



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 OPTICKÝCH PRVKŮ NA ÚČINNOST
SVĚTLOVODU**

INFLUENCE OF OPTICAL ELEMENTS ON THE TUBULAR SKYLIGHTS
EFFICIENCY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Nekvapil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Škoda, Ph.D.

BRNO 2017



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor Elektroenergetika
Ústav elektroenergetiky

Student: Bo. Jan Nekvapil
Ročník: 2

ID: 133386
Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Vliv optických prvků na účinnost světlovodu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte literární rešerší normativních předpisů pro oblast měření světlovodů.
2. Pokuste se na základě získaných poznatků změnit v laboratorních podmínkách účinnost světlovodu pro různé konfigurace.
3. V naměřených datech se pokuste najít vzájemné korelace, a je-li to možné, vyjádřete je matematicky či graficky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 22.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

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.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Vliv optických prvků na účinnost světlovodu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.“

Zde bych chtěl poděkovat svému vedoucímu panu Ing. Janu Škodovi, Ph.D. za jeho velkou pomoc, odborné vedení, cenné rady, náměty a připomínky při měření a vypracovávání této práce. Dále bych chtěl poděkovat také panu Ing. Stanislavu Sumcovi, Ph.D. za úpravy na programu ovládajícím goniofotometr. Zde bych poděkoval také panu doc. Ing. Stanislavu Darulovi, CSc. za jeho rady při konzultacích. Mé díky patří také panu doc. Ing. Petrovi Baxantovi, Ph.D. za jeho rady. Za pomoc a rady děkuji také panu Ing. Jaroslavu Štěpánkovi, panu Ing. Martinovi Motyčkov. V neposlední řadě děkuji také panu Ing. Josefovi Dohnalovi a Mgr. Janu Benáčkovi za pomoc při zápisu zdrojového kódu v programu Matlab. Rád bych poděkoval také za silnou podporu svým rodičům a přítelkyni.

V Brně dne: 22.05.2017

.....

Abstrakt

Tato práce řeší měření účinnosti světlovodů v laboratorních podmínkách při osvětlení takřka přímými světelnými paprsky. Dále se zabývá měřením spektrální odrazivosti odrazných materiálů dostupných na trhu v ČR. Cílem je porovnání účinnosti různých světlovodných tras mezi sebou a zjištění spektrálních vlastností odrazných materiálů. Světlovody byly změřeny pomocí krychlového integrátoru. Světelným zdrojem pohyboval automatický goniofotometr. Tok zdroje byl určen metodou zonálních toků. Data přepočtena v programu Matlab. Vyhodnocení je grafické i číselné. Výsledkem práce je jak porovnání vlastností odrazných materiálů pro světlovody, tak hodnocení účinnosti zadaných světlovodných tras. Na základě výsledků je možné vybrat optimální variantu při projektování trasy světlovodu.

Klíčová slova: dutý světlovod; měření účinnosti dutých světlovodů; účinnost dutých světlovodů; spektrální odrazivost; odrazné materiály;

Abstract

This thesis deals with the measurement of light tubes efficiency in laboratory conditions during lighting by almost direct light rays. It also deals with the measurement of the spectral reflectance of the reflective materials available on the Czech market. The comparison of the efficiency of different light routes and also the determination of the spectral qualities of different reflective materials are the aims of this thesis. The light tubes were measured by means of the cubic integrator. The light source was moved and manoeuvred by means of the automatic goniophotometer. The light source flow was determined by the method of the zonal flows. The data were calculated in the Matlab programme. The evaluation is both in the graphic and in the numeric forms. The result of the thesis is both the comparison of the reflective materials for light tubes qualities, and the evaluation of efficiency of the assigned light routes. The optimal variant can be then selected during designing of the light tubes route according to the results of the measurements.

Key words: hollow light guide; hollow light guides efficiency measurement; hollow light guide efficiency; spectral reflectance; reflective materials;

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD	14
2 HISTORIE	15
3 SVĚTELNĚ-TECHNICKÉ VELIČINY	16
3.1 RADIOMETRICKÉ VELIČINY	16
3.2 SOUVISEJÍCÍ POJMY	17
3.2.1 OBLOHA	17
3.2.2 BODOVÝ ZDROJ SVĚTLA.....	19
3.2.3 PROSTOROVÝ ÚHEL.....	19
3.2.4 INDEX PODÁNÍ BAREV	20
3.2.5 CITLIVOST LIDSKÉHO OKA	21
3.3 FOTOMETRICKÉ VELIČINY	27
3.3.1 SVĚTELNÝ TOK	27
3.3.2 SVÍTIVOST	27
3.3.3 JAS.....	30
3.3.4 OSVĚTLENOST	30
3.4 OPTICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ	31
3.4.1 LOM SVĚTLA (REFRAKCE).....	32
3.4.2 ODRAZ SVĚTLA (REFLEXE)	33
3.4.3 PROSTUP SVĚTLA (TRANSMISE)	35
3.4.4 POHLICENÍ SVĚTLA (ABSORPCE)	36
4 SVĚTLOVODY	37
4.1 AKTIVNÍ A PASIVNÍ SVĚTLOVODY	38
4.2 KONSTRUKČNÍ A OPTICKÉ ČÁSTI.....	40
4.2.1 NÁSTŘEŠNÍ KOPULE	40
4.2.2 SVĚTLOVODNÝ TUBUS	40
4.2.3 STROPNÍ KRYT (DIFUZOR)	41
5 PRAKTICKÁ ČÁST.....	43
5.1 Úvod.....	43
5.2 NEJISTOTY MĚŘENÍ.....	43
5.3 AKTUÁLNĚ POUŽÍVANÉ METODY MĚŘENÍ.....	44
5.3.1 MĚŘENÍ POMOCÍ SVĚTELNÉHO INTEGRÁTORU.....	44
5.3.2 METODA ZONÁLNÍCH TOKŮ	45
5.3.3 MĚŘENÍ VE VENKOVNÍM PROSTŘEDÍ – SROVNÁVACÍ METODA.....	46
5.4 AKTUÁLNĚ POUŽÍVANÉ METODY VÝPOČTU	47
5.4.1 PŘIBLIŽNÁ TABULKOVÁ METODA	47

5.4.2 SIMULACE A VÝPOČET POMOCÍ PROGRAMU	48
5.5 SPECIFIKACE MĚŘENÉHO SVĚTLOVODU	48
5.6 MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍ ODRAZIVOSTI VZORKŮ.....	50
5.6.1 ÚVOD	50
5.6.2 POSTUP MĚŘENÍ	50
5.6.3 VYHODNOCENÍ.....	52
5.7 MĚŘENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT SVĚTLOVODŮ	61
5.7.1 ÚVOD	61
5.7.2 SVĚTELNÝ ZDROJ	61
5.7.3 POSTUP MĚŘENÍ	64
5.7.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ.....	74
6 ZÁVĚR.....	79
LITERATURA	81
OBRÁZKY	83
PŘÍLOHA A	85
PŘÍLOHA B.....	88
PŘÍLOHA C	92

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Scéna oblohy (pohled ze Starého Lískovce, Brno, 2012, neupraveno)	19
Obr. 2: Znázornění prostorového úhlu (v obrázku $\varphi=2\cdot\beta$) [B].....	20
Obr. 3: Ukázka zkreslení barevného podání [I]	21
Obr. 4: Purkyňův efekt (ztmavnutí červené barvy při nízkém osvětlení) [J].....	22
Obr. 5: Poměrná spektrální citlivost normálního fotometrického pozorovatele [A].....	23
Obr. 6: Ukázka posunu cirkadiánního rytmu [M]	24
Obr. 7: Působení světla [N]	25
Obr. 8: Kruithofův diagram [K]	26
Obr. 9: Směrové vyzařování reflektoru [L].....	28
Obr. 10: Soustavy fotometrických rovin [O]	29
Obr. 11: Kopule Raybender 3000® [P]	32
Obr. 12: Sluneční varič [Q]	34
Obr. 13: Vzorník odrazných materiálů pro tubusy [C]	35
Obr. 14: Světlovod - nástřešní kopule, světlovodný tubus a stropní kryt [D].....	37
Obr. 15: Světlovod s přidavnými funkcemi, odvětráváním a přisvětlením [R]	38
Obr. 16: Heliostat [S]	39
Obr. 17: Typické tvary nástřešních kopulí [E].....	40
Obr. 18: Světlovodný tubus [F].....	41
Obr. 19: Difuzor Optiview® [G].....	42
Obr. 20: Měření světlovodu s kulovým integrátorem [T]	45
Obr. 21: Automatický goniofotometr v laboratoři	46
Obr. 22: Měření světlovodu ve venkovním prostředí [U].....	47
Obr. 23: Kopule Raybender® 3000 nasazená na světlovodu při měření	49
Obr. 24: Koleno světlovodu Brighten Up® série [H]	49
Obr. 25: Graf poměrných spekter zářivých toků vybraných typů světla	51
Obr. 26: Počet odrazů v přímém ideálním světlovodu délky 3000 mm.....	54
Obr. 27: Vypočtená účinnost v přímém světlovodu délky 1500 mm během roku.....	56
Obr. 28: Graf – odrazivost materiálů pro měřené spektrum světla	58
Obr. 29: Graf – odrazivost materiálů pro měřené spektrum světla – výřez	59
Obr. 30: Zdroj světla pro měření	62
Obr. 31: Světelný zdroj pro měření, paprsek zúžený iris clonou	63
Obr. 32: Měření křivek svítivosti na stejném světlovodu, vlevo bez clony, vpravo s ní ..	63
Obr. 33: Krychlový integrátor	64
Obr. 34: Stínítko v integrátoru, držák fotočlánku	65
Obr. 35: Ukázka oběhu světelného zdroje okolo kopule světlovodu.....	65
Obr. 36: Pravá polovina měřených bodů hemisféry.....	66
Obr. 37: Pohled na oběh světelného zdroje kolem kopule.....	67
Obr. 38: Ukázka z měření	68
Obr. 39: Měřicí pracoviště pro zjištění světelného toku zdroje	69
Obr. 40: Difuzor JustFrost se zacloněním skleněného okraje	70
Obr. 41: Měření křivky svítivosti pomocí ručně aretovaného goniofotometru.....	71
Obr. 42: Zobrazení zdánlivého pohybu slunce po obloze	72
Obr. 43: Ukázka výsledných obrázků	74
Obr. 44: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 1, pohled od severu (bod 270°).....	92

Obr. 45: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 1, pohled od jihozápadu	93
Obr. 46: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 2, pohled od severu (bod 270°).....	93
Obr. 47: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 2, pohled od jihozápadu	94
Obr. 48: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 3, pohled od severu (bod 270°).....	94
Obr. 49: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 3, pohled od jihozápadu	95
Obr. 50: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 4, pohled od severu (bod 270°).....	95
Obr. 51: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 4, pohled od jihozápadu	96
Obr. 52: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 5, pohled od severu (bod 270°).....	96
Obr. 53: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 5, pohled od jihozápadu	97
Obr. 54: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 6, pohled od severu (bod 270°).....	97
Obr. 55: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 6, pohled od jihozápadu	98
Obr. 56: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 7, pohled od severu (bod 270°).....	98
Obr. 57: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 7, pohled od jihozápadu	99
Obr. 58: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 8, pohled od severu (bod 270°).....	99
Obr. 59: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 8, pohled od jihozápadu	100
Obr. 60: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 9, pohled od severu (bod 270°).....	100
Obr. 61: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 9, pohled od jihozápadu	101
Obr. 62: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 10, pohled od severu (bod 270°).....	101
Obr. 63: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 10, pohled od jihozápadu	102
Obr. 64: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 11, pohled od severu (bod 270°).....	102
Obr. 65: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 11, pohled od jihozápadu	103
Obr. 66: Poměrná citlivost světlovodu BETA_1 – 1, pohled od severu (bod 0°).....	104
Obr. 67: Poměrná citlivost světlovodu BETA_1 – 1, pohled od jihu	104
Obr. 68: Poměrná citlivost světlovodu BETA_1 – 2, pohled od severu (bod 0°).....	105
Obr. 69: Poměrná citlivost světlovodu BETA_1 – 2, pohled od jihu	105
Obr. 70: Poměrná citlivost světlovodu BETA_1 – 3, pohled od severu (bod 0°).....	106
Obr. 71: Poměrná citlivost světlovodu BETA_1 – 3, pohled od jihu	106
Obr. 72: Poměrná citlivost světlovodu BETA_2 – 1, pohled od severu (bod 0°).....	107
Obr. 73: Poměrná citlivost světlovodu BETA_2 – 1, pohled od jihu	107
Obr. 74: Poměrná citlivost světlovodu BETA_2 – 2, pohled od severu (bod 0°).....	108
Obr. 75: Poměrná citlivost světlovodu BETA_2 – 2, pohled od jihu	108
Obr. 76: Poměrná citlivost světlovodu BETA_2 – 3, pohled od severu (bod 0°).....	109
Obr. 77: Poměrná citlivost světlovodu BETA_2 – 3, pohled od jihu	109
Obr. 78: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 1, pohled od severu (bod 0°).....	110
Obr. 79: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 1, pohled od jihu.....	111
Obr. 80: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 2, pohled od severu (bod 0°).....	111
Obr. 81: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 2, pohled od jihu.....	112
Obr. 82: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 3, pohled od severu (bod 0°).....	112
Obr. 83: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 3, pohled od jihu.....	113
Obr. 84: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 4, pohled od severu (bod 0°).....	113
Obr. 85: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 4, pohled od jihu.....	114

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Radiometrické veličiny	16
Tab. 2: Příklady hodnot A_c	27
Tab. 3: Přehled fotometrických veličin	31
Tab. 4: Tabulka výsledků měření celého spektra	53
Tab. 5: Tabulka rozdílů odrazivosti vzorků při jejich otáčení	60
Tab. 6: Skladba světlovodné trasy pro jednotlivá měření	68
Tab. 7: Znázornění výpočtu světelného toku zdroje	70
Tab. 8: Znázornění výpočtu světelného toku vycházejícího ze světlovodu.....	71
Tab. 9: Číslování světlovodných tras v obrázcích.....	75
Tab. 10: Účinnosti přímých světlovodů pro vybrané úhly dopadu světla.....	76
Tab. 11: Účinnosti zalomených světlovodů pro vybrané úhly dopadu světla.....	77
Tab. 12: Účinnosti krátkých světlovodů, soubor GAMA	78
Tab. 13: Uvedení celé tabulky (Tab. 8).....	85
Tab. 14: Znázornění poklesu odrazů při zvětšujícím se průměru světlovodu.....	88
Tab. 15: Znázornění poklesu světla pro přímý světlovod délky 1,5 m	89
Tab. 16: Znázornění poklesu světla pro přímý světlovod délky 3 m	90
Tab. 17: Znázorňující pokles světla pro přímý světlovod délky 6 m	91
Tab. 18: Poměrné účinnosti přímých světlovodů pro vybrané úhly dopadu světla	92
Tab. 19: Poměrné účinnosti zalomených světlovodů, soubor BETA_1 a BETA_2	103
Tab. 20: Poměrné účinnosti krátkých světlovodů, soubor GAMA	110

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka
$\Delta\phi_i$	Dílčí světelný tok prostorovým úhlem	lm
ϕ_Σ	Výsledný světelný tok zdroje	lm
E_S	Osvětlenost v integrátoru při zjišťování převodní konstanty	lx
$H_e(\lambda)$	Spektrální hustota záření	cd
$I_{\gamma,i;str}$	Střední svítivost v elementu prostorového úhlu	cd
R_w	Vážená neprůzvučnost – jednočíselná veličina odvozená vážením z průběhu neprůzvučnosti R pomocí směrné váhové křivky (viz ČSN 73 0532)	-
c_n	Rychlost světla ve vakuu	ms^{-1}
$\frac{l}{2}$	Délka tubusu, nutná k prvnímu odrazu při výpočtu	mm
r_T	Poloměr tubusu světlovodu	mm
θ_1	Úhel dopadu optického záření	°
θ_2	Úhel lomu optického záření	°
γ_S	Elevace slunce nad obzorem	°
γ_i	Úhel odklonu od hlavní osy světlovodu	°
η_{SV}	Účinnost světlovodu při vybraných podmínkách	%
η_{id}	Ideální účinnost přenosu světla světlovodem	%
$\eta_{\tau d}$	Účinnost průchodu paprsku difuzorem (= 90 %)	%
$\eta_{\tau k}$	Účinnost průchodu paprsku kopulí (= 90 %)	%
ρ_{D55Zr}	Integrační zrcadlová odrazivost materiálu pro spektrum D55	%
ρ_d	Složka s rozptylným odrazem, resp. velikost difuzního rozptylu	-; %
ρ_r	Složka se zrcadlovým odrazem, resp. zrcadlového odrazu	-; %
ρ_λ	Spektrální činitel odrazu	-
τ_{nor}	Je činitel prostupu světla při kolmém dopadu	-
τ_ψ	Představuje směrový činitel prostupu světla pro daný úhel dopadu	-
ψ		
ϕ_S	Světelný tok světlovodu ALFA 2 při poloze zdroje v hlavní ose	lm
ϕ_{SV}	Světelný tok libovolné varianty světlovodu	lm
ϕ_Z	Světelný tok zdroje pro měření	lm
ϕ_e	Zářivý tok	W
ϕ_{v1}	Světelný tok dopadající na povrch	lm
$\phi_{\rho,d}$	Světelný tok odražený difuzním odrazem	lm
$\phi_{\rho,r}$	Světelný tok odražený zrcadlovým odrazem na povrchu i uvnitř prostředí	lm
A	Sluneční meridián	°
A_c	Index cirkadiánního aktivačního účinku	-
a_{cv}	Činitel cirkadiánní účinnosti	-
A_S	Azimut od severu	°
$A-\alpha$	Soustava fotometrických polorovin	
$B-\beta$	Soustava fotometrických polorovin	
c až e	Parametry funkce indikatrix	-
$C(\lambda)$	Poměrná cirkadiánní účinnost	-
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování	
$C-\gamma$	Soustava fotometrických polorovin	
$D65$	Normalizované světelné spektrum o náhradní teplotě	

	<i>chromatičnosti 6500 K</i>	
E	<i>Osvětlenost</i>	lx
E_e	<i>Ozářenost (Intenzita ozáření)</i>	$W \cdot m^{-2}$
$E_{e\lambda}$	<i>Spektrální ozáření</i>	$W \cdot m^{-3}$
$E_{Sy\ AVG}$	<i>Hodnoty osvětlenosti měřené goniofotometrem s ruční aretací</i>	lx
f	<i>Frekvence</i>	Hz
$f_I(\gamma)$	<i>Charakteristická funkce svítivosti</i>	-
H	<i>Světlení</i>	$lm \cdot m^{-2}$
h'	<i>Délka zbývajících tubusu po prvním odrazu paprsku</i>	mm
I	<i>Svítivost</i>	
I_0	<i>Svítivost uvažovaného zdroje ve vztáhném směru, tj. obvykle ve směru kolmém k hlavní vyzařovací ploše svítidla</i>	cd
I_e	<i>Zářivost</i>	$W \cdot sr^{-1}$
I_o	<i>Intenzita dopadajícího světla</i>	lx
I_S	<i>Intenzita rozptýleného světla</i>	lx
I_γ	<i>Svítivost zjištěná z uvažovaného diagramu svítivosti, pod úhlem γ od vztáhného směru</i>	cd
J_e	<i>Radiozita</i>	$W \cdot m^{-2}$
K	<i>Převodní konstanta krychlového integrátoru</i>	
K_m	<i>Konstanta pro fotopické vidění, pro $\lambda = 555\text{ nm}$, $K_m = 683\text{ lmW}^{-1}$</i>	lmW^{-1}
L	<i>Jas</i>	$cd \cdot m^{-2}$
L_e	<i>Zář</i>	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$
$L_{e\lambda}$	<i>Spektrální zář</i>	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-3}$
M_e	<i>Intenzita vyzařování</i>	$W \cdot m^{-2}$
n	<i>Počet odrazů v tubusu (zaokrouhluje se směrem dolů na celá čísla)</i>	-
PC	<i>Polykarbonát</i>	
$PMMA$	<i>Polymethylmethakrylát - plexisklo</i>	
Q	<i>Zářivá energie</i>	J
S	<i>Plocha , na niž dopadá světelný tok</i>	m^2
$S. A. D.$	<i>Sezónní afektivní porucha</i>	
TTE	<i>Transmission tube efficiency, účinnost přenosu světla optickou komponentou</i>	
$V(\lambda)$	<i>Křivka vyjadřující poměrné světelné účinnosti monochromatického záření, pro fotopické vidění</i>	-
$V'(\lambda)$	<i>Křivka vyjadřující poměrné světelné účinnosti monochromatického záření, pro skotopické vidění</i>	-
Z	<i>Úhlová vzdálenost elementu oblohy od zenitu</i>	°
Z_S	<i>Zenitní úhel Slunce</i>	°
γ_1	<i>Odklon od hlavní osy přímého světlovodu</i>	°
$\Delta\rho$	<i>Procentuální rozdíl odrazivosti vzorků při pootáčení</i>	%
λ	<i>Vlnová délka světla</i>	nm
Φ_e	<i>Zářivý tok</i>	W
ψ	<i>Úhel natáčení světelného zdroje v rovině C</i>	°
ψ	<i>Natáčení paprsku v rovině měření</i>	°
ω	<i>Natáčení roviny měření vůči horizontu (vůči rovině příruby světlovodu)</i>	°
$X(\lambda)$	<i>Spektrum zářivého toku</i>	
Z	<i>Úhlová vzdálenost slunce od zenitu</i>	°
c	<i>Rychlost světla ve zkoumaném optickém prostředí</i>	ms^{-1}

dS	<i>Elementární plocha pro níž stanovujeme prostorový úhel</i>	m^2
$d\Omega$	<i>Elementární prostorový úhel</i>	sr
$f(\chi)$	<i>Funkce indikatrix</i>	
$n(\lambda)$	<i>Index lomu optického prostředí</i>	-
r	<i>Vzdálenost mezi středem elementární plochy a místem pozorování pro prostorový úhel</i>	m
α	<i>Pohlčení světla</i>	-
β	<i>Úhel, který svírá normála elementární plochy s osou prostorového úhlu, $\varphi=2\cdot\beta$</i>	°
γ	<i>Výška elementu oblohy nad horizontem</i>	°
ρ	<i>Činitel odrazu, činitel smíšeného odrazu</i>	-
τ	<i>Prostup světla</i>	-
$\varphi(Z)$	<i>Gradační funkce</i>	-
χ	<i>Úhlová vzdálenost plošky oblohy od polohy Slunce</i>	°
ϕ	<i>Celkový světelný tok</i>	lm

1 ÚVOD

Život na Zemi se vyvinul v prostředí osvětleném slunečním svitem. Denní světlo je součástí přirozeného prostředí, v němž se člověk s ostatními organismy vyvíjel a přizpůsobil se mu. Pravidelné střídání dne a noci řídí a usměrňuje biorytmy v lidském těle. Kromě intenzity osvitů je důležitá také doba insolace člověka. Moderní společnost je však stále více vytržena z přirozeného prostředí a lidé tráví většinu času dne v prostředí uměle vytvořeném. Nedostatek denního světla a působení umělého osvětlení se může projevit narušením vnitřních hodin člověka, tzv. cirkadiánních rytmů, což je pro tělo stresová situace (prof. Illnerová). V horším případě, při silném nedostatku denního světla, dojde k silnému narušení „vnitřních hodin člověka“, což může vyústit až k sezónní afektivní poruše neboli S. A. D. Toto se projevuje dlouhodobou únavou až depresemi. Spektrální složení umělého světla je odlišné od světla slunečního a nedokáže jej plně nahradit. Světlo během dne podléhá dynamickým změnám, a proto nedokážeme vždy zabezpečit dostatečnou úroveň osvětlení pracoviště denním světlem. Na druhou stranu tyto změny osvětlení pozitivně působí na výkonnost pracovníka. Pro přisvícení používáme umělých zdrojů. Norma ČSN 36 0020 říká „Sdružené osvětlení při dlouhodobém působení není z hlediska vlivu na člověka rovnocenné v plném rozsahu, ale je podstatně příznivější, než osvětlení pouze umělé.“[1] „V budovách s trvalým pobytem lidí se musí co nejvíce využívat denního osvětlení, neboť je pro člověka nenahraditelné.“ [2] I z těchto důvodů vychází snahy ve stavebnictví o přivedení denního svitu do interiérů budov. V místech s nízkou úrovní denního osvětlení, či bez možnosti instalace oken nebo světlíků přichází na řadu elegantní řešení v podobě tubusových světlovodů.

Předkládaná diplomová práce ověřuje a zhodnocuje vliv optických částí na účinnost přenosu světla. Účinnost přenosu závisí na vlastnostech všech optických komponent systému pro efektivní přenos denního světla. Proto zde bude rozvedena jejich konstrukce. Výstupem práce jsou grafy znázorňující účinnost přenosu světla na tvaru světlovodné dráhy a přidružené tabulky. V rámci diplomové práce, která vychází ze semestrálního projektu, byly změřeny další vzorky odrazných materiálů určených pro světlovody.

2 HISTORIE

Myšlenka vedení denního světla do stavby je velmi stará. První dohledatelné pokusy pochází ze starověkého Egypta, kde se používaly svislé šachty vyložené zlatými pláty pro osvětlení nitra mohutných staveb. Jiným příkladem z historie je použití vedení světla z výkonného elektrického zdroje v opticky hustším prostředí, ve vodním paprsku, s použitím čoček. Takovými pokusy se zabýval prof. Colladon z Univerzity v Ženevě v roce 1841. Čikolev roku 1874 navrhl a zkonstruoval duté světlovody pro vedení světla z elektrických lamp do továrny na výrobu střelného prachu. Tím osvětlil pracoviště, ale odsunul obloukovou lampu mimo rizikové prostory továrny. Dále Neal a Lake roku 1878 rozvinuli způsoby vedení, přerozdělování a větvení světelného toku. Nor Hannenborg na přelomu 19. a 20. století podal patent na světlovodný systém pro budovu. Vývoj prostředků podílejících se na vedení světla pokračoval, ale po rozšíření elektrické žárovky na počátku 20. století se poněkud zastavil. Další vynálezy a patenty přichází více než o 50 let později. V roce 1965 Buchman použil světlovody s optickou štěrbínou, které svítí po celé délce. Ve spolupráci s Aizenbergem v roce 1975 přichází s vynálezem polopropustné fólie pro dlouhé duté světlovody a dále klínovým světlovodem. Od začátku 70. let se vývoj více zaměřuje na vedení denního světla oproti umělému z výkonného zdroje. Zastrow a Wittwer roku 1986 přináší světlovod z prizmatického polymeru s vysokou vnitřní odrazivostí. Dnes rozšířené světlovody vychází ze systému tubusového světlíku, který Sutton patentoval v roce 1986 a o šest let později jej vylepšil. Bixby si nechal patentovat natáčení světlovodu v roce 1996, Shao světlovod pro osvětlování a přirozené větrání v roce 1999, O'Neil kónický světlovod rozšiřující se směrem k osvětlovanému povrchu roku 2002. V současné době jsou již světlovody běžně dostupné a používají se k osvětlování v budovách. [3]

3 SVĚTELNĚ-TECHNICKÉ VELIČINY

Zrak je velmi důležitý lidský smysl, neboť člověk jím přijímá většinu informací o svém okolí. Světlo je elektromagnetické záření přesně vymezeného rozsahu vlnových délek, které jsme schopni detekovat okem.

Veličiny popisující elektromagnetické záření jsou radiometrické. Abychom získali veličiny fotometrické, uvažujeme spektrální citlivost normalizovaného lidského oka (viz následující podkapitoly). Zde jsou uvedeny světelně-technické veličiny, které se budou používat v rámci této práce. Proto je nutná jejich přesná definice.

3.1 Radiometrické veličiny

Radiometrické veličiny charakterizují přenos energie pomocí elektromagnetických vln.

Tab. 1: Radiometrické veličiny

Název veličiny	Značka	Jednotka	Popis
Zářivá energie	Q	J	Vyjadřuje (celkové) množství energie.
Zářivý tok	Φ_e	W	Energie přenesená zářením za jednotku času. Někdy označována jako zářivý výkon.
Zářivost	I_e	$W \cdot sr^{-1}$	Prostorová hustota zářivého toku vyzařovaného bodovým zdrojem. Při nerovnoměrném prostorovém rozložení zářivého toku platí vzorec viz ⁽¹⁾ .
Zář	L_e	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$	Prostorová a plošná hustota zářivého toku (v daném směru a v daném bodě na ploše vyzařující či ozářené nebo na dráze paprsků záření), platí viz ⁽²⁾ .
Ozářenost (Intenzita ozáření)	E_e	$W \cdot m^{-2}$	Plošná hustota zářivého toku dopadajícího na element plochy.
Intenzita vyzařování / zářivá exitance	M_e	$W \cdot m^{-2}$	Výkon vyzářený jednotkovou plochou do celého poloprostoru - udává plošnou hustotu světelného toku, který vyzařuje element plochy.
Radiozita	J_e	$W \cdot m^{-2}$	Součet vlastního vyzařování a intenzity odraženého záření z uvažované plochy.
Spektrální zář	$L_{e\lambda}$	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-3}$	Zář dané vlnové délky.
Spektrální ozáření	$E_{e\lambda}$	$W \cdot m^{-3}$	Ozáření dané vlnové délky.

Pozn. (1) $I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$ ($W \cdot sr^{-1}$; W; sr), (2) $L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega \cdot dA_N}$ ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$; sr; m^{-2}), [12]

3.2 Související pojmy

3.2.1 Obloha

Přirozený zdroj světla, slunce a obloha, mají společnou nevýhodu pro technické výpočty. Tato nevýhoda spočívá v neustálých změnách světelných podmínek z pohledu pozorovatele. Pro návrh světlovodu je však třeba znát nejhorší možné světelné podmínky v místě instalace pro zjištění minimálního přínosu pro osvětlovaný interiér. Na druhou stranu je třeba současně znát nejlepší podmínky v daném místě, neboť může docházet k přílišné intenzitě osvětlení v interiéru a oslnění osob.

Bylo potřeba vhodným způsobem uchopit, specifikovat a vybrat typické světelné podmínky, které nastávají kdekoli na světě. Slovenský vědec doc. Richard Kittler se velmi zasloužil při popisu oblohových scén. Jeho návrhy výpočtů, výzkum denní osvětlenosti v reálných podmínkách, popis zákalu a znečištění atmosféry, se staly podklady nyní schváleným normám. Na konferenci Sluneční světlo v budovách v Rotterdamu v roce 1967 představil návrh výpočtu rozložení jasů na jasné obloze. [17]

“Základem výpočtu denního osvětlení je určení jasu plošného elementu oblohy, který závisí i na jeho úhlové výšce nad horizontem nebo jeho úhlové vzdálenosti od zenitu (...).

$$Z = 90^\circ - \gamma \quad 3.1$$

kde Z je úhlová vzdálenost elementu oblohy od zenitu $[\circ]$,

γ je výška elementu oblohy nad horizontem $[\circ]$.

Umístění elementu na obloze určuje vertikální gradaci jasu pomocí gradační funkce $\varphi(Z)$, což vyjadřuje standardní vzorec v CIE, 2003 a také ISO, 2004 v rozmezí $0^\circ \leq Z \leq 90^\circ$:

$$\varphi(Z) = 1 + a \left(\frac{b}{\cos Z} \right), \quad 3.2$$

přičemž

$$\varphi(0^\circ) = 1 + a^b. \quad 3.3$$

A pro pozici u horizontu $\varphi(90^\circ) = 1$. (...)

Současně je důležité také určit úhlovou vzdálenost oblohového elementu od Slunce χ , která má vliv na rozptyl slunečního světla všemi směry do prostoru pomocí funkce indikatrix $f(\chi)$ popisující relativní rozptylovou indikatrix. Tato funkce se dá představit jako průřezová křivka symetrickým tělesem jasu fiktivního aerosolu. Na rozdíl od absolutní indikatrix je relativní ta, která má v kolmém směru na sluneční paprsek hodnotu 1. To se docílí, když jas v libovolném směru je dělen jasnem ve směru kolmém na sluneční paprsek.” (Darula, Kittler, str. 48)

„Pro výpočet úhlové vzdálenosti libovolné elementární plošky oblohy od momentální polohy Slunce χ se aplikuje vztah pro vzdálenost dvou bodů na kouli ze sférické geometrie:

$$\chi = \arccos(\cos Z_s \cos Z + \sin Z_s \sin Z \cos A), \quad 3.4$$

kde χ je úhlová vzdálenost plošky oblohy od polohy Slunce $[\circ]$,

Z_S a Z jsou zenitní úhly Slunce a elementu oblohy [°]

A je azimutální odklon orientace oblohového elementu od slunečního meridiánu [°].” (Darula, Kittler, str. 49)

Pro azimutální odklony od severu platí $A = |A_S - A_e|$. (A zde je uvedeno zjednodušení vztahu, které platí pro elementární plošku v zenitu a pro všechny elementy na horizontální kružnici v úrovni Slunce, pro níž platí $Z = Z_S$.) Následuje zjednodušení vztahu:

$$\chi = \arccos(\cos^2 Z_S + \sin^2 Z_S \cos A). \quad 3.5$$

Z jasů na almunkantarátu (všechny elementy na horizontální kružnici v úrovni Slunce) lze určit funkcí relativní indikatrix rozptylu. Z jasů skenu oblohy lze zjistit průběh gradační funkce. [3]

„Využitím těchto možností se určili na základě analýzy různých skenů jasů oblohy naměřených v Berkeley v Kalifornii, v Sydney a Tokiu ^(Kittler, 1998) parametry a , b pro gradační funkce $\varphi(Z)$, resp. c až e pro funkci indikatrix $f(\chi)$ potřebné ve výpočtech typických rozložení oblohových jasů

$$f(\chi) = 1 + c \left[d(\chi) - d\left(\frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 \chi. \quad 3.6$$

(Darula, Kittler, str. 50)

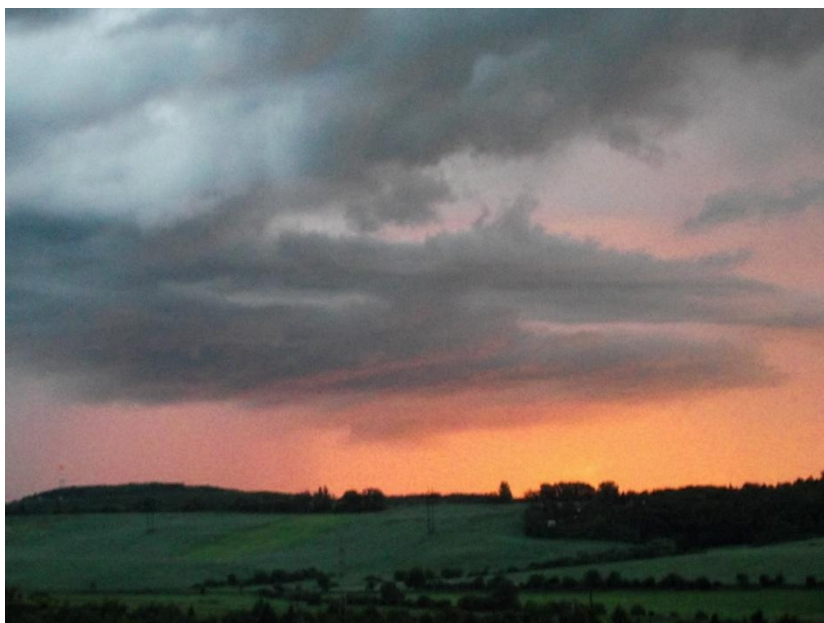
(Kittler, 1998) KITTLER, R., 1985. Luminance distribution characteristics of homogeneous skies: a measurement and úprediction strategy. Lighting Research and Technology, 17, 4, p. 183-188.

Funkce indikatrix i funkce gradační jsou součástí normy CIE S 011/E: 2003 / ISO 15469:2004, kde jsou také uvedeny parametry 15 standardních obloh.

Kromě pohybu Slunce a popisu oblohové scény je také nutné zmínit spektrální složení přírodního světla. Toto složení se dynamicky mění nejen dle denní doby, ale mění se také zakalení atmosféry a oblačnost. Atmosféra je spektrálně selektivní. (Pouze vlastním pozorováním během dne si můžeme povšimnout ranního a večerního zbarvení světla do červena - je pohlcena modrá složka.) To je způsobeno Rayleighovým rozptylem. Ten popisuje způsob rozptylu světla na částicích daleko menších než je vlnová délka světla. Lord Rayleigh dále zjistil, že poměr intenzity rozptýleného světla I_S a dopadajícího světla I_0 je nepřímo úměrný čtvrté mocnině vlnové délky λ , jak ukazuje následující vztah:

$$\frac{I_S}{I_0} = \frac{\text{konst.}}{\lambda^4} \quad (lx; lx; -; nm. \quad 3.7$$

Výstupem je vysvětlení, proč je obloha na Zemi modrá. Modré světlo se rozptyluje daleko více než světlo červené. Pokud částice svou velikostí překročí rozměry vlnové délky světla (prach, vodní pára – mlha), pak lze hovořit o Mieovu rozptylu. Pokud jsou částice stejně velké, převažuje některá z barev (červená, zelená), pokud jsou různě velké, vidíme barvu bílou (oblaka). [19]



Obr. 1: Scéna oblohy (pohled ze Starého Lískovce, Brno, 2012, neupraveno)

3.2.2 Bodový zdroj světla

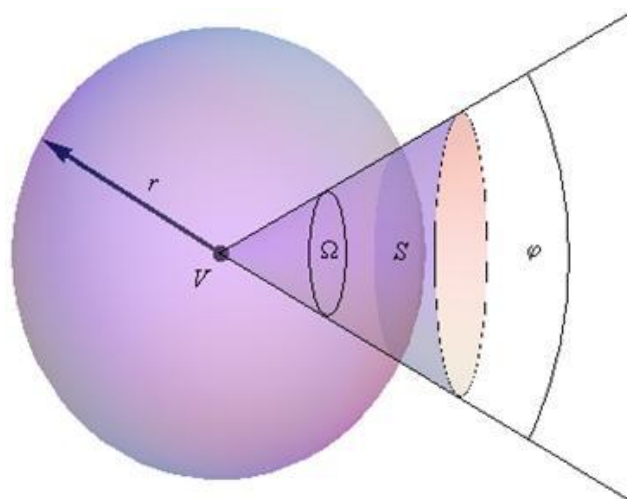
Bodový zdroj světla je definován jako takový zdroj, jehož největší rozměr lze v porovnání se vzdáleností pozorovatele zanedbat. V praxi se uvažuje vzdálenost rovna 5-10 násobku největšího rozměru světelně aktivní plochy svítidla/zdroje.

