

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ARCHITEKTURY**

**ÚSTAV STAVITELSTVÍ II**



**NÁVRH A OVĚŘENÍ METODIKY OSVĚTLENÍ  
POMOCÍ SVĚTLOVODŮ**

**DESIGN AND VERIFICATION OF METHODOLOGY  
OF DAYLIGHT USING LIGHT GUIDE**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Ing. Lenka Prokopová**

**Doktorský studijní obor:           Architektura a urbanismus**  
**Doktorský studijní program:    Architektura, stavitelství a technologie**  
**Školitelka:                           Ing. Daniela Bošová, Ph.D.**

**Praha, 2015**



## PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Lenka Prokopová

Název disertační práce: Návrh a ověření metodiky osvětlení pomocí světlovodů

Prohlašuji, že jsem uvedenou doktorskou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitelky Ing. Daniely Bošové, Ph.D.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu:

- SGS11/102/OHK1/2T/11: Optimalizace návrhu světlovodů včetně metodiky měření
- SGS12/108/OHK1/2T/11: Optimalizace návrhu prosvětlení podstřešních prostor
- SGS13/105/OHK1/2T/11: Transport světla tubusovým světlovodem
- SGS15/222/OHK1/3T/15: Aplikace inovativních materiálů na celoskleněné konstrukce z hlediska kvality vnitřního prostředí
- VEGA 2/0029/11, Research of quantitative and qualitative characteristics of daylighting in buildings. Light transmission efficiency of two guide light samples v rámci programu EU LLP - Erasmus 2012-2013

V Praze dne:

podpis:



## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala všem, bez kterých by tato práce nevznikla. Poděkování patří zejména vedoucí mé disertační práce Ing. Daniele Bošové, Ph.D., za její cenné rady a připomínky a především velkou důvěrou. Velké díky patří i celé mé rodině, jejíž podpora po celou dobu mého studia byla vždy velkou hnací silou.

Mé díky je rovněž směřováno Doc. Ing. Stanislavu Darulovi, díky kterému jsem mohla pracovat na výzkumné části své disertační práce v laboratoři s umělou oblohou na Slovenské akademii věd.

Dále musím poděkovat pracovištím a institucím, bez jejichž pomoci a vstřícnosti jejich pracovníků by tato práce nikdy nevznikla:

- Fakulta architektury - Ústav stavitelství II
- Fakulta stavební – Katedra konstrukcí pozemních staveb
- Ústav stavebnictva a architektúry Slovenské akademie vied v Bratislave
- SOLA SYSTEM SLOVAKIA, s.r.o., - dodání vzorků světlovodů
- České vysoké učení technické v Praze
- Rektorát ČVUT v Praze - EU LLP - Erasmus 2012-2013



## ANOTACE

Lidé tráví většinu času uvnitř budov. Studie ukazují, že se jedná průměrně i o více než 90% celého životního cyklu. Proto bychom měli vnitřní prostředí budov přizpůsobit zdravému a příjemnému působení. Jedním z požadavků bývá vhodné vnitřní osvětlení interiérů. Dříve se tento požadavek vyřešil vhodným umístěním svítidel a případně doplnil nastavením intenzity umělého osvětlení. Brzy se však prokázalo, že nám denní osvětlení chybí a tento problém se začal intenzivněji řešit. Dalším impulsem pro optimální využití denního osvětlení je také celosvětový trend snížení spotřeby fosilních paliv s tím související snížení emisí skleníkových plynů a následný boj proti globálnímu oteplování.

Hledáme proto další prvky, které přinášejí denní světlo do interiérů v případech, kdy není možné využít klasické okenní otvory. Jednou z možností může být využití světlovodů, které mohou přivést denní světlo do jinak těžko osvětlitelných interiérů či jejich částí. Světlovod označujeme jako doplňkový prvek denního osvětlení, jelikož účinnosti přenosu světla jsou vlivem ztrátových činitelů nižší. Navíc nám světlovod neumožňuje vizuální propojení s vnějším prostředím. Je však stále „zdrojem“ denního osvětlení a dokáže světlo transportovat i s jeho dynamikou, která je pro lidský organismus důležitá z hlediska biologických rytmů, na které je organismus již od nepaměti nastaven.

Světlovodem transportované denní světlo je v místnosti rozptýleno a je do interiéru dodané jako difúzní. Nedochází proto k pronikání přímých slunečních paprsků, což může být pro některé vnitřní prostředí žádoucí. Navíc chceme-li dosvětlit místa, která mají z hlediska hygieny určité požadavky, je potřeba toto množství umět také vyčíslit. A správně pak navrhnout jak průměr, délku, tak také počet a umístění světlovodných prvků.

„Give light, and the darkness will disappear of itself“

*Desiderius Erasmus*





## ABSTRACT

People spend most of their time indoors, studies show that it is more than 90% of the life cycle. Therefore, we should adapt to indoor environment to healthy and pleasant influence. One of the requirements is appropriate internal interior lighting. Previously, this requirement was solved suitably located lights alternatively was finalized intensity of artificial lighting. It was soon proved that daylight is missing, and the problem was discussing more intensively. Another impetus for the optimal use of daylight is also a worldwide trend towards a reduction in fossil fuel consumption with associated reductions in greenhouse gas emissions and the consequent fight against global warming.

Therefore we are looking the other elements that bring daylight into the interior, where it is not possible to use the classic window openings. One possibility may be the use of light guides, which can bring daylight into the interior, which is illuminable very difficultly. Light guide is referred to as an additional element of daylight, because the efficiency of light transmission are lower for loss factors. Furthermore, light guides do not enable visual connection with the outside environment. However, light guide is still a "source" of daylight and is able to transport light with its dynamism, which is important for the human body with respect to biological rhythms.

Transported daylight using light guide is diffused into the room and is supplied as diffuse light to the interior. This avoids the penetration of direct sunlight, which can be for some indoor environments desirable. Properly then design diameter, length, the number and the placement of light guides.

„Give light, and the darkness will disappear of itself“

*Desiderius Erasmus*



## Obsah

PROHLÁŠENÍ .....	2
PODĚKOVÁNÍ.....	3
ANOTACE.....	4
ABSTRACT.....	5
1. IDENTIFIKACE PROBLÉMU – CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....	9
2. PŘEHLED LITERATURY .....	11
2.1. Rešerše problematiky v zahraničí .....	11
2.2. Rešerše problematiky v České republice .....	15
3. ZÁKLADY SVĚTELNÉ TECHNIKY .....	19
3.1. Světelné záření .....	19
3.2. Podstata světla .....	20
3.3. Azimut slunce .....	20
3.4. Výška slunce .....	21
3.5. Dráhy slunce .....	21
4. Fyziologie vidění .....	22
4.1. Stavba oka .....	22
4.2. Funkce sítnice .....	23
4.3. Akomodace.....	24
4.4. Adaptace.....	24
4.5. Fototropický reflex.....	25
4.6. Zorné pole .....	25
4.7. Oslnění.....	26
4.8. Spektrální citlivost zraku .....	27
5. ZÁKLADNÍ SVĚTELNĚ TECHNICKÉ VELIČINY .....	28
5.1. Světlený tok .....	28
5.2. Prostorový úhel.....	29
5.3. Svítivost .....	29
5.4. Osvětlenost.....	30
5.5. Jas 30	
6. DENNÍ OSVĚTLENÍ .....	32
6.1. Obecně .....	32
6.2. Požadavky na denní osvětlení v zahraničí .....	36
6.3. Požadavky na denní osvětlení v České Republice.....	37
6.3.1 Požadavky ČSN 73 0580-1, (Z1-2011) – základní požadavky:.....	37
6.3.2 Požadavky ČSN 73 0580-2, (Z1 - 2014) – Denní osvětlení obytných budov:.....	37
6.3.3 Požadavky ČSN 73 0580-3 (Z2-1999)- denní osvětlení škol .....	38



6.3.4	Požadavky ČSN 73 0580-4 (Z2-1999) – pro administrativní a ostatní prostory: .....	39
6.3.5	Požadavky ČSN 73 0580-4 (Z2-1999) – pro oddechové místnosti:.....	39
6.3.6	Požadavky ČSN 73 0580-4 (Z2-1999) - pro průmyslové budovy.....	39
6.3.7	Požadavky ČSN 36 0020-1 – Sdružené osvětlení .....	40
6.3.8	Vyhláška č. 268/2009 Sb. O technických požadavcích na stavbu, § 12 odst. 1,2,4 a 5 .....	40
6.3.9	Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, § 45 odst. 1, 3, 4, 8 .....	41
6.3.10	Vyhláška č. 410/2005 Sb. O hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých, § 12 odst.1, 2, 3, 4, § 15 odst.1,2, 3, 4, 5, § 16 odst.1, 2, 3.....	42
7.	SVĚTLOVOD, JEHO ČÁSTI A MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO VÝROBU.....	45
7.1.	Světlovod - obecně .....	45
7.2.	Kopule .....	45
7.2.1.	Plasty .....	45
7.2.2.	Sklo .....	49
7.3.	Tubus.....	51
7.3.1.	Hliník.....	51
7.3.2.	Metalizovaný polyester .....	52
7.4.	Stropní difuzér .....	55
8.	VÝZKUMNÝ ZÁMĚR .....	56
8.1.	Identifikační údaje .....	56
8.2.	Úvod .....	57
8.3.	Popis výzkumného záměru.....	57
8.4.	Popis vzorků.....	58
8.5.	Měřicí přístroje .....	60
8.6.	Kalibrace měřících přístrojů.....	62
8.7.	Test jasů umělé oblohy .....	65
8.8.	Metodika měření .....	67
8.9.	Nejistota měření .....	69
8.10.	Výsledky měření.....	70
8.11.	Vyhodnocení.....	76
9.	VÝPOČETNÍ MODEL Y .....	77
9.1.	Luxplot package model .....	78
9.2.	Výpočetní metoda dle CIE 173:2012 Tubular Daylight Guidance Systems	80
9.3.	Výpočetní software HOLIGILM (Hollow light guide interior illumination method).....	83
9.4.	Shrnutí výsledků výpočetních metod.....	87



10. ZÁVĚR .....	88
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	90
SEZNAM TABULEK .....	92
SEZNAM GRAFŮ.....	92
LITERATURA.....	93
SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ.....	96

Příloha 1	– Testovací protokol - sonda referenčního luxmetru Brüel
Příloha 2	– Protokol o kalibraci - Extech č.14 HD 450
Příloha 3	– Protokol o kalibraci - Extech č.15 HD 450
Příloha 4	– Protokol testu jasů umělé oblohy
Příloha 5	– Protokol o měření světlovodu – vzorek 1
Příloha 6	– Protokol o měření světlovodu – vzorek 2a
Příloha 7	– Protokol o měření světlovodu – vzorek 2b
Příloha 8	– Protokol o měření světlovodu – vzorek 2c
Příloha 9	– Protokol o měření světlovodu – vzorek 2c
Příloha 10	– Fotodokumentace



## 1. IDENTIFIKACE PROBLÉMU – CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

V dnešní době začínáme využívat i méně atraktivní pozemky k výstavbě pozemních staveb a navíc se snažíme tuto plochu využít co možná nejvíce. Vznikají tak prostory, které jsou velmi málo nebo nejsou vůbec osvětleny denním světlem. Zde nastává problém především s vytvoření vhodného prostředí pro pobyt člověka, který v uzavřeném prostoru tráví většinu času. Dále také dochází ke zvýšení energetické náročnosti, kdy musíme nahradit přirozený zdroj světla, zdrojem umělým. Oba tyto faktory nepříznivě ovlivňují návrh objektu, proto se snažíme nalézat vhodnější řešení, abychom i do těžko přístupných prostor dovedli denní světlo, které je pro zrakové činnosti člověka velmi důležité, ale také abychom dosáhli úspor energií, které by byly spotřebovány používáním umělého osvětlení.

Vhodným osvětlovacím prostředkem se proto stávají světlovody, které dokáží přenášet denní světlo na velké vzdálenosti. Jejich pořízení nepatří k nejlevnějším investicím, proto bychom měli velkou pozornost věnovat optimalizaci návrhu, aby jeho instalace přinesla co nejefektivnější využití.

Světlovod je stavební prvek, který má tři základní části: kopuli, tubus a difuzor. Kopule, která vyčnívá nad povrch, zachytává maximální množství světla a láme ho do tubusu světlovodu, který odráží světlo až k difuzoru. Poslední část – difuzor, rozptyluje transportované světlo do interiéru v podobě difúzního neboli rozptýleného světla – viz obr. 1.

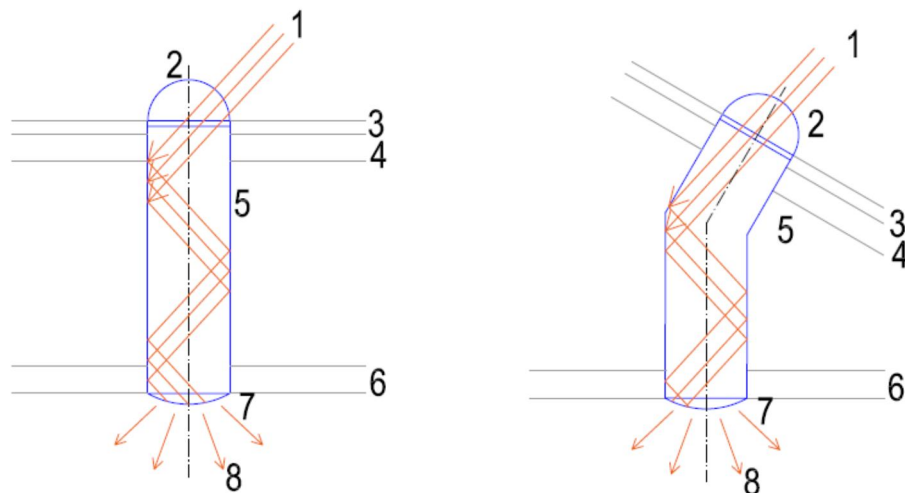
Světlovody se nejprve začaly využívat v neobytných místnostech, jako jsou koupelny, toalety, chodby, schodiště, či další komunikační prostory nebo jako doplňkové osvětlení v místnostech bez trvalého pobytu. Postupně se začaly vyrábět světlovody s většími průměry a s lepšími odrazivostmi, proto se v některých případech mohou použít i jako hlavní osvětlovací prostředek i pro místnosti s trvalým pobytem lidí, většinou však tvoří doplňkový zdroj denního osvětlení, jelikož neumožňují vizuální kontakt s okolím.

Problém nastává s návrhem světlovodů pro právě zmíněné místnosti s trvalým pobytem lidí. V České republice je dán požadavek na množství denního osvětlení, ale není stanovena metodika posouzení poskytovaného množství světla



světlovodem. Proto cílem mé disertační práce bude sestavit modely světlovodů, u kterých bude možné naměřit množství poskytovaného světla v laboratoři pod umělou oblohou na Slovenské akademii věd v Bratislavě při rovnoměrně zatažené obloze. Na základě naměřených výsledků se prověří možné, dosud používané metodiky výpočtu, které by co nejpřesněji kopírovaly naměřené hodnoty. Tyto výpočetní modely bude potřeba důkladně nastudovat, včetně veškerých koeficientů a ty poté nastavit tak, aby odpovídaly světelným podmínkám v České republice.

Výsledná metodika by pak měla sloužit k návrhům a posuzování světlovodů z hlediska účinnosti poskytování denního osvětlení. Měla by pomoci projektantům s návrhem počtu, velikosti a umístěním světlovodů pro místnosti, které pak mohou splňovat požadavky pro místnosti s trvalým pobytem lidí.



**Obrázek 1: Princip funkce světlovodu a jeho základní části:**

- 1 - sluneční záření
- 2 - nástřešní kopule
- 3 - střešní krytina
- 4 - konstrukce střechy
- 5 - tubus světlovodu
- 6 - konstrukce stropu
- 7 - stropní difuzér
- 8 - rozptýlené světlo



## 2. PŘEHLED LITERATURY

### 2.1. Rešerše problematiky v zahraničí

Na konci roku 1980 byly již používány pasivní solární systémy, tak jak jsou známy dnes. Již v té době bylo využito vývoje v reflexních materiálech, které jsou používány pro trubky světlovodů. Tvary zkoušených průřezů byly nejprve velice různorodé, avšak pozdější vývoj a následné uvedení na trh se zaměřil výhradně na kruhové průřezy. První publikace na toto téma vyšla v roce 1986, autory byla dvojice Zastrow a Wittwer, která však popisovala trubkový světlovod o trojúhelníkovém průřezu a transport světla byl stanoven experimentálně (ZASTROW, a další, 1986). Průřez měl délky stran 0,01 m, jejich vnitřní odrazivost byla 95% a celková délka světlovodu byla 0,12 m. Vypočtená účinnost přenosu světla se rovnala hodnotě 0,296, které přibližně odpovídala i naměřená hodnota 0,320. Dle tohoto experimentu byl také stanoven první vztah pro účinnost transportu světla  $T$ . (CALLOW, 2003)

$$T = 2 \int_0^{2\pi} \cos\theta \rho^{L \tan\theta / d(\text{eff})} \sin\theta d\theta \quad [1]$$

kde je:  $T$  účinnost transportu světla [-]

$\theta$  úhel dopadu světla [rad]

$L$  délka světlovodu [m]

$d$  průměr světlovodu [m]

$\rho$  odrazivost povrchu [-]

Výpočetní vztah byl dále používán pro výpočty účinnosti prostupu světla světlovodem Swiftem a Smithem (SWIFT, a další, 1999) a upraven byl takto:

$$T = \rho^{L \tan\theta / d} \quad [2]$$

kde je:  $T$  účinnost transportu světla [-]

$\theta$  úhel dopadu světla [rad]

$L$  délka světlovodu [m]

$d$  průměr světlovodu [m]

$\rho$  odrazivost povrchu [-]



Funkci a využití světlovodů popsal také Allen v roce 1997 (ALLEN, 1997). Pro svoji práci si vybral 2 administrativní budovy v Kalifornii, kde u jedné z nich byly použity střešní světlíky a v druhé byly použity světlovody. Pomocí stmívajících předradníků byly ovládána svítidla a to za účelem úspory elektrické energie, která se samozřejmě potvrdila.

Poté v publikační činnosti o světlovodech následovali Oakley (OAKLEY, et al., 1999) a Carter (CARTER, 2002). Dále bylo zapotřebí nastínit výpočtové metody, které by popisovaly šíření světla světlovodem. Tyto metody jsou založeny na teoretických modelech, na které navazují empirické modely ze skutečných měření. První modely zohledňovaly především odrazivost samotného tubusu, ale nebraly v úvahu ztrátu světla prostupem střešní kopule ani stropního difuzoru.

Autoři, kteří pak zveřejnili již propracovanější metodiky výpočtu, včetně všech možných ztrát světla, ke kterým může během prostupu světlovodem dojít, byli např. Zhang a Muneer (ZHANG, a další, 2000) a (ZHANG, a další, 2002). Ve studiích se zabývali jak přímým, tak zahnutým tubusem světlovodu a dle naměřených výsledků ve Velké Británii se jejich výpočetní modely lišily jen o 3 max. 5%. Jenkins a Maneer ve výzkumné zprávě (JENKINS, a další, 2003) popisují světelný tok světlovodem a také navrhují metody výpočtu pro zataženou oblohou, kdy osvětlení vyplývá z daného světelného toku. Veškeré použité údaje byly získány z měření ve Velké Británii v průběhu celého roku na různých místech, data tedy odpovídají výsledkům skutečných oblohových podmínek.

Callow (CALLOW, 2003) shrnul tyto poznatky ve své práci a uvedl, že světlo, které je propuštěné světlovodem závisí především na odrazivosti vnitřního povrchu samotného tubusu světlovodu, na jeho délce a průměru a také na úhlu dopadu světelných paprsků. Máme-li menší průměr a kratší délku tubusu a budeme-li uvažovat malý úhel dopadu světelných paprsků v letním období, kdy je Slunce nejvýše a velkou odrazivost vnitřního povrchu světlovodu, odpovídá propustnost světla světlovodem  $T$  vztahu [2] publikované dvojicí Swift a Smith (SWIFT, a další, 1999).





Nejobtížnější je popsat skutečné externí světelné podmínky, jelikož jsou v čase proměnné. Abychom vůbec mohli realitu popsat, stanovili se pro hodnocení denního osvětlení jednotné podmínky a to rovnoměrně zatažená obloha. S těmito externími podmínkami se uvažuje jak v zahraničí, tak v České republice. Protože nemá zatažená obloha stejnou úroveň intenzity denního osvětlení pro celou zeměkouli, nemůžou být ani teoretické metodiky jednotně používány pro celý svět. Proto se pro jednotlivé oblasti musejí provést také srovnávací experimentální metodiky, které pro daná místa na Zemi zoptimalizují teoretické modely.

Mezi nepublikovanější výpočetní modely pak patří:

- Metoda CIE (CIE, 2006)
- Zhang-Muneerova metoda
- Jenkins-Muneerova metoda
- Tsangrassoulisova metoda
- Luxplot package model

Těmito metodami můžeme popsat množství světla, které se pomocí světlovodu dostane do místností, ale nedokážeme již popsat osvětlenost daných prostorů, pro které jsou požadavky na osvětlenost většinou udávány. Zde přicházejí na řadu simulační metody, které dokážou popsat světelné pole a to pomocí sledování paprsků nebo částic. (DARULA, a další, 2009)

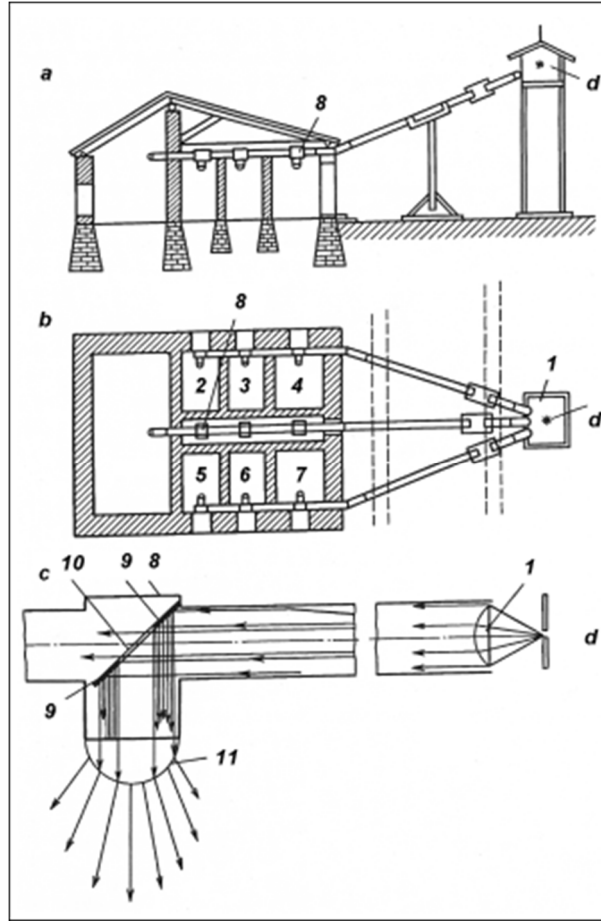
Nejpoužívanějšími metodami jsou:

- Radiální metoda
- Metoda globální osvětlenosti
- Metoda fotonové mapy
- Metoda zpětného sledování paprsků

Historií samotného vývoje a užití dutých světlovodů se věnoval Aizenberg (AIZENBERG, 2001). Ve své práci pak uvádí, že jako první r. 1874 realizoval dutý světlovod známý vynálezce Čikolev (ČIKOLEV, 1880). V Ochtinské továrně na výrobu střelného prachu (u Sankt Petěrburgu) vybudoval osvětlovací soustavu s dutými světlovody z pozrcadlených trub (obr. 2 - zdroj (AIZENBERG, 2001)). Těmito světlovody se dopravovalo světlo výkonné elektrické obloukovky, instalované na



speciální věži mimo budovy. Světlo bylo směrováno do místností poloprůhlednými zrcadly a zde se rozptylovalo polokoulemi s difuzním prostupem světla (AIZENBERG, 2001).



Obrázek 2: Osvětlovací soustava P.N. Čikoleva s dutými koncovými světlovodů v Ochtinské prachové továrně – zdroj: (AIZENBERG, 2001)

kde je: d – obloukovka

1- kondenzor

3 až 7 – osvětlované prostory s nebezpečím výbuchu

8 – svítidla, tj. hlavice pro rozdělování a rozptyl světla

9,10 – odrážející a propouštějící plochy dělicí hlavice



## 2.2. *Rešerše problematiky v České republice*

V České republice, jako v jedné z mála zemí, jsou dány požadavky pro úroveň denního osvětlení a to pro prostory s trvalým pobytem lidí. Dané požadavky jsou přiřazeny prostorům dle převažující zrakové činnosti. Pro tyto požadavky se některé místnosti stávají nepoužitelnými a světlovody by mohly být jedním z řešení jak do těchto prostor transportovat denní světlo a dále je využívat i pro trvalý pobyt lidí.

Kolektiv Plch, Mohelníková a Suchánek se pustili knihou „Osvětlování neosvětlitelných prostor“ (PLCH, a další, 2004) právě do této problematiky. Popsali světlovodné systémy a jejich využití a snažili se je porovnat s klasickým osvětlením a nalézt tak jejich výhody:

- systémy dokážou dovést denní světlo do vnitřních dispozic včetně jeho dynamiky
- zamezují oslnění a mohou v hlubších interiérech zajistit rovnoměrnost osvětlení
- na rozdíl od umělého osvětlení nejsou závislé na elektrické energii
- umožňují liniové či plošné zdroje namísto bodových
- filtrují ultrafialové a infračervené složky ze slunečního záření
- na rozdíl od výkonných světelných zdrojů zmenšují tepelnou zátěž místnosti
- celkově zlepšují světelnou pohodu a omezují tak škodlivý vliv pracovního prostředí na zrakovou únavu, sezonní depresi či úrazovost
- v nemocnicích a školách zaznamenávají příznivý vliv denního světla na pacienty, žáky a studenty, kteří pak prokazují lepší fyzickou i psychickou kondici a také zlepšují prospěch a tvůrčí aktivitu.

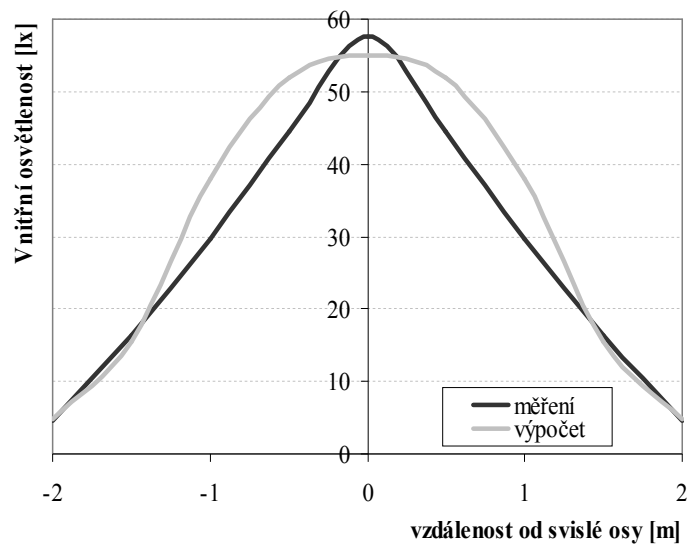
Z publikace pak plyne, že pro světlovod je nejvýhodnější navrhnout velkou soustřednou plochu pro solární zisky a dovést světlo na místo určení pokud možno s nejmenšími ztrátami. Proto jsou doporučeny větší průměry a krátké délky tubusů. Pro delší vzdálenosti se poté jako nejvýhodnější variantou jeví systémy, které využívají optická vlákna. Na výstupu do místnosti by měl být instalován prvek, který světlo rovnoměrně rozptýlí do prostoru, nazývaný difuzor. (PLCH, a další, 2004)



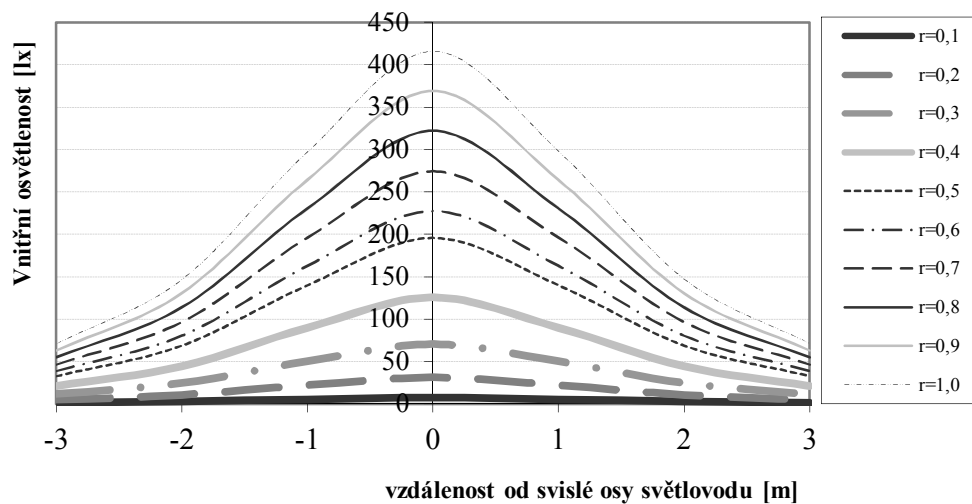
Tým autorů se rozrostl ještě o Darulu, Kittlera, Kocifaje a Vajkaye a v knize Osvětlování světlovedy (DARULA, a další, 2009), kde je podrobně rozebrán vývoj samotných světlovedů, podrobně vysvětleny jejich optické vlastnosti, metody posuzování a analytické řešení návrhu. Popisují zde základy fotometrie, základní veličiny, vztahy mezi fotometrickými a energetickými veličinami a matematické vyjádření složek světelného a zářivého toku.

V přehledu vývoje trubkových světlovedů jsou zmíněny i starověké Egypťské vertikální šachty vyložené zlatými pláty, které sloužili k dopravě světla do nitra mohutných kamenných staveb. O novodobých světlovedech jsou zmínky z druhé poloviny 19. století, které vzešly v souvislosti s vedením umělého světla z elektrických obloukových lamp.

Pro vedení především denního světla se začínají světlovedy využívat od 70 – 80 let 20. století. Kdy přišly na řadu nejprve pasivní světelné systémy a později také aktivní světelné systémy, které pro koncentraci světelného záření využívají optická zrcadla a čočky. Abychom mohli podrobně posoudit optické vlastnosti prvků světlovedů, je nutné stanovit spektrální propustnosti u transparentních prvků světlovedů, hodnoty směrové propustnosti nástřešních kopulí a stropních krytů světlovedů pro dané úhly dopadu světelných paprsků a stanovit spektrální odrazivosti vnitřních povrchů světlovedných trubků. Dle knihy lze podrobně namodelovat exteriérové světelné podmínky a podle uvedených příkladů můžeme vypočítat jas oblohy s danou výškou a azimutem Slunce a také horizontální difúzní, sluneční i celkové osvětlenosti v libovolném čase a místě. Jsou zde zmíněny výše uvedené zahraniční analytická řešení, empirické a simulační metody pro modelování denního osvětlení pomocí světlovedů. Na již realizovaném světlovedu je proveden kontrolní výpočet, ale pouze jednou výpočetní metodou, který je srovnán se skutečným měřením. Při výpočtu je počítáno s ideálně rozptylným difuzorem, proto jsou hodnoty ve vzdálenosti 0m od osy světlovedu vyšší pro naměřené hodnoty a vypočítané hodnoty mají pozvolnější průběh – viz obr. 3. Výpočty poté byly provedeny pro průměry světlovedu od 0,1m do 1,0 m – viz obr. 4. Poslední kapitola je věnována ukázkami praktických realizací světlovedů.



Obrázek 3: Porovnání výsledků výpočtu přímé osvětlenosti s naměřenými hodnotami při rovnoměrně zatažené obloze (DARULA, a další, 2009).



Obrázek 4: Grafické znázornění rozložení vypočtené přímé osvětlenosti na srovnávací rovině (DARULA, a další, 2009)

Kaňka popsal v článku Tubus světlovodu pod oblohou CIE (KAŇKA, 2012) způsob výpočtu činitele denní osvětlenosti  $D_d$  [%] difuzoru světlovodu v podmínkách osvětlení transparentní kopule světlovodu nestíněnou zataženou oblohou CIE 1:3. Hodnota činitele  $D_d$  [%] závisí na průměru  $r$  [m] a délce  $l$  [m] tubusu světlovodu a na činiteli  $\rho$  [-] odrazu světla jeho vnitřních stěn. Hodnotu  $D_d$  [%] lze použít k výpočtu činitele denní osvětlenosti pracovní roviny v místnosti osvětlované světlovodem za předpokladu uvažování zatažené oblohy CIE 1 : 3 jako zdroje venkovní osvětlenosti.



Navržená technická metoda výpočtu může napomoci architektům, světelným technikům a orgánům státní správy ke správnému hodnocení účinnosti světlovodů při jejich navrhování všude tam, kde tato zařízení mohou přispět ke kvalitě vnitřního prostředí staveb i k úsporám energie. (KAŇKA, 2012)

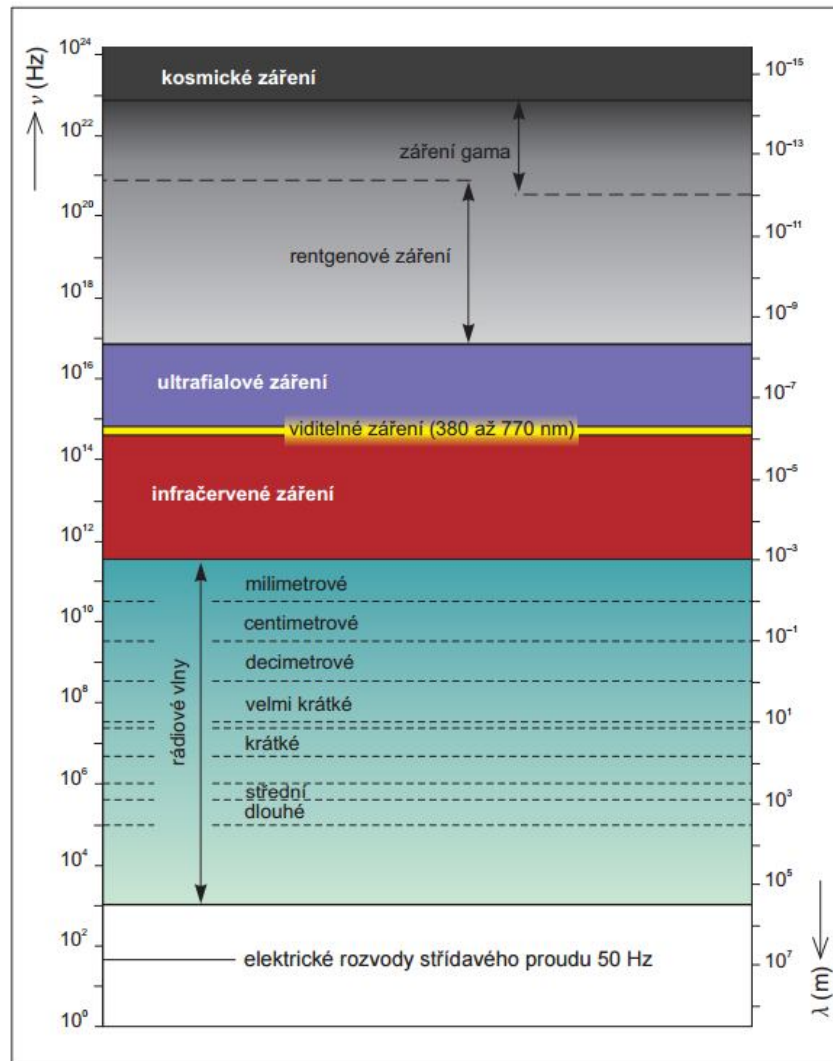


### 3. ZÁKLADY SVĚTELNÉ TECHNIKY

#### 3.1. Světelné záření

Záření neboli radiace je šíření či přenos energie prostorem v podobě elektromagnetických vln nebo hmotných částic. Ve světelné technice se však nezkoumá podstata elektromagnetického záření nebo jeho silové účinky, ale to, že libovolné složky záření lze rozdělit na složky se sinusovým průběhem.

Každá složka je charakterizována jedním kmitočtem [Hz], případně vlnovou délkou  $\lambda$  [nm]. Seřadí-li se složky záření podle jejich kmitočtů či vlnových délek, získáme spektrum záření – viz obr. 5. (HABEL, a další, 2013).

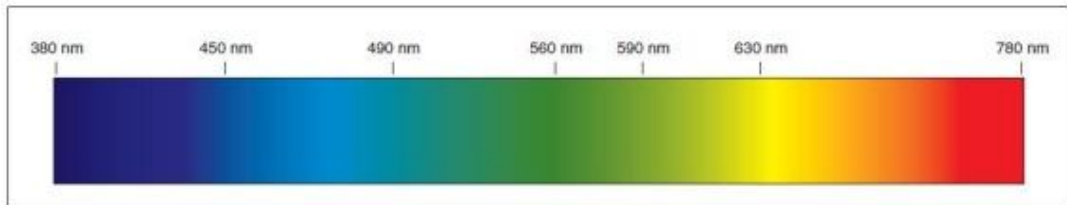


Obrázek 5: Spektrum elektromagnetických záření s orientačním členěním podle kmitočtů a vlnových délek (HABEL, a další, 2013)



### 3.2. Podstata světla

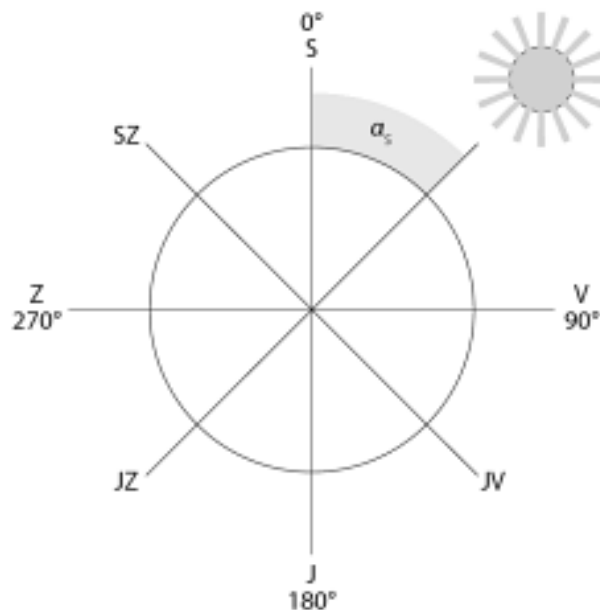
Světlo nezpůsobuje jen zrakový vjem, ale také barevný počinek. Barevné vlastnosti primárních světelných zdrojů se označují názvem chromatičnost nebo jsou popsány všeobecným indexem barevného podání  $R_a$ , barevné vlastnosti sekundárních světelných zdrojů se označují názvem kolorita. Záření každé vlnové délky viditelného světla budí barevný počitek. Každému barevnému počitku odpovídá určitá spektrální barva, kterou popisujeme barevným tónem – viz obr. 6.



Obrázek 6: Rozložení barevných tónů ve spektrální oblasti viditelného záření (SOKANSKÝ, a další, 2011)

### 3.3. Azimut slunce

Azimut slunce  $\alpha_s$  [°] je orientovaný úhel, který svírá kolmý průmět slunečního paprsku do vodorovné roviny od severního směru. Měří se ve směru hodinových ručiček. Z definice vyplývá, že sever má azimut  $0^\circ$ , východ  $90^\circ$ , jih  $180^\circ$  a západ  $270^\circ$  – viz obr. 7.



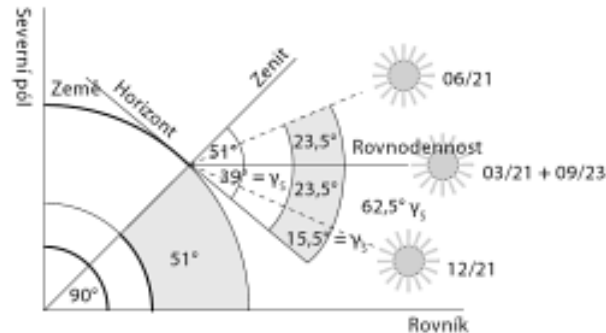
Obrázek 7: Azimut slunce (KÖSTER, 2004)





### 3.4. Výška slunce

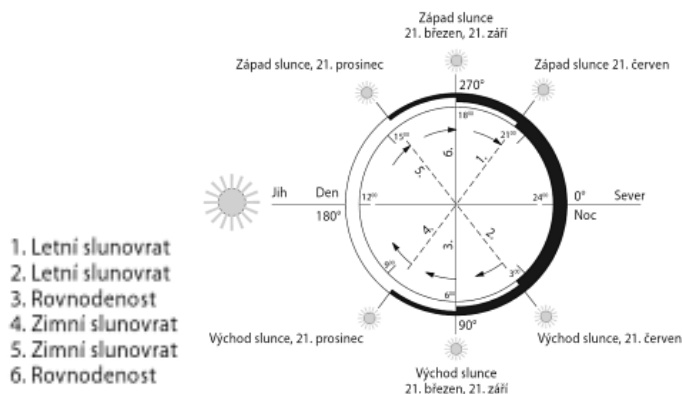
Výška slunce  $\gamma_s$  [°] je úhel, který svírá sluneční paprsek s horizontální rovinou proloženou místem pozorování – viz obr. 8. Je-li slunce nad obzorem. Má jeho výška vždy kladnou hodnotu. Své maximální hodnoty nabývá výška slunce při kulminaci. Ke kulminaci dochází vždy v poledne pravého slunečního času, kdy v našich šířkách je slunce vždy na jihu. (WEIGLOVÁ, a další, 2006)



Obrázek 8: Vztah mezi zeměpisnou šířkou a výškou slunce na severní zeměpisné šířce 51° (KÖSTER, 2004)

### 3.5. Dráhy slunce

Dráhy slunce závisí na výšce slunce nad obzorem – mezi maximální výškou slunce (léto) a nejnižší výškou (zima), dále na orientaci ke větovým stranám a denní době od východu do západu slunce. V zeměpisných šířkách střední Evropy se tyto parametry určují: pro východ slunce v zimě: jihovýchod, východ slunce v létě: severovýchod, západ slunce v zimě: jihovýchod, západ slunce v létě: severozápad – viz obr. 9. 21. března a 21. září jsou dny rovnodennosti – slunce vychází přesně v 6 hodin ráno na východě a zapadá v 18 hodin na západě. To platí pro všechny zeměpisné šířky.



Obrázek 9: Zobrazení denních a ročních slunečních drah na zeměpisné šířce 51° (KÖSTER, 2004)



## 4. Fyziologie vidění

Zrakový systém člověka je tvořen souborem orgánů, které zajišťují příjem, přenos a zpracování informací informace přenesené světlem v komplexu nervových podráždění, jejichž výsledkem je zrakový vjem. Světlo je prostředkem, který umožňuje příjem zrakové informace a osvětlení tak může tento příjem usnadnit nebo ztížit. Základní znalosti anatomie a fyziologie zrakového systému jsou proto nutnou podmínkou pro správný návrh a posouzení osvětlení. Zrakový systém se skládá ze tří hlavních částí:

- 1) periferní – oči člověka
- 2) spojovací – zrakové nervy
- 3) centrální – podkorové a korové oblasti mozku

Vzájemná složitá propojení a vazby v centrální nervové soustavě potvrzují skutečnost, že osvětlení ovlivňuje nejen samotné zrakové vnímání, ale také celou řadu dalších funkcí organismu člověka a jeho psychický stav. Funkce periferní části – oka – jako části, která přijímá informace přenášené světlem z vnějšího prostředí a bezprostředně tak vstupuje v interakci s tímto prostředím, má na stav světlené pohody či nepohody podstatný význam.

### 4.1. Stavba oka

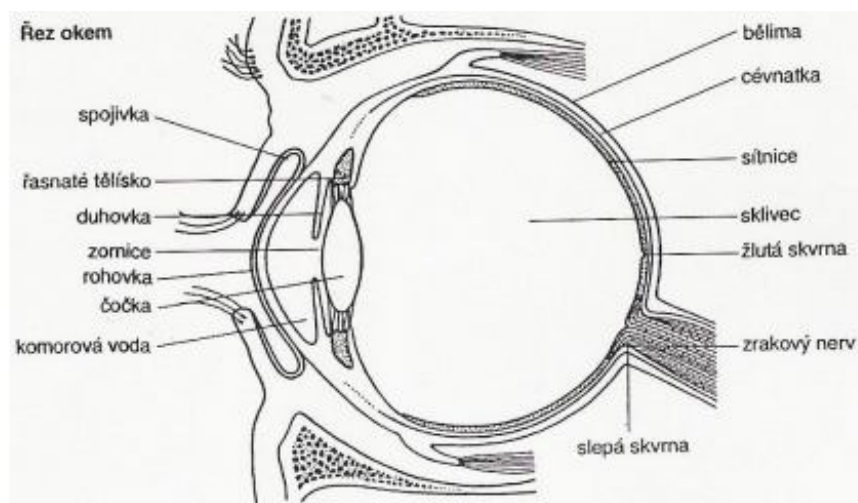
Obě oči jsou symetricky uloženy v lebce v očnicích. Tvar oka je přibližně kulový, uzpůsobený pro snadné a rychlé otáčení v ocnici. Oční bulva dospělého člověka má průměr asi 24mm. Stěnu oka v jeho zadní části tvoří tři vrstvy:

- 1) bělima – je bělavá hustá tkáň, která tvoří nosnou vrstvu stěny oční bulvy
- 2) cévnatka – má význam pro výživu nitra oka, zejména třetí vrstvy
- 3) sítnice – obsahuje dva druhy světločivných buněk: tyčinky asi  $130 \cdot 10^6$  ks a čípky asi  $7 \cdot 10^6$  ks

Nejvíce světločivných buněk je soustředěno v optické ose okna – v tzv. žluté skvrně. V místě, kde na sítnici ústí zrakový nerv – v tzv. slepé skvrně – naopak světločivné buňky chybí. V přední části oka bělima přechází v průhledný pevný obal tvaru hodinového sklíčka zvaný rohovka, zatímco cévnatka přechází jednak v tzv.



řasnaté tělísko, na které je zavěšena oční čočka, jednak také v duhovku. Uprostřed duhovky je přibližně kruhový otvor – zornice, kudy vstupuje do oka světlo. Průměr zornice se mění v závislosti na činnosti hladkých svalů duhovky a tím se upravuje hodnota světelného toku vstupující do oka. Duhovka tak tvoří jakousi optickou clonu oka. Činnosti hladkých svalů řasnatého tělíska lze v jistém rozmezí měnit tvar oční čočky a tím i její optické vlastnosti. Vnitřní prostor oka za čočkou vyplňuje čirá průhledná bezbarvá rosolovitá pružná hmota – sklivec. Jednotlivé části oka jsou zobrazeny a popsány na obr. 10. (WEIGLOVÁ, a další, 2006)



Obrázek 10: Svislý řez lidským okem (Fyzika, 2010)

#### 4.2. *Funkce sítnice*

Oční čočka promítá obraz pozorovaného předmětu na sítnici, kde se obraz zachytí a je soustavou nervových vláken převáděn do mozku. Sítnice se skládá z 10 ti vrstev, kde v poslední vrstvě jsou světločivné buňky – tyčinky a čípky. Tyčinky jsou určeny k vidění za šera. Jsou vysoce citlivé, pracují i při velmi nízkých světelných podnětech, avšak neumožňují rozlišení barev světla. Při skotopickém vidění vnímáme různé jasy v zorném poli s vysokým stupněm rozlišení jako různé odstíny šedé barvy od bílé po černou. Čípky jsou činné jen při dostatečně silném osvětlení a jsou určeny k vidění za dne. Jsou citlivé na všechny barvy světla, které jsou schopny velmi dobře rozlišovat. Naopak jejich schopnost registrovat rozdíl jasů je malá. Přejídem mezi oběma způsoby vidění je vidění, při kterém se současně uplatňují tyčinky i čípky. Podstatou vidění je fotochemický děj odehrávající se na sítnici, kde



hlavním činitelem jsou látky sítnicové pigmenty, které se rozkládají účinkem světla. Světločivné buňky tak nejsou drážděny přímo světlem ale chemicky v závislosti na koncentraci sítnicových pigmentů.

### **4.3. Akomodace**

Oko není schopno současně stejně ostře zobrazit na sítnici předměty nacházející se v různých vzdálenostech. Normální oko hledící do dálky zobrazuje na sítnici ostře předměty ležící nekonečně daleko od oka, prakticky ve vzdálenosti větší než asi 6 m, kdy lze světelné paprsky přinášející informaci o těchto předmětech pokládat za rovnoběžné. Akomodace je schopnost oka přizpůsobit lomivost oční čočky vidění do blízka tj. do vzdálenosti menší než cca 6 m. Rozsah akomodace není u všech lidí stejný a mění se s věkem. Jednotkou akomodačního rozsahu je dioptrie. Akomodace probíhá bez účasti našeho vědomí při změnách fixace pohledu stažením řasnatého tělíska, na kterém je zavěšená čočka. Tím se mění zakřivení přední i zadní stěny čočky. Akomodace je tedy spojena s jistým, i když nevědomým úsilím. Nadměrná potřeba akomodace při pozorování blízkých předmětů po dlouhou dobu vede k únavě zraku. Jednou z nejdůležitějších funkcí oka v místnosti je možnost přerušování akomodačního úsilí pohledem do exteriéru. Proto je pro zdraví člověka tak důležitý výhled z okna neboli kontakt s exteriérem. S akomodací souvisí pojem konvekční zraková vzdálenost. Je to vzdálenost 0,25 m, která se považuje za nejvhodnější pro pozorování blízkých předmětů při čtení, psaní nebo při jemné práci.

### **4.4. Adaptace**

Adaptací nazýváme schopnost zraku přizpůsobit se různým hladinám osvětlenosti. Zdravé oko je schopné vnímat již při osvětlenosti asi  $2 \cdot 10^{-9}$  lx. K vidění dochází v rozmezí od 0,25 do 100 000 lx. Těmto velkým změnám osvětlenosti se oči přizpůsobují jednak změnou velikostí otvoru zornice – zornicový reflex, jednak změnou citlivosti světločivných buněk a změnou velikosti vjemových polí sítnice.

Hlavním mechanismem adaptace zraku je fotochemický děj probíhající na sítnici, jehož výsledkem je změna citlivosti světločivných buněk. Prostřednictvím



fotochemické reakce sítnicových pigmentů spojené s chemickým drážděním světločivných buněk se energie světleného záření mění v energii nervových impulsů. Tato přeměna může probíhat s různou intenzitou a tím je i zajištěna adaptace ve velmi širokém rozsahu osvětlenosti. Vlivem světla se sítnicové pigmenty rozkládají a ve tmě probíhá jejich syntéza. Obě tyto fotochemické reakce neprobíhají tak rychle, jako zornicový reflex, ale vyžadují určitý čas. Při adaptaci zraku z nižšího jasu na vyšší se v důsledku rozkladu sítnicových pigmentů zmenšuje citlivost světločivných buněk. Adaptace trvá asi jednu minutu a pak doznívá asi deset minut. Adaptace na nižší jas je podmíněna syntézou a vytvořením zásoby sítnicových pigmentů, což trvá poněkud delší dobu. Adaptace probíhá ve dvou etapách, kdy během cca 20 ti minut se zvyšuje citlivost čípků a tyčinek a pak asi dalších 40 minut se zvyšuje citlivost tyčinek.

#### **4.5. Fototropický reflex**

S rozložením jasů v prostoru a speciálně v zorném poli souvisí další vlastnost lidského zraku – fototropický reflex. Při něm se oči automaticky obracejí k tomu místu v orném poli, kde je nejvyšší jas nebo nejvyšší kontrast jasů. Této vlastnosti zraku je možno využít k podpoře soustředění na zrakovou práci. Nutnost při práci fototropický reflex vědomě překonávat může být rovněž příčinou zrakové únavy.

#### **4.6. Zorné pole**

Část prostoru, kterou může pozorovatel postřehnout pohledem bez pohybu oka a hlavy se nazývá zorné pole. Přesně člověk vidí v úhlovém rozsahu asi 8° ve vodorovné a asi 6° ve svislé rovině. Největší ostrost vidění je asi v rozsahu 1,5°. Pro přesné vidění je třeba, aby obraz předmětu, který chceme ostře vidět, padl na žlutou skvrnu sítnice, což vyžaduje velmi přesnou souhru očních svalů, která zajišťuje nastavení optických os obou očí do jednoho bodu. Při disfunkci této vlastnosti zraku nastává zhoršení vidění, nevolnost, bolení hlavy a závrať. Velikost monokulárního zorného pole levého a pravého oka a jejich společné části tzv. binokulárního zorného pole závisí na jasu a barvě. Se zmenšujícím se jasem se zorné pole zmenšuje.



Pro posouzení zrakové náročnosti prováděné práce je důležitý tzv. kritický detail, který si oko reflexním pohybem umísťuje do centra zorného pole. Kritický detail se pak na sítnici zobrazuje do středu žluté skvrny. Kritický detail lze definovat jako nejmenší podrobnost, kterou musí zrak při dané práci rozlišit. Například při čtení může být kritickým detailem tloušťka kresby písma.

Část prostoru, kterou můžeme postřehnout jen při pohybu očí, aniž bychom pohybovali hlavou nebo tělem se nazývá pohledové pole. Připojíme-li navíc možnost pohybu hlavou, získáme obhledové pole.

#### **4.7. Oslnění**

Důležitou podmínkou zrakové pohody je vyloučení oslnění zraku uživatelů vnitřního prostoru. Oslnění je nepříznivý stav zraku, který zhoršuje, či znemožňuje vidění. Podle stupně působení rozeznáváme oslnění rušivé, kdy si postižená osoba neuvědomuje příčinu svého diskomfortu, omezující, kdy vidění se stává namáhavé a oslepující, které znemožňuje vidění někdy i jistou dobu po tom, kdy již příčina oslnění zanikla. I rušivé oslnění, působí-li delší dobu, má nepříznivý vliv na zrakovou činnost a je příčinou zbytečné únavy.

Absolutní oslnění vzniká, je-li v zorném poli tak veliký jas, že zrak není schopen přizpůsobit se mu adaptací. Při denním osvětlení se jedná o jas asi  $2 \cdot 10^5 \text{ cd m}^{-2}$ . Zraková pohoda se narušuje již při poměru jasů 1:10 a k oslnění dochází již při poměru 1:100. Nejčastější chybou při navrhování denního osvětlení je oslnění kontrastem. Vzniká, jestliže jsou v zorném poli plochy o velmi rozdílném jasu. Toto oslnění velmi ztěžuje zrakovou práci zejména, je-li pozorovaný předmět tmavý, přičemž velké světlé okolní plochy určují vysokou úroveň adaptačního jasu – jedná se například o pozorování tmavého obrazu na meziokenním pilíři, četba na lůžku nevhodně obráceném proti oknu.

Při bočním osvětlení interiéru je vždy jisté riziko oslnění jasným osvětlovacím otvorem. Je-li osvětlovací otvor zasklen materiálem, který mění směr procházejících světelných paprsků směrem vzhůru (matné sklo, skleněné tvarovky), pak je při mírném slunečním světle nebezpečí oslnění značné. Pracoviště by proto měla být



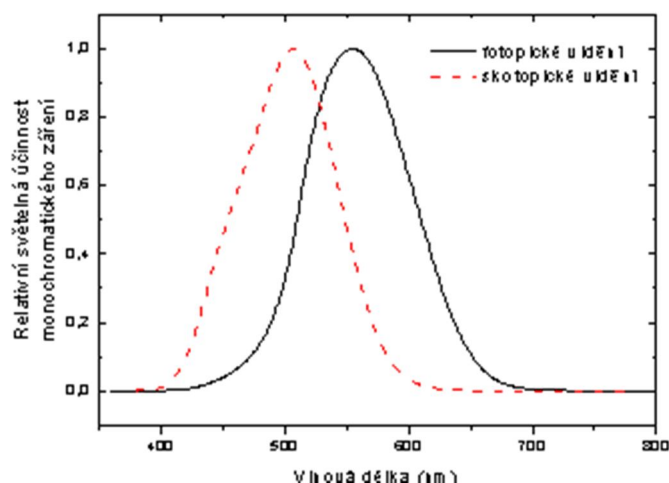
v interiéru orientována takovým způsobem, aby pracovník neměl v zorném poli okno, ale aby si současně vlastním tělem nestínil.

#### 4.8. Spektrální citlivost zraku

Lidský zrak není stejně citlivý na všechny barvy. Největší citlivost vykazuje na světlo žluté, přičemž citlivost na barvu světla je poněkud jiná při fotopickém a jiná při skotopickém vidění – viz obr. 11. Odlišná křivka spektrální citlivosti čípků a tyčinek způsobuje při přechodu od fotopického ke skotopickému vidění zmenšování jasu červeného světla v porovnání se světlem modrým. Tento úkaz se nazývá Purkyňův jev podle významného českého fyziologa 19. století.

Spektrální citlivost zraku je u různých osob odlišná. Aby se zajistila jednotnost světelně technických výpočtů, přijala Mezinárodní komise pro osvětlování CIE dohodu o spektrální citlivosti tzv. normálního fotometrického pozorovatele.

Normální fotometrický pozorovatel je myšlená osoba, která má v populaci průměrnou spektrální citlivost zraku. Při fotopickém vidění je citlivost normálního fotometrického pozorovatele největší pro světlo vlnové délky rovno 555 nm. Od této vlnové délky, která se nazývá základní, na obě strany spektra citlivost klesá, až při vlnových délkách kratších než asi 380 nm a delších než asi 770 nm je prakticky nulová. (WEIGLOVÁ, a další, 2006)



Obrázek 11: Poměrná světelná účinnost monochromatického záření (NAVRÁTIL, 2006)



## 5. ZÁKLADNÍ SVĚTELNĚ TECHNICKÉ VELIČINY

Zrak člověka není uzpůsobený k tomu, aby v mozkových centrech vidění vznikaly počítky reagující na souhrnné působení záření za určitou dobu. Pro proces vidění není proto důležitá energie vyjádřena zdroji za určitý čas, ale rozhodující je výkon, tedy zářivý tok zdrojů a zejména jeho prostorové rozdělení. Při hodnocení kvality osvětlení se posuzuje, do jaké míry osvětlení napomáhá postupu přijetí a zpracování informace přinášené světlem a usnadňuje proces vidění a vznik zrakového vjemu. (HABEL, a další, 2013)

Pro popis světelného záření a jeho parametrů je důležité používat fyzikální veličiny a jednotky, které jsou sjednocené tak, že platí všude na světě. U světla jsou tyto veličiny sjednoceny pod záštitou Mezinárodní komise pro osvětlování CIE. Všechny veličiny a jednotky zavedené komisí CIE se vztahují na tzv. normálního fotometrického pozorovatele. Tohoto pozorovatele reprezentují standartní vlastnosti lidského oka, protože každý člověk může mít odlišnou citlivost k různým vlnovým délkám světla. (SOKANSKÝ, a další, 2011)

### 5.1. Světlený tok

Světlený tok je veličina, která odpovídá zářivému toku a vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový počinek, resp. vjem se nazývá světlený tok. Jednotkou světleného toku je lumen [lm]. Světlený tok  $\Phi$  monochromatického záření vlnové délky  $\lambda$ , se určí ze vztahu:

$$\Phi = K_m \int_0^{+\infty} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

[3]

kde je:  $V(\lambda)$  poměrná světelná účinnost monochromatického pro normálního fotometrického pozorovatele při fotometrickém vidění [-]

$P(\lambda)$  spektrální koncentrace zářivého výkonu [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

$K_m$  světelná účinnost monochromatického světla základní vlnové délky [ $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ ]





Mezinárodní orgány CIE a ISO v souladu s definicí kandely schválily, že světelná účinnost monochromatického světla  $K_m$  odpovídající monofrekvenčnímu záření základní vlnové délky  $\lambda_m = 555\text{nm}$  dosahuje hodnoty  $K_m = 683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ .

### 5.2. Prostorový úhel

Důležitou geometrickou veličinou používanou ve světelné technice je prostorový úhel. Jeho velikost je určena velikostí plochy vyřaté obecnou kuželovou plochu jednotkové koule, jejíž střed je totožný s vrcholem uvažované kuželové plochy.

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} \quad [4]$$

kde je:  $d\Omega$  elementární prostorový úhel [srad]

$dS$  elementární plocha vymezená prostorovým úhlem [ $\text{m}^2$ ]

$r$  vzdálenost plochy od vrcholu úhlu [m]

Největší hodnoty  $\Omega_{max} = 4\pi$  nabývá prostorový úhel pro plochu  $S$  rovnou povrchu celé koule tj.  $S = 4 \pi r^2$ .

### 5.3. Svítivost

Svítivost je světelně technická veličina, která popisuje distribuci světelného toku do prostoru. Udává, kolik světelného toku vyzaří zdroj v prostorovém úhlu do určitého směru. Jednotkou svítivosti je kandela [cd]. Kandelu můžeme najít mezi základními fyzikálními jednotkami soustavy SI. Střední hodnota svítivosti se pak určí ze světelného toku  $\Phi$  vyzařující v jednotkovém prostorovém úhlu  $\Omega$ .

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad [5]$$

Kde je:  $I$  svítivost [cd]

$d\Phi$  světelný tok [lm]

$d\Omega$  prostorový úhel, do kterého je světelný tok vyzařován [srad]

Svítivost se určuje pro bodový zdroj, to znamená, že zdroj má zanedbatelné rozměry a vzhledem ke vzdálenosti bodu  $r$ , ke kterému se provádí kontrolní měření.



Změřením svítivosti ve všech bodech prostoru kolem zdroje a vynesení hodnot vektorů dostaneme prostorové rozložení svítivosti zdroje. V praxi se však s prostorovým rozložením svítivosti dále nepracuje a používají se pouze různé typy řezu touto plochou. V těchto řezech dostaneme křivky svítivosti, které charakterizují distribuci světelného toku.

#### 5.4. Osvětlenost

Osvětlenost, která je někdy uváděna jako intenzita osvětlení, patří mezi další odvozené fotometrické veličiny. Osvětlenost udává hodnotu světelného toku dopadajícího na jednotkovou plochu – kterou je  $1\text{m}^2$ . Jednotkou osvětlenosti je lux [lx] a je dána vztahem:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad [6]$$

kde je:  $E$  osvětlenost [lx]

$d\Phi$  velikost světelného toku dopadajícího na plochu [lm]

$dS$  elementární plocha na kterou dopadá záření [ $\text{m}^2$ ]

Osvětlenost bodového zdroje lze také vyjádřit pomocí svítivosti a to na základě tzv. čtvercového a kosinového zákona.

#### 5.5. Jas

Jas je fotometrická veličina, která je definována jako měrná svítivost. Označuje se písmenem  $L$  a udává se v jednotkách - kandela na metr čtvereční [ $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ]. Jedná se o veličinu, na kterou oko přímo reaguje – neboli oko reaguje na kontrast jasu.

Jas je určen plošnou a prostorovou hustotou světelného toku. Proto vždy záleží na poloze pozorovatele a směru jeho pohledu. Nezáleží přitom, zda vychází jas svazku paprsků přímo ze zdroje záření, nebo zda je odražen od libovolné plochy.

Obloha s rozptýleným slunečním světlem v atmosféře se považuje za plošný zdroj světla a je dána vztahem.

$$L = \frac{dI}{dS'} = \frac{dI}{dS \cdot \cos \theta} \quad [7]$$



kde je:  $L$  jas [ $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $dI$  svítivost elementární plošky zdroje ve zvoleném směru [ $\text{cd}$ ]  
 $dS$  elementární plocha zdroje ve zvoleném směru [ $\text{m}^2$ ]  
 $\theta$  úhel, kterým je určen směr svítivosti zdroje [ $\text{rad}$ ]



## 6. DENNÍ OSVĚTLENÍ

### 6.1. Obecně

Slunce je primárním zdrojem denního záření, které je jednou z přirozených forem energie, kterou můžeme bezprostředně využívat. Hlavní složkou denního světla na zemském povrchu je tedy přímé sluneční světlo a oblohové světlo. Denní světlo je nejen vhodným energetickým zdrojem pro osvětlování prostorů, ale také nutným předpokladem pro vytvoření zdravého prostředí pro život živých organismů v interiérech. Světlo vzniká jako viditelná část spektra denního záření.

Viditelné světlo má charakter elektromagnetického záření v rozsahu vlnových délek 380 a až 780 nm. Meze spektrálního rozsahu viditelného záření ale obecně nelze přesně definovat, protože se mohou měnit v závislosti na pozorovateli.

Proto byla stanovena solární neboli sluneční solární konstanta  $E_{e,o}$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ], což je ozářenost extraterestriální slunečním zářením na povrchu kolmém na sluneční paprsky pro střední vzdálenosti Země od Slunce a je rovna hodnotě  $E_{e,o} = 1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \pm 0,5\%$ .

Kromě zářivé sluneční konstanty se v případě světelně technických hodnocení zavádí světelná solární konstanta  $E_{v,o} = 133\,800 \text{ lx}$ , která představuje osvětlenost na ploše  $1\text{m}^2$  při kolmém dopadu slunečních paprsků na hranici zemské atmosféry. Při průchodu atmosférou dochází k zeslabení světlené intenzity.

Exteriérová osvětlenost představuje intenzitu denního osvětlení na horizontálním povrchu země. Někdy je také nazývána globální osvětleností, neboť zahrnuje světelné záření od přímého i oblohového světla. Oblohové světlo má difúzní charakter a jeho zdrojem je každý bod oblohové hemisféry.

Exteriérovou osvětlenost ovlivňuje jas oblohy, který závisí na poloze Slunce, oblačnosti a zákalu atmosféry (vlivem molekul vzduchu, ozonem, vodními parami, aerosoly).

Do světelně technických hodnocení vstupují hodnoty exteriérové osvětlenosti a jasu oblohy, pro které byly stanoveny normové podmínky. Jas



v daném místě oblohy  $L$  je ve většině případů udáván poměrnou veličinou ve vztahu k zenitnímu jasů  $L_z$  ( $L : L_z$ ).

Standardizované typy oblohy (dle CIE) jsou následující:

- Rovnoměrně zatažená obloha při tmavém terénu: (činitel odrazu tmavého terénu  $\rho = 0,05 - 0,2$ ) s gradací jasu  $L : L_z = 1 : 3$ . Tento typ oblohy se většinou volí jako výchozí model pro světelně technická měření a posuzování.
- Rovnoměrně zatažená obloha při zasněženém terénu (činitel odrazu zasněženého terénu  $\rho = 0,5 - 0,85$ ) s gradací jasu  $1 : 2$ . Používá se pouze pro doplňkové posouzení osvětlenosti v místech s dlouhodobou sněhovou pokrývkou.
- Jasná obloha – jas oblohy je závislý na poloze Slunce nad horizontem a není po celé hemisféře rovnoměrně rozložen.

Denní osvětlenost ve venkovním prostoru se skládá z přímého světla a světla oblohového, které se označují jako globální neboli celková osvětlenost  $E_g$ . Tato celková osvětlenost je pak dána vztahem:

$$E_g = E_s + E_{ob} \quad [8]$$

kde je:  $E_g$  denní neboli celková osvětlenost [lx]

$E_s$  osvětlenost přímým slunečním světlem [lx]

$E_{ob}$  osvětlenost difúzním oblohovým světlem [lx]

Světelně technické měření je doporučeno provádět při exteriérové osvětlenosti do 5000lx a pro výpočty a hodnocení denního osvětlení v budovách lze použít  $E_h = 20\,000$ lx, která je stanovena jako průměrná hodnota denní osvětlenosti pro Českou republiku.

Denní osvětlení podléhá dynamickým změnám a jen těžko lze najít dny, kdy jsou splněny podmínky rovnoměrně zatažené oblohy. Z tohoto důvodu bývají mnohdy světelně technická měření zatížena značnými chybami.

Ke zvýšení přesnosti vyhodnocení denního osvětlení přispěly výsledky standardizace stavů oblohy a matematický popis vlastností vyhovující staticky významným stavům reálné oblohy, které byly provedeny v rámci dlouhodobého



výzkumného programu. Modely patnácti typů oblohy od zatažené, oblačné až po jasnou s různým stupněm zákalu popisují rozložení poměrných jasů na obloze a umožňují stanovit absolutní hodnoty jasů a osvětleností oblohy oblohovým světlem na horizontální exteriérové rovině. Kromě výpočtu přímé sluneční osvětlenosti existuje též postup pro předurčení globální osvětlenosti. Tyto modely rozšiřují možnosti navrhování a hodnocení denního osvětlení v budovách. Jejich použití umožňuje zpřesnění počítačových modelů, světelně technického i energetického hodnocení budov s korektními klimatickými údaji, optimalizaci sdruženého osvětlení i posouzení možných rizik oslnění. (PLCH, a další, 2004)

Pro hodnocení denního osvětlení se používá činitel denního osvětlení  $D$  [%]. Činitel denní osvětlenosti vnitřního prostoru je podíl osvětlenosti daní roviny přímým i odraženým oblohovým světlem v dané době a současné srovnávací osvětlenosti venkovní nezastíněné vodorovné roviny za předpokládaného nebo známého rozložení jasu oblohy. Přímé slunečné světlo je vyloučeno z obou osvětleností, jelikož se počítá s rovnoměrně zataženou oblohou, tudíž pouze s difúzním světlem. V hodnotě činitele denní osvětlenosti bodu dané roviny jsou zahrnuty vlivy zasklení, nečistoty atd. Činitel denní osvětlenosti  $D$  se poté stanoví dle vztahu:

$$D = \frac{E}{E_{eh}} \cdot 100 \quad [9]$$

kde je:  $D$  činitel denního osvětlení [%]

$E$  osvětlenost v bodě dané roviny [lx]

$E_{eh}$  srovnávací osvětlenost v bodě venkovní nezastíněné roviny [lx]

Při stanovení činitele denního osvětlení výpočtem, použijeme vztah:

$$D = D_s + D_e + D_i \quad [10]$$

kde je:  $D$  činitel denního osvětlení [%]

$D_s$  oblohová složka činitele denního osvětlení [%]

$D_e$  vnější odražená složka činitele denního osvětlení [%]

$D_i$  vnitřní odražená složka činitele denního osvětlení [%]



Oblohová složka činitele denního osvětlení  $D_s$  je podíl osvětlenosti dané roviny v daném bodě vyvolané přímo oblohou s předpokládaným nebo známým rozložením jasů a osvětlenosti horizontální roviny poloprostorem oblohy bez překážek. Přímé sluneční světlo je vyloučeno z obou osvětleností, jelikož je uvažováno s rovnoměrně zataženou oblohou. Oblohou složku pak stanoví vztah:

$$D_s = \frac{E_s}{E_{eh}} \cdot 100 \quad [11]$$

kde je:  $D_s$  oblohová složka činitele denního osvětlení [%]

$E_s$  osvětlenost bodu dané roviny oblohovým světlem [lx]

$E_{eh}$  srovnávací osvětlenost v bodě venkovní nezastíněné roviny [lx]

Vnitřní odražená složka činitele denního osvětlení  $D_i$  je podíl složky osvětlenosti dané roviny v daném bodě vnitřního prostoru vyvolané vnitřními odraznými povrchy přímo nebo nepřímo osvětlenými oblohou s předpokládaným nebo známým rozložením jasů a osvětleností horizontální roviny vyvolané poloprostorem oblohy bez překážek. Přímé sluneční světlo je opět vyloučeno z obou osvětleností. Vnitřní odražená složka se udává dle vztahu:

$$D_i = \frac{E_i}{E_{eh}} \cdot 100 \quad [12]$$

kde je:  $D_i$  vnitřní odražená složka činitele denního osvětlení [%]

$E_i$  osvětlenost bodu dané roviny vnitřním odraženým světlem [lx]

$E_{eh}$  srovnávací osvětlenost v bodě venkovní nezastíněné roviny [lx]

Vnější odražená složka  $D_e$  je podíl složky osvětlenosti dané roviny v daném bodě vyvolané přímo vnějšími odraznými povrchy přímo nebo nepřímo osvětlenými oblohou s předpokládaným nebo známým rozložením jasů a osvětlenosti poloprostorem téže oblohy bez překážek. Přímé sluneční světlo je vyloučeno. Vnější odražená složka činitele denní osvětlenosti se stanoví ze vztahu:

$$D_e = \frac{E_e}{E_{eh}} \cdot 100 \quad [13]$$

kde je:  $D_e$  vnější odražená složka činitele denního osvětlení [%]

$E_e$  osvětlenost bodu dané roviny vnějším odraženým světlem [lx]

$E_{eh}$  srovnávací osvětlenost v bodě venkovní nezastíněné roviny [lx]



## 6.2. Požadavky na denní osvětlení v zahraničí

V rámci výzkumného záměru byla provedena rešerše zahraničních norem a to převážně sousedících zemí – Německo, Rakousko, Polsko a Slovensko. Dále také Velké Británie, USA a Maďarska. Po kontrole těchto norem bylo zjištěno, že ostatní státy mají udány požadavky na celkové osvětlení jako takové a to dle konkrétního zrakového úkolu, kde nerozlišujeme, zda se jedná o umělé či přirozené osvětlení.

Pouze na Slovensku jsou uvedeny konkrétní požadavky na denní osvětlení srovnatelné s Českou republikou. Dle zápisu českých a slovenských norem, je vidět že vycházejí ze stejných podkladů a proto jsou požadavky na denní osvětlení v obou zemích téměř totožné.

Ve většině evropských států platí především norma EN 12464-1. Tato norma stanovuje požadavky na osvětlení pro vnitřní pracovní prostory z hlediska zrakové pohody a zrakového výkonu. Uvedeny jsou všechny běžné zrakové úkoly, včetně stínítek zobrazovacích jednotek. (EN12464-1:, 2012)

Pro představu jsou v tabulce 1 uvedeny požadavky na osvětlení administrativních prostor pro dané místnosti a činnosti.

Prostor, úkol, činnost	Udržovaná osvětlenost $\bar{E}_m$ [lx]	Index oslnění $UGR_L$ [-]	Index podání barev $R_a$ [-]
psaní, čtení, práce na PC	300	19	80
tabule ve školách	500	19	80
demonstrační stůl v přednáškových sálech	750	19	80
archivy	200	25	80
prodejní prostory	300	22	80
prostor u pokladny	500	19	80
kuchyně	500	22	80
herny v mateřských školách	300	19	80
krytá nástupiště a chodby pro cestující	50	28	40
expedice a balírny	300	25	60

Tabulka 1: Požadavky na osvětlení pro administrativní prostory a činnosti (EN12464-1:, 2012)





### **6.3. Požadavky na denní osvětlení v České Republice**

Požadavky pro denní osvětlení v České republice udávají normy, které jsou sice jen doporučené, ale níže uvedené vyhlášky a nařízení vlády tyto normy činí závaznými.

#### **6.3.1 Požadavky ČSN 73 0580-1, (Z1-2011) – základní požadavky:**

Při hodnocení stínění stávajících vnitřních prostorů novými stavbami nebo jejich částmi v případech, že tyto prostory po zastínění nevyhoví požadavkům ČSN 73 0580-2 až 4, se požaduje splnění požadavku hodnoty činitele denní osvětlenosti roviny zasklení okna z vnější strany  $D_w$  [%].

Splnění požadavku hodnoty činitele denní osvětlenosti roviny zasklení okna z vnější strany pro běžné prostory s trvalým pobytem lidí – kategorie 2 –  $D_w = 32$  % a pro prostory s trvalým pobytem lidí v souvislé řadové zástavbě v centrech měst – kategorie 3 –  $D_w = 29$  %.

Se zařazením dané lokality do kategorie 3 musí udělit souhlas oprávněná instituce příslušné obce. (ČSN730580-1, Z1-2011)

Technické požadavky z hlediska denního osvětlení pracovišť stanoví nařízení vlády č. 361/2007 Sb. formou normových hodnot vlastností, kde "normová hodnota je konkrétní technický požadavek obsažený v příslušné české technické normě ČSN, jehož dodržení považuje konkrétní ustanovení za splnění jím stanovených požadavků".

#### **6.3.2 Požadavky ČSN 73 0580-2, (Z1 - 2014) – Denní osvětlení obytných budov:**

Splnění požadavku minimální hodnoty činitele denní osvětlenosti  $D_{min} = 0,7$  % (Č.D.O. –  $D_{min,pož}$ ) ve dvou kontrolních bodech, umístěných v polovině hloubky obytné místnosti, ale nejdále 3 m od okna, vzdálených 1 m od vnitřních povrchů bočních stěn.

Splnění požadavku průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti z obou těchto bodů  $D_{m1/2} = 0,9$  % (Č.D.O. –  $D_{m1/2,pož}$ )



Jsou-li okna ve dvou stýkajících se stěnách, postačí, je-li tento požadavek splněn u jedné z obou dvojic kontrolních bodů. (ČSN730580-2, Z1-2014)

### 6.3.3 Požadavky ČSN 73 0580-3 (Z2-1999)- denní osvětlení škol

Splnění požadavku minimální hodnoty činitele denní osvětlenosti v posuzovaných bodech funkčně vymezené části dlouhodobém pobytů žáků učeben mateřských škol  $D_{min} = 2,0 \%$  (Č.D.O. –  $D_{min,pož}$ ) a zároveň splnění požadavku průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti v posuzovaných bodech funkčně vymezené části při horním osvětlení a trvalém pobytu lidí  $D_m = 6,0 \%$  (Č.D.O. –  $D_{m,pož}$ ) pro III. třídu zrakové činnosti (např. pracovní výtvarné výchovy, rýsovný, laboratoře a dílny pro jemné práce)

Splnění požadavku minimální hodnoty činitele denní osvětlenosti v posuzovaných bodech funkčně vymezené části dlouhodobém pobytů žáků učeben mateřských škol  $D_{min} = 1,5 \%$  (Č.D.O. –  $D_{min,pož}$ ) a zároveň splnění požadavku průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti v posuzovaných bodech funkčně vymezené části při horním osvětlení a trvalém pobytu lidí  $D_m = 5,0 \%$  (Č.D.O. –  $D_{m,pož}$ ) pro IV. třídu zrakové činnosti (např. studovny, čítárny, kmenové učebny, laboratoře a dílny pro běžnou práci, kabinety pracovní a sborovny)

Doplňující umělé osvětlení během dne (celkové sdružené osvětlení) lze ve vnitřních prostorech s trvalým pobytém lidí použít krátkodobě v odůvodněných případech. Denní osvětlení je zvláště významné pro děti předškolních zařízení, jejichž zrakový orgán se rychle vyvíjí a ovlivňuje rozvoj pohybových a mentálních schopností a může při jeho nedostatku docházet k manifestaci nebo vzniku zrakových vad. Doplnující umělé osvětlení během dne (celkové sdružené osvětlení) bude proto navrženo pouze v zadních částech místností učeben, kde se nacházejí komunikace a nábytek pro uskladnění pomůcek. Tato část místnosti nebude využívána k dlouhodobému pobytu žáků. (ČSN730580-3, Z2-1999)



#### **6.3.4 Požadavky ČSN 73 0580-4 (Z2-1999) – pro administrativní a ostatní prostory:**

Splnění požadavku minimální hodnoty činitele denní osvětlenosti v posuzovaných bodech funkčně vymezené části při trvalém pobytu lidí  $D_{min} = 1,5 \%$  (Č.D.O. minimální) a zároveň splnění požadavku průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti v posuzovaných bodech funkčně vymezené části při horním osvětlení a trvalém pobytu lidí  $D_m = 5,0 \%$  (Č.D.O. průměrný) pro IV. třídu zrakové činnosti (kancelářské a prodejní činnosti, pronajímatelné plochy, velín) (ČSN730580-4, Z2-1999)

#### **6.3.5 Požadavky ČSN 73 0580-4 (Z2-1999) – pro oddechové místnosti:**

Splnění požadavku minimální hodnoty činitele denní osvětlenosti v posuzovaných bodech funkčně vymezené části při trvalém pobytu lidí  $D_{min} = 1,0 \%$  (Č.D.O. minimální) a zároveň splnění požadavku průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti v posuzovaných bodech funkčně vymezené části při horním osvětlení a trvalém pobytu lidí  $D_m = 3,0 \%$  (Č.D.O. průměrný) pro V. třídu zrakové činnosti (místnosti pro odpočinek zaměstnanců v pracovních pauzách) (ČSN730580-4, Z2-1999)

#### **6.3.6 Požadavky ČSN 73 0580-4 (Z2-1999) - pro průmyslové budovy**

Splnění požadavku minimální hodnoty činitele denní osvětlenosti v posuzovaných bodech funkčně vymezené části při trvalém pobytu lidí  $D_{min} = 1,5 \%$  (Č.D.O. minimální) a zároveň splnění požadavku průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti v posuzovaných bodech funkčně vymezené části při horním osvětlení a trvalém pobytu lidí  $D_m = 5,0 \%$  (Č.D.O. průměrný) pro IV. třídu zrakové činnosti (kancelářské a prodejní činnosti, pronajímatelné plochy, velín)

Průměrné hodnoty činitele denní osvětlenosti  $D_m$  musí být splněny pouze u vnitřních prostorů s horním osvětlením nebo u prostorů s kombinovaným denním osvětlením, u kterého je podíl horního osvětlení na průměrné hodnotě činitele denní osvětlenosti  $D_m$  roven nejméně jedné polovině. (ČSN730580-4, Z2-1999)



### 6.3.7 Požadavky ČSN 36 0020-1 – Sdružené osvětlení

Ve funkčních zónách nevyhovující části učeben pro denní osvětlení může být užito osvětlení sdružené (kombinace denního a umělého osvětlení) navržené podle ČSN 36 0020-1 Sdružené osvětlení.

Při trvalém pobytu lidí (podle ČSN 73 0580-1) ve vnitřním prostoru se sdruženým osvětlením nebo v jeho funkčně vymezené části musí být zachován dostatečný podíl denní složky v závislosti na obtížnosti zrakových činností. Minimální podíl denní složky musí mít hodnotu  $D_{min} = 0,5 \%$  (Č.D.O. minimální) pro IV. třídu zrakové činnosti. Při horním nebo kombinovaném osvětlení rovněž  $D_m = 1,5 \%$  (Č.D.O. průměrný) pro IV. třídu zrakové činnosti.

### 6.3.8 Vyhláška č. 268/2009 Sb. O technických požadavcích na stavbu, § 12 odst. 1,2,4 a 5

U nově navrhovaných budov musí návrh osvětlení v souladu s normovými hodnotami řešit denní, umělé i případné sdružené osvětlení, a posuzovat je společně s vytápěním, chlazením, větráním, ochranou proti hluku, prosluněním, včetně vlivu okolních budov a naopak vlivu navrhované stavby na stávající zástavbu.

Obytné místnosti musí mít zajištěno denní osvětlení v souladu s normovými hodnotami.

Zastínění stávajících pobytových místností novými stavbami nebo jejich novými částmi se posuzuje podle činitele denní osvětlenosti roviny zasklení oken.

V pobytových místnostech musí být navrženo denní, umělé a případně sdružené osvětlení v závislosti na jejich funkčním využití a na délce pobytu osob v souladu s normovými hodnotami. Pobytové místnosti musí mít zajištěno dostatečné přirozené nebo nucené větrání a musí být dostatečně vytápěny s možností regulace tepla.

Zastínění stávajících vnitřních prostorů se považuje za vyhovující, jsou-li dodrženy normové hodnoty. Zastínění nově navrhovaných pobytových místností se posuzuje podle činitele denní osvětlenosti na srovnávací rovině uvnitř těchto místností v souladu s normovými hodnotami. Zastínění stávajících i nových bytů se kromě výše uvedeného posuzuje podle oslunění v souladu s normovými hodnotami.



Při doplňování stávající souvislé zástavby výstavbou v prolukách, popřípadě formou nástaveb a přístaveb, se posuzuje vliv na stínění okolních budov porovnáním se stavem při úplné souvislé zástavbě, zejména s výškovou úrovní zástavby a půdorysným rozsahem. (Vyhláška 268/2009Sb., 2009)

Technické požadavky z hlediska denního osvětlení místností jsou uvedeny v souboru norem ČSN 73 0580-1 až 4 Denní osvětlení budov.

### **6.3.9 Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, § 45 odst. 1, 3, 4, 8**

K osvětlení pracoviště včetně spojovacích cest se užívá denní, umělé nebo sdružené osvětlení. Osvětlení pracoviště a spojovacích cest mezi jednotlivými pracovišti denním, umělým nebo sdruženým osvětlením musí odpovídat náročnosti vykonané práce na zrakovou činnost a ochranu zdraví v souladu s normovými hodnotami a požadavky! Normovou hodnotou se rozumí konkrétní hodnota denního, umělého nebo sdruženého osvětlení obsažená v příslušné české technické normě upravující hodnoty denního, sdruženého a umělého osvětlení. Normovým požadavkem se rozumí technický požadavek obsažený v příslušné české technické normě. Osvětlení nesmí být příčinou oslňování.

Na pracovišti, na němž je vykonávána trvalá práce, osvětleném denním osvětlením musí být dodrženy tyto hodnoty:

a) denní osvětlení vyjádřené činitelem denní osvětlenosti  $D$ , minimální  $D_{min} = 1,5 \%$ , při horním nebo kombinovaném denním osvětlení i průměrný  $D_m = 3,0 \%$

b) celkové umělé osvětlení vyjádřené udržovanou osvětleností  $E_m = 200 \text{ lx}$

Na pracovišti, na němž je vykonávána trvalá práce, osvětleném sdruženým osvětlením, musí být dodrženy tyto hodnoty:

a) denní složka sdruženého osvětlení vyjádřená činitelem denní osvětlenosti  $D$ , minimální  $D_{min} = 0,5 \%$ , při horním nebo kombinovaném denním osvětlení i průměrný  $D_m = 1,0 \%$

b) celkové umělé osvětlení vyjádřené udržovanou osvětleností  $E_m = 200 \text{ lx}$



c) hodnoty celkového umělého osvětlení podle odstavců 3 a 4 (výše zmíněné body) se použijí za předpokladu, že příslušná česká technická norma nestanoví s ohledem na zrakovou náročnost jinou hodnotu.

V místnosti pro odpočinek podle § 55 odst. 3 denní osvětlení vyjádřené minimálním činitelem denní osvětlenosti musí být  $D_{min} = 1,0 \%$ .

Pozn.: Trvalá práce je ve smyslu nařízení vlády 361/2007 Sb. taková práce, která je vykonávána po dobu delší než 4 hodiny. (§ 6 odst. 2). (361/2007Sb., 2007)

Technické požadavky z hlediska denního osvětlení učeben škol jsou uvedeny v ČSN 73 0580-3/Z2:1999 Denní osvětlení budov: Část 3 Denní osvětlení škol – změna 2.

Technické požadavky z hlediska denního osvětlení obytných místností jsou uvedeny v ČSN 73 0580-3:1994, Z2: 1999Denní osvětlení budov: Část 3Denní osvětlení škol.

#### **6.3.10 Vyhláška č. 410/2005 Sb. O hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých, § 12 odst.1, 2, 3, 4, § 15 odst.1,2, 3, 4, 5, § 16 odst.1, 2, 3**

Ve vnitřních prostorech budov zařízení pro výchovu a vzdělávání a provozovnách pro výchovu a vzdělávání, určených k dlouhodobému pobytu žáků, musí být vyhovující denní osvětlení odpovídající normovým hodnotám. Místa žáků v lavicích musí být v učebnách orientována tak, aby žáci nebyli v zorném poli oslňování jasem osvětlovacích otvorů a ani si nestínili místo zrakového úkolu.

V prostorech určených pouze ke krátkodobému pobytu je možné použít celkového sdruženého osvětlení. Dále je možné, je použít v případech uvedených v normě (při skupinovém vyučování s různým uspořádáním pracovních míst v prostoru nebo v dílnách při potřebě osvětlit stíněné povrchy). Pro žáky se zrakovým postižením nebo zrakovými vadami je nutné zajistit denní i umělé osvětlení odpovídající specifickým potřebám podle stupně jejich postižení. V soustavě sdruženého osvětlení denní i doplňující umělé osvětlení musí vyhovovat příslušným normovým hodnotám a požadavkům.



Parametry umělého osvětlení ve vnitřních prostorech budov zařízení pro výchovu a vzdělávání a provozovnách pro výchovu a vzdělávání musí odpovídat normovým hodnotám.

Osvětlení tabule musí odpovídat normovým hodnotám. Tabule musí mít matný povrch, nevztahuje se na tabule, na které se nepíše křídou. Ve stěně za tabulí nesmí být osvětlovací otvor (okno nebo střešní okno), v opačném případě musí být zakryt neprůsvitným materiálem, jehož činitel odrazu světla se blíží hodnotě činitele odrazu této stěny.

Pro většinu zrakových činností v zařízeních i provozovnách pro výchovu a vzdělávání se vyžaduje směr osvětlení zleva a shora, umístění řad svítidel u umělých osvětlovacích soustav rovnoběžně s okenní stěnou nad levý okraj lavic.

Při zrakově obtížných a náročných činnostech je nejvhodnější orientace osvětlovacích otvorů na neslunečnou stranu.

Výška horizontálních srovnávacích rovin pro návrh a posouzení osvětlení místa zrakového úkolu

- a) u denního osvětlení v zařízeních pro děti předškolního věku je 0,45 m nad podlahou,
- b) u denního osvětlení ve školách a školských zařízeních je 0,85 m nad podlahou,
- c) u umělého osvětlení v zařízeních pro děti předškolního věku je 0,45 m nad podlahou,
- d) u umělého osvětlení ve školských zařízeních je stejná jako převládající výška lavic.

Za místo zrakového úkolu je považován prostor s lavicemi nebo stůl učitele a blízké okolí zrakového úkolu je považován prostor místnosti sloužící výuce.

Osvětlovací soustavy a části vnitřních prostorů odrážející světlo musí být čištěny a obnovovány ve lhůtách daných plánem údržby v souladu s projektem osvětlení a musí být udržovány v takovém stavu, aby požadované vlastnosti osvětlení byly splněny po celou dobu života osvětlovací soustavy. Není-li zpracován



v projektu osvětlení plán údržby, postupuje se v souladu s ustanovením § 22 písm. d) až f).

Regulace denního osvětlení, rozložení světla a zábrana oslnění musí být řešena v souladu s normovými požadavky.

Osvětlení prostor určených pro sport musí být řešeno v souladu s normovými požadavky.

Osvětlení pracovišť zaměstnanců škol a školských zařízení ve smyslu této vyhlášky musí odpovídat požadavkům zvláštního právního předpisu (nařízení vlády č. 361/2007. Sb.) (Vyhláška 410/2005Sb., 2005)





## 7. SVĚTLOVOD, JEHO ČÁSTI A MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO VÝROBU

### 7.1. Světlovod - obecně

Světlovod slouží pro osvětlení jinak neosvětlitelných míst přirozeným denním světlem. Využití má jak u rodinných domů, tak u kanceláří, komerčních prostorů nebo výrobních hal. Světlo se do místnosti dostává pomocí průhledné kopule, která je nejčastěji umístěna na střeše, dále je světlo transportováno světlovodným tubusem s vysoce odrazivou vrstvou a v místnosti je pak rozptýlováno pomocí stropního difuzoru. Jednotlivé části difuzoru jsou popsány a zobrazeny na obr. 12.



1. kopule

2. tubus

3. difuzér

Obrázek 12 - Schéma světlovodu (Solatube, 2015)

### 7.2. Kopule

Kopule světlovodu, která slouží k zachycování denního světla, musí být vyrobena z transparentního materiálu. Nejčastěji se proto používá sklo nebo plast – polykarbonát (PC) nebo polymethylmethakrylát (PMMA), který se svými vlastnostmi blíží sklu. Základem je, aby materiál měl dobrou propustnost světla po dlouhou dobu životnosti světlovodu. (LIGHTWAY, 2010)

#### 7.2.1. Plasty

Plastové kopule jsou většinou vyrobeny z kvalitního plastu, kterým může být polykarbonát nebo polymethylmethakrylát (PMMA). Výhodou je určitě nižší cena



v porovnání se skleněným materiálem. Nevýhodou bývá snadnější poškrábání či „žluknutí“ materiálu, které samozřejmě negativně ovlivňuje propustnost světla. Polymethylmethakrylát a polykarbonát jsou polymery kyseliny akrylové a methakrylové, jsou často označovány jako polyakryláty. Vyznačují se vynikající odolností vůči povětrnosti, stálostí na světle a transparentností, proto jsou vhodné pro kopule světlovodu. (MLEZIVA, 2000)

#### **7.2.1.1. Polymethylmethakrylát (PMMA)**

Každý druhý uhlík základního uhlíkového řetězce je kvartérní a jeho substituenty jsou jednak metyl a jednak esterifikovaná karboxylová skupina – COOCH<sub>3</sub>. Methylmethakrylát (MMA) je velmi reaktivní monomer schopný velmi rychlé polymerace i za nízkých teplot, kterou lze uskutečnit jako blokovou polymeraci mezi dvěma paralelně uloženými chlazenými deskami. S výhodou je možné provést opatrnou před-polymeraci MMA na relativně nízko-viskózní kapalinu. Podstatná část tepla, která se uvolňuje při úplné polymeraci methylmethakrylátu, se uvolní již při této před-polymeraci. Získá se tak produkt, jehož další vytvrzování se daleko snáze drží pod kontrolou. Výsledný polymethylmethakrylát má dobré optické vlastnosti, a proto se technologie blokové polymerace MMA využívá k výrobě průhledných desek běžně nazývaných organické sklo. Zatímco silikátové sklo je průhledné maximálně do tloušťky 120 mm, organické sklo umožňuje nezkreslený výhled i při tloušťce 800mm. (BAŽANTOVÁ, a další, 2005)

Polymethylmethakrylát má mez pevnosti v tlaku 63,3 MPa, 4% tažnost, teplotu skelného přechodu je 105°C a teplota křehnutí je 91°C. Teplota 190°C je teplota počínajícího rozkladu homopolymeru při dlouhodobém vystavení zvýšené teplotě.

Jeho nejtypičtější vlastností je čírost, naprostá bezbarevnost i v tlustých vrstvách a dokonalá průhlednost, což je pro světlovodnou kopuli velice žádané. Vzhledem k tomu, že je kopule umístěna na střeše objektů, je také nezbytné, aby byla odolná také proti povětrnostním vlivům, v tomto směru předčí PMMA všechny běžné termoplasty. Tento materiál byl dokonce ponechán mnohaletému působení



tropického podnebí a byla zjištěna jen velmi malá změna jeho čirosti a zbarvení. Dobře tvarovatelný je při 130-140°C. Propustnost světla je až 92% v celém rozsahu světla, má dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti, odolává vodě, zředěným alkáliím a kyselinám. Neodolává koncentrovanějším kyselinám a hydroxidům. Rozpouští se v aromatických a chlorovaných uhlovodících, esterech, ketonech a etherech. (MLEZIVA, 2000) Pružnost a houževnatost je srovnatelná se dřevem, ale hlavním nedostatkem je nízká povrchová tvrdost, která způsobuje snadné poškrábání. Na druhé straně se PMMA dobře mechanicky opracovává – je možné řezání, vrtání, soustružení, hoblování, pilování, broušení a leštění. K výhodným vlastnostem polymethylmethakrylátu patří mimořádně vysoká rázová houževnatost a skutečnost, že se třísťí jen na tupé úlomky.

Polymethylmethakrylát je typický termoplast, protože zahříváním poskytuje dobře tvarovatelnou hmotu. Po ochlazení však dochází ke 2 - 4% smrštění. Proto se doporučuje provést před tvarováním a řezáním rozměrové ustálení dostatečně dlouhým ohřevem na teplotu 130°C. (BAŽANTOVÁ, a další, 2005)

Patří mezi relativně drahé plasty, proto je jeho využití vhodné jen při potřebě jeho všech pozitivních vlastností. (MLEZIVA, 2000)

#### **7.2.1.2. Polykarbonát (PC)**

Polykarbonáty jsou při stejné délce řetězce alkoholové složky měkčí než polymethakryláty. (MLEZIVA, 2000)

Polykarbonáty představují relativně mladé termoplasty. S jejich výrobou se začalo až po roce 1953. Formálně je možné polykarbonáty popsat jako lineární polyestery odvozené od kyseliny uhličité a příslušné dihydroxysloučeniny (schematicky značené jako XO-X-OH).

Skutečná příprava polykarbonátů přímou esterifikací velmi slabé kyseliny uhličité není možná a základní surovinou pro jejich výrobu je proto fosgen (COCl<sub>2</sub>). Jako dihydroxysloučenina se prakticky výhradně používá bisfenol A, známý též jako dian.



Polykarbonáty nevykazují ostrý bod tání. Viskozita polykarbonátové taveniny je značně vysoká a leží mezi 10 až 100 Pa.s. Přesto se dají tavením velmi dobře zpracovávat díky enormní stálosti taveniny. Termoplastický stav nastává již při 220-240°C a ani po 2 hod. zahřívání za přístupu vzduchu se vlastnosti taveniny prakticky nemění. Ke slabému žloutnutí dochází teprve po 2 hod. zahřívání při 300°C. (BAŽANTOVÁ, a další, 2005)

Polykarbonáty jsou při stejné délce řetězce alkoholové složky měkčí než polymethakryláty. (MLEZIVA, 2000)

Molekula polykarbonátů je tuhá. Teprve při poměrně vysokých teplotách získávají segmenty vláknitých molekul pohyblivost. Molekula jako celek zůstává pevně fixována. Tím lze vysvětlit dobrou rozměrovou stabilitu výlisků.

Hustota polykarbonátů má hodnotu 1,17-1,22 g.cm<sup>-3</sup>. Pevnost polykarbonátů v tahu za ohybu dosahuje 110 – 120 MPa, tahová pevnost je zhruba poloviční (60MPa). Pevnost v tlaku je 80-90MPa a při stanovení rázové houževnatosti se zkušební tělíska bez vrubu nedají při běžném zkušebním uspořádání vůbec přerazit. Výlisky jsou průhledné a bezbarvé.

Dobré mechanické i vzhledové vlastnosti nejsou ovlivňovány povětrnostními vlivy ani vlhkostí vzduchu. Rovněž vliv světla se v širokém vlnovém obsahu prakticky neprojevuje.

Důležitou vlastností polykarbonátů je, že vykazují malé elastické protažení. Při zvyšujícím se tahovém napětí je až do 50 MPa elastické protažení nepatrné, což je důležitou konstrukční vlastností. Při dlouhodobých zkouškách se ukázalo, že polykarbonáty ve srovnání s ostatními termoplasty mají pouze malý studený tok.

Polykarbonátové fólie se nemění ani při 72 hod. ozařování ultrafialovým, světlem. Žádné změny nebyly pozorovány ani při umělém stárnutí 26 týdnů při 150°C.

Pro tyto mimořádně dobré vlastnosti se polykarbonáty výrazně prosadily při konstrukci různých prosvětlovacích prvků.

Monolitické polykarbonátové desky se používají především na průhledné bezpečnostní (nerozbitné) zasklení oken, světlíků, přístřešků a světlovodů.



Duté (komůrkové) desky z polykarbonátu mají i tepelněizolační účinky a dobře se uplatňují zejména při výrobě průsvitných světlíků, světlovodů a stěn. (BAŽANTOVÁ, a další, 2005)

### 7.2.2. Sklo

Sklo patří k významným silikátovým hmotám a ve stavebnictví se nejběžněji používá k zasklívání okenních a dveřních otvorů, světlíků, světlovodů a ostatních průhledných konstrukcí. Významně se také uplatňuje jako architektonický prvek při vytváření interiérů a exteriérů.

Sklo je organický amorfní materiál vyrobený tavením vhodných surovin a jejich následným řízeným ochlazením. Ztuhnutí není způsobeno krystalizací, která nastává při ochlazování tavenin většiny materiálů, ale plynulým vzrůstem viskozity na tak vysokou hodnotu, že se materiál jeví pevným.

Charakteristickou vlastností skla je relativně vysoká propustnost světla v části viditelného spektra, tuhost a tvrdost při běžných teplotách, křehkost, homogenita, odolnost proti povětrnostním a chemickým vlivům, relativně nízká měrná tepelná vodivost a elektrická vodivost, plynotěsnost a relativně vysoká odolnost proti vzduchu a vodě.

Při výrobě skla se nejprve společně taví sklářský kmen, čeřiva a skleněné střepy. Získaná tavenina se pak v ještě tekutém nebo polotekutém stavu tvaruje do požadované podoby.

Složení sklářského kmene se vyjadřuje pomocí obsahu oxidů. Základem sklářského kmene je sklotvorný  $\text{SiO}_2$  (u běžného tabulkového skla tvoří zhruba 72% kmene) doplněný nejčastěji  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  a  $\text{K}_2\text{O}$ .

Základní surovinou pro přípravu sklářského kmene je čistý křemičitý písek s obsahem  $\text{SiO}_2$  60 až 80% a zrnitost do 0,4mm. Musí být chemicky čistý, zpravidla zušlechtěný praním, sušením a tříděním. Nesmí obsahovat větší množství barvicích látek, zvláště  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (u okenního skla je maximální množství  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0,2%). Oxid vápenatý se přidává ve formě jemně mletého  $\text{CaCO}_3$ . Tavením kmene přechází



uhličitan vápenatý na oxid vápenatý, jehož obsah upravuje rozpustnost a chemickou odolnost skla.

Oba alkalické oxidy ( $\text{Na}_2\text{O}$  a  $\text{K}_2\text{O}$ ) se přidávají rovněž ve formě uhličitanů (sody nebo potaše). Sodné sklo snižuje teplotu tání, zvláště snadno se taví. Jako čeriva se používají sírany (sodný, vápenatý, barnatý) a dusičnany (draselný, vápenatý, barnatý). Přidávají se do sklářského kmene v malém množství, aby odstranily z roztavené skloviny bublinky, nečistoty a současně sklovinu homogenizovali. Často pomáhají urychlit i tavící pochody a napomáhají i při odbarvování skloviny.

Skleněné střepey se přidávají k již uvedeným sklářským surovinám v množství do 30% a způsobují urychlení tavení a zlepšují i počáteční homogenitu skloviny. Vlastnosti skla lze ovlivňovat složením sklářských surovin, tj. volbou jednotlivých složek a jejich poměrného množství. Hustota skla značně kolísá v závislosti na jeho složení. Spodní hodnotu hustoty  $2200\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  nacházíme u čistě křemenného skla, hustota skla olovnatého může dosáhnout až  $6000\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Hustota nejběžnějšího sodnovápenatého tabulového skla činí  $2500\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

U jednoduchých plochých skel tloušťky 2 až 3 mm je propustnost světelného záření až 92%. Matované druhy skel či drátové sklo mají propustnost 50 až 60%. Ploché sklo odráží cca 8% paprsků, které na něj dopadají kolmo, přičemž s rostoucím úhlem dopadu velikost odrazu zvětšuje. Propustnost skel je závislá na tloušťce skla a se zvyšující se tloušťkou se snižuje. (Pro sklo, jakožto opticky homogenní prostředí, platí Lambertův-Beerův zákon.) Propustnost není v celém rozsahu vlnových délek stejná. Běžná skla ultrafialové světlo absorbují (v závislosti na obsahu oxidu železitého). Infračervené záření však běžná tabule skla ve značné míře propustí.

Tenkou vrstvou tvořenou oxidy kovů nanesených na okenní sklo lze ovlivňovat velikosti absorpce a reflexe vůči dopadajícímu elektromagnetickému záření (dlouho-vlnnému, krátko-vlnnému a středně vlnnému záření).

Pevnost skla závisí také na vlastnostech povrchu, na opracování hran a vadách ve skle. Pokud je povrch skla poškrábaný, jeho pevnost se podstatně sníží. Pevnost rovněž závisí na tloušťce skla. Čím je tloušťka skla menší, tím větší je



pevnost skla v tahu. Zvýšení pevnosti skla je možné cestou potlačení vzniku nebo účinku povrchových vad. Mechanické leštění nebo vyhlazení povrchu vysokou teplotou zvyšuje pevnost skla.

Skleněné výrobky vydrží mnohem větší krátkodobé zatížení než zatížení trvalé. Při dlouhotrvajícím zatížením skla se projeví únava materiálu a sklo praskne.

### **7.3. Tubus**

Tubus světlovodu dopravuje světlo do interiéru místnosti a má převážně kruhový průřez. Musí být vyroben z takového materiálu, aby jeho povrch dokázal odrazit co nejvíce světla, které se do světlovodu dostane. Proto se používají především hliníkové tubusy, které mohou být potaženy navíc reflexními fóliemi, jejichž přesnější složení je však výrobním tajemstvím výrobců světlovodů. Dalším možným materiálem pro výrobu světlovodného tubusu může být metalizovaný polyester.

#### **7.3.1. Hliník**

Hliník a jeho slitiny se, vzhledem k jejich třikrát nižší hustotě než má ocel, řadí mezi lehké kovy. Hliník má stříbrošedou barvu a jako technický kov se ve stavebnictví používá již od konce devatenáctého století. První aplikace ve světě byly střešní krytiny z Al plechu tl. 1,27mm, které jsou na některých objektech dodnes.

Hliník se vyrábí z rud s vyšším obsahem oxidu hlinitého, nejčastěji z bauxitu. Protože hliník nelze získat z rudy redukcí kyslíku uhlíkem jako v případě výroby železa, používá se způsoby výroby elektrolýzou. Výroba je proto náročná na elektrickou energii, na výrobu 1kg hliníku je potřeba 16 až 20kWh.

Z bauxitu se nejprve získá na autoklávu při teplotě 160 až 250°C čistý oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ze kterého se elektrolýzou v elektrických pecích (elektrolýzerech) působením elektrického proudu s napětím 5,5 až 6 V a s intenzitou 20 až 50 kA uvolňuje z elektrolytu hliník a kyslík. Elektrolytem je oxid hlinitý rozpuštěný v roztaveném kazivci ( $\text{CaF}_2$ ). Tím se vyrobí hutnický hliník s čistotou 99 až 99,9%, který je těžší než elektrolyt a usazuje se na katodě na dně pece, odkud se plynule vybírá.



Pro použití světlovaného tubusu se využívá hliník ve formě plechu, který je z hlediska požadavku na velkou odrazivost především hladký. Většinou se jedná o plech z čistého hliníku. Je válcovaný za studena z hliníku všech čistot. Plech z čistého hliníku patří mezi nejméně pevné materiály, jeho pevnost lze zvýšit deformačním zpevněním a válcováním za studena na stav polotvrdý nebo tvrdý. Plechy ze slitin se vyrábějí ze slitin vytvrditelných s tepelným zpracováním (přirozené stárnutí nebo umělé stárnutí).

Plech se dodávají v tabulích bez povrchové úpravy jako polotovar pro další zpracování nebo s povrchem lakovaným. Běžnou úpravou pásů ze slitiny hliníku je povrch lakovaný polyvinylidenfluoridem (PVdF) a opatřený snímatelnou ochrannou fólií. Na lícové straně má dvouvrstvý krycí lak tloušťky 25 $\mu$ m a na rubové straně ochranný lak tloušťky 3  $\mu$ m. Ochranná fólie brání zničení a poškození povrchu je snímána na závěr stavebních prací.

Plech se dodávají v tl. 0,63 až 8mm a to v tabulích rozměrech 1000 x 2000, 1000 x 2500, 1500 x 3000 mm. Hliníkové plechy se musí skladovat v temperovaných halách, kde nedochází ke kondenzaci par. Při navlhnutí stohů plechů, dochází ve vzdálenosti několika cm od kraje ke korozi, která se projeví šednutím původně lesklého povrchu. Dopravu plechů je nutné zabezpečit v zakrytých dopravních prostředcích.

Fólie se používají k zajištění odrazu tepelných paprsků na potahy tepelně izolačních materiálů, na vložky nebo potahy hydroizolačních asfaltových pásů, světlovodných tubusů a dalších prvků ve stavebnictví.

### **7.3.2. Metalizovaný polyester**

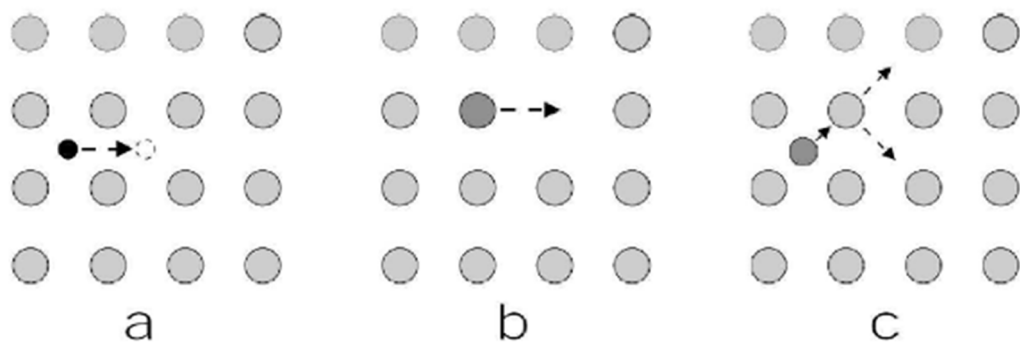
Metalizované plasty mají již dlouhou dobu široké spektrum použití, ať už jako obaly na potraviny, světlené reflektory, tubusy světlovodů, CD, atd. Jejich výroba je perspektivní především z hlediska své teplotní stability a odolnosti proti chemikáliím, mechanické deformaci, záření a některé dokonce i proti vysokým teplotám.





Jedná se o částice kovu, které jsou rozptýleny v objemu polymeru. Mnohvrstvé struktury kovu a polymeru tvoří husté a rychlé spojení, i když se jedná o kombinaci dvou velmi rozdílných materiálů. Zatímco kovy tvoří uzavřenou krystalickou strukturu velké hustoty s vysokou kohezí, polymery jsou makromolekulární látky s otevřenou strukturou, které drží pohromadě díky slabým van der Waalsovým silám. Vazebná energie kovů je o dva řády větší než vazebná energie polymerů. Kromě toho interakce kovů s polymery je podstatně slabší v porovnání se silnými interakcemi mezi kovy.

Tenké kovové vrstvy se nanášejí diodovým napařováním na polymerní fólii při pokojové teplotě a poté se používá postdepoziční žhání pro docílení difúze kovových částic do polymeru navíc doprovázené plasmatickou úpravou. Difúze částic často zahrnuje několik rozdílných difúzních mechanismů, které závisí na chemických vlastnostech obou látek. Velikost difundujícího atomu, koncentrace defektů v matici, pozice Fermiho hladiny energie (nejvyšší energetická hladina v dovoleném pásmu, ve které se ještě vyskytují právě dva elektrony) a krystalická struktura matrice jsou faktory ovlivňující difúzi. Některé difúzní mechanismy jsou zobrazeny na obrázku 13.



Obrázek 13: Příklad difúzních mechanismů: a) posuvná difúze, b) difúze na volné místo, c) difúze substitucí nebo vyražením

Posuvná difúze, při níž difundující atomy přeskakují z jedné mezery do druhé, probíhá při malé velikosti difundujících atomů. Předpokládá se, že pohybující se atomy narušují okolní matici. Difúze na volné místo závisí na koncentraci volných míst. Difúze substitucí nebo vyražením probíhá tedy, když difundující atom a atom



usazený v matici mají přibližně stejnou velikost. Obvyklý tok částic je z vyšší koncentrace do koncentrace nižší, opačný případ nastává pouze v případech, kdy je do systému přidána nějaká řídicí síla, např. elektrické pole. (SLOTTE, 1999)

Difúze kovů do polymerů zůstává zatím málo prostudovanou jak experimentálně, tak teoreticky. Proto se věnuje mnoho úsilí k pochopení struktury a stability rozhraní kovů / polymerů, zvláště s cílem zlepšit přilnavost kovové vrstvy a předejít degradaci polymeru.

Bylo zjištěno, že struktura a tím i mechanické, chemické a dielektrické vlastnosti rozhraní jsou závislé na stupni vzájemného promísení. A proto je třeba pochopit difúzi kovů a polymerů. První výzkumy ukazují, že difúze silně závisí na chemických reakcích na rozhraní kov – polymer. Chemické procesy na rozhraní určují jeho morfologii. Existuje závislost mezi reaktivitou kovu a difúzní aktivitou. Silně reaktivní kovy (Ti, Cr, Al) vytváří spojitou vrstvu a reálně ostré rozhraní, kdežto středně nebo slabě reaktivní kovy (Ni, Ag, Cu) difundují do objemu polymeru, a i při vyšších teplotách mají silnou tendenci utvářet shluky (klastry) uvnitř polymeru. Difúzi kovu do polymeru také silně ovlivňuje rychlost nanášení. Malá rychlost, kdy se rozptýlí velká část jednotlivých atomů po povrchu, výrazně zvyšuje difúzi do objemu polymeru. Velká depoziční rychlost, kdy se kov shlukuje na povrchu, zanedbává v objemu polymeru jen stopové množství kovu. (FAUPELE, a další, 1999)

Vazebná energie kovů je rámcově o dva řády vyšší než vazebná energie polymerů. Interakce kovů s polymery je podstatně slabší, v porovnání se silnými reakcemi mezi atomy kovů. Odtud plyne silná tendence kovů shlukovat se a jejich, za běžných podmínek, nízká rozpustnost v polymerech. Navzdory tomu, byly zjištěny kovové klastry i v objemu polymeru. Zřejmě existuje nějaká hnací síla difuze kovových klastrů, např. Gibbsonova energie (=energie termodynamického stavu vyjadřující práci potřebnou k dosažení tohoto stavu) kovu je uvnitř polymeru menší než na povrchu. Velmi výrazný rozdíl mezi kovy a polymery se odráží při vzájemné difúzi, která probíhá jinak nežli interdifúze mezi dvěma materiály, které jsou si podobné a vzájemně se propouštějí. (FAUPELE, a další, 1999)



#### **7.4. Stropní difuzér**

Světlovodný tubus je v místnosti ukončen stropním difuzorem, který má za úkol rozptýlit světlo po místnosti a to tak, aby bylo co nejrovnoměrnější. Je vyroben opět buď ze skla, nebo z plastů, stejně jako kopule světlovodu. Jelikož má za úkol přinést do interiéru finální podobu denního osvětlení, musí být vyráběn vždy z čirých materiálů, aby nedocházelo k barevnému zkreslování denního osvětlení. Dále musí být materiál difuzoru stejně jako materiál nástřešní kopule maximálně odolný proti stárnutí, aby byl stále propustný a mohl tak distribuovat tak denní světlo.

Veškeré materiály používané pro výrobu stropních difuzorů jsou totožné s materiály pro výrobu střešních kopulí a jsou tak uvedeny v kapitole 7.2.



## 8. VÝZKUMNÝ ZÁMĚR

### 8.1. *Identifikační údaje*

Řešitelské pracoviště:



Ústav stavebníctva a architektúry, Slovenskej akadémie vied

Oddelenie stavebnej fyziky

Dúbravská cesta 9, 845 03 Bratislava

Zodpovědný řešitel projektu VEGA 2/0029/11:

doc. Ing. Stanislav Darula, CSc.

Hostující pracoviště:



Fakulta architektury ČVUT

Ústav Stavitelství II

ul. Thákurova 9, 166 29 Praha 6

Zpracovatel:

Ing. Lenka Prokopová,

stážistka v rámci programu EU LLP - Erasmus 2012-2013

Dodavatel vzorků světlovodů:

Sola System Slovakia, s.r.o.,

Podpriehradná 3/A, 821 07 Bratislava



## **8.2. Úvod**

Světlovod se používá pro transport denního světla z exteriéru do interiérů budov, tam kde již tuto funkci nemůže vykonat klasický okenní otvor. Většinou se jedná o podzemní části objektů, prostory situované ve vnitrobloku nebo také o velmi hluboké místnosti, kde boční osvětlovací soustavou nedosáhneme požadovaných parametrů denního osvětlení. Světlovod je spíše doplňkový zdroj denního osvětlení, který se využívá pro vedlejší místnosti, jako jsou schodiště, chodby, hygienická zázemí a to jak pro rodinné domy, tak pro administrativní, komerční či výrobní objekty. Světlo se do tubusu světlovodu dostává přes střešní průhlednou kopuli, která je vyráběna z akrylátového či skleněného materiálu, dále je transportováno vysoce odrazivým světlovodným tubusem a do místnosti je rozptýleno stropním difuzorem. Po místnosti se roz distributes jako difúzní denní světlo.

## **8.3. Popis výzkumného záměru**

Na základě podpory programu EU LLP – Erasmus 2012-2013 jsem se jako doktorandka dostala na výzkumné pracoviště Slovenské akademie věd. Konkrétně se jednalo o Ústav stavebnictví a architektury, oddělení stavební fyziky, kde se nachází laboratoř umělé oblohy. Zde jsem pod vedením pana docenta Stanislava Daruly mohla odzkoušet několik vzorků tubusů světlovodů a naměřit tak důležitá data pro tuto práci.

Nejprve jsme se domluvili na spolupráci s firmou Sola System Slovakia, s.r.o., která pro výzkum zapůjčila vzorky světlovodů. Tyto vzorky jsem měla k dispozici po celou dobu stáže a mohla s nimi pracovat. Jednotlivé díly jsme dostali nesestavené, a proto začátek práce spočíval v tom, abychom vzorky světlovodů připravili pro plánované měření.

Důležitou částí byla určitě příprava měřících přístrojů, která spočívala zejména v kalibraci luxmetrů. Díky vybavení, které má k dispozici Slovenská akademie věd, jsme srovnávací měření mohli provést přímo na fotometrické lavici, která se nachází v místní fotometrické laboratoři.



Pro přípravu umělé oblohy jsme po jejím nasvícení museli zkontrolovat především rozložení jasů, které by měly odpovídat standardům rovnoměrně zatažené oblohy při tmavém terénu. Proto jsme pomocí jasoměru Minolta Luminance Meter 1°, postupně měřili jas ve čtyřech na sebe kolmých směrech a to vždy pod úhly 0°, 4°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° a 90°.

Vzorky světlovodů jsme instalovali do středu montážního stolu, který je součástí umělé oblohy. Pomocí dvou luxmetrů jsme pro každý vzorek zjišťovali činitele účinnosti přenosu difúzního světla a jednotlivé výsledky poté zaznamenávali do protokolů a finálně je vyhodnocovali. Podrobnější metodika měření je uvedena níže.

#### **8.4. Popis vzorků**

K testování přenosu světla světlovodem pod umělou oblohou bylo celkem použito 5 vzorků, u kterých byl vždy splněn parametr pro průměr přímého tubusu světlovodu 530 mm a délka 1 170 mm. Délka tubusu byla limitována výškou montážního stolu, který je součástí zařízení umělé oblohy a slouží pro osazování vzorků. Byly testovány dva různé povrchové materiály tubusu světlovodu. Z nich první byl Solatube - Spectralight Infinity (polymerová vrstva na hliníku) a druhý Alanod - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník). Dále byl zjišťován vliv čiré akrylátové kopule a difuzoru s jemně mléčnou strukturou a lehce vroubkovaným povrchem na světelnou účinnost světlovodu. Pro vzorek 1 bylo provedeno měření pouze pro přímý tubus bez vlivu difuzoru a kopule. Vzorek 2 byl testován jak s kopulí, tak s difuzorem a také jako komplet (kopule + difuzor). Jednotlivé vzorky jsou popsány a schematicky zobrazeny na obr 14.

Vzorek č. 1: Tubus světlovodu z materiálu Solatube - Spectralight Infinity (polymerová vrstva na hliníku) bez kopule a bez difuzoru.

Vzorek č. 2a Tubus světlovodu z materiálu Alanod - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) bez kopule a bez difuzoru.

Vzorek č. 2b Tubus světlovodu z materiálu Alanod - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) s kopulí a bez difuzoru.



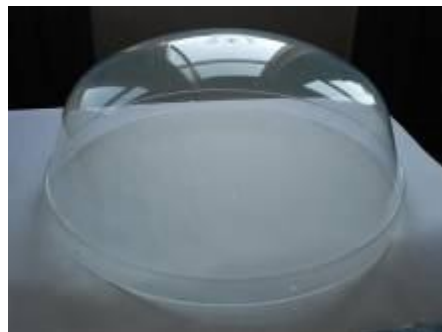
Vzorek č. 2c Tubus světlovodu z materiálu Alanod - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) bez kopule a s difuzorem.

Vzorek č. 2d Tubus světlovodu z materiálu Alanod - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) s kopulí a s difuzorem. Zjištění činitele účinnosti přenosu difúzního světla.



Obrázek 14: Schematické obrázky testovaných vzorků světlovodů o průměru 530 mm a délky 1 170 mm

Kopule světlovodu byla vyrobena z čirého akrylátu, nepravidelného tvaru, po boku zkosená. Dle podkladů výrobce nepropouští UVA ani UVB záření. Měla vnější průměr 575 mm a kotvila se na střešní kovový límec světlovodu. Její reálná podoba je zobrazena na obr. 15.



Obrázek 15: Kopule světlovodu

Tubus světlovodu měl průměr 530 mm. Vzorek tubusu o délce 1170 mm byl vytvořen z hliníkové pásové fólie. Jednalo se vždy o dva kusy délky 600 mm, které byly do sebe zasunuté. Veškeré spoje byly přelepeny hliníkovou montážní páskou. Tubus se nepodařilo z důvodu malé tuhosti materiálů spojit přesně do kruhového průřezu. Pro měření se používaly dva materiály a to 1) Solatube - Spectralight Infinity (polymérová vrstva na hliníku) a 2) Alanod - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník). Kruhový tvar tubusu byl stabilizován umělohmotnou obručí, viz obr. 16.



Obrázek 16: Tubus světlovodu

Difuzor světlovodu byl vyroben z PMMA (polymethylmethakrylát) průsvitného strukturovaného materiálu. Z vnitřní strany tubusu byl lehce vroubkovaný povrch, ze strany interiéru byl jeho povrch hladký. Difuzor měl bílý rámeček, který lehce zmenšoval průměr průsvitné části světlovodu, vše je patrné na obr. 17. Po stěnách musel být difuzor přelepený hliníkovou montážní páskou, aby nepronikalo světlo stěnami a nezvyšovalo tak osvětlenost pozadí v prostoru měření výstupného světelného toku.



Obrázek 17: Difuzor světlovodu

### **8.5. Měřicí přístroje**

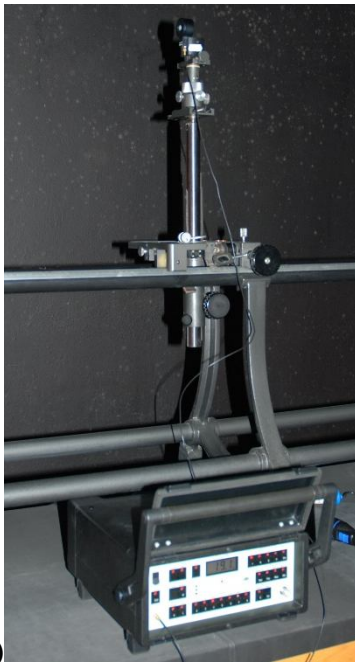
Pro měření vystupujícího množství světla ze světlovodu byl použit úředně kalibrovaný luxmetr Precision Photometer Bruel-Kjaer 1105 – viz obr. 18a. Oproti tomu luxmeter Extech 450 č. 14, NO. 12095034 – viz obr. 18b měřil množství





vstupujícího světla do vzorku světlovodu a Luxmeter Extech 450 č. 15, NO. 12095018 byl použit pro měření zpětného odrazu světla.

Luxmetr je přístroj k měření intenzity osvětlení. Jednotkou intenzity osvětlení je lux [lx], což je intenzita osvětlení světelným tokem 1 lumenu [lm] rovnoměrně rozděleným na plochu 1 m<sup>2</sup> (1 lux = 1 lm/m<sup>2</sup>). Za kvalitní luxmetr, je považován přístroj, jehož spektrální citlivost odpovídá spektrální citlivosti lidského oka a jehož světlocitlivý receptor je opatřen tzv. kosinusovým korektorem, eliminujícím směrovou (úhlovou) chybu při šikmém dopadu světla. Luxmetry se skládají z přijímače s fotočlánkem a z měřicího a vyhodnocovacího systému. Konstrukce luxmetru bývá různá a souvisí s metodou měření fotoproudu a principem samotného fotočlánku. Obvykle je měřen fotoproud vhodným obvodem s operačním zesilovačem.



a)



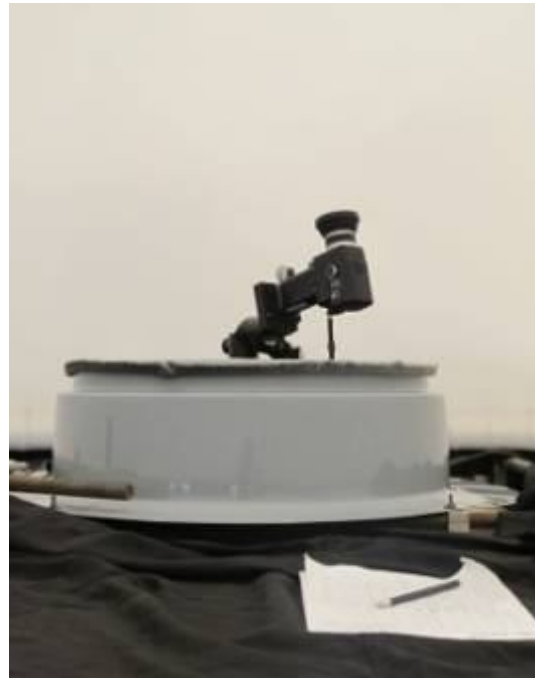
b)

Obrázek 18: a) Luxmetr Precision Photometer Bruel-Kjaer 1105, b) Luxmetr Extech 450 č. 14

Pro kontrolu nastavení jasů umělé oblohy byl použit jasoměr Minolta Luminance Meter 1°, v. č. 401711 – viz obr. 19. Jasoměry slouží k měření jasů a jednotkou je [cd.m<sup>-2</sup>]. Skládají se ze snímače s fotočlánkem, optického systému pro vymezení prostorového úhlu a z měřicího a vyhodnocovacího systému. Fotočlánek s vysokou citlivostí a spektrálním přizpůsobením je opatřen optickou soustavou clonicích a fokusačních prvků, které vymezují prostorový úhel měření jasů zorného



pole jasoměru. Zjednodušeně bychom mohli říci, že se jasoměr dá vyrobit také tak, že na fotočlánek nasadíme tubus opatřený na vstupu clonou s kruhovým otvorem, čímž vymezíme prostorový úhel, v němž dopadají paprsky z měřené plochy na fotočlánek. Na ploše fotočlátku měřený jas vytvoří osvětlenost, která je úměrná světelnému toku dopadajícímu z jasné plochy, kterou měříme.

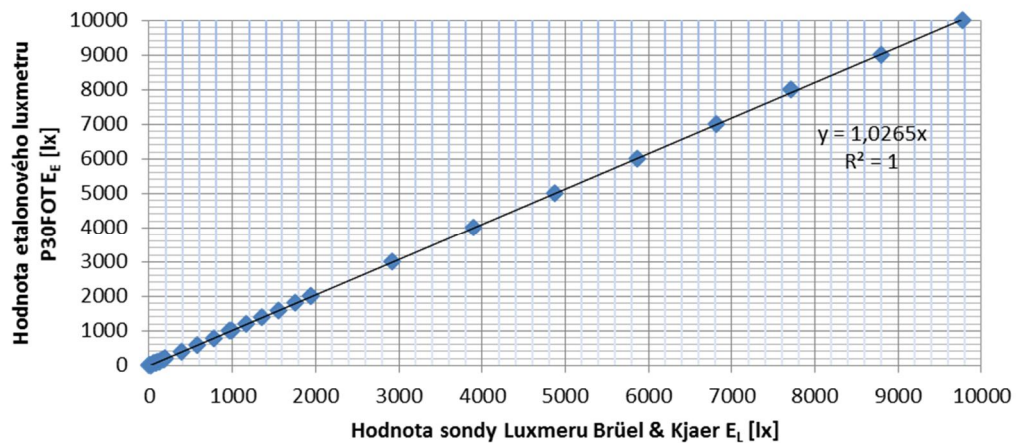


Obrázek 19: jasoměr Minolta Luminance Meter 1°, v. č. 401711.

### **8.6. Kalibrace měřících přístrojů**

Experimentální měření osvětlenosti vyžaduje kalibrované luxmetry resp. jejich fotometrické hlavy. Senzory totiž v čase degradují ve svých úrovních osvětlenosti různě. Každé měření je ovlivněno chybami měřícího přístroje a ještě samotným postupem měření. Při přípravě experimentu a jeho provádění by měly být tyto chyby co nejvíce sniženy, proto jsou kalibrace tak důležité.

Dne 9.11.2011 byla provedena certifikovaná kalibrace sondy 1301932 luxmetru výrobce Brüel & Kjaer na Slovenském metrologickém ústavě v centru termometrie, fotometrie a radiometrie. Sonda luxmetru byla kalibrovaná fotometrickou hlavicí P30FOT korigovanou na funkci  $V(\lambda)$ , která patří do soustavy národní etalonové svítivosti NE012. Výsledky certifikované kalibrace jsou uvedeny v grafu 1.



Graf 1: Lineární závislost mezi sondou referenčního luxmetru a etalonu

Kalibrační konstanta  $k = 1,027$  úředně kalibrovaného luxmetru Brüel & Kjaer byla vypočtena z certifikačního protokolu a pro praktické měření osvětlenosti platí:

$$E_{Etalon} = 1,027 \times E_{Brüel} \quad [14]$$

kde je:  $E_{Etalon}$  osvětlenost etalonového luxmetru [lx]

$E_{Brüel}$  osvětlenost luxmetru Brüel [lx]



Obrázek 20: Senzor Precision Photometer Bruel Kjaer 1105 na fotometrické lavici při kalibraci

Luxmetry Extech č.14 HD450 (NO.12095034, Z2/11102014) a Extech č.15 HD450 (NO.12095018, Z2/11102015) byly kalibrovány ve fotometrické laboratoři v Ústavu stavebnictva a architektury Slovenské akademie vied na fotometrické lavici – viz obr. 20. Kalibrování sond luxmetrů bylo provedeno pro 11 různých vzdáleností



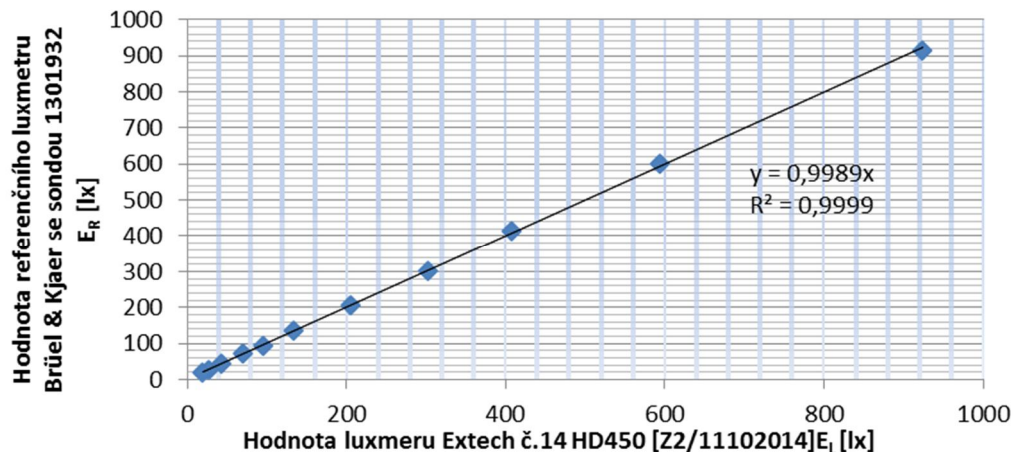
od zdroje světla, kterým byla žárovka 200 W napojena na stmívací zařízení se stabilizátorem zn. Samo Automation s nastavenou intenzitou 90 %, veškerá měření byla pro kontrolu provedena třikrát. Výsledky kontrolních měření jsou uvedeny v grafu 2 a 3. Veškeré kalibrační protokoly jsou příloho této disertační práce.

Pro luxmetr Extech č.14 HD450 byl zjištěn vztah pro měřenou osvětlenost takto:

$$E_{Brüel} = 0,999 \times E_{Extech \text{ č.14}} \quad [15]$$

kde je:  $E_{Brüel}$  osvětlenost luxmetru Brüel [lx]

$E_{Extech \text{ č.14}}$  osvětlenost luxmetru Extech č.14 HD450 [lx]



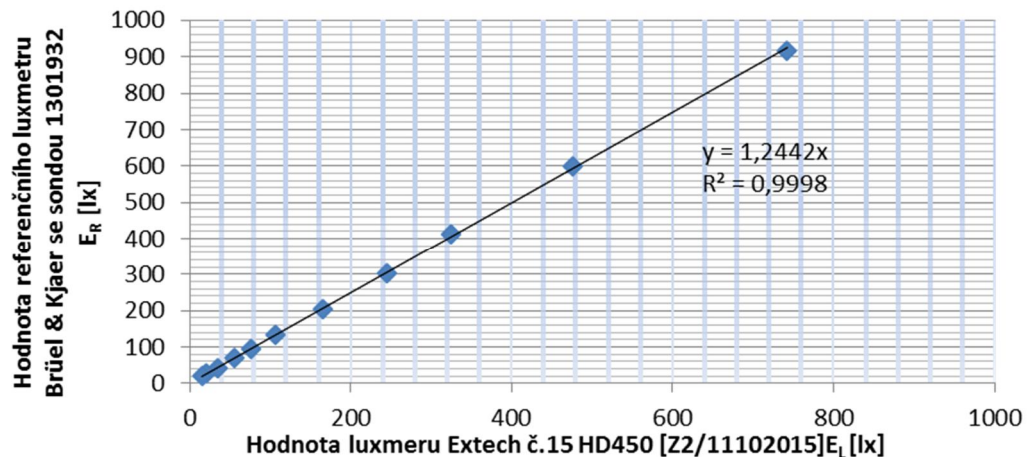
Graf 2: Lineární závislost mezi kalibrovaným luxmetrem Extech č.14 a sondou referenčního luxmetru Brüel

Poté je kalibrační konstanta  $k = 1,025$  platná pro luxmetr Extech č.14 450, jelikož bylo potřeba zvážit oficiální kalibraci referenčního luxmetru Brüel.

$$E_{calibrated} = 0,999 \times 1,027 \times E_{Extech \text{ č.14}} = 1,025 \times E_{Extech \text{ č.14}} \quad [16]$$

kde je:  $E_{calibrated}$  osvětlenost po kalibraci pro luxmetr Extech č.14 HD450 [lx]

$E_{Extech \text{ č.14}}$  osvětlenost luxmetru Extech č.14 HD450 [lx]



Graf 3: Lineární závislost mezi kalibrovaným luxmetrem Exttech č.15 a sondou referenčního luxmetru Brüel

Pro luxmetr Exttech č.15 HD450 byl zjištěn vztah pro měřenou osvětlenost takto:

$$E_{Brüel} = 1,244 \times E_{Exttech \text{ č.15}} \quad [17]$$

kde je:  $E_{Brüel}$  osvětlenost luxmetru Brüel [lx]

$E_{Exttech \text{ č.15}}$  osvětlenost luxmetru Exttech č.15 HD450 [lx]

Poté je kalibrační konstanta  $k = 1,277$  platná pro luxmetr Exttech č.15 450, jelikož bylo potřeba zvážit oficiální kalibraci referenčního luxmetru Brüel.

$$E_{calibrated} = 1,244 \times 1,027 \times E_{Exttech \text{ č.15}} = 1,277 \times E_{Exttech \text{ č.15}} \quad [18]$$

kde je:  $E_{calibrated}$  osvětlenost po kalibraci pro luxmetr Exttech č.15 HD450 [lx]

$E_{Exttech \text{ č.15}}$  osvětlenost luxmetru Exttech č.15 HD450 [lx]

### 8.7. Test jasů umělé oblohy

Umělá obloha se nachází ve světlo-technické laboratoři na Ústavu stavebnictva a architektury Slovenské akademie vied. Má průměr 8m a je možné ji osvětlit reflektory umístěnými v úrovni podlahy. Pro kontrolní měření byla umělá obloha nasvětlena dle standardu CIE pro rovnoměrně zamračenou oblohu při tmavém terénu, kde by mělo být rozložení jasů dle vztahu:

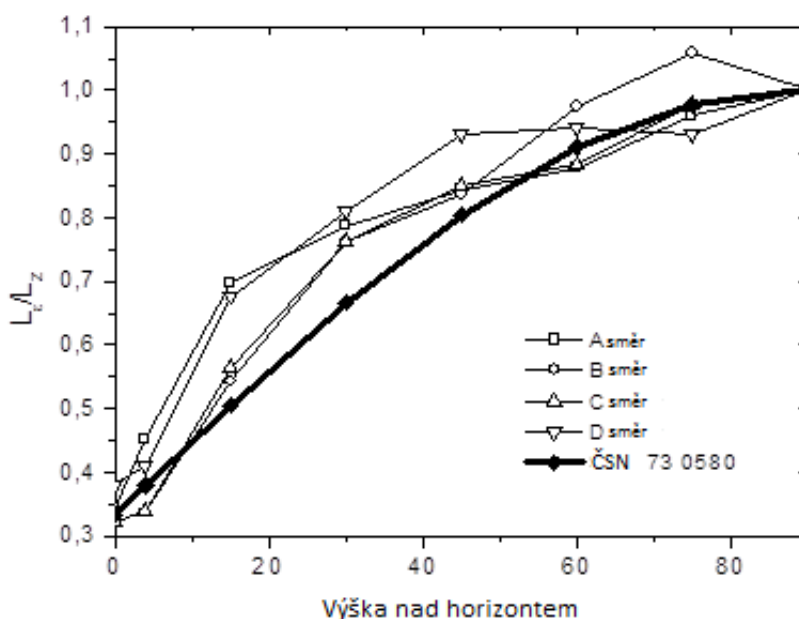
$$\frac{L_h}{L_z} = \frac{1}{3} \quad [19]$$

Kde je:  $L_h$  jas horizontu oblohy [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]

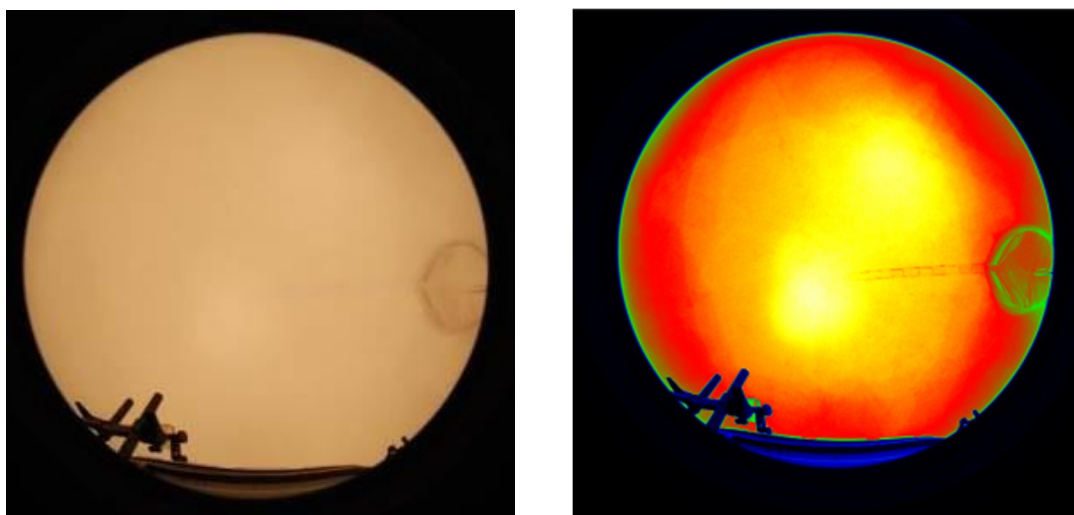
$L_z$  jas zenitu [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]



Kontrolní měření jasů oblohy probíhalo tak, že do středu umělé oblohy byl umístěn jasoměr Minolta Luminance Meter 1°, kterým byl postupně měřen jas ve čtyřech na sebe kolmých směrech. V každém směru byl jas měřen pod úhly 0°, 4°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° a 90° a pro kontrolu vždy ve třech opakováních – viz obr. 22. Výsledky kontrolního měření, v daných úhlech a směrech jsou zobrazeny v grafu 4. Obrázek 21 zobrazuje pohled na umělou oblohu skrz tubus světlovodu včetně jasové mapy.

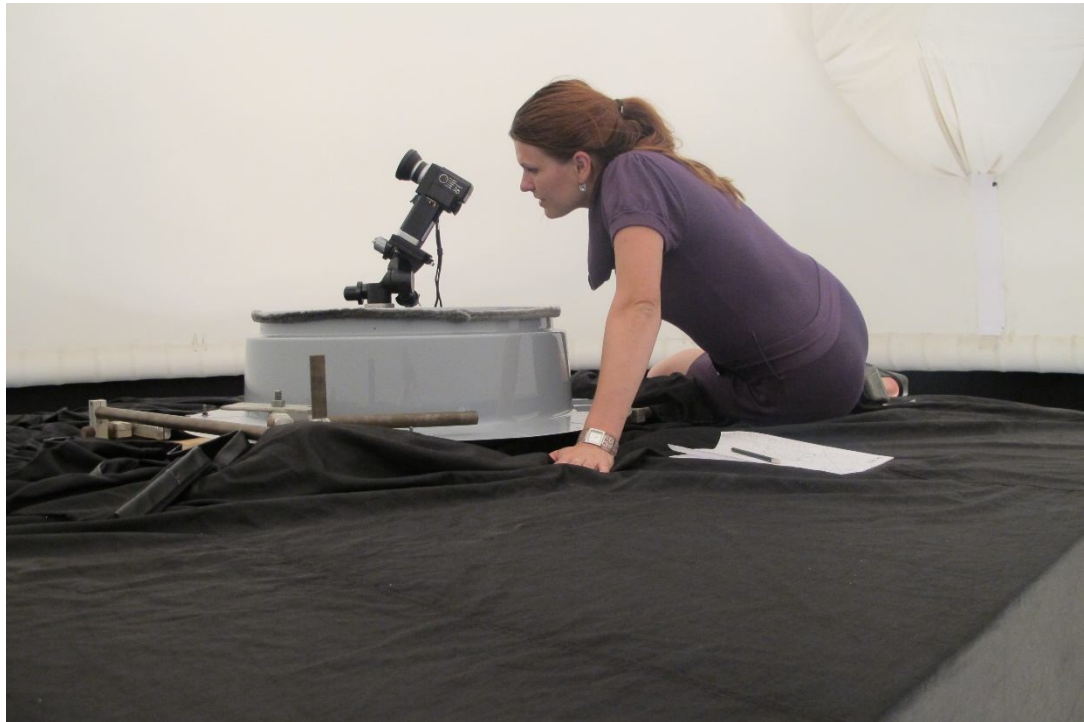


Graf 4: Grafické znázornění kontroly jasů rovnoměrně zatažené oblohy při tmavém terénu dle CIE z 9.7.2013



Obrázek 21: Pohled ze světlovodu na umělou oblohu (vlevo), včetně jasové mapy (vpravo)





Obrázek 22: Kontrola jasů umělé oblohy pomocí jasoměru Minolta umístěného nad límcem světlovodu

### **8.8. Metodika měření**

Před začátkem měření byly veškeré používané senzory jednotlivých luxmetrů kalibrovány ve fotometrické laboratoři, jak je uvedeno výše.

Zdrojem světla byla umělá obloha, která byla nastavena s rozložením jasu 1:3 dle standardu CIE zamračené oblohy pro tmavý terén

Difúzní světlo definované intenzity dopadající na vnější otvor tubusu nebo povrch kopule světlovodu se měřilo současně s měřením vystupujícího světla na konci světlovodu na vodorovné rovině. Jako zdroj difúzního světla byla použita umělá obloha hemisférického tvaru nakalibrovaná na rozložení jasu 1:3 dle standardu CIE zamračené oblohy pro tmavý terén. Umělá obloha s kopulí o průměru 8 m se nachází na ÚSTARCH SAV v Bratislavě. Dokonalé difúzní světlo pod kopulí je vytvářeno soustavou reflektorů, které osvětlují její speciální, světlo rozptylující povrch. Světlovod byl umístěn do středu umělé oblohy a pomocí límce světlovodu byl osazen ve vertikální poloze do měřícího stolu.

Dopadající i vystupující světlo se měřilo luxmetry se směrově a spektrálně korigovanými hlavicemi. Čidlo luxmetru měřící vystupující množství světla se



posouvalo pod vzorkem světlovodu s konstantním krokem 20 mm ve vzdálenosti 3 mm mezi spodní hranou světlovodu nebo difuzoru a čidlem luxmetru. Měřena byla osvětlenost od osy světlovodu do vzdálenosti 0,64 m ve čtyřech na sebe kolmých směrech dle metodiky (CIE, 2006). Každý testovaný vzorek byl měřen ve třech opakováních, a z každé sady měření byla vypočítána průměrná hodnota světelného toku vstupujícího do světlovodu  $\Phi_e$  a vystupujícího ze světlovodu  $\Phi_i$ . Poté byla hodnota světelné účinnosti světlovodu stanovena dle vzorce:

$$E_{ff} = \frac{\Phi_i}{\Phi_e} \quad [20]$$

Kde je:  $E_{ff}$  hodnota světelné účinnosti světlovodu [-]

$\Phi_i$  světelný tok vystupující ze světlovodu [lm]

$\Phi_e$  světelný tok vstupující do světlovodu [lm]

Hodnoty světelné účinnosti byly určeny pro denní světlo D65, které odpovídá podmračené denní obloze bez sluníčka. Hodnoty žárovkového světla byly vypočítány pomocí korekčního činitele  $k$  na žárovkové světlo.

$$k = 1 + (1 - 0,97) = 1,03 \quad [21]$$

Kde je:  $k$  korekčního činitele na žárovkové světlo [-]

Z hlediska účinnosti světlovodu byl měřen také zpětný odraz. Ve stejný čas byla odečtena hodnota ze senzoru luxmetru Extech č. 14, který měřil světlo vstupující do světlovodu a ze senzoru Extech č. 15, který měřil světlo zpětně se odrážející ze světlovodu směrem do kopule umělé oblohy. Měření bylo prováděno pomocí čidla upevněného na tyčce otočeného směrem do světlovodu, čidlo bylo postupně posouváno po hraně světlovodu ve čtyřech na sebe kolmých směrech od středu k hraně světlovodu v 5ti bodech po 5ti centimetrech – viz obr. 23.





Obrázek 23: Měření zpětného odrazu pomocí dvou čidel luxmetrů Extech č. 14 (vstupující osvětlenost) a č.15 (zpětný odraz)

### 8.9. Nejistota měření

Měření se uskutečnilo v laboratorních podmínkách. Luxmeter Precision Photometer Bruel-Kjaer 1105 byl úředně kalibrován v r. 2011 (Certifikát o kalibraci č. 769/270/41/11, SMÚ Bratislava, 30,11,2011). Luxmetr Extech č. 14 a č. 15 byly dne 6. 6. 2013 překalibrovány vzhledem k referenčnímu luxmetru Precision Photometer Bruel-Kjaer 1105 na fotometrické lavici ÚSTARCH SAV v Bratislavě.

Při výpočtu nejistoty měření se zohlednily vlastnosti hlavic luxmetrů, stabilita elektrické energie dodávaná pro svítidla pod oblohou, umístění fotonky a geometrie sestavy vzorků světlovodů, veškeré používané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.

TYP B	Třída 1, laboratorní měření	
Spektrální chyba	0,75	0,56
Směrová chyba	3,00	9,00
Umístnění fotonky	1,00	1,00
Napětí (obloha)	1,50	2,25
Ostatní	1,50	2,25
Kombinovaná standardní nejistota		
	$u$	5,57
Rozšířená nejistota		
	$U$	11,14

Tabulka 2: Používané hodnoty nejistot pro měření pod umělou oblohou.



## Rekapitulace

Standardní nejistota typu B	$u_B = 3.88\%$
Kombinovaná standardní nejistota	$u = 5.57\%$
Rozšířená nejistota	$U = 11.14\%$
Odchylka rozložení jasu měřené oblohy od modelu CIE rovnoměrně zatažené oblohy	$z = 3,97\%$

Pro vyhodnocení činitele účinnosti přenosu difúzního světla  $E_{ffdif}$  lze použít vztah:

$$E_{ffdif} = E_{ffv} \times k - z \pm u \quad [22]$$

Kde je:  $E_{ffdif}$  činitel účinnosti přenosu difúzního světla [-]

$E_{ffv}$  naměřená účinnost přenosu difúzního světla [-]

$k$  korekčního činitele na žárovkové světlo [-],  $k = 1,03$

$z$  odchylka rozložení jasu měřené oblohy od modelu CIE rovnoměrně zatažené oblohy [-],  $z = 0,0397$

$u$  kombinovaná standardní nejistota [-],  $u = 0,0557$

### 8.10. Výsledky měření

Výsledky veškerých měření byly pečlivě zapsány do protokolů a vyhodnoceny. Podrobné protokoly jsou přílohou této disertační práce. Níže jsou uvedeny stručné výsledky kontrolního měření.

**Sestava světlovodu, vzorek č. 1****Tube Spectralight Infinity (polymérová vrstva na hliníku) bez kopule a bez difuzoru**

<i>Typ vzorku:</i>	Solatube Spectralight Infinity, bez kopule, bez difuzoru
<i>Rozměr:</i>	d = 530 mm, l = 1170 mm
<i>Zdroj světla:</i>	Umělá obloha s jasem CIE zamračené oblohy, ÚSTARCH SAV Bratislava
<i>Typ osvětlenosti:</i>	Difúzní osvětlenost
<i>Senzor exteriér:</i>	Luxmeter Extech 450 č. 14, NO. 12095034
<i>Senzor interiér:</i>	Precision Photometer Bruel-Kjaer 1105

VZOREK 1

**Měření účinnosti přenosu difúzního světla  $E_{ffdif}$** 

Typ vzorku č.1	Číslo měření	Světelný tok vstupující do světlovodu $\Phi_e$	Světelný tok vystupující ze světlovodu $\Phi_i$	Naměřená účinnost přenosu difúzního světla $E_{ffv}$	Činitele účinnosti přenosu difúzního světla $E_{ffdif} \pm u$
	[-]	[lm]	[lm]	[-]	[-]
Solatube - Spectralight Infinity	1.1	116,998	105,179	0,8990	<b>0,8856 <math>\pm 0,0557</math></b>
	1.2	113,753	102,578	0,9018	
	1.3	113,233	101,276	0,8944	
	<b>Průměr</b>	<b>114,662</b>	<b>103,011</b>	<b>0,8984</b>	
Změřil:	Datum:		Zodpovědný za měření		
Ing. L. Prokopová, doc. Ing. S. Darula	18. 7. 2013		Ing. Stanislav Darula, CSc.		

**Vyhodnocení**

Činitel účinnosti přenosu difúzního světla $E_{ffdif}$	<b>88,56% <math>\pm</math> 5,57%</b>
--	--------------------------------------

**Sestava světlovodu, vzorek č. 2a****Tubus Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) bez kopule a bez difuzoru**

Typ vzorku:	Alanod - Miro Silver 27, bez kopule, bez difuzoru
Rozměr:	d = 530 mm, l = 1170 mm
Zdroj světla:	Umělá obloha s jasnem CIE zamračené oblohy, ÚSTARČ SAV Bratislava
Typ osvětlenosti:	Difúzní osvětlenost
Senzor exteriér:	Luxmeter Extech 450 č. 14, NO. 12095034
Senzor interiér:	Precision Photometer Bruel-Kjaer 1105

VZOREK 2a

**Měření účinnosti přenosu difúzního světla  $E_{ffdif}$** 

Typ vzorku č.2a	Číslo měření	Světelný tok vstupující do světlovodu $\Phi_e$	Světelný tok vystupující ze světlovodu $\Phi_i$	Naměřená účinnost přenosu difúzního světla $E_{ffv}$	Činitele účinnosti přenosu difúzního světla $E_{ffdif} \pm u$
	[-]	[lm]	[lm]	[-]	[-]
Alanod – Miro Silver 27	2a.1	111,124	96,335	0,8669	<b>0,8483</b> <b>±0,0557</b>
	2a.2	113,665	97,766	0,8601	
	2a.3	109,933	94,483	0,8595	
	<b>Průměr</b>	<b>111,574</b>	<b>96,195</b>	<b>0,8622</b>	
Změřil:	Datum:		Zodpovědný za měření		
Ing. L.Prokopová, doc. Ing. S. Darula	1. 8. 2013		Ing. Stanislav Darula,CSc.		

**Vyhodnocení**

Činitel účinnosti přenosu difúzního světla $E_{ffdif}$	<b>84,83% ± 5,57%</b>
--	-----------------------

**Sestava světlovodu, vzorek č. 2b****Tubus Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) s kopulí a bez difuzoru**

Typ vzorku:	Alanod - Solatube Miro Silver 27, s kopulí, bez difuzoru
Rozměr:	d = 530 mm, l = 1170 mm
Zdroj světla:	Umělá obloha s jasnem CIE zamračené oblohy, ÚSTARČ SAV Bratislava
Typ osvětlenosti:	Difúzní osvětlenost
Senzor exteriér:	Luxmeter Extech 450 č. 14, NO. 12095034
Senzor interiér:	Precision Photometer Bruel-Kjaer 1105

VZOREK 2b

**Měření účinnosti přenosu difúzního světla  $E_{ffdif}$** 

Typ vzorku č.2b	Číslo měření	Světelný tok vstupující do světlovodu $\Phi_e$	Světelný tok vystupující ze světlovodu $\Phi_i$	Naměřená účinnost přenosu difúzního světla $E_{ffv}$	Činitele účinnosti přenosu difúzního světla $E_{ffdif} \pm u$
	[-]	[lm]	[lm]	[-]	[-]
Alanod - Miro Silver 27 s kopulí	2b.1	111,574	86,702	0,7771	<b>0,7491 ±0,0557</b>
	2b.2	108,922	82,940	0,7615	
	2b.3	113,616	86,222	0,7589	
	<b>Průměr</b>	<b>111,371</b>	<b>85,288</b>	<b>0,7658</b>	
Změřil:	Datum:		Zodpovědný za měření		
Ing. L. Prokopová, Ing. D. Bošová	5. 8. 2013		Ing. Stanislav Darula, CSc.		

**Vyhodnocení**

Činitel účinnosti přenosu difúzního světla $E_{ffdif}$	<b>74,91% ± 5,57%</b>
--	-----------------------

**Sestava světlovodu, vzorek č. 2c****Tubus Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) bez kopule a s difuzorem**

Typ vzorku:	Alanod - Miro Silver 27, bez kopule, s difuzorem
Rozměr:	d = 530 mm, l = 1170 mm
Zdroj světla:	Umělá obloha s jasně zamračené oblohy, ÚSTARCH SAV Bratislava
Typ osvětlenosti:	Difúzní osvětlenost
Senzor exteriér:	Luxmeter Extech 450 č. 14, NO. 12095034
Senzor interiér:	Precision Photometer Bruel-Kjaer 1105

**Tabulka 2c. Měření účinnosti přenosu difúzního světla  $E_{ffdif}$** 

Typ vzorku č.2c	Číslo měření	Světelný tok vstupující do světlovodu $\Phi_e$	Světelný tok vystupující ze světlovodu $\Phi_i$	Naměřená účinnost přenosu difúzního světla $E_{ffv}$	Činitele účinnosti přenosu difúzního světla $E_{ffdif} \pm u$	
	[-]	[lm]	[lm]	[-]	[-]	
Alanod – Miro Silver 27 s difuzorem	2c.1	107,068	64,458	0,6020	<b>0,5770 ±0,0557</b>	
	2c.2	106,516	63,562	0,5967		
	2c.3	103,618	61,911	0,5975		
	<b>Průměr</b>	<b>105,734</b>	<b>63,310</b>	<b>0,5988</b>		
Změřil:	Ing. L. Prokopová, Ing. D. Bošová		Datum:	7. 8. 2013	Zodpovědný za měření	Ing. Stanislav Darula, CSc.

**Vyhodnocení**

Činitel účinnosti přenosu difúzního světla $E_{ffdif}$	<b>57,70% ± 5,57%</b>
--	-----------------------

**Sestava světlovodu, vzorek č. 2d****Tubus Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) s kopulí a s difuzorem**

Typ vzorku:	Alanod - Miro Silver 27, s kopulí, s difuzorem
Rozměr:	d = 530 mm, l = 1170 mm
Zdroj světla:	Umělá obloha s jasnem CIE zamračené oblohy, ÚSTARCH SAV Bratislava
Typ osvětlenosti:	Difúzní osvětlenost
Senzor exteriér:	Luxmeter Extech 450 č. 14, NO. 12095034
Senzor interiér:	Precision Photometer Bruel-Kjaer 1105

**Měření účinnosti přenosu difúzního světla  $Eff_{dif}$** 

Typ vzorku č.2d	Číslo měření	Světelný tok vstupující do světlovodu $\Phi_e$	Světelný tok vystupující ze světlovodu $\Phi_i$	Naměřená účinnost přenosu difúzního světla $E_{ffv}$	Činitele účinnosti přenosu difúzního světla $E_{ffdif} \pm u$	
	[-]	[lm]	[lm]	[-]	[-]	
Alanod - Miro Silver 27 s kopulí s difuzorem	2d.1	105,715	56,689	0,5362	<b>0,5367</b> <b>±0,0557</b>	
	2d.2	102,449	55,093	0,5378		
	2d.3	102,310	54,863	0,5362		
	<b>Průměr</b>	<b>103,491</b>	<b>55,548</b>	<b>0,5367</b>		
Změřil:	Ing. L. Janečková, Ing. D. Bošová		Datum:	6. 8. 2013	Zodpovědný za měření	Ing. Stanislav Darula, CSc.

**Vyhodnocení**

Činitel účinnosti přenosu difúzního světla $E_{ffdif}$	<b>53,67% ± 5,57%</b>
--	-----------------------



### 8.11. Vyhodnocení

Světelná účinnost přenosu difúzního světla samostatným tubusem průměru 530 mm, délky 1170 mm, s akrylátovou čirou kopulí a standardně vyráběným strukturovaným difuzorem byla zjištěna měřením v laboratorních podmínkách pod umělou oblohou. Výsledky měření jsou shrnuté v následující tabulce č. 3.

Samozřejmě největší účinnost přenosu světla má samotný tubus světlovodu, bez difuzoru a bez kopule. Lepší účinnost měl materiál nazvaný obchodním názvem Spectralight Infinity - polymerová vrstva na hliníku, která vykazovala větší odrazivost světla. Větší ztrátový podíl měl difuzor než kopule.

	Jednotky	VZOREK 1 - Spectralight Infinity (polymerová vrstva na hliníku) - bez kopule - bez difuzoru	VZOREK 2a - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - bez kopule - bez difuzoru	VZOREK 2b - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - s kopulí - bez difuzoru	VZOREK 2c - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - bez kopule - s difuzorem	VZOREK 2d - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - s kopulí - s difuzorem
Světelný tok vstupující do světlovodu $\Phi_e$	[lm]	114,662	111,574	111,371	105,734	103,491
Světelný tok vystupující ze světlovodu $\Phi_i$	[lm]	103,011	96,195	85,288	63,31	55,548
Naměřená účinnost přenosu difúzního světla $E_{fiv}$	[-]	0,8984	0,8622	0,7658	0,5988	0,5367
Činitel difúzní světelné propustnosti $E_{fifir} \pm u$	[-]	<b>0,8856 ± 0,0557</b>	<b>0,8483 ± 0,0557</b>	<b>0,7491 ± 0,0557</b>	<b>0,5770 ± 0,0557</b>	<b>0,5367 ± 0,0557</b>
Zpětný odraz - Světelný tok vstupující do světlovodu $\Phi_{e-ZO}$	[lm]	117,925	111,619	-	113,606	-
Zpětný odraz - Světelný tok vystupující ze světlovodu $\Phi_{ei-ZO}$	[lm]	0,883	1,207	-	16,459	-
Zpětný odraz - Naměřená účinnost přenosu difúzního světla $E_{fiv-ZO}$	[-]	0,0075	0,0108	-	0,1449	-

Tabulka 3: Světelná účinnost světlovodu průměru 530 mm, délky 1170 mm





## 9. VÝPOČETNÍ MODELY

Poslední důležitou částí této práce je aplikace vzorků světlovodů na zahraniční matematické výpočetní modely a porovnání vypočítaných a naměřených hodnot.

Tyto výpočetní modely jsou založeny nejen na teoretických modelech, ale využívají také empirické postupy, které stojí na hodnotách ze světelných měření. A to z toho důvodu, že ve většině případech nemůžeme postihnout analytickými modely popis fyzikálních realit. Jedním z případů jsou směrové odrazy v tubusu při různém rozložení jasů na obloze a při pronikání slunečních paprsků do světlovodu.

Pro porovnání naměřených výsledků s matematickými modely byly vybrány tři výpočetní metody a to Luxplot package model (JENKINS, a další, 2005), tabulková metoda zveřejněná v dokumentu CIE: 173 (2006) a výpočetní software nazvaný HOLIGILM (KOCIFAJ, a další, 2008).

Abychom mohli jednotlivé metody porovnat, bylo důležité si předem stanovit odrazivost povrchu světlovodného tubusu a ztrátové činitele prostupu světla skrz kopuli a difuzor. Pro vzorek označený číslem 1, byl použit tubus z materiálu Spectralight Infinity – což je polymerová vrstva na hliníku a odrazivost je dána hodnotou  $\rho_1 = 0,950$ . Pro vzorek číslo 2, vyrobené z materiálu Micro Silver 27 neboli pokovovaný hliník, byla odrazivost stanovena hodnotou  $\rho_2 = 0,930$ . Ztrátový činitel čiré akrylátové kopule  $\tau_{kop} = 0,90$ , difuzor světlovodu byl vyroben z PMMA (polymethylmethakrylát) průsvitného strukturovaného materiálu, jehož ztrátový činitel odpovídá hodnotě  $\tau_{dif} = 0,70$ . V případě vzorku 2d byla použita jak kopule, tak difuzor a proto se ztrátový činitel rovná:

$$\tau_{kop+dif} = \tau_{kop} \cdot \tau_{dif} = 0,90 \cdot 0,7 = 0,63 \quad [23]$$

Kde je:  $\tau_{kop+dif}$  ztrátový činitel vzorku s kopulí i difuzorem [-]

$\tau_{kop}$  ztrátový činitel vzorku s kopulí [-],  $\tau_{kop} = 0,90$

$\tau_{dif}$  ztrátový činitel vzorku s difuzorem [-],  $\tau_{dif} = 0,70$



### 9.1. *Luxplot package model*

Tento návrhová pomůcka má sloužit pro výpočet osvětlenosti od světlovodu na pracovní rovině. Model pracuje s kosinovým zákonem pro osvětlenost k popsání rozložení světla od difuzoru světlovodu a také s výsledky kontrolních měření, proto se jedná o empirickou metodu. Z výpočtu se stanovuje světelný tok v libovolné vzdálenosti pod stropním difuzorem pro jakoukoliv velikost světlovodu. Proto byly zkoušeny světlovody o průměrech 0,30m až 0,53 m a délek 0,60 m až 5,40 m.

Teorie používá vztah, který určuje světelný tok vstupující do světlovodu, ten závisí na exteriérové osvětlenosti a průřezu světlovodu a je stanoven následovně:

$$\Phi_e = E_e \cdot \pi \cdot r^2 \quad [24]$$

Kde je:  $\Phi_e$  světelný tok vstupující do světlovodu [lm]

$E_e$  exteriérová osvětlenost [lx]

$r$  poloměr tubusu světlovodu [m]

Celkový světelný tok vystupující z přímého tubusu světlovodu pak bude odpovídat vztahu:

$$\Phi_i = \tau \cdot E_e \cdot \pi \cdot r^2 \quad [25]$$

Kde je:  $\Phi_i$  světelný tok vystupující ze světlovodu [lm]

$\tau$  ztrátový činitel celého světlovodu [-]

$E_e$  exteriérová osvětlenost [lx]

$r$  poloměr tubusu světlovodu [m]

Toto je základní rovnice stanovující světelný tok. Exteriérová osvětlenost  $E_e$  a poloměr  $r$  jsou měřitelné hodnoty, takže pouze činitel  $\tau$  je potřeba zjistit. Zatímco ostatní dokumenty, řešící tuto problematiku, se snaží popsat ztrátový činitel celého světlovodu pomocí velkého množství proměnných, které jsou velmi obtížně kvantifikovány, cílem této teorie bylo tento vztah co nejvíce zjednodušit. Proto byl zaveden tzv. činitel tvaru  $A$  (Aspect Ratio), který je dán poměrem délky tubusu světlovodu k jeho průměru:

$$A = l/d \quad [26]$$

Kde je:  $A$  činitel tvaru  $A$  (Aspect Ratio) [-]

$l$  délka tubusu světlovodu [m]



$d$  průměr tubusu světlovodu [m]

Potřebná data pro další práci byla získána pomocí testovacích měření, které probíhaly na Nottinghamské universitě. Zde byl měřen tubus světlovodu o průměru 0,3 m a délek v rozmezí 0,6 m až 5,4 m. Z výsledků bylo konkrétně zjištěno, že:

$$\tau = 0,82e^{-0,11A} \quad [27]$$

Kde je:  $\tau$  ztrátový činitel celého světlovodu [-]

$A$  činitel tvaru (Aspect Ratio) [-]

Je patrně, že i při nulové délce světlovodu, není přenos světla roven jedné, to je způsobeno tím, že kopule a difuzor mají také své ztrátové činitele, tzn., že pohlcují světlo. Koeficient 0,82 byl stanoven tak, že pokud připojíme kopuli přímo na difuzor, transportujeme 82% světla z exteriéru. A hodnota 0,82 tak odpovídá kombinované propustnosti kopule a světlovodu.

Pro použití této metody pro měřené vzorky pod umělou oblohou na Slovenské akademii věd, je potřeba výpočetní vztahy Luxplot package modelu trochu poupravit. Použitý koeficient 0,82 se jeví až příliš optimisticky, proto ve vzorcích zohledníme výše uvedené ztrátové činitele kopule a difuzoru a mělo by platit:

$$\tau = \tau_{kop} \cdot \tau_{dif} \cdot e^{-0,11A} = \tau_{kop} \cdot \tau_{dif} \cdot e^{-0,11/l/d} = \tau_{kop} \cdot \tau_{dif} \cdot e^{-0,11*1,17*0,53} \quad [28]$$

kde je:  $\tau$  ztrátový činitel celého světlovodu [-]

$A$  činitel tvaru (Aspect Ratio) [-],  $A = l/d$

$l$  délka tubusu světlovodu [m],  $l = 1,17$  m

$d$  průměr tubusu světlovodu [m],  $d = 0,53$  m

$\tau_{kop}$  ztrátový činitel kopule [-],  $\tau_{kop} = 0,90$

$\tau_{dif}$  ztrátový činitel difuzoru [-],  $\tau_{dif} = 0,70$

$$\tau_{vzorku1} = \tau_{kop} \cdot \tau_{dif} \cdot e^{-0,11*1,17*0,53} = 1 \cdot 1 \cdot e^{-0,11*1,17*0,53} \quad \text{- bez kopule a difuzoru}$$

$$\tau_{vzorku2a} = \tau_{kop} \cdot \tau_{dif} \cdot e^{-0,11*1,17*0,53} = 1 \cdot 1 \cdot e^{-0,11*1,17*0,53} \quad \text{- bez kopule a difuzoru}$$






$$\tau_{vzorku2b} = \tau_{kop} \cdot \tau_{dif} \cdot e^{-0,11*1,17*0,53} = 0,9 \cdot 1 \cdot e^{-0,11*1,17*0,53} \quad \text{- s kopulí a bez difuzoru}$$

$$\tau_{vzorku2c} = \tau_{kop} \cdot \tau_{dif} \cdot e^{-0,11*1,17*0,53} = 1 \cdot 0,7 \cdot e^{-0,11*1,17*0,53} \quad \text{- bez kopule a s difuzorem}$$

$$\tau_{vzorku2d} = \tau_{kop} \cdot \tau_{dif} \cdot e^{-0,11*1,17*0,53} = 0,9 \cdot 0,7 \cdot e^{-0,11*1,17*0,53} \quad \text{- s kopulí a s difuzorem}$$



Výsledné hodnoty výpočtu účinnosti přenosu difúzního světla tubusovým světlovodem dle Luxplot package modelu jsou uvedeny v tabulce 4:

Výpočetní metoda	Činitel účinnosti přenosu difúzního světla				
	VZOREK 1 Spectralight Infinity (polymerová vrstva na hliníku) - bez kopule - bez difuzoru 	VZOREK 2a - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - bez kopule - bez difuzoru 	VZOREK 2b - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - s kopulí - bez difuzoru 	VZOREK 2c - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - bez kopule - s difuzorem 	VZOREK 2d - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - s kopulí - s difuzorem 
Luxplot package model	0,7844	0,7844	0,7060	0,5491	0,4942

Tabulka 4: Činitel účinnosti přenosu difúzního světla dle Luxplot package modelu

## 9.2. Výpočetní metoda dle CIE 173:2012 Tubular Daylight Guidance Systems

CIE je mezinárodní komisí pro osvětlování (International Commission on Illumination), je organizace s mezinárodní spoluprací pro výměnu informací mezi členskými státy ve všech otázkách týkajících se umělému i dennímu osvětlení. Členové jsou zástupci asi 40 zemí.

Tento dokument byl vypracován technickým výborem 3-38 pod divizí 3 – „Vnitřní prostředí a návrh osvětlení“. Obsahuje technologickou revizi všech typů světlovodných systémů pro denní světlo. Hlavní části se zabývají fotometrií komponentů i celých systémů, metodou návrhu, problémy s údržbou, energetickými hledisky, náklady a přínosy, ale také lidskými faktory a architektonickými otázkami. Zpráva obsahuje i příkladové studie, které ukazují povedené projekty z praxe.

Metoda umožňuje hodnocení účinnosti celé řady konfigurací pasivních světlovodných systémů, včetně vlivu zalomení. Účinnosti přenosu tubusu



světlovodu *TTE* (Transmission Tube Efficiencies) jsou pro zjednodušení uvedeny v tabulce, pro různé délky, průměry a odrazivosti nebo je možné tuto účinnost vypočítat dle vztahu:

$$TTE = \frac{e^{\frac{l}{d} \tan \theta \ln \rho}}{\left(1 - \frac{l}{d} \tan \theta \ln \rho\right)^{0,5}} \quad [29]$$

kde je: *TTE* účinnosti přenosu tubusu (Transmission Tube Efficiencies) [-]

*l* délka tubusu světlovodu [m]

*d* průměr tubusu světlovodu [m]

$\theta$  úhel výseku oblohy [rad,°]

$\rho$  činitel odrazu světla na vnitřním povrchu světlovodu [-]

Abychom zjistili globální neboli celkovou účinnost světlovodu *EG* (Global Efficiency), musíme opět zohlednit vliv kopule a vliv difuzoru. Ty byly v této metodě stanoveny koeficientem 0,63, ten se jeví již pravděpodobněji než u předešlé metody. Vztah pro celkovou účinnost světlovodu je popsán jako:

$$EG = TTE \cdot 0,63 \cdot MF \quad [30]$$

kde je: *EG* celková účinnost světlovodu (Global Efficiency) [-]

*TTE* účinnosti přenosu tubusu (Transmission Tube Efficiencies), [-]

*MF* udržovací činitel (Maintenance factor) [-]

Pro konkrétní případ měřených vzorků je potřeba výše uvedené vztahy dle metodiky uvedené v CIE 173:2012 přizpůsobit. Vztah pro účinnost přenosu tubusu je pro vzorek 1 odlišný od vzorků 2 (2a až 2d) a to z důvodu odlišných materiálů a tedy i odrazivostí tubusů.

$$\begin{aligned} TTE &= \frac{e^{\frac{l}{d} \tan \theta \ln \rho}}{\left(1 - \frac{l}{d} \tan \theta \ln \rho\right)^{0,5}} = \frac{e^{\frac{1,17}{0,53} \tan 30 \ln 0,95}}{\left(1 - \frac{1,17}{0,53} \tan 30 \ln 0,95\right)^{0,5}} = 0,9075 - \text{pro vzorek 1} \\ &= \frac{e^{\frac{1,17}{0,53} \tan 30 \ln 0,93}}{\left(1 - \frac{1,17}{0,53} \tan 30 \ln 0,93\right)^{0,5}} = 0,8722 - \text{pro vzorky 2a-2d} \end{aligned}$$

kde je: *TTE* účinnosti přenosu tubusu (Transmission Tube Efficiencies) [-]

*l* délka tubusu světlovodu [m],  $l = 1,17$  m



- $d$  průměr tubusu světlovodu [m],  $d = 0,53$  m
- $\theta$  úhel výseku oblohy [rad,°],  $\theta = 30^\circ$  = realistický výsek oblohy kolem zenitu s nejefektivnějšími účinky oblohových jasů
- $\rho$  činitel odrazu světla na vnitřním povrchu světlovodu [-],  
 $\rho_1 = 0,95$  pro vzorek 1,  
 $\rho_{2a}, \rho_{2b}, \rho_{2c}, \rho_{2d} = 0,93$  pro vzorky 2a, 2b, 2c a 2d

Celkovou účinnost světlovodu vycházející ze vztahu [30] je potřeba pro zkušební měřené vzorky také upravit, opět se jedná o úpravu koeficientu, zohledňující vliv kopule a difuzoru. Ten bude upraven stejně jako u Luxplot package modelu. A objevuje se zde navíc udržovací činitel, který se pro laboratorní podmínky rovná hodnotě 1. Pro reálné výpočty je v dokumentu uvedena tabulka pro udržovací činitel ( $MF$ ), který například pro horizontální světlovod v obytné místnosti v městské zástavbě odpovídá hodnotě 0,76.

$$EG = TTE \cdot 0,63 \cdot MF = TTE \cdot \tau_{kop} \cdot \tau_{dif} \cdot 1 \quad [31]$$

kde je:  $EG$  celková účinnost světlovodu (Global Efficiency) [-]

$TTE$  účinnosti přenosu tubusu (Transmission Tube Efficiencies), [-]

$TTE = 0,9075$  - pro vzorek 1

$TTE = 0,8722$  - pro vzorky 2a-2d

$\tau_{kop}$  ztrátový činitel kopule [-],  $\tau_{kop} = 0,90$

$\tau_{dif}$  ztrátový činitel difuzoru [-],  $\tau_{dif} = 0,70$

$MF$  udržovací činitel (Maintenance factor) [-],  $MF = 1$  – pro laboratorní podmínky měřících vzorků

$$EG_{vzorku\ 1} = TTE \cdot \tau_{kop} \cdot \tau_{dif} \cdot 1 = 0,9075 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,9075 \quad - \text{ bez kopule a difuzoru}$$

$$EG_{vzorku\ 2a} = TTE \cdot \tau_{kop} \cdot \tau_{dif} \cdot 1 = 0,8722 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,8722 \quad - \text{ bez kopule a difuzoru}$$

$$EG_{vzorku\ 2b} = TTE \cdot \tau_{kop} \cdot \tau_{dif} \cdot 1 = 0,8722 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 1 = 0,7850 \quad - \text{ s kopulí a bez difuzoru}$$

$$EG_{vzorku\ 2c} = TTE \cdot \tau_{kop} \cdot \tau_{dif} \cdot 1 = 0,8722 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 1 = 0,6105 \quad - \text{ bez kopule a s difuzorem}$$

$$EG_{vzorku\ 2d} = TTE \cdot \tau_{kop} \cdot \tau_{dif} \cdot 1 = 0,8722 \cdot 0,9 \cdot 0,7 \cdot 1 = 0,5495 \quad - \text{ s kopulí a s difuzorem}$$



Výsledné hodnoty výpočtu celkové účinnosti přenosu difúzního světla tubusovým světlovodem dle metody CIE 173:2012 jsou uvedeny v tabulce 5:

Výpočetní metoda	Činitel účinnosti přenosu difúzního světla				
	VZOREK 1 Spectralight Infinity (polymerová vrstva na hliníku) - bez kopule - bez difuzoru	VZOREK 2a - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - bez kopule - bez difuzoru	VZOREK 2b - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - s kopulí - bez difuzoru	VZOREK 2c - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - bez kopule - s difuzorem	VZOREK 2d - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - s kopulí - s difuzorem
CIE 173:2012	0,9075	0,8722	0,7850	0,6105	0,5495

Tabulka 5: Činitel účinnosti přenosu difúzního světla dle CIE 173:2012

### 9.3. Výpočetní software *HOLIGILM (Hollow light guide interior illumination method)*

Program HOLIGILM počítá osvětlení obdélníkové místnosti s použitím tubusového světlovodu jako světelného zdroje. Díky použití sofistikovaných metod (např. analytické řešení), je velmi rychlý. Tento program je volně dostupný (plná verze) na <http://www.holigilm.info>.

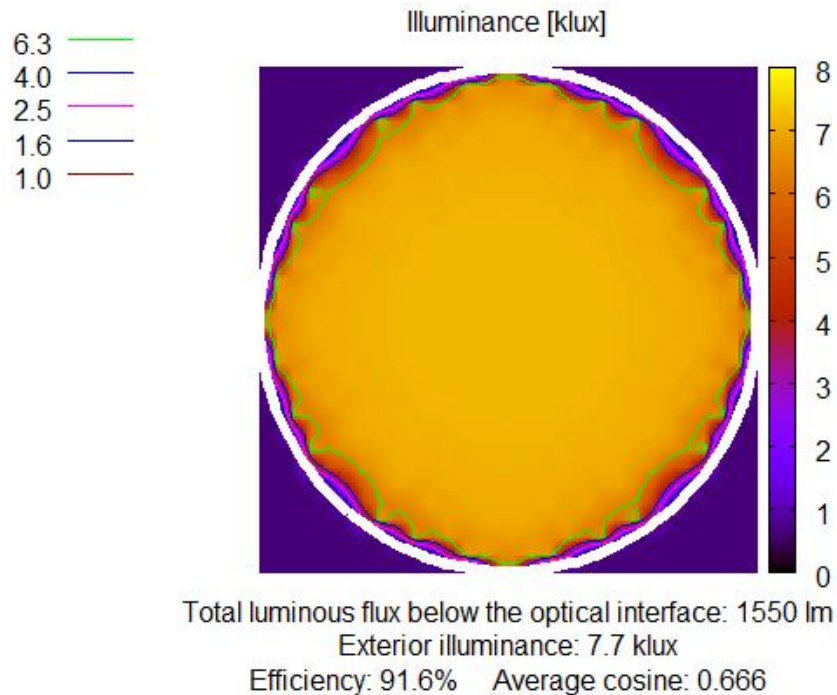
Po nainstalování programu je možné zadat rozměry pravoúhlé místnosti, popřípadě i její orientaci (nepracujete-li s modelem rovnoměrně zatažené oblohy). Pracovat se dá ze všemi 15 standartními typy obloh dle CIE, nebo je možné si nastavit i vlastní polohu Slunce.

Software dále umožňuje zadat až 10 tubusových světlovodů do jedné místnosti u kterých lze nastavit jejich průměr, průhlednost kupole, délku tubusu a jeho vnitřní odrazivost, průhlednost či difuznost spodní části světlovodu – tzn. difuzéru.

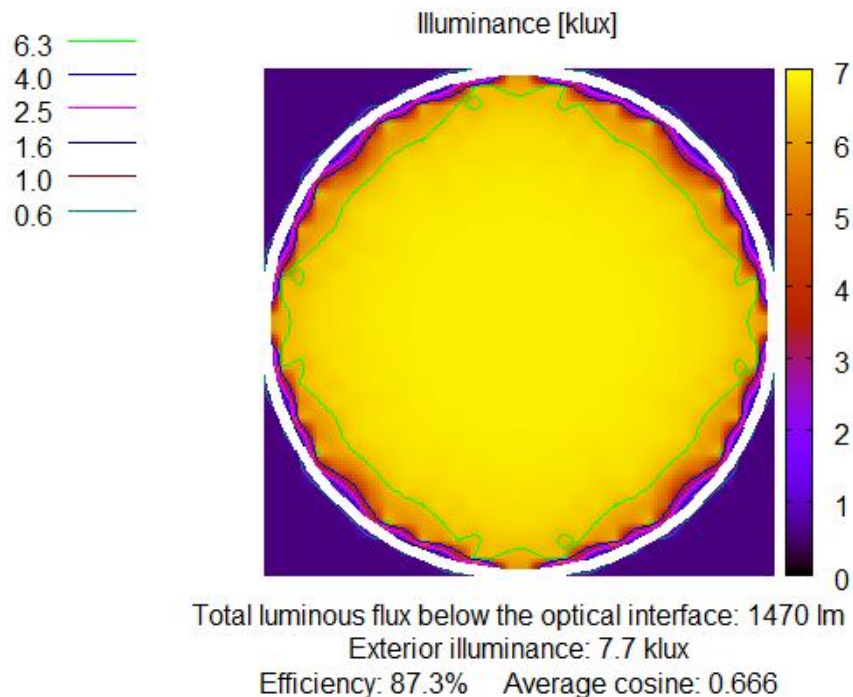
Po provedení výpočtu je možné si zvolit počet izofot na srovnávací rovině. Pokud je výsledná hodnota osvětlení velice nízká, je vhodné si nastavit limity pro



zobrazování. Výsledkem je také účinnost přenosu světla tubusovým světlovodem, která byla využita pro měřené modely. Pro výpočet byly samozřejmě použity stejné zadávací podmínky, jako u ostatních výpočetních metod. Jejich grafické vyobrazení je patrné na obrázcích níže – obr. 24 až 28.

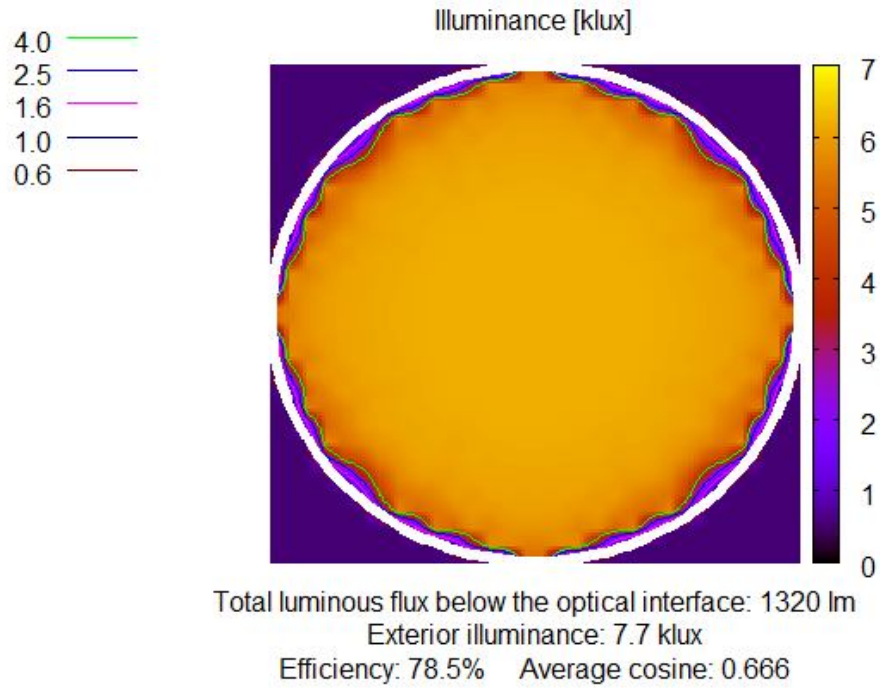


Obrázek 24: Výpočet účinnosti transportu světla pomocí programu HOLIGILM – vzorek 1

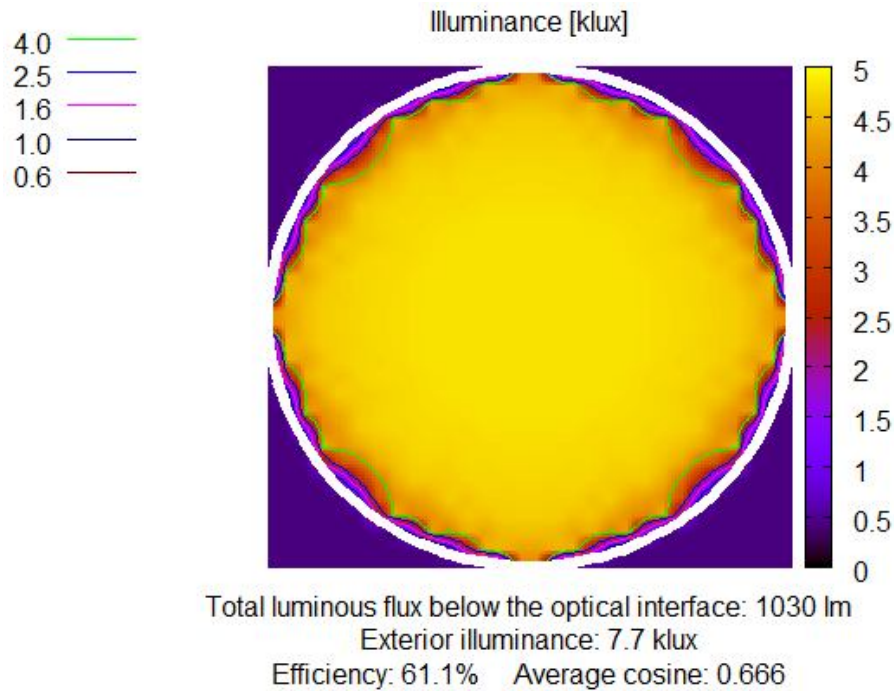


Obrázek 25: Výpočet účinnosti transportu světla pomocí programu HOLIGILM – vzorek 2a

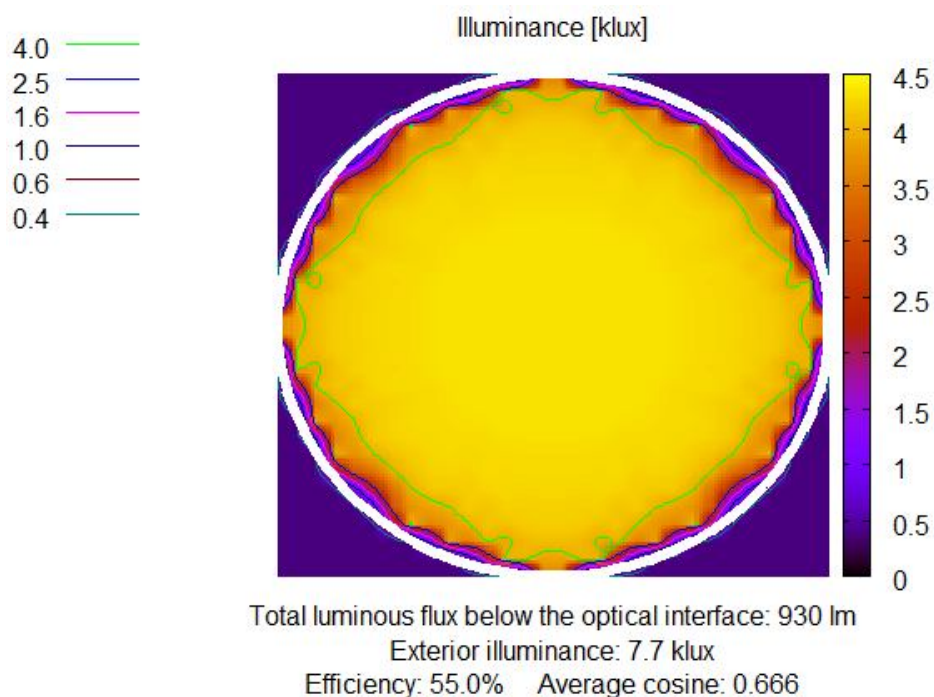




Obrázek 26: Výpočet účinnosti transportu světla pomocí programu HOLIGILM – vzorek 2b



Obrázek 27: Výpočet účinnosti transportu světla pomocí programu HOLIGILM – vzorek 2c



Obrázek 28: Výpočet účinnosti transportu světla pomocí programu HOLIGILM – vzorek 2d

Výsledné hodnoty výpočtu celkové účinnosti přenosu difúzního světla tubusovým světlovodem dle výpočetního programu HOLIGILM jsou uvedeny v tabulce 6:

Výpočetní metoda	Činitel účinnosti přenosu difúzního světla				
	VZOREK 1 Spectralight Infinity (polymerová vrstva na hliníku) - bez kopule - bez difuzoru	VZOREK 2a - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - bez kopule - bez difuzoru	VZOREK 2b - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - s kopulí - bez difuzoru	VZOREK 2c - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - bez kopule - s difuzorem	VZOREK 2d - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - s kopulí - s difuzorem
HOLIGILM	0,916	0,873	0,785	0,611	0,550






Tabulka 6: Činitel účinnosti přenosu difúzního světla dle HOLIGILM



#### 9.4. Shrnutí výsledků výpočetních metod

Pro měřené vzorky, které jsou popsány v kapitole 8.4, byly vybrány 3 výpočetní metody, které vyčíslují účinnost přenosu světla tubusovým světlovodem. Jednalo se o Luxplot package model, výpočetní tabulka dle dokumentu CIE 173:2012 a o výpočetní software s názvem HOLIGILM. Výpočty byly zpracovány se vstupními daty popsány v kapitole 9.

Veškeré výsledky jsou shrnuty v tabulce č.7. Tabulka ukazuje, že rozdíly mezi naměřenými hodnotami účinnosti přenosu difúzního světla a vypočítanými hodnotami se pohybují max. do 10%, průměrně však jen o 5%.

Výpočetní metoda	Činitel účinnosti přenosu difúzního světla				
	VZOREK 1 Spectralight Infinity (polymerová vrstva na hliníku) - bez kopule - bez difuzoru 	VZOREK 2a - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - bez kopule - bez difuzoru 	VZOREK 2b - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - s kopulí - bez difuzoru 	VZOREK 2c - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - bez kopule - s difuzorem 	VZOREK 2d - Miro Silver 27 (pokovovaný hliník) - s kopulí - s difuzorem 
Měření	0,8856 ±0,0557	0,8483 ±0,0557	0,7491 ±0,0557	0,5770 ±0,0557	0,5130 ±0,0557
Luxplot package model	0,7844	0,7844	0,7060	0,5491	0,4942
CIE 173:2012	0,9075	0,8722	0,7850	0,6105	0,5495
HOLIGILM	0,916	0,873	0,785	0,611	0,550

Tabulka 7: Činitel účinnosti přenosu difúzního světla dle měření pod umělou oblohou a dle výpočetních metod



## 10. ZÁVĚR

To, že nám denní světlo prospívá, a že je uvnitř interiérů nepostradatelným prvkem, je již dobře známo. Má lepší barvu i vlastnosti než většina umělých světlených zdrojů. Navíc jeho optimální využívání snižuje spotřebu energie. Použitím světlovodů můžeme tento trend podpořit v podobě dosvětlování prostor, které nelze dostatečně, nebo vůbec osvětlit denním světlem distribuovaným okny. Jedná se o transport difúzního světla, které do interiéru nepřináší tak velké tepelné zisky, jako přímé denní osvětlení. Může proto pomoci i ve snížení spotřeby energie pro chlazení.

Tato práce popisuje nejen krátký vývoj světlovodů, řešení problematiky světlovodů v České republice, ale také v zahraničí. Věnuje se i základům světlené techniky, optiky a samotného vidění, bez jejíž základu by nemusely být správně pochopeny některé části dokumentu.

Požadavky, které jsou kladeny na denní osvětlení, jsou v České Republice jedny z nejpropracovanějších a proto také jedny z nejpřísnějších. Proto se i naše Česká republika podílí na vytvoření evropských standardů s požadavky na denní světlo, které budou v počátku jistě méně přísné, než naše národní předpisy, ale dále se na nich dá pracovat a poukazovat na vhodnost použití dle našich dosavadních zkušeností.

Jedna z kapitol je věnovaná jednotlivým částím světlovodů, a materiálům, které se pro výrobu světlovodů používají. Každá z částí má svůj účel a proto materiál zvolený pro jeho výrobu musí plnit kritéria, která jsou na něj kladena. Důležitou vlastností je samozřejmě kvalita a životnost materiálu.

Pro výzkumný záměr, který byl pro tuto práci nutnou součástí, bylo umožněno využít laboratoř umělé oblohy na Slovenské akademii věd (SAV). Zde byly naměřeny osvětlenosti distribuované samotnými vzorky světlovodů. Spolupráce se SAV a především s vedoucím oddělením stavební fyziky docentem Stanislavem Darulou mi umožnila nejen získat jedinečné a velmi cenné zkušenosti s výzkumem, ale hlavně jsem mohla sama pracovat na svém projektu od samého začátku, tzn. od



přípravy vzorků, laboratoře, až po samotné měření a finálním zpracováním výsledků. Po zpracování výsledků byly vyčísleny i účinnosti transportu difúzního světla, které byly srovnávány s výpočetními metodami.

Důležitou částí každé výzkumné práce spojenou s měřením je seznámení se s měřicími přístroji a jejich kalibrace. Stářím a používáním přístrojů postupně degradují a zvyšuje se jejich měřicí chyba. Nejlepší variantou je kalibrace přístrojů stejnými osobami, které pak provádějí samotné měření. Dokáží pak lépe odhalit případné chyby měření způsobené měřicím přístrojem a zároveň s nimi lépe umějí pracovat. Proto bylo provedeno několik kontrolních měření luxmetrů ve fotometrické laboratoři a s mírnými zjištěnými odchylkami se dále počítalo.

Výpočetní modely jsou převzaté ze zahraničních zdrojů. Po jejich důkladném nastudování jsou některé koeficienty upraveny, aby přesněji popisovaly měřené vzorky světlovodů a aby na uvedených příkladech ukázaly vhodnost jejich použití.

Závěrem lze konstatovat, že se upravené výpočetní metody i naměřené výsledky účinnosti transportu denního světla světlovodem shodovaly s rozdílem max. 10%, což je pozitivní výsledek. Proto jsou výše uvedené metodiky použitelné s mírnými úpravami i pro další výpočty spojené s požadavky na denní osvětlení v České republice. Při výpočtech, či návrhu denního osvětlení, kde budou využity také světlovody, je však nutností se v dané problematice dobře orientovat a použité koeficienty používat s dobrou znalostí jejich podstaty.

Disertační práce přináší nejen teoretické poznatky o světlovodech ze zahraniční a tuzemské literatury, ale využívá je dále pro laboratorní měření, které bylo pro výzkum nezbytnou součástí. Naměřené hodnoty účinnosti transportu světla světlovodem umožnily lépe popsat a pochopit matematické modely, které je možné s mírnými úpravami používat nyní i v praxi. V budoucnu je potřeba se zaměřit na nové materiály, které by mohly efektivnost transportu světla světlovodem ještě zlepšit, jelikož světelné ztráty, které jsou způsobeny prostupem skrz kopuli, mnohonásobnými odrazy a prostupem skrz difuzor jsou stále vysoké a proto by mohly být dále snižovány.



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Princip funkce světlovodu a jeho základní části:.....	10
Obrázek 2: Osvětlovací soustava P.N. Čikoleva s dutými koncovými světlovody v Ochtinské prachové továrně – zdroj: (AIZENBERG, 2001).....	14
Obrázek 3: Porovnání výsledků výpočtu přímé osvětlenosti s naměřenými hodnotami při rovnoměrně zatažené obloze (DARULA, a další, 2009)...17	
Obrázek 4: Grafické znázornění rozložení vypočtené přímé osvětlenosti na srovnávací rovině (DARULA, a další, 2009) .....	17
Obrázek 5: Spektrum elektromagnetických záření s orientačním členěním podle kmitočtů a vlnových délek (HABEL, a další, 2013).....	19
Obrázek 6: Rozložení barevných tónů ve spektrální oblasti viditelného záření (SOKANSKÝ, a další, 2011).....	20
Obrázek 7: Azimut slunce (KÖSTER, 2004) .....	20
Obrázek 8: Vztah mezi zeměpisnou šířkou a výškou slunce na severní zeměpisné šířce 51° (KÖSTER, 2004).....	21
Obrázek 9: Zobrazení denních a ročních slunečních drah na zeměpisné šířce 51° (KÖSTER, 2004) .....	21
Obrázek 10: Svislý řez lidským okem (Fyzika, 2010) .....	23
Obrázek 11: Poměrná světelná účinnost monochromatického záření (NAVRÁTIL, 2006) .....	27
Obrázek 12 - Schéma světlovodu (Solatube, 2015) .....	45
Obrázek 13: Příklad difúzních mechanismů: a) posuvná difúze, b) difúze na volné místo, c) difúze substitucí nebo vyražením.....	53
Obrázek 14: Schematické obrázky testovaných vzorků světlovodů o průměru 530 mm a délky 1 170 mm .....	59
Obrázek 15: Kopule světlovodu .....	59
Obrázek 16: Tubus světlovodu.....	60
Obrázek 17: Difuzor světlovodu.....	60



Obrázek 18: a) Luxmetr Precision Photometer Bruel-Kjaer 1105, b) Luxmetr Extech 450 č. 14.....	61
Obrázek 19: jasoměr Minolta Luminance Meter 1°, v. č. 401711. ....	62
Obrázek 20: Senzor Precision Photometer Bruel Kjaer 1105 na fotometrické lavici při kalibraci.....	63
Obrázek 21: Pohled ze světlovodu na umělou oblohu (vlevo), včetně jasové mapy (vpravo).....	66
Obrázek 22: Kontrola jasů umělé oblohy pomocí jasoměru Minolta umístěného nad límcem světlovodu.....	67
Obrázek 23: Měření zpětného odrazu pomocí dvou čidel luxmetrů Extech č. 14 (vstupující osvětlenost) a č.15 (zpětný odraz) .....	69
Obrázek 24: Výpočet účinnosti transportu světla pomocí programu HOLIGILM – vzorek 1.....	84
Obrázek 25: Výpočet účinnosti transportu světla pomocí programu HOLIGILM – vzorek 2a .....	84
Obrázek 26: Výpočet účinnosti transportu světla pomocí programu HOLIGILM – vzorek 2b.....	85
Obrázek 27: Výpočet účinnosti transportu světla pomocí programu HOLIGILM – vzorek 2c .....	85
Obrázek 28: Výpočet účinnosti transportu světla pomocí programu HOLIGILM – vzorek 2d.....	86



## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Požadavky na osvětlení pro administrativní prostory a činnosti (EN12464-1; 2012).....	36
Tabulka 2: Používané hodnoty nejistot pro měření pod umělou oblohou. ....	69
Tabulka 3: Světelná účinnost světlovodu průměru 530 mm, délky 1170 mm .....	76
Tabulka 4: Činitel účinnosti přenosu difúzního světla dle Luxplot package modelu .....	80
Tabulka 5: Činitel účinnosti přenosu difúzního světla dle CIE 173:2012.....	83
Tabulka 6: Činitel účinnosti přenosu difúzního světla dle HOLIGILM .....	86
Tabulka 7: Činitel účinnosti přenosu difúzního světla dle měření pod umělou oblohou a dle výpočetních metod.....	87

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Lineární závislost mezi sondou referenčního luxmetru a etalonu .....	63
Graf 2: Lineární závislost mezi kalibrovaným luxmetrem Extech č.14 a sondou referenčního luxmetru Brüel.....	64
Graf 3: Lineární závislost mezi kalibrovaným luxmetrem Extech č.15 a sondou referenčního luxmetru Brüel.....	65
Graf 4: Grafické znázornění kontroly jasů rovnoměrně zatažené oblohy při tmavém terénu dle CIE z 9.7.2013 .....	66





## LITERATURA

**361/2007Sb., Nařízení vlády. 2007.** *kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci.* Praha : Vláda České republiky, 2007.

**AIZENBERG, J. B. 2001.** Historie vývoje a užití dutých světlovodů (History of the development and use of hollow light guides). *Světlo.* 4, 2001, Sv. 1, stránky 8-10.

**ALLEN, T. 1997.** *Conventional tubular skylights an evaluation of the daylighting systems at two ACT commercial buildings.* Washington DC : autor neznámý, 1997. stránky 97-129.

**BAŽANTOVÁ, Z., a další. 2005.** *Stavební hmoty.* Bratislava : Jaga group, s.r.o., 2005. Sv. 1. vydání. ISBN 80-8076-007-1.

**CALLOW, J. M. 2003.** *Daylighting using tubular light guide systems.* University of Nottingham. 2003. PhD. Thesis.

**CARTER, D. J. 2002.** The measured and predicted performance of passive solar light pipe systems. *Lighting Research and Technology.* 33, 2002, Sv. 1, stránky 39-53.

**CIE. 2006.** *Tubular light guide system 173:2006.* Vienna : Central Burea, 2006. Sv. Technical Report.

**ČIKOLEV, V. N. 1880.** *Kanalizacija električeskogo sveta.* místo neznámé : Električestvo, 1880. stránky 168, 187. Sv. No.11, No.12.

**ČSN730580-1. Z1-2011.** *Denní osvětlení budov - Část 1: Základní požadavky.* Praha : Český normalizační institut, Z1-2011.

**ČSN730580-2. Z1-2014.** *Denní osvětlení budov. Část 2: Denní osvětlení obytných budov.* Praha : Český normalizační institut, Z1-2014.

**ČSN730580-3. Z2-1999.** *Denní osvětlení budov. Část 3: Denní osvětlení škol.* Praha : Český normalizační institut, Z2-1999.

**ČSN730580-4. Z2-1999.** *Denní osvětlení budov. Část 4: Denní osvětlení průmyslových budov.* Praha : Český normalizační institut, Z2-1999.

**DARULA, S., a další. 2010.** Tubular light guides: Estimation of indoor illuminance levels. *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America.* 2010, stránky 241-252.

**DARULA, Stanislav, a další. 2009.** *Osvětlování světlovody.* Praha : Grada, 2009. str. 160. ISBN 978-80-247-2459-1.



**EN12464-1: 2012.** *Light and Lighting - lighting of work places - Part 1: Indoor work places.* Brusel : European Committee for Standardization, 2012.

**FAUPELE, F, a další. 1999.** *Nucleation, growth, interdiffusion and adhesion of methal films on polymers.* Stuttgart : autor neznámý, 1999.

**Fyzika. 2010.** [Online] 2010.

<http://fyzika.gbn.cz/phprs/view.php?cislocianku=2004112001>.

**HABEL, Jiří, a další. 2013.** *Světlo a osvětlování.* Praha : FCC Public, 2013. str. 624. ISBN 978-80-86534-21-3.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2012.** Optimizing the design light guides including methods of measuring. Sheffield : Univerity of Sheffield, 2012, str. 25.

**JENKINS, D. a MUNEER, T. 2004.** Light-pipe prediction methods. 2004, Sv. 1, 78, stránky 77-96.

—. **2003.** Modelling light pipe performances. *Building and Environment.* 38, 2003, Sv. 7, stránky 965-972.

**JENKINS, D., MUNEER, T. a KUBIE, J. 2005.** A design tool for predicting the performances of light pipes. *Energy and Building,* 37,5. 2005, stránky 485-492.

**KAŇKA, Jan. 2012.** *Tubus světlovodu pod CIE oblohou.* Praha : Společnost pro techniku a prostředí, 2012. stránky 61-66.

**KOCIFAJ, M., DARULA, S. a KITTLER, R. 2008.** HOLIGILM: Hollow light guide interior illumination method - An analytic calculation approach for cylindrical light-tubes. *Solar Energy,* 82(3). 2008, stránky 247-259.

**KÖSTER, Helmut. 2004.** *Dynamic Daylighting Architecture - basics, systems, projects.* Basel : Birkhäuser Verlag AG, 2004. str. 160.

**LIGHTWAY. 2010.** Lightway, křišťálové světlovody. [Online] 2010.

<http://www.lightway.cz/>.

**MLEZIVA, Jan. 2000.** *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití.* Praha : Sobotáles, 2000. Sv. 2. přepracované vydání. ISBN 80-85920-72-7.

**NAVRÁTIL, Zdeněk. 2006.**

[http://vnuf.cz/sbornik\\_old/Veletrh\\_11/11\\_17\\_Navratil.html](http://vnuf.cz/sbornik_old/Veletrh_11/11_17_Navratil.html). *Demonstrace skládání barev.* [Online] 2006.

**OAKLEY, G., RIFFAT, S. B. a SHAO, L. 1999.** *Daylight performance of light-pipes.* Harrogate : autor neznámý, 1999. stránky 159-74.



- PLCH, Jiří, MOHELNÍKOVÁ, Jitka a SUCHÁNEK, Petr. 2004.** *Osvětlení neosvětlitelných prostor*. Brno : ERA group spol. s.r.o., 2004. str. 129. ISBN 80-86517-82-9.
- SLOTTE, J. 1999.** *Diffusion of impurities and vacancies in compound semiconductors*. Helsinky : Acta Polytechnica Scandinavica, 1999. Sv. Academic Dissertation.
- SOKANSKÝ, Karel, a další. 2011.** *SVĚTELNÁ TECHNIKA*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2011. str. 256. ISBN 978-80-01-04941-9.
- Sola System Slovakia, s.r.o. 2006-2015.** Solatube - Innovation in Daylight. [Online] 2006-2015. <http://www.solatube.sk/>.
- Solatube, Courtesy. 2015.** <http://www.solar-energy-at-home.com/solar-tube.htm>. *Solar Energy et Home*. [Online] 2015.
- SWIFT, P. D. a SMITH, G. B. 1999.** Cylindrical mirror light pipes. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 1999, str. 362.
- SWIFT, P.D., a další. 2006.** Hotspots in cylindrical mirror light pipes: Description and removal. *Lighting Research and Technology*, 38(1). 2006, stránky 19-31.
- Vyhláška 268/2009Sb. 2009.** *O technických požadavcích na stavby*. Praha : Ministerstvo pro místní rozvoj, 2009.
- Vyhláška 410/2005Sb. 2005.** *O hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých*. Praha : Ministerstvo zdravotnictví, 2005.
- WEIGLOVÁ, Jiřina, BEDLOVIČOVÁ, Daniela a KAŇKA, Jan. 2006.** *Stavební fyzika 1 - Denní osvětlení a oslunění budov*. Praha : Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. str. 130. ISBN 80-01-03392-9.
- ZASTROW, A a WITTEW, V. 1986.** *Daylighting with mirror light pipes and with fluorescent planar concentrators*. místo neznámé : SPIE - Materials and optics for solar energy conversion and advanced lighting technology, 1986. str. 692.
- ZHANG, X. a MUNEER, T. 2002.** A design guide for performance assessment of solar light-pipes. *Lighting Research and Technology*. 34, 2002, stránky 149-169.
- . 2000. A mathematical model for the performance of light-pipes. *Lighting Research and Technology*. 32, 2000, stránky 141-146.



## SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2011.** Komparativní analýza okenních otvorů z hlediska účinnosti poskytování denního osvětlení. *Otvorové výplně stavebních konstrukcí 2011*. Hradec Králové: Stavokonzult, stránky 67-70.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2011.** Vliv umístění a velikosti okenního otvoru na množství a kvalitu osvětlenosti interiéru. *Sborník příspěvků z mezinárodní vědecké konference CzechSTAV 2011 Inovace ve stavebnictví (Innovation in Building Construction)*. Hradec Králové: Magnanimitas, stránky 91-97. ISBN 978-80-904877-5-8.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2012.** Úroveň denního osvětlení v interiéru v závislosti na směru zasklení okenního otvoru. *ATELIÉR otvorových výplní, izolací a vybavení staveb*, roč. 1, č. 2-3/2012, stránky 11-13. ISSN 1212-4370.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2012.** Optimizing the design light guides including methods of measuring. *LumeNet2012*. Sheffield: University of Sheffield, stránky 25.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2012.** Optimisation of the Design of Daylight Guidance Systems Including Measurement Methodology. *EnviBuild 2012 - Buildings and Environment*. Brno: Technical University in Brno, Faculty of Civil Engineering, stránky 148-151. ISSN 1022-6680. ISBN 978-80-214-4600-7.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2012.** Regeneration of Precast Panel Buildings in Terms of Its Effect on Daylight. *EnviBuild 2012*. Brno: University of Technology, stránky 113-116. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03785-596-6.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2012.** Optimisation of the Design of Daylight Guidance Systems Including Measurement Methodology. *EnviBuild 2012*. Brno: University of Technology, stránky 97-100. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03785-596-6.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2012.** Regeneration of Precast Panel Buildings in Terms of Its Effect on Daylight. *EnviBuild 2012 - Buildings and Environment*. Brno: Technical University in Brno, Faculty of Civil Engineering, stránky 172-175. ISSN 1022-6680. ISBN 978-80-214-4600-7.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2012.** Vliv rekonstrukce obvodového pláště a doplňkového osvětlení na množství světla v obytné místnosti. *Poruchy a obnova obalových konstrukcí budov*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Stavebná fakulta, díl 1, stránky 107-114. ISBN 978-80-553-0798-5.



**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2012.** Světlovod ve střešní konstrukci - v horské oblasti. *Strechy 2012*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, díl 1, stránky 147-151. ISBN 978-80-227-3824-8.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2012.** Problematika denního osvětlení: Vliv okenního rámu na úroveň denního osvětlení. *Dřevěná okna, dveře, schody 2012*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, stránky 37-41. ISBN 978-80-7375-599-7.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2013.** Svetlovod v strešnej konštrukcii v horskej oblasti. *Stavebné materiály*. roč. IX, č. 04, stránky 20-21. ISSN 1336-7617.

**KITTLER, R., DARULA, S., JANEČKOVÁ, L. 2013.** Slunce jako významný přírodní zdroj světla v budovách. *Stavební obzor.*, roč. 9, č. 9/2013, stránky 221-224. ISSN 1210-4027.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2013.** Ostění a jeho vliv na denní osvětlení. *TZB info* [online]. roč. 15, Internet: <http://stavba.tzb-info.cz/denni-osvetleni-a-osluneni/10447-osteni-a-jeho-vliv-na-denni-osvetleni>. ISSN 1801-4399.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2013.** Optimisation of the Design of Daylight Guidance Systems Including Measurement Methodology. *Advanced Materials Research*. Durnten-Zurich: Scientific.net, vol. 1, stránky 97-100. ISSN 1662-8985. ISBN 978-3-03785-596-6.

**JANEČKOVÁ, L., DARULA, S., BOŠOVÁ, D. 2013.** Rozdíly mezi naměřenými 5-sekundovými daty a jejich integrovanými hodnotami při hodnocení dostupnosti denního osvětlení. *Progres techniky v architektúre*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, stránky 172-175. ISBN 978-80-227-4105-7.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2013.** The use of daylight for sustainable development. *LUX EUROPA Kraków 2013 - 12th European Lighting Conference*. Szczyrk: Polski Komitet Oświetleniowy SEP, vol. 1, stránky 361-365. ISBN 978-83-910849-6-0.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2013.** Daylight in interiors. *Structures and Architecture, Concepts, Applications and Challenges*. Leiden: CRC Press/Balkema, vol. 1, stránky 971-975. ISBN 978-0-415-66195-9.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2013.** Regeneration of Precast Panel Buildings in Terms of Its Effect on Daylight. *Advanced Materials Research*. Durnten-Zurich: Scientific.net, stránky 113-116. ISSN 1662-8985. ISBN 978-3-03785-596-6.

**JANEČKOVÁ, L. a BOŠOVÁ, D. 2013.** Ostění a jeho vliv na denní osvětlení. *Dřevěná okna, dveře, schody 2013*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, díl 1.



**JANEČKOVÁ, L., DARULA, S., BOŠOVÁ, D. 2013.** Differences between 5- second and X-minute intervals of daylight measurements. *enviBUILD 2013 - International conference proceedings*. Bratislava: STU v Bratislave, stránky 171-174. ISBN 978-80-227-4070-8.

**JANEČKOVÁ, L., DARULA, S., BOŠOVÁ, D. 2014.** Influence of instantaneous measured data on evaluation interval of daylighting. *Advanced Materials Research*. Durnten-Zurich: Trans Tech Publications, stránky 328-331. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-040-8.

**PROKOPOVÁ, L., DARULA, S., BOŠOVÁ, D. 2014.** Comparison of Two Coating Material Reflections of Hollow Light Guide Tube. *Envibuild 2014 - International Conference Buildings and Environment 2014*. Brno: Technical University in Brno, Faculty of Civil Engineering, vol. 1, stránky 412-418. ISBN 978-3-03826-664-8.

**PROKOPOVÁ, L., DARULA, S., BOŠOVÁ, D. 2014.** Transmission of skylight through tubular light guides. *LUMEN V4 2014*. Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, art. no. P24, ISBN 978-963-9299-21-4.

**PROKOPOVÁ, L., DARULA, S., BOŠOVÁ, D. 2014.** Comparison of Two Coating Material Reflections of Hollow Light Guide Tube. *enviBUILD 2014 - Buildings and Environment International Conference proceedings*. Brno: Technical University in Brno, Faculty of Civil Engineering, vol. 1, stránky 189. ISBN 978-80-214-5003-5.

**PROKOPOVÁ, L., DARULA, S., BOŠOVÁ, D. 2014.** Comparison of Two Coating Material Reflections of Hollow Light Guide Tube. *Advanced Materials Research*. Durnten-Zurich: Trans Tech Publications, stránky 412-415. ISSN 1022-6680. ISBN 978-3-03835-280-8.

**PROKOPOVÁ, L., DARULA, S., BOŠOVÁ, D. 2015.** Measurement and calculation method for transmission of light through tubular light guide. *Proceedings of the 28th Session of the CIE*. Manchester: University of Manchester, ISBN 978-3-902842-55-8.

**PROKOPOVÁ, L., DARULA, S., BOŠOVÁ, D. 2015.** Measurement Daylight Factor measurement in architectural models. *Envibuild 2015 - International Conference Buildings and Environment 2015*, Bratislava: STU v Bratislave.

**PROKOPOVÁ, L. - BOŠOVÁ, D. - DARULA, S.:** Testing of illuminance meters for Daylight Factor measurements. *Envibuild 2015 - International Conference Buildings and Environment 2015*, Bratislava: STU v Bratislave.

# Příloha 1

– Testovací protokol

sonda referenčního luxmetru Brüel



# TESTOVACÍ PROTOKOL

## - sonda referenčního luxmetru Brüel

<b>Předmět testování:</b>	Luxmetr Brüel
<b>Typ:</b>	Precision Photometer Type 1105, sonda Type 8600
<b>Výrobní číslo:</b>	luxmetr 1298010, sonda 1301932
<b>Výrobce:</b>	Brüel & Kjaer, Dánsko
<b>Místo testování:</b>	Laboratoř fotometrie Ústav stavebnictva a architektury Slovenská akadémia vied
<b>Datum testování:</b>	06.06.2013
<b>Počet stran:</b>	3

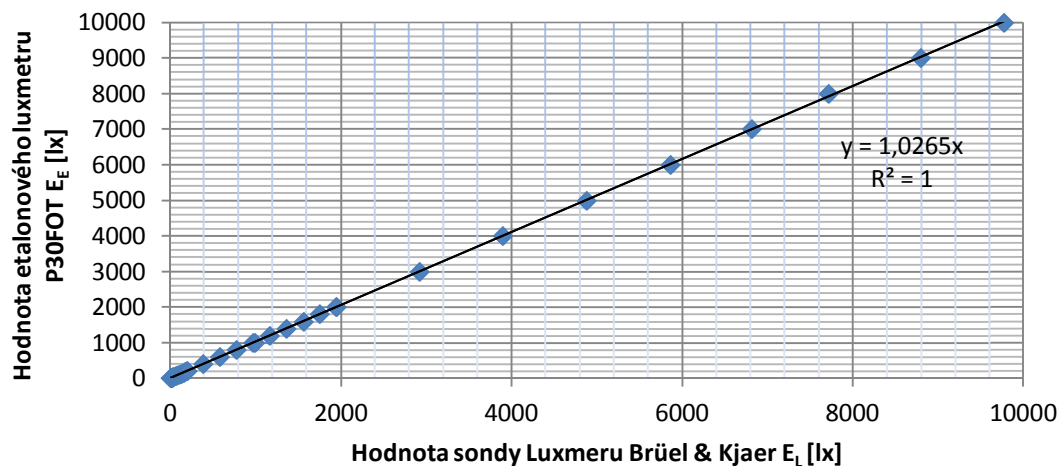
### **Odkaz na certifikovanou kalibraci:**

Dne 9.11.2011 byla provedena certifikovaná kalibrace sondy 1301932 luxmetru výrobce Brüel & Kjaer na Slovenském metrologickém ústavě v centru termometrie, fotometrie a radiometrie. Sonda luxmetru byla kalibrovaná fotometrickou hlavicí P30FOT korigovanou na funkci  $V(\lambda)$ , která patří do soustavy národní etalonové svítivosti NE012. Výsledky certifikované kalibrace jsou uvedeny v Tab. 1



Číslo měření	Hodnota Brüel $E_L$	Hodnota etalonového luxmetru P30FOT $E_E$	Číslo měření	Hodnota Brüel $E_L$	Hodnota etalonového luxmetru P30FOT $E_E$
[-]	[lx]	[lx]	[-]	[lx]	[lx]
1	1,90	2	21	193	200
2	3,90	4	22	385	400
3	5,78	6	23	579	600
4	7,71	8	24	775	800
5	9,65	10	25	969	1000
6	11,61	12	26	1164	1200
7	13,51	14	27	1358	1400
8	15,51	16	28	1558	1600
9	17,39	18	29	1748	1800
10	19,35	20	30	1940	2000
11	19,2	20	31	986	1000
12	38,6	40	32	1944	2000
13	58,0	60	33	2921	3000
14	77,2	80	34	3897	4000
15	96,4	100	35	4876	5000
16	116,0	120	36	5864	6000
17	135,1	140	37	6817	7000
18	154,4	160	38	7716	8000
19	173,9	180	39	8799	9000
20	193,1	200	40	9770	10000

Tabulka 1: Výsledek certifikované kalibrace z 9.11.2011, rozsah kalibrace 2-10000 lx



Graf 1: Lineární závislost mezi sondou referenčního luxmetru a etalonu

Kalibrační konstanta  $k$  dle certifikované kalibrace je rovna:  $k = 1,027$

$$E_{\text{Etalon}} = 1,027 \times E_{\text{Brüel}} \text{ [lx]}$$

**Postup testovacího měření:**

Luxmetr Brüel & Kjaer se sondou 1301932 byl testován ve fotometrické laboratoři v Ústavu stavebnictva a architektury Slovenské akademie vied na fotometrické lavici. Testování sondy luxmetru bylo provedeno pro 11 různých vzdáleností od zdroje světla, kterým byla žárovka 200 W napojena na stmívací zařízení se stabilizátorem zn. Samo Automation s nastavenou intenzitou 90 %, veškerá měření byla pro kontrolu provedena třikrát. Výsledky kontrolního měření, včetně uvedených vzdáleností čidla od zdroje světla jsou uvedeny v Tab.2.

**Výsledky testovacího měření:**

Vzdálenost čidla od zdroje	Měření			Průměr
	1	2	3	
[cm]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]
52,5	918	916	915	916
62,5	600	600	599	600
72,5	413	412	416	414
82,5	302	303	301	302
97,5	205	204	205	205
117,5	134,6	134,0	133,0	133,9
137,5	95,0	94,4	94,3	94,6
157,5	70,4	70,4	70,2	70,3
197,5	43,6	43,4	42,7	43,2
247,5	26,9	26,5	26,4	26,6
287,5	19,9	19,1	19,4	19,5

Tabulka 2: Výsledky kontrolního měření sondy 130193 luxmetru Brüel & Kjaer

# Příloha 2

– Protokol o kalibraci

Extech č.14 HD 450



ÚSTAV STAVEBNÍCTVA A ARCHITEKTÚRY  
Slovenská akadémia vied  
Dúbravská cesta 9  
845 03 Bratislava 45

FAKULTA ARCHITEKTURY  
České vysoké učení technické v Praze  
Thákurova 9  
166 29 Praha 6 -Dejvice



# PROTOKOL O KALIBRACI

## - EXTECH č.14 HD 450

<b>Předmět testování:</b>	Luxmetr Extech č.14
<b>Typ:</b>	HD 450 č.14
<b>Výrobní číslo:</b>	NO.12095034, Z2/11102014
<b>Výrobce:</b>	Extech Instruments
<b>Místo kalibrace:</b>	Laboratoř fotometrie Ústav stavebníctva a architektúry Slovenská akadémia vied
<b>Datum kalibrace:</b>	06.06.2013
<b>Počet stran:</b>	2

**Místo vydání:** Bratislava  
**Datum vydání:** 13.6.2013

**Kalibrovala:** Ing. Lenka Prokopová  
**Zodpovědná osoba:** Doc. Ing. Stanislav Darula, CSc

**Návaznost:**

Luxmetr Extech č.14 HD450 (NO.12095034, Z2/11102014) byl kalibrován referenčním luxmetrem Brüel & Kjaer se sondou 1301932.

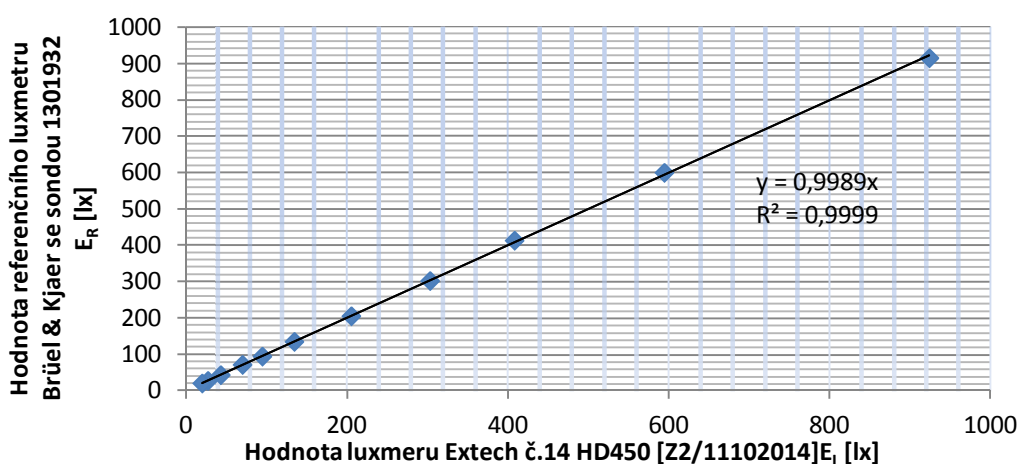
**Postup kalibrace:**

Luxmetr Extech č.14 HD450 (NO.12095034, Z2/11102014) byl kalibrován ve fotometrické laboratoři v Ústavu stavebnictva a architektury Slovenské akademie vied na fotometrické lavici. Kalibrování sondy luxmetru bylo provedeno pro 11 různých vzdáleností od zdroje světla, kterým byla žárovka 200 W napojena na stmívací zařízení se stabilizátorem zn. Samo Automation s nastavenou intenzitou 90 %, veškerá měření byla pro kontrolu provedena třikrát. Výsledky kontrolního měření, včetně uvedených vzdáleností čidla od zdroje světla jsou uvedeny v Tab.1.

**Výsledky kalibrace:**

Vzdálenost čidla od zdroje [cm]	Rozsah [lx]	Měření			Průměr Extech č.14 E <sub>L</sub> [lx]	Referenční luxmetr Brüel E <sub>R</sub> [lx]
		1	2	3		
52,5	do 4000	925	930	916	924	916
62,5		594	590	599	594	600
72,5		409	408	407	408	414
82,5	do 400	303,0	303,7	302,1	303	302
97,5		206,4	205,4	204,2	205	205
117,5		134,2	135,9	133,3	134,5	133,9
137,5		94,6	94,6	95,1	94,8	94,6
157,5		70,0	69,9	70,1	70,0	70,3
197,5		43,0	43,0	42,7	42,9	43,2
247,5		26,6	26,4	26,6	26,5	26,6
287,5		19,5	19,3	19,2	19,3	19,5

Tabulka 1: Výsledek kalibrace z 6.6.2013, rozsah kalibrace 19-1000 lx



Graf 1: Lineární závislost mezi kalibrovaným luxmetrem Extech č.14 a sondou referenčního luxmetru Brüel

Kalibrační konstanta  $k$  dle provedené kalibrace je rovna:  $k = 0,999$

$$E_{\text{Brüel}} = 0,999 \times E_{\text{Extech č.14}} \text{ [lx]}$$

# Příloha 3

– Protokol o kalibraci

Extech č.15 HD 450



ÚSTAV STAVEBNÍCTVA A ARCHITEKTÚRY  
Slovenská akadémia vied  
Dúbravská cesta 9  
845 03 Bratislava 45

FAKULTA ARCHITEKTURY  
České vysoké učení technické v Praze  
Thákurova 9  
166 29 Praha 6 -Dejvice



# PROTOKOL O KALIBRACI

## - EXTECH č.15 HD 450

<b>Předmět testování:</b>	Luxmetr
<b>Typ:</b>	HD 450 č.15
<b>Výrobní číslo:</b>	NO.12095018, Z2/11102015
<b>Výrobce:</b>	Extech Instruments
<b>Místo kalibrace:</b>	Laboratoř fotometrie Ústav stavebníctva a architektúry Slovenská akadémia vied
<b>Datum kalibrace:</b>	06.06.2013
<b>Počet stran:</b>	2

**Místo vydání:** Bratislava  
**Datum vydání:** 13.6.2013

**Kalibrovala:** Ing. Lenka Prokopová  
**Zodpovědná osoba:** Doc. Ing. Stanislav Darula, CSc

**Návaznost:**

Luxmetr Extech č.15 HD450 (NO.12095018, Z2/11102015) byl kalibrován referenčním luxmetrem Brüel & Kjaer se sondou 1301932.

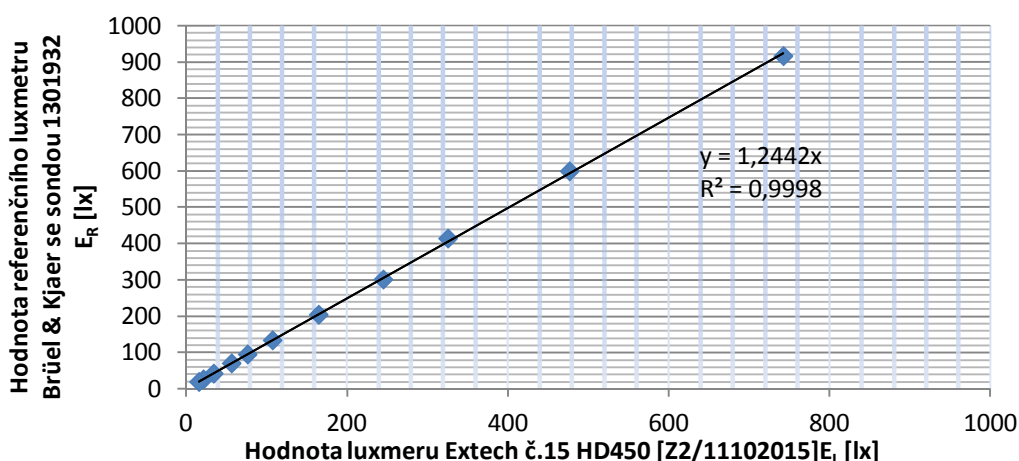
**Postup kalibrace:**

Luxmetr Extech č.15 HD450 (NO.12095018, Z2/11102015) byl kalibrován ve fotometrické laboratoři v Ústavu stavebnictva a architektury Slovenské akademie vied na fotometrické lavici. Kalibrování sondy luxmetru bylo provedeno pro 11 různých vzdáleností od zdroje světla, kterým byla žárovka 200 W napojena na stmívací zařízení se stabilizátorem zn. Samo Automation s nastavenou intenzitou 90 %, veškerá měření byla pro kontrolu provedena třikrát. Výsledky kontrolního měření, včetně uvedených vzdáleností čidla od zdroje světla jsou uvedeny v Tab.1.

**Výsledky kalibrace:**

Vzdálenost čidla od zdroje [cm]	Rozsah [lx]	Měření			Průměr Extech č.15 E <sub>L</sub> [lx]	Referenční luxmetr Brüel E <sub>R</sub> [lx]
		1 [lx]	2 [lx]	3 [lx]		
52,5	do 4000	743	745	740	743	916
62,5		474	478	477	476	600
72,5		327	327	322	325	414
82,5	do 400	245,1	244,7	244,2	245	302
97,5		165,4	163,9	165,3	165	205
117,5		107,4	106,8	107,6	107,3	133,9
137,5		75,7	75,7	76,3	75,9	94,6
157,5		56,1	56,2	56,5	56,3	70,3
197,5		34,1	34,1	34,5	34,2	43,2
247,5		21,0	21,0	21,3	21,1	26,6
287,5		15,3	15,4	15,4	15,4	19,5

Tabulka 1: Výsledek kalibrace z 6.6.2013, rozsah kalibrace 15-1000 lx



Graf 1: Lineární závislost mezi kalibrovaným luxmetrem Extech č.15 a sondou referenčního luxmetru Brüel

Kalibrační konstanta  $k$  dle provedené kalibrace je rovna:  $k = 1,244$   
 $\text{Brüel} = 1,244 \times \text{Extech č.15 [lx]}$



# Příloha 4

– Protokol testu jasů  
umělé oblohy



ÚSTAV STAVEBNÍCTVA A ARCHITEKTÚRY  
Slovenská akadémia vied  
Dúbravská cesta 9  
845 03 Bratislava 45

FAKULTA ARCHITEKTURY  
České vysoké učení technické v Praze  
Thákurova 9  
166 29 Praha 6 -Dejvice



# PROTOKOL TESTU JASŮ UMĚLÉ OBLOHY

<b>Předmět testování:</b>	umělá obloha
<b>Použité přístroje:</b>	jasoměr Minolta Luminance Meter 1°
<b>Výrobní číslo přístroje :</b>	401 711
<b>Výrobce přístroje:</b>	Minolta
<b>Místo testování:</b>	Světlo-technická laboratoř Ústav stavebnictva a architektury Slovenská akadémia vied
<b>Datum testování:</b>	09.07.2013
<b>Počet stran:</b>	3

**Místo vydání:** Bratislava  
**Datum vydání:** 15.8.2013

**Testovala:** Ing. Lenka Prokopová  
**Zodpovědná osoba:** Doc. Ing. Stanislav Darula, CSc

**Popis předmětu testování – umělé oblohy:**

Umělá obloha se nachází ve světlo-technické laboratoři na Ústavu stavebnictva a architektury Slovenské akademie vied. Má průměr 8m a je možné ji osvětlit reflektory umístěnými v úrovni podlahy. Pro kontrolní měření byla umělá obloha nasvětlena dle standardu CIE pro rovnoměrně zamračenou oblohu při tmavém terénu, kde by mělo být rozložení jasů dle vztahu:

$$\frac{L_h}{L_z} = \frac{1}{3} \quad (1)$$

Kde:  $L_h$  je jas horizontu oblohy [ $\text{cd/m}^2$ ]

$L_z$  je jas horizontu zenitu [ $\text{cd/m}^2$ ]

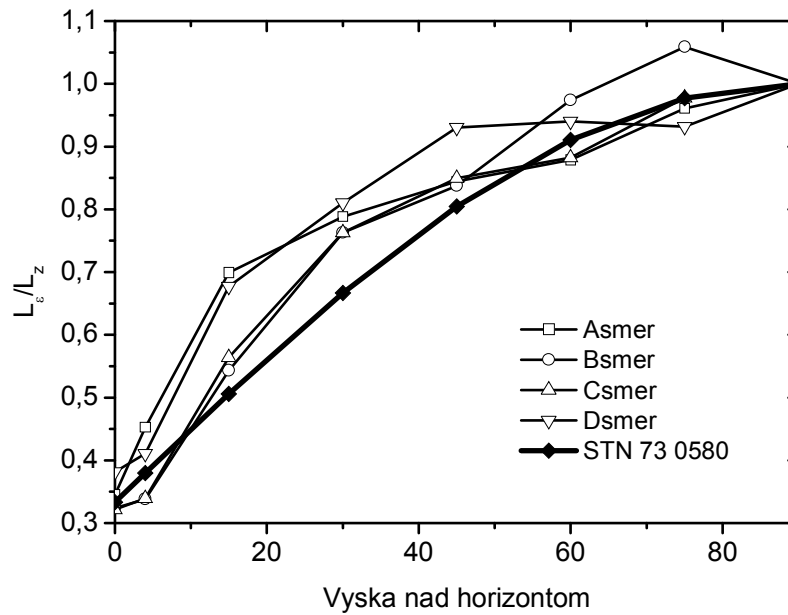
**Postup kontrolní měření:**

Do středu umělé oblohy byl umístěn jasměr Minolta Luminance Meter 1°, kterým byl postupně měřen jas ve čtyřech na sebe kolmých směrech – viz obr. 1. V každém směru byl jas měřen pod úhly 0°, 4°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° a 90° a pro kontrolu vždy ve 3 opakováních. Výsledky kontrolního měření, v daných úhlech a směrech jsou uvedeny v Tab.1.

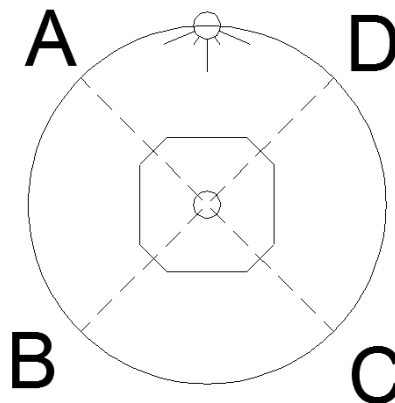
Úhel	Směr A					Směr B				
	Měření			Průměr jasů	Poměr $L_h/L_z$	Měření			Průměr jasů	Poměr $L_h/L_z$
	1	2	3			1	2	3		
[°]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[-]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[-]
0	67,3	67,6	66,8	67,2	0,3448	63,9	63,7	59,5	62,4	0,3237
4	85,6	89	90	88,2	0,4523	65	63	67,3	65,1	0,3379
15	141	134	134	136,3	0,6991	126	97,7	90	104,6	0,5427
30	156	156	149	153,7	0,7880	154	147	140	147,0	0,7630
45	169	166	159	164,7	0,8444	170	161	153	161,3	0,8374
60	175	176	163	171,3	0,8786	199	185	179	187,7	0,9740
75	187	192	183	187,3	0,9607		205	203	204,0	1,0588
90	198	197	190	195,0	1,0000	197	193	188	192,7	1,0000

Úhel	Směr C					Směr D				
	Měření			Průměr jasů	Poměr $L_h/L_z$	Měření			Průměr jasů	Poměr $L_h/L_z$
	1	2	3			1	2	3		
[°]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[-]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[ $\text{cd/m}^2$ ]	[-]
0	60,7	63,5	64,2	62,8	0,3215	73,5	78,6	77,2	76,4	0,3815
4	64,1	67,2	67,5	66,3	0,3392	93	74,2	79,6	82,3	0,4106
15	97,6	96	137	110,2	0,5642	142	135	130	135,7	0,6772
30	147	146	154	149,0	0,7628	175	164	148	162,3	0,8103
45	166	164	168	166,0	0,8498	193	190	176	186,3	0,9301
60	176	169	172	172,3	0,8823	194	188	183	188,3	0,9401
75	194	189	190	191,0	0,9778	188	184	188	186,7	0,9318
90	198	194	194	195,3	1,0000	205	195	201	200,3	1,0000

Tabulka 1: Výsledek kontroly jasů rovnoměrně zatažené oblohy při tmavém terénu dle CIE z 9.7.2013



Graf 1: Grafické znázornění kontroly jasů rovnoměrně zatažené oblohy při tmavém terénu dle CIE z 9.7.2013 v porovnání



Obrázek 1: Situační náčrt pozic jednotlivých směrů měření pod umělou oblohou

#### Vyhodnocení:

Po naměření hodnot jasů při nasvícení umělé oblohy odpovídající rovnoměrně zatažené oblohy při tmavém terénu s poměrem jasů 1:3 uvedené v STN/ČSN 73 0590 byla zjištěna odchylka  $z = 3,97\%$ , která byla vyjádřena dle vztahu:

$$z = MBD = 1/N \sum(model - measured) \quad (2)$$

Kde: *mode* jsou data modelové situace rovnoměrně zatažené oblohy s poměrem jasů 1:3

*measured* jsou data naměřená v umělé obloze

# Příloha 5

– Protokol o měření světlovodu  
vzorek 1



# PROTOKOL O MĚŘENÍ SVĚTLOVODU

## - VZOREK 1



<b>Předmět testování:</b>	světlovod - vzorek 1 pod umělou oblohou Solatube Spectralight Infinity, bez kopule, bez difuzoru
<b>Použité přístroje:</b>	Luxmeter Extech 450 č.14  Precision Photometer Bruel-Kjaer 1105  Luxmeter Extech 450 č.15
<b>Místo testování:</b>	Světlo-technická laboratoř Ústav stavebnictva a architektury Slovenská akadémia vied
<b>Datum testování:</b>	18.07.2013
<b>Počet stran:</b>	7

**Popis měření:** Dopadající i vystupující světlo se měřilo luxmetry se směrově a spektrálně korigovanými hlavicemi. Čidlo luxmetru měřící vystupující množství světla se posouvalo pod vzorkem světlovodu s konstantním krokem 20 mm ve vzdálenosti 3 mm mezi spodní hranou světlovodu nebo difuzoru a čidlem luxmetru. Měřila se osