



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

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jakub Král

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jitka Mohelníková, Ph.D.

BRNO 2022

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

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

Rukopis dizertační práce je uložen v archivu pedagogicko-vědeckého oddělení Fakulty stavební VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

© Ing. Jakub Král, 2022

OBSAH

1	ÚVOD	2
1.1	Téma dizertační práce	2
1.2	Cíle dizertační práce	2
2	SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU	3
2.1	Sluneční záření a jeho obecné vlastnosti.....	3
2.2	Denní světlo.....	3
2.3	Tubusové světlovody	3
2.3.1	Vývoj technologie tubusových světlovodů.....	3
2.3.2	Tubusové světlovody a normativní požadavky	4
3	ZVOLENÉ METODY PRÁCE	4
3.1	Experimentální část	4
3.1.1	Měření osvětlenosti.....	4
3.1.2	Měření spektrální odraznosti	6
3.1.3	Hodnocení spektrální propustnosti světlovodů.....	7
3.2	Počítačové simulace a hodnocení světelné účinnosti světlovodu.....	7
4	VÝSLEDKY	8
4.1	Výsledky měření osvětlenosti.....	8
4.2	Výsledky měření spektrální odraznosti	9
4.3	Vyhodnocení spektrální propustnosti světlovodů	11
4.4	Výsledky počítačových simulací	11
4.4.1	Porovnání dat z měření a simulací a analýza výsledků	11
4.4.2	HOLIGILM simulace pro podmínky jasné a zatažené oblohy	13
4.4.3	Vyhodnocení účinnosti světlovodu.....	14
4.4.4	Zhodnocení energetické účinnosti tubusového světlovodu	18
4.4.5	Diskuse vyhodnocených výsledků.....	20
5	ZÁVĚR	21
5.1	Shrnutí dosažených výsledků	21
5.2	Přínos dizertační práce.....	22
5.3	Doporučení a Navazující cíle.....	23
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	24
7	CURRICULUM VITAE	27
8	VYBRANÉ AUTOROVY PUBLIKACE	28
9	ABSTRAKT	29

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 výrobcí 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 světlovody 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.

2 SHRnutí 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.

2.2 DENNÍ SVĚTLO

Žijeme v době, kdy převážnou část našich životů trávíme uvnitř budov. Jedním ze způsobů, jak si udržet kontakt s venkovním prostředím 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 [3]. Je známo, že větší vystavení přirozenému světlu snižuje účinky této poruchy.

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. Tubusové světlovody jsou často využívány jako doplňkové osvětlovací prvky pro obytné místnosti. Velmi časté využití je i ve školských a zdravotnických zařízeních.

2.3.1 Vývoj technologie tubusových světlovodů

První pokusy přenést světlo na delší vzdálenosti jsou datovány do starověkého Egypta [4]. Další významný posun nastal až v 19. a 20. století, kdy se nezávisle na sobě pokusili o potrubní vedení světla vědci z různých částí světa [5–8]. V roce 1980 byla zahájena sériová výroba v SSSR a dochází k širšímu užití tubusových světlovodů v budovách [9]. S tvarem průřezu tubusů se experimentovalo [10, 11], ale pozdější vývoj a komercializace se soustředily téměř výhradně na kruhový průřez. Snaha o zlepšení výkonu světlovodů vedla mimo jiné k vývoji laserem řezaných panelů (tzv. Laser Cut Panels – LCP) umístovaných na nástřešní kolektor [12].

V roce 2000 byl poprvé publikován matematický model popisující výkon světlovodu [13]. V dalších letech byly publikovány práce zabývající se výsledky monitorování praktických

instalací [14–18]. Na principy matematického modelu výkonu světlovodu navázal vývoj počítačového softwaru HOLIGILM a jeho postupné rozšíření [19–21]. V roce 2019 byl představen přehled výzkumů a vývoje základních slunečních systémů budov za posledních padesát let [22]. Vědecké práce z posledních let se zabývaly optimalizací laserem řezaných panelů za účelem zvýšení výstupního výkonu světlovodu [23] a analýzou výkonu tubusového světlovodu v závislosti na různé tvary světelného kolektoru [24].

2.3.2 Tubusové světlovody a normativní požadavky

V roce 2019 byla do českých technických norem zavedena nová evropská norma ČSN EN 17037 Denní osvětlení budov [28]. 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 [26].

V nové evropské normě ČSN EN 17037 není uveden požadavek na osvětlenost světlovody. 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.

3 ZVOLENÉ METODY PRÁCE

3.1 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1.1 Měření osvětlenosti

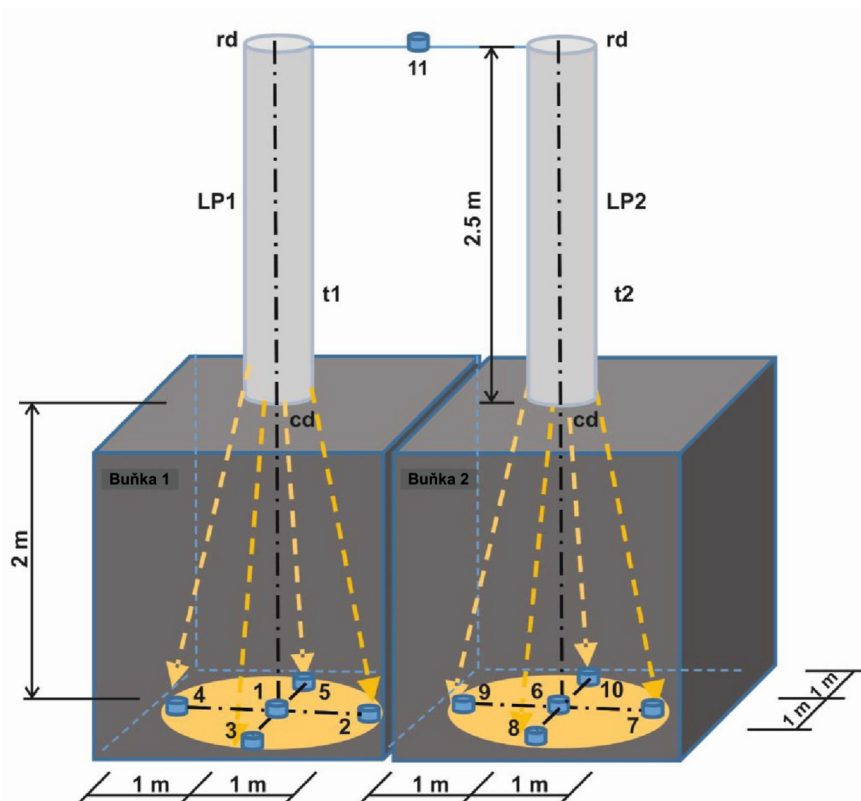
Předmětem světelných měření byly dvě podobné soustavy tubusových světlovodů (dále jen LP, jako zkratka anglického názvu Light pipe). Měření probíhalo v mírných klimatických podmínkách v lokalitě Ostrovačice, okres Brno – venkov, Česká republika (zeměpisná šířka 49°12'39.08" severní šířky, zeměpisná délka 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 rozdělený na dvě buňky se světlovody 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. Celkově jedenáct luxmetrů (2×5 interních a 1 externí) bylo propojeným elektrickým obvodem do sítě.



Obr. 3.2 Schéma instalace luxmetrů pod světlovody

Zkratky: rd – střešní kopule, cd – stropní difuzor, t1 a t2 – trubky 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. 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. 3.2, 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.



Obr. 3.3 Instalace měřícího zařízení – buňka 1 a buňka 2 odděleny vnitřní příčkou s dveřmi

3.1.2 Měření spektrální odraznosti

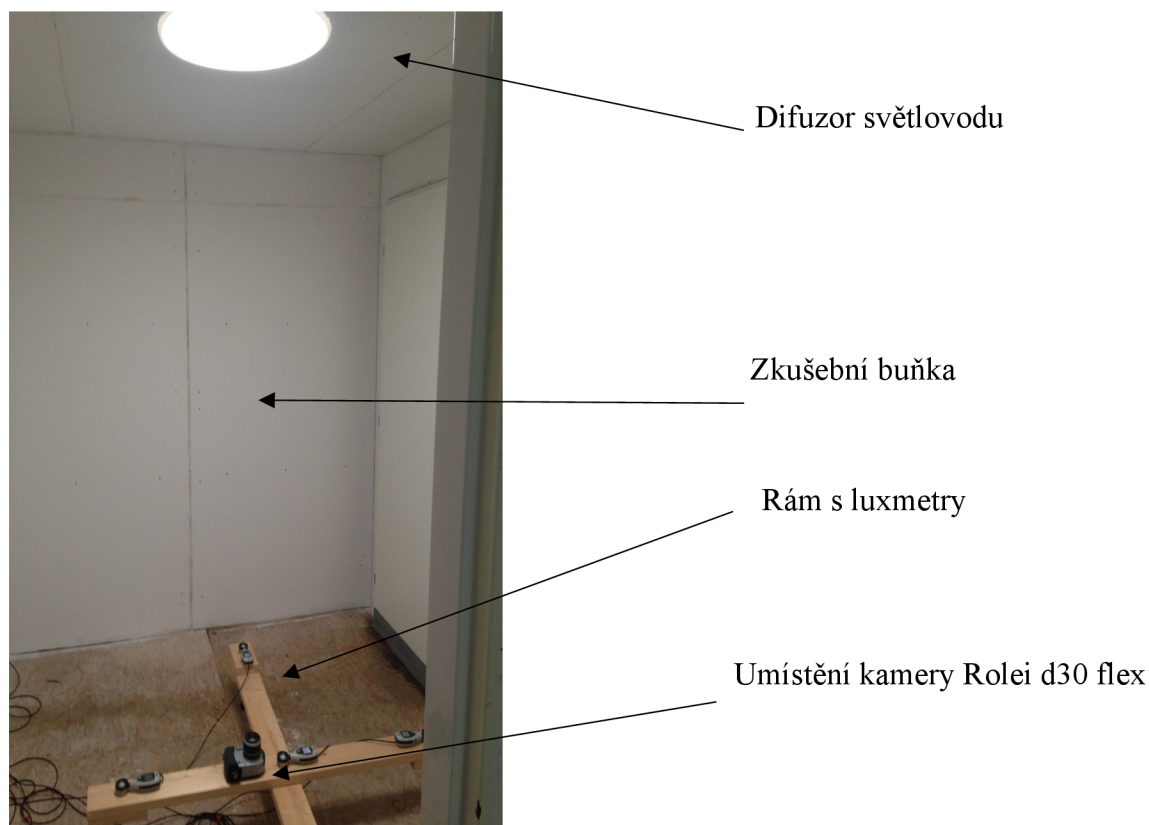
Účinnost světlovodů závisí především na odraznosti tubusů. Tubusy světlovodů mají vnitřní vysoce reflexní povrchové povlaky. Vnitřní povrchy tubusů LP1 a LP2 byly pokryty různými povrchovými úpravami. Tyto úpravy nebyly známé, proto byla provedena spektrální analýza za účelem zjištění vlivu odraznosti 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

¹ Zkratka LP vznikla z anglického výrazu Light pipe

centru AdMaS VUT v Brně. Dosažené výsledky odraznosti ve viditelném rozsahu byly použity jako vstupní data v simulacích denního osvětlení světlovody.

3.1.3 Hodnocení spektrální propustnosti světlovodů

Bylo provedeno monitorování a vyhodnocení spektrální světelné propustnosti světlovody 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 světlovodu LP1 a následně v blízkosti osy světlovodu LP2, Obr 3.4.



Obr. 3.4 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 světlovody 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 světlovody LP1 a LP2 bylo simulováno pomocí softwaru HOLIGILM [20]. Dosažené výstupy představují distribuci osvětlení na vodorovné referenční rovině 2 m pod světlovody 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 světlovodů: 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 světlovodů byla použita $\rho = 0,97$ pro instalaci LP1 a $\rho = 0,94$ pro LP2, jak vyplývá ze spektrálních měření (kapitola 4.2)

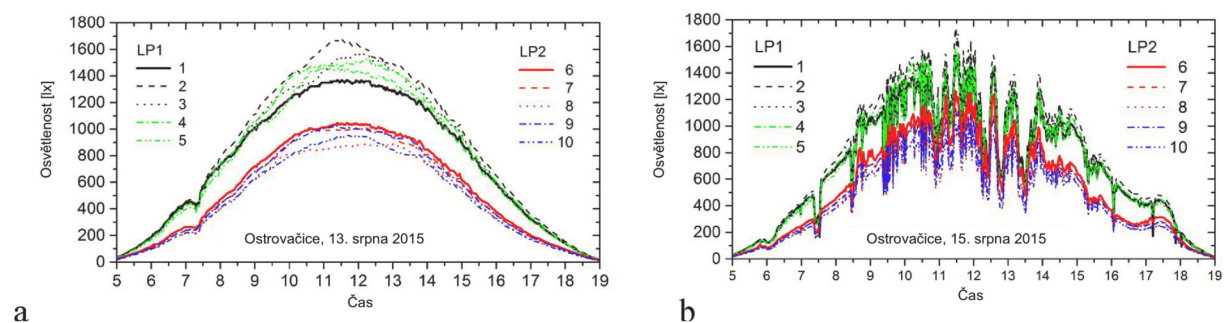
Byly také provedeny simulace denního světla HOLIGILM pro několik variant rozměrů přímých tubusových světlovodů a různých odraznosti, pro podmínky jasné a zatažené oblohy, podle [27]. Pro simulace denního osvětlení byly vybrány rozměry a konfigurace přímých tubusových světlovodů, které jsou běžně používané 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 $\tau = 0,75$.

4 VÝSLEDKY

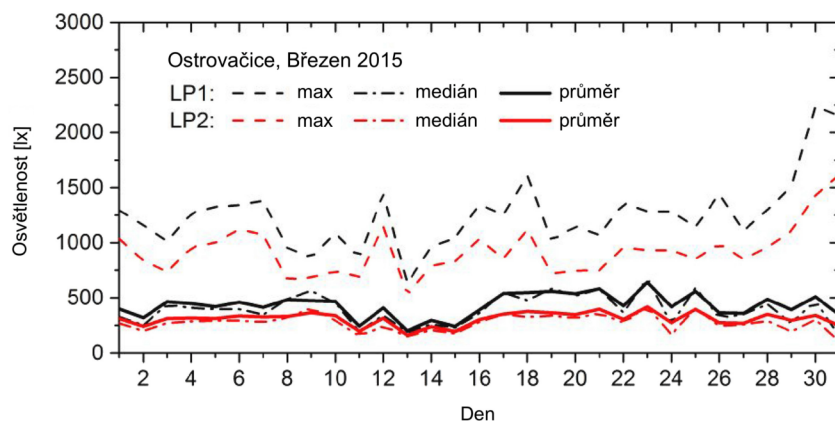
4.1 VÝSLEDKY MĚŘENÍ OSVĚTLENOSTI

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 světlovedy LP1 a LP2. Sensory 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.

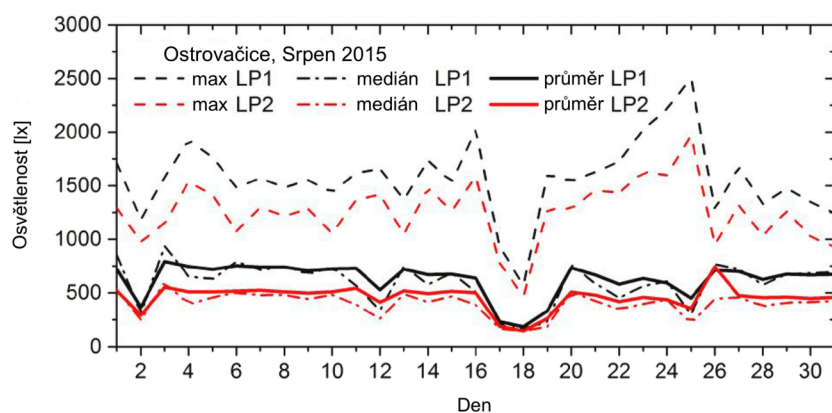
Příklady denních profilů osvětlenosti ze dne 13. srpna 2015 pro stav jasné oblohy a z 15. srpna 2015 dokumentující dynamické změny denní osvětlenosti jsou uvedeny v grafech na Obr. 4.1a a Obr. 4.1 b. Oba grafy ukazují rozdíly v úrovních osvětlení mezi dvěma podobnými světlovedy. Je zřejmé, že světloved LP1 poskytuje vyšší úrovně osvětlení u všech senzorů ve srovnání se světlovedem 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 Hodnoty denní osvětlenosti – maximální, medián, průměr, zaznamenané v březnu 2015, jako vzorek dat naměřených během přechodného ročního období



Obr. 4.3 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. 4.2 pro jarní měsíc březen a na Obr. 4.3 pro letní čas 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.

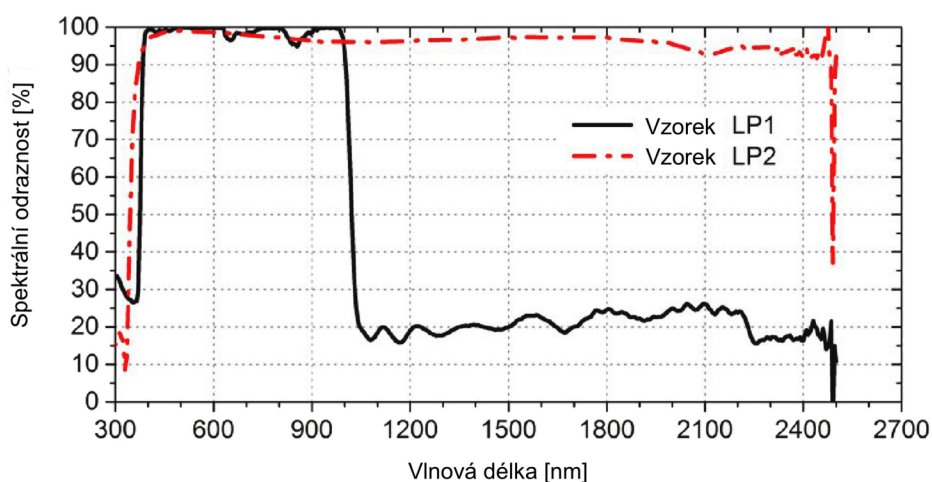
4.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍ ODRAZNOSTI

Spektrální měření v rozsahu optického záření byla prováděna v souladu s normovými doporučeními [28]. 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

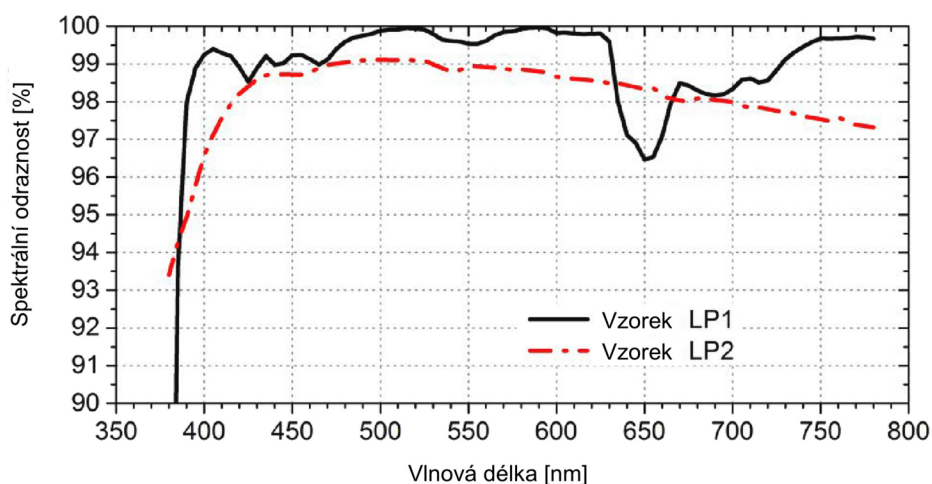
nebude během slunečných letních dnů zdrojem přehřátí v interiéru. Propustnost záření vzorku LP2 je ve zmíněném spektrálním rozsahu dostatečně vysoká, jak je dokumentováno na Obr. 4.4.

Na druhou stranu má vzorek LP1 vyšší odraznost světla ve viditelném spektru ve spektrálním rozsahu mezi 380 a 780 nm (obr 4.5). Hodnoty odraznosti [29] 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 světlovodů 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 činitele odrazu byly použity v simulacích denního osvětlení pomocí programu HOLIGILM.



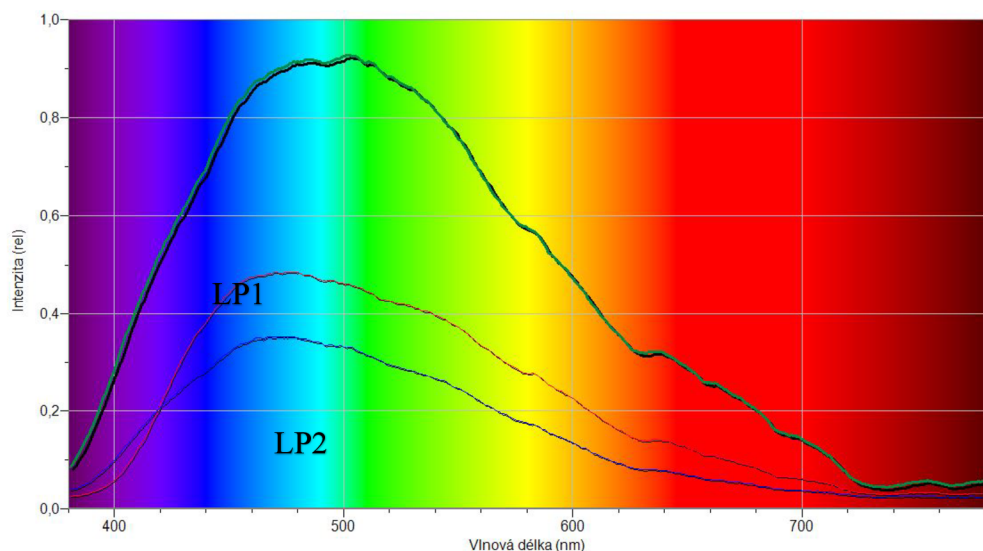
Obr. 4.4 Hodnoty spektrální odraznosti na vnitřním povrchu světlovodného tubusu v rozsahu vlnových délek 300-2500 nm.



Obr. 4.5 Hodnoty spektrální odraznosti na vnitřním povrchu tubusu ve viditelném spektru 380-780 nm.

4.3 VYHODNOCENÍ SPEKTRÁLNÍ PROPUSTNOSTI SVĚTLOVODŮ

Výsledky vyhodnocení spektrální propustnosti světla pomocí spektrometru instalovaného pod posuzovanými světlovedy jsou uvedeny pro oba typy světlovedů LP1 a LP2 na Obr. 4.6.

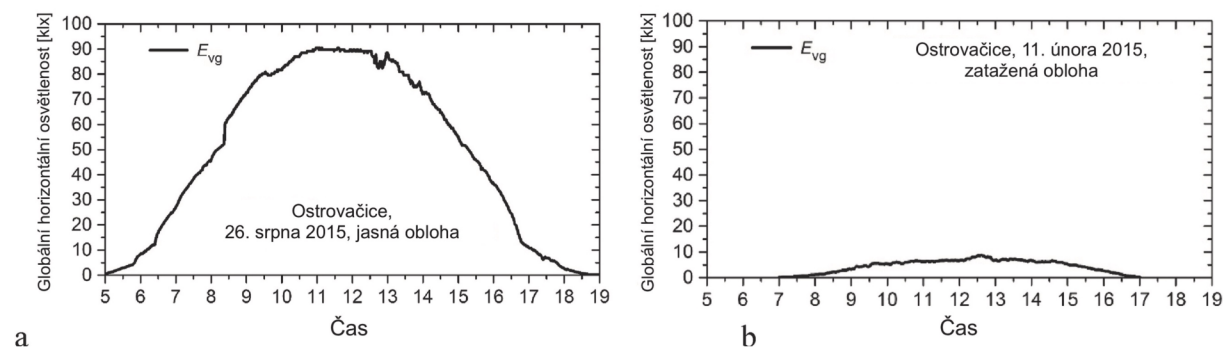


Obr. 4.6 Spektrální propustnost světlovedu LP1 a LP2 v porovnání se spektrem denního osvětlení

4.4 VÝSLEDKY POČÍTAČOVÝCH SIMULACÍ

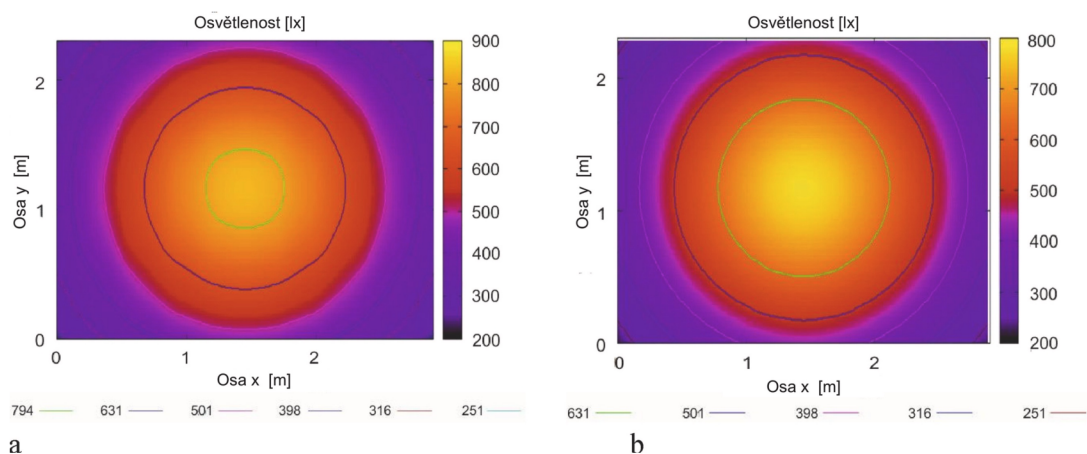
4.4.1 Porovnání dat z měření a simulací a analýza výsledků

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. 4.7).

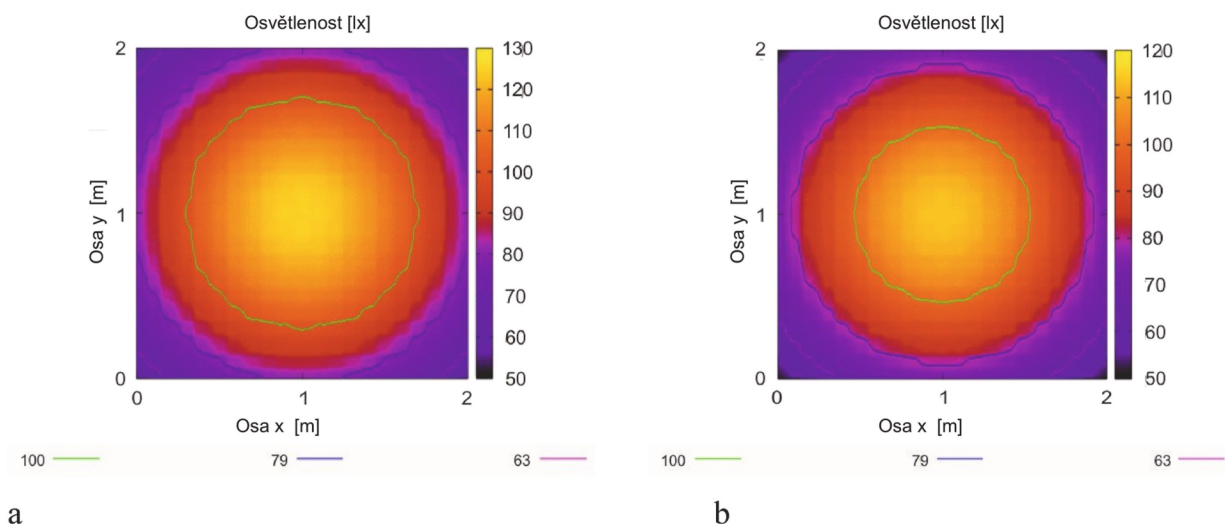


Obr. 4.7 Hodnoty globální horizontální osvětlenosti: a) jasná obloha, měřeno 26.srpna 2015 b) zatažená obloha, měřeno 11. února 2015

Naměřené hodnoty byly porovnány s výsledky počítačových simulací v programu HOLIGILM. Grafické rozložení izochar osvětlenosti na vodorovné referenční rovině jsou zobrazeny na Obr. 4.8 a Obr. 4.9, 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. 4.8 HOLIGILM simulace osvětlenosti na referenční rovině, 26. srpna 2015 ve 12:00hod., jasná obloha a) Tubusový světlovd LP1 b) Tubusový světlovd LP2



Obr. 4.9 HOLIGILM simulace osvětlenosti na referenční rovině, 11. února 2015 ve 12:00hod., zatažená obloha a) Tubusový světlovd LP1 b) Tubusový světlovd LP2

Tab. 4.1 Měření 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 Měření 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). 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

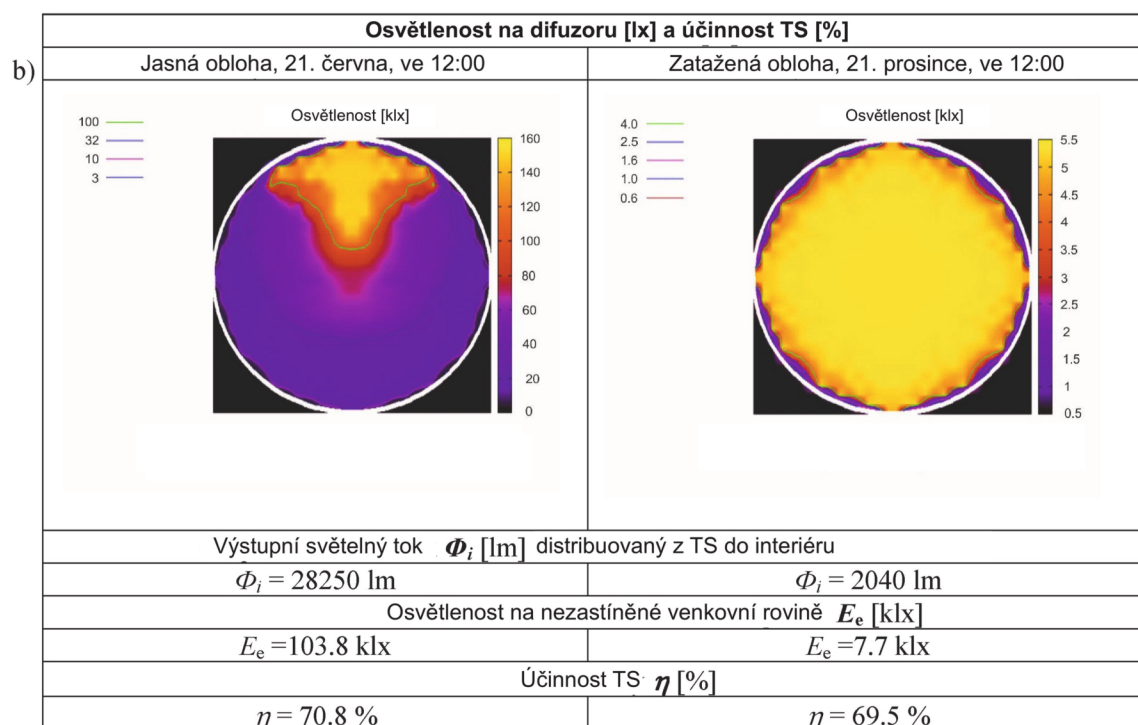
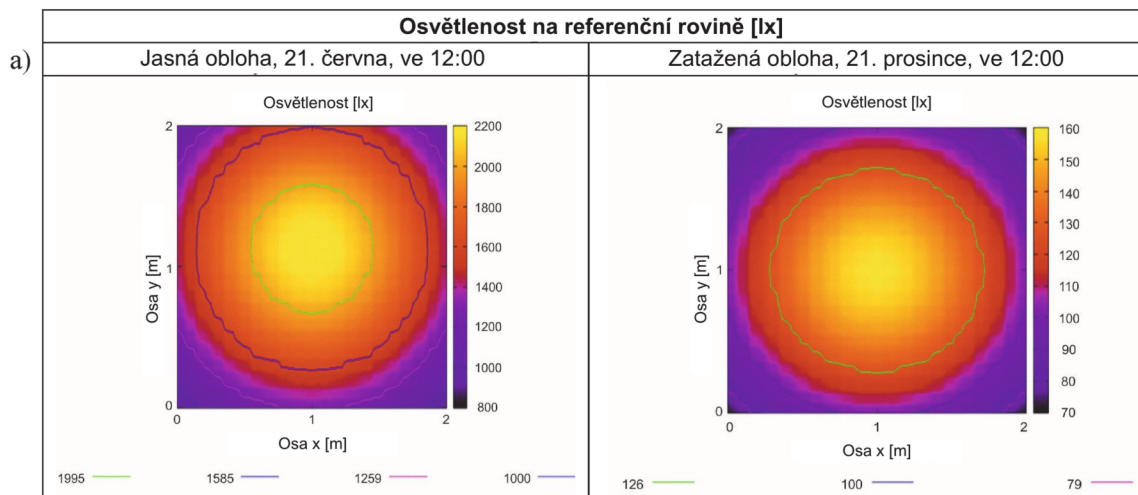
Velké sezónní rozdíly v hodnotách osvětlenosti jsou z uvedených údajů patrné. Existují vyšší hodnoty osvětlenosti a jejich fluktuace pro podmínky jasné oblohy ve srovnání s nízkou distribucí osvětlení pro difúzní osvětlení ve dnech zatažené oblohy. Obecně je procento výkyvů v hodnotách osvětlenosti asi 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. 4.10b pro podmínky jasné oblohy. LP2 má zjevně nižší odraznost a z tohoto důvodu se světlo nižší intenzitou rozptyluje rovnoměrněji na difuzoru.

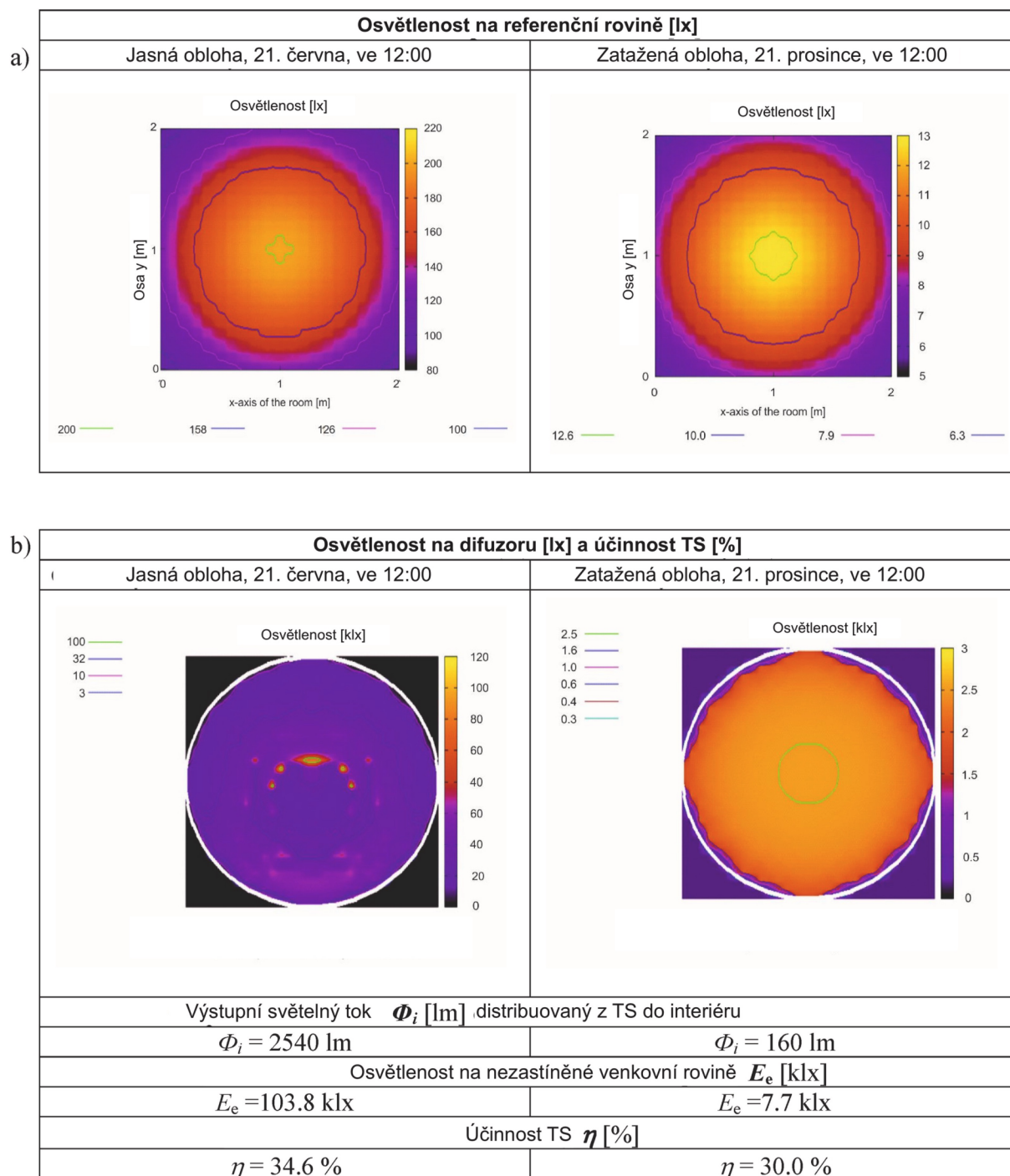
Na druhou stranu se simulace HOLIGILM provádějí pro ideální lambertovský difuzor, a proto simulované hodnoty vykazují symetričtější a rovnoměrnější rozdělení v referenční rovině, což je také uvedeno na obr 4.10a, 4.11a. To vysvětluje, proč se rozdíly mezi naměřenými a simulovanými hodnotami více či méně 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 $D = 0,7\text{ m}$ a nejkratší délkou $L = 1\text{ m}$ a na Obr. 4.12 pro tubusový světlovod s průměrem $D = 0,3\text{ m}$ a nejdelší délkou $L = 3\text{ m}$. Pro zjištění limitů účinnosti tubusového světlovodu byla v prvním případě uvažována odraznost 0,98 a ve druhém případě odraznost tubusu 0,90.



Obr. 4.10 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 [klx] na difuzoru světlovodu určené pro výstupní světelný tok Φ_i [lm], venkovní horizontální osvětlenost E_e [klx] a účinnost světlovodu η [%].



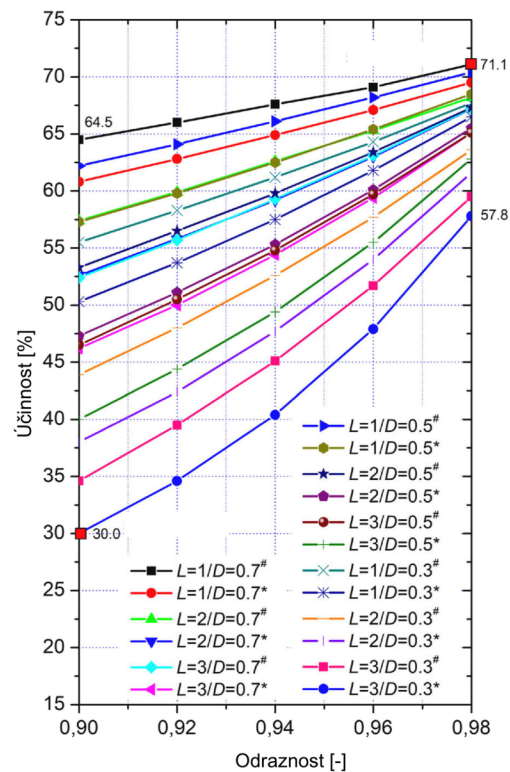
Obr. 4.11 HOLIGILM simulace osvětlenosti pro světlovod o průměru $D = 0.3$ m, délka $L = 3$ m a odraznost tubusu $\rho = 0.90$; simulováno pro jasnou oblohu (21. června, 12:00) a zataženou oblohu (21. prosince, 12:00) a) Osvětlenost [lx] na referenční rovině 2 m pod světlovodem b) Osvětlenost [lx] na difuzoru světlovodu určené pro výstupní světelný tok Φ_i [lm], venkovní horizontální osvětlenost E_e [klx] a účinnost světlovodu η [%].

Horní části Obr. 4.10 a 4.11, 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. 4.10 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 $L = 1$ m, 2 m a 3 m, průměr $D = 0,3$ m, 0,5 m a 0,7 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. 4.12. Tento graf lze považovat za jednoduchý nástroj pro navrhování rozměrů přímých světlovodů. Nejvyšší účinnost světlovodu (Obr. 4.12) je uvedena v pravém horním rohu hodnotou 71,1 % pro světlovod největšího průměru, zatímco nejnižší účinnost zobrazená v levé dolní části Obr. 4.12 hodnotou 30 %, která platí pro nejdelší světlovod o nejmenším průměru a nejnižší odraznosti.

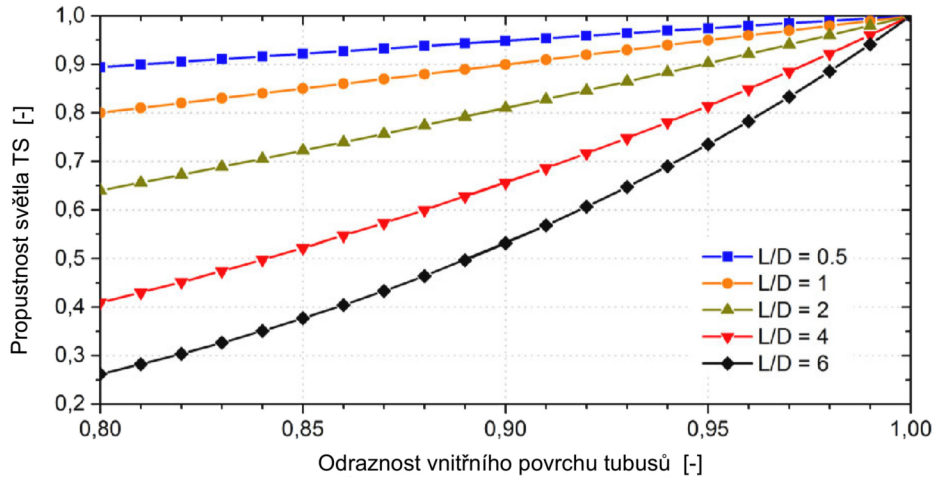


Obr. 4.12 Účinnost tubusového světlovodu v závislosti na odraznosti tubusu

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 [10]. 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 [26]. Výsledky tohoto vyhodnocení jsou uvedeny na obr 4.13 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. 4.13 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. 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 světlovody. Hodnocení se provedlo na základě stanovené účinnosti světlovodu. Tato účinnost je ovlivněna, mimo jiné, také podmínkami oblohy, jak je patrné z výsledků na Obr. 4.12 a 4.13.

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.

Z obrázku 4.14 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 [30].

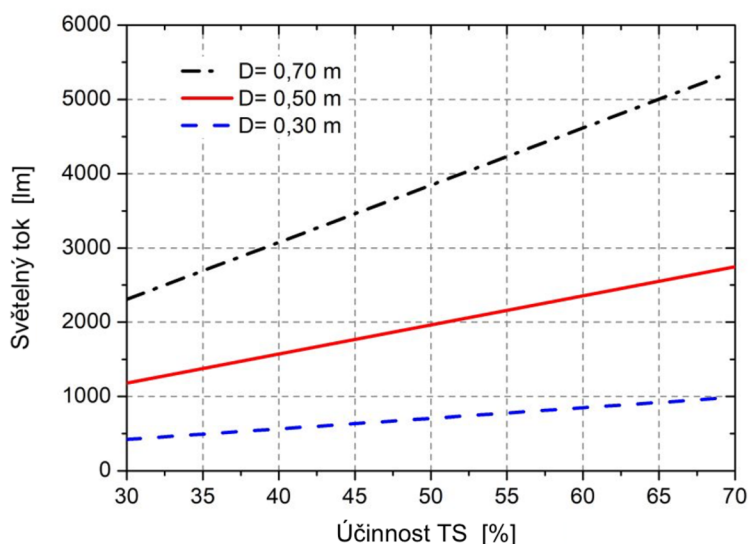
Existuje řada umělých světelných zdrojů, které lze použít pro analýzu energetických úspor světlovody. LED zdroje umělého světla jsou v praxi velmi využívány. Jako příklad bylo zvoleno LED svítidlo s měrným světelným výkonem $e = 117 \text{ lm/W}$ a příkonem $P = 13 \text{ W}$ (odpovídá 100 W žárovce). 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:

