



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

### ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## VLIV PARAMETRŮ NA EFEKTIVITU PŘENOSU SVĚTLA DUTÝM SVĚTLOVODEM

INFLUENCE OF PARAMETERS ON THE EFFICIENCY OF TRANSMISSION OF LIGHT THROUGH A  
SKYLIGHT

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

#### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Tioka

#### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Nekvapil

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**  
Ústav elektroenergetiky

**Student:** Jakub Tioka

**ID:** 195453

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### **Vliv parametrů na efektivitu přenosu světla dutým světlovodem**

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte průzkum trhu a vyberte nejrozšířenější typy světlovodů.
2. Stanovte kritéria simulací světlovodů v softwaru TracePro a parametry světlovodů, které budete měnit.
3. Proveďte simulace jednotlivých řešení a z výsledků vytvořte katalog. Zhodnoťte výsledky a pokuste se v datech najít vzájemné korelace.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle doporučení vedoucího práce

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 27.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Nekvapil

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Bibliografická citace práce:**

TIOKA, Jakub. *Vliv parametrů na efektivitu přenosu světla dutým světlovodem* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119167>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jan Nekvapil.

## **ABSTRAKT**

Text práce se zabývá možnostmi osvětlování interiérů budov denním světlem při použití vertikálních dutých světlovodů. Je sledován vliv parametrů na změnu přenosových vlastností světlovodů. Výsledky simulací kvantifikují účinnost přenosu světla různých provedení světlovodů a poukazují na parametry, které ji podstatně ovlivňují. Práce umožňuje uživatelům i firmám jednodušší volbu parametrů komponent světlovodů pro získání efektivnějšího přenosu světla dle jejich požadavků.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** dutý světlovod; parametry dutého světlovodu; osvětlování denním světlem; osvětlovací systémy; odrazivost materiálů;



## **ABSTRACT**

This thesis deals with the possibilities of daylight illumination in building interiors using vertical hollow light guides. The influence of parameters on the change of transmission properties of skylights is observed. The results of the simulations quantify the light transmission efficiency of different composition of hollow light guides and refer to parameters that significantly affect light transmission. The result of the thesis allows users and companies to simpler select the parameters of light guide components to get the optimal variant according to their requirements.

**KEYWORDS:** hollow light guide; parameters of hollow light guide; lighting the buildings with sunlight; skylight; reflectivity of materials

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>2 CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>12</b>
<b>3 FOTOMETRICKÉ VELIČINY .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 ÚVOD.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 VELIČINY .....</b>	<b>13</b>
3.2.1 SVĚTELNÝ TOK $\Phi$ .....	13
3.2.2 MĚRNÝ VÝKON $H$ .....	13
3.2.3 PROSTOROVÝ ÚHEL $\Omega$ .....	13
3.2.4 SVÍTIVOST $I$ .....	14
3.2.5 OSVĚTLENOST $E$ .....	14
3.2.6 JAS $L$ .....	14
3.2.7 INDEX PODÁNÍ BAREV $R_A$ .....	15
3.2.8 TEPLOTA CHROMATIČNOSTI $T_K$ .....	15
3.2.9 TYPY OBLOH.....	15
<b>4 OSVĚTLOVÁNÍ BUDOV .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1 ÚVOD.....</b>	<b>17</b>
<b>4.2 OSVĚTLOVÁNÍ PRACOVIŠŤ A OBYTNÉHO PROSTŘEDÍ.....</b>	<b>17</b>
4.2.1 ZÁSADY DOBRÉHO VIDĚNÍ.....	17
4.2.2 OSVĚTLOVÁNÍ PRACOVIŠŤ.....	17
4.2.3 OSVĚTLOVÁNÍ OBYTNÉHO PROSTŘEDÍ .....	18
<b>4.3 OSVĚTLOVÁNÍ DENNÍM SVĚTLEM.....</b>	<b>18</b>
4.3.1 POMĚRNÁ POZOROVACÍ VZDÁLENOST $P_V$ .....	18
4.3.2 ČINITEL DENNÍ OSVĚTLENOSTI $D$ .....	19
4.3.3 OSVĚTLENOST VENKOVNÍ VODOROVNÉ NEZACLONĚNÉ ROVINY $E_H$ .....	19
<b>5 OSVĚTLOVACÍ SYSTÉMY .....</b>	<b>20</b>
<b>5.1 ÚVOD.....</b>	<b>20</b>
<b>5.2 ROZDĚLENÍ DENNÍCH OSVĚTLOVACÍCH SYSTÉMŮ .....</b>	<b>20</b>
<b>5.3 VYUŽITÍ SVĚTLOVODNÝCH SYSTÉMŮ .....</b>	<b>20</b>
5.3.1 POŽADAVKY NA SVĚTLOVODNÉ SYSTÉMY .....	21
<b>5.4 SVĚTLOVODNÉ SYSTÉMY.....</b>	<b>21</b>
5.4.1 HELIOSTATY .....	21
5.4.2 HORIZONTÁLNÍ SVĚTLOVODY .....	21
5.4.3 VERTIKÁLNÍ SVĚTLOVOD.....	22
<b>6 VÝSLEDEK PRŮZKUMU TRHU SE SVĚTLOVODY .....</b>	<b>24</b>
<b>6.1 ÚVOD.....</b>	<b>24</b>
<b>6.2 NABÍDKA SVĚTLOVODŮ .....</b>	<b>24</b>

---

<b>6.3 ZHODNOCENÍ.....</b>	<b>24</b>
6.3.1 STŘEŠNÍ KOPULE.....	24
6.3.2 SVĚTLOVODNÝ TUBUS.....	24
6.3.3 DIFUZOR.....	25
<b>7 METODY A POSTUPY ŘEŠENÍ.....</b>	<b>26</b>
7.1 ÚVOD.....	26
7.2 MĚŘENÍ.....	26
7.3 SIMULACE.....	26
<b>8 PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>27</b>
<b>8.1 PŘEDPOKLADY O SIMULACÍCH.....</b>	<b>27</b>
8.1.1 ÚČINNOST SVĚTLOVODU.....	27
8.1.2 DEFINOVÁNÍ PARAMETRŮ SLUNCE A OBLOHY.....	27
8.1.3 SVĚTELNÝ TOK SVĚTLOVODU $\Phi_D$ .....	31
<b>8.2 SIMULACE TRACEPRO.....</b>	<b>32</b>
8.2.1 ZÁKLADNÍ SVĚTLOVOD.....	32
8.2.2 MODEL OBLOHY.....	32
8.2.3 VÝSLEDKY SIMULACE - TVAR KOPULE.....	32
8.2.4 VÝSLEDKY SIMULACE – MATERIÁL KOPULE.....	36
8.2.5 VÝSLEDKY SIMULACE – TLOUŠŤKA KOPULE.....	36
8.2.6 VÝSLEDKY SIMULACE – ODRAZIVÝ MATERIÁL TUBUSU.....	36
8.2.7 VÝSLEDKY SIMULACE - DÉLKA A PRŮMĚR SVĚTLOVODU.....	37
8.2.8 VÝSLEDKY SIMULACE - TVAR TUBUSU.....	38
8.2.9 VÝSLEDKY SIMULACE – OBLOHA.....	40
<b>9 ZÁVĚR.....</b>	<b>41</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>42</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>44</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 - Grafická definice steradiánu [3]</i> .....	13
<i>Obrázek 2 - Pokles osvětlenosti při změně vzdálenosti [3]</i> .....	14
<i>Obrázek 3 - Teplota chromatičnosti [15]</i> .....	15
<i>Obrázek 4 - Jasná obloha [10]</i> .....	16
<i>Obrázek 5 - Zatažená obloha [10]</i> .....	16
<i>Obrázek 6 – Osvětlenost <math>E_h</math> vodorovné nestíněné roviny v průběhu dne i roku [17]</i> .....	19
<i>Obrázek 7- Rodinný dům osvětlený pomocí světlovodů [9]</i> .....	20
<i>Obrázek 8 - Heliostat [12]</i> .....	21
<i>Obrázek 9 - Horizontální světlovod [13]</i> .....	22
<i>Obrázek 10 - Tvary střešních kopulí [16]</i> .....	22
<i>Obrázek 11 - Vertikální světlovod [22]</i> .....	22
<i>Obrázek 12 - Světlovodný tubus [20]</i> .....	23
<i>Obrázek 13 - Stropní difuzor [20]</i> .....	23
<i>Obrázek 14 - Změna výšky slunce [26]</i> .....	28
<i>Obrázek 15 - TracePro model oblohy</i> .....	32
<i>Obrázek 16- TracePro světlovod s kopulí polokoule</i> .....	33
<i>Obrázek 17 - TracePro světlovod s rovným sklem</i> .....	33
<i>Obrázek 18 - TracePro světlovod s kopulí ve tvaru jehlanu</i> .....	33
<i>Obrázek 19 - TracePro světlovod se sníženou kopulí</i> .....	34
<i>Obrázek 20 - TracePro světlovod s vroubkovanou kopulí</i> .....	34
<i>Obrázek 21 - TracePro světlovod s kopulí se zrcátkem</i> .....	34
<i>Obrázek 22 - Graf účinnost kopulí světlovodu</i> .....	35
<i>Obrázek 23 - TracePro přímé šíření paprsků světlovodem</i> .....	37
<i>Obrázek 24 - TracePro náhodné šíření paprsků světlovodem</i> .....	37
<i>Obrázek 25 – TracePro čtvercové šíření paprsků světlovodem</i> .....	37
<i>Obrázek 26 - Graf účinnosti světlovodného tubusu</i> .....	37
<i>Obrázek 27- TracePro rovnoměrné rozložení světelného toku na difuzoru</i> .....	39
<i>Obrázek 28- TracePro nerovnoměrné rozložení světelného toku na difuzoru</i> .....	39
<i>Obrázek 31 - Autodesk Invertor – koleno 90°</i> .....	40
<i>Obrázek 29 - Autodesk Invertor – koleno 60°</i> .....	40
<i>Obrázek 30- Autodesk Invertor - koleno 30°</i> .....	40
<i>Obrázek 32- Obloha TracePro</i> .....	40

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1 - Příklady požadavků osvětlení .....</i>	<i>17</i>
<i>Tabulka 2 - Třídy zrakové činnosti (ČSN 73 0580-1) [17] .....</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 3 - světelný činitel zákalu atmosféry [1] .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 4 - teoretická osvětlenost dne 1. května při jasné obloze s nízkým zákalem .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 5 – další teoretické příklady denní osvětlenosti .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 6 - nasimulované hodnoty účinnosti světlovodu v závislosti na materiálu kopule a denní době .....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 7 - nasimulované hodnoty účinnosti světlovodu v závislosti na materiálu světlovodu ....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 8 - Trh se světlovody.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 9 - účinnost světlovodu dle tvaru kopuli.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 10 - účinnost světlovodu dle délky a průměru světlovodného tubusu .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 11 - účinnost světlovodu dle tloušťky kopule.....</i>	<i>46</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

<i>značka</i>	<i>veličina</i>	<i>Jednotka</i>
$\Phi$	<i>světelný tok</i>	<i>lm</i>
$\eta$	<i>měrný výkon</i>	<i>lm×W<sup>-1</sup></i>
$\Omega$	<i>prostorový úhel</i>	<i>sr</i>
$dS$	<i>element plochy pro prostorový úhel</i>	<i>m<sup>2</sup></i>
$r$	<i>poloměr koule</i>	<i>m</i>
$I$	<i>svítivost</i>	<i>cd</i>
$E$	<i>osvětlenost</i>	<i>lx</i>
$\alpha$	<i>úhel paprsku vzhledem k normále plochy</i>	<i>°</i>
$L$	<i>jas</i>	<i>cd×m<sup>2</sup></i>
$\rho_v$	<i>činitel odrazu</i>	<i>%</i>
$\Phi_{dop}$	<i>světelný tok dopadající na plochu</i>	<i>lm</i>
$\Phi_{odr}$	<i>světelný tok odražený od plochy</i>	<i>lm</i>
$R_a$	<i>index podání barev</i>	<i>-</i>
$T_k$	<i>teplota chromatičnosti</i>	<i>K</i>
$P_V$	<i>poměrná pozorovací vzdálenost</i>	<i>-</i>
$d$	<i>vzdálenost pozorovaného objektu od oka</i>	<i>m</i>
$d_{cr}$	<i>velikost kritického detailu</i>	<i>mm</i>
$D$	<i>činitel denní osvětlenosti</i>	<i>%</i>
$E_h$	<i>osvětlenost venkovní vodorovné nezacloněné roviny</i>	<i>lx</i>
$\eta$	<i>účinnost světlovodu</i>	<i>-</i>
$\Phi_k$	<i>světelný tok dopadající na kopuli světlovodu</i>	<i>lm</i>
$\Phi_d$	<i>světelný tok dopadající na difuzor světlovodu</i>	<i>lm</i>
$\delta$	<i>deklinace slunce</i>	<i>°</i>
$J$	<i>pořadový den v roce</i>	<i>-</i>
$y_s$	<i>výška slunce</i>	<i>°</i>
$H$	<i>hodina v pravém slunečním čase v daném dni</i>	<i>h</i>
$\varepsilon$	<i>činitel excentricity</i>	<i>-</i>
$E_v$	<i>extraterestriální osvětlenost</i>	<i>lx</i>
$m$	<i>relativní optická tloušťka atmosféry</i>	<i>-</i>
$\alpha_v$	<i>extinkční koeficient absolutně čisté a suché atmosféry</i>	<i>-</i>
$P_v$	<i>horizontální sluneční osvětlenost</i>	<i>lx</i>

---

<b><i>T<sub>v</sub></i></b>	<i>světelný činitel zákalu atmosféry</i>	-
<b><i>D<sub>v</sub></i></b>	<i>horizontální difuzní osvětlenost</i>	<i>lx</i>
<b><i>G<sub>v</sub></i></b>	<i>celková osvětlenost</i>	<i>lx</i>
<b><i>S</i></b>	<i>plocha simulovaného světlovodu</i>	<i>m<sup>2</sup></i>
<b><i>η<sub>h</sub></i></b>	<i>horizontální účinnost světlovodu</i>	-
<b><i>l</i></b>	<i>délka světlovodu</i>	<i>mm</i>

# 1 ÚVOD

Sluneční světlo je energie, která dopadá na naši planetu. A jako energii ji dokážeme přeměnit na jiné druhy energie. Nás bude nejvíce zajímat přeměna na elektrickou energii. To dokážeme s účinností 10 % až 20 %. Kdybychom ji chtěli opět přeměnit na světelnou energii tak maximálně s účinností do 15 %, a to při mnohem kvalitativně horších parametrech světla. Celková účinnost přeměny světelné energie na jiné druhy energie proto není výhodná. Z toho důvodu bychom sluneční světlo bychom neměli přeměňovat, ale pouze usměrnit do míst, kde světlo potřebujeme.

Na osvětlení denním světlem se nemusíme pohlížet pouze z energetického pohledu. Lidský zrak byl vyvinut tak, aby vnímal právě denní světlo. Využití denního světla pro osvětlování je proto nejlepším řešením. Pokud je to účelně, technicky a ekonomicky realizovatelné, měli bychom se vyhnout osvětlování umělému, a pracovat s denním světlem.

## 2 CÍLE PRÁCE

Práce má za cíl popsat základní fotometrické veličiny a metody osvětlování budov denním světlem. V dalším bodě popsat funkci a využití světlovodů. Vyhledat světlovody, které jsou na trhu a zjistit jaké mají parametry. Podle trhu světlovodů stanovit vhodné tvary a materiály komponentů, se kterými bude prováděna simulace. Praktická část je pak samotná simulace světlovodů s různými parametry v programu TracePro. Podle výsledků simulací pak stanovit vhodné aplikace různých světlovodů.



## 3 FOTOMETRICKÉ VELIČINY

### 3.1 Úvod

Cílem kapitoly je uvést základní fotometrické veličiny. Ty jsou založeny na radiometrických veličinách, při uvážení poměrné spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele (ve vztahu na lidský zrak). Veličiny a vztahy mezi nimi jsou potřebné k dalšímu rozboru dané problematiky.

### 3.2 Veličiny

#### 3.2.1 Světelný tok $\phi$

Světelný tok vyjadřuje intenzitu zřakového vjemu normálního oka, vyvolaného energií světelného záření, které projde za jednotku času určitou plochou v prostoru, kterým se světlo šíří [11]. Jednotkou je Lumen [ $lm$ ] a 1 Lumen můžeme definovat jako  $1/683$  W monochromatického záření o frekvenci  $540 \times 10^{12}$  Hz (frekvence s nejvyšší účinností pro normálního pozorovatele) [2].

#### 3.2.2 Měrný výkon $\eta$

Měrný výkon světelného zdroje je podíl světelného toku zdroje a jeho elektrického příkonu. Jeho jednotka je lumen na watt [ $lm \times W^{-1}$ ] a je to velmi důležitá veličina při posuzování světelných zdrojů z energetického pohledu. Teoreticky největší hodnota je  $\eta = 683 \text{ lm} \times W^{-1}$  [3].

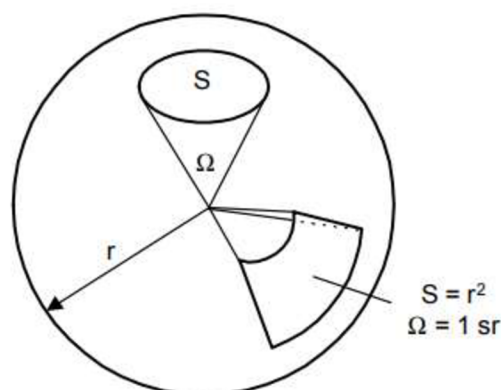
$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad [lmW^{-1}; lm; W]$$

#### 3.2.3 Prostorový úhel $\Omega$

Prostorový úhel není fotometrická veličina, ale souvisí s popisem dalšího vztahu pro výpočet svítivosti. Prostorový úhel značíme písmenem  $\Omega$  s jednotkou jeden steradián [ $sr$ ]. Vypočítat ji můžeme tak, že vytvorneme kuželosečku na povrchu jednotkové koule (koule  $r = 1$  m). Vrchol kuželosečky je ve středu jednotkové koule [19]. Element prostorového úhlu je definován vztahem [11].

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} \quad [sr; m^2; m]$$

Velikost prostorového úhlu celého prostoru je  $4\pi$  sr [19].



Obrázek 1 - Grafická definice steradiánu [3]

### 3.2.4 Svítivost I

Vymezíme-li malý prostorový úhel a známe světelný tok, který takovým prostorovým úhlem prochází, tak určíme fotometrickou veličinu svítivost [2]. Její jednotka Kandela [cd] je definována jako svítivost zdroje, který vyzařuje monochromatické záření o frekvenci  $540 \times 10^{-12} \text{ Hz}$ . Jeho zářivost v tomhle směru je  $1/683 \text{ W}$  na jeden steradián. Z historické definice můžeme přirovnat 1 cd jako svítivost 1 svíčky. Svítivost můžeme vypočítat ze vztahu [11]:

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad [\text{cd}; \text{lm}; \text{sr}]$$

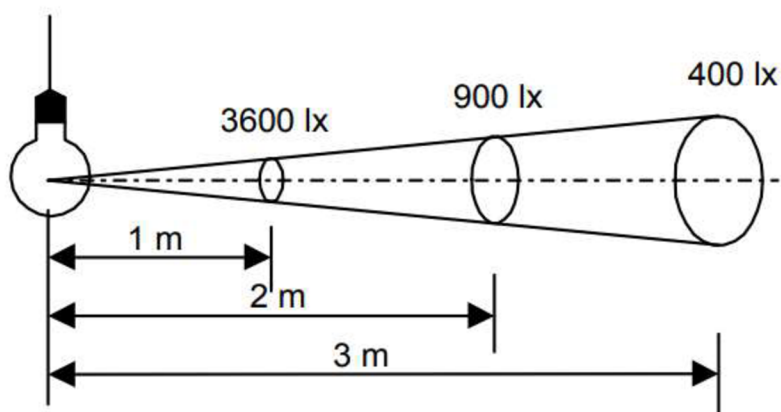
### 3.2.5 Osvětlenost E

Poté, co světelný tok dopadne na plochu, tak na ploše naměříme osvětlenost. Jednotkou je lux [lx] a při osvětlování je to nejdůležitější a nejsledovanější veličinou. Lidský zrak se dokáže přizpůsobit osvětlenosti od  $10^{-9} \text{ lx}$  až po  $10^6 \text{ lx}$ . Je dána vztahem [2]:

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad [\text{lx}; \text{lm}; \text{m}^2]$$

nebo

$$E = \frac{I}{r^2} \quad [\text{lx}; \text{cd}; \text{m}]$$



Obrázek 2 - Pokles osvětlenosti při změně vzdálenosti [3]

Pokud paprsky dopadajícího světla jsou pod úhlem  $\alpha$  vzhledem k normále plochy, vztah se doplní o  $\cos \alpha$  daného úhlu [2]:

$$E = \frac{I}{r^2} \times \cos \alpha \quad [\text{lx}; \text{cd}; \text{m}, ^\circ]$$

### 3.2.6 Jas L

Jas je veličina, která nám udává množství světelného toku, které od dané jednotkové plochy odrazí, nebo je jeho zdrojem, v definovaném směru [2]. Pozorovatel vnímá pouze to, že jedna plocha je jasnější než druhá [3]. Jednotkou je Kandela na metr čtvereční [ $\text{cd} \times \text{m}^{-2}$ ] a vztah:

$$L = \frac{I}{dS \times \cos \alpha} \quad [\text{cd} \times \text{m}^2; \text{cd}; \text{m}^2, ^\circ]$$

Jas osvětleného povrchu závisí na činiteli odrazu  $\rho_v$  daného povrchu. Činitel odrazu je dán poměrem dopadajícího a odraženého světelného toku [3].

$$\rho_v = \frac{\phi_{dop}}{\phi_{odr}} \quad [%; \text{lm}; \text{lm}]$$

### 3.2.7 Index podání barev $R_a$

Index podání barev nám číselně posuzuje schopnost pozorovatele vnímat jednotlivé barvy. Velikost indexu podání barev určujeme od 0 do 100. Denní světlo a světla tepelných zdrojů mají index podání barev  $R_a=100$ . Naopak výbojové zdroje světla jako např. nízkotlaká sodíková výbojka, která vyzařuje jen monochromatické žluté světlo. U takového zdroje nelze barvy vůbec rozlišit a proto má index podání barev  $R_a=0$  [3].

### 3.2.8 Teplota chromatičnosti $T_k$

Teplota chromatičnosti u teplotních světelných zdrojů (žárovka, halogenové žárovky) nám udává skutečnou teplotu rozžhaveného vlákna. U výbojek určujeme náhradní teplotu chromatičnosti. To není skutečná teplota, ale pouze barevný tón odpovídající dané teplotě [3].

Teplota chromatičnosti denního světla se mění v závislosti na denní době a typu oblohy. Při východu a západu slunce je  $T_k = 3000 \text{ K}$ . V průběhu dne roste až na maximální hodnotu  $T_k = 6000 \text{ K}$  poté opět klesá. Největší  $T_k$  dosahujeme, při jasné obloze, kdy obloha má modrou barvu  $T_k = 7000 - 10000 \text{ K}$ . V některých literaturách se teplota chromatičnosti stanovuje pomocí D křivek, které nemají konstantní spektrum př. D50 (5000 K), D65 (6500 K)



Obrázek 3 - Teplota chromatičnosti [15]

### 3.2.9 Typy obloh

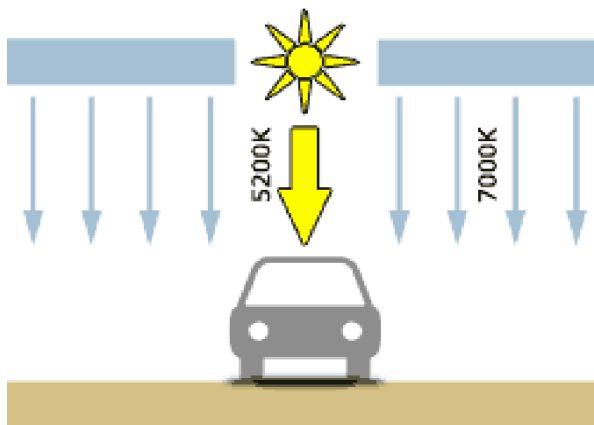
Tohle není fotometrická veličina, ale velmi blízce souvisí s teplotou chromatičnosti, a je důležitá pro stanovení simulace. Je stanoveno 15 typů oblohy a z nich 4 jsou dle CIE standardu [1].

- Standartní zatažené nebe
- Nebe rovnoměrného jasu
- Jasná obloha s nízkým znečištěním
- Jasná obloha s vyšším znečištěním

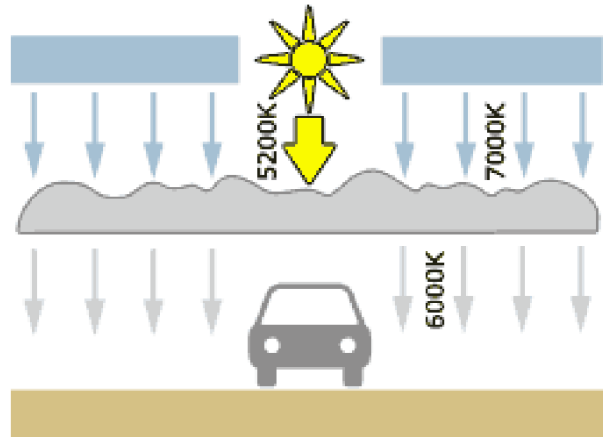
Normované oblohy zjednodušují skutečné oblohy, které se neustále mění. Normovaná obloha je ustanovená koeficienty, které vystihují její základní vlastnosti. Stanovují hodnotu jasu zenitu  $L_z$ . Zenit je pomyslný bod, při uvažování oblohy jako kopule, v nejvyšším místě [1]. Dále gradaci jasu, která roste od horizontu až po Zenit. Poslední údaj je poměr mezi difuzní a přímým osvětlením při daném typu oblohy [1].

Slunce není pouze bodový zdroj světla, ale skrze atmosféru dosahuje obloha vysokých jasů. I po západu slunce nebo, pod mrakem stále jsme schopni vidět tzn. dopadá na nás světlo skrze jas oblohy.

Velikost dopadajícího světla záleží na úhlu mezi slunečními paprsky a horizontem. Někdy úhel můžeme definovat spíše jako výška slunce nad obzorem. Výška slunce bude samozřejmě se měnit s denní dobou, ale i s ročním obdobím a zeměpisnou šířkou. Dále závisí na světelném činiteli zákalu atmosféry. V průmyslových oblastech se znečištěným ovzduším může mít činitel až 3x větší hodnotu, než v horských oblastech [1].



Obrázek 4 - Jasná obloha [10]



Obrázek 5 - Zatažená obloha [10]

## 4 OSVĚTLOVÁNÍ BUDOV

### 4.1 Úvod

V této kapitole si uvedeme základní požadavky a normy při osvětlování budov a pracovišť. Bude nás zajímat hlavně potřebná složka denního světla.

### 4.2 Osvětlování pracovišť a obytného prostředí

*„Dostatečné světlo motivuje člověka k činnosti, k práci, povzbuzuje náladu a vytváří příjemnou atmosféru. Nedostatek světla naopak utlumuje, snižuje pracovní výkonnost a bezpečnost - zvyšuje riziko chyb v práci a pracovních úrazů. Vnitřní prostředí bývá osvětleno světlem denním (to je nezastupitelné), umělým nebo oběma současně, mluvíme pak o osvětlení sdruženém. Umělé osvětlení slouží k vytvoření světelného klimatu v době, kdy denní osvětlení není dostatečné (stmívání, velká oblačnost) nebo je nelze využít (noc, prostory bez oken a světlíků), [16]. Přesné hodnoty minimálního (i maximálního) osvětlení nám udávají Světelně-technické normy ČSN 73 0580 1- 4, ČSN 36 0020 a ČSN EN 12467 - 1.*

#### 4.2.1 Zásady dobrého vidění

Máme dva hlavní požadavky, na které se navrhuje osvětlení, a to zrakový výkon a zraková pohoda. Zrakový výkon nám udává, jaké množství podnětů jsme schopni zrakově zpracovat v závislosti na čase. Zraková pohoda je stav, který je pro náš zrak komfortní. Dle druhu vykonávané činnosti se liší, jestli se klade důraz na zrakovou pohodu nebo zrakový výkon.

Pro dobré vidění je třeba zajistit dostatečnou intenzitu osvětlení, jas a jeho rozložení, rozumný kontrast a barvu světla. Intenzita osvětlení je určována velikostí detailů a předmětů, se kterými pracujeme při dané činnosti. Kontrast nám udává podíl mezi nejvíce a nejméně osvětlenou plochou v okolí. Nevyhovující osvětlení, vyvolává snadno zrakovou únavu. Ta snižuje produktivitu práce a může způsobit další zrakové problémy (bolest hlavy a oči, zánět spojivek, nervozita, stres) [16].

#### 4.2.2 Osvětlování pracovišť

Osvětlení musí odpovídat nárokům vykonávané práce. To je základní požadavek osvětlení pracoviště. Požadované osvětlení se většinou vztahuje k výšce pracovního stolu tj. 0,85 m nad zemí. Pokud vlivem snížení světelného toku či znečištění svítidla dojde k poklesu osvětlenosti pod stanovenou normu, musí dojít k údržbě osvětlovací soustavy. Zvlášť je potřeba osvětlovat nebezpečné prostory a překážky na pracovišti [16].

Tabulka 1 - Příklady požadavků osvětlení

místo	E [lx]
operační stůl	10000
operační sál	1000
laboratoře	500
tabule ve škole	500
práce na PC	300
Hala	150
chodba	50-100

### 4.2.3 Osvětlování obytného prostředí

Osvětlování obytného prostředí má vytvářet příjemné prostředí. Podle využití prostoru a individuálních požadavků uživatele je osvětlování navrhováno. Normy jsou zde spíše doporučené. Doporučují více menších světelných zdrojů a celkovou nižší hodnotu osvětlenosti. Pokud je potřeba vyšší osvětlenost, doporučuje se místní osvětlení. Vhodná jsou zde nástěnná a stojanová svítidla.

### 4.3 Osvětlování denním světlem

Denní světlo je nenahraditelný faktor životního prostředí. Pokud máme navrhovat osvětlení, pro prostory s pohybem osob přes den, musíme respektovat minimální požadavky na denní světlo. Více denního světla bychom měli využít tam, kde je to účelné a hospodárné [17].

#### 4.3.1 Poměrná pozorovací vzdálenost $P_v$

Pokud nespíme, tak neustále vykonáváme zrakovou práci. Obtížnost práce závisí na vzdálenosti pozorovaného objektu, sledované podrobnosti (kritického detailu) a na kontrastu jasů.

Tabulka 2 - Třídy zrakové činnosti (ČSN 73 0580-1) [17]

třída	název	$P_v$ [-]	příklad	kritický detail $d_{cr}$ [mm]		Hodnota D [%]	
				$d = 0,25$ m	$d = 10$ m	$D_{min}$	$D_m$
I.	mimořádně přesná	> 3330	nejpřesnější zraková činnost s omezenou možností použití zvětšení	< 0,075	< 3	3,5	10
II.	velmi přesná	3330–1670	velmi přesné činnosti při výrobě a kontrole	0,075–0,15	3–6	2,5	7
III.	přesná	1670–1000	obtížné laboratorní práce, náročné vyšetření	0,15–0,25	6–10	2	6
IV.	středně přesná	1000–500	čtení, psaní, obsluha strojů, sport	0,25–0,5	10–20	1,5	5
V.	hrubší	500–100	manipulace s předměty a materiálem	0,5–2,5	20–100	1	3
VI.	velmi hrubá	< 100	udržování čistoty, mytí, chůze v neznámém prostoru	> 2,5	> 100	0,5	2
VII.	celková orientace	–	chůze ve známém prostoru, celkový dohled	–	–	0,2	1

Požadavky na množství denního světla jsou odstupňovány podle obtížnosti zrakové činnosti. Pro vykonávání určité činnosti potřebujeme dané množství světla. Třídy zrakové činnosti se řídí dle poměrné pozorovací vzdálenosti  $P_v$  [17].

$$P_v = \frac{d}{d_{cr}} \quad [-; m; mm]$$

$d$  - vzdálenost pozorovaného objektu od oka např. pokud držíme předmět v ruce uvažujeme vzdálenost  $d = 0,25$  m

$d_{cr}$  - velikost kritického detailu

Podle poměrné pozorovací vzdálenosti jsou pak přiděleny nejnižší hodnoty činitele denního osvětlenosti D.

### 4.3.2 Činitel denní osvětlenosti D

Úroveň denního osvětlení nám určuje poměrná veličina, a to činitel denního osvětlení. Je definována vztahem [18]:

$$D = \frac{E}{E_h} \times 100 \quad [\%; lx; lx]$$

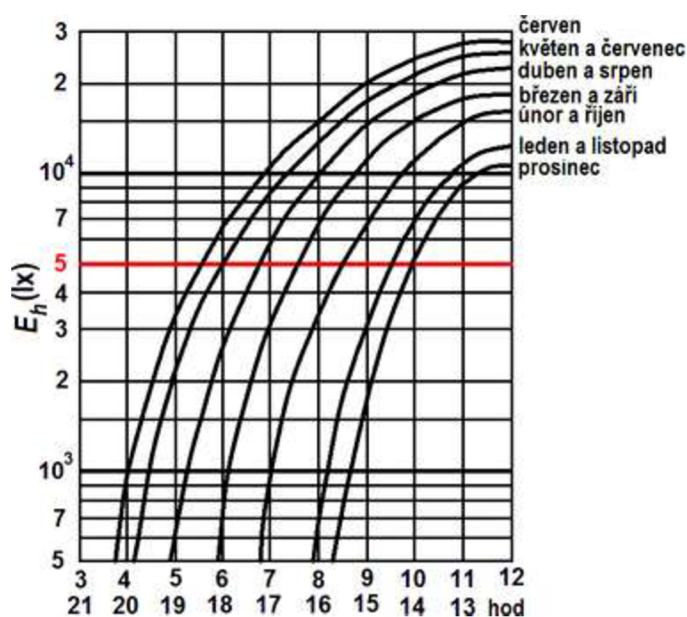
$E$  - je naměřená osvětlenost v daném bodě

$E_h$  - osvětlenost venkovní vodorovné nezacloněné roviny

Normované hodnoty popsány v předchozí kapitole (Tab. 2). V tabulce nalezneme hodnotu  $D_m$ , což je hodnota průměrná z naměřených hodnot.  $D_{min}$  je minimální hodnota naměřená na pracovní ploše. Při sdruženém osvětlení (denní zároveň s umělým osvětlením) hodnota  $D$  je menší [18].

### 4.3.3 Osvětlenost venkovní vodorovné nezacloněné roviny $E_h$

Osvětlenost venkovní vodorovné nezacloněné roviny závisí na denní době, počasí a ročním období. Jelikož je to velmi nestálá hodnota, tak pro navrhované osvětlení se stanovila hodnota venkovní osvětlenosti  $E_h = 5000 lx$ . Přesné údaje o zatažené obloze tom lze pozorovat na grafu osvětlenosti nestíněné roviny – dle obrázku 6 [17].

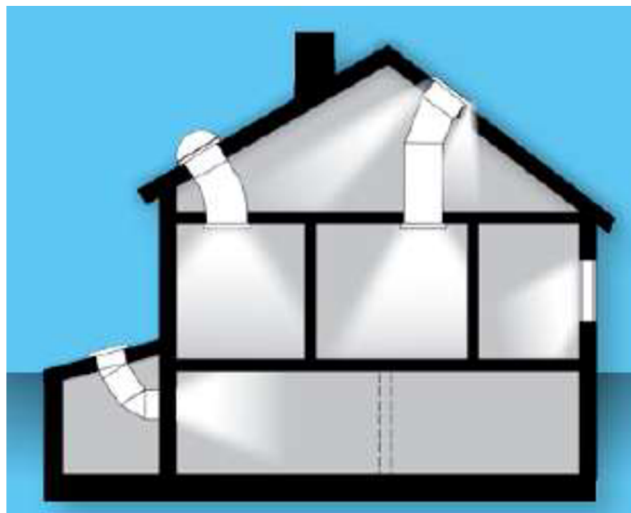


Obrázek 6 – Osvětlenost  $E_h$  vodorovné nestíněné roviny v průběhu dne i roku [17]



## 5 OSVĚTLOVACÍ SYSTÉMY

### 5.1 Úvod



Obrázek 7- Rodinný dům osvětlený pomocí světlovodů [9]

Tato kapitola obsahuje rozdělení denní osvětlovacích systémů a jejich využití. Dále samotný popis jednotlivých světlovodných systémů a jejich využití. Poté se budeme zabývat dutým vertikálním světlovodem, jehož využití je nejrozšířenější. Následuje popisem jednotlivých částí dutého vertikálního světlovodu. Na závěr si uvedeme jednotlivé vedlejší systémy, které obsahují duté světlovody.

### 5.2 Rozdělení denních osvětlovacích systémů

Jeden ze způsobů, jak můžeme dělit denní osvětlovací systémy je na pasivní a aktivní osvětlovací systémy. Rozdíl mezi nimi určujeme, jestli osvětlovací prvky jsou statické nebo pohyblivé. Pasivní systémy se využívají po dlouhou dobu, jsou bezporuchové a fungují na jednodušším principu. Aktivní systémy mají pohyblivé části, které se otáčejí směrem ke slunci. Dosahují tak větší účinnosti, ale jejich pořizovací náklady a náklady na údržbu jsou vyšší. Vertikální duté světlovody, kterými se budeme zabývat, jsou pasivní osvětlovací systémy.

Další možnost, jak dělit světlovodné systémy je dle jejich funkcí. Systémy na využívání difúzního záření (světelné police, anidolické integrované systémy). Dále systémy na směřování přímého světla (prizmatické panely, světlovodná skla). Poslední systém je pro vedení světla – světlovodné systémy (heliostaty, vertikální duté světlovody, horizontální světlovody). V následující části se budeme zabývat jen světlovodnými systémy, do kterých se řadí i duté světlovody [4].

### 5.3 Využití světlovodných systémů

Světlovodné systémy využíváme v místě, které nemá přímý kontakt (nebo žádný) se sluneční oblohou. Předchůdcem světlovodných systémů jsou střešní světlíky, které také opticky spojují venkovní prostředí s interiérem budovy. Světlíky ale mají nerovnoměrné rozložení světla v osvětlovaném prostoru a jejich účinnost je malá.



Světlovodné systémy mají tři hlavní funkční vlastnosti. První je zachytávání světla, dále přenos světla a jeho distribuci do interiéru.

### 5.3.1 Požadavky na světlovodné systémy

Dle normy ČSN EN 12464-1 (Světlo a osvětlení) je nutná složka denního světla v každém prostoru s trvalým pobytém lidí, tj. prostor kde se osoba nachází déle než 4 hodiny. To chrání osoby před zrakovou únavou [7]. Pomocí světlovodných systémů je možné dodržet tuto normu i v místech těžce osvětlitelných (schodiště a chodby, podzemí části budov). Jednotlivé požadavky:

- efektivní přenos světla => bez ztrát ve spojovacích prvcích, materiál s co nejvyšší odrazivostí
- stálý světelný tok v průběhu dne
- přenos světelné energie bez tepelné
- co nejmenší zásah do architektury domu => cena instalace
- bez potřeby údržby

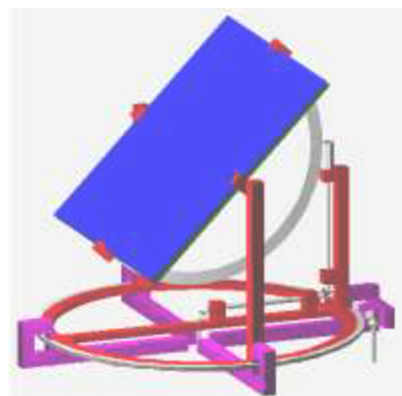
## 5.4 Světlovodné systémy

Světlovodné systémy dělíme hlavně dle místa, odkud zachytáváme světlo. Rozeznáváme hlavní typy: heliostaty, vertikální duté světlovody, horizontální světlovody

### 5.4.1 Heliostaty

Heliostaty mohou být parabolická nebo rovinná zrcadla, která se pomocí jednoosého nebo dvouosého ovládacího zařízení natáčejí směrem ke Slunci. Sluneční záření se od nich odráží směrem ke světlovodné části v budově. Světlo odražené od heliostatu je před vstupem do místnosti rozptýleno, aby docházelo k rovnoměrnému rozložení.

Vyrábí se z leštěných kovů, postříbřeného skla nebo fólie z umělé hmoty opatřené tenkou vrstvou hliníku. Často se kombinují s Fresnelovými čočkami, pokud se světlo přenáší na větší vzdálenosti [1].



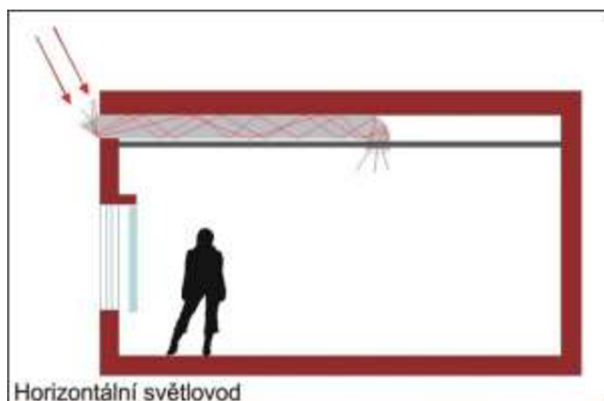
Obrázek 8 - Heliostat [12]

Heliostaty jsou starší vynálezy a dnešní době jejich využití je omezené. Používají se hlavně tam, kde je potřeba velká koncentrace denního světla. Jejich další využití je i energetice v místech kde je hodně slunečního záření. Pomocí heliostatů je sluneční světlo nasměřováno do míst, kde dochází k ohřevu vody a následné přeměně na el. energii.

### 5.4.2 Horizontální světlovody

Horizontální světlovody lze využít v místě kde nelze použít vertikální světlovod (vysoká budova, nevhodný vstup ze střechy). Okna dokáží transportovat světlo maximálně do vzdálenosti cca 6 m. Při využití horizontálního světlovodu takhle vzdálenost je podstatně větší [13].

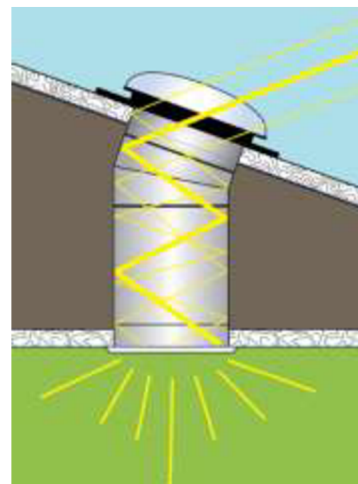
Horizontální světlovod se skládá ze 3 částí. Vstupní část je optický koncentrátor, který soustřeďuje přímé a difuzní záření oblohy do tubusu světlovodu. Světlovodný tubus je další částí horizontálního světlovodu. V něm se odráží paprsky od reflexní vrstvy a směřují hlouběji do tubusu. Světlovod uzavírá jeden nebo více difuzorů, který rozptyluje paprsky do místnosti.



Obrázek 9 - Horizontální světlovod [13]

### 5.4.3 Vertikální světlovod

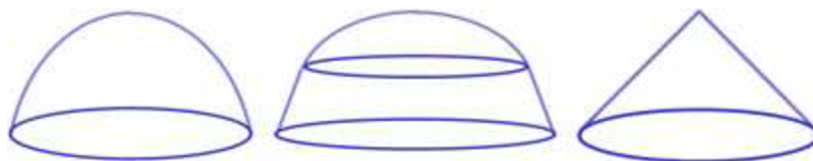
Vertikální světlovod je nejpoužívanější světlovod. Jeho využití při osvětlování vnitřních prostor je velké. Od krátkých širokých světlovodů, které nahrazují světlíky, až po dlouhé světlovody osvětlující podzemní prostory [20]. Hlavní součásti světlovodu jsou stejné jako u horizontálního světlovodu.



Obrázek 11 - Vertikální světlovod [22]

#### 5.4.3.1 Střešní kopule

Střešní kopule sbírá z oblohy sluneční paprsky, odtud jsou směřovány do světelného tubusu. Účinnost střešní kopule lze velmi obtížně odhadnout. Účinnost závisí na světelných podmínkách a výšce slunce na obzoru. Také záleží na tvaru kopule, která je zvolena (viz obrázek 10). Materiály kopulí jsou buď čiré sklo, plexisklo nebo polykarbonát. Skleněné kopule mají nižší pořizovací náklady, nežloutnou a nestárnou. Plastové kopule jsou odolnější a mají vyšší účinnost, v prvních letech používání [20].



Obrázek 10 - Tvary střešních kopulí [16]

Všechny kopule by měli být co nejhladší, aby se na nich nezachycovala špína a sníh. Na velikosti zachyceného světelného toku závisí nejvíce parametry: rozměr, tvar kopule a úhel, pod kterým je kopule skloněna oproti horizontu.

#### 5.4.3.2 Světlovodný tubus

Světlovodným tubusem prochází paprsky od střešní kopule až ke stropnímu difuzoru. Je z hliníkového materiálu, na který je napařováno stříbro a oxidy křemíku. To zajišťuje odrazivost

větší než 98 %. Díky tomu jsme schopni světlo přivést na větší vzdálenosti s minimálními ztrátami [20].



Obrázek 12 - Světlovodný tubus [20]

Ideálním tubus by byl takový, ve kterém by se světlo neodráželo, ale jen jím procházelo. Největší účinnost přenosu proto dosahuje u rovných světlovodů. Pokud je třeba změnit směr tubusu, můžeme využít nastavitelné koleno. To ovšem za cenu ztrát světelného toku. Ztráty při použití kolene závisí na průměru a délce tubusu, světelných podmínkách a úhlu použitého kolene.

Světlovodný tubus je složen z úseků, které jsou při instalaci pevně spojeny, aby nedocházelo k dalším ztrátám. Typické průměry světlovodů jsou od 250 mm až po 1000 mm [20].

Nejčastěji se využívají neprůhledné tubusy, které jen přenášejí světlo. Existují také šterbinové tubusy, které mají optické šterbiny a propouští světlo při průchodu světlovodem. Posledním typem jsou tubusy transparentní, které tvoří tzv. svítící sloup. V po celé délce jsou prvky rozptylující paprsky ven z tubusu [1].

#### 5.4.3.3 Stropní difuzor

Funkcí stropního difuzoru je rozptýlit světlo po místnosti a zamezit oslnění. Při průchodu paprsků difuzorem dochází ke ztrátě intenzity paprsku. Ztráty jsou samotným průchodem difuzoru, tak i zpětným odrazem do světlovodu.

Difuzor je ze skleněného nebo plastového materiálu. Skleněný difuzor nezloutne, propouští světlo při zachování přirozeného barevného spektra. Plastový difuzor je levnější a odolnější. Nejčastější tvar je rovný nebo jemně zakulacený [20].



Obrázek 13 - Stropní difuzor [20]

#### 5.4.3.4 Příslušenství

Mezi další přídatné systémy, které se dnes jsou instalovány do světlovodů patří [20]:

- Izolační prvek – zabraňuje průchodu tepla v obou směrech, zabraňuje srážení vlhkosti a přispívá k tepelné izolaci budovy.
- Přídatné osvětlení – pro noční osvětlení mohou být do světlovodu nainstalovány LED osvětlení nahrazující stropní lustr. Může být kombinováno s fotovoltaickým systémem.
- Stmívač - reguluje intenzitu světelného toku procházejícího tubuse, částečně nebo úplně zamezuje průchodu paprsku dle potřeby
- PYRO sestava – prvky se zvýšenou odolností proti požáru. Zvyšují odolnost konstrukce, a tak zamezují případnému odvodu kouře světlovodem.
- Odvětrávání - Světlovod, u kterého funkce vedení světla je spojena s funkcí odvětrávací

## 6 VÝSLEDEK PRŮZKUMU TRHU SE SVĚTLOVODY

### 6.1 Úvod

V posledních 20 letech se problematikou denního osvětlování se zabývalo hodně firem. Dostatečně prosvětlená budova působí příjemným a atraktivním dojmem. Každá stavební firma preferuje jiné řešení. Některé se snaží stavět budovy s maximální plochou pokrytou okny. Jiné firmy zase preferují střešní světlíky či duté světlovody.

### 6.2 Nabídka světlovodů

Firmy, které světlovody nabízejí, je možné rozdělit do dvou skupin.

První jsou velké firmy, které se zabývají jen světlovody a mají velký výběr světlovodů: Vertikální světlovody, horizontální světlovody, a další speciální druhy světlovodů např. světlovod který má vstup do tubusu umístěný na chodníku nebo v silnici. Každá firma používá jeden typ odrazivého materiálu pro všechny světlovody. Nabízené délky a průměry světlovodů jsou ve velkém rozmezí. Příkladem takových firem jsou: Lightway, Solatube, Sunizer.

Druhý typ firem má ve své nabídce nejen světlovody, ale i jiné osvětlovací systémy. Jejich výběr a (dostupné) informace o světlovodech nejsou takového rozsahu. Tyto firmy se světlovody nezabývají se takovou dobou, jako první typ firem, a nabízejí pouze vertikální světlovody. Příklad firem: Velux, Allux, Fakro.

### 6.3 Zhodnocení

Zhodnocení je uvedeno v příloze, tabulka 8 – Trh se světlovody

Výrobci ať již dle zkušeností nebo místa instalace preferují každý jiné části světlovodu. Všichni nabízejí své výrobky v celku i s doplňky. Drobnými rozdíly v průměrech a spojích si zajišťují o instalaci celého světlovodu od jejich firmy.

#### 6.3.1 Střešní kopule

Většina výrobců preferuje kulatou kopuli před rovným sklem, což je zřejmé z hlediska účinnosti. Kromě půlkoule jsou časté i kopule nižšího profilu, které lépe pohlcují ranní paprsky a polední světlo spíše odráží. Často mají Fresnelovu čočku umístěnou na vnitřní straně kopule, která směřuje více světla do světlovodu. Jako materiál používají nejčastěji polykarbonát, dále také často využívají plexisklo. Skleněné kopule již mnoho výrobců nevyrábí, což může být způsobeno současným rozvojem plastů a jejich kvalitou.

#### 6.3.2 Světlovodný tubus

Všichni výrobci používají jako základní materiál tubusu hliník. Na vnitřní stěně je vrstva ze stříbra a oxidů křemíku. Odrazivosti všichni garantují odrazivost více než 98 % po dobu 25 let. Průměry i délky jednotlivých dílů tubusu jsou také velmi podobné. Odlišné jsou hlavně názory na celkovou účinnost přenosu světla světlovodem a ztráty v kolenech tubusu. Také jsou rozdílné maximální délky světlovodných tubusů, s tím je i rozdílná nabídka prodlužovacích částí tubusu.

Některé průměry výrobci neudávají v mm ale v normovaných číselných kategoriích pro trubky a podobné válcovité produkty (jako právě světlovodné tubusy).

### **6.3.3 Difuzor**

O difuzorech výrobci udávají nejméně informací. Používají se jak plastové, tak i skleněné difuzory různých druhů. Všichni výrobci však vyrábí prizmatické difuzory, které nejlépe rozprostřou světlo po místnosti.

## 7 METODY A POSTUPY ŘEŠENÍ

### 7.1 Úvod

Pro stanovení parametrů průchozího světla máme dvě možnosti. Buď stanovujeme efektivitu přenosu světla pomocí simulace nebo pomocí měření. V ideálním případě nejprve simulujeme a poté ověřujeme pomocí měření správnost simulace.

### 7.2 Měření

Měřit můžeme různé vlastnosti, ale nejdůležitější je měření denního osvětlení. Norma ČSN 36 0011 nám udává osvětlení denním světlem ve vnitřních prostorách (viz. kap 4.3)

Měření provádíme pomocí dvou luxmetrů. Jeden je umístěn ve venkovním prostředí a měří osvětlenost nezacloněné roviny. Rozsah takového luxmetru musí být minimálně do 100 000 lx. Druhý luxmetr měří osvětlenost pracovní plochy ve výšce 0,85m nad podlahou. Měření se provádí každých 30 sekund. Poté se porovnáním obou hodnot stanoví činitel denní osvětlenosti D [9].

### 7.3 Simulace

Simulací můžeme lépe zjistit informace o samotném světlovodu. Většinou nemůžeme zahrnout prostředí, ve kterém bude světlovod instalován. Pro simulaci musíme zadat zdroj světla (sluneční svit), který se ovšem v průběhu dne mění, tudíž se vhodné provádět simulace opakovaně, pro různé denní doby. Zadáme, o jaký typ oblohy se jedná např. jasná obloha, zatažená (difuzní) a polojasná obloha. Nyní můžeme na světlovodu stanovit 2 virtuální plochy, jednou budeme měřit vstupující paprsky a druhou paprsky vystupující ze světlovodu. Jejich podílem pak stanovíme jejich účinnost. Simulace je však jen natolik přesná, jak jsou přesně její zadané údaje.

Příkladem takového simulačního programu je TracePro, který budeme využívat pro praktickou část práce. TracePro obsahuje spoustu nástrojů pro simulaci jak denního osvětlení a světlovodů, tak i umělé osvětlování, displeje a další optické přístroje. Program obsahuje prostředí, do kterého importujeme model z programu Autodesk Inventor. Poté stanovíme všechny světlené parametry a materiálové parametry. Pak nastavíme rozsah simulace (dle množství paprsků můžeme očekávat délku simulace). Z výsledků můžeme stanovit účinnost přenosu, směr a světelný tok z vystupující ze světlovodu [21].

## 8 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část bakalářské práce, se skládala z jednotlivých simulací dutého světlovodu. Veškeré simulace probíhali v programu TracePro.

### 8.1 Předpoklady o simulacích

Abychom mohli analyzovat výsledky simulací, musíme si nejprve stanovit základní předpoklady a specifikace světlovodů a oblohy nad světlovodem.

#### 8.1.1 Účinnost světlovodu

Bylo by asi více možností, jak definovat účinnost světlovodu. Zvolena byla možnost určení účinnosti  $\eta$  jako poměr světelného toku zachyceného na povrchu kopule  $\phi_k$  ku světelnému toku, který změříme na vnitřní straně difuzoru  $\phi_d$ .

$$\eta = \frac{\phi_k}{\phi_d} \quad [\%; \text{lm}; \text{lm}]$$

Difuzor světlovodu, není započítán do celkové účinnosti světlovodu ze dvou důvodů. První je ten, že pokud světlovod přirovnáme ke světelnému zdroji, tak poté difuzor můžeme přirovnat ke svítidlu. Stejně jako svítidlo, které má za úkol výkon světelného zdroje distribuovat do prostoru, tak i difuzor má tuhle funkci. A také difuzor je volen dle osvětlovaného prostředí (přímé světlo na pracovní plochu nebo co nejvíce rozptýlené světlo do interiéru), což je druhý důvod proč difuzor nebyl zahrnut do celkové účinnosti.

#### 8.1.2 Definování parametrů slunce a oblohy

Pro výpočet výšky slunce, osvětlenosti a deklinace slunce jsou použity vztahy dle knihy Osvětlování světlovody (4). Pro simulace a výpočty byl stanoven den 1. května s jasnou normovanou oblohou bez znečištění. V našich zeměpisných podmínkách tj. 50° severní šířky. Uvedeme si příklad výpočtu pro 12 h.

##### Deklinace slunce $\delta$

Země při oběhu slunce svírá úhel s rovinou zemského rovníku a mění se od -23,5° až do 23,5°. Pro deklinaci v určitý den v roce můžeme použít vztah:

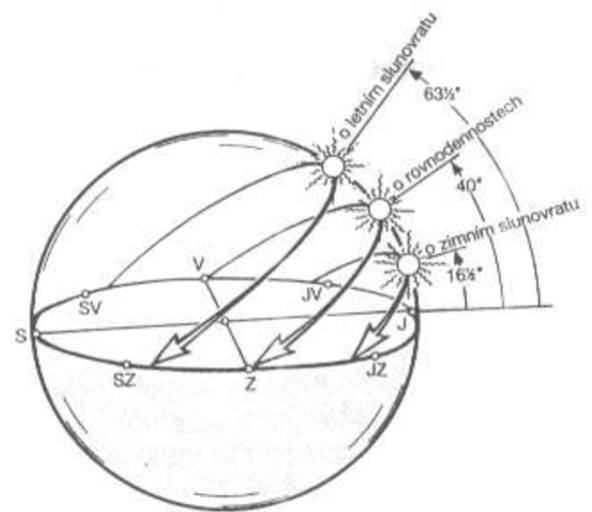
$$\delta = 23,45^\circ \sin \left[ \frac{360^\circ}{365} (J - 81) \right] = 23,45^\circ \sin \left[ \frac{360^\circ}{365} (J - 81) \right] = 14,9^\circ$$

kde  $J$  pořadový den v roce,  $J = 121$

### Výška slunce $y_s$

výška slunce nad horizontem je úhel, který se svírá mezi sluncem a horizontem. Závisí na denní době, ročním období a zeměpisné šířce, ve které se nacházíme. Vypočteme dle vztahu:

$$\begin{aligned} \sin y_s &= \sin(\varphi) \times \sin(\delta) \\ &\quad - \cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(15^\circ H) = \\ &= \sin(50^\circ) \times \sin(14,9^\circ) - \cos(50^\circ) \times \\ &\quad \cos(14,9^\circ) \times \cos(15^\circ \times 12,08) = \\ &= 0,766 \times 0,257 - 0,643 \times 0,966 \times (-1) = 0,818 \\ y_s &= \arcsin(\sin y_s) = 54,9^\circ \end{aligned}$$



Obrázek 14 - Změna výšky slunce [6]

kde  $\varphi$  zeměpisná šířka,  $\varphi = 50^\circ$

H je hodina v pravém slunečním čase v daném dni,  $H = 12,08$  h

### Činitele excentricity $\varepsilon$

činitel excentricity zahrnuje změny maximální horizontální osvětlenosti v průběhu roku v závislosti jak vzdálenosti Slunce od Země. Vypočteme ze vztahu:

$$\varepsilon = 1 + 0,034 \cos \left[ \frac{365^\circ}{360} (J - 2^\circ) \right] = 1 + 0,034 \cos \left[ \frac{365^\circ}{360} (121 - 2^\circ) \right] = 0,9826$$

### Extraterestriální osvětlenost $E_v$

Maximální možná osvětlenost při dané výšce slunce a ročním období bez vlivu atmosféry a jejího zákalu. Vypočteme ze vztahu:

$$E_v = E_{v0} \times \varepsilon \times \sin(y_s) = 133\,334 \times 0,9826 \times \sin 54,9^\circ = 107\,189 \text{ lx}$$

### Relativní optická tloušťka atmosféry $m$

$$\begin{aligned} m &= \frac{1}{\sin(y_s) + 0,5272 \times (y_s + 6,07995^\circ)^{-1,6364}} = \\ &= \frac{1}{\sin(54,9^\circ) + 0,5272 \times (54,9 + 6,07995)^{-1,6364}} = 1,2215 \end{aligned}$$

### Extinkční koeficient absolutně čisté a suché atmosféry $a_v$

$$a_v = \frac{1}{9,9 + 0,043m} = \frac{1}{9,9 + 0,043 \times 1,2215} = 0,10048$$



### Horizontální sluneční osvětlenost $P_v$

Teoretická hodnota sluneční osvětlenosti při daných světelných podmínkách. Vypočteme ze vztahu:

$$P_v = E_v \times e^{(-a_v \times m \times T_v)} = 107\,189 * e^{(-0,10048 \times 1,2215 \times 2,5)} = 78852 \text{ lx}$$

kde  $T_v$  je světelný činitel zákalu atmosféry, my volíme  $T_v = 2,5$ , viz tabulka 3

Tabulka 3 - světelný činitel zákalu atmosféry [1]

$T_v$	Charakteristika oblohy	Typické podmínky zákalu atmosféry, období nebo lokalita
1,5 – 2,5	Extrémně modrá obloha s čistým a suchým vzduchem	Zimní studený čistý vzduch v horách během jasných dnů, na venkově
2,5 – 3,5	Jasná modrá obloha se vzduchem bez znečištění, $L_z / D_v$ je blízké typu oblohy 12	Obyčejně jarní nebo ranní letní podmínky s nízkým zákaelem atmosféry na venkově nebo ve větrných sídlech
3,5 – 4,5	Bělomodrá obloha s $L_z / D_v$ blízkým typu obloh 11, 12 nebo 13	Letní atmosféra s vyšším obsahem vlhkosti na venkově nebo v městech s nižším znečištěním v ovzduší
4,5 – 5,5	Modrobílá obloha s několika oblaky CiSt/Ci nebo s částečně znečištěným ovzduším s $L_z / D_v$ blízkým typu obloh 13 nebo 14	Vyšší obsah vlhkosti v ovzduší nebo menší smog ve městech
5,5 – 6,5	Modrobílá obloha se znečištěným ovzduším s $L_z / D_v$ blízkým typu obloh 13, 14 nebo 15	Oblasti větších měst nebo průmyslových oblastí se znečištěným ovzduším, letní smog ve městech
nad 6,5	Slunce zastíněno oblakem na jasné obloze	Na libovolném místě během jasných situací

### Horizontální difuzní osvětlenost $D_v$

Teoretická hodnota difuzní osvětlenosti při daných světelných podmínkách. Vypočteme ze vztahu:

$$D_v = \frac{E_v}{D_v} \times E_v = 0,1 \times 107\,189 = 10\,719 \text{ lx}$$

kde  $E_v/D_v$  je koeficient propustnosti oblohového světla, je stanoven pro každý typ oblohy, pro typ oblohy 12 je hodnota koeficientu  $E_v/D_v = 0,1$

### Celková osvětlenost $G_v$

Součet přímé a difuzní osvětlenosti určí celkovou osvětlenosti pod oblohou. V případě zastínění slunce oblaky uvažujeme pouze difuzní osvětlenost.

$$G_v = E_v + D_v = 78\,852 \text{ lx} + 10\,719 \text{ lx} = 89\,570 \text{ lx}$$

To je osvětlenost, se kterou budeme uvažovat, na vstupu do světlovodu. Hodnoty pro celý den jsou v Tabulce 4. Jsou možné odchylky od skutečných hodnot, hlavně při nízkých hodnotách výšky slunce, pro které se vztahy těžce definují.

Tabulka 4 - teoretická osvětlenost dne 1. května při jasné obloze s nízkým zákalem

hodina	výška slunce [°]	sluneční osvětlenost [lx]	difuzní osvětlenost [lx]	celková osvětlenost [lx]
5	2,80	149,69	639,40	789,10
6	12,12	8669,74	2751,08	11420,83
7	21,73	24819,12	4851,15	29670,27
8	31,25	41992,25	6796,49	48788,74
9	40,19	57348,50	8454,52	65803,02
10	47,84	69244,75	9712,26	78957,01
11	53,15	76616,63	10483,99	87100,62
12	54,89	78852,39	10717,12	89569,51
13	52,51	75771,56	10395,77	86167,32
14	46,74	67623,37	9541,82	77165,20
15	38,82	55089,46	8213,49	63302,95
16	29,75	39313,06	6501,28	45814,35
17	20,19	22062,31	4521,90	26584,21
18	10,60	6528,37	2410,22	8938,58
19	1,36	14,18	310,15	324,33

Tabulka 5 – další teoretické příklady denní osvětlenosti

datum	1.5.	1.5.	21.12.	21.12.
obloha	Bezoblačná, značně zakalená obloha	Zatažená obloha Dv/Ev = 0,25	jasná obloha s nízkým zákalem	Bezoblačná, značně zakalená obloha
hodina	Gv [lx]	Gv [lx]	Gv [lx]	Gv [lx]
6	1722	6878	-	-
7	9712	12128	-	-
8	21400	16991	6	0
9	33306	21136	3850	389
10	43120	24281	11907	2855
11	49390	26210	18006	5663
12	51315	26793	19957	6684
13	48665	25989	17279	5296
14	41759	23855	10653	2364
15	31494	20534	2721	205
16	19440	16253	-	-
17	8078	11305	-	-
18	1049	6026	-	-

### 8.1.3 Světelný tok světlovodu $\phi_d$

Pokud již víme celkovou horizontální osvětlenost, kterou budeme mít na střeše u kopule světlovodu, můžeme si vypočítat světelný tok, který je na konci světlovodu. Světelný tok pak bude:

$$\phi_d = Gv \times S \times \eta_h \quad [\text{lm}; \text{lx}; \text{m}^2, -]$$

kde  $S$  plocha simulovaného světlovodu

$\eta_h$  je horizontální účinnost světlovodu. Liší se od normální účinnosti světlovodu tím, že nezahrnuje vertikální složku osvětlenosti, která dopadá na kopuli. To tak musí být, protože hodnota osvětlenosti (pod oblohou) se udává pouze v horizontálním směru. Horizontální osvětlenost se určuje při měření denní osvětlenosti, i při výpočtu denní osvětlenosti (v předchozí kapitole 8.1.2).

Horizontální účinnost světlovodu můžeme vypočítat jako poměr světelného toku procházející plochu o průměru kopule (to může být hodnota světelného toku procházející kopulí ozn. rovné sklo) ku světelnému toku na difuzoru (hodnota světelného toku na difuzoru světlovodu s reálnou kopulí).

#### Příklad výpočtu světelného toku světlovodu

Pokud máme ve 12h osvětlenost na střeše  $Gv = 89569,51 \text{ lx}$ , průměr světlovodu 350 mm a horizontální účinnost světlovodu 30 %, pak světelný tok bude:

$$\phi_d = Gv \times S \times \eta_h = 89569,51 \times \pi \times 0,175^2 \times 0,3 = 2585,28 \text{ lm}$$

Což nám odpovídá světelnému toku dvou 100 W žárovek, musíme však uvážit, že tahle hodnota je v létě, za dobrých světelných podmínek, a ještě k tomu v době poledne. Tento výpočet může použít případně, že uvažujeme světlovod s kopulí namířenou do zenitu.

## 8.2 Simulace TracePro

Modely světlovodů napodobují skutečné světlovody na trhu. Modely světlovodů byly sestaveny z technických výkresů v programu Autodesk Inventor 2016. Poté byly exportovány do programu TracePro ve kterém probíhaly simulace.

### 8.2.1 Základní světlovod

Byl stanoven základní světlovod s parametry:

délka světlovodu	2 m
průměr světlovodu	350 mm
materiál reflexivního tubusu	Alanod 2014, 4270 GP (Miro)
tvar kopule	hladká polokoule
materiál kopule	křišťálové sklo s indexem lomu $n = 1,544$
tloušťka kopule	5 mm
úhel střechy	$0^\circ$

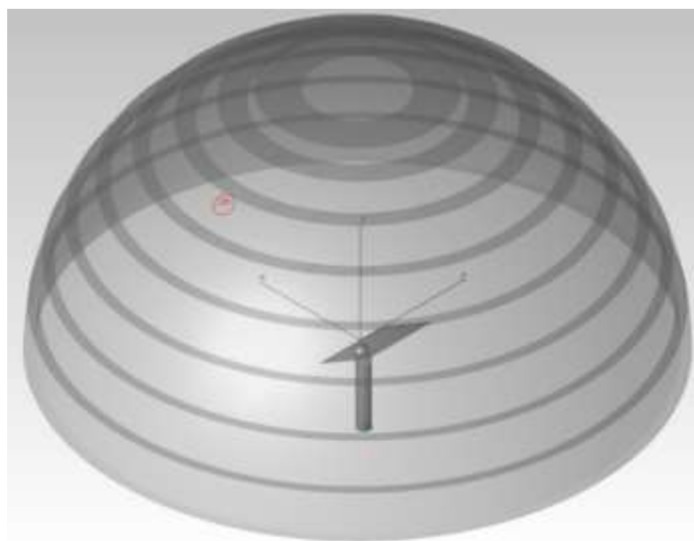
další parametry, byly zvoleny dle povahy simulace. Každý typ simulace se lišil pouze jedním parametrem. Výsledky parametru byli pak porovnávány mezi sebou. Pro jinak zvolené základní parametry by se výsledky mohli odchýlovat.

### 8.2.2 Model oblohy

Byl vybrán normovaný model oblohy číslo 12 (Jasná modrá obloha bez znečištění). Model oblohy se skládal ze dvou částí.

První část zahrnovala difuzní záření oblohy. Skládala se z půlkoule rozdělené dle výšky. Tím byla napodobena gradace jasu ze skutečné oblohy. Byla zvolena normalizovaná gradace jasu 1:3. Tahle část se po většinu simulací neměnila.

Druhá část zahrnovala přímý sluneční svit. To zajišťovala kruhová plocha v teoretické výšce skutečného slunce. Paprsky byly nasměrovány do simulovaného světlovodu. Při simulaci se výška slunce se měnila v časech od 5-12 h pro stanovený den.



Obrázek 15 - TracePro model oblohy

### 8.2.3 Výsledky simulace - tvar kopule

Prvním sledovaným parametrem byl tvar kopule. Byly vymodelovány tvary kopulí: hladká polokoule, rovné sklo, kužel, snížená kopule, vroubkovaná kopule, kopule s vnitřním zrcátkem. Jednotlivé tvary kopulí si dále představíme.