3.2.3 Prostorový úhel

Prostorový úhel je část prostoru vymezená obecnou kuželosečkou. Vrchol této kuželosečky je v místě středu vycházejícího záření. Jednotka prostorového úhlu je steradián. Jeho velikost je rovna ploše, kterou vytne kuželosečka na jednotkové kouli, je-li střed koule shodný se středem kužele. Pro celý prostor nabývá prostorový úhel maximální hodnoty 4π . Výpočet prostorového úhlu, kterým vidí pozorovatel elementární plochu z bodu:

$$d\Omega = \frac{dS \cdot \cos(\beta)}{r^2} \text{ (sr, m}^2, \text{m)}, \quad 3.8$$

kde	$d\Omega$	je elementární prostorový úhel,
	dS	je elementární plocha pro níž prostorový úhel stanovujeme,
	β	je úhel, který svírá normála elementární plochy s osou prostorového úhlu,
	r	je vzdálenost mezi středem elementární plochy a místem pozorování pro prostorový úhel. [8]



Obr. 2: Znázornění prostorového úhlu (v obrázku $\varphi=2\cdot\beta$) [B]

3.2.4 Index podání barev

„Vjem barvy určitého předmětu je v zásadě podmíněn jednak spektrálním složením záření zdroje osvětlujícího předmět, jednak spektrálním činitelem odrazu či prostupu pozorovaného předmětu. Vjem barvy je však ovlivněn i samotným zrakem, a to s ohledem na různou citlivost k jednotlivým barvám i s ohledem na stav adaptace zraku podle převládajícího druhu osvětlení zorného pole. Vzhledem k dlouholetému zvyku člověka na barevný vzhled předmětů v denním (přírodním), ale také žárovkovém světle se tato okolnost často stává i vžitou představou a vjem barvy předmětu v přírodním, resp. žárovkovém světle se běžně považuje za normální. Proto při pozorování předmětů ve světle výbojových zdrojů (s velmi odlišným spektrálním složením v porovnání s teplotními zdroji) může dojít ke značnému zkreslení vjemu barev osvětlených předmětů. Problémy vznikají v rozlišování barev a zejména v přizpůsobení barvy vyráběného předmětu barvě standardu, a to jak v běžném životě, tak i v obchodě a v průmyslové výrobě.“

„Vliv spektrálního složení světla zdrojů na vjem barvy osvětlených předmětů charakterizuje podání barev. Vjem barvy se přitom vědomě či nevědomě srovnává s jejich vzhledem ve světle smluvního či obvyklého zdroje světla. Při takto pojatém hodnocení barev se v souladu s doporučením Mezinárodní komise pro osvětlování neuvažují ani estetické, ani psychologické vlivy. K číselnému ocenění jakosti podání barev se využívá index podání barev, který vyjadřuje stupeň shodnosti vjemu barvy předmětů osvětlených uvažovaným zdrojem a barvy těchž předmětů osvětlených smluvním zdrojem světla za stanovených podmínek pozorování. Metoda hodnocení je založena na číselném vyjádření rozdílu vjemu barvy vybraného souboru osmi, popř. až čtrnácti barevných vzorků při postupném osvětlení uvažovaným a smluvním zdrojem světla. Výpočtem se stanovuje všeobecný index podání barev R_a .“ (Habel 2013, s. 128)



Obr. 3: Ukázka zkreslení barevného podání [I]

3.2.5 Citlivost lidského oka

Podobně jako lidské ucho vnímá akustickou intenzitu zvukového podnětu podle logaritmické závislosti, odezva oka na různé vlnové délky není stejná a popisuje jeho citlivost na optické záření. Tímto je vymezeno optické záření z širokého rozsahu elektromagnetických vln. Citlivost při dané vlnové délce se nazývá spektrální citlivost oka.

„Světločivnými receptory sítnice je $6 \cdot 10^6$ čípků a asi 20krát tolik tyčinek. Jsou rozmístěny rozdílně: v jamce uprostřed žluté skvrny (naproti otvoru zornice je sítnice mírně prohloubena - fovea centralis) jsou pouze čípky, jejichž hustota směrem k periferii rychle ubývá, zatímco tyčinky jsou nejvíce nahromaděny asi 30° okolo jamky ve žluté skvrně. Směrem k periferii sítnice se jejich hustota postupně snižuje z max. $1,5 \cdot 10^5 \text{ mm}^{-2}$ až na jednu třetinu.“ (Silbernagl 2004, s. 348) V místě vyústění zrakového nervu, kde nejsou žádné receptory, se nachází slepá skvrna.

Fotopické (denní) vidění je zajištěno barevně citlivými čípkami. Tyto receptory jsou určeny k vidění detailů při jasném osvětlení. *„V sítnici člověka jsou tři druhy čípků s rozdílnou maximální citlivostí: krátkovlnné (415 – 440 nm), středovlnné (520 – 540 nm) a dlouhovlnné (550 – 570 nm).“* (Rokyta 2000, s. 299) Pro jejich funkci je třeba dostatečná úroveň osvětlení sítnice. Nejvyšší citlivost těchto receptorů je při vlnové délce 555 nm.

Pro skotopické vidění (tj. vidění v noci) se tento vrchol posunuje směrem k modré části spektra na 507 nm. Skotopické vidění zajišťují tyčinky. *„Tyčinky umožňují černobílé vidění při špatném osvětlení, kdy je vysoká citlivost provázena ztrátou zrakové ostrosti.“* (Silbernagl 2004, s. 348) Největší citlivost tyčinkového pigmentu je v oblasti 500 nm.

Při přechodu, mezi denním a nočním viděním, nastává tzv. mezopické vidění, či vidění za šera. Tímto způsobem člověk vidí, pokud se jas okolních ploch pohybuje okolo 1 cdm^{-2} .

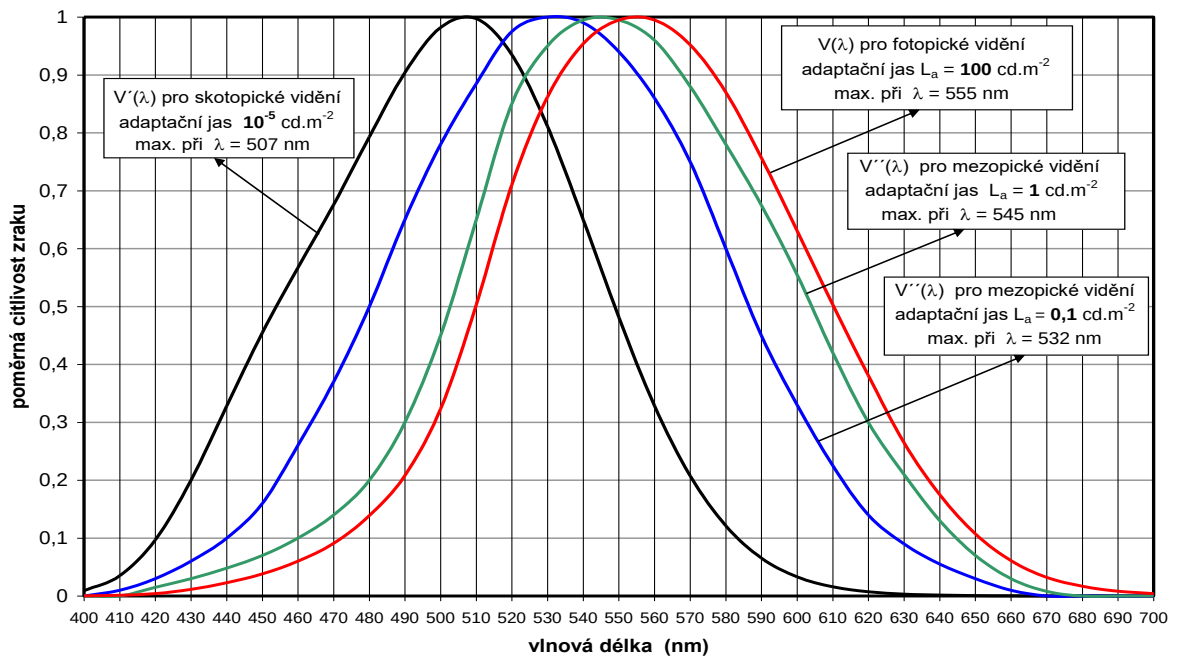
Citlivost lidského oka, tak jak byla změřena dle CIE (International Commission on Illumination), je popsána křivkami, jejichž maxima se liší, jak je vysvětleno výše (viz Obr. 4). To je způsobeno rozdílnou citlivostí senzorů na sítnici, čípků a tyčinek. Člověk tedy vidí barevně díky čípkům, které jsou nejvíce citlivé na rozdíly vlnových délek, a potřebují vyšší intenzitu světla k počítu. Za nízké intenzity ozáření se tedy projevují tyčinky, které mají svá maxima citlivosti v oblasti modrého světla. Proto vidíme okolní předměty jako „nebarevné“. Modré předměty jsou vnímány jasněji oproti červeným. Tento jev objevil český vědec Jan Evangelista Purkyně (tzv. Purkyňův efekt). „*Všiml si, že když se prochází za jarního večera rozkvetlou přírodou, mění se po západu slunce barvy květů; červené květy tmavnou, žluté blednou a modré naopak vidíme jasněji. Začal tento úkaz studovat soustavně a tak zjistil, že ke stejnému výsledku vede i pozorování jakýchkoli barevných objektů, které při silném vnějším osvětlení vidíme jako stejně jasné, ale při klesajícím osvětlení se modré plochy nebo body jeví světlejší než odpovídající plochy červené. Svému objevu věnoval i dizertaci, kterou obhájil r. 1818...*“ (Grygar 2011, s.238 - 239)

Spektrální citlivost oka je také ovlivněna adaptací, která se projevuje při mezopickém vidění. Tento jev ukazuje obrázek níže, kdy s klesajícím jasnem okolí dochází k posunu maxima citlivosti oka k nižším vlnovým délkám.



Obr. 4: Purkyňův efekt (ztmavnutí červené barvy při nízkém osvětlení) [J]

Křivky citlivosti oka normálního fotometrického pozorovatele přijala Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE), aby se zajistila jednotnost ve světelně-technických výpočtech. Tyto křivky vyjadřující poměrné světelné účinnosti monochromatického záření, označujeme pro fotopické vidění $V(\lambda)$ a pro skotopické vidění $V'(\lambda)$, reprezentují průměrné zdravé oko lidské populace. [7] [8]

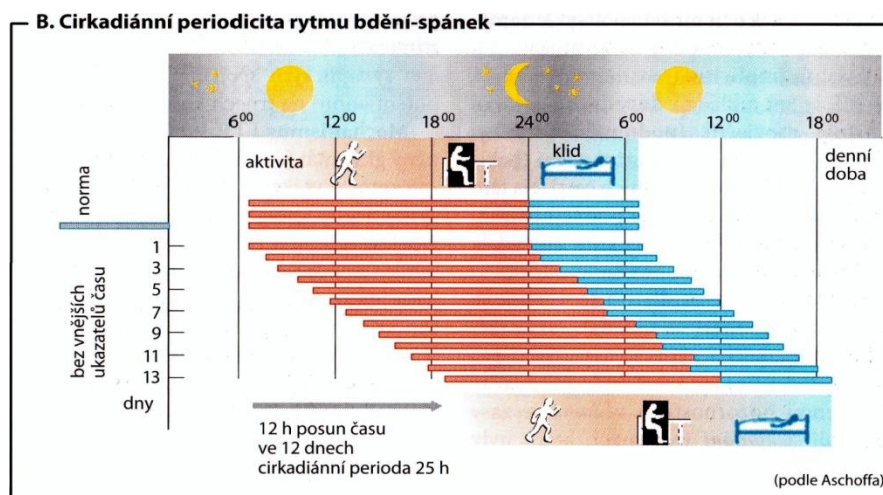


Obr. 5: Poměrná spektrální citlivost normálního fotometrického pozorovatele [A]

3.2.5.1 Biorytmy a cirkadiánní čidla

Funkce lidského těla, stejně jako všechny ostatní úrovně organizace živých soustav, se vyznačuje pravidelným kolísáním biologických pochodů. Toto soustavné opakování určitého děje v pravidelných intervalech se nazývá biorytmus. Perioda trvání biorytmů v našem těle je různá. Podle délky periody rozdělujeme tři typy biorytmů. [14]

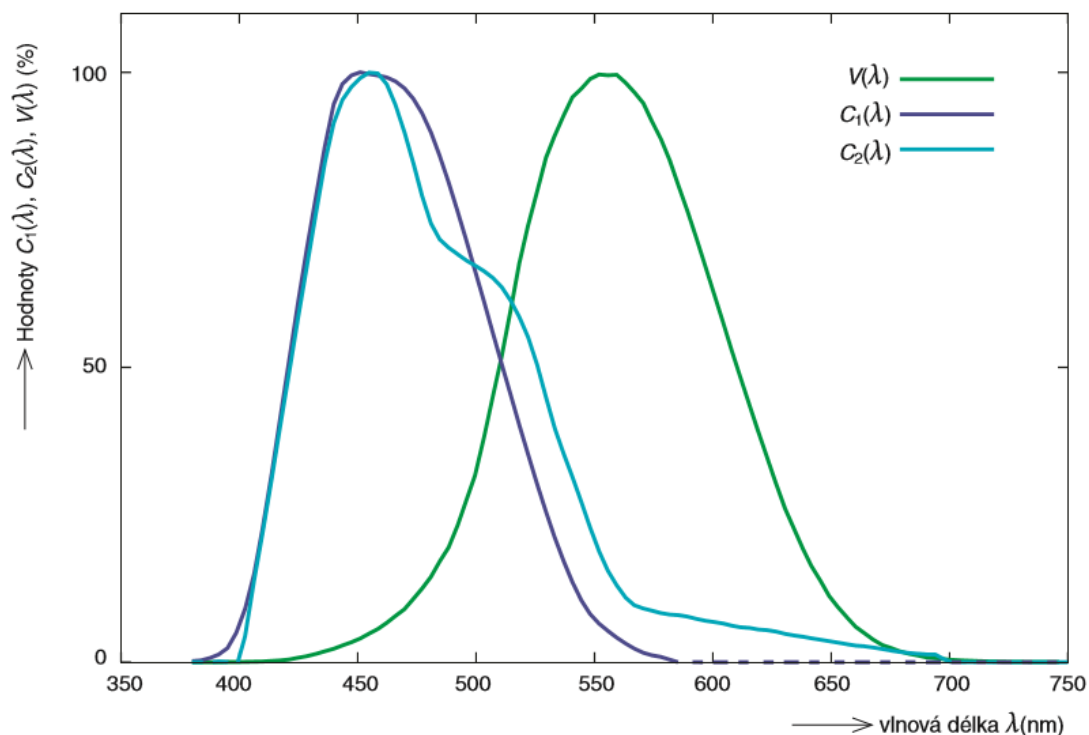
Biorytmy s periodou kratší než 20 hodin nazýváme ultradiánní. Do této skupiny biorytmů zařazujeme rytmus srdeční aktivity, rytmus dýchání apod. Biorytmy s periodou trvání zhruba 24 hodin (tedy 20 - 28 hodin) nazýváme cirkadiánní. Patří sem rytmus spánku a bdění, rytmus tělesné teploty a tlaku, příjmu potravy, fyzické a psychické výkonnosti, produkce a uvolňování hormonů. Nejdéle trvající biorytmy, s periodou delší než 28 hodin, nazýváme infradiánní. [14]



Obr. 6: Ukázka posunu cirkadiánního rytmu, není-li synchronizován denním světlem [M]

„Na tvorbě biorytmů se podílí epifyza (šišinka), což je část mezimozku zprostředkovávající některé vlivy světla na organismus člověka. V epifyze se tvoří hormon melatonin, jehož produkce je ovlivňována světlem; nejvíce je tento hormon vylučován za tmy. Melatonin působí ospalost a má další účinky na činnost mozku, např. při nedostatku světla ovlivňuje zhoršení nálady, popř. u některých jedinců až vznik deprese. (...) Výsledky mnoha výzkumů potvrzují, že kromě známých fotoreceptorů, tj. čípků (reagujících převážně při denním či fotopickém vidění) a tyčinek (reagujících převážně při tzv. nočním či skotopickém vidění) je v sítnici ještě třetí druh fotoreceptorů, které jsou čidly cirkadiánní soustavy.“ (Habel 2013, s. 30-31)

Výzkumy zabývající se biorytmy lidského těla prokázaly, že vliv na „seřizování vnitřních hodin člověka“ mají kromě cirkadiánních čidel také čípky, navíc u obou receptorů je důležitá také doba osvitů světlem. „Při porovnání úzkopásmových záření o dominantních vlnových délkách 460 a 555 nm se ukázalo, že jejich účinek na pokles melatoninu je zpočátku přibližně stejný, avšak u zeleného světla během 90 minut téměř vymizí, kdežto u modrého světla je působení trvalé. $C_1(\lambda)$ vystihuje spíše citlivost při dlouhodobém působení a $C_2(\lambda)$ částečně zohledňuje i krátkodobé působení. Uvádějí se dva druhy účinku: pokles hladiny melatoninu a fázový posun centrálních hodin.“ (FUKSA 2011, s. 57)

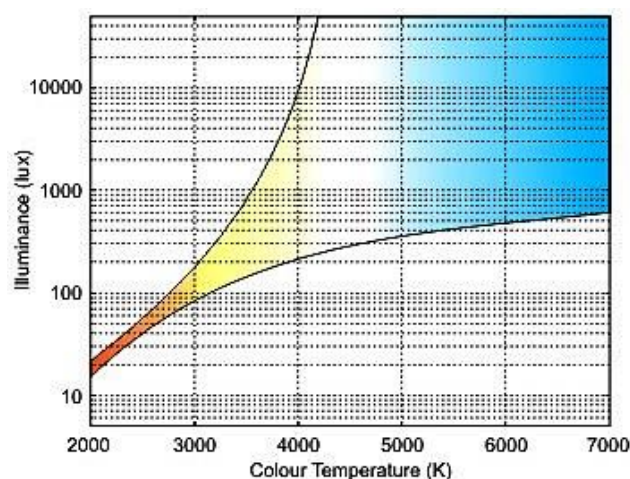


Obr. 7: Působení světla [N]

„Odbourání melatoninu po ránu a udržování jeho nízké hladiny během dne lze považovat za více než žádoucí, neboť spouští množství procesů vedoucích k větší bdělosti, aktivitě a soustředěnosti. Posílení spektra v oblasti cirkadiánní citlivosti lze dosáhnout použitím světelných zdrojů s vyšší teplotou chromatičnosti. Podle Kruithofova diagramu lze pak od uživatelů očekávat požadavky na vyšší osvětlenost, což je možné řešit např. přídavnými lokálními svítilny. Vyšší osvětlenost a vyšší teplota chromatičnosti mohou mít na pracovištích konkrétní ekonomický výstup v podobě kvalitnější práce ⁽²⁾, snížení stresu ⁽¹⁾, lepšího využití pracovní doby nebo snížení nemocnosti.“ (FUKSA 2011, s. 57)

(1) HOLLWICH, F.: The Influence of Ocular Light Perception on Metabolism in Man and in Animal. Springer Verlag, New York, 1979, 129 s., ISBN 0387903151.

(2) BOMMEL VAN, W. J. M. –BELD VAN DEN, G. J.: Lighting for work: a review of visual and biological effects. Lighting Research and Technology, December 2004, 36, 4, s. 255–266, ISSN 1477-1535, DOI:10.1191/1365782804li122oa.



Obr. 8: Kruithofův diagram [K]

„V článku ⁽³⁾ se zavádějí cirkadiánní veličiny analogicky k veličinám fotometrickým. Funkci $V(\lambda)$ nahrazuje $C(\lambda)$ a veličiny se opatřují indexem c . Lze tak pracovat např. s pojmem cirkadiánní osvětlenost. Cirkadiánní osvětlenost lze měřit luxmetrem korigovaným na poměrnou cirkadiánní účinnost $C(\lambda)$. Pro orientační měření lze ke korekci použít tmavě modrou fólii Lee č. 120. Jinou možností je výpočet ze změřeného spektra zářivého toku nebo zjištění přepočtového koeficientu pro daný zdroj. Podle Van Bommela ⁽³⁾ lze zavést činitel cirkadiánní účinnosti a_{cv} , který se pro světlo s poměrným spektrálním složením výkonu $X(\lambda)$ vypočítá podle vztahu

$$a_{cv} = \{X(\lambda)\} = \frac{K_m \int_{380}^{780} X(\lambda) \cdot C(\lambda) \cdot d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} X(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad 3.9$$

Tento činitel je tedy pro daný světelný zdroj koeficientem pro přepočet fotopických hodnot na hodnoty cirkadiánní a lze jej použít k porovnání různých světél, resp. světelných zdrojů, z hlediska jejich účinků na nervovou soustavu. Průběh křivky $C(\lambda)$ a ani obsah plochy pod ní zatím nejsou přesně známy. Proto je vhodné výpočet opatřit koeficientem, díky kterému budou hodnoty vypočtené se současným a v budoucnosti aktualizovaným průběhem $C(\lambda)$ srovnatelné. Koeficient lze definovat různými způsoby, např. rovností ploch pod $C(\lambda)$ a pod $V(\lambda)$ nebo rovností světelného a cirkadiánního toku pro CIE normalizované světlo A (model žárovkového světla). Varianta, kterou navrhuji k diskusi, má pracovní název index cirkadiánního aktivačního účinku a pracovní označení A_c . Jeho hodnota se stanoví na 100 pro světlo CIE D65 a vypočítá se podle vztahu:

$$A_c = \{X(\lambda)\} = 100 \cdot \frac{\int_{380}^{780} X_{D65}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780} X_{D65}(\lambda) \cdot C(\lambda) \cdot d\lambda} \cdot a_{cv}\{X(\lambda)\} \quad 3.10$$

$$A_c \approx 106,25 \cdot a_{cv}\{X(\lambda)\}$$

A_c umožňuje srovnávat světelné zdroje z hlediska jejich cirkadiánního účinku. Pro referenční – denní světlo má hodnotu 100. Jeho hodnoty lze snadno vyčíslit pro běžné typy světelných zdrojů a teploty černého tělesa.“ (FUKSA 2011, s. 57) Viz Tab. 2.

(3) BOMMEL VAN, W. J. M. –BELD VAN DEN, G. J.: Lighting for work: a review of visual and biological effects. Lighting Research and Technology, December 2004, 36, 4, s. 255–266, ISSN 1477-1535, DOI:10.1191/1365782804li1220a.

Tab. 2: Příklady hodnot A_c

Světelný zdroj		Specifikace zdroje	A_c (-)
denní světlo		D65	100
černé těleso		2 700 K	36
		4 000 K	64
		5 000 K	82
		6 500 K	100
		8 000 K	116
		20 000 K	156
		100 000 K	181
zářivka	teple bílá 827	2 700 K	27
	neutrálně bílá 840	4 000 K	55
	neutrálně bílá 950	5 000 K	83
	chladně bílá (denní) 965	6 500 K	95 až 105
	modrá	Philips TL-D Blue	740
žárovka	obyčejná	2 800 K	36
	halogenová	2 900 K	40
LED	teple bílá	2 850 K	36
	chladně bílá (denní)	6 800 K	90
	modrá	450 nm	875
	zelená	520 nm	52
	červená	630 nm	0,4
výbojka	sodíková	vysokotlaká	8 až 13
	sodíková	nízkotlaká	0,2
	halogenidová 942	4 200 K	69
	halogenidová 965	6 500 K	100

Převzato z (FUKSA 2011, s. 57)

3.3 Fotometrické veličiny

3.3.1 Světelný tok

Světelný tok je veličina odvozená ze zářivého toku. Liší se pouze respektováním citlivosti lidského oka. Vyjadřuje množství světla, které vyzáří zdroj do prostoru za časovou jednotku. Světelný tok je tudíž fotometrická veličina.

Značení:

$$\phi = K_m \cdot \int_{380}^{780} V(\lambda) \cdot H_e(\lambda) \cdot d\lambda \quad (lm, lm \cdot W^{-1}, -, W \cdot m^{-2}), \quad 3.11$$

kde ϕ je celkový světelný tok,

K_m je konstanta pro fotopické vidění při nejvyšší citlivosti oka (555 nm),

$V(\lambda)$ je křivka spektrální citlivosti oka,

$H_e(\lambda)$ je spektrální hustota záření. [9]

3.3.2 Svítivost

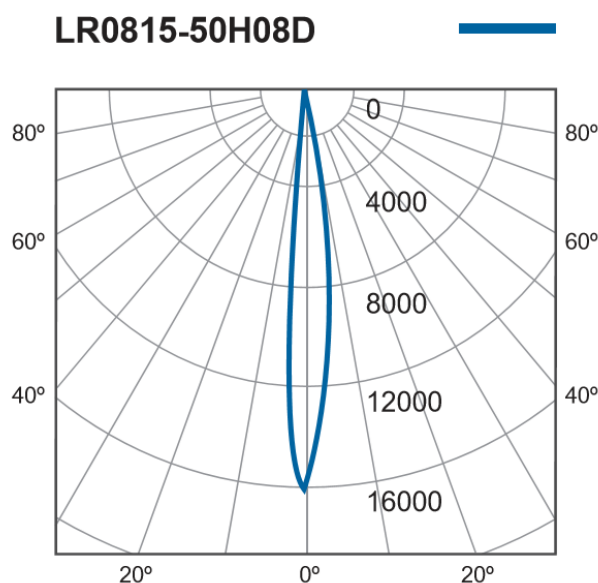
Svítivost patří do základních jednotek soustavy SI. Je popsána jako svítivost světelného zdroje, který vyzařuje do daného směru záření o $f = 540 \text{ THz}$ a jeho intenzita v tomto směru

dosahuje velikosti $\frac{1}{683} \text{ W sr}^{-1}$. Je to světelný tok procházející určeným prostorovým úhlem. Jedná se o jedinou fotometrickou veličinu v SI soustavě.

Značení:

$$dI = \frac{d\phi}{d\Omega} (\text{cd}, \text{lm}, \text{sr}), \quad 3.12$$

kde dI je elementární svítivost,
 $d\phi$ je světelný tok procházející elementárním prostorovým úhlem,
 $d\Omega$ je elementární prostorový úhel. [8]



Obr. 9: Směrové vyzařování (křivka svítivosti) reflektoru původně určeného pro měření [L]

3.3.2.1 Křivka svítivosti

"Zjistí-li se hodnoty svítivosti svítidla ve všech směrech prostoru a nanesou-li se prostorově od světelného středu zdroje jako radiusvektory, dostane se spojením všech koncových bodů těchto radiusvektorů fotometrická plocha svítivosti. Při výpočtech obvykle postačuje znát jen některé řezy touto plochou, a to rovinami procházejícími bodovým zdrojem. V rovinách řezu tak vzniknou čáry (křivky) svítivosti v polárních souřadnicích. Počátek diagramu svítivosti se umísťuje do světelného středu zdroje či svítidla. Základní či vztahový směr diagramu svítivosti, od něhož se měří úhly, se obvykle umísťuje do středu normály k hlavní vyzařovací ploše zdroje či svítidla. Jednotlivé křivky svítivosti se získávají měřením na goniofotometrech a výrobci svítidel, popř. světelných zdrojů je uvádějí v dokumentaci.

Křivky svítivosti lze matematicky obecně popsat vztahem:

$$I_{\gamma} = I_0 \cdot f(\gamma) (\text{cd}; \text{cd}; -), \quad 3.13$$

kde I_{γ} je svítivost zjištěná z uvažovaného diagramu svítivosti, pod úhlem γ od vztahového směru

I_0 je svítivost uvažovaného zdroje ve vztahném směru, tj. obvykle ve směru kolmém k hlavní vyzařovací ploše svítidla,

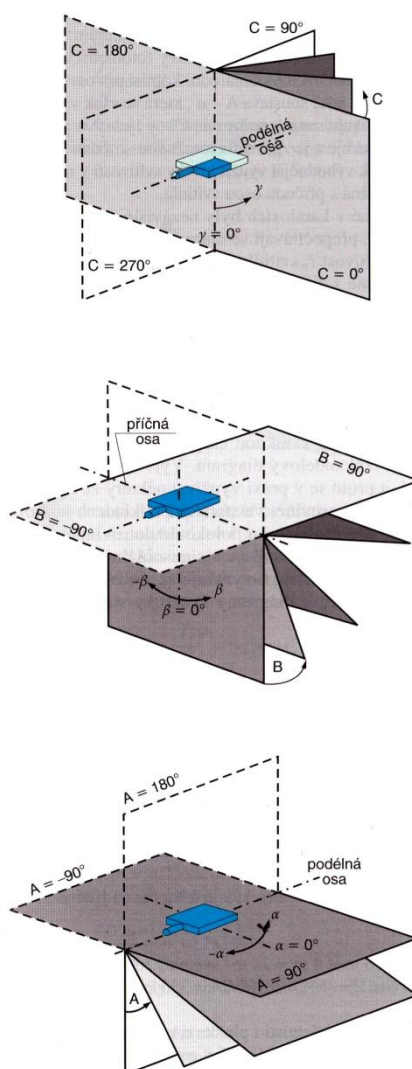
$f_I(\gamma)$ je charakteristická funkce (indikatrix) svítivosti, tj. funkce matematicky popisující (aproximující) uvažovanou křivku svítivosti;

Nejčastěji se k aproximaci využívá funkce:

$\cos^n \gamma$ (kde $n = 0, 1, 2, 3$ a 5), $\sin \gamma$; $\sin \gamma \cdot \cos^m \gamma$ (kde $m = 1, 2, 3, 4$), a zejména pak různých lineárních kombinací uvedených funkcí.“ (Habel 2013, s. 68)

3.3.2.2 Soustavy fotometrických polorovin

Čáry svítivosti se vždy udávají ve vztahu k určité soustavě polorovin. Mezinárodní komise pro osvětlování CIE doporučila tři soustavy polorovin A- α , B- β a C- γ . První ze soustav se v praxi již nepoužívá.



Obr. 10: Soustavy fotometrických rovin [O]

„Prostorové rozložení svítivosti by bylo možné znázornit také popsáním bodů na povrchu jednotkové koule (se středem ve světelném středu uvažovaného zdroje) hodnotami svítivosti odpovídajícími směru spojnice světelného středu s daným bodem na povrchu koule. Poloha jednotlivých bodů na povrchu koule, a s tím i uvažovaný směr v prostoru, se určuje v síti rovnoběžek a poledníků. Spojením bodů stejných hodnot svítivosti na povrchu koule vzniknou čáry nazývané izokandely. Nakreslením sítě izokandel se získá izokandelový diagram. Vytvoření prostorové soustavy souřadnic je však obtížné, a proto se v praxi využíval některý ze způsobů zobrazení povrchu koule resp. polokoule v rovině. Ve starších podkladech je možné setkat se s tzv. sinusoidálním zobrazením povrchu polokoule do rovinného diagramu. Plochy uzavřené jednotlivými izokandelami jsou v sinusoidálním diagramu rovné prostorovým úhlům, do nichž zdroj (svítidlo) vyzařuje se svítivostí odpovídající dané izokandele. Proto je možné takové diagramy využít ke stanovení světelného toku zdrojů, popř. svítidel.“ (Habel 2013, s. 70)

3.3.3 Jas

Jas je veličina udávající prostorovou hustotu světelného toku v různých směrech. [8] Neboli světlost povrchů tak, jak ji vnímá lidské oko. Pro posouzení okolí okem je nejdůležitější. Jas se dá vyjádřit více vztahy, zde je uvedeno vyjádření v závislosti svítivosti:

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos(\theta)} \quad (cd \cdot m^{-2}, cd, m^2, -), \quad 3.14$$

kde L je jas povrchu,
 $dA \cdot \cos(\theta)$ představuje kolmý průmět plochy vzhledem k oku pozorovatele,
 θ úhel svírající směr paprsku a normály k plošce dA . [9]

3.3.4 Osvětlenost

Osvětlenost je světelný tok dopadající na plochu. Jedná se o sledovanou veličinu při kontrole návrhu intenzity osvětlení srovnávací roviny. Jednotkou je lux a měříme ji luxmetrem.

Značení:

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad (lx, lm, m^2), \quad 3.15$$

kde E je osvětlenost povrchu,
 $d\phi$ představuje dopadající světelný tok,
 dS je plocha na niž dopadá světelný tok.

Při šíření elektromagnetického záření po kulové vlnoploše platí, že s rostoucí vzdáleností klesá hustota energie s druhou mocninou vzdálenosti (čtvercový zákon).

Značení:

$$E = \frac{I_{\gamma}}{r^2} \cdot \cos(\beta) \text{ (lx, cd, m, -)}, \quad 3.16$$

kde E je osvětlenost,
 I_{γ} je zdroj o známé svítivosti,
 r vzdálenost,
 β je úhel, který svírá normála elementární plochy s osou prostorového úhlu. [8] [9]

Fotometrické veličiny velice přehledně uvádí tabulka:

Tab. 3: Přehled fotometrických veličin

Název veličiny	Značka	Jednotka	Vztah	Veličina udává
Světelný tok	ϕ	Lm	-	„Kolik světla vyzáří světelný zdroj do prostoru; světelný výkon posuzovaný z hlediska lidského oka.“
Prostorový úhel	Ω, ω	Sr	$\Omega = \frac{A}{r^2}$	„Úhel při vrcholu světelného kuželu, vymežující plochu A [m^2] z plochy koule o poloměru r .“
Svítivost	I	Cd	$I = \frac{\phi}{\omega}$	„Kolik světelného toku ϕ vyzáří světelný zdroj do prostorového úhlu ω v určitém směru.“
Osvětlenost	E	Lx	$E = \frac{\phi}{A}$	„Jak je určitá plocha osvětlována, tj. jak velký světelný tok ϕ dopadá na osvětlovanou plochu A .“
Světlení	H	$lm \cdot m^{-2}$	$H = \frac{\phi}{A}$	„Velikost světelného toku vycházejícího z plochy A .“
Jas	L	$cd \cdot m^{-2}$	$L = \frac{I}{A_p}$	„Jas je měřítkem pro vjem světlosti svítícího nebo osvětlovaného tělesa (s plochou A_p), jak je vnímá lidské oko.“

(Plch 2004, s. 18)

3.4 Optické vlastnosti materiálů

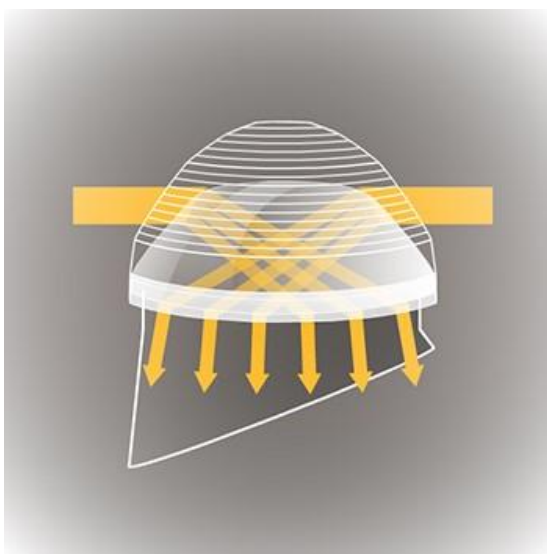
Optické vlastnosti materiálů vychází z účinků působení hmotných prostředí na optické záření. Pro posuzování světelných vlastností hmoty potřebujeme definované spektrální složení, nebo monochromatické záření. Materiál osvětlíme usměrněným svazkem světelných paprsků, či difuzním světlem. Po interakci s materiálem může dojít k difrakci a změně vlastností záření (ovlivnění spektrálního složení). [5] Pro naše potřeby je nutné popsat několik

optických vlastností materiálů, které budou ovlivňovat naše měření. Jedná se zejména o odrazivost materiálu, lom světla, prostupnost a pohltivost. V následujících odstavcích bude napsáno více o těchto jevech.

3.4.1 Lom světla (refrakce)

„Lom záření je změna směru šíření záření vlivem změny jeho rychlosti při průchodu opticky nehomogenním prostředím nebo při prostupu rozhraním mezi dvěma prostředími s různými indexy lomu.“ (Rybář 2002)

Refraktor neboli optický hranol má důležitou úlohu v optice a optoelektronice, například pro difrakci světla apod. V našem případě drážkování na vnitřní straně kopule představuje malé hranoly. Tyto hranoly směřují dopadající paprsky světla do světlovodného systému. Tím se zvyšuje účinnost jímání světla při nízké výšce slunce nad obzorem.



Obr. 11: Kopule Raybender 3000® [P]

Poměr rychlosti monochromatického světla ve vakuu a rychlosti šíření světla ve zkoumaném prostředí vyjadřuje index lomu $n(\lambda)$:

$$n(\lambda) = \frac{c}{c_n} \geq 1 \quad (-, ms^{-1}, ms^{-1}), \quad 3.17$$

kde $n(\lambda)$ je index lomu pro monochromatické optické záření o vlnové délce λ ,
 c_n je rychlost světla ve vakuu, $c = 299\,792\,458\,ms^{-1}$,
 c je rychlost světla ve zkoumaném optickém prostředí.

Šíření vlnění při prostupu skrze dvě rozhraní popisuje Snellův zákon:

$$n_1(\lambda) \cdot \sin\theta_1 = n_2(\lambda) \cdot \sin\theta_2 \quad (-, -, -, -), \quad 3.18$$

kde $\sin\theta_1$ je sinus úhlu dopadu optického záření o vlnové délce λ ,
 $\sin\theta_2$ je sinus úhlu lomu,

$n_1(\lambda)$ a $n_2(\lambda)$ jsou indexy lomu v prostředí prvním a druhém.

Určitou modifikací je relativní index lomu $n_{21}(\lambda)$ vyjadřující poměr indexu lomu druhého prostředí k prvnímu. Toto je popsáno vztahem:

$$n_{21}(\lambda) = \frac{n_2(\lambda)}{n_1(\lambda)} = \frac{\frac{c}{c_2(\lambda)}}{\frac{c}{c_1(\lambda)}} = \frac{c_1(\lambda)}{c_2(\lambda)} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} \quad (-, -, -), \quad 3.19$$

a platí, že

$n_{21}(\lambda) > 1$ je $n_1(\lambda) < n_2(\lambda)$, první prostředí je opticky řidší, než druhé,

$n_{21}(\lambda) = 1$ je $n_1(\lambda) = n_2(\lambda)$, obě prostředí mají stejnou optickou hustotu,

$n_{21}(\lambda) < 1$ je $n_1(\lambda) > n_2(\lambda)$, první prostředí je opticky hustší oproti druhému. [5]

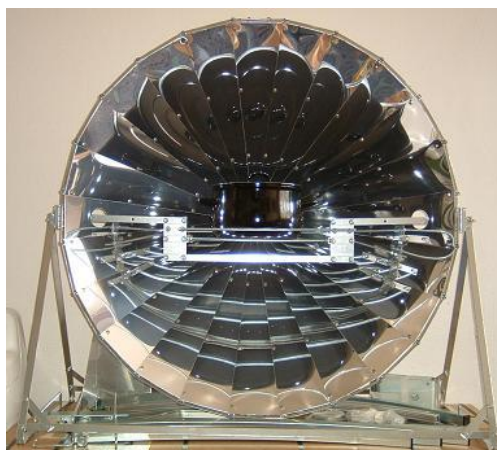
Tzv. totální odraz je speciální příklad lomu světla. Při zvětšování úhlu dopadu paprsku z opticky hustšího prostředí na opticky řidší se zvětšuje úhel lomu až na mezní hodnotu rovnou pravému úhlu. Při dalším zvětšení úhlu dopadajícího paprsku již k lomu nedochází a nastává totální (úplný) odraz. Pro rozhraní sklo - vzduch je mezní úhel roven 42° . [5] [12]

3.4.2 Odraz světla (reflexe)

Při odrazu optického záření se nemění frekvence odražených monochromatických složek světla. Odraz nastává na povrchu materiálu (povrchový odraz) a také průchodem optického prostředí (objemový odraz). Z makroskopického hlediska je pro nás podstatné množství odraženého světla a způsob odrazu.

Odraz zrcadlový, je odrazem ideálním, a nastává na hladkém rovném povrchu. Platí pro něj zákony geometrické optiky. Úhel dopadu se značí α a úhel odrazu β . Oba se měří od kolmice k povrchu. Oproti tomu odraz difuzní (rozptylný) získáme od matného, zdrsňeného, či strukturovaného povrchu. Druhý ideální případ je rovnoměrně rozptylný odraz, při němž v žádném směru nepřevažuje odražená složka světla. Naopak je tomu ve směrově rozptylném odrazu. Smíšený odraz je pak kombinací zrcadlového a difuzního odrazu. [5]

Reflektory umožňují ovládat směr paprsků ze zdroje, či naopak koncentrovat přijímané paprsky z okolí do ohniska – a to nejen světlo, ale i ostatní elektromagnetické záření.



Obr. 12: Sluneční vaříč [Q]

3.4.2.1 Činitel odrazu

Činitel odrazu je vyjádřen vztahem:

$$\rho = \frac{\int_0^\infty \left(\frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda}\right) \cdot V(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty \left(\frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda}\right) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (-, W, nm^{-1}, -, -, nm), \quad 3.20$$

kde $\frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda}$ je spektrum dopadajícího zářivého toku

$V(\lambda)$ je poměrná spektrální citlivost oka normalizovaného pozorovatele.

[8] [5

]

Při odrazu dochází k útlumu odraženého paprsku světla (elektromagnetického záření), neboť účinnost odrazu není v žádném případě bezetrátová a závisí na vlastnostech bariéry, jaká část dopadajícího záření bude pohlcena. Proto se zavádí činitel odrazu. Činitel odrazu je definován jako účinnost odrazu světla v setinách. Tento koeficient se často uvádí integrálně přes celé spektrum světla, avšak není při všech vlnových délkách konstantní. Selektivní odraz ovlivňuje chromatičnost odraženého světla, způsobuje zkreslení vnímání jasů a barev okem.

V našem případě souvisí tato vlastnost také s účinností odrazu jednotlivých barev dopadajícího světla. Může se stát, že při nevhodném použití odrazného materiálu získává odražené světlo určitý barevný nádech. A to zejména, jsou-li velké rozdíly mezi účinnostmi odrazu různých barev světla (tj. různých vlnových délek). Poté dochází ke zkreslení barevného vnímání oka.

Spektrální činitel odrazu záření vyjadřuje selektivitu odrazného povrchu. Materiál neodráží všechny dopadající vlnové délky se stejnou účinností. Proto dochází při odrazech k rozdílu spektrálního složení světla odraženého vůči dopadajícímu. Jeho vyjádření je následující:

$$\rho_\lambda = \frac{(\phi_{e1,\lambda})_\rho}{(\phi_{e1,\lambda})} = \frac{\phi_{e1,\lambda} \cdot \rho_\lambda}{\phi_{e1,\lambda}} \quad (-, lm, -, lm), \quad 3.21$$

kde ρ_λ je spektrální činitel odrazu,

$\phi_{e1,\lambda}$ je dopadající světelný tok jedné vlnové délky.

Smíšený odraz vyjádříme jako:

$$\rho = \frac{\phi_{\rho,r}}{\phi_{v1}} + \frac{\phi_{\rho,d}}{\phi_{v1}} = \rho_r + \rho_d(-, lm, lm, lm, lm; -, -), \quad 3.22$$

kde ρ je činitel smíšeného odrazu světla (neselektivní),
 ϕ_{v1} je světelný tok dopadající na povrch v lm,
 $\phi_{\rho,r}$ je světelný tok odražený zrcadlovým odrazem na povrchu i uvnitř prostředí,
 $\phi_{\rho,d}$ je světelný tok odražený difuzním odrazem,
 ρ_r je složka se zrcadlovým odrazem,
 ρ_d je složka s rozptylným odrazem.[5]

„Hodnoty činitele odrazu dopadajícího difuzního záření se stanoví buď z hodnot činitelů odrazu pro směřované světlo (obvykle kolmo k povrchu) pomocí korekčních činitelů nebo se vychází z naměřených údajů.“ (Rybár 2002, s. 27)



Obr. 13: Vzorník odrazných materiálů pro tubusy [C]

Poznámka k obrázku - vrstvy: 1 – Spectralight® Infinity, 99,7 %; 2 – napařované stříbro 98 %; 3 – leštěný hliník 95 %; 4 – chrom 84 %)

3.4.3 Prostup světla (transmise)

K prostupu světla dochází skrze optické prostředí ideálně neměnicí jeho spektrální složení. Prostup světla může být přímý nebo rozptylný. Oba typy jsou teoretické mezní stavy prostupu. Přímý prostup světla se chová podle zákonů geometrické optiky, naopak je tomu u rozptylné transmise. Rozptylnou transmisí můžeme ještě dělit na rovnoměrně rozptylnou, při

níž je zachován rovnoměrný jas všech směrů do poloprostoru, či směrově rozptýlnou, kdy v některém směru je jas odlišný. Toho se využívá při úpravě optických vlastností stropního krytu, aby bylo dosaženo požadovaného směrového rozložení světelného toku. Při příliš vysoké intenzitě denního osvětlení mohou být použity clony (např. žaluzie). V reálném prostředí existuje vždy smíšený prostup. Obecně při prostupu dochází k pohlcení části záření, transmise není bezetrátová. Selektivní prostup ovlivní spektrální složení světla a následně vjem barev stejně, jak bylo popsáno výše, při odrazu. Tento jev je ovšem využíván také záměrně, u barevných filtrů. U vedení denního světla jde především o co nejmenší ovlivnění přirozeného denního světla.

3.4.3.1 Činitel prostupu světla (transmise τ)

Činitel prostupu světla je podíl světelného toku prošlého prostředím a dopadajícího na rozhraní optického prostředí. V literatuře se často uvádí integrální hodnota v rozmezí spektra vlnových délek světla a nezohledňuje se úhel dopadajícího paprsku, počítá se s kolmým dopadem. Korekce se provádí poměrným činitelem pro směrový prostup:

$$\tau_{\psi} = \tau_{nor} \cdot \frac{\tau_{\psi}}{\tau_{nor}} (-; -; -), \quad 3.23$$

kde τ_{ψ} představuje směrový činitel prostupu světla pro daný úhel dopadu ψ ,
 τ_{nor} je činitel prostupu světla při kolmém dopadu,
 $\frac{\tau_{\psi}}{\tau_{nor}}$ je poměrný činitel prostupu světla pro úhel dopadu ψ . [5]

3.4.4 Pohlcení světla (absorpce)

K absorpci světla dochází při šíření světla hmotným prostředím. Pohlcení α je doplňkem k činiteli odrazu a prostupu:

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad 3.24$$

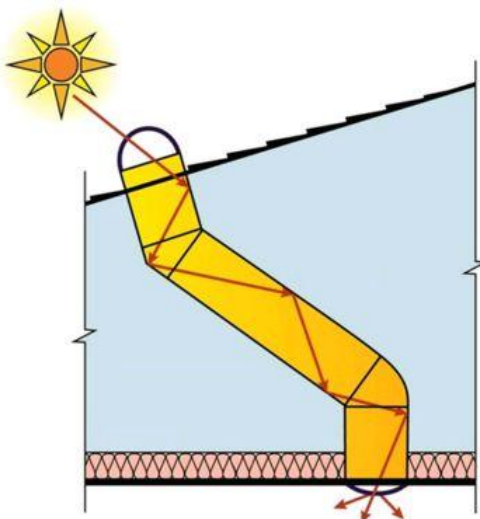
a tedy

$$\alpha = 1 - \tau - \rho. \quad 3.25$$

[5]

4 SVĚTLOVODY

Světlovody mají podobu více či méně širokých tubusů se speciální vrstvou na vnitřní stěně. Tato vrstva je nečastěji odrazná, ale může být také polopropustná. Světlovod se skládá ze tří funkčních částí. První část zachytává oblohové světlo, následuje přenosové prostředí a třetí část jej emituje do interiéru. Další součásti upravující zisk a distribuci světla, jeho zabarvení, či intenzitu, jsou volitelné. Jedná se například o systémy zrcadel a odrazných ploch, clon, filtrů a přidavného elektrického osvětlení.



Obr. 14: Světlovod - nástřešní kopule, světlovodný tubus a stropní kryt [D]

Výkonností světlovodu rozumíme celkový světelný tok, který dokáže světlovod přenést do vnitřních osvětlovaných prostor. Výkonnost je tedy ovlivněna zejména příčným průřezem světlovodu (ten je nejčastěji kruhový), tvarem trasy tubusu a samozřejmě kvalitou vnitřního odrazného povrchu. Světlovody osvětlují denním světlem těžko přístupné prostory, které by jinak musely být osvětleny pouze umělým osvětlením. Umožňují tedy nejen přístup přirozeného denního světla do interiéru a tím také splnění norem pro minimální podíl denního osvětlení v prostorách, kde to dříve nebylo myslitelné, ale i úsporu energie. Technologický skok, díky kvalitě odrazné vrstvy, jednoduchosti kompletace světlovodné dráhy a její variabilitě, zjednodušuje širší použití také v menších budovách, rodinných domech atd.

Doplňkovou možností je sdružení funkce světlovodů tak, že slouží nejen k osvětlení, ale také k odvětrání vnitřních prostor. K větrání ovšem neslouží světlovodný tubus kvůli znečištění povrchu, ale prostor mezikruží nebo přidružené potrubí ve tvaru půlměsíce. Kromě toho může být světlovod doplněn o elektrický zdroj světla a v závislosti na venkovní osvětlenosti se tento zdroj řídí.



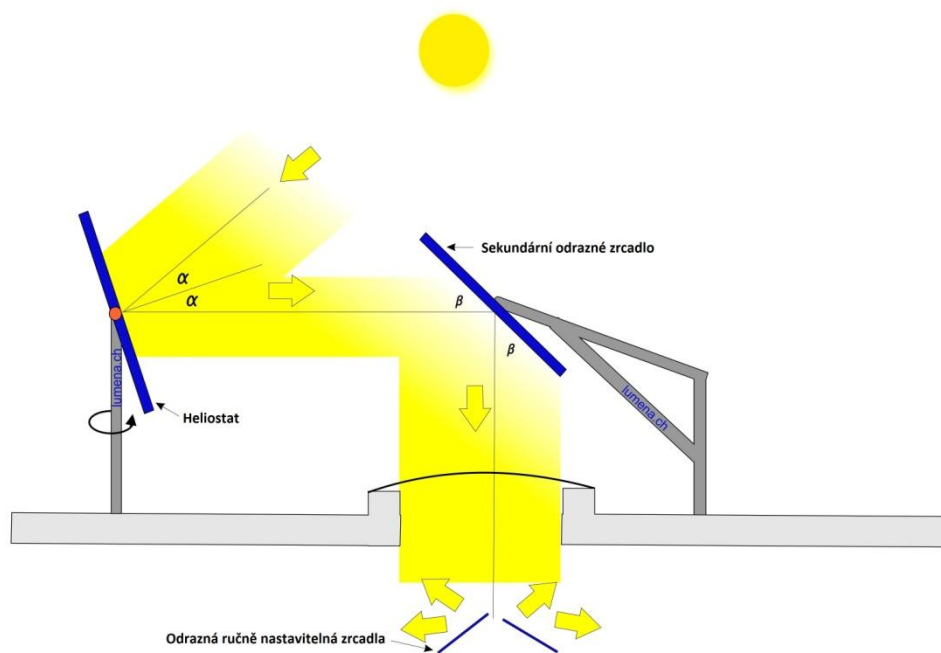
Obr. 15: Světlovod s přídatnými funkcemi, odvětráváním a přisvětlením [R]

4.1 Aktivní a pasivní světlovody

Rozdíl mezi jmenovanými světlovody spočívá ve způsobu zachytávání oblohového světla. Pasivní světlovody, jak již napovídá název, nereagují na změny venkovních světelných podmínek. Jsou to světlovody složené z pevně zabudovaných, nepohyblivých dílů. Obecně platí, že „*pasivní osvětlovací systémy umožňují přístup slunečního záření do budovy bez technických zařízení. Denní osvětlení je zajišťováno pouze pomocí vhodného stavebního a dispozičního řešení a volbou povrchových úprav v interiéru.*” (Plch 2004, s. 28) Mezi pasivní osvětlovací prvky můžeme zařadit kromě oken a světlíků také jednoduché světlovody.

V dnešní době už není tak důležitým předělem mezi aktivními a pasivními světlovody pohyblivost, či nepohyblivost světelně-aktivních součástí. (Protože vývoj jakéhokoli výrobku s dlouhou životností se snaží pohyblivých dílů vyvarovat, neboť je to možný zdroj poruch.) Existují totiž díly, které jsou pevně přimontované, nastavené a přesto svým důmyslným zpracováním (díky fyzikálnímu principu lomu paprsku), reagují na pohyb slunce po obloze. Řeč je o Fresnelově čočce, která může být součástí nástřešního dílu světlovodné soustavy.

Pokud se vrátíme k dělení světlovodů, tak aktivní světlovody obsahují prvky, které cíleně zareagují na měnící se venkovní světelné podmínky. Tyto světlovody obsahují čočky, pohyblivá zrcadla, či hranoly určené ke koncentraci slunečního záření, za účelem maximálního světelného zisku. Aktivní systémy jsou tedy komplikovanější a dražší, na druhou stranu dosahují vyšších světelných zisků a tím pádem jsou vhodnější pro osvětlení vzdálenějších míst. [4] Můžeme zde ještě přidat i automaticky ovládané žaluzie, či clony zabráňující přílišné intenzitě osvětlení v interiéru (tyto prvky však mohou obsahovat také pasivní světlovody).



Obr. 16: Heliostat [S]

Ať už se jedná o pasivní, či aktivní světlovodný systém, je třeba jej kromě světelného hlediska posuzovat i z jiných úhlů pohledu. Prostup světlovodu vnější obálkou budovy je poměrně srovnatelný s velikostí komínu. Výrobci světlovodů mají vstup střešou vyřešený opravdu dobře. Jedná se o lakované lemy s vysokými límcí lisované z jednoho kusu plechu. Různé lemy, které jsou určeny pro různé typy krytiny a dále jsou také přizpůsobené různým sklonům střech. Riziko zatékání je při správné instalaci minimální.

Dalším rizikem, které musíme posoudit je narušení izolace stavby. „Evropská ani česká norma nezařazuje světlovod do kategorie oken. Norma neupravuje žádnou závaznou hodnotu nebo metodiku posouzení prostupu tepla. Přes absenci zákonem stanovené normy se prezentují hodnoty určené metodikou měření prostupu tepla otvorových konstrukcí – oken. Hodnoty pro otvorové výplně však nelze závazně vyžadovat. (...) Světlovod je neplošná konstrukce s více uzavřenými dutinami, kde tepelně dynamické změny působí na celý systém, nikoliv jen v místě izolace budovy (na rozdíl od okna). K tepelným přenosům nesmí docházet v celé délce vedení tubusu ani uvnitř tubusu. (...) Tepelnému mostu a kondenzaci konvekční cestou (vzdušnou výměnou teplot) Solatube® zabraňuje svými prvky. Stropním difuzérem, teplotně odolnou akrylátovou kopulí, vnitřní izolační kopulí, izolační vložkou nebo dvojskelným tepelně izolačním panelem. Izolační kopulový kroužek, izolační stropní příruba, technologie Cool Tube, izolační límec Flashing Insulator a dilatace tubusů v místě obálky budovy brání tepelnému mostu a vzniku kondenzace konduktivní cestou (tubusem). Bezproblémovou funkci světlovodu zajišťují difuzní otvory v oblasti kopule, sloužící k odvodu vlhkosti uzavřené při montáži.“ (Solatube®, [18])

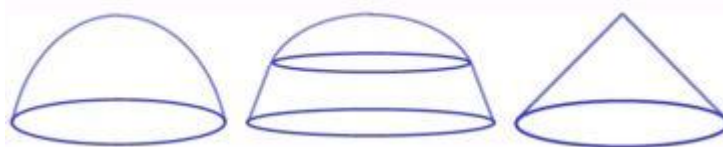
Dále je to zvuková neprůzvučnost, kde je hodnota vážené neprůzvučnosti u modelu Brighten Up® 160 DS – 250 mm uvedena $R_w = 41 \text{ dB}$. Zvukovou neprůzvučnost upravuje norma ČSN 73 0532 Akustika-Ochrana proti hluku v budovách a posuzování akustických

vlastností stavebních výrobků – Požadavky). Posledním bodem je požární bezpečnost. Světlovody Solatube® splňují příslušné normy v ČR a EU.

4.2 Konstrukční a optické části

4.2.1 Nástřešní kopule

Nástřešní kopule je přijímačem pro oblohové světlo. Materiálů používaných na výrobu kopulí existuje několik. Může to být čiré sklo, plexisklo (PMMA) a polykarbonát (PC). Důležité je, aby transparentní materiál zůstal čirý i po letech používání. Tvary kopule mohou být různé, základním tvarem je polokoule. Tato však může být také tvarovaná, s drážkami směřujícími světelné paprsky. Stejně tak místo ní může být instalována pouze rovná skleněná tabulka. [3]



Obr. 17: Typické tvary nástřešních kopulí [E]

Jinou možností jsou pak nástřešní válce, čímž se opět zvětší plocha jímající světlo. Preciznost provedení, plocha a propustnost jsou parametry, které zásadním způsobem rozhodují o světelném přínosu světlovodu pro osvětlovaný interiér. Projektant ovlivní polohu kopule. Ta je montovaná pokud možno v nezastíněné části střechy, či fasády. Pokud je kopule usazená vodorovně (počítáme s paprsky přicházejícími pod úhlem od svislice max. 60°), pak je schopná využít 82 % světla ze zatažené oblohy. Při náklonu kupole o 30° od vodorovné polohy směrem k přímému slunci, se hodnota zmenšuje na 73 %. Uživatel může příznivě ovlivnit funkci světlovodu častějším čištěním kopule. Čistá kopule má prostupnost rovnající se 0,9. [6]

Vylepšení čiré kopule (naš případ) spočívá v umístění odrazného zakřiveného zrcadla nasměrovaného lesklou stěnou na jih. Zrcadlo se upne dovnitř kopule. Čímž sice zamezíme přístupu difúzního světla ze severní strany, ale přínos v podobě záchytu paprsků slunce při jeho nízké výšce nad obzorem převažuje. V našem případě máme k dispozici pevné zrcadlo, které se nasadí dovnitř kopule, budeme sledovat jeho reálný přínos polohou světelného zdroje.

Další modifikace spočívá ve vytvoření optických hranolů na vnitřní stěně kopule. Hranoly lámou světlo dopadající pod malým úhlem od horizontu dovnitř světlovodného systému. Obvykle se paprsky lámou pod dvojnásobkem úhlu dopadu. [6]

4.2.2 Světlovodný tubus

Světlovodný tubus představuje přenosové prostředí světla skrze mnohonásobné odrazy. Může být pevný, či flexibilní. Jelikož ani totální odraz není bezztrátový, snaží se konstruktéři světlovodů snížit počet odrazů od stěn vhodným tvarováním tubusu. Patent přihlášený roku

2002 konstruktérem O'Neilem představuje speciální kónický světlovod rozšiřující se směrem k osvětlovanému povrchu, který snižuje počet odrazů. [3] Tvar průřezu tubusu je nejčastěji kruhový. Mohou se objevit i hranaté tvary, které však kvůli rohům přenáší světlo s menší účinností. Dalším speciálním příkladem je klínový tvar světlovodu určeného pro dlouhá vedení patentovaný 1978 konstruktéry Buchmanem a Aizenbergem. [3]

Tubus má na vnitřní ploše nosného plechu nanesenou odraznou vrstvu, která je jeho nejdůležitější částí. Tubusy se používají nejen čistě pro přenos světla a osvětlování, ale také jako designový prvek do nových staveb. Jedná se o transparentní skleněné, či akrylátové duté sloupky protínající několik pater. Aby se dosáhlo zajímavého světélkování v interiéru budovy, je uvnitř tubusu nalepena polopropustná folie, či nanesen mikropřizmatický film. Další možností je svítící štěrbinu na určité délce světlovodu. Vývoj materiálů odrazných ploch postupuje od leštěných kovů (hliník a stříbro) ke speciálním vrstvám, které již kovy předčily svou odrazivostí a spektrální neselektivností.

Korpus tubusu může být přímý anebo lomený. Vedení světla v přímém tubusu má nejvyšší účinnost, dosahuje nejmenšího počtu odrazů. Ovšem v některých případech není tato varianta z prostorových důvodů možná, a proto tubus zalomen kolenem, či koleny, a propojen případně vodorovným tubusovým vedením. Záleží na úhlu kolene a také na počtu kolen, ale obecně se tím silně snižuje účinnost přenosu. Závislost účinnosti přenosu světla na úhlu odklonu přenosové cesty je také předmětem zkoumání této práce. Pokud to okolnosti umožňují, je lepší trasu naplánovat bez zalomení.



Obr. 18: Světlovodný tubus [F]

4.2.3 Stropní kryt (difuzor)

Třetí důležitou částí světlovodu je stropní kryt. Jeho úkolem je redistribuce přijatého světelného toku do osvětlovaného prostoru a také utěsnění světlovodné trasy. Popřípadě může být přepážka nad stropním krytem a na horním konci světlovodu pod kopulí. Jeho úkolem je zajištění průchodu světla s co nejmenšími ztrátami a jeho přesměrování. Ztráty vznikají průchodem světla difuzorem a odrazem světla zpět od krytu do tubusu. Materiály určené pro difuzory jsou stejné jako u kopulí (sklo, PMMA, PC). Rovnoměrnost osvětlení pod difuzorem závisí také na délce a průměru světlovodu. S rostoucím průměrem a zkracující se délkou je při jasné obloze obtížné dosáhnout rovnoměrného osvětlení interiéru.

Stropní a podhledové kryty mohou mít různé tvary. Například segmentový, plochý, válcový, vypouklý, kuželový. Kryty mohou být také vysunuty směrem do interiéru, kde tvoří zajímavý svítící designový prvek. [4]

V našem případě se jedná o ploché stropní kryty od firmy Solatube série Brighten Up[®] provedením z mléčného skla, či s jemným drážkováním a s Fresnelovými čočkami.



Obr. 19: Difuzor Optiview[®] [G]

5 PRAKTICKÁ ČÁST

5.1 Úvod

Specifikem pro měření celého světlovodného systému jsou značné rozměry oproti velikosti typických svítidel určených pro osvětlování vnitřních prostor. Každá instalace světlovodu představuje individuální provedení světlovodné cesty. Nutnost zjištění parametrů světlovodů dala vzniknout teoretickým metodám výpočtu a posléze také praktickým zkouškám.

Měření pod oblohou má svá úskalí, a sice neustále se měnící světelné podmínky v závislosti na denní a roční době a na momentálním počasí. Pro měření světelné prostupnosti se měří osvětlenost na venkovní volné ploše a zároveň pod světlovodem. Takovým příkladem je dlouhodobé porovnávací měření dvou světlovodů od různých výrobců za použití UNIMO buňky, upevňovací konstrukce, jednoho vnějšího luxmetru a pro každý světlovod pětice paměťových luxmetrů umístěných na srovnávací rovině v přesných rozstupech uvnitř osvětlované místnosti. [10]

Při projektování budov se počítá činitel denní osvětlenosti při nejméně příznivém počasí, a sice při rovnoměrně zatažené zimní obloze s gradací jasu 1:3 (normalizované dle CIE). Taková umělá obloha, která dokáže přesně napodobit světelné podmínky, byla postavena na Ústavu stavebnictví Slovenské akademie věd. Umělá obloha je zařízení umožňující opakované přesné měření např. denní osvětlenosti na modelech budov. [11] Tudíž se dá využít při měření světlovodů. Ovšem je zde limitace délkou světlovodu, který může být vztyčen pod umělou oblohou.

Jestliže není možné měřit pod umělou oblohou, využíváme technické zprávy CIE (173:2012), které stanovují postup měření přenosové charakteristiky světlovodu. [9] Metoda využívá standardizovaný zdroj a proto je opakovatelná. Pokud chceme napodobit zataženou oblohu, je potřeba výkonný světelný zdroj umístěný za rozptylující stěnou pro získání konstantní osvětlenosti. Provoz standardního zdroje je však nákladný a navíc je nutné mít kulový integrátor dostatečného průměru s odpovídajícím otvorem pro vstup světlovodu.

5.2 Nejistoty měření

Norma *ČSN EN 13032-1+A1 Světlo a osvětlení* stanovuje měření, měřicí podmínky a chyby, které se mohou při měření projevit. V této diplomové práci by bylo s ohledem na povahu a rozsáhlost měření velmi obtížné vyčíslit konečnou chybu, kterou jsou zatíženy výsledky. Zde je uveden výčet některých komplikací, které jsou potenciálními zdroji chyb.

Světelný zdroj se přibližuje povaze přímého slunečního světla, ale jen do jisté míry. Rozdíly jsou zejména v rozbíhavosti paprsků, světelném spektru a zdánlivé velikosti slunce na obloze. Nedostatek v podobě proměnlivosti světelného toku zdroje byl korigován nejen ustálením světelného toku před každým měřením, ale také přepočtem levé poloviny měřených hodnot k pravé polovině (dříve měřené) podle poklesu osvětlenosti v integrátoru, který byl zjištěn z opětovné polohy světelného zdroje v zenitu.

Při skladbě světlovodné trasy bylo nejdůležitější zachovat vždy stejnou délku porovnatelných světlovodů, stejné umístění a vyvážení v prostoru vůči goniofotometru a také stejné natočení kopule a přídavného odrazného zrcátka. Dále bylo nutné zachovat přímý směr spojovaných rovných dílů světlovodu i při zalomení trasy. Důležité bylo též udržovat díly čisté a bez prachu. V krychlovém integrátoru bylo provedeno mnoho nátěrů a nástřiků vnitřních stěn tak, aby byla překryta původní barva použitého materiálu a bylo tak docíleno stejnoměrného rozložení barvy. Dále bylo třeba zatmelit vnitřní hrany integrátoru, zavětrovat konstrukci tak, aby byla dostatečně pevná a zároveň také lehká. Integrátor se tak přiblížil svým tvarem přesné krychli o hraně 1 m. Při měření výstupu světlovodu metodou zonálních toků bylo nutné vyvážit goniofotometr s ruční aretací, připravit rameno, umístit fotočlánek do osově výšky 2 m a zachovat vystředění goniofotometru vůči světlovodu také během měření. Pro měření světelného toku na fotometrickém stole bylo nutné zajistit přesné osově vystředění světelného zdroje vůči spektrometru, dále vyvážení ramene se zdrojem na otočné základně. Při měření spektrální odrazivosti vzorků dodaných od jednotlivých firem, bylo některé z nich nutno nejprve před měřením vyrovnat. Při měření spektrální odrazivosti materiálu se mohou projevit nerovnosti měřeného vzorku a tak ovlivnit výsledky měření. Nerovnosti na vzorku se projeví nerovnoměrným odrazem světla a tak se může stát, že na detektor dopadne více odraženého světla, než u vzorku zcela rovného. Toto může nadhodnotit výsledky měření. Dalším aspektem je možný vliv fotoluminiscence vzorku.

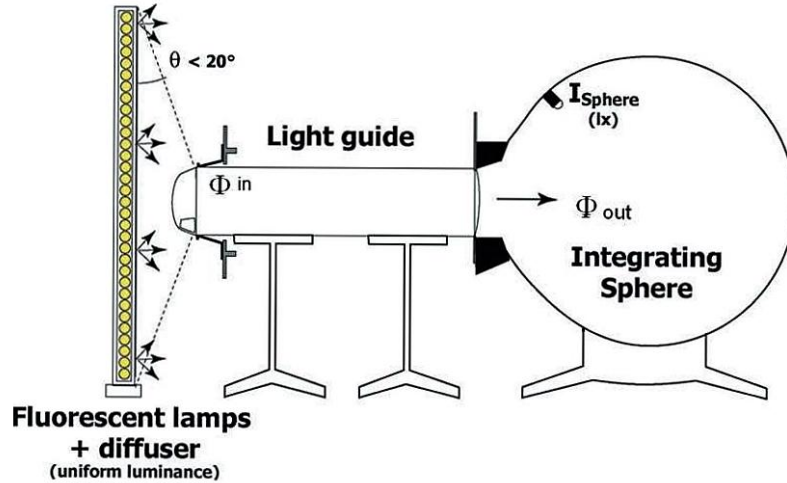
5.3 Aktuálně používané metody měření

Pro projektanta posuzujícího osvětlenost interiéru jsou nejdůležitějšími parametry velikost světelného toku vycházejícího z hrdla světlovodu a jeho směrové rozložení. Při určování světelného toku vycházejícího ze stropního krytu můžeme si zvolit ze dvou měřících metod.

5.3.1 Měření pomocí světelného integrátoru

Integrátor se používá, pokud chceme znát celkový světelný tok vycházející z hrdla světlovodu. Výhoda jednoduchosti měření je vyvážena faktem, že tímto způsobem nelze zjistit směrové rozložení vycházejícího světelného toku. Podle technické normy ČSN EN 13032 je možné k měření použít kromě kulového, také kubický integrátor.

Postup měření je takový, že měřený světlovod je nasazen na odpovídající otvor ve světelném integrátoru. V tomto ohledu je nutné mít dostatečně velký integrátor s odpovídajícím výřezem ve stěně (o průměru např. 250 - 740 mm). Zdrojem světla je podle normy dostatečně velká stěna svítící rozptýleným světlem, viz obrázek níže.



Obr. 20: Měření světlovodu s kulovým integrátorem [T]

5.3.2 Metoda zonálních toků

Světelný tok svítidla, v našem případě výstupu světlovodu, lze stanovit graficko-početní metodou ze zjištěných křivek svítivosti. Tyto křivky svítivosti představují svítivosti zonálních pásů. Každý z nich je popsán prostorovým úhlem. Ze znalosti pásů a svítivosti v nich lze určit celkový světelný tok. To je pro nás důležité, neboť tímto způsobem je možné zjistit světelný tok prošlý světlovodem a také tok zdroje světla.

Výpočet se provádí v několika krocích:

$$I_{\gamma} = I_0 \cdot f_I(\gamma) \text{ (cd; cd; } -), \quad 4.1$$

$$\Delta\Omega_i = 2\pi \cdot (\cos\gamma_i + \cos\gamma_{i+1}) \text{ (sr; } ^\circ; ^\circ), \quad 4.2$$

$$\Delta\phi_i = I_{\gamma; i; \text{stř}} \cdot \Delta\Omega_i \text{ (lm; cd; sr)}, \quad 4.3$$

$$I_{\gamma; i; \text{stř}} = \frac{I_{\gamma(i+1)} + I_{\gamma(i)}}{2} \text{ (cd; cd; cd)}, \quad 4.4$$

$$I_{\gamma} = E_{\gamma} \cdot h^2 \text{ (cd; lx; m}^2), \quad 4.5$$

$$\phi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta\phi_i \text{ (lm; lm)} \quad 4.6$$

kde I_{γ} je svítivost v daném vyzařovacím úhlu svítidla

I_0 je svítivost ve vztažném směru

$f_I(\gamma)$ je charakteristická funkce svítivosti

$\Delta\Omega_i$ je element prostorového úhlu

γ_i je úhel odklonu od hlavní osy světlovodu

$\Delta\phi_i$ představuje dílčí světelný tok prostorovým úhlem

$I_{\gamma; i; st\check{r}}$ střední svítivost v elementu prostorového úhlu

Φ_{Σ} představuje výsledný světelný tok zdroje. [21]

K měření potřebujeme fotočlánek upevněný na otáčivém polohovatelném rameni goniofotometru. Goniofotometrů existuje několik typů rozdělených podle pohyblivých a statických částí. Buď je otočný světelný zdroj a pevný fotočlánek, nebo je to naopak. Speciálním typem jsou pak zrcadlové goniofotometry, v nichž je pevně upnut světelný zdroj i fotočlánek. Pohyblivou část představuje soustava zrcadel. Každý typ může být buď s aretací ruční, nebo automatickou. Automatické goniofotometry ve spojení s počítačem samostatně změří křivku svítivosti zdroje (resp. svítidla). Program zaznamená změřené hodnoty a vypočítá světelný tok.



Obr. 21: Automatický goniofotometr v laboratoři

5.3.3 Měření ve venkovním prostředí – srovnávací metoda

První studie týkající se světlovodů byly založeny na několika měřeních pro vybrané venkovní světelné podmínky. Obvykle pro zataženou a jasnou oblohu. Jiná měření byla

uskutečněna za použití paměťových systémů umožňujících dlouhodobá měření světlovodů. Později byla do přímých světlovodů také vkládána kolena a difuzory a stejným způsobem byly měřeny již celé sestavy tak, jak jsou montovány do budov. K tomuto typu měření je potřeba jednoduchá stavba, do níž upevníme světlovod (např. stavební buňka), několik luxmetrů na přesně určených místech uvnitř buňky a jeden luxmetr pro měření venkovní osvětlenosti. Výsledky vnější a vnitřní osvětlenosti ve stejných časových okamžicích jsou pak srovnávány.



Obr. 22: Měření světlovodu ve venkovním prostředí [U]

5.4 Aktuálně používané metody výpočtu

5.4.1 Přibližná tabulková metoda

Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) stanovila také přibližné tabulkové metody, které jsou popsány ve zprávě CIE Report 173:2006. V této zprávě se uvádí metoda pro návržení vhodného světlovodu pomocí tabulkových hodnot. Vstupními údaji jsou účel osvětlované místnosti (koupelna, chodba), zeměpisné souřadnice místa a délka světlovodu. Není zde uvažováno s materiálem vnitřního povrchu světlovodu, ani zda je přímý, či s koleny. Dalším předpokladem je, že plocha průřezu stropního krytu je pouze (1 - 3) % z povrchu stropu. Což je v praxi reálné. Tím je získán výsledný vhodný průměr světlovodného tubusu. Tento návrh je ovšem orientační.

Metoda pro zjištění účinnosti přenosu umožňuje vyčíslit účinnosti u množství různých provedení včetně těch se zapojením kolien. Je založena na účinnosti přenosu skrze komponentu (tzv. TTE – transmission tube efficiency), stejně jako první z přibližných metod dle CIE. Tabeľované hodnoty účinností jsou zpracovány pro šest průměrů světlovodů, čtyři odrazivosti a velký počet provedení s různými poměry délky světlovodu ku jeho průměru (tzv. L/D). Zalomení světlovodu se stupňuje po 30°. Tato účinnost celého zařízení (TTE) se

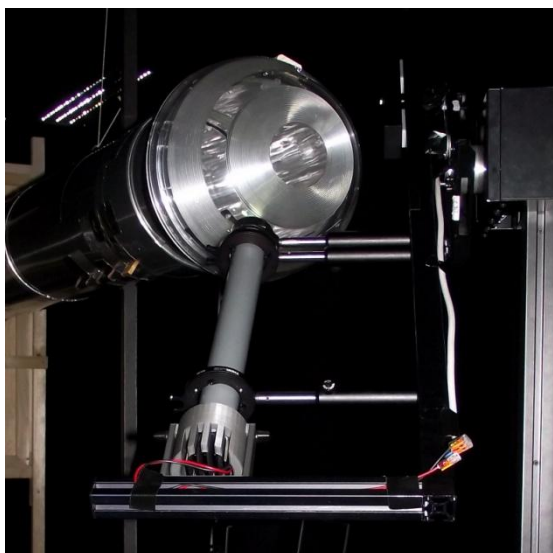
zkoriguje prostupností komponent pro sbírání oblohového světla, stropního krytu a činitelem údržby. Tím je možno kalkulovat s výstupním světelným tokem světlovodu do objektu. [6]

5.4.2 Simulace a výpočet pomocí programu

Druhou metodu je možné uskutečnit jednoduchým výpočtem. Podle místa budovy se stanoví venkovní osvětlenost. Ta se násobí průřezem světlovodu a účinností jednotlivých komponent systému, tím získán světelný tok vycházející ze světlovodu. Podle technických údajů od výrobce stropního krytu může být křivka svítivosti a výsledná osvětlenost na srovnávací ploše stanovena pomocí výpočetních programů.

5.5 Specifikace měřeného světlovodu

Úkolem této diplomové práce je změřit a stanovit vliv optických částí světlovodu na výsledný světlovodný systém na praktických příkladech. Měření probíhá s výrobky firmy Solatube. V našem případě máme možnost měřit světlovodný systém Solatube® 160 DS – 250 mm s plochými stropními kryty série Brighten Up® (provedení z mléčného skla, s jemným drážkováním, či s Fresnelovými čočkami). Tento systém vyniká odrazivostí vnitřního materiálu Spectralight® Infinity, která dosahuje maximální 99,7% účinnosti na odraz. Tubusy o délce 400, či 600 mm se napojují za sebe a mají průměr 250 mm. Každý tubus má lehce kónický tvar (kvůli nasazení světlovodů za sebe) směrem k osvětlovanému prostoru se rozšiřuje. Vícesložková odrazná vrstva je nanášena na vnitřním povrchu nosného hliníkového plechu. Ukončení tubusu je provedeno stropním krytem (difuzérem). Tento difuzér může být z akrylátu, polykarbonátu anebo z mléčného tvrzeného skla. Na horní konec tubusu se upevňuje vnitřní tepelně izolační kopule, která je akrylátová, čirá. Na ni se upevní kopule Raybender® 3000. Tato kopule je modifikací základního sběrače oblohového světla. Obsahuje totiž drážkování (vybroušené hranoly) na vnitřní straně kopule. Tyto hranoly zalamují paprsky světla dopadající na kopuli pod nízkým úhlem od horizontu. Tím zvyšují účinnost jímání světla při ranním a večerním osvitu sluncem. Taková úprava se hodí pro oblasti od 45° zeměpisné šířky. V takových místech, což platí i pro naše podmínky, může zvýšit světelný zisk až o 50 % v zimním období. Naopak druhým efektem je snížení prostupnosti světla pro přímý osvit, je-li slunce vysoko nad obzorem, a to o 10 %. [6]. Firma Solatube navíc nabízí možnost upevnění zrcátka Light Tracker™, které sice blokuje nepřímé světlo ze severní strany, ale posiluje zisk světla právě při malých úhlech nad obzorem. Toto vylepšení může být umístěno také v čiré kopuli.



Obr. 23: Kopule Raybender® 3000 nasazená na světlovodu při měření

Světlovodná trasa často z různých příčin nemůže být přímá, ale je nutné ji zalomit pod různými úhly a to i několikrát. Existují světlovody flexibilní, jejichž výhoda se projevuje při instalaci. Ta je rychlá a nenáročná. Ovšem provozní účinnost je výrazně nižší i při použití stejného odrazného materiálu. Naopak pevné systémy se hůře upevňují do střechy, avšak disponují vyšší účinností a o tu nám jde při návrhu především. Kolena se vyrábí pevná a stavitelná. Firma Solatube nabízí stavitelné koleno, které lze plynule zalomit od přímého směru až po pravý úhel. Toto koleno máme k dispozici pro měření.



Obr. 24: Koleno světlovodu Brighten Up® série [H]

Výrobce pro jednoduchou orientaci zákazníka uvádí, že průměru 250 mm odpovídá efektivní délka trasy 6 m a plocha osvitu 8 až 14 m².

5.6 Měření spektrální odrazivosti vzorků

5.6.1 Úvod

Při přenosu světla dochází k mnoha odrazům a jen ve speciálních případech může světlo z exteriéru projít světlovodem bez kontaktu s odrazným povrchem. Odrazný povrch se nechová stejně ke všem vlnovým délkám světla a může tedy docházet k barevnému zkreslení světla přicházejícího do interiéru budovy. Zajímalo mě, jaké spektrální vlastnosti vykazují materiály dostupné na tuzemském trhu a také velikost integrální odrazivosti jednotlivých materiálů. Za tímto účelem jsem oslovil firmy zabývající se tímto odvětvím a některé z nich mi odpověděly zpět. Jsou to jmenovitě tyto firmy:

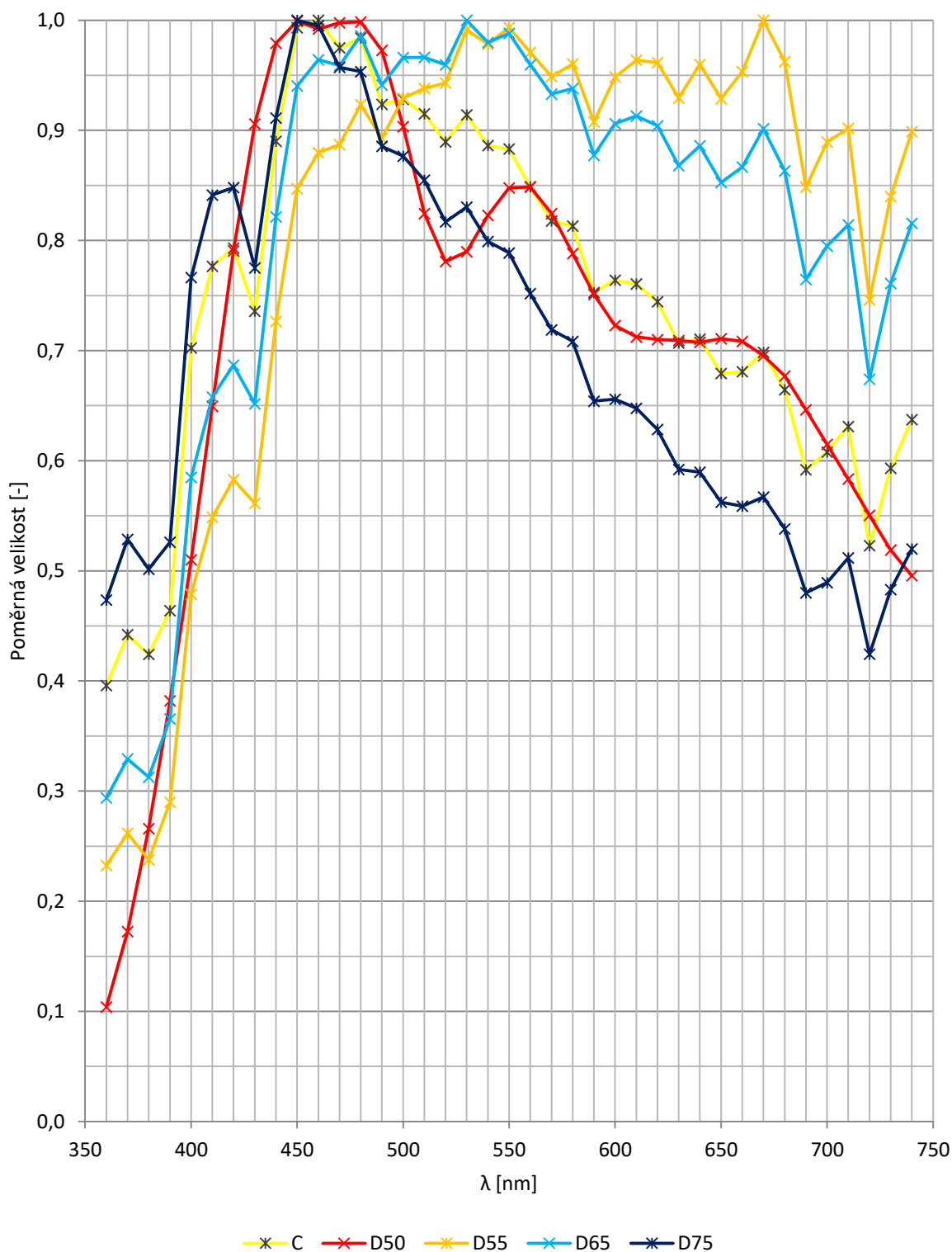
- ABC - AMERICAN BOHEMIAN CORPORATION s.r.o.,
(dále značeno SUNIZER),
- FAKRO CZECH s.r.o. (dále značeno Fakro),
- Lightway s.r.o. (dále značeno Lightway),
- SUNWAY s.r.o. (dále značeno Sunway (1) a Sunway (2)),
- WT-WINDOWS TOMORROW s.r.o., výrobky fy Solatube International, Inc.
(dále značeno Solatube),
- anonymní firma, (dále značeno „VZOREK“).

Jednání bylo ve všech případech velmi vstřícné, následované poskytnutím požadovaných vzorků odrazných materiálů, za což jsem jim vděčný a rád bych jim zde poděkoval za projevenou součinnost a ochotu.

5.6.2 Postup měření

K měření spektrální odrazivosti byl použit spektrofotometr Konica Minolta CM-3600d. Měřicí rozsah přístroje je 360 - 740 nm s krokem po 10 nm. Vzorek materiálu se umísťuje do přístroje (upevní se přitlačnou klapkou), přístroj si posvítí výbojkou na materiál a z odraženého světla zjišťuje spektrální odrazivost materiálu. Výbojky jsou v přístroji dvě, jedna pro zrcadlový a druhá pro rozptylný odraz. Ze získaných hodnot je dále vypočtena integrální odrazivost zrcadlová a velikost integrálního rozptylu. Měření je automatizované a hodnoty pro výpočty se zaznamenávají do počítače.

Pro posuzování integrální odrazivosti je také důležité, jakým typem světla se na materiál svítí. Existují normovaná světelná spektra, s nimiž je zde počítáno. Jsou to tyto: A, B, C, D50, D55, D65, D75. Spektrum LED modulu, se kterým měříme, odpovídá spektru D55. Není zde počítáno se spektrem žárovky (A), neboť se žárovka pro případné přidavné osvětlení světlovodu nepoužívá. Také se spektrem B se zde nepočítá.



Obr. 25: Graf poměrných spekter zářivých toků vybraných typů světla

Aby měření bylo co nejpřesnější a vyloučil se vliv orientace čtvercového vzorku, byl každý ze vzorků pootáčen po 90° a tato rotace se provedla třikrát. Ze získaných 12 hodnot bylo dále počítáno. Vzorků bylo celkem sedm, od každé z firem po jednom, vyjma firmy SUNWAY s.r.o., která dodala dva různé vzorky.

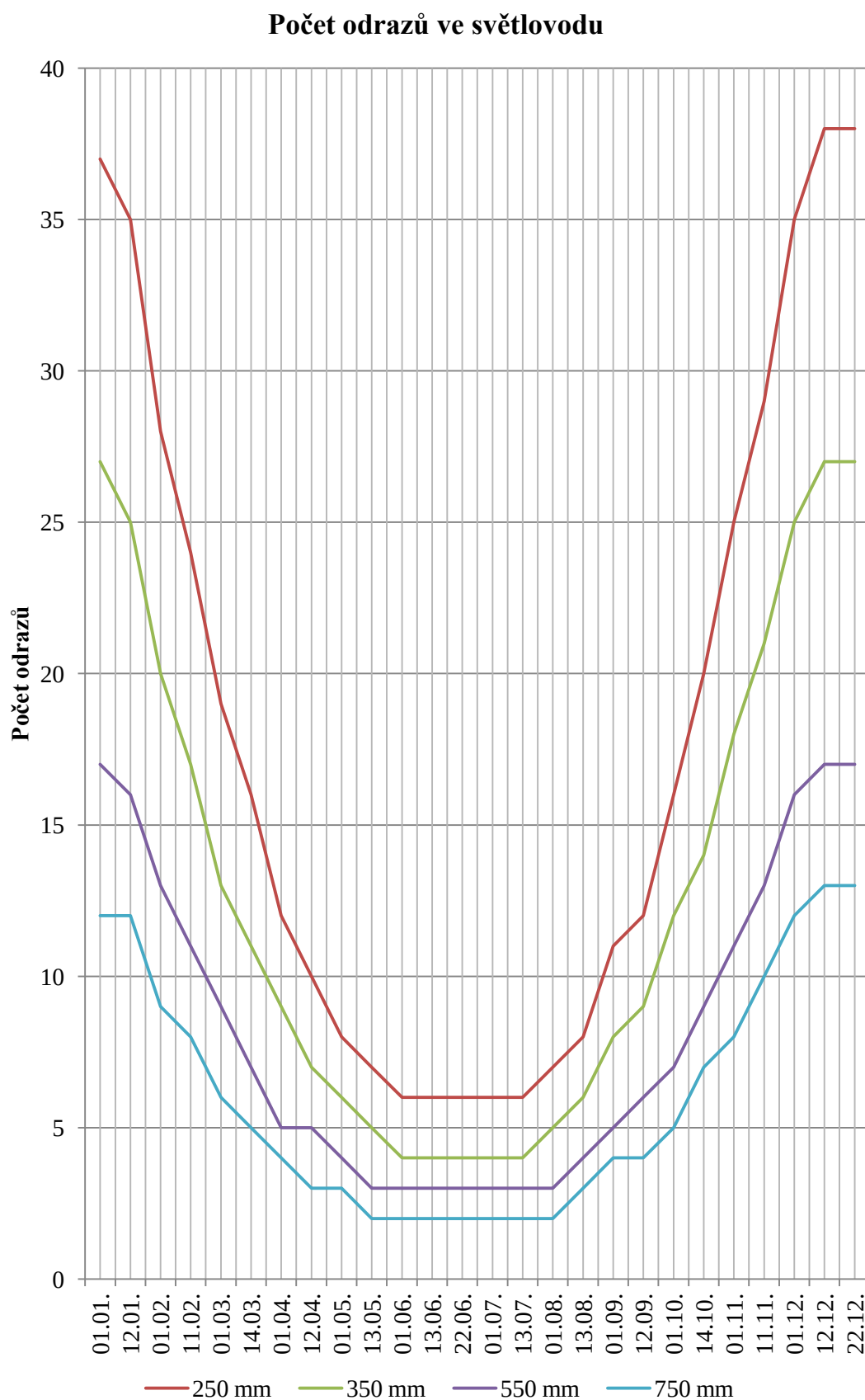
5.6.3 Vyhodnocení

Změřeno bylo celé spektrum světla, které přístroj umožňuje (360 – 740 nm). Z tabulky (Tab. 4) vyplývá, že integrální odrazivost je velmi vysoká u všech měřených vzorků. Leštěný hliník, či chrom jsou již pro účely světlovodů materiály minulosti. Měření také ukazuje větší rozmezí rozptylu. Toto však berme s rezervou, neboť některé měřené vzorky nebyly zcela rovné ani po snaze o jejich vyrovnaní na korkové podložce. Obecně může být konstatováno, že všechny materiály dosahují vysoké odrazivosti.

Nyní je zde pro dokreslení situace znázorněn procentní pokles paprsku způsobený odrazy ve světlovodu a jeho průchodem kopulí a difuzorem. Je to ideální světlovod bez spojů a nerovností. Výpočet je proto čistě geometrický. Paprsek světla vchází do světlovodu v jeho ose (v rovině příruby). Myšlené rovné světlovody mají délky 1,5 m, 3 m a 6 m. Průměr myšleného světlovodu je 250 mm. Uvažovaná účinnost průchodu světla kopulí a difuzorem je vždy stejná, a to 90% (jak pro kopuli, tak pro difuzor). Pro výpočet byla brána pouze zrcadlová odrazivost. Výpočet je proveden pro pravé poledne zvoleného dne, kdy má Slunce azimut 0° a různou výšku nad obzorem γ_s . Povrchová teplota Slunce je cca 5800 K, a proto je použita nejbližší uvažovaná teplota chromatičnosti 5500 K (v tabulce Tab. 4 je k tomu vybrána odpovídající integrální zrcadlová odrazivost).

Tab. 4: Tabulka výsledků měření celého spektra

Výsledné odrazivosti materiálů				
Měření spektra 360 - 740 nm				
Materiál	Typ světla	Integrální zrcadlová	Integrální rozptyl	Integrální celková
		ρ_r	ρ_d	ρ
		[%]	[%]	[%]
Fakro	C	94,13	4,27	98,40
	D50	94,14	4,28	98,41
	D55	94,14	4,27	98,41
	D65	94,14	4,26	98,40
	D75	94,14	4,26	98,40
Lightway	C	92,99	5,65	98,64
	D50	92,99	5,67	98,66
	D55	92,99	5,66	98,65
	D65	92,99	5,65	98,64
	D75	92,99	5,64	98,63
Solatube	C	97,43	2,38	99,81
	D50	97,41	2,41	99,82
	D55	97,41	2,39	99,80
	D65	97,41	2,36	99,77
	D75	97,41	2,34	99,76
Sunizer	C	93,70	5,00	98,70
	D50	93,69	5,04	98,73
	D55	93,70	5,02	98,72
	D65	93,71	4,99	98,70
	D75	93,71	4,97	98,69
Sunway (1)	C	90,75	8,35	99,10
	D50	90,75	8,37	99,12
	D55	90,75	8,36	99,11
	D65	90,76	8,35	99,10
	D75	90,76	8,34	99,10
Sunway (2)	C	93,62	4,84	98,47
	D50	93,60	4,87	98,47
	D55	93,61	4,85	98,47
	D65	93,63	4,84	98,47
	D75	93,64	4,82	98,47
Vzorek	C	96,01	2,13	98,14
	D50	95,99	2,15	98,14
	D55	96,00	2,14	98,14
	D65	96,01	2,12	98,14
	D75	96,02	2,11	98,13



Obr. 26: Počet odrazů v poledne v přímém ideálním světlovodu délky 3000 mm na základě průměru tubusu a data

Jak je vidět z výše uvedeného grafu (Obr. 26), s rostoucím průměrem světlovodu rapidně ubývá počet odrazů. S tím je spojena účinnost světlovodu během roku, což znázorňuje níže uvedený graf (Obr. 27). Tabulky s daty pro vykreslení grafů jsou v příloze dokumentu (Příloha B). Tyto účinnosti reprezentují idealizované podmínky pouze přímého osvětlení sluncem bez vlivu okolní oblohy.

Výpočet počtu odrazů je proveden následujícím způsobem:

$$Z = 90^\circ - \gamma_s (^\circ; -; ^\circ), \quad 5.1$$

$$\frac{l}{2} = \frac{r}{\operatorname{tg}(Z)} (mm; mm; -), \quad 5.2$$

$$h' = h - \frac{l}{2} (mm; mm; mm), \quad 5.3$$

$$n = 1 + \frac{h'}{2 \cdot \frac{l}{2}} (-; mm; mm), \quad 5.4$$

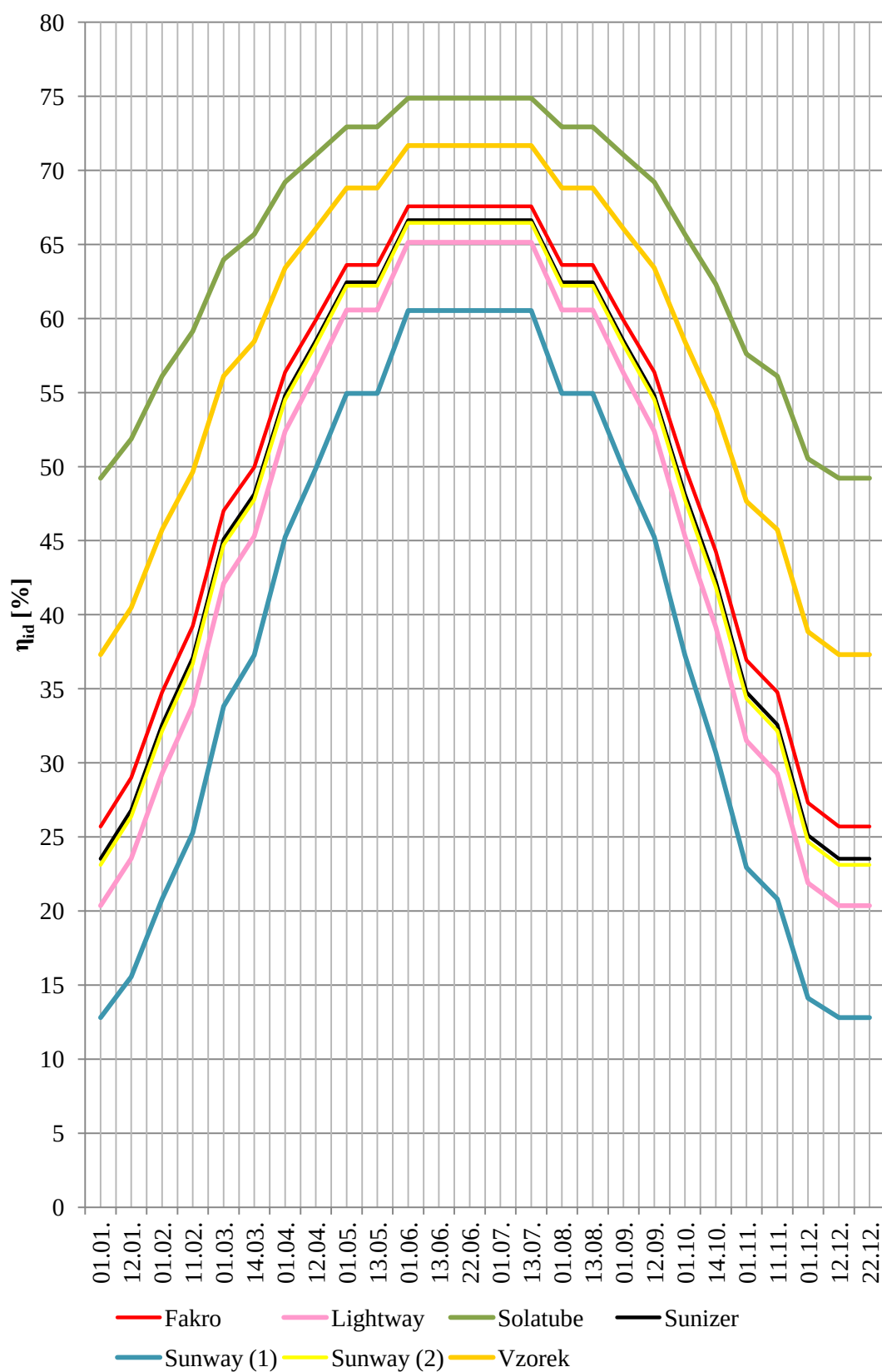
kde	Z	úhlová vzdálenost slunce od zenitu
	γ_s	je elevace slunce nad obzorem
	$\frac{l}{2}$	je délka tubusu, nutná k prvnímu odrazu při výpočtu
	r_T	je poloměr tubusu světlovodu
	h'	délka zbývajícího tubusu po prvním odrazu paprsku
	n	počet odrazů v tubusu (zaokrouhluje se směrem dolů na celá čísla)

Výpočet účinnosti ideálního přenosu světla se provede jedním krokem:

$$\eta_{id} = (\eta_{\tau k} \cdot \eta_{\tau d} \cdot \rho_{D55Zr}^n) (\%; \%; \%; \%; -) \quad 5.5$$

kde	η_{id}	ideální účinnost přenosu světla světlovodem
	$\eta_{\tau k}$	účinnost průchodu paprsku kopulí (= 90 %)
	$\eta_{\tau d}$	účinnost průchodu paprsku difuzorem (= 90 %)
	ρ_{D55Zr}	integrální zrcadlová odrazivost materiálu pro spektrum D55

Ideální účinnost přenosu světla světlovodem



Obr. 27: Vypočtená účinnost v přímém světlovodu délky 1500 mm během roku, vždy v poledne daný den

Výpočet integrální odrazivosti byl proveden následujícím postupem v několika krocích. Nejprve byly seřazeny hodnoty spektrální odrazivosti vedle sebe do tabulky (spektrální odrazivost včetně zrcadlové složky SCI a bez zrcadlové složky SCE). Hodnoty získané z 12 měření se zprůměrovaly. S těmito průměry odrazivosti (SCI a SCE) se zde dále počítá.

Pro výpočet integrální odrazivosti v našem případě platí:

$$\rho = \frac{\int_{360}^{740} \left(\frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right) \cdot V(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{360}^{740} \left(\frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (-, W, nm^{-1}, -, \%, nm), \quad 5.6$$

kde $\frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda}$ je spektrum dopadajícího zářivého toku (pro náš případ poměrná spektra zářivých toků vybraných typů světél)

$V(\lambda)$ je poměrná spektrální citlivost oka normalizovaného pozorovatele

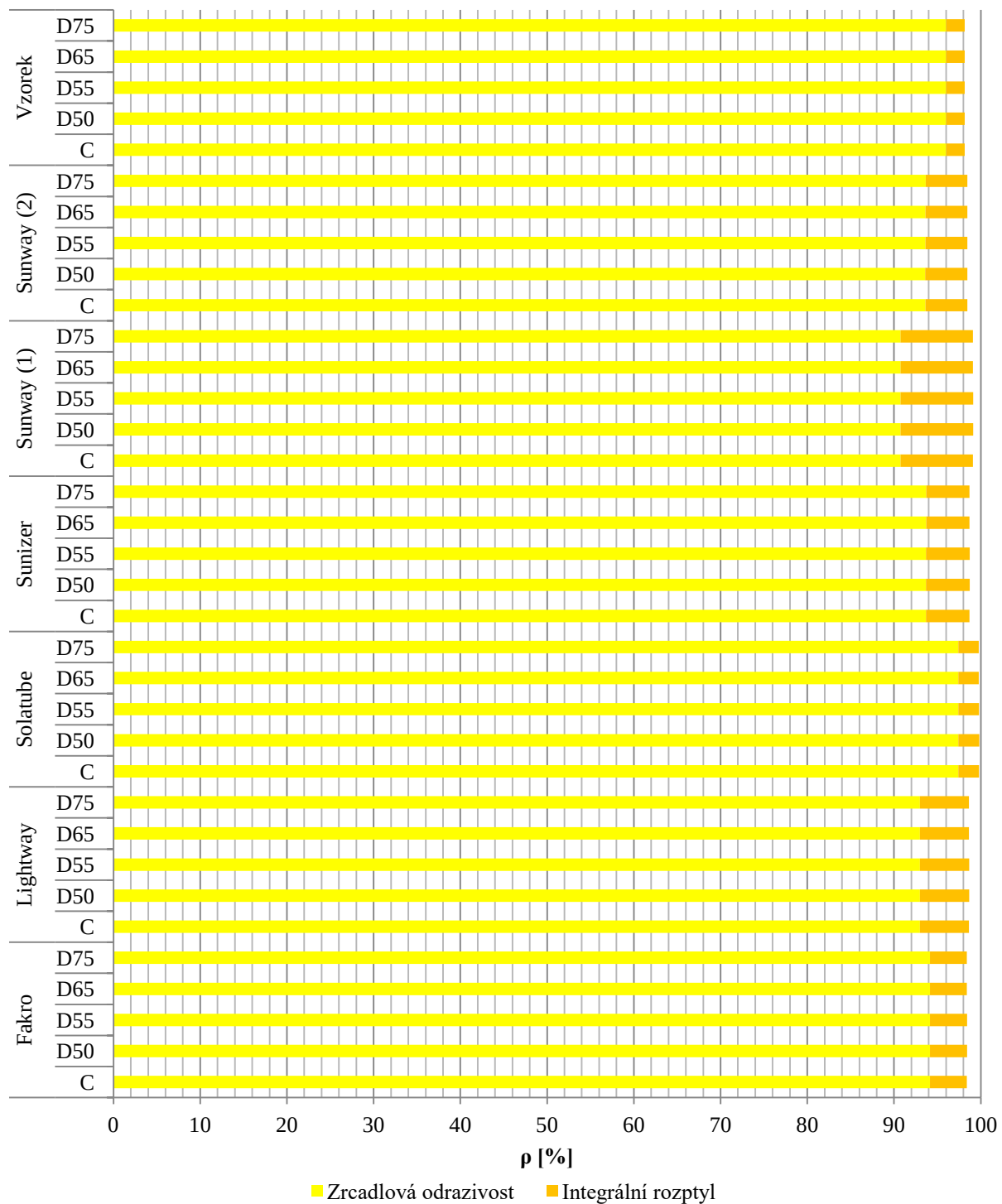
$\rho(\lambda)$ je spektrální odrazivost na určité vlnové délce světla (SCI)

Pro výpočet integrálního rozptylu ρ_d platí stejný vztah, pouze se dosadí za $\rho(\lambda)$ spektrální odrazivost bez zrcadlové složky (SCE). Odečtením výsledků od sebe je získána zrcadlová odrazivost ρ_r :

$$\rho_r = \rho - \rho_d (\%; \%; \%). \quad 5.7$$

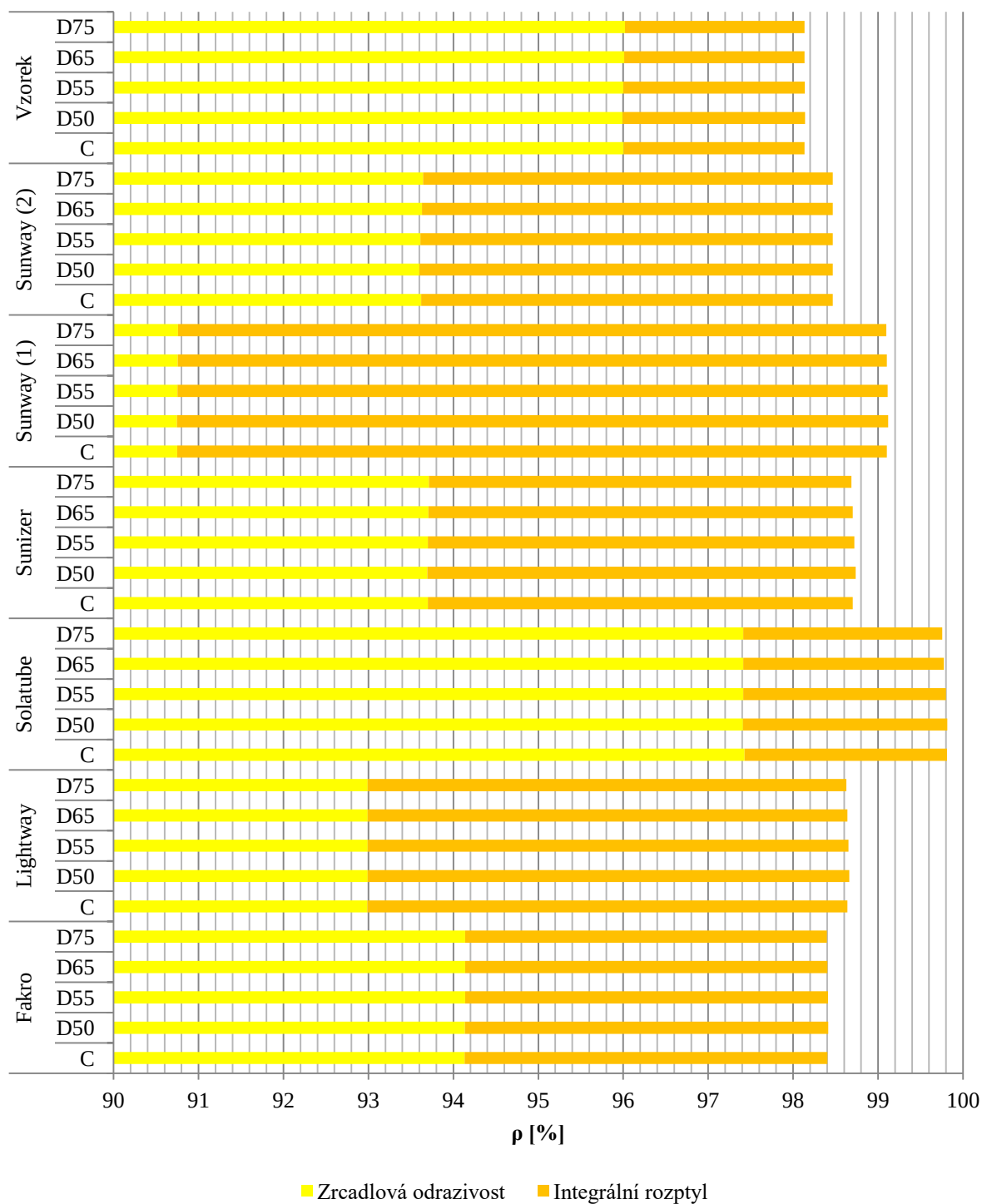
Níže je uvedeno grafické znázornění integrální odrazivosti měřených materiálů (Obr. 27 a 28). Rozdíly mezi jednotlivými vzorky jsou malé. Pro lepší demonstraci toho, jak se chová materiál při osvětlení různým světlem, je pro každý vzorek (od jednotlivých firem) uvedeno pět odrazivostí pro pět světelných spekter.

Integrální odrazivost materiálů



Obr. 28: Graf – odrazivost materiálů pro měřené spektrum světla

Integrální odrazivost materiálů (výřez)



Obr. 29: Graf – odrazivost materiálů pro měřené spektrum světla – výřez

Při zpracování dat se ukázalo, že některé ze vzorků mají různou spektrální odrazivost v závislosti na orientaci vzorku. Rozdíly jsou však pouze menší. Tyto rozdíly projevující se při změně orientace mohou být dány jak vlastnostmi materiálů, tak jeho nerovnostmi.

Maximální rozdíly jsou vybrány ze změřených dat spektrální odrazivosti před zprůměrováním.

Tab. 5: Tabulka rozdílů odrazivosti vzorků při jejich otáčení

Rozdíly integrální odrazivosti materiálů			
Materiál	Měření (1)	Měření (2)	Měření (3)
	$\Delta\rho$	$\Delta\rho$	$\Delta\rho$
	[%]	[%]	[%]
Fakro	0,35	0,34	0,40
Lightway	0,30	0,26	0,24
Solatube	0,28	0,23	0,21
Sunizer	0,03	0,02	0,02
Sunway (1)	0,62	0,60	0,60
Sunway (2)	0,06	0,04	0,04
Vzorek	0,20	0,13	0,27

Podmínky měření: teplota 24,5 °C,
relativní vlhkost vzduchu 46 %,
atmosférický tlak 1018 hPa.

Použité přístroje: Spektrofotometr Minolta CM-3600d, No. 11611013
PC a programové vybavení

5.7 Měření jednotlivých variant světlovodů

5.7.1 Úvod

Pro simulaci přímých paprsků Slunce potřebujeme reflektor s velmi úzkou křivkou svítivosti. Nejlépe s parabolickým reflektorem a miniaturním zdrojem světla v ohnisku, který by co nejpřesněji simuloval prakticky rovnoběžné paprsky Slunce. Dále je nutné respektovat zdánlivou velikost slunce na obloze. Poté bychom vybraný světelný zdroj upnutý na rameni goniofotometru směřovali tak, aby pod různými úhly vůči rovině vstupní příruby světlovodu osvětloval kopuli světlovodu, jako přímé paprsky Slunce na myšleném místě instalace světlovodu.

Problémy s nalezením odpovídajícího zdroje jsou hned dva. Zejména se jedná o rovnoběžnost slunečních paprsků, kterou bychom měli při měření dodržet. Dále je to spektrální složení světla, které je rozdílné oproti přírodnímu. Obojí lze částečně vyřešit. Rovnoběžnosti paprsků se přiblížíme použitím reflektoru s úzkou vyzařovací charakteristikou, v našem případě pouhé 3° . Použitím clony umístěné před reflektor lze dosáhnout lepších vlastností. Druhá nevýhoda také není tak zásadní, neboť měřený světlovod, jehož vnitřní povrch je tvořen materiálem Spectralight® Infinity, je jen málo spektrálně selektivní. O tom jsme se přesvědčili při měření vlastností tohoto materiálu v předchozí části této práce.

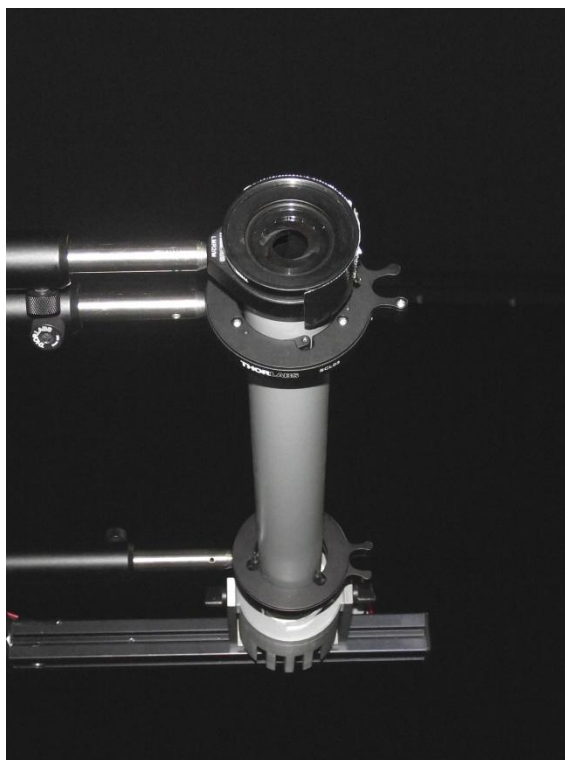
5.7.2 Světelný zdroj

Po vyjmenování požadavků a nevýhod byl k měření vybrán světelný zdroj z laboratoře kvůli okamžité dostupnosti, velikosti zdroje a hlavně možnosti přiložení široké škály nástavců přizpůsobujících směrové vyzařování zdroje. Po vyhledání možných nástavců byl z dostupných zdrojů v laboratoři zvolen modul LED XP-E s chladičem od firmy CREE. Tento jsme propojili s nástavcem finské firmy LEDIL. Vybrán byl reflektor s nejužší charakteristikou vyzařování vůbec, který je dostupný k této LED. Jedná se o model F12985_CRYSTAL-MINE, který se vyznačuje rozbíhavostí paprsků pouze 3° . Oproti očekávání výrobce nemá vyřešené uchycení nástavce na vlastní LED modul a jeho vystředění. Proto byla navržena konstrukce v programu AutoCAD 2017 a vytištěna na 3D tiskárně. Uchycení reflektoru se skládá ze tří částí tak, aby bylo rozebíratelné a nebyl poškozen ani reflektor ani chladič s LED modulem. Celou sestavu (svítidlo) připevňuje k rameni z hliníkového profilu třetí díl ve tvaru U pomocí šroubů. Na obrázku níže (Obr. 29) je zdokumentována celá sestava, U-konzole, vnější násuvný díl a vnitřní díl již přimontovaný k LED modulu s chladičem. Úplně vpravo na fotografii je vidět reflektorový nástavec od firmy LEDIL zajišťující úzkou křivku svítivosti.



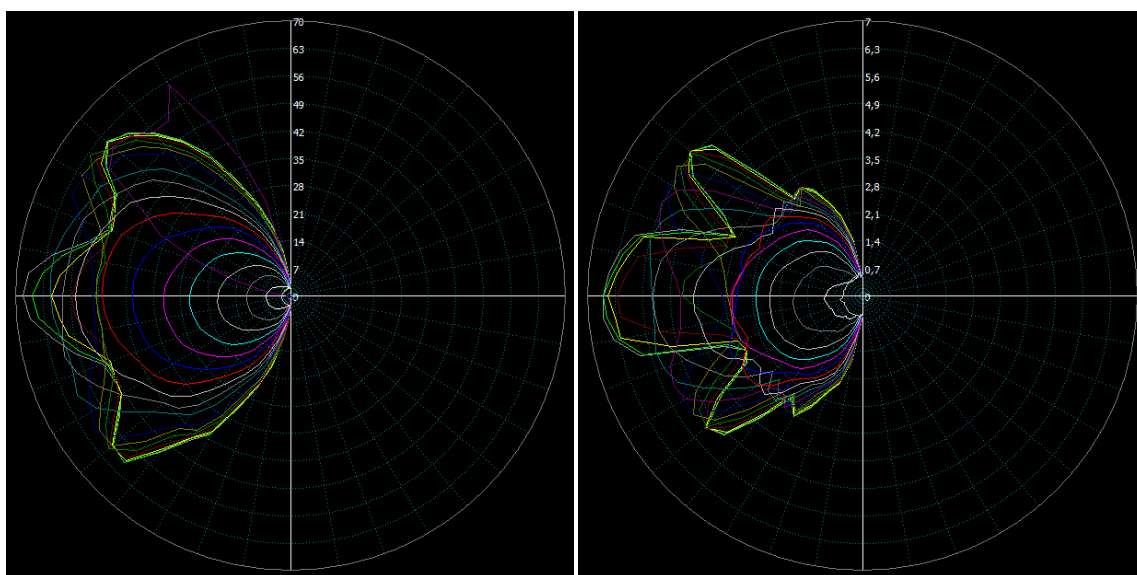
Obr. 30: Zdroj světla pro měření

Světelný zdroj musel vyhovovat dalším požadavkům měření. Průměr slunečního kotouče na obloze je z pohledu pozorovatele pouze 32'. To znamená, že v případě měření se světelným zdrojem v laboratoři vzdáleným od světlovodu 60 cm, by měla světelně aktivní část zdroje mít průměr jen 0,56 cm. V našem případě byla nastavena clona na průměr 1,5 cm. Zejména proto, aby osvětlenost v krychlovém integrátoru dosahovala rozumné, dobře měřitelné, hodnoty. Toto se projevilo zejména při nízkých úhlech elevace „slunce“ nad obzorem, tedy vstupní přírubou světlovodu. Dalším důvodem nastavení průměru šterbiny clony bylo vyzkoušení optimální velikosti průmětu světelné stopy na kopuli tak, aby se při posunu goniofotometru o jeden krok nová světelná stopa na kopuli nacházela mimo plochu předchozí světelné stopy, či se jejího okraje pouze dotýkala. Aby byl svazek paprsků lépe vymezen a okraj světelné stopy ostřejší, byla na reflektor umístěna 40 cm dlouhá trubka z PVC o průměru 40 mm. Tato trubka byla ještě uvnitř nastříkána černým matným lakem. Její konec uzavřela iris clona od firmy ThorLabs. Viz níže (Obr. 30).



Obr. 31: Světelný zdroj pro měření, paprsek zúžený iris clonou

Po instalaci clony byl rozdíl ihned patrný při pohledu na změřené křivky citlivosti světlovodu. S přiloženou clonou vykazuje křivka mnohem prudší změny osvětlenosti v integrátoru. Viz obrázek níže (Obr. 31), kde pravá část znázorňuje křivky citlivosti po instalaci clony. Levá část obrázku ukazuje odezvu světlovodu bez clony a trubky.

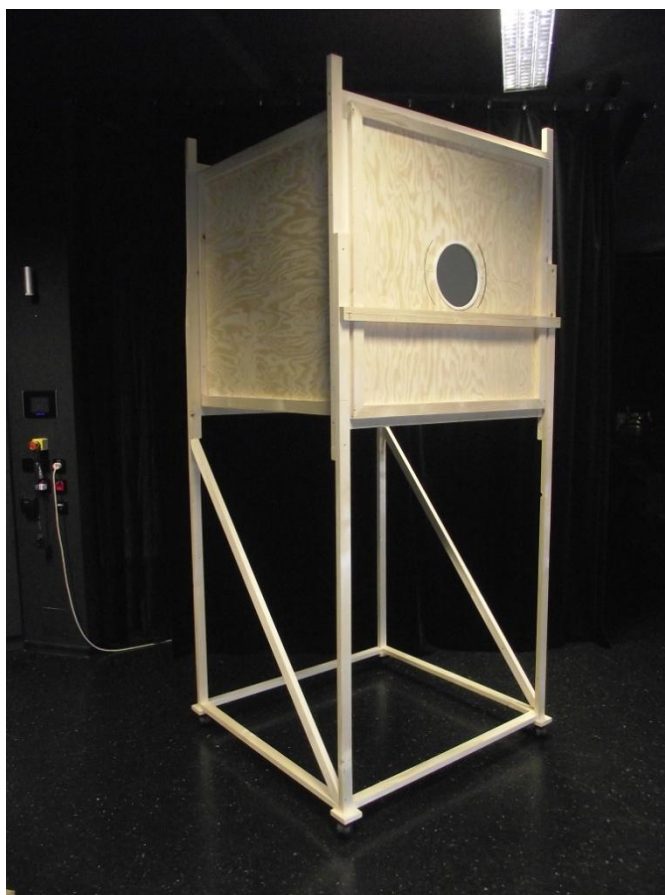


Obr. 32: Měření křivek svítivosti na stejném světlovodu, vlevo bez clony, vpravo s ní

5.7.3 Postup měření

Původní návrh měření světlovodů pomocí metody zonálních toků se ukázal z časových důvodů jako nevhodný (potřebovali bychom nejméně 1600 hodin čistého času měření). Místo toho jsme zvolili měření pomocí krychlového integrátoru, který proces měření značně zrychluje (nyní byl čistý čas měření pouze 58 hodin) a zjednodušuje. Ovšem díky zrychlení měření zase naopak nezjistíme křivky svítivosti výstupu světlovodu s difuzory. Pro požadavek zadání však toto měření zcela postačuje.

Integrátor má hranu vnitřního povrchu délky 1 m. Je vyroben z borovicové překližky (tloušťka 6 mm) a vnějšího rámu ze smrkových hoblovaných latí (rozměr 23x42 mm). Přední stěna (vstup světlovodu) je odnímatelná po povolení čtyř vrutů. Vnitřní výmalba je provedena barvou Primalex Polar kvůli vysokému obsahu BaSO_4 (deklarováno min. 92 %). Nejprve osm nátěrů, poté stříkáno rozprašovačem kvůli rovnoměrnosti bílé barvy. Celý integrátor je vyzdvižen na čtyřech nohách se zavětrováním a s kolečky s brzdou pro snadnou manipulaci v laboratoři. Střed vstupního otvoru integrátoru je přesně ve výšce 2 m od podlahy. Lať na přední stěně při měření přidržuje výstupní přírubu světlovodu, aby nepoklesla, a aby bylo zajištěno těsné spojení integrátoru a světlovodu. Na okraji otvoru ve stěně integrátoru je z vnější strany přilepeno molitanové bílé těsnění. Naznačení kružnice na stěně sloužilo ke zjednodušení při pojíždění integrátoru ke světlovodu.



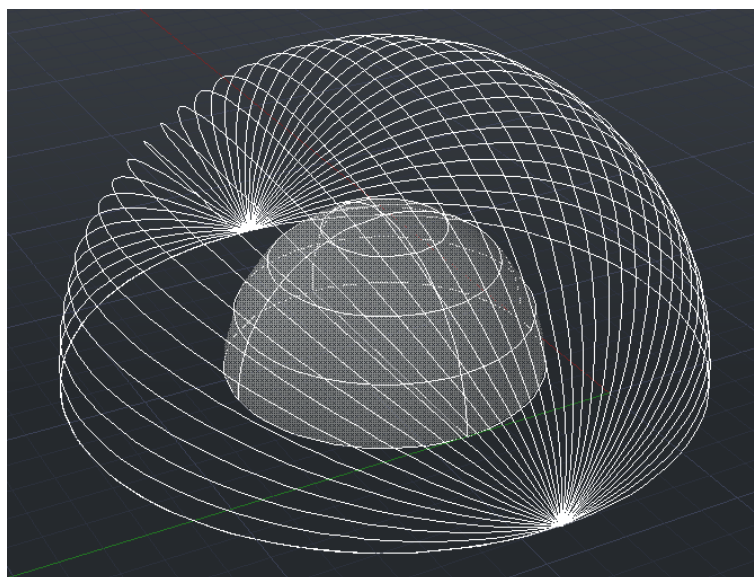
Obr. 33: Krychlový integrátor

Na vstupní straně světlovodu obíhá světelný zdroj v rovinách C- γ . Roviny jsou odstupňovány po 5° (úhel ω) a stejná je velikost kroku umělého „slunce“ v každé rovině (úhel ψ). Světlovod ústí do krychlového integrátoru. Oproti vstupu světlovodu do integrátoru je v ose (procházející středem vstupu a přiloženým světlovodem) ve stěně umístěný fotočlánek z luxmetru PRC Krochmann RadioLux 111, a to za stínítkem (kruh z překližky na stopce), aby nebyl přímo osvětlen světlovodem.



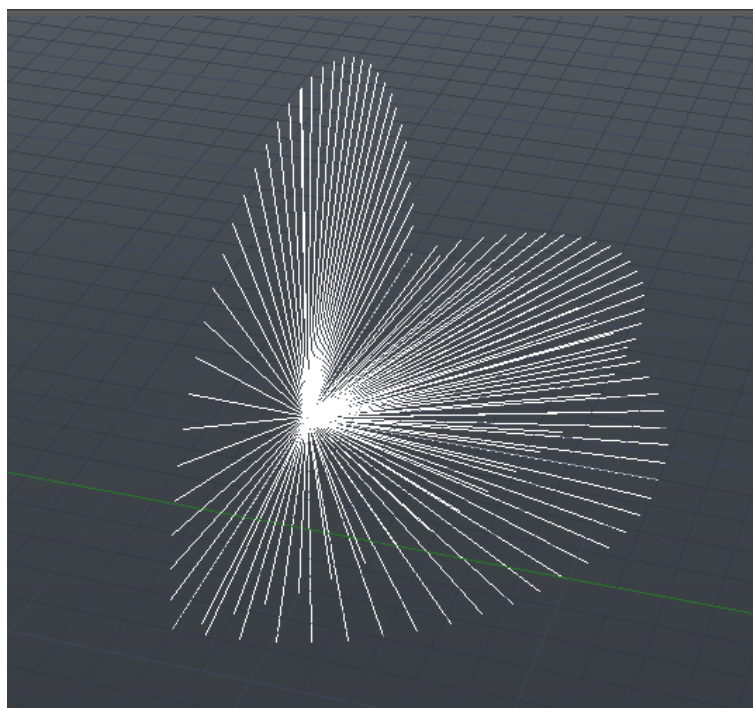
Obr. 34: Pohled zevnitř – stínítko v integrátoru, pohled na integrátor zezadu – držák fotočlátku

Jelikož byl použit automatický goniofotometr, který je určený pro pohyb se svítidlem ve volném prostoru, měření bylo nutno rozdělit na tři bloky. Trajektorie oběhu světelného zdroje jsou demonstrovány na následujícím obrázku (Obr. 34). Trajektorie vycházející z bodu blíže spodnímu okraji obrázku, představujícího sever, se sbíhají na opačném konci v bodě, který představuje jih.



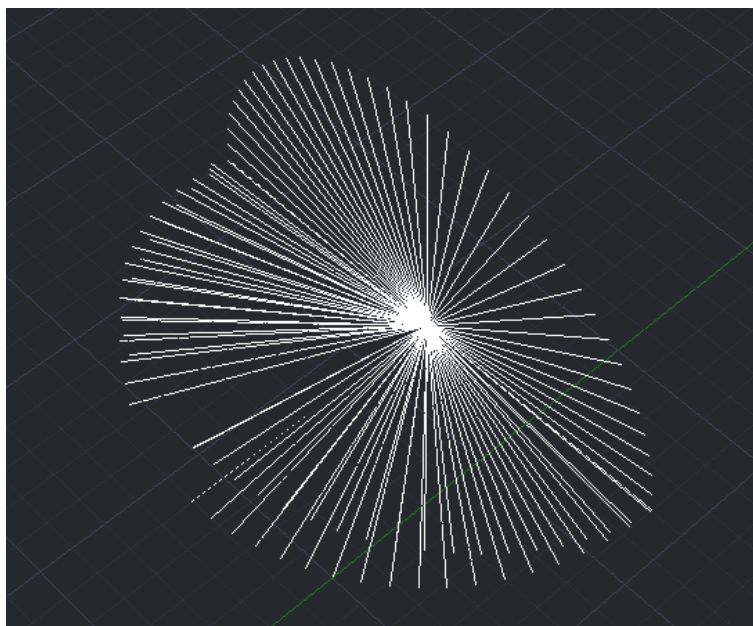
Obr. 35: Ukázka oběhu světelného zdroje okolo kopule světlovodu

Nejprve byla měřena z pohledu goniofotometru (viz obrázek Obr. 35) pravá polovina. Paprsky na obrázku představují měřené body na sféře (kvůli přehlednosti jsou zde vyobrazeny pouze tři roviny). Rovina paprsků kolmá na podložku je označena úhlem $\omega = 90^\circ$. Se sklápěním roviny k podložce se úhel zvětšuje až na $\omega = 180^\circ$. Paprsky jsou v rovině vůči sobě odkloněny o 5° . Úhel ψ označující naklonění paprsku v rovině se postupně zmenšuje od 180° (pro nejbližší paprsek) po 0° u paprsku nejvzdálenějšího (v rovině ležící v myšlené základně obrázku je to pohyb proti směru hodinových ručiček).



Obr. 36: Pravá polovina měřených bodů hemisféry

Následovalo měření levé poloviny rozdělené na dvě dílčí části, horní a spodní. Horní část však nebyla změřena celá, neboť se goniofotometr nemohl natočit do tří poloh v každé rovině (pohyb v rovině, od jižního směru, úhly 75° , 80° , 85° , na obrázku jsou to chybějící paprsky v rovině). Tento problém byl vyřešen zrcadlením úhlů ze spodní levé části (tedy úhlů od jižního směru 95° , 100° , 105°). Světlovod, resp. odrazné zrcátko, byl orientován tak, aby bylo možné provést toto zrcadlení díky symetrii. Viz obrázek níže (Obr. 36). V souborech BETA_1, BETA_2 a GAMA byl světlovod pootočen o 90° proti směru hodinových ručiček.



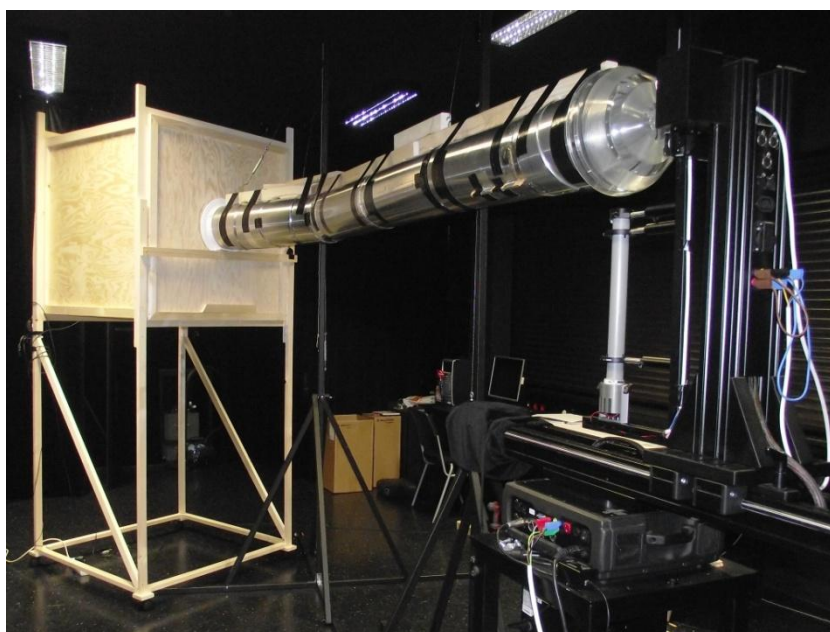
Obr. 37: Pohled na oběh světelného zdroje kolem kopule (vlevo chybějící paprsky znázorňují neměřitelné body v levé polovině)

Celkem bylo změřeno 18 variant světlovodů. Jednotlivé díly světlovodu byly spojovány hliníkovou páskou, popř. duct páskou. Světlovod, i přes svoji nízkou hmotnost, měl tendenci se prohýbat. Proto byl vždy páskou připevněn k nosnému hranolu se zářezy na odpovídajících místech tak, aby místa se spoji v koleni a místa napojení A, B dílu, byla rovná. Za háčky v hranolu byl poté světlovod zavěšen na pevné 3 m vysoké laboratorní stojany. K závěsu sloužil drát s napínáky na pletivo. Díky laserovému vybavení laboratoře bylo vyrovnaní světlovodu do přímého směru, vůči goniofotometru, a do horizontální roviny, výrazně jednodušší. Na jednotlivých variantách světlovodů pak byly vyměňovány díly: kopule čirá, drážkovaná, zrcátko a difuzory. Popis skladby světlovodné trasy ukazuje tabulka níže (viz Tab. 6).

Tab. 6: Skladba světlovodné trasy pro jednotlivá měření

Soubor	Skladba světlovodné trasy					Poznámky k popisu	Délka
	Díl	Díl	Díl	Díl	Díl		[mm]
ALFA	A_0°	4 x D	-	-	B_0°	čirá kopule, difuzér JustFrost	2886
	A_0°	4 x D	-	-	B_0°	kopule Raybender, čirá, difuzér JustFrost	
	A_0°	4 x D	-	-	B_0°	kopule čirá a Raybender s LightTracker, difuzér JustFrost	
	A_0°	4 x D	-	-	B_0°	kopule Raybender, difuzér OptiView	
	A_0°	4 x D	-	-	B_0°	čirá kopule, difuzér OptiView	
	A_0°	4 x D	-	-	B_0°	kopule Raybender, čirá, difuzér OptiView	
	A_0°	4 x D	-	-	B_0°	kopule čirá a Raybender s LightTracker, difuzér OptiView	
	A_0°	4 x D	-	-	B_0°	kopule Raybender, difuzér Vusion	
	A_0°	4 x D	-	-	B_0°	čirá kopule, difuzér Vusion	
	A_0°	4 x D	-	-	B_0°	kopule Raybender, čirá, difuzér Vusion	
	A_0°	4 x D	-	-	B_0°	kopule čirá a Raybender s LightTracker, difuzér Vusion	
BETA_1	A_0°	3 x D	Kol_0°	-	B_0°	kopule čirá a Raybender s LightTracker, difuzér Vusion	2868
	A_0°	3 x D	Kol_30°	-	B_0°		-
	A_0°	3 x D	Kol_60°	-	B_0°		-
BETA_2	A_0°	1 x D	Kol_0°	2 x D	B_0°	kopule čirá a Raybender s LightTracker, difuzér Vusion	2868
	A_0°	1 x D	Kol_30°	2 x D	B_0°		-
	A_0°	1 x D	Kol_60°	2 x D	B_0°		-
GAMA	A_0°	2 x D	-	-	B_0°	kopule čirá a Raybender s LightTracker, difuzér Vusion	1715
	A_0°	1 x D	Kol_30°	-	B_0°		-
	A_0°	1 x D	Kol_60°	-	B_0°		-
	A_0°	1 x D	Kol_90°	-	B_0°		-

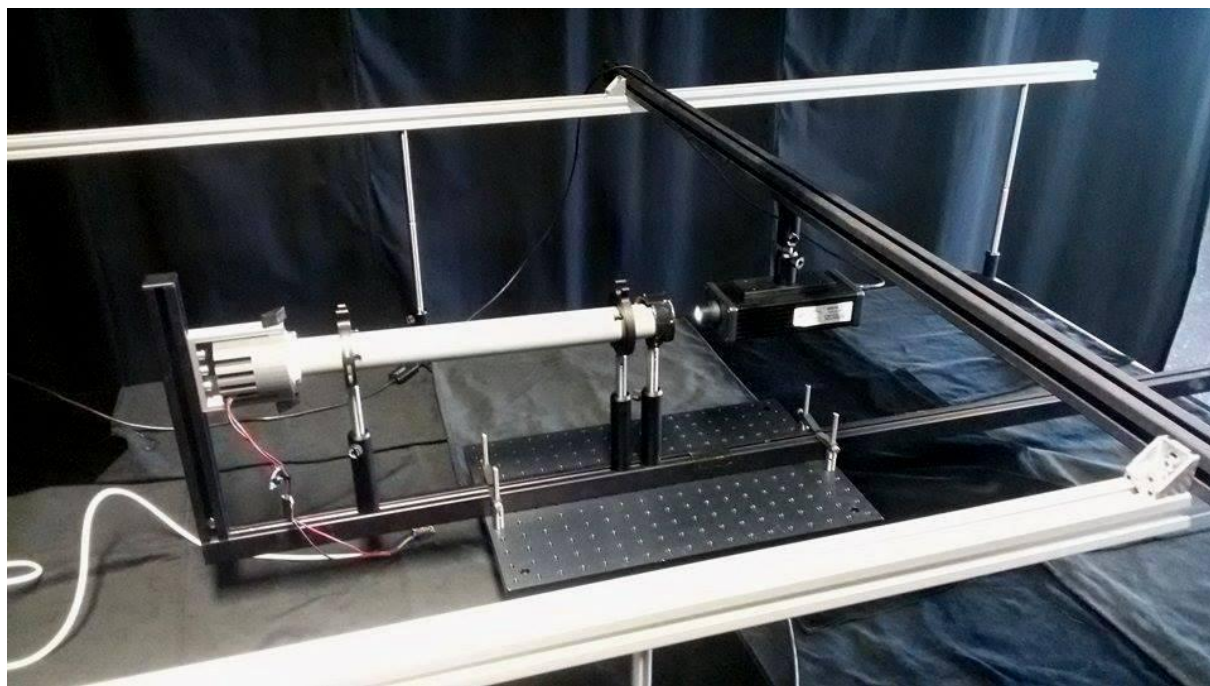
Poznámka k tabulce: A_0° a B_0° značí vstupní a výstupní díl, za podtržítkem je uveden úhel ohybu světlovodu v daném dílu. Úhly u kolene jsou značeny stejně, např. Kol_30°.



Obr. 38: Ukázka z měření

Aby mohl být krychlový integrátor využit k vyhodnocení měření, bylo třeba stanovit jeho převodní konstantu reprezentující hladinu osvětlenosti uvnitř integrátoru při vstupu světelného toku 1 lm. Označme ji například K . Za tímto účelem bylo nutné zjistit nejen světelný tok vycházející ze zdroje použitého k měření, ale i tok vycházející ze světlovodu s mléčným difuzorem. Zvolili jsme metodu zonálních toků.

Měřicí stanoviště bylo v laboratoři připraveno na fotometrickém stole. Celé rameno, s nímž se měřilo pomocí automatického goniofotometru, bylo přišroubováno a vyváženo na otočné nosné plotně. Tato plotna od firmy ThorLab obsahovala vlastní pohon. Přes zařízení ovládající pohon (Brushed Motor Controller) byl otočný talíř připojen k počítači a z něj ovládán. Měřicím zařízením byl spektrometr Specbos 1211 upnutý na příčku, s níž se posouvalo po konstrukci nacházející se okolo a nad otočným ramenem. Vyhodnocení velikosti světelného toku probíhalo na základě měření křivky svítivosti v jedné rovině. Tento postup byl opakován pro různé vzdálenosti, aby byla získána reálnější představa o změnách vypočteného světelného toku. Měření ukázala malé rozdíly mezi vypočtenými toky. Ukázalo se, že při různém natočení svítidla vůči spektrofotometru dochází ke změnám teploty chromatičnosti měřeného světla. Tento rozptyl je do cca 4900 – 5900 K, medián i průměr se blíží hodnotě 5500 K (proto je pro výpočty v této práci brána hodnota D55). Je velmi pravděpodobné, že se při měření projevilo současně více chyb. Jelikož byl paprsek světla velmi úzký, mohla se projevit chyba nerovnoměrnosti osvětlení plošky senzoru, dále například odchylka vznikající různým úhlem dopadu světla na senzor.



Obr. 39: Měřicí pracoviště pro zjištění světelného toku zdroje

Při výpočtu světelného toku zdroje světla je důležité dodržet podmínku bodového zdroje světla. Tzn. rozměr největší světelně aktivní plochy zdroje světla je zanedbatelný vůči vzdálenosti zdroje a měřicího senzoru. Proto jsou při výpočtu světelného toku brána v úvahu

data změřená z největší vzdálenosti, která byla možná (900 mm). Pro tento případ vychází světelný tok zdroje $\phi_Z = 4,868$ lm.

Tab. 7: Znázornění výpočtu světelného toku zdroje

γ_1	$E_{Z\gamma_AVG}$	I_γ	$\Delta\Omega_i$	$I_{\gamma;i;stř}$	$\Delta\phi_i$
[°]	[lx]	[cd]	[sr]	[cd]	[lm]
0	1030,31	834,55	0,0010	779,01	0,7455
1	893,17	723,47	0,0029	511,99	1,4697
2	371,02	300,52	0,0048	204,17	0,9766
3	133,11	107,82	0,0067	91,14	0,6101
4	91,92	74,45	0,0086	56,39	0,4852
5	47,31	38,32	0,0105	27,15	0,2854
6	19,72	15,98	0,0124	12,22	0,1517
7	10,44	8,46	0,0143	6,95	0,0995
8	6,71	5,44	0,0162	2,72	0,0441

Stejným způsobem byl měřen světelný tok vycházející ze světlovodu, na jehož výstupu byl difuzor JustFrost.

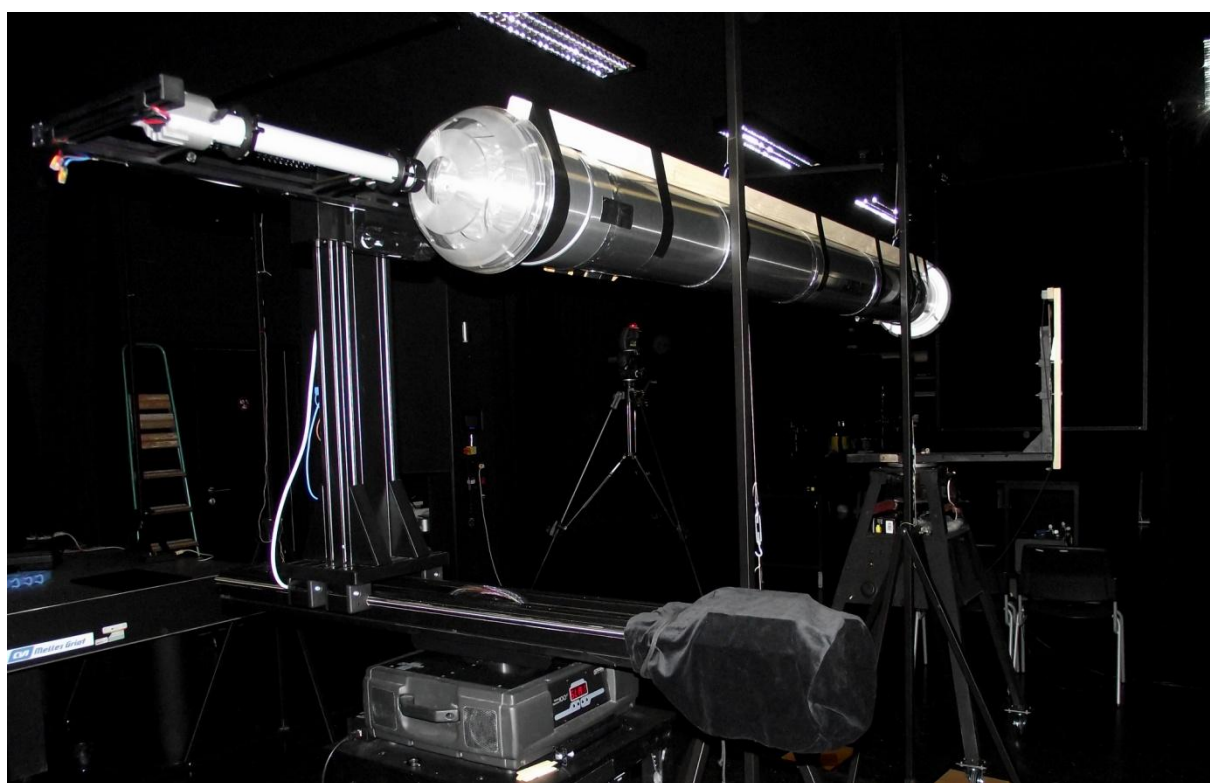


Obr. 40: Difuzor JustFrost se zacloněním skleněného okraje

Vychází se z předpokladu, že křivka svítivosti difuzoru je souměrná podle osy procházející od zdroje skrz světlovod a difuzor. Limitující zde byla délka ramene goniofotometru s ruční aretací, kdy nebylo možné dosáhnout optimální vzdálenosti zdroje a čidla. Vzdálenost měření byla 553 mm a průměr svítící části difuzoru 233 mm. Byla změřena křivka svítivosti v jedné rovině s krokem 1°. Měření bylo dvakrát opakováno a z hodnot byl vypočítán průměr v rozsahu 0° až 90° ($E_{S\gamma_AVG}$) s dalším uvažováním rotační symetrie. Výpočet světelného toku zdroje byl proveden na základě vztahů (4.1 až 4.6) uvedených v kapitole 5.3.2. Níže uvedená tabulka (Tab. 8) je v příloze tohoto dokumentu umístěna celá (Příloha A, Tab. 16).

Tab. 8: Znázornění výpočtu světelného toku vycházejícího ze světlovodu

γ_1	$E_{S_{\gamma_AVG}}$	I_{γ}	$\Delta\Omega_i$	$I_{\gamma,i,istř}$	$\Delta\phi_i$
[°]	[lx]	[cd]	[sr]	[cd]	[lm]
0	30,1100	9,2079	0,0010	9,1815	0,0088
1	29,9375	9,1552	0,0029	9,0783	0,0261
2	29,4350	9,0015	0,0048	8,8761	0,0425
3	28,6150	8,7507	0,0067	8,6139	0,0577
...	...	...	...	...	...
88	0,0128	0,0039	0,1096	0,0075	0,0008
89	0,0360	0,0110	0,1097	0,0107	0,0012
90	0,0337	0,0103	ϕ_z	[lm]	3,0431



Obr. 41: Měření křivky svítivosti světlovodu v jedné rovině pomocí ručně aretovaného goniofotometru (na fotografii umístěn vpravo)

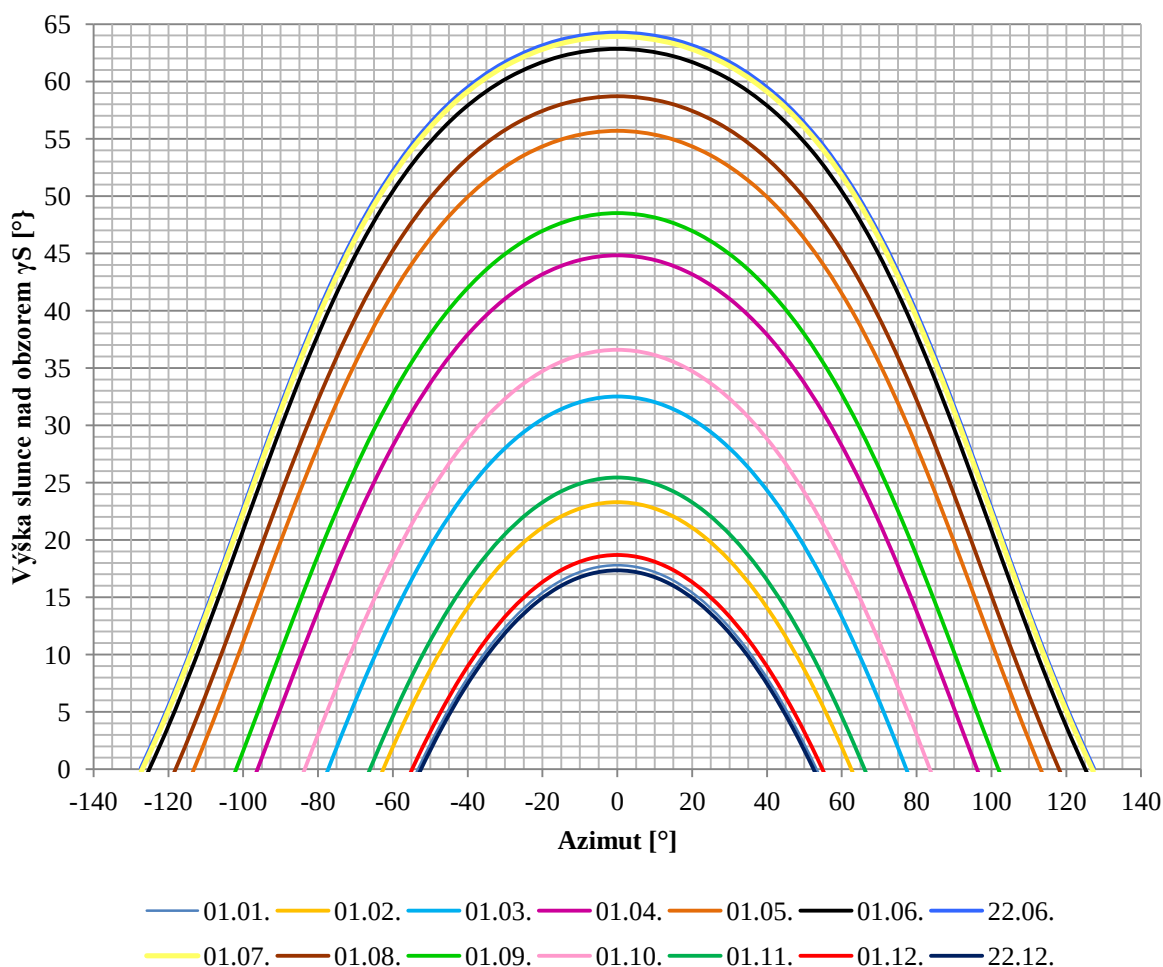
Byl vypočten světelný tok světlovodu o velikosti $\phi_S = 3,0431$ lm. Dalším krokem nezbytným pro určení převodní konstanty K bylo zjištění, jakou osvětlenost v integrátoru vyvolá připojení světlovodu osvětleného zdrojem v hlavní ose. Byla naměřena hodnota

$E_S = 6,015 \text{ lx}$. Při předpokladu správné funkce integrátoru, je možné stanovit převodní konstantu:

$$K = \frac{E_S}{\phi_S}(\text{lx}; \text{lm}; \text{lx} \cdot \text{lm}^{-1}) = \frac{6,015 \text{ lx}}{3,0431 \text{ lm}} = 1,9766 \text{ lx} \cdot \text{lm}^{-1}. \quad 5.8$$

Díky konstantě lze vypočítat účinnost přenosu světla světlovodem a porovnávat jednotlivé varianty mezi sebou. Pro tento účel je třeba vybrat z tabulek se změřenými hodnotami (přiloženo k dokumentu na CD) buňky reprezentující výšku slunce nad obzorem v pravé poledne během roku. V daném okamžiku svítí slunce přímo z jižní strany. Rozsah elevace slunce γ_S se v Brně pohybuje mezi minimem $17,36^\circ$ (dne 22. prosince) a maximem $64,25^\circ$ (dne 22. června). V našem případě byly vybrány hodnoty osvětlenosti E_{SV} pro natáčení zdroje v rovině $\omega = 90^\circ, \psi = \{20^\circ, 25^\circ, \dots, 65^\circ\}$. Trajektorii slunce po obloze znázorňuje graf níže (Obr. 40). Pro letní měsíce je dráha nejdelší a v zimních měsících nejkratší. Značení azimutu v obrázku je provedeno od jihu (dopoledne je azimut záporný, odpoledne kladný).

Trajektorie pohybu slunce po obloze během roku



Obr. 42: Zobrazení zdánlivého pohybu slunce po obloze na začátku každého měsíce během roku pro pozorovatele na Staré radnici v Brně

Zde je uveden výpočet světelného toku a účinnosti:

$$\phi_{SV} = \frac{E_{SV}}{K} (lm; lx; lx \cdot lm^{-1}) \quad 5.9$$

kde ϕ_{SV} je světelný tok vycházející ze světlovodu,
 E_{SV} je hladina osvětlenosti v krychlovém integrátoru
 K je převodní konstanta integrátoru

$$\eta_{SV} = \frac{\phi_{SV}}{\phi_Z} \cdot 100 (lm; lm; \%) \quad 5.9$$

kde η_{SV} je účinnost světlovodu při výše uvedených podmínkách,
 ϕ_Z je světelný tok zdroje světla

Protože všechny světlovody byly měřeny stejným způsobem, je možné zde hodnotit průměrnou účinnost světlovodu (viz níže Tab. 10).

Podmínky měření:

teplota 24 °C,

relativní vlhkost vzduchu 34 -38 %,

atmosférický tlak 1018 - 1030 hPa.

Použité přístroje:

Luxmetr PRC Krochmann RadioLux 111, No. 150915

Fotometrická hlavice PRC 150915 - 01

Zdroj Keithley 2601B Systém source meter, No. 01574, (SAP 316281)

Automatický goniofotometr, goniofotometr s ruční aretací

Spektroradiometr Specbos 1211, S/N 2015926

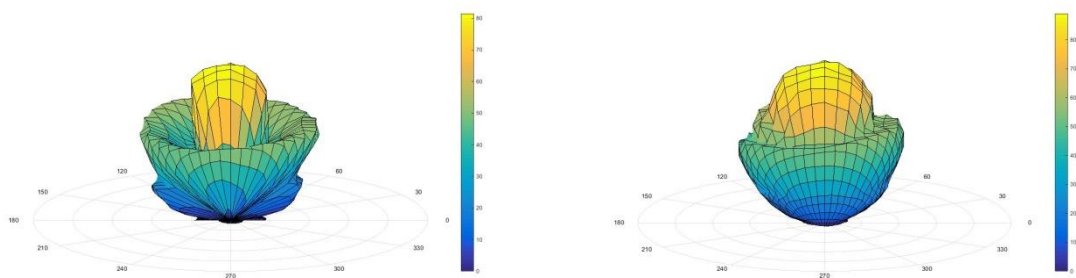
Brushed motor controller Kinesis, No. 27501076

PC a programové vybavení

5.7.4 Výsledky měření a vyhodnocení

Výsledky měření jednotlivých variant světlovodů shrnují následující obrázky, ukazující směrovou citlivost světlovodu, a tabulky, pro porovnání účinností světlovodů ve vybraných úhlech dopadu světla. Rozsáhlejší tabulky, vztahující se ke světlovodům, jsou uvedené v příloze dokumentu na CD. Vykreslení prostorových obrázků je provedeno v programu Matlab. Skript výpočtu je rovněž na přiloženém CD.

Barevné zobrazení vyjadřuje procentuální účinnosti porovnatelných světlovodů vůči nejúčinnějšímu z dané skupiny. V každé skupině (souboru) jsou porovnatelné světlovody očíslovány (viz Tab. 9). Skupiny porovnatelných světlovodů jsou tři. Soubor ALFA, BETA_1 dohromady s BETA_2 a GAMA. Pro každý světlovod jsou v příloze na konci dokumentu (Příloha C) uvedeny dva obrázky. První znázorňuje citlivost směrem od severu, aby byl naznačen vliv odrazného zrcátka upnutého v kopuli. Druhý obrázek pro každý ze světlovodů ukazuje citlivost z jižního směru, kde se taktéž projevuje vliv zrcátka. (Pozn. v souboru světlovodů ALFA je pohled mírně pootočen oproti ostatním světlovodům s cílem zvýšit přehlednost zobrazení.) Zde je přidána ukázka obrázků kopule drážkované se zrcátkem a čiré vždy při pohledu od severu.



Obr. 43: Ukázka výsledných obrázků, vlevo světlovod s drážkovanou kopulí a zrcátkem, vpravo světlovod pouze s širokou kopulí

Tab. 9: Číslování světlovodných tras v obrázcích

Soubor	Poznámky k popisu	Číslo
ALFA	čirá kopule, difuzér JustFrost	1
	kopule Raybender, čirá, difuzér JustFrost	2
	kopule čirá a Raybender s LightTracker, difuzér JustFrost	3
	kopule Raybender, difuzér OptiView	4
	čirá kopule, difuzér OptiView	5
	kopule Raybender, čirá, difuzér OptiView	6
	kopule čirá a Raybender s LightTracker, difuzér OptiView	7
	kopule Raybender, difuzér Vusion	8
	čirá kopule, difuzér Vusion	9
	kopule Raybender, čirá, difuzér Vusion	10
	kopule čirá a Raybender s LightTracker, difuzér Vusion	11
BETA_1	kopule čirá a Raybender s LightTracker, difuzér Vusion, koleno déle od kopule	1
		2
		3
BETA_2	kopule čirá a Raybender s LightTracker, difuzér Vusion, koleno blíže kopuli	4
		5
		6
GAMA	kopule čirá a Raybender s LightTracker, difuzér Vusion	1
		2
		3
		4

5.7.4.1 Soubor ALFA

Tab. 10: Účinnosti přímých světlovodů pro vybrané úhly dopadu světla

Účinnosti rovných úseků světlovodů											
Varianty světlovodů - soubor ALFA											
γ_s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
[°]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
20	17,5	24,7	26,0	33,8	23,7	31,1	32,7	28,7	27,2	27,2	28,1
25	22,5	28,8	30,0	39,1	30,7	35,8	37,0	34,6	32,1	32,1	32,9
30	27,8	30,7	31,7	39,3	34,1	37,1	37,5	39,1	33,2	33,2	35,5
35	32,3	29,8	31,0	38,3	39,4	36,1	37,4	35,4	33,1	33,1	33,9
40	40,8	37,7	38,4	46,4	45,7	42,2	43,3	45,9	42,8	42,8	43,1
45	46,2	50,0	50,7	53,7	48,1	49,0	51,2	58,7	56,7	56,7	56,2
50	47,6	53,3	53,2	61,1	46,9	55,4	55,8	65,5	58,6	58,6	59,3
55	45,3	48,8	48,6	55,8	44,8	50,7	51,2	59,5	53,0	53,0	54,1
60	52,4	37,5	37,2	42,2	51,0	38,5	38,9	45,7	40,4	40,4	41,7
65	46,1	33,1	34,1	36,9	44,7	33,1	35,1	40,7	37,9	37,9	38,5
Průměr	37,8	37,4	38,1	44,7	40,9	40,9	42,0	45,4	41,5	41,5	42,3

Dále je v příloze uvedena tabulka poměrná (Tab. 18), která porovnává světlovody mezi sebou tak, jak jsou vykresleny pomocí obrázků v příloze (Příloha C). Poměrné účinnosti v tabulce jsou vztaženy k nejlepší osvětlenosti v integrátoru získané při poloze zdroje na hlavní ose procházející světlovodem (při použití světlovodu ze souboru ALFA). Tvar objektu na obrázku je ovlivněn všemi opticky aktivními komponentami světlovodu. Pokud se však blíže podíváme na obrázky světlovodů ALFA – 1, 5 a 9, zjistíme, že difuzor nemá na výsledný tvar objektu velký vliv. Tvar citlivosti pro světlovody s čirou kopulí je prakticky stejný pro všechny difuzory. Při posuzování účinnosti je rozptyl tří srovnávaných 3,7 %. Nejnižší účinnost má světlovod s nasazeným difuzorem Justfrost (37,8 %), vyšší má Optiview (40,9 %) a nejlepší z nich je Vusion (41,5 %).

Použití pouze drážkované kopule s absencí vnitřní číré kopule zajišťuje nejlepší výsledky, u difuzorů Vusion (45,4 %) a Optiview (44,7 %). Tvar citlivosti je dán lokalizací drážkování na kopuli. Pokud paprsek přecházel přes drážkování, odezva fotočlásku v integrátoru byla výrazně vyšší. Kopule má dva pásy drážkování, které jsou reprezentovány tvarem citlivosti na obrázcích ALFA – 4, 8 (Obr. 50, 51, 58 a 59). Zde je také patrné omezení světelného toku světlovodu při polohách slunce odkloněného od zenitu o 15° - 40°. Jak je uvedeno výše, polohy elevace nad 60° dosáhne slunce v našich podmínkách pouze v letních měsících.

Při použití drážkované kopule ve spojení s čirou kopulí se projeví průchod další vrstvou snížením účinnosti přenosu světla. Tvar je opět obdobný a nejlepší účinnosti dosáhnul Vusion (41,5 %) vzápětí ho následoval Optiview (40,9 %). Nejnižší účinnost má opět JustFrost (37,4 %).

Další kombinace světlovodů v souboru ALFA jsou představeny použitím všech dostupných dílů, tzn. přidání odrazného zrcátka do kopule. Toto zrcátko se projeví oříznutím citlivosti ze severu (což je vidět na prvním obrázku každé odpovídající kombinace) a naopak zvětšením citlivosti na nízké elevační úhly slunce z jižní části. Při našem měření se přínos zrcátka příliš neprojevil. Nejvyšší účinnosti dosáhl světlovod s použitým difuzorem Vusion (42,3 %), Optiview (42 %) a dále Justfrost (38,1 %).

5.7.4.2 Soubory BETA_1 a BETA_2

Tab. 11: Účinnosti zalomených světlovodů pro vybrané úhly dopadu světla

Účinnosti světlovodů s kolenem na konci a na začátku trasy						
Varianty světlovodů - soubor BETA						
γ_s	1	2	3	4	5	6
[°]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
20	28,3	33,7	32,7	28,7	33,0	30,6
25	34,5	37,5	37,1	34,2	44,0	42,5
30	37,5	38,0	35,6	30,7	35,6	36,3
35	35,8	38,5	38,7	34,6	42,3	43,6
40	43,3	40,6	43,1	40,4	37,7	39,0
45	52,5	48,3	47,2	54,0	48,1	48,4
50	56,7	50,0	45,0	54,8	50,7	42,5
55	50,6	44,9	38,3	47,4	44,6	39,8
60	38,5	34,9	31,0	36,4	35,1	33,0
65	35,0	31,8	30,9	35,5	31,5	32,0
Průměr	41,3	39,8	37,9	39,7	40,3	38,8

Hlavním úkolem této diplomové práce bylo zjištění, v kterém místě je výhodnější světlovodnou trasu zalamovat, zda blíže kopuli nebo blíže difuzoru. Tabulka (Tab. 11) srovnává světlovodné trasy podle vybraných úhlů dopadu světla. Jedná se prakticky o stejně dlouhé světlovody, jako v předcházejícím souboru ALFA (jsou pouze o 18 mm kratší). Všech šest světlovodů bylo plně vystrojeno. Rozdíly mezi jednotlivými světlovody byly v místě zalomení trasy a úhlu zalomení.

Rovné úseky světlovodů BETA - 1, 4 by měly představovat nejvyšší účinnost přenosu světla při použití kolene v trase. Došlo zde k nelogickému zvýšení účinnosti světlovodu při jeho zalomení (světlovod Beta – 5). (Je to zvláštní úkaz, neboť u souboru Gama došlo také ke zvýšení účinnosti při zalomení světlovodu z 30° na 60°.) Ukázalo se, že je lepší mít menší nerovnosti (dané spojováním dílů kolene), které zvyšují počet odrazů až na konci trasy. Tzn. BETA – 1 s kolenem umístěným v největší vzdálenosti od vstupu má vyšší účinnost oproti BETA – 4 s kolenem umístěným blíže kopuli. Pokud trasu zalamujeme, pak je lepší zlom umístit blíže ke kopuli. V obou případech s úhly 30° a 60° jsou účinnější trasy s koleny blíže kopuli. Rozdíly by se pravděpodobně více projevíly u delších světlovodů. Zde byl posun kolene v trase pouze o 1200 mm. Při pohledu na obrázky (Obr. 66 až 77) v příloze (Příloha C) je patrné, že při zalamování trasy dochází k výrazné změně tvaru křivky citlivosti světlovodu.

5.7.4.3 Soubor GAMA

Tab. 12: Účinnosti krátkých světlovodů, soubor GAMA pro vybrané úhly dopadu světla

Účinnosti krátkých světlovodů				
Varianty světlovodů - soubor GAMA				
γ_s	1	2	3	4
[°]	[%]	[%]	[%]	[%]
20	32,7	35,1	33,5	34,5
25	39,2	38,3	39,5	37,9
30	43,3	37,4	37,8	35,3
35	39,1	37,7	41,6	37,9
40	47,5	39,0	45,7	40,3
45	55,5	46,4	50,1	48,8
50	58,9	51,1	44,4	48,9
55	52,6	46,0	41,4	42,7
60	40,7	35,1	34,2	33,7
65	37,1	31,4	32,2	31,6
Průměr	44,7	39,7	40,0	39,2

Nejkratší světlovody, které byly měřeny, ukazují malý vliv úhlu zalomení na výslednou účinnost. Velký pokles účinnosti při zalomení o 30° vůči rovnému úseku se pak již dále příliš nezvyšuje. Naopak zde dokonce vzrostla účinnost při zvětšení zalomení na 60°, předpokládám, že je to anomálie způsobená odchylkou měření. Při měření krátkých světlovodů bylo nejsložitější zajistit jejich stabilitu v prostoru a tvar trasy s ohledem na hmotnost světlovodu vůči hmotnosti podpůrné konstrukce.

6 ZÁVĚR

V zadání předkládané práce bylo stanoveno několik cílů. V prvním bodě se jednalo o provedení literární rešerše současných normativních předpisů týkajících se měření světlovodů. Dalším bodem bylo stanovení měřicího postupu a experimentálního provedení měření v laboratoři. Posledním bodem zadání bylo grafické a číselné vyjádření naměřených dat. Stanovené cíle práce korespondují s jednotlivými částmi diplomové práce.

Na základě vyhledání a prostudování norem bylo zjištěno, že měření světlovodů se provádí zejména komparativní metodou kontinuálního měření ve venkovních podmínkách. Exteriérové světelné podmínky při měření však nelze opakovat. Další možností je měření v laboratoři s velkoplošným zdrojem difúzního světla a integrátorem na výstupu světlovodu pro zjištění vycházejícího světelného toku. Tato metoda však určuje nejméně příznivou světelnou situaci pro světlovod, kdy dochází k mnoha odrazům při přenosu světla světlovodem, a tím je velikost výstupního světelného toku silně ovlivněna. Tato metoda neodhaluje příznivé vlastnosti světlovodu při osvětlení přímým slunečním světlem. Další metody zjišťování výkonnosti světlovodů jsou orientační, tabulkové.

V první části měření diplomové práce byla soustředěna pozornost na stanovení spektrálních vlastností odrazných materiálů používaných při konstrukci světlovodů. Materiály k tomuto měření laskavě poskytlo šest firem:

- ABC - AMERICAN BOHEMIAN CORPORATION s.r.o.,
- FAKRO CZECH s.r.o.,
- Lightway s.r.o.,
- SUNWAY s.r.o.,
- WT-WINDOWS TOMORROW s.r.o.,
- anonymní firma.

Celkem bylo k dispozici pro měření sedm vzorků materiálů. Ukázalo se, že všechny materiály dostupné na našem trhu jsou kvalitní, disponují vysokou integrální odrazivostí a jejich vzájemné rozdíly jsou velmi malé. Dalším bodem v první části jsou tabulky a grafická vyjádření vlastností vzorků a ukázka počtu odrazů ve fiktivních rovných světlovodech.

Po zhodnocení možných variant měření tubusových světlovodů byl vybrán postup měření s využitím krychlového integrátoru a světelného zdroje s malou rozbíhavostí paprsků jako simulace slunce. Za tímto účelem byl svépomocí vyroben krychlový integrátor o vnitřní hraně 1 m. Dále byl sestaven světelný zdroj určený pro měření. Svítidlo se skládalo z LED modulu XP-E od firmy CREE, dále difuzoru usměrňujícího světelný tok diody do úzkého paprsku světla, upevňujících dílů, které byly navrženy a vytištěny 3D tiskárnou a omezující iris clony. Celá sestava byla přimontována k rameni automatického goniofotometru. K měření světelného toku světlovodu byl také upraven goniofotometr s ruční aretací. Pro měření toku světelného zdroje bylo připraveno pracoviště na fotometrickém stole v laboratoři. Změřeno bylo 18 variant světlovodů, které byly rozděleny do tří porovnatelných skupin. Jednalo se jak o rovné světlovody, tak i o světlovody zalomené pomocí kolene. Každá skupina světlovodů měla jinou délku světlovodné trasy. Z měření vyplývají následující zjištění:

- u rovných světlovodů souboru ALFA nejlepších hodnot dosáhly světlovody s použitým difuzorem Vusion a drážkovanou kopulí, bez použití kopule čiré;
- nejmenší účinnosti dosahovaly světlovody s difuzorem JustFrost;
- u zalomených světlovodů (soubory BETA_1 a BETA_2) je výhodnější zalamovat světlovodnou trasu blíže kopuli;
- u krátkých světlovodů souboru GAMA byla zjištěna pouze malá závislost poklesu účinnosti při větším zalomení trasy.

Změřením účinnosti světlovodu při přímém a rozptýlném osvětlení by bylo možné stanovit pomyslnou provozní účinnost světlovodu - to jak během jednotlivých měsíců, tak i během dne. Data potřebná k tomuto teoretickému stanovení by musela obsahovat informace o skladbě dopadajícího světla na kopuli světlovodu, tedy jak je rozděleno dopadající světlo na přímou a difuzní složku. Tato data je možno získat aproximací pro umístění instalace světlovodu z jednotlivých měřicích stanic. Ovšem v ČR tato data zaznamenávána nejsou. Nejbližší měřicí stаницe je na SAV v Bratislavě a dále ve Vídni. Aproximace dat se nedoporučuje, mohou vznikat velké odchylky. Pokud by byly dostupné hodnoty pro ČR, otevřely by se další možnosti přesnějšího hodnocení účinnosti světlovodů a finanční návratnosti instalace. To však již přesahuje rámec předložené práce, a proto se jedná spíše o námět na další měření navazující na tuto problematiku.

LITERATURA

- [1] ČSN 360020:2015. *Sdružené osvětlení*. ÚNMZ, 2015.
- [2] ČSN 730580-1. *Denní osvětlení budov: Základní požadavky*. ÚNMZ, 2011.
- [3] DARULA, Stanislav, Richard KITTler, Miroslav KOCIFAJ, Jiří PLCH, Jitka MOHELNÍKOVÁ a František VAJKAJ. *Osvětlování světlovody*. 1. vyd. Praha: Grada, 2009, s. 19 - 30. Stavitel. ISBN 978-80-247-2459-1.
- [4] PLCH, Jiří, Petr SUCHÁNEK a Jitka MOHELNÍKOVÁ. *Osvětlení neosvětlitelných prostor*. 1. vyd. Brno: ERA group, 2004, v, 129 s. ISBN 80-865-1782-9.
- [5] RYBÁŘ, Peter. *Denní osvětlení a oslunění budov*. 1. vyd. Brno: ERA group, 2002, vi, 271 s. Technická knihovna (ERA). ISBN 80-865-1733-0.
- [6] CARTER, David. Digest 2 Tubular daylight guidance systems. *Lighting research and technology*. 2014, 46(4): 369 - 387.
- [7] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013, 622 s. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [8] BAXANT, Petr. *Světelná technika* [online]. Brno [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: e-learning FEKT VUT v Brně. Skripta. VUT.
- [9] ZAJÍČEK, Josef. *Využití dutých světlovodů pro osvětlování*. Brno, 2012. Diplomová práce. FEKT VUT v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.
- [10] PLCH, Jiří, Jitka MOHELNÍKOVÁ a Jakub KRÁL. *Light pipe comparative measurement* [online]. 2015, : 3 [cit. 2015-11-15].
- [11] KAŇKA, Jan. ČVUT V PRAZE, STAVEBNÍ FAKULTA. Význam činitelů při výpočtech ve stavební světelné technice. *Světlo: Časopis pro světlo a osvětlování*. 2008, (3): 3. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/vyznam-cinitelu-pri-vypoctech-ve-stavebni-svetelne-technice--15832>, [cit. 2015-12-21].
- [12] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [13] ROKYTA, Richard. *Fyziologie pro bakalářská studia v medicíně, přírodovědných a tělovýchovných oborech*. Praha: ISV, 2000. Lékařství. ISBN 80-858-6645-5.
- [14] SCHLEICHEROVÁ, Monika. *Biologické rytmy živočichů - rozšiřující učivo biologie na gymnáziích*. České Budějovice, 2009. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Radka Závodská. Původní zdroj: Illnerová H., 1985: Cirkadiánní biorytmy. In: Trávníčková E. (ed.): Novinky ve fyziologii II. s. 11, SPN, Praha.
- [15] GRYGAR, Jiří. Purkyňův jev a astronomie. *Živa: Rozhled v oboru veškeré přírody*. Academia, 2011, 2011(5), 236-237.
- [16] FUKSA, Antonín. Světlo a biologické hodiny. *Světlo*. Praha: FCC Public s. r. o., 2011, 2010(6), 56-58.

- [17] Doc. Ing. Richard Kittler, DrSc. – Ocenenie CIE za dlhoročný prínos v základnom výskume. *Světlo: Časopis pro světlo a osvětlování*. 2007, **2007**(6), 2. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/doc-ing-richard-kittler-drsc-ocenenie-cie-za-dlhorocny-prinos-v-zakladnom-vyskume--16102>
- [18] Izolační vlastnosti světlovodů Solatube®. *Solatube®: Úvod > Technologie > Izolační vlastnosti* [online]. 2015 [cit. 2016-09-14]. Dostupné z: <http://www.solatube.cz/technologie/izolacni-vlastnosti>
- [19] CHOMOUCKÁ, Jana. *Rozptyl* [online]. Brno, 2004 [cit. 2016-09-17]. Dostupné z: http://www.fch.vut.cz/~zmeskal/obring/presentace_2004/04_rozptyl.pdf. Elektronický studijní text. Ústav fyzikální a spotřební chemie, Fakulta chemická, Vysoké učení technické v Brně.
- [20] ČSN EN 13032-1+A1 Světlo a osvětlení - Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel - Část 1: Měření a formát souboru údajů. ÚNMZ, 2011.
- [21] Drápela, J., Baxant, P. Osvětlovací soustavy, Elektronický text č. EEN606, Laboratorní cvičení. Brno: 2006. s. 1-46. (cs)

OBRÁZKY

- [A] Obr. PowerWiki. [online]. [cit. 2016-08-25]. Dostupné z https://www.powerwiki.cz/attach/A1B15EN3/EN3_1_zaklady.ppt
- [B] Obr. 11. In: Encyklopedie fyziky [online]. © 2006 – 2015 Jaroslav Reichl, Martin Všetička. [cit. 2015-12-28]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/1306-rovinny-uhel-a-prostorovy-uhel>.
- [C] Obrázek. In: Vzorkovník tubusových materiálů. [online]. © 2013–2015 WT-WINDOWS TOMORROW s.r.o. [cit. 2015-12-28]. Dostupné z: http://www.solatube.cz/data/files/article/35/Solatube-vzorkovnik_tubusovych_materialu.pdf.
- [D] Typical tubular daylighting device, No. 82, June 2014. In: Performance of Tubular Daylighting devices. [online]. © 2014 A. Laouadi, H.H. Saber. [cit. 2015-12-28]. Dostupné z: http://www.nrc-cnrc.gc.ca/ctu-sc/ctu_sc_n82.
- [E] Typical collector shapes, No. 82, June 2014. In: Performance of Tubular Daylighting devices. [online]. © 2014 A. Laouadi, H.H. Saber. [cit. 2015-12-28]. Dostupné z: http://www.nrc-cnrc.gc.ca/ctu-sc/ctu_sc_n82.
- [F] Obrázek. In: Technologie, Prvky světlovodu Solatube®, Tubus . [online]. © 2013–2015 WT-WINDOWS TOMORROW s.r.o. [cit. 2015-12-28]. Dostupné z: <http://www.solatube.cz/technologie/prvky-svetlovodu/tubus>.
- [G] Obrázek. In: Technologie, Prvky světlovodu Solatube®, Difuzér . [online]. © 2013–2015 WT-WINDOWS TOMORROW s.r.o. [cit. 2015-12-28]. Dostupné z: <http://www.solatube.cz/technologie/prvky-svetlovodu/difuzer>.
- [H] Obrázek. In: Produkty, Brighten Up® série, Rezidenční světlovody. [online]. © 2013–2015 WT-WINDOWS TOMORROW s.r.o. [cit. 2015-12-28]. Dostupné z: <http://www.solatube.cz/produkty/brighten-up/komponenty/koleno-ohyb-az-90>.
- [I] Obrázek. In: Technologie, Prvky světlovodu Solatube®, Difuzér. [online]. © 2013–2015 WT-WINDOWS TOMORROW s.r.o. [cit. 2016-08-22]. Dostupné z: <http://www.solatube.cz/technologie/prvky-svetlovodu/difuzer>
- [J] Obrázek. Obr.1: Purkyňův efekt. Ztmavnutí červené barvy při nízkém osvětlení. [online]. [cit. 2016-08-25]. Dostupné z: <http://www.jandur.cz/optics/detekce/d5.htm>
- [K] Obrázek.: Kruithofův diagram. [online]. [cit. 2016-09-02]. Dostupné z: http://www.c3m.cz/C3M_list.php?q=%28idText~equals~11210%29
- [L] Obrázek: Směrové vyzařování (křivka svítivosti) použitého zdroje při měření. Specifikace výrobku. [online]. [cit. 2016-09-02]. Dostupné z: <file:///C:/Users/OEM/AppData/Local/Temp/LED-reflector-127.pdf>
- [M] Obrázek: Ukázka posunu cirkadiánního rytmu, není-li synchronizován denním světlem. SILBERNAGL, Stefan a DESPOPOULOS. *Atlas fyziologie člověka*. 6. vyd., zcela přeprac. a rozš., Vyd. 3. české. Praha: Grada, 2004, s. 335. ISBN 80-247-0630-X.

[N] Obrázek: Působení světla. FUKSA, Antonín. Světlo a biologické hodiny. *Světlo*. Praha: FCC Public s. r. o., 2011, **2010**(6), s. 56.

[O] Obrázek: Obr. 3.12. Soustava fotometrických rovin $C - \gamma$; Obr. 3.13. Soustava fotometrických rovin $B - \beta$; Obr. 3.14. Soustava fotometrických rovin $A - \alpha$. HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013, s. 69. ISBN 978-80-86534-21-3.

[P] Obrázek. In: Úvod, Technologie, Prvky světlovodu, Kopule. [online]. © 2013–2015 WT-WINDOWS TOMORROW s.r.o. [cit. 2016-09-15]. Dostupné z: <http://www.solatube.cz/technologie/prvky-svetlovodu/kopule>.

[Q] Obrázek. In: Ekodům, Energy, Sun, Vaříče. [online]. © 2007 [ecoShop.cz](http://www.ecoshop.cz). [cit. 2016-09-15]. Dostupné z: <http://www.ekodum.cz/energy/sun/0240.jpg>.

[R] Obrázky. In: Úvod, Produkty, , Brighten Up[®] série, Rezidenční světlovody. [online]. © 2013–2015 WT-WINDOWS TOMORROW s.r.o. [cit. 2016-09-15]. Dostupné z: <http://www.solatube.cz/produkty/brighten-up/doplňky/odvetravaci-ventilacni-sada>.; <http://www.solatube.cz/produkty/brighten-up/doplňky/vnitřní-elektrické-osvětlení>.

[S] Obrázek. In: Home, Daylight systems, Heliostats. [online]. © LUMENA AG. [cit. 2016-09-15]. Dostupné z: <http://www.lumena.ch/Tageslichtsysteme/heliostaten/default.htm>.

[T] Obrázek. In: Standard source used in the CIE Report 173 photometry system. In: Lighting Research and Technology, Vol. 46, 2014. [online]. © 2014 D. Carter. [cit. 2016-09-17]. Dostupné z: file:///D:/Záloha%20SVDY/DP_SVDY/Článek%20použ.%20v%20SP.pdf.

[U] Obrázek Figure 4 Light pipe under test on roof. In: BRE - BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. *Test Report: Transmittance of flexible and rigid light pipes under overcast and simulated sunlit conditions*. Garston, Watford (UK), 2008, 17 s. Test report No. 248038.

PŘÍLOHA A

Tab. 13: Uvedení celé tabulky (Tab. 8)

γ_1	$E_{ZAVG\gamma}$	$\Delta\Omega_i$	$I_{\gamma,i;stř}$	$\Delta\phi_i$
[°]	[lx]	[sr]	[cd]	[lm]
0	30,1100	0,0010	9,1815	0,0088
1	29,9375	0,0029	9,0783	0,0261
2	29,4350	0,0048	8,8761	0,0425
3	28,6150	0,0067	8,6139	0,0577
4	27,7200	0,0086	8,2668	0,0711
5	26,3450	0,0105	7,8268	0,0823
6	24,8425	0,0124	7,3574	0,0913
7	23,2750	0,0143	6,8971	0,0987
8	21,8325	0,0162	6,4178	0,1040
9	20,1400	0,0181	5,8952	0,1067
10	18,4150	0,0200	5,4036	0,1080
11	16,9250	0,0219	4,9430	0,1081
12	15,4025	0,0237	4,4748	0,1062
13	13,8625	0,0256	4,0466	0,1036
14	12,6025	0,0275	3,6508	0,1002
15	11,2738	0,0293	3,2968	0,0966
16	10,2873	0,0311	2,9788	0,0928
17	9,1943	0,0330	2,6852	0,0885
18	8,3668	0,0348	2,4271	0,0845
19	7,5063	0,0366	2,1741	0,0796
20	6,7125	0,0384	1,9465	0,0748
21	6,0178	0,0402	1,7478	0,0702
22	5,4130	0,0420	1,5710	0,0659
23	4,8613	0,0437	1,4123	0,0618
24	4,3750	0,0455	1,2746	0,0580
25	3,9610	0,0472	1,1539	0,0545
26	3,5853	0,0489	1,0470	0,0512
27	3,2620	0,0506	0,9503	0,0481
28	2,9528	0,0523	0,8611	0,0451
29	2,6788	0,0540	0,7850	0,0424
30	2,4553	0,0557	0,7199	0,0401
31	2,2530	0,0573	0,6581	0,0377
32	2,0513	0,0589	0,6036	0,0356
33	1,8965	0,0605	0,5563	0,0337
34	1,7415	0,0621	0,5136	0,0319
35	1,6173	0,0637	0,4753	0,0303
36	1,4910	0,0652	0,4394	0,0287

37	1,3828	0,0668	0,4071	0,0272
38	1,2800	0,0683	0,3782	0,0258
39	1,1938	0,0698	0,3531	0,0246
40	1,1153	0,0712	0,3304	0,0235
41	1,0455	0,0727	0,3086	0,0224
42	0,9728	0,0741	0,2891	0,0214
43	0,9178	0,0755	0,2728	0,0206
44	0,8660	0,0769	0,2566	0,0197
45	0,8124	0,0782	0,2418	0,0189
46	0,7687	0,0795	0,2290	0,0182
47	0,7292	0,0809	0,2166	0,0175
48	0,6873	0,0821	0,2048	0,0168
49	0,6524	0,0834	0,1950	0,0163
50	0,6228	0,0846	0,1855	0,0157
51	0,5904	0,0858	0,1761	0,0151
52	0,5615	0,0870	0,1676	0,0146
53	0,5345	0,0882	0,1596	0,0141
54	0,5095	0,0893	0,1519	0,0136
55	0,4842	0,0904	0,1449	0,0131
56	0,4634	0,0914	0,1381	0,0126
57	0,4397	0,0925	0,1316	0,0122
58	0,4212	0,0935	0,1257	0,0117
59	0,4006	0,0945	0,1196	0,0113
60	0,3818	0,0954	0,1142	0,0109
61	0,3651	0,0964	0,1093	0,0105
62	0,3497	0,0973	0,1038	0,0101
63	0,3293	0,0981	0,0982	0,0096
64	0,3132	0,0990	0,0935	0,0093
65	0,2983	0,0998	0,0887	0,0089
66	0,2818	0,1006	0,0840	0,0084
67	0,2673	0,1013	0,0793	0,0080
68	0,2511	0,1020	0,0746	0,0076
69	0,2367	0,1027	0,0701	0,0072
70	0,2219	0,1034	0,0653	0,0068
71	0,2054	0,1040	0,0607	0,0063
72	0,1917	0,1046	0,0564	0,0059
73	0,1773	0,1051	0,0520	0,0055
74	0,1629	0,1057	0,0476	0,0050
75	0,1486	0,1062	0,0433	0,0046
76	0,1345	0,1066	0,0393	0,0042
77	0,1226	0,1071	0,0355	0,0038
78	0,1099	0,1075	0,0317	0,0034
79	0,0976	0,1078	0,0278	0,0030

80	0,0842	0,1082	0,0463	0,0050
81	0,2185	0,1085	0,0850	0,0092
82	0,3374	0,1087	0,0594	0,0065
83	0,0509	0,1090	0,0138	0,0015
84	0,0392	0,1092	0,0232	0,0025
85	0,1128	0,1093	0,0205	0,0022
86	0,0214	0,1095	0,0057	0,0006
87	0,0156	0,1096	0,0043	0,0005
88	0,0128	0,1096	0,0075	0,0008
89	0,0360	0,1097	0,0107	0,0012
90	0,0337	Φ_z	[lm]	3,0431

PŘÍLOHA B

Tab. 14: Znázornění poklesu odrazů při zvětšujícím se průměru světlovodu

Počet odrazů					
Délka tubusu 3000 mm		Průměr světlovodu			
Datum	γ_s	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	[°]	250	350	550	750
01.01.	17.79	37	27	17	12
12.01.	19.05	35	25	16	12
01.02.	23.29	28	20	13	9
11.02.	26.22	24	17	11	8
01.03.	32.51	19	13	9	6
14.03.	37.58	16	11	7	5
01.04.	44.82	12	9	5	4
12.04.	49.10	10	7	5	3
01.05.	55.70	8	6	4	3
13.05.	59.10	7	5	3	2
01.06.	62.84	6	4	3	2
13.06.	64.02	6	4	3	2
22.06.	64.25	6	4	3	2
01.07.	63.92	6	4	3	2
13.07.	62.63	6	4	3	2
01.08.	58.72	7	5	3	2
13.08.	55.23	8	6	4	3
01.09.	48.53	11	8	5	4
12.09.	44.22	12	9	6	4
01.10.	36.59	16	12	7	5
14.10.	31.57	20	14	9	7
01.11.	25.44	25	18	11	8
11.11.	22.63	29	21	13	10
01.12.	18.70	35	25	16	12
12.12.	17.62	38	27	17	13
22.12.	17.36	38	27	17	13

**Tab. 15: Znázornění poklesu ze 100 % světla na vstupu pro přímý světlovod
délky 1,5 m**

Datum	Ys	Počet odrazů	ABC	Fakro	Lightway	Solatube	Sunway (1)	Sunway (2)	Vzorek
	[°]		D55	D55	D55	D55	D55	D55	D55
-			[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
01.01.	17,79	19	23,53	25,70	20,37	49,22	12,81	23,11	37,30
12.01.	19,05	17	26,80	29,00	23,55	51,87	15,56	26,37	40,48
01.02.	23,29	14	32,57	34,77	29,29	56,11	20,82	32,14	45,75
11.02.	26,22	12	37,10	39,23	33,87	59,13	25,28	36,68	49,64
01.03.	32,51	9	45,10	47,03	42,12	63,97	33,82	44,71	56,10
14.03.	37,58	8	48,13	49,96	45,29	65,67	37,26	47,77	58,44
01.04.	44,82	6	54,82	56,37	52,38	69,21	45,25	54,51	63,41
12.04.	49,10	5	58,51	59,88	56,32	71,05	49,86	58,23	66,05
01.05.	55,70	4	62,44	63,61	60,57	72,94	54,94	62,20	68,80
13.05.	59,10	4	62,44	63,61	60,57	72,94	54,94	62,20	68,80
01.06.	62,84	3	66,64	67,57	65,13	74,87	60,54	66,45	71,67
13.06.	64,02	3	66,64	67,57	65,13	74,87	60,54	66,45	71,67
22.06.	64,25	3	66,64	67,57	65,13	74,87	60,54	66,45	71,67
01.07.	63,92	3	66,64	67,57	65,13	74,87	60,54	66,45	71,67
13.07.	62,63	3	66,64	67,57	65,13	74,87	60,54	66,45	71,67
01.08.	58,72	4	62,44	63,61	60,57	72,94	54,94	62,20	68,80
13.08.	55,23	4	62,44	63,61	60,57	72,94	54,94	62,20	68,80
01.09.	48,53	5	58,51	59,88	56,32	71,05	49,86	58,23	66,05
12.09.	44,22	6	54,82	56,37	52,38	69,21	45,25	54,51	63,41
01.10.	36,59	8	48,13	49,96	45,29	65,67	37,26	47,77	58,44
14.10.	31,57	10	42,26	44,27	39,17	62,32	30,69	41,86	53,86
01.11.	25,44	13	34,76	36,93	31,49	57,60	22,94	34,34	47,65
11.11.	22,63	14	32,57	34,77	29,29	56,11	20,82	32,14	45,75
01.12.	18,70	18	25,11	27,30	21,90	50,53	14,12	24,68	38,86
12.12.	17,62	19	23,53	25,70	20,37	49,22	12,81	23,11	37,30
22.12.	17,36	19	23,53	25,70	20,37	49,22	12,81	23,11	37,30

**Tab. 16: Znázornění poklesu ze 100 % světla na vstupu pro přímý světlovod
délky 3 m**

Datum	Y _s	Počet odrazů	ABC	Fakro	Lightway	Solatube	Sunway (1)	Sunway (2)	Vzorek
	[°]		D55	D55	D55	D55	D55	D55	D55
-			[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
01.01.	17,79	37	7,29	8,66	5,51	30,70	2,23	7,04	17,90
12.01.	19,05	35	8,31	9,78	6,37	32,35	2,71	8,04	19,42
01.02.	23,29	28	13,10	14,92	10,59	38,87	5,35	12,76	25,84
11.02.	26,22	24	16,99	19,00	14,16	43,17	7,89	16,61	30,42
01.03.	32,51	19	23,53	25,70	20,37	49,22	12,81	23,11	37,30
14.03.	37,58	16	28,60	30,81	25,33	53,25	17,14	28,17	42,16
01.04.	44,82	12	37,10	39,23	33,87	59,13	25,28	36,68	49,64
12.04.	49,10	10	42,26	44,27	39,17	62,32	30,69	41,86	53,86
01.05.	55,70	8	48,13	49,96	45,29	65,67	37,26	47,77	58,44
13.05.	59,10	7	51,37	53,07	48,71	67,42	41,06	51,03	60,87
01.06.	62,84	6	54,82	56,37	52,38	69,21	45,25	54,51	63,41
13.06.	64,02	6	54,82	56,37	52,38	69,21	45,25	54,51	63,41
22.06.	64,25	6	54,82	56,37	52,38	69,21	45,25	54,51	63,41
01.07.	63,92	6	54,82	56,37	52,38	69,21	45,25	54,51	63,41
13.07.	62,63	6	54,82	56,37	52,38	69,21	45,25	54,51	63,41
01.08.	58,72	7	51,37	53,07	48,71	67,42	41,06	51,03	60,87
13.08.	55,23	8	48,13	49,96	45,29	65,67	37,26	47,77	58,44
01.09.	48,53	11	39,60	41,68	36,42	60,71	27,85	39,18	51,71
12.09.	44,22	12	37,10	39,23	33,87	59,13	25,28	36,68	49,64
01.10.	36,59	16	28,60	30,81	25,33	53,25	17,14	28,17	42,16
14.10.	31,57	20	22,05	24,20	18,94	47,95	11,63	21,63	35,81
01.11.	25,44	25	15,92	17,89	13,17	42,05	7,16	15,55	29,20
11.11.	22,63	29	12,27	14,05	9,85	37,87	4,85	11,94	24,80
01.12.	18,70	35	8,31	9,78	6,37	32,35	2,71	8,04	19,42
12.12.	17,62	38	6,83	8,16	5,12	29,91	2,03	6,59	17,18
22.12.	17,36	38	6,83	8,16	5,12	29,91	2,03	6,59	17,18

**Tab. 17: Znázorňující pokles ze 100 % světla na vstupu pro přímý světlovod
délky 6 m**

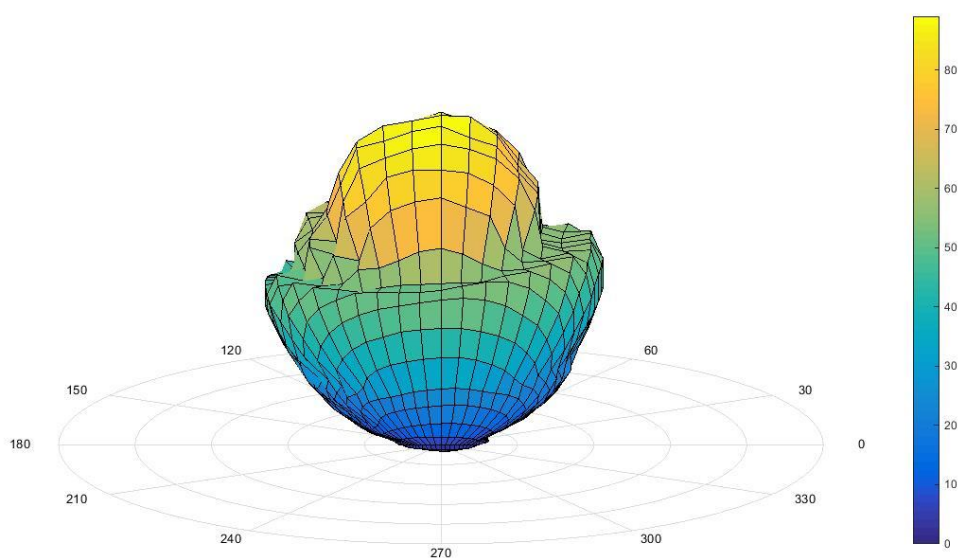
Datum	γ _s	Počet odrazů	ABC	Fakro	Lightway	Solatube	Sunway (1)	Sunway (2)	Vzorek
	[°]		D55	D55	D55	D55	D55	D55	D55
-			[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
01.01.	17,79	75	0,62	0,87	0,35	11,34	0,06	0,57	3,80
12.01.	19,05	69	0,91	1,25	0,54	13,27	0,10	0,85	4,85
01.02.	23,29	56	2,12	2,75	1,38	18,66	0,35	2,01	8,24
11.02.	26,22	49	3,34	4,20	2,30	22,41	0,70	3,19	10,97
01.03.	32,51	38	6,83	8,16	5,12	29,91	2,03	6,59	17,18
14.03.	37,58	31	10,78	12,45	8,52	35,93	4,00	10,46	22,86
01.04.	44,82	24	16,99	19,00	14,16	43,17	7,89	16,61	30,42
12.04.	49,10	21	20,66	22,78	17,61	46,70	10,55	20,25	34,38
01.05.	55,70	16	28,60	30,81	25,33	53,25	17,14	28,17	42,16
13.05.	59,10	14	32,57	34,77	29,29	56,11	20,82	32,14	45,75
01.06.	62,84	12	37,10	39,23	33,87	59,13	25,28	36,68	49,64
13.06.	64,02	12	37,10	39,23	33,87	59,13	25,28	36,68	49,64
22.06.	64,25	12	37,10	39,23	33,87	59,13	25,28	36,68	49,64
01.07.	63,92	12	37,10	39,23	33,87	59,13	25,28	36,68	49,64
13.07.	62,63	12	37,10	39,23	33,87	59,13	25,28	36,68	49,64
01.08.	58,72	15	30,52	32,73	27,23	54,66	18,89	30,09	43,92
13.08.	55,23	17	26,80	29,00	23,55	51,87	15,56	26,37	40,48
01.09.	48,53	21	20,66	22,78	17,61	46,70	10,55	20,25	34,38
12.09.	44,22	25	15,92	17,89	13,17	42,05	7,16	15,55	29,20
01.10.	36,59	32	10,10	11,72	7,92	35,00	3,63	9,80	21,95
14.10.	31,57	39	6,40	7,68	4,76	29,13	1,84	6,17	16,49
01.11.	25,44	50	3,13	3,95	2,14	21,83	0,63	2,98	10,53
11.11.	22,63	58	1,86	2,44	1,20	17,70	0,29	1,76	7,60
01.12.	18,70	71	0,80	1,11	0,47	12,59	0,08	0,75	4,47
12.12.	17,62	76	0,58	0,82	0,32	11,04	0,05	0,54	3,64
22.12.	17,36	77	0,54	0,77	0,30	10,76	0,05	0,50	3,50

PŘÍLOHA C

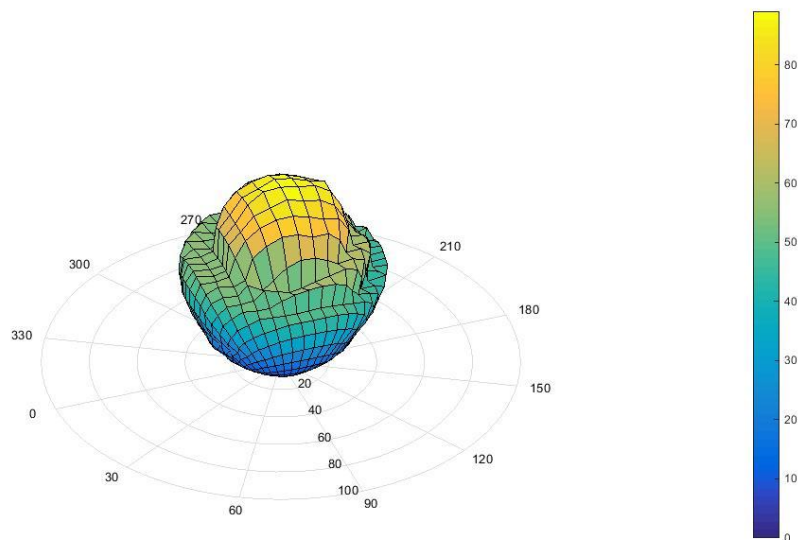
Soubor ALFA

Tab. 18: Poměrné účinnosti přímých světlovodů pro vybrané úhly dopadu světla

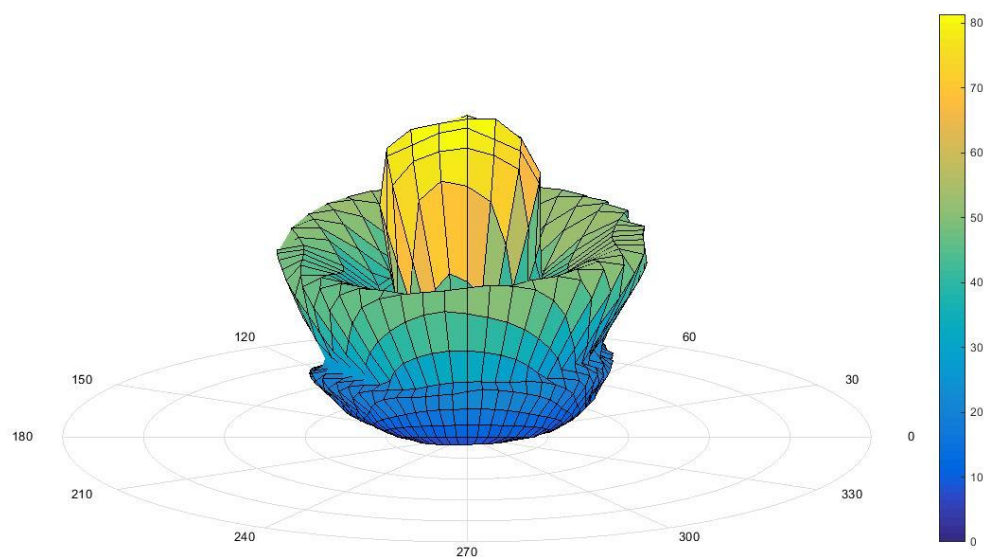
Poměrné účinnosti rovných úseků světlovodů											
Varianty světlovodů - soubor ALFA (maximum 7,386 lx odpovídá 100 %)											
γ_s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
[°]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
20	22,7	32,1	33,8	44,1	30,9	40,5	42,5	37,4	35,4	35,4	36,6
25	29,3	37,6	39,1	51,0	40,0	46,6	48,1	45,1	41,8	41,8	42,8
30	36,2	40,0	41,3	51,2	44,4	48,4	48,9	50,9	43,3	43,3	46,3
35	42,1	38,8	40,4	50,0	51,3	47,1	48,7	46,1	43,1	43,1	44,1
40	53,2	49,2	50,1	60,4	59,6	55,0	56,4	59,8	55,8	55,8	56,1
45	60,1	65,2	66,0	70,0	62,7	63,8	66,6	76,5	73,9	73,9	73,3
50	62,0	69,4	69,3	79,6	61,1	72,2	72,7	85,3	76,3	76,3	77,3
55	59,1	63,5	63,3	72,7	58,3	66,0	66,7	77,6	69,0	69,0	70,5
60	68,2	48,8	48,4	55,0	66,4	50,2	50,6	59,6	52,6	52,6	54,3
65	60,0	43,1	44,5	48,1	58,2	43,1	45,7	53,0	49,4	49,4	50,2
Průměr	49,3	48,8	49,6	58,2	53,3	53,3	54,7	59,1	54,1	54,1	55,1



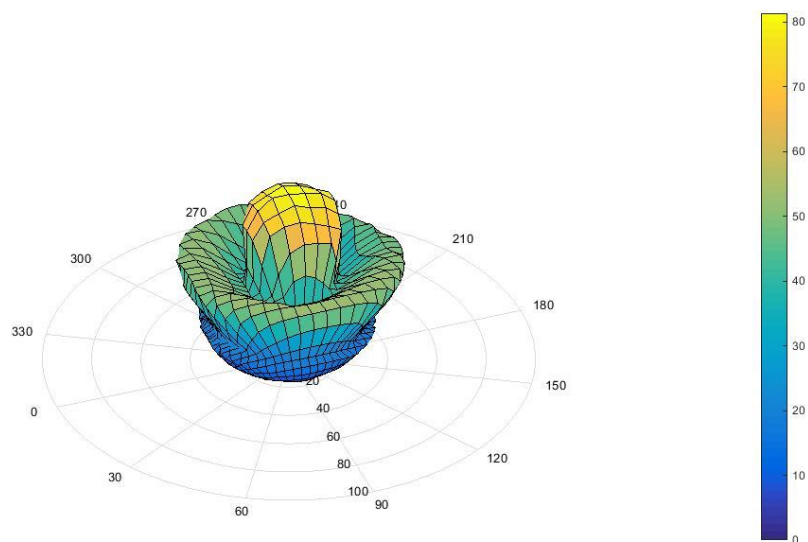
Obr. 44: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 1, pohled od severu (bod 270°)



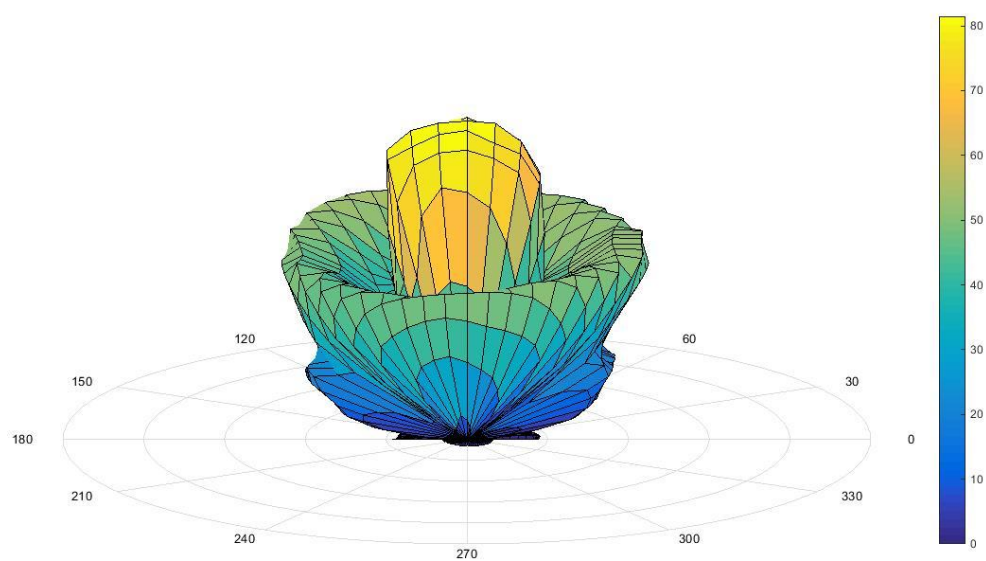
Obr. 45: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 1, pohled od jihozápadu



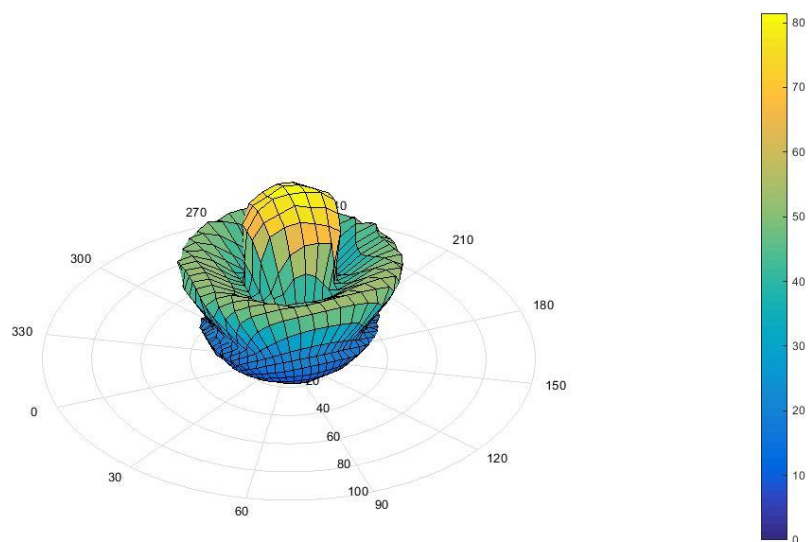
Obr. 46: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 2, pohled od severu (bod 270°)



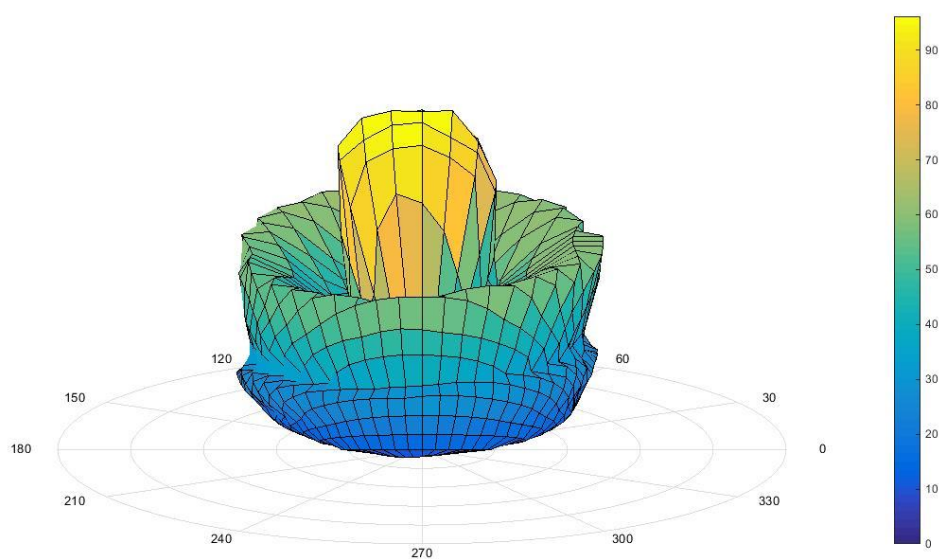
Obr. 47: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 2, pohled od jihozápadu



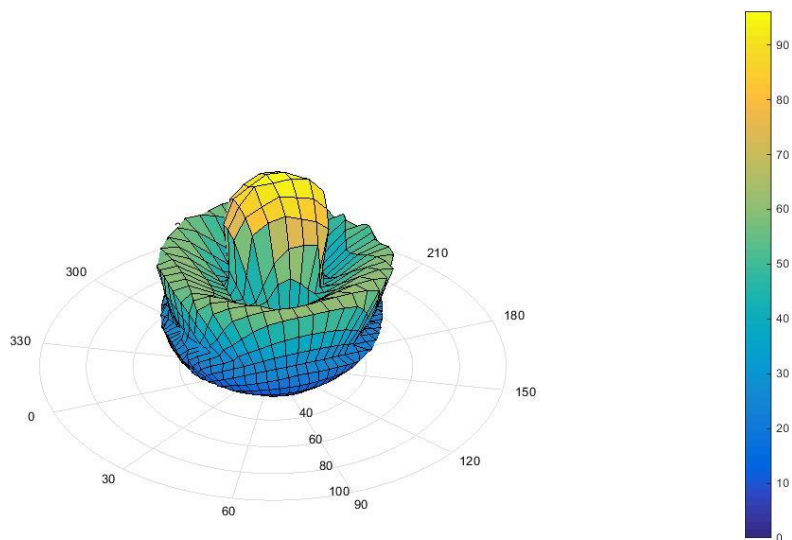
Obr. 48: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 3, pohled od severu (bod 270°)



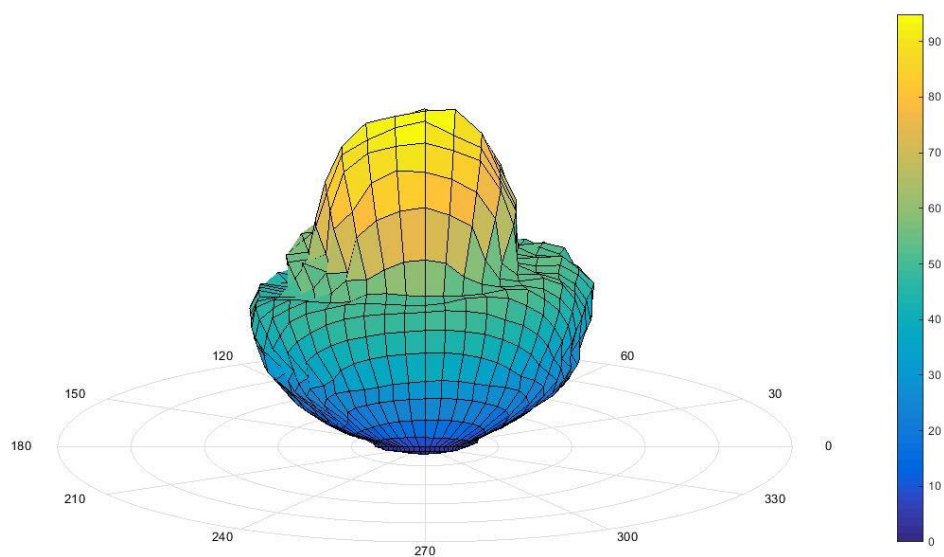
Obr. 49: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 3, pohled od jihozápadu



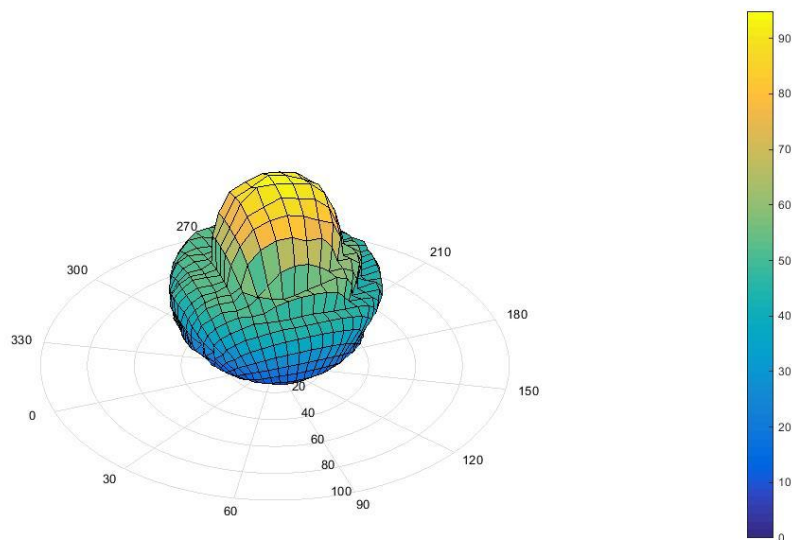
Obr. 50: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 4, pohled od severu (bod 270°)



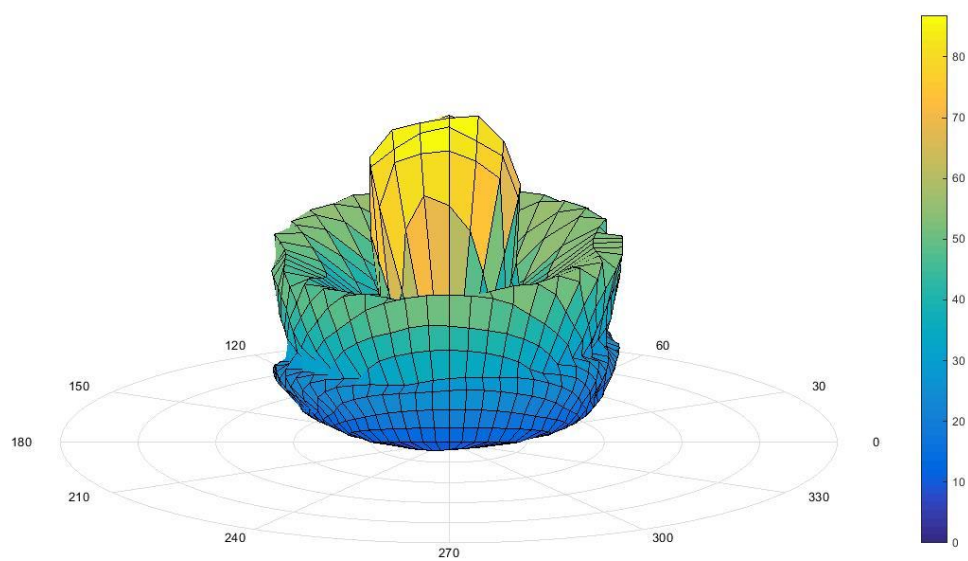
Obr. 51: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 4, pohled od jihozápadu



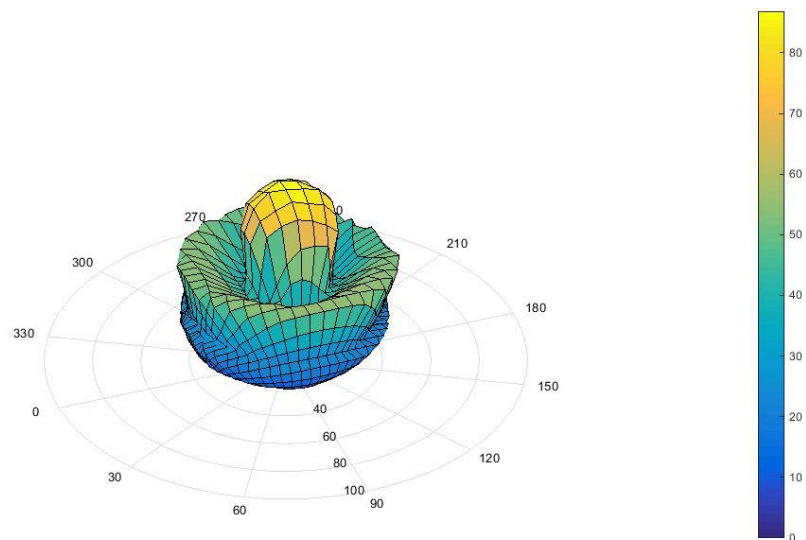
Obr. 52: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 5, pohled od severu (bod 270°)



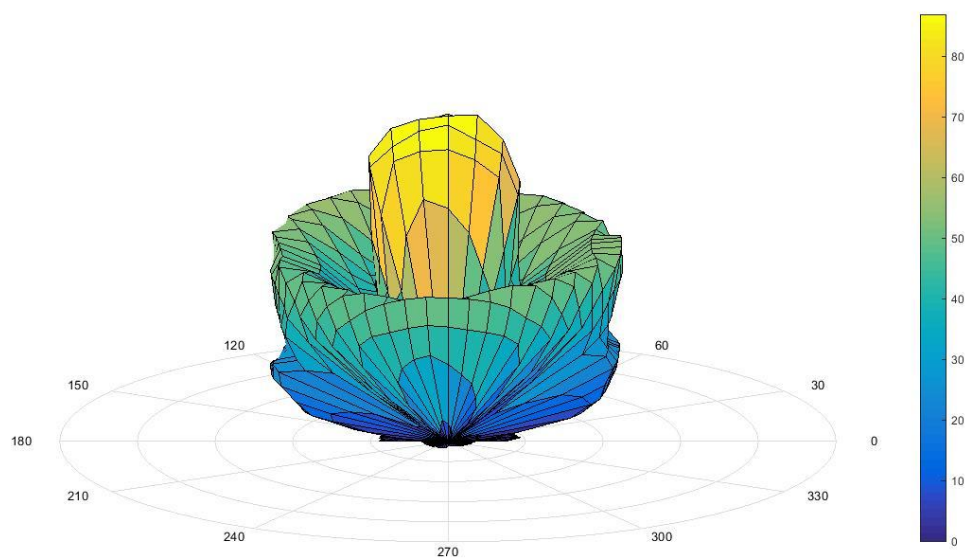
Obr. 53: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 5, pohled od jihozápadu



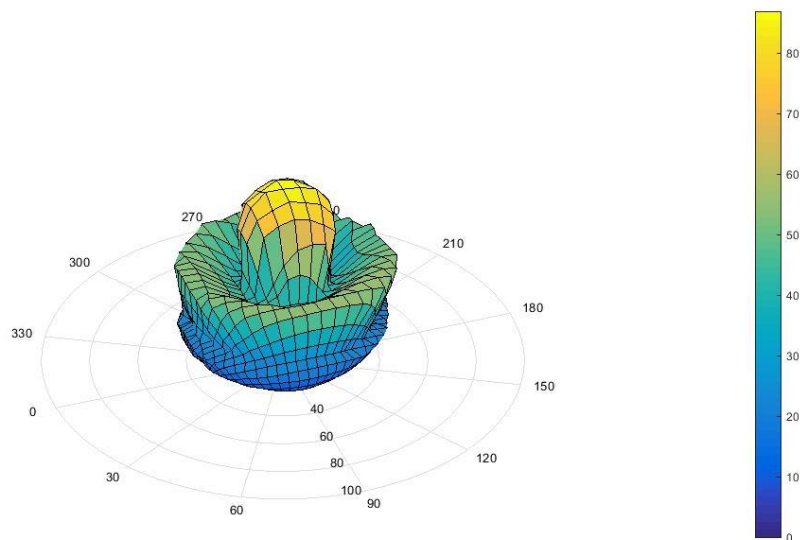
Obr. 54: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 6, pohled od severu (bod 270°)



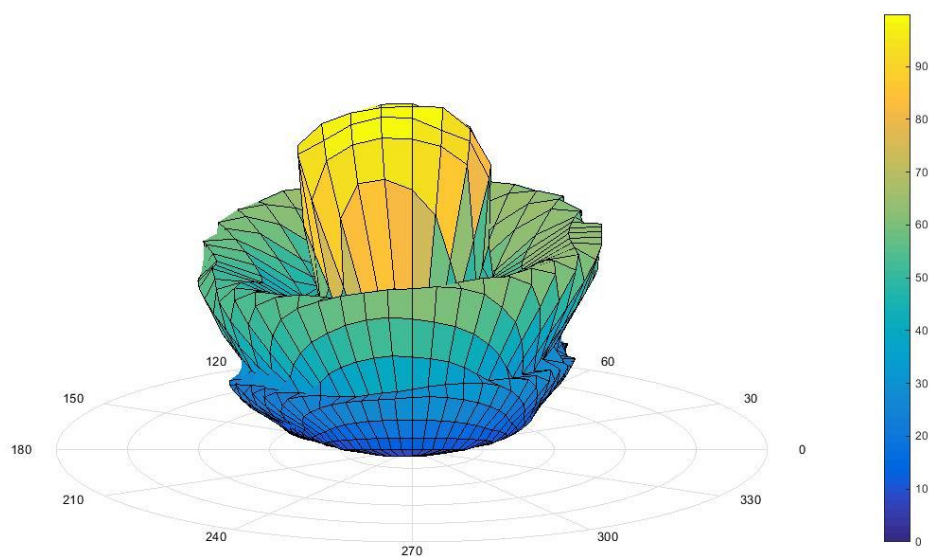
Obr. 55: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 6, pohled od jihozápadu



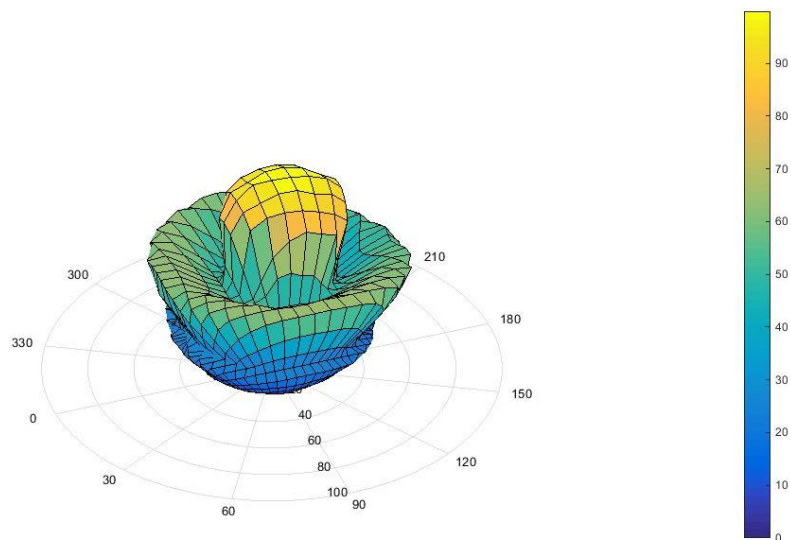
Obr. 56: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 7, pohled od severu (bod 270°)



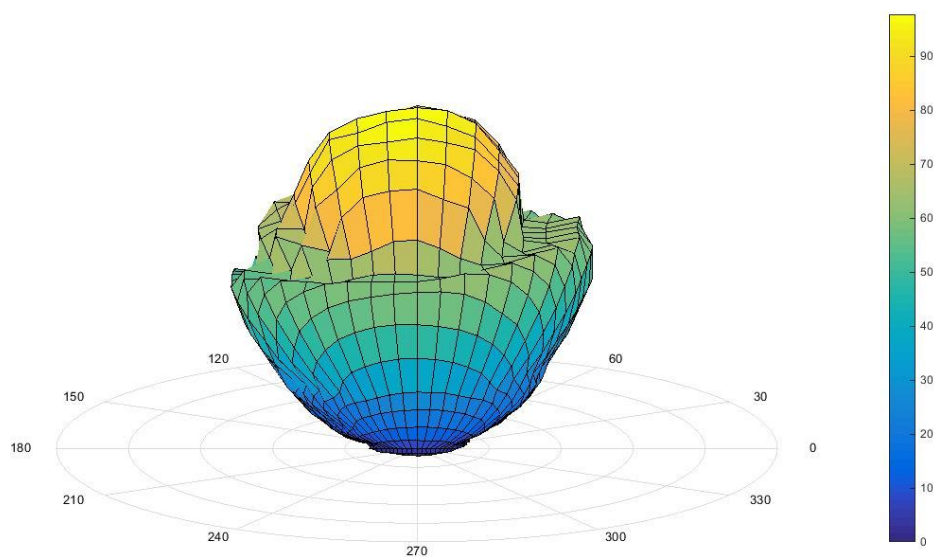
Obr. 57: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 7, pohled od jihozápadu



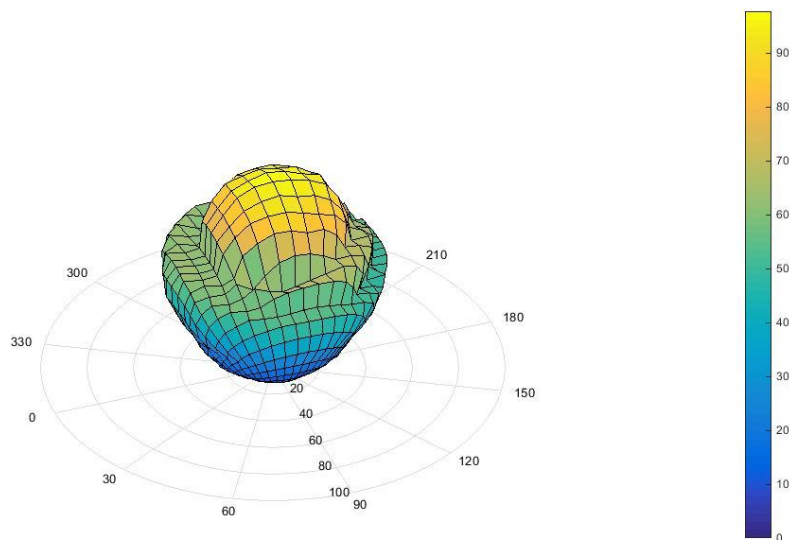
Obr. 58: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 8, pohled od severu (bod 270°)



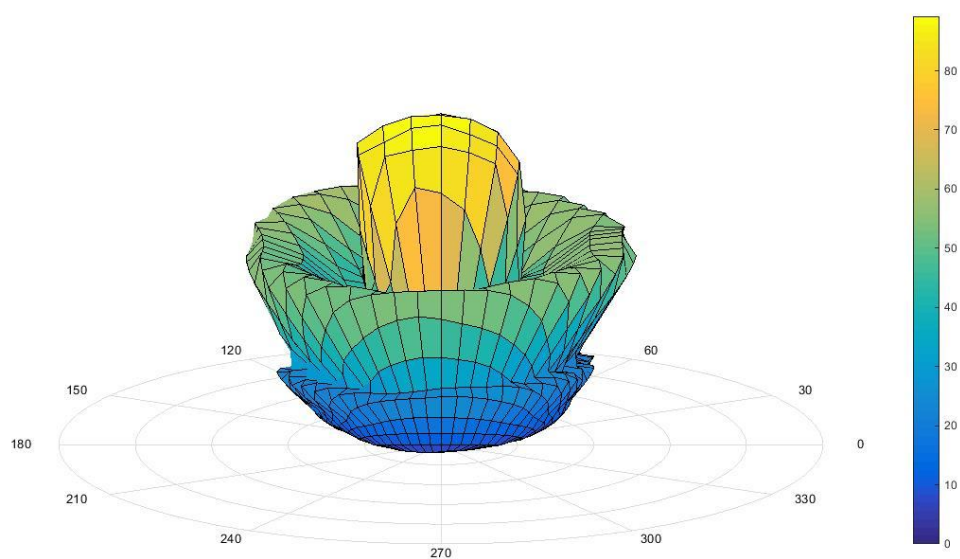
Obr. 59: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 8, pohled od jihozápadu



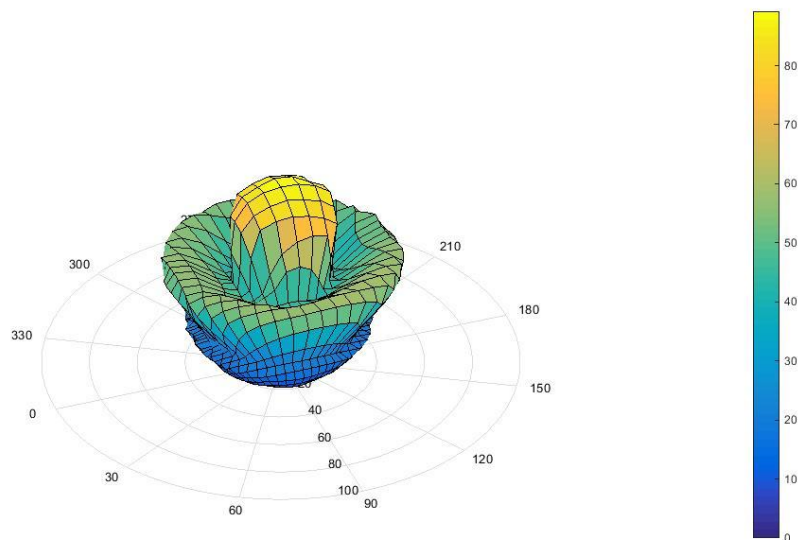
Obr. 60: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 9, pohled od severu (bod 270°)



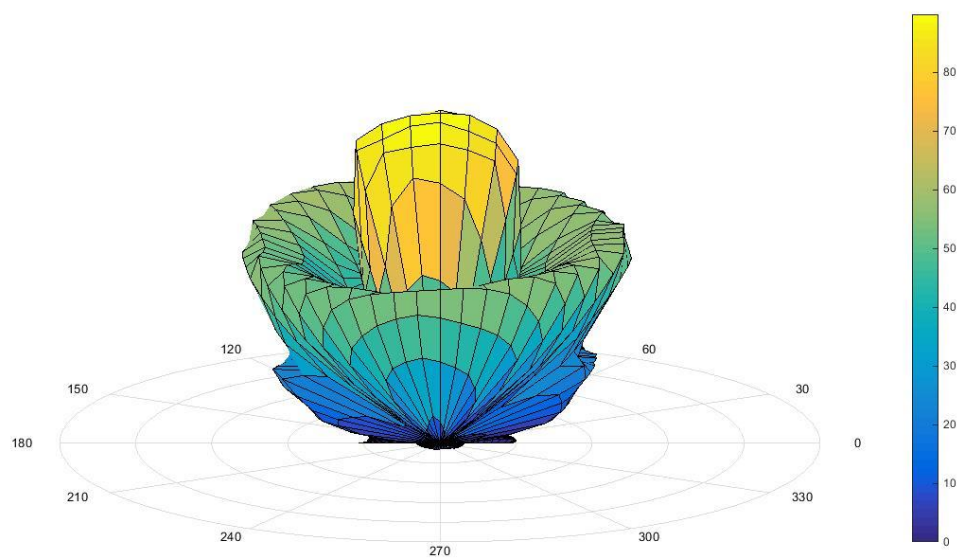
Obr. 61: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 9, pohled od jihozápadu



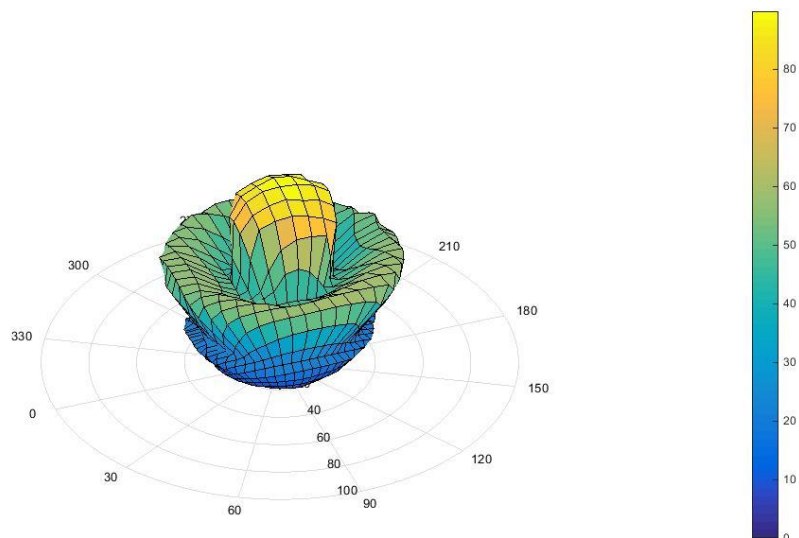
Obr. 62: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 10, pohled od severu (bod 270°)



Obr. 63: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 10, pohled od jihozápadu



Obr. 64: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 11, pohled od severu (bod 270°)

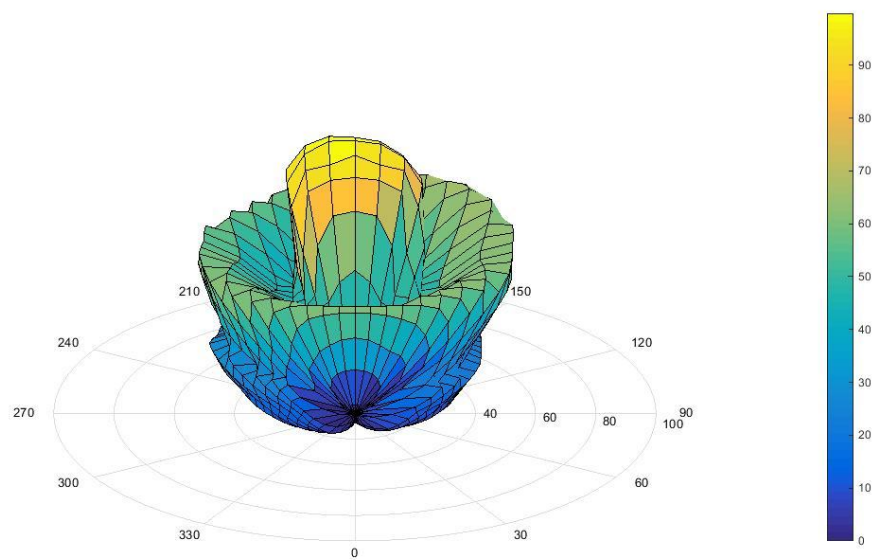


Obr. 65: Poměrná citlivost světlovodu ALFA – 11, pohled od jihozápadu

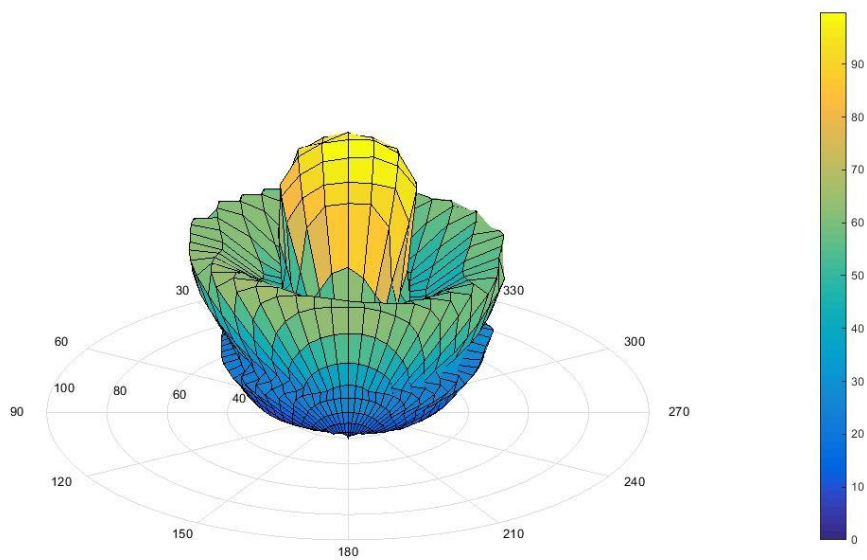
Soubory BETA_1 a BETA_2

Tab. 19: Poměrné účinnosti zalomených světlovodů, soubor BETA_1 a BETA_2 pro vybrané úhly dopadu světla

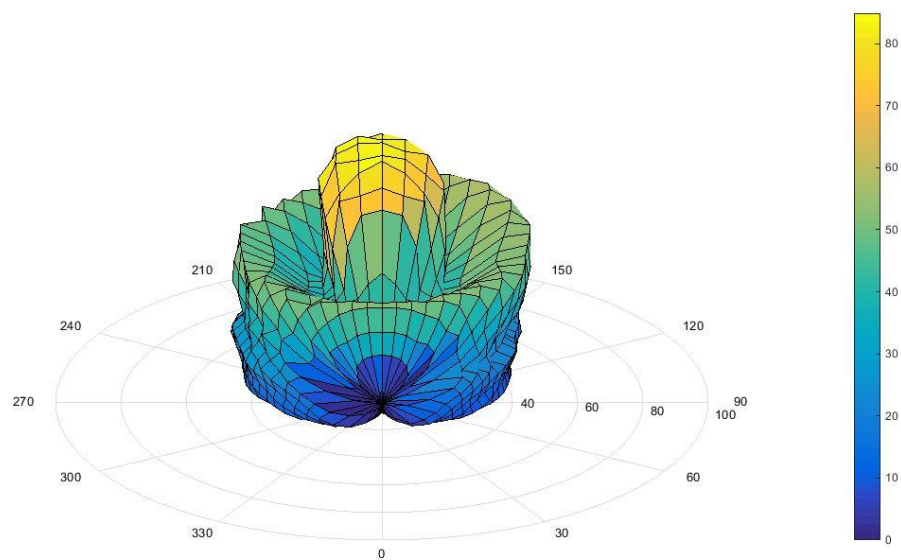
Poměrné účinnosti světlovodů s kolenem na konci a na začátku trasy						
Varianty světlovodů - soubor BETA (maximum 6,592 lx odpovídá 100 %)						
γ_s	1	2	3	4	5	6
[°]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
20	41,3	49,2	47,7	41,9	48,2	44,7
25	50,4	54,7	54,1	49,9	64,3	62,0
30	54,8	55,5	51,9	44,8	52,0	53,0
35	52,2	56,2	56,6	50,6	61,8	63,7
40	63,2	59,3	62,9	58,9	55,1	56,9
45	76,7	70,5	68,8	78,9	70,2	70,6
50	82,8	73,0	65,7	79,9	74,0	62,0
55	73,9	65,6	55,9	69,2	65,1	58,1
60	56,2	51,0	45,3	53,1	51,2	48,2
65	51,1	46,4	45,1	51,8	46,0	46,8
Průměr	60,3	58,1	55,4	57,9	58,8	56,6



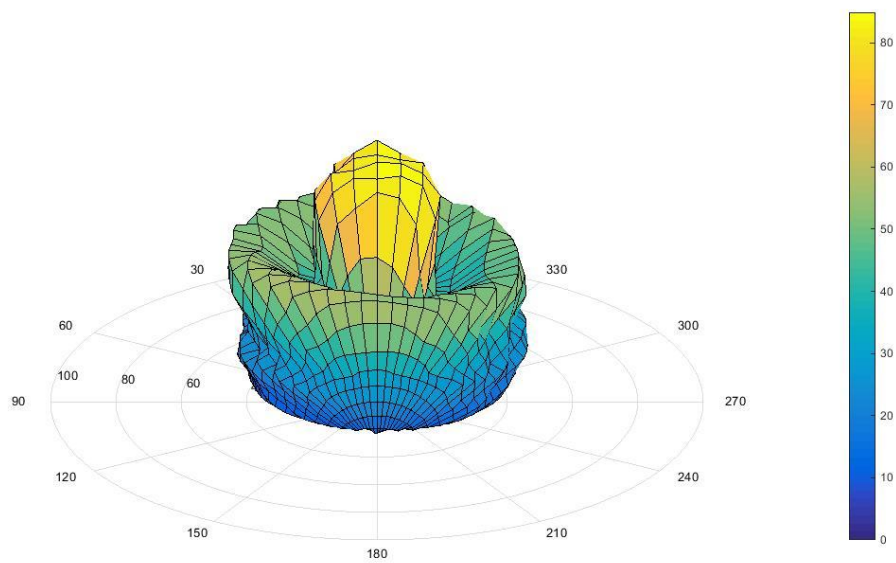
Obr. 66: Poměrná citlivost světlovodu BETA_1 – 1, pohled od severu (bod 0°)



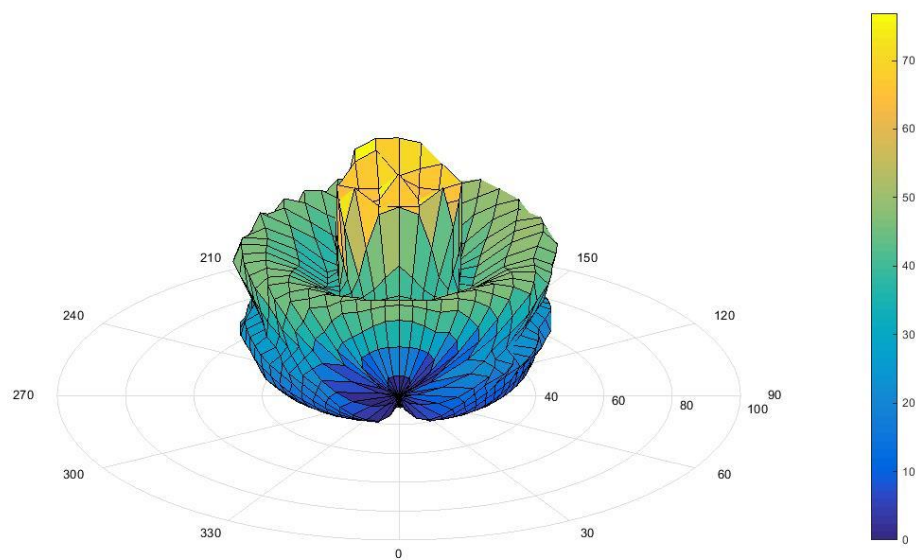
Obr. 67: Poměrná citlivost světlovodu BETA_1 – 1, pohled od jihu



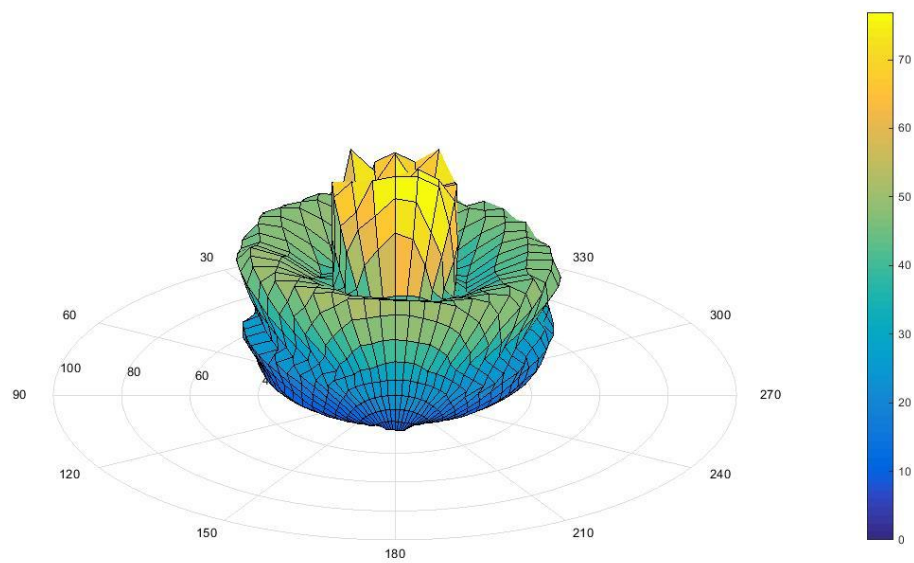
Obr. 68: Poměrná citlivost světlovodu BETA_1 – 2, pohled od severu (bod 0°)



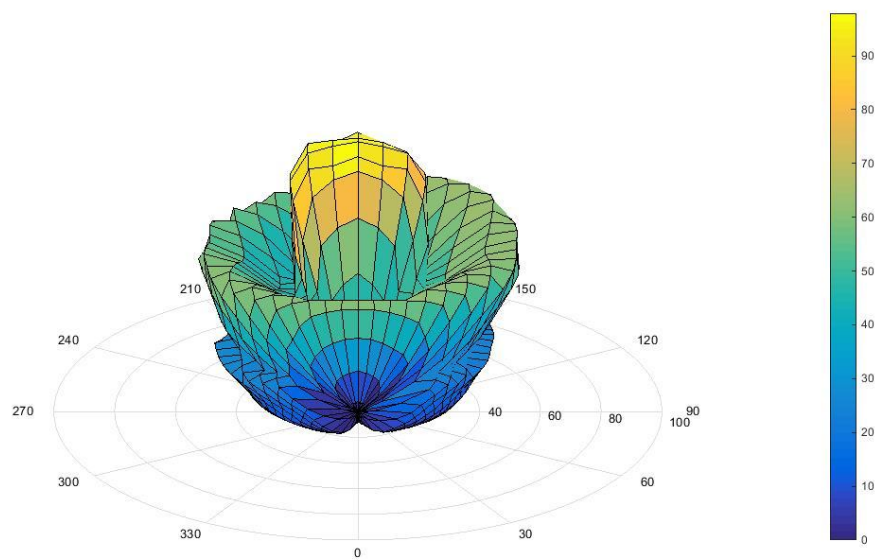
Obr. 69: Poměrná citlivost světlovodu BETA_1 – 2, pohled od jihu



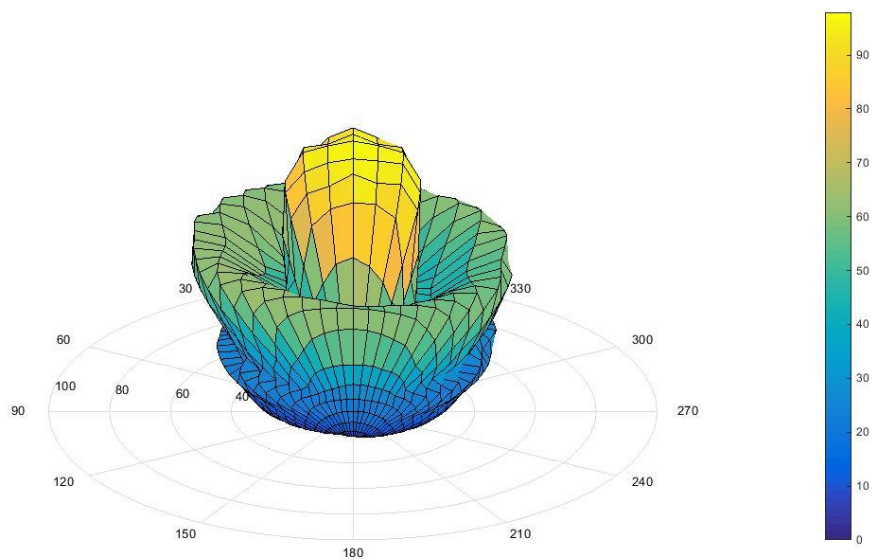
Obr. 70: Poměrná citlivost světlovodu BETA_1 – 3, pohled od severu (bod 0°)



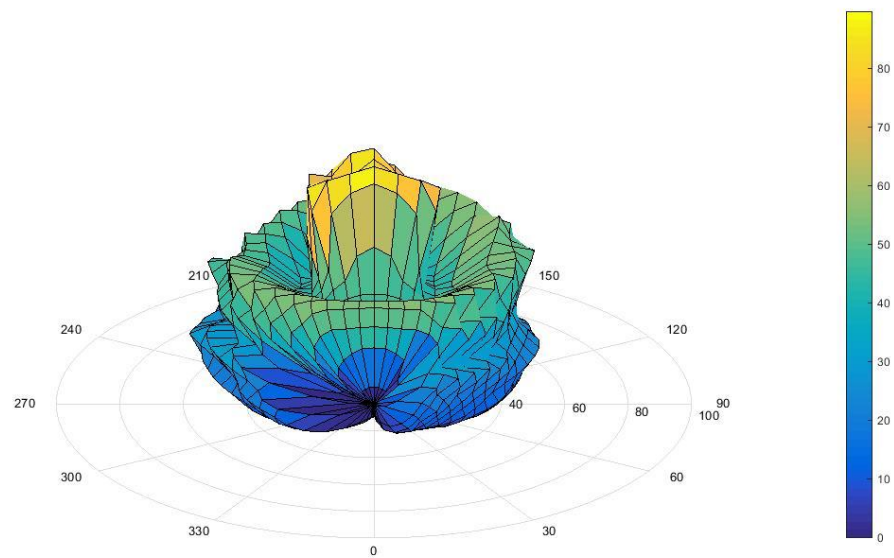
Obr. 71: Poměrná citlivost světlovodu BETA_1 – 3, pohled od jihu



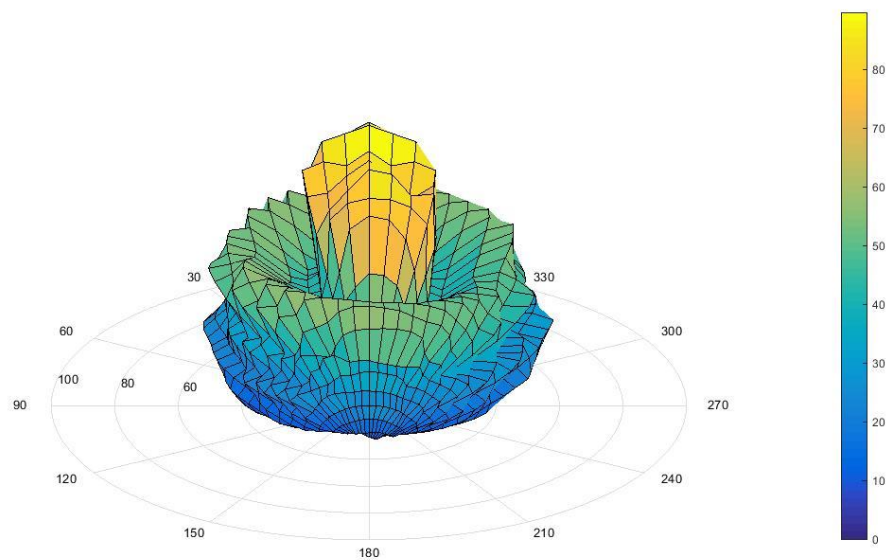
Obr. 72: Poměrná citlivost světlovodu BETA_2 – 1, pohled od severu (bod 0°)



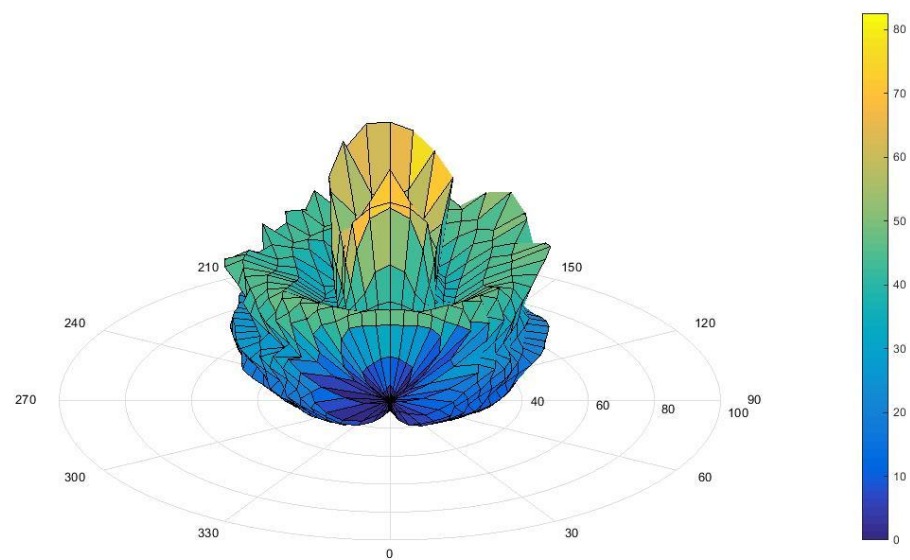
Obr. 73: Poměrná citlivost světlovodu BETA_2 – 1, pohled od jihu



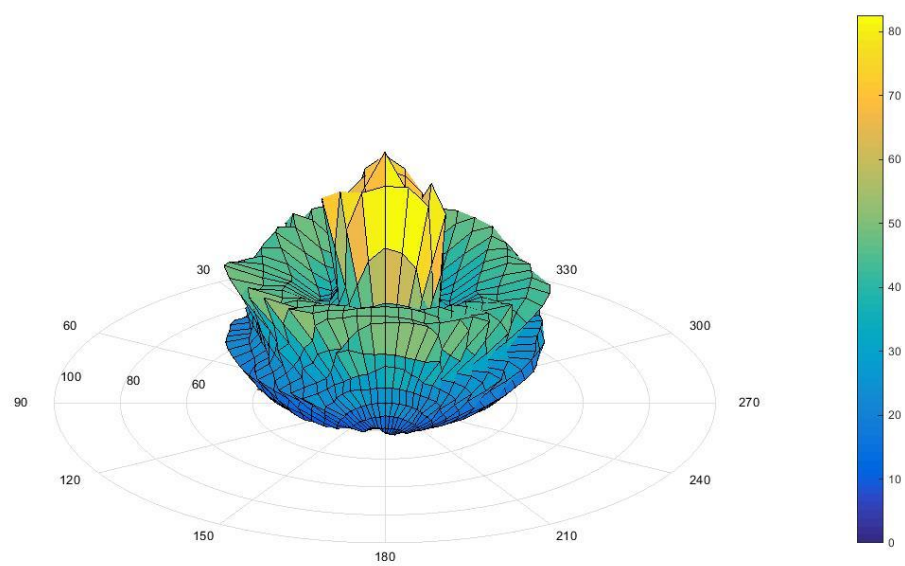
Obr. 74: Poměrná citlivost světlovodu BETA_2 – 2, pohled od severu (bod 0°)



Obr. 75: Poměrná citlivost světlovodu BETA_2 – 2, pohled od jihu



Obr. 76: Poměrná citlivost světlovodu BETA_2 – 3, pohled od severu (bod 0°)

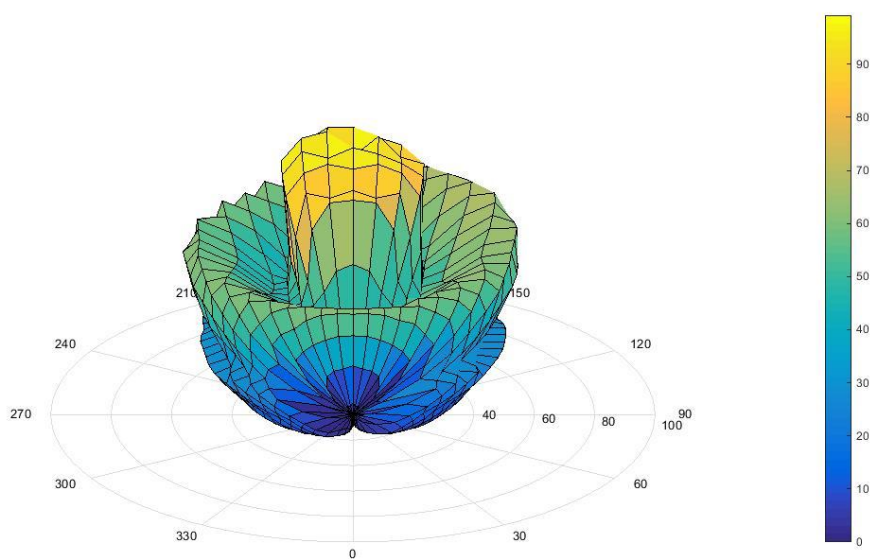


Obr. 77: Poměrná citlivost světlovodu BETA_2 – 3, pohled od jihu

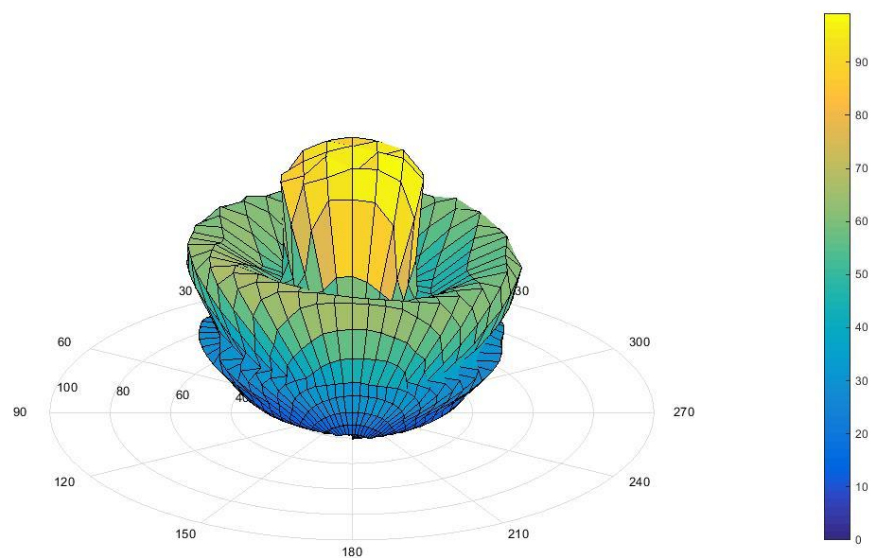
Soubor GAMA

Tab. 20: Poměrné účinnosti krátkých světlovodů, soubor GAMA pro vybrané úhly dopadu světla

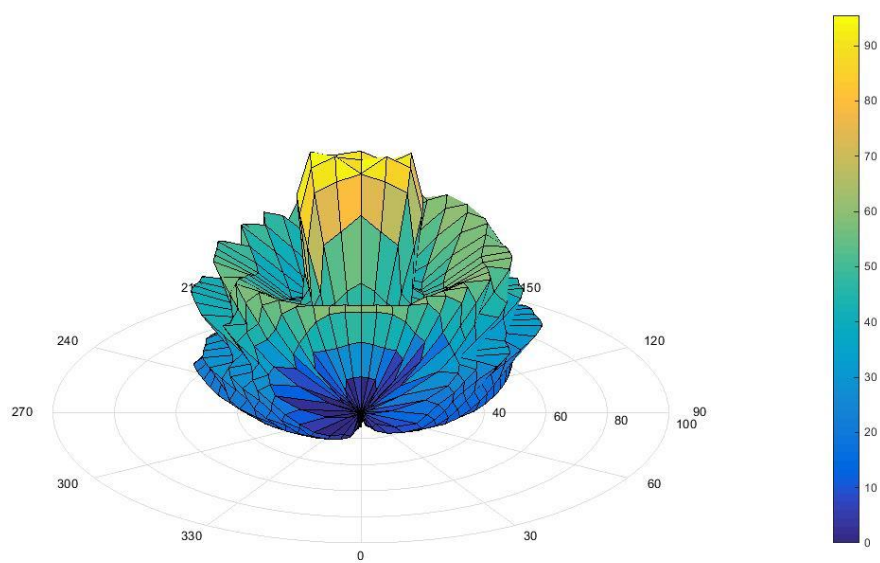
Poměrné účinnosti krátkých světlovodů				
Varianty světlovodů - soubor GAMA (maximum 6,639 lx odpovídá 100 %)				
γ_s	1	2	3	4
[°]	[%]	[%]	[%]	[%]
20	47,4	50,9	48,6	49,9
25	56,8	55,4	57,2	55,0
30	62,8	54,2	54,8	51,1
35	56,7	54,7	60,3	54,9
40	68,9	56,5	66,3	58,4
45	80,4	67,2	72,6	70,7
50	85,4	74,1	64,4	70,9
55	76,2	66,7	60,0	61,9
60	59,0	50,8	49,5	48,9
65	53,7	45,4	46,6	45,9
Průměr	64,7	57,6	58,0	56,8



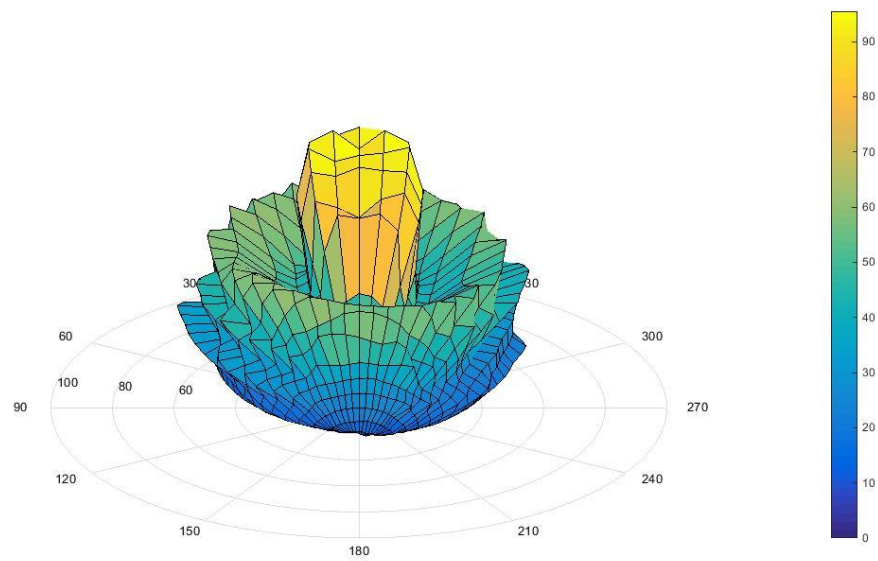
Obr. 78: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 1, pohled od severu (bod 0°)



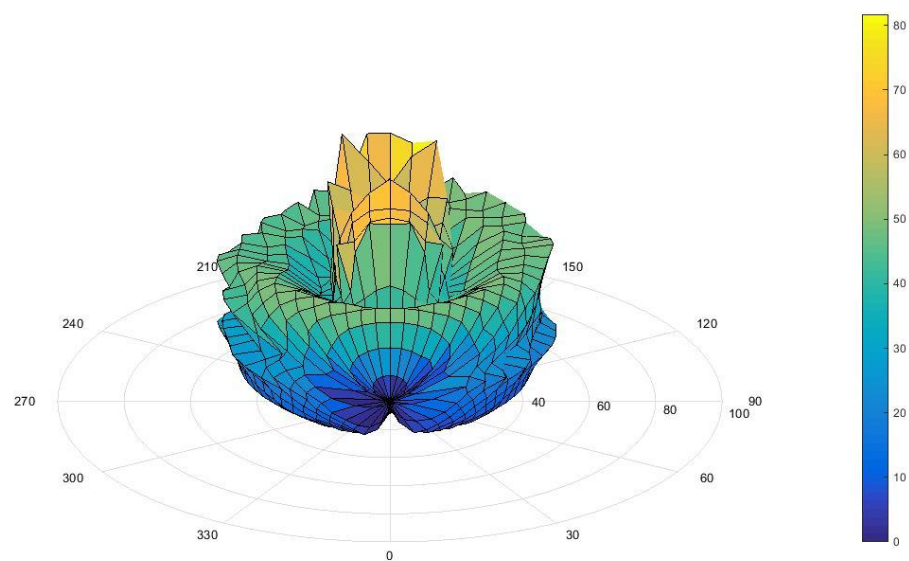
Obr. 79: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 1, pohled od jihu



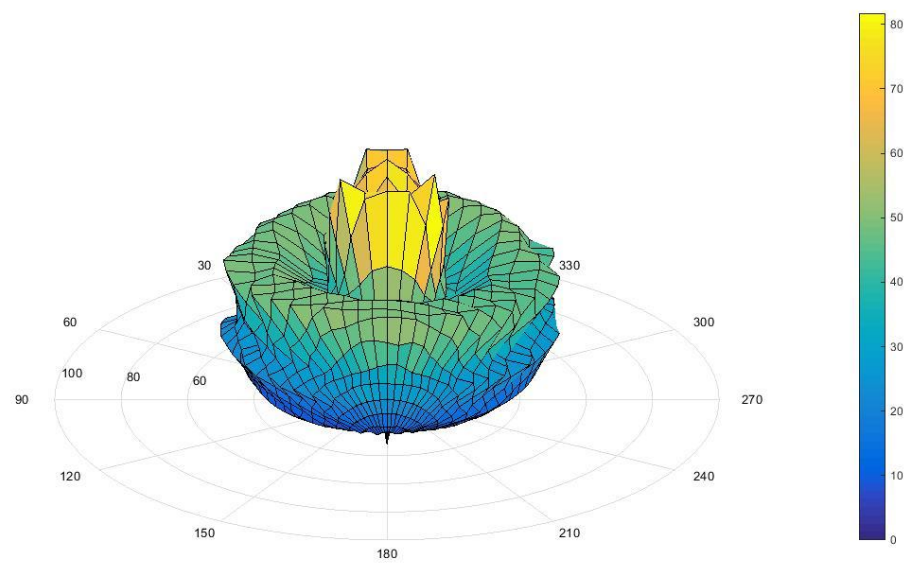
Obr. 80: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 2, pohled od severu (bod 0°)



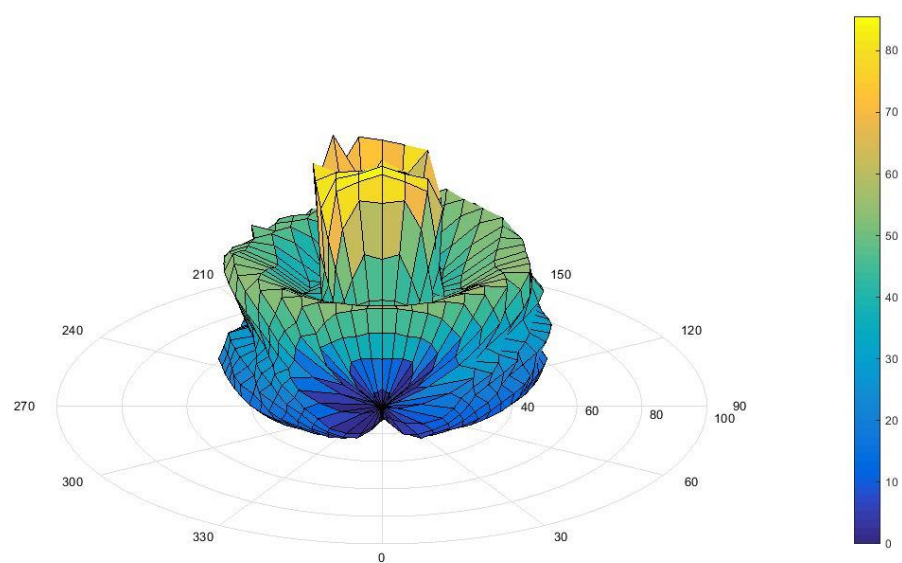
Obr. 81: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 2, pohled od jihu



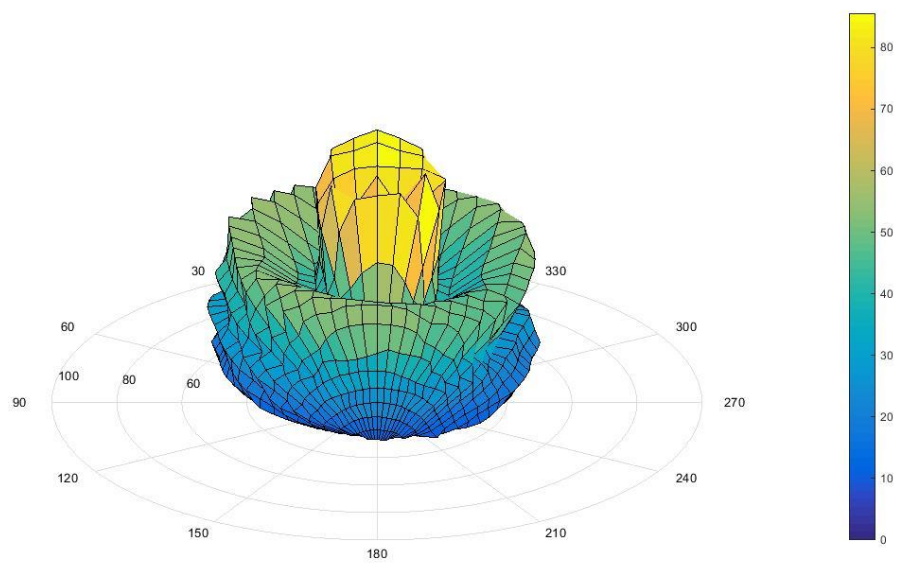
Obr. 82: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 3, pohled od severu (bod 0°)



Obr. 83: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 3, pohled od jihu



Obr. 84: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 4, pohled od severu (bod 0°)



Obr. 85: Poměrná citlivost světlovodu GAMA – 4, pohled od jihu