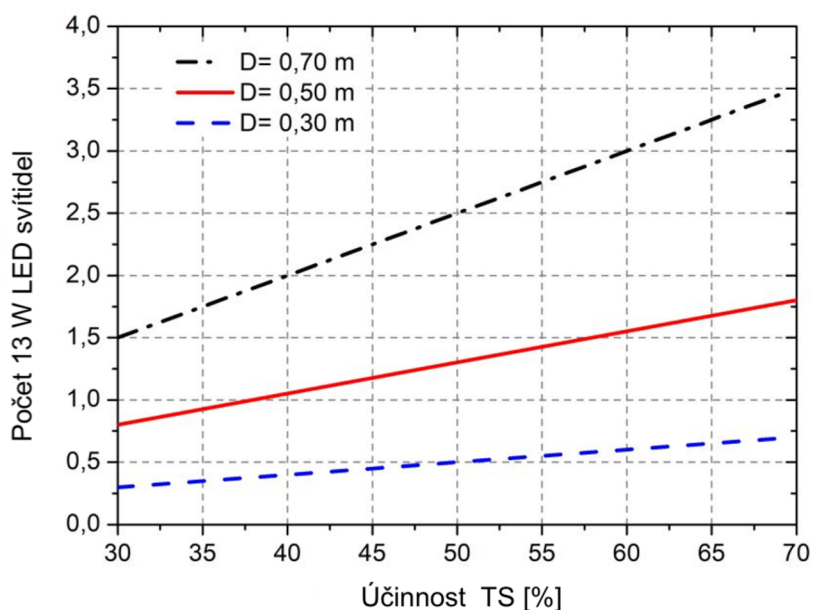
$$E_n = 2 \times 13 \text{ W} \times 10 \text{ hodin/den} \times 365 \text{ dni/rok} = 94,9 \text{ kWh za rok.}$$

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

Na obrázku 4.14 je uveden graf závislosti světelné účinnosti tubusového světlovodu na světelném toku procházejícím světlovodem. Na následujícím obrázku 4.15 je graf zohledňující počet LED zdrojů, které jsou ekvivalentní tubusovým světlovodům o daném průměru a účinnosti.



Obr. 4.14 Světelný tok Φ vstupující do interiéru z tubusového světlovodu (TS),
D – průměr tubusu světlovodu.



Obr. 4.15 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 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 osvětleností 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 tubusu 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 [31, 32]. 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.

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. Poznátky 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 světlovody 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] 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
- [4] DARULA, S., R. KITTLER, M. KOCIFAJ, J. PLCH, J. MOHELNÍKOVÁ a F. VAJKAY. *Osvětlování světlovody*. Grada Publishing, a.s., 2009. ISBN 978-80-247-2459-1.
- [5] ČIKOLEV, V. N. Kanalizacija električeskogo světa . *Električestvo*. 1880, 168.
- [6] MOLERA, E. J. a J.C. CEBRIAN. Molera & Cebrian's system of electric lighting. *American Industries*. 1879.
- [7] 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>
- [8] 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>
- [9] *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-duty-ch-svetlovodu-1-cast--16956>
- [10] ZASTROW, A. a V. WITTEWER. 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
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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
- [14] CALLOW, J. M. *Daylighting Using Tubular Light Guide Systems*. Nottingham, 2003. University of Nottingham.
- [15] MARWAE, 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

- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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
- [20] 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
- [21] 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
- [22] 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
- [23] 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
- [24] 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
- [25] ČSN EN 17037. *Denní osvětlení budov*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [26] CIE 173:2012, *Tubular Daylight Guidance Systems*, Commission Internationale de L'Eclairage, 2012.
- [27] ISO 15469:2004. *Spatial distribution of daylight — CIE standard general sky*, CIE International Commission on Illumination, 2004.
- [28] ASTM G173-03(2012). *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface*, ASTM International, 2012.
- [29] 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.
- [30] 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

- [31] 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
- [32] 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

7 CURRICULUM VITAE

Osobní údaje

Jméno a příjmení: Jakub Král
Narozen: 14.03.1985 ve Frýdku-Místku
Bydliště: Fryčovice 776, 739 45 Fryčovice
Telefon / Email: +420 606 672 102 / fm.jakubkral@gmail.com

Vzdělání

2013 – dosud Doktorské studium v oboru Stavební inženýrství – Pozemní stavby
VUT Brno, Fakulta stavební
Téma: Hodnocení vlivu tubusových světlovodů na denní osvětlení budov.

2008 – 2011 Ing. – Obor: Konstrukce staveb
VŠB – TU Ostrava, Fakulta stavební

2004 – 2008 Bc. – Obor: Architektura a stavitelství
VŠB – TU Ostrava, Fakulta stavební

1998 – 2004 Gymnasium P. Bezruče, Frýdek-Místek

Pracovní zkušenosti

2016 – dosud Ředitel divize TOPSAFE (Topwet s.r.o.)
Samostatné řízení jedné z firemních divizí, vedení týmu asi 25-ti osob

2011 – 2016 Obchodně technický manažer (Topwet s.r.o.)
Budování značky s novými produkty na trhu, kontrola technických řešení

2010 – 2011 Projektant (Dekprojekt s.r.o.)
Zpracování projektů a posudků se zaměřením na střešní pláště a izolace

8 VYBRANÉ AUTOROVY PUBLIKACE

KRÁL, J. Daylight in buildings based on tubular light guides. *Przeгляд Elektrotechniczny*. 2022. ISSN 0033-2097. Po recenzi přijato a v tisku

DARULA, S., J. MOHELNÍKOVÁ a J. KRÁL. Daylight in buildings based on tubular light guides. *Journal of Building Engineering*. 2021, **44**(102608). ISSN 2352-7102. Dostupné z: doi:10.1016/j.job.2021.102608

PLCH, J., J. MOHELNÍKOVÁ a J. KRÁL. Light Pipe Comparative Measurement. In: *Proceedings of the 21st International Conference LIGHT SVĚTLO 2015*. Brno: FEKT VUT, 2015, s. 233-235. ISBN 978-80-214-5244-2.

KRÁL, J., L. BROTAS a J. MOHELNÍKOVÁ. Lightpipe illuminance measurements. In: *Proceedings of Master Conference People and Buildings 2015*. Londýn: Network for Comfort and Energy Use in Buildings (NCEUB), 2015, s. 9-13. ISBN 978-0-9928957-2-3.

9 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.

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.