### 8.2.3.1 Hladká polokoule

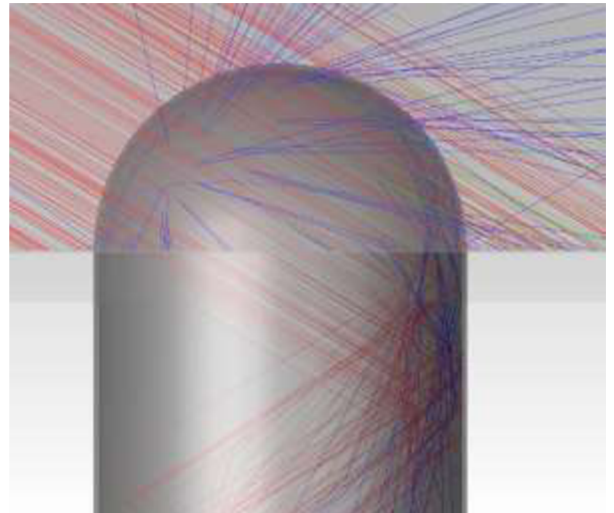
Specifikace: nejrozšířenější tvar u používaných kopulí

Pohlčení paprsků z oblohy: vysoké po celý den

Světelný tok na difuzoru: při ranní paprscích malý, poté strmě narůstá

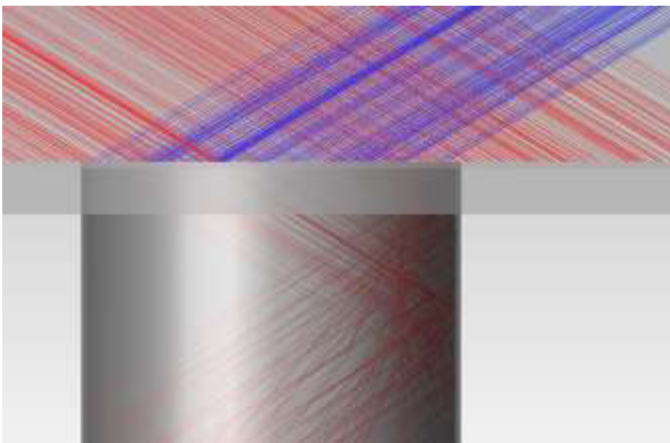
Účinnost: 16 % – 32 %

Doporučení: univerzální, vhodné pro skoro jakékoliv aplikace i světelné podmínky



Obrázek 16- TracePro světlovod s kopulí polokoule

### 8.2.3.2 Rovné sklo



Obrázek 17 - TracePro světlovod s rovným sklem

Specifikace: jednoduchý tvar

Pohlčení paprsků z oblohy: nízké, hlavně při ranní paprscích

Světelný tok na difuzoru: při ranní paprscích žádný, poté strmě narůstá

Účinnost: 28 % – 43 %

Doporučení: pro šikmé střechy, krátké světlovody v místech, kde není vyžadován světelný tok při nízké výšce slunce

### 8.2.3.3 Kužel

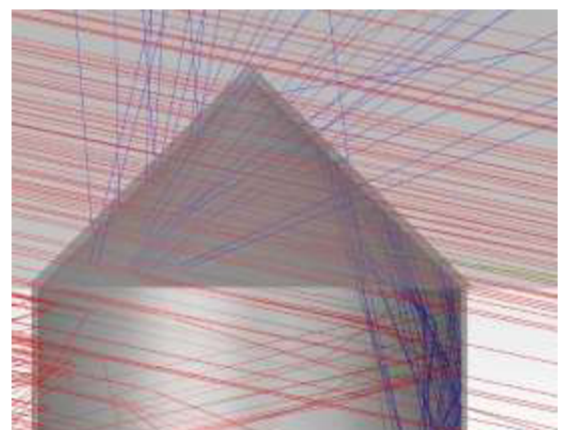
Specifikace: v praxi se moc nepoužívá, náročné na výrobu

Pohlčení paprsků z oblohy: střední, dobře zachycuje ranní paprsky

Světelný tok na difuzoru: poměrně veliký ráno, poté narůstá, ale pomaleji než ostatní tvary kopulí

Účinnost: 18 % – 32 %

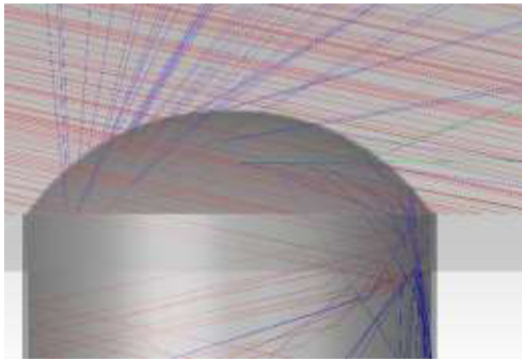
Doporučení: Sice je malá pravděpodobnost, že je s takovou kopulí potkáte, může být vhodný pro rovné střechy a pro zachycování ranních paprsků



Obrázek 18 - TracePro světlovod s kopulí ve tvaru jehlanu



### 8.2.3.4 Snížená kopule



Specifikace: běžně používaný tvar, kombinuje výhody rovného skla a polokoule

Pohlčení paprsků z oblohy: středně veliké po celý den

Světelný tok na difuzoru: středně veliký po celý den

Účinnost: 14 % – 28 %

Doporučení: univerzální, vhodný skoro pro jakékoliv aplikace, nejlepší poměr cena x výkon

Obrázek 19 - TracePro světlovod se sníženou kopulí

### 8.2.3.5 Vroubkovaná kopule

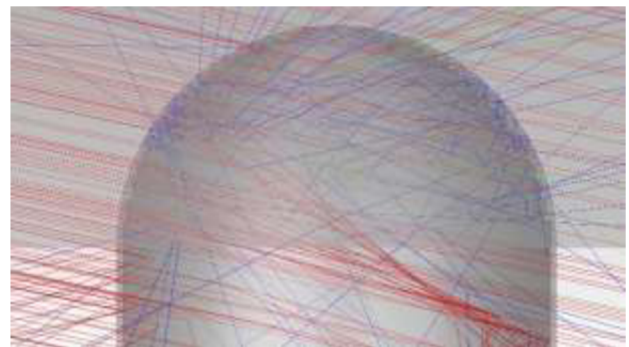
Specifikace: vroubkování na vnitřní straně (efekt Fresnelovy čočky), vnější strana hladká polokoule

Pohlčení paprsků z oblohy: oproti ostatním tvarům kopulí, velmi dobře zachycuje ranní paprsky

Světelný tok na difuzoru: ráno velký, poté narůstá velmi pomalu oproti ostatním tvarům kopulí

Účinnost: 18 % – 25 %

Doporučení: nejvhodnější pro zachování konstantního světelného toku po celý den, nevhodné pro zatažené oblohy



Obrázek 20 - TracePro světlovod s vroubkovanou kopulí

### 8.2.3.6 Kopule se zrcátkem



Obrázek 21 - TracePro světlovod s kopulí se zrcátkem

Specifikace: Hladká polokoule na vnitřní straně je zakulacené zrcátko z reflexivního povrchu. Zkoušeno pro 2 varianty.

První - statické zrcátko natočené proti severní straně.

Druhá – zrcátko natočené proti slunečním paprskům.

Pohlčení paprsků z oblohy: zrcátko pomáhá zachycovat hlavně ranní paprsky

Světelný tok na difuzoru: v první variantě je světelný tok středně velký po celý den, druhé variantě zrcátko

zvyšuje světelný tok na difuzoru, hlavně pro ranní paprsky

Účinnost: 14 % – 30 %

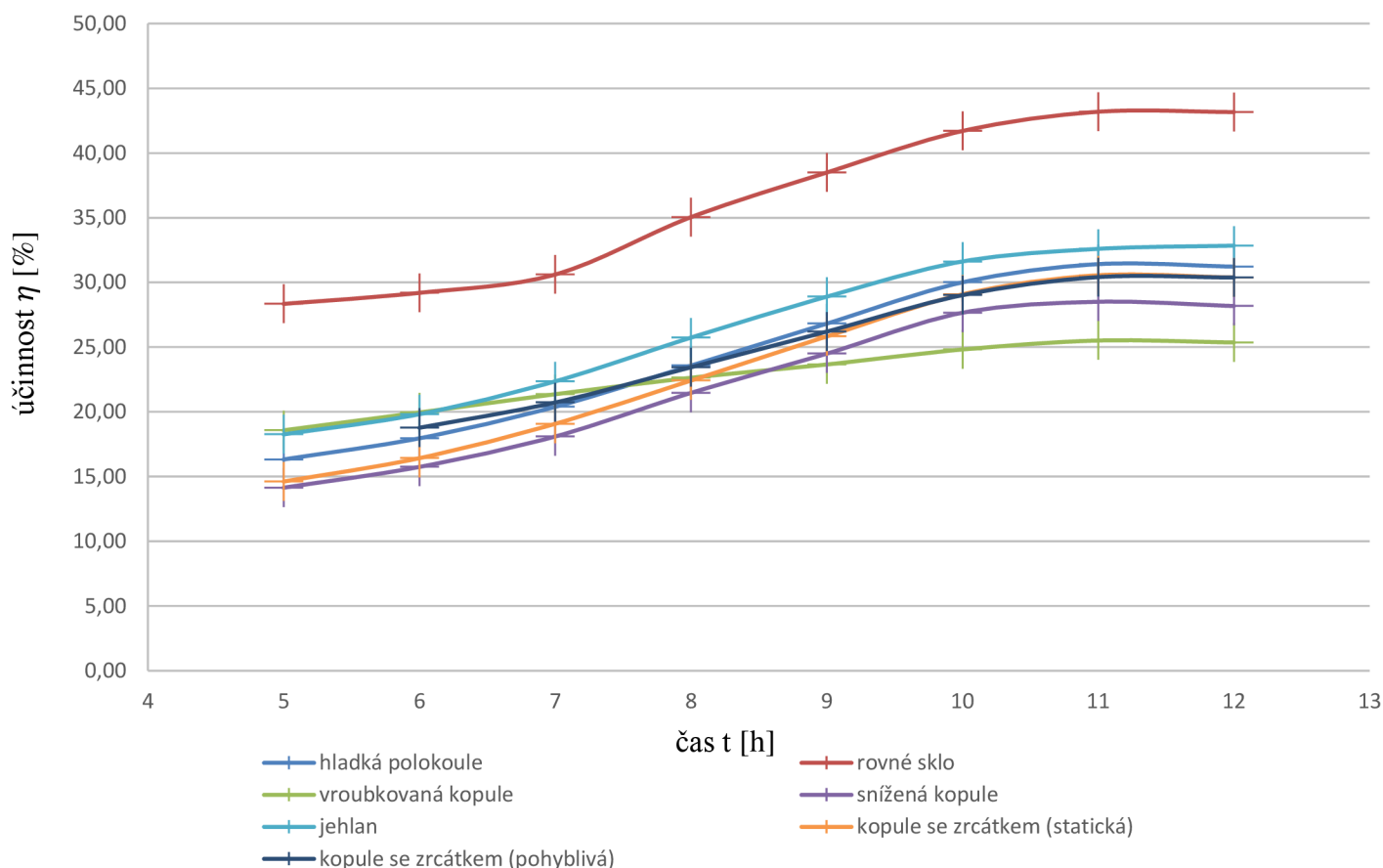
Doporučení: u první varianty nebyla zjištěna žádná přílišná výhoda, u druhé bychom mohli dojít ke zvýšení výkonu oproti ostatním kopulím, to ovšem by musel být aktivní osvětlovací systém

### 8.2.3.7 Zhodnocení

Stanovení tvaru kopule můžeme efektivně ovlivnit účinnost a světelný tok světlovodu. Na rozdíl od ostatních parametrů, které často již nelze ovlivnit (jako délka, průměr a tvar světlovodu), lze tvar kopule volit přesně dle potřeby. Snaha o zachycení slunečních paprsků, které kopule (co nejrovněji) pošle do světlovodu. Pro každé světelné podmínky má každá z typů kopulí své výhody i nevýhody. Proto tvar kopule by měl pro každou aplikaci být správně zvolen a má smysl se zabývat dalšími tvary kopulí.

Bylo testováno více tvarů kopulí. Na obrázku 22 můžeme pozorovat změny v průběhu dne, pro určité tvary kopulí. Graf je dle tabulky 8 v přílohách.

**Graf účinnosti světlovodů v průběhu dne u různých typů kopulí**



Obrázek 22 - Graf účinnosti kopulí světlovodu

### 8.2.4 Výsledky simulace – materiál kopule

Další simulace byla zaměřena na materiál kopule. Testovaný materiálem bylo: křišťálové sklo, křemenné sklo, Polykarbonát, PMMA

Tabulka 6 - nasimulované hodnoty účinnosti světlovodu v závislosti na materiálu kopule a denní době

materiál/čas	index lomu	5 h	6 h	7 h	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h
účinnost	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
křišťálové sklo	1,544	16,32	17,96	20,39	23,57	26,81	30,00	31,41	31,22
křemenné sklo	1,460	16,70	18,37	20,85	24,11	27,42	30,69	32,13	31,93
Polykarbonát	1,590	16,11	16,91	20,12	23,27	26,47	29,62	31,00	30,81
PMMA	1,494	16,55	18,21	20,67	23,90	27,18	30,42	31,84	31,65

Z výsledků nasimulovaných výsledků (viz tabulka 6) můžeme určit, že změna materiálů nemá na celkovou účinnost světlovodu velký vliv. O trochu větší účinnost mají materiály s nižším indexem lomu (křemenné sklo, PMMA). Volba materiálů kopule se tedy může řídit více ostatními vlastnostmi (odolnost, cena) než optickými vlastnosti.

### 8.2.5 Výsledky simulace – tloušťka kopule

Další kratší simulací byla změna tloušťky skla kopule. Simulováno bylo pro vrstvy od 1 mm do 10 mm.

Podle výsledků můžeme stanovit, že parametr tloušťka kopule nemá vliv na celkovou účinnost světlovodu. Volba tloušťky kopule se může volit dle požadavku - odolnost x materiál.

### 8.2.6 Výsledky simulace – odrazivý materiál tubusu

Abychom mohli analyzovat data, musíme si připomenout, že odrazivost materiálu není pro všechny úhly dopadu stejná. Stejně je tomu i tak pro různé vlnové délky a rozptyl paprsku po odrazu od materiálu. Povrch materiálu tedy lze jen těžko definovat. Z toho důvodu bylo využito pouze materiálů z knihovny TracePro. Byli vybrány materiály vhodné pro světlovodné tubusy:

Alanod 4270 GP (známý jako MIRO), Alanod 4200 GP, Alanod 4400 AG, Miro-27, perfektní zrcadlový odraz (pro porovnání).

Tabulka 7 - nasimulované hodnoty účinnosti světlovodu v závislosti na materiálu světlovodu

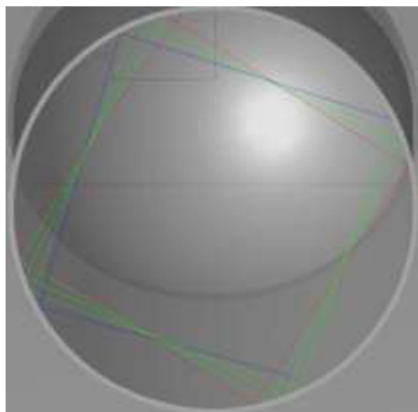
materiál	zářivý tok - kopule [W]	zářivý tok - difuzor [W]	účinnost [%]
Miro-4270 GP	2,12	0,50	23,57
Alanod 4200 GP	2,12	0,50	23,63
Alanod 4400 AG	2,12	0,37	17,28
Miro-27	2,12	0,39	18,34
perfektní zrcadlo	2,12	1,11	52,57

Z výsledku můžeme vidět, že odrazivost tubusu velmi závisí na typu odrazivého materiálu. Ale ani s ideálním zrcadlovým odrazem nedosáhneme 100% účinnost. Což nám udává maximální

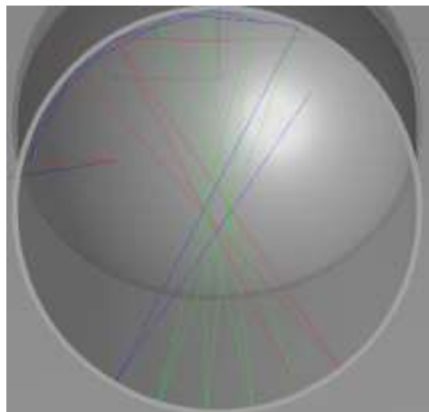


účinnost, kterou jsme schopni dosáhnout pomocí ideálního odrazného materiálu. Co nemůžeme ovlivnit odrazivostí materiálu jsou paprsky dopadající na kopuli, které se částečně odrazí zpět. Dále paprsky procházející kopulí, bez nasměrování do světlovodu.

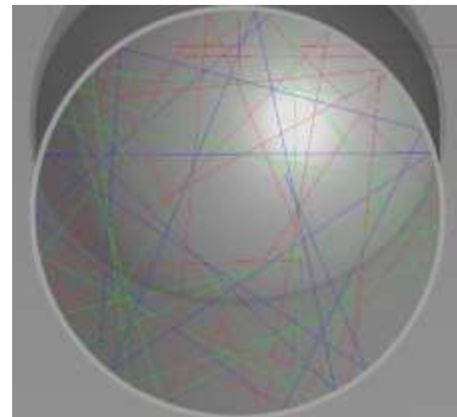
Způsob, jakým se paprsky odráží ve světlovodu je velmi odlišný. Zde je pár příkladů:



Obrázek 25 – TracePro čtvercové šíření paprsků světlovodem



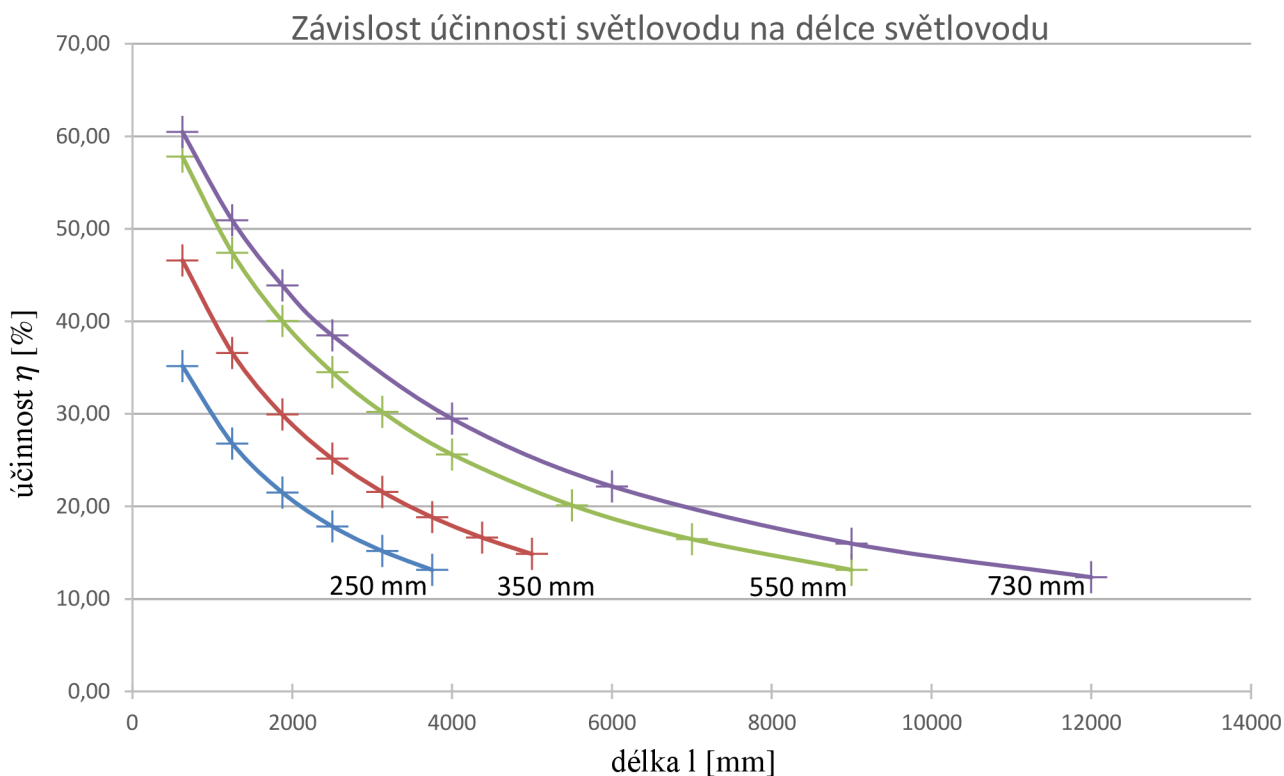
Obrázek 23 - TracePro přímé šíření paprsků světlovodem



Obrázek 24 - TracePro náhodné šíření paprsků světlovodem

### 8.2.7 Výsledky simulace - délka a průměr světlovodu

Dalším sledovaným parametrem byla délka a průměr světlovodného tubusu. Byli vybrány průměry světlovodu: 250 mm, 350 mm, 550 mm a 730 mm. Délka se měnila pro jednotlivé průměry v průběhu simulace.



Obrázek 26 - Graf účinnosti světlovodného tubusu

U větších průměrů světlovodu, a při stejné délce světlovodů, se paprsky nemusí tolikrát odrazit. Proto jednoznačně s rostoucím průměrem nám roste i účinnost světlovodu. Při stejném průměru světlovodu a mění se délce světlovodu, nám klesá účinnost ze stejného důvodu. Při přenosu světla na větší vzdálenost dochází k více odrazům. Průběh měnící se účinnosti můžeme vidět na obr 26.

Důležité je si také uvědomit že podle vztahu pro světelný tok světlovodu (kap. 8.1.3) narůstá světelný tok (procházející světlovodem) s průměrem světlovodu kvadraticky. Takže nejen světlovody s větším průměrem mají větší účinnost, ale i propouští mnohem více světelného toku, který můžeme použít pro osvětlování.

Pro dlouhé světlovody, má odrazivý materiál tubusu největší vliv na účinnost světlovodu. Pro stanovený průměr nám udává maximální efektivní délku světlovodu.

### 8.2.8 Výsledky simulace - tvar tubusu

Simulace byla provedena při světlovodu dlouhém 2 m a při různé kombinaci kolen světlovodu, sklonů střech a světových stran. Cílem simulace bylo ověřit, jak se mění účinnost světlovodu v závislosti na úhlu kolene. Jednotlivé simulace a výsledky si přiblížíme. Tabulky s nasimulovanými hodnotami naleznete v přílohách.

#### 8.2.8.1 Rovná střecha, koleno na začátku světlovodu

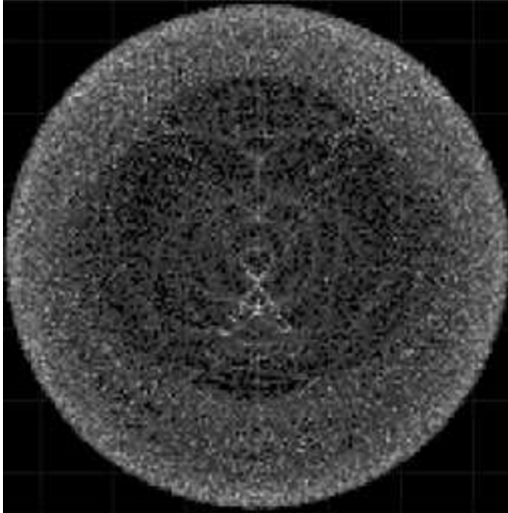
Účinnost světlovodu je velmi proměnlivá v závislosti na denní době, úhlu kolene a pod jakým úhlem dopadají sluneční paprsky. Dochází zde často k jevu, při kterém koleno nesnižuje účinnost světlovodu, ale naopak jej zvyšuje. Např. u kolen  $30^\circ$  pokud je ve 12 h natočeno ve směru slunečních paprsků světelný tok na difuzoru je o 10 % větší než při rovném světlovodu. Ovšem při nižší výšce slunce (v 8 h) u kolene  $30^\circ$  ve směru slunečních paprsků je světelný tok o 30 % menší. Naopak, pokud by bylo koleno natočeno proti směru dopadajících slunečních paprsků, světelný tok by byl opět o 10 % větší než při rovném světlovodu. Čím úhel kolene na začátku světlovodu větší, tím jsou tyto výchyly, oproti rovnému světlovodu, větší.

Bylo simulováno pro kolena  $30^\circ$  a  $60^\circ$  při slunečních paprscích ve směru kolene, proti němu a otočenému o  $90^\circ$ .

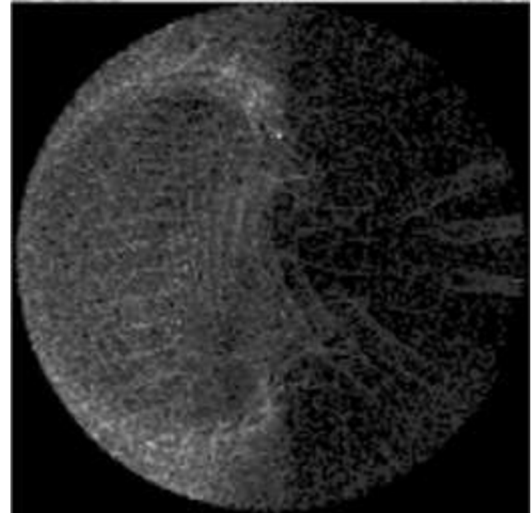
#### 8.2.8.2 Rovná střecha, koleno na konci světlovodu

Účinnost světlovodu v tomhle případě se neliší tolik od rovného světlovodu bez kolene. Změna účinnosti světlovodu mírně klesá s úhlem kolene. Naopak dochází zde k nerovnoměrnému rozložení světelného toku na difuzoru. Koleno na konci světlovodu způsobuje zhušťování paprsků v dolní části difuzoru.

Bylo simulováno pro kolena  $30^\circ$  a  $60^\circ$ . Natočení slunečních paprsků vůči kolenu nemělo vliv na celkovou účinnost.



Obrázek 27- TracePro rovnoměrné rozložení světelného toku na difuzoru



Obrázek 28- TracePro nerovnoměrné rozložení světelného toku na difuzoru

### 8.2.8.3 Šikmá střecha, rovný světlovod bez kolene

Zde se jedná, o částečné zakrytí oblohy střechou. Pokud však vstup do světlovodu je ve střešní manžetě, dochází jen k minimální ztrátě světla, a tedy účinnost světlovodu se nemění. Instalování těchto světlovodů by mělo být na severní, nebo jižní střeše. Při instalaci na východní, nebo západní střeše by mohlo dojít v brzkých ranních či večerních hodinách zastínění slunečních paprsků, když je potřebujeme nejvíce.

### 8.2.8.4 Šikmá střecha, koleno na začátku světlovodu

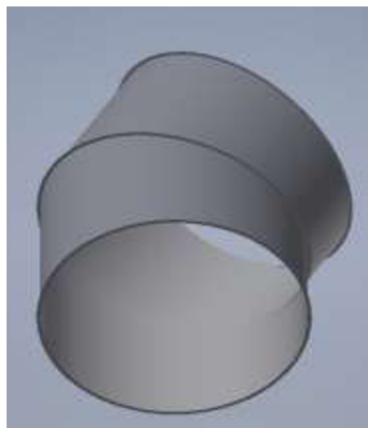
Účinnost světlovodu je velmi závislá na denní době a světové straně. Pokud je světlovod instalován na severní straně, účinnost světlovodu je velmi podobná, jako u rovného světlovodu. Při instalaci na východní straně dosáhneme většího světelného toku a účinnosti světlovodu v ranních hodinách. Naopak večer již zachycuje jen velmi málo paprsků. Opačný jev nastává se světlovodem na západní straně. Na jižní střechu se takové světlovody nevyplatí vůbec instalovat.

Bylo simulováno pro kolena a náklony střech  $30^\circ$  a  $45^\circ$ , vždy tak, aby difuzor byl v horizontální poloze. Simulace proběhla pro všechny světové strany.

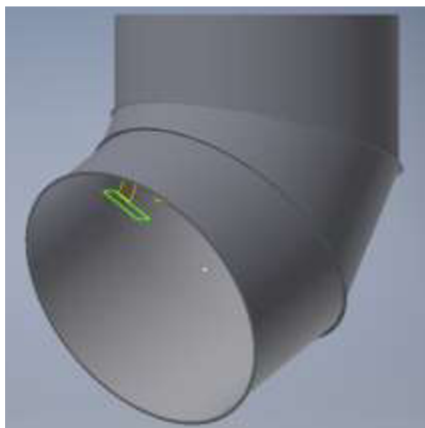
### 8.2.8.5 Šikmá střecha, koleno na konci světlovodu

Tahle simulace dopadla velmi podobně jako simulace v předchozí kapitole (kap. 8.2.8.4). Výsledky účinnosti a světelných toků jsou však ještě více závislé na denní době a světové straně.

Simulace opět proběhla s koleny a náklony střech  $30^\circ$  a  $45^\circ$ , aby difuzor byl v horizontální poloze.



Obrázek 31- Autodesk Inventor - koleno 30°



Obrázek 30 - Autodesk Inventor – koleno 60°

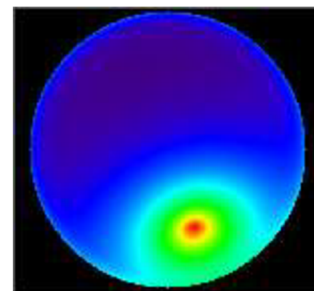


Obrázek 29 - Autodesk Inventor – koleno 90°

### 8.2.9 Výsledky simulace – obloha

Tahle simulace sice není o parametrech světlovodu, ale dává nám možnost porovnat jednotlivé simulace. Program TracePro obsahuje simulátor denní oblohy, který se může importovat jako zdroj pro simulaci. Rozložení jasu oblohy simuluje jiným a složitějším způsobem. Sluneční svit je rozdělen do více kruhových ploch s různým jasnem (viz obrázek 32).

Na základě těchto obloh byly opakovány předchozí simulace. Výsledky nových simulací v některých případech se liší od předchozích simulací. Mění hodnotu účinnosti světlovodů, ale trend změny účinnosti světlovodů zůstává stejný.



Obrázek 32- Obloha TracePro

## 9 ZÁVĚR

Osvětlování denním světlem pomocí světlovodů není v dnešní době příliš běžné. Většina lidí volí možnost osvětlovat denní světlem pomocí oken, které na rozdíl oproti světlovodům, mají přímý kontakt s okolím. Umělé osvětlení může světlovod nahradit pouze, pokud jsou vhodné parametry oblohy. Takže světlovody se používají jenom jako doplňkové osvětlení.

Výrobci světlovodů nám představují nejvíce používané světlovody a jejich komponenty. U světlovodů na trhu můžeme očekávat dobrou účinnost komponentů. Proto jsou nám podkladem pro simulace. Kromě účinnosti světlovodů musíme počítat i s životností, cenou jednotlivých komponentů.

Na základě simulací je možné rozdělit parametry na ty, které mají na účinnost světlovodů větší nebo menší vliv. Malý vliv mají parametry jako jsou materiál a tloušťka kopule. Odrazivost materiálu má sice velký vliv na účinnost dlouhých světlovodů. Ovšem firmy používají velmi účinné materiálu pro odrazivost světlovodného tubusu, a proto rozdíly použití jednotlivých materiálů nejsou tak velké.

Další parametr, který může a nemusí mít vliv na účinnost, je tvar tubusu. Průměrně největší účinnosti dosáhneme u rovného světlovodu. Při použití kolene jej můžeme umístit buď na začátek tubusu, nebo na jeho konec. Pokud tak učiníme na začátku světlovodu účinnost a světelný tok se nám velmi bude měnit v průběhu dne. Toho můžeme využít, pokud chceme dosáhnout většího světelného toku v určité části dne. Pokud ovšem umístíme koleno na konec světlovodného tubusu dosáhneme větší průměrné účinnosti, ale za cenu nerovnoměrného světelného toku vyzařujícího z difuzoru.

Parametr tvar kopule nám, také významně ovlivňuje účinnost světlovodů. Při vhodném tvaru kopule nedochází pouze k zachycení paprsků, ale také k jejich nasměrování do světlovodného tubusu. To ovlivňuje velmi účinnost světlovodu. Každý tvar kopule směřuje do světlovodu paprsky při jiné výšce slunce (denní době). Z toho vyplývá, že má smysl se zabývat dalšími tvary kopulí i v budoucnu.

Poslední parametr, který má největší vliv na účinnost a světelný tok světlovodu, je délka a průměr světlovodného tubusu. Maximální efektivní délka světlovodu je dána průměrem světlovodu a odrazivostí materiálu světlovodného tubusu. S rostoucím průměrem světlovodu nám nejen se zvyšuje účinnost, ale také kvadraticky narůstá světelný tok procházející světlovodem.

Výsledků bakalářské práce může být využito při návrhu osvětlování světlovody. Vhodná volba jednotlivých komponentů světlovodu může přispět k efektivnímu řešení pro zadané podmínky a k nejvhodnějšímu řešení pro uživatele.

## POUŽITÁ LITERATURA

### Knihy

- [1] DARULA, S. et al. Osvětlování světlovody. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a.s., 2009. 160 s. ISBN 978-80-247-2459-1.
- [2] HABEL, J. A. KOL. Světelná technika a osvětlování. FCC Public, Praha 1995, 448 stran, ISBN 80-901985-0-3
- [3] WILDA L. ELEKTIRCKÉ ZAŘÍZENÍ I ELEKTRICKÉ SVĚTLO, SKRIPTA STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÉ ŠKOLY ELEKTROTECHNICKÉ BRNO, KOUNICOVA 16, 88 STRAN

### Vědecko-kvalifikační práce

- [4] ZAJÍČEK, J. Využití dutých světlovodů pro osvětlování. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 73 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.
- [5] NEKVAPIL, J. Vliv optických prvků na účinnost světlovodu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 114 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Škoda, Ph.D.
- [6] PUDIVÍTR, Petr. *Praktické úlohy z astronomie* [online]. Praha, 2001 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: [http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~puda/ulohy/dipl\\_pp/01.htm](http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~puda/ulohy/dipl_pp/01.htm). DIPLOMOVÁ PRÁCE. MFF UK v Praze. Vedoucí práce Doc. RNDr. Marek Wolf, CSc.

### Normy

- [7] ČSN 73 0580 - 4. Denní osvětlení budov: část 4: Denní osvětlení průmyslových budov. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1994

### Elektronické texty

- [8] ŠKODA, Jan. *Měření prostorového úhlu* [online]. VUT v Brně, c2012 [cit. 2018-10-26]. Dostupné z: [HTTP://WWW.UEEN.FEEC.VUTBR.CZ/LIGHTLABORATORY/FILES/SYLABUS/72\\_MERENI\\_PROSTOROVEHO\\_UHLU.PDF](HTTP://WWW.UEEN.FEEC.VUTBR.CZ/LIGHTLABORATORY/FILES/SYLABUS/72_MERENI_PROSTOROVEHO_UHLU.PDF)
- [9] KUŽEL, Jaroslav. *Měření osvětlení* [online]. SZU Praha [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/mereni-osvetleni--16601>
- [10] PIHAN, Roman. *VYVÁŽENÍ BÍLÉ NA DSLR* [online]. © 2013 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: [http://www.fotoroman.cz/tech1/light\\_white\\_balance.htm](http://www.fotoroman.cz/tech1/light_white_balance.htm)
- [11] REICHL, Jaroslav. *Encyklopedie fyziky: Fotometrické veličiny* [online]. C2006-2018 [cit. 2018-10-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-FOTOMETRICKE-VELICINY>
- [12] ROSSEN, Erik. *The Rossen Mini-Heliostat FAQ* [online]. c2000 [cit. 2018-10-27]. Dostupné z: <http://www.rossen.ch/solar/miniheliostatfaq.html>
- [13] BRANDEJSKÝ, Petr. *Přirozené světlo v interiéru: odrazné plochy* [online]. 1. 3. 2017 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/4192.prirozene-svetlo-v-interieru-odrazne-plochy>

- [14] KÓMAR, Ladislav a Miroslav KOCIFAJ. *Optics of hemispherical top dome and its effect on tubular light-guide efficiency: diffuse light case* [online]. , 27 [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: [HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/PROFILE/MIROSLAV\\_KOCIFAJ/PUBLICATION/235522183\\_OPTICS\\_OF\\_HEMISPHERICAL\\_TOP\\_DOME\\_AND\\_ITS\\_EFFECT\\_ON\\_TUBULAR\\_LIGHT\\_GUIDE\\_EFFICIENCY\\_DIFFUSE\\_LIGHT\\_CASE/LINKS/59DF5A5145851593BEA666BD/OPTICS-OF-HEMISPHERICAL-TOP-DOME-AND-ITS-EFFECT-ON-TUBULAR-LIGHT-GUIDE-EFFICIENCY-DIFFUSE-LIGHT-CASE.PDF](https://www.researchgate.net/profile/Miroslav_Kocifaj/publication/235522183_OPTICS_OF_HEMISPHERICAL_TOP_DOME_AND_ITS_EFFECT_ON_TUBULAR_LIGHT_GUIDE_EFFICIENCY_DIFFUSE_LIGHT_CASE/LINKS/59DF5A5145851593BEA666BD/OPTICS-OF-HEMISPHERICAL-TOP-DOME-AND-ITS-EFFECT-ON-TUBULAR-LIGHT-GUIDE-EFFICIENCY-DIFFUSE-LIGHT-CASE.PDF)
- [15] *Barva světla – teplota chromatičnosti* [online]. [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: <https://www.dum-svitidel.cz/barva-svetla-teplota-chromaticnosti-k.htm>
- [16] PŘIBÁŇOVÁ, Henrietta a Ariana LAJČÍKOVÁ. *Umělé osvětlení vnitřního prostředí* [online]. 3.1.2003, 1 [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/osvetleni/1303-umele-osvetleni-vnitriho-prostredi>
- [17] KAŇKA, Jan. *Požadavky na denní osvětlení budov* [online]. 12.12.2016, 1 [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/denni-osvetleni-a-osluneni/15093-pozadavky-na-denni-osvetleni-budov>
- [18] *Posouzení denního osvětlení* [online]. [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: <http://webmium.blob.core.windows.net/users/103484/assets/26953be40868aa4df2dc93ad9b1d625c/02ukazkovyposudekdennihoosvetlenikestazeni.pdf>
- [19] KUŽEL, Jaroslav. *Měření osvětlení* [online]. SZU Praha [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/mereni-osvetleni--16601>
- WWW stránka**
- [20] *Křišťálové světlovody Lightway* [online]. [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://www.lightway.cz/cesky/o-svetlovodech.html>
- [21] *TracePro* [online]. ©2018 [cit. 2018-11-16]. Dostupné z: <https://www.lambdares.com/tracepro/#applications>
- [22] *Světlovody: Shrnutí vlastností světlovodů* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.grescha.cz/svetlovody.html>
- [23] *Světlovody FAKRO* [online]. [cit. 2018-10-27]. Dostupné z: <http://www.svetlovody-montaze.cz/produkty/svetlovody-fakro>

## PŘÍLOHY

Tabulka 8 - Trh se světlovody

	<b>Firma</b>	<b>Značka</b>	<b>Odrazný materiál</b>
	[-]	[-]	[-]
1	ABC - American Bohemian Corporation s. r. o.	Sunizer	vrstva stříbra a ALONOD MIRO 27 SILVER/4270 AG
2	FAKRO CZECH s. r. o.	Fakro	-
3	Lightway s. r. o.	Lightway	-
4	Sunway s. r. o.	Sunway	-
5	WT-Windows Tomorrow s. r. o.	Solatube	SpectraLight Infinity
6	Velux	Velux	-
7	Allux		-
9	Columbia Skylights		-
10	CiralightGlobal, Inc.		
11	Elite Solar Systems	Phoenix	MIRO-SILVER

	<b>Účinnost odrazu</b>	<b>Technický list</b>	<b>Prodlužovací tubus</b>	<b>Tvar nástřešní části</b>	
	[%]	A/N	[mm]		
1	>98,0	A	415/620/1250	Rovná, plast	Kopule
2	-	N	610	Rovné, sklo	Kopule
3	99,7	A	416/625/1250	zakulacená, segmentová	Kopule
4	99,8	N	-	-	Kopule
5	99,7	A	600/1200	Kolektor s vnější kopulí	Kopule
6	98,0	A	620/1240	Rovné, sklo	Kopule
7	98,2	N	-	-	sférická Kopule
9	98,0	N	-	Rovné sklo	Kopule
10	-	A	-	-	Kopule
11	98,0	A	-	-	Kopule



	Materiál kopule			Difuzory	
	PMMA (Plexi)	Polykarbonát	Sklo (jaké)	Plast (jaký)	Sklo (jaké)
1	A	A	N	ABS PMMA	N
2	N	A	A(integrované)	-	-
3	A	A	A(kříšťalové)	PMMA	Sodnodraselné
4	-	-	-	-	Dvojsko plněné Argonem
5	A	A	N	PMMA	Temperované mléčné
6	A	N	N	Polykarbonát (vnitřní)	Sklo (pohledový)
7	N	A	N		Akrilové
9	-	-	-	-	-
10	N	A	N	PMMA,Polycarbonate	N
11	-	-	-	-	-

Řada průměrů						
[mm]						
1	230	330	430	530	730	
2	250	350	550			
3	192	262	371	520	754	1159
4	260	360	560	780		
5	250	350	530	740		
6	250	350				
7	250	350	550	850		
9	(10) 250	(13) 330	(18) 508	21		
10	400	800				
11	6	(10) 250	(13) 330	(18) 508		

Tabulka 9 - účinnost světlovodu dle tvaru kopulí

Simulováno s oblohy TracePro, průměr světlovodu 350mm, délka světlovodu 2m

Tvar kopule	čas	5 h	6 h	7 h	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h
účinnost		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
hladká polokoule		16,32	17,96	20,39	23,57	26,81	30,00	31,41	31,22
rovné sklo		28,34	29,19	30,61	35,04	38,49	41,69	43,18	43,16
vroubkovaná		18,58	19,95	21,36	22,64	23,66	24,82	25,51	25,36
snížená kopule		14,14	15,75	18,10	21,46	24,49	27,65	28,50	28,18
jehlan		18,26	19,82	22,36	25,73	28,90	31,62	32,59	32,84
kopule se zrcátkem(statická)		14,62	16,42	19,08	22,42	25,82	29,08	30,55	30,38
kopule se zrcátkem (pohyblivá)		-	18,77	20,72	23,44	26,20	29,01	30,41	30,38

Tabulka 10 - účinnost světlovodu dle délky a průměru světlovodného tubusu

Simulováno s oblohy TracePro, odrazivý materiál Alanod 4270 GP, výška slunce pro 8 h

průměr [mm]	délka [mm]	625	1250	1875	2500	3125	3750	4000
	účinnost	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
250		35,17	26,80	21,51	17,85	15,18	13,14	-
350		46,58	36,59	29,92	25,15	21,58	18,84	-
550		57,79	47,41	40,03	34,51	30,22	-	25,62
730		60,47	50,91	43,89	38,49	-	-	29,48

průměr[mm]	délka [mm]	4375	5000	5500	6000	7000	9000	12000
	účinnost	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
350		16,64	14,85	-	-	-	-	-
550		-	-	20,11	-	16,46	13,14	-
730		-	-	-	22,17	-	15,98	12,34

Tabulka 11 - účinnost světlovodu dle tloušťky kopule

Simulováno s vlastní oblohou, tvar kopule – půlkoule, výška slunce pro 8 h

tloušťka [mm]	zářivý tok – difuzor [W]	zářivý tok – kopule [W]	Účinnost [%]
1	3,8202	8,5654	44,600
2	3,8193	8,5654	44,590
3	3,8178	8,5654	44,572
4	3,8158	8,5654	44,549
5	3,8181	8,5654	44,576
7,5	3,8083	8,5654	44,461
10	3,8036	8,5654	44,407

Pozn. kvůli nepatrným rozdílům je výsledek potřeba uvést na více desetinných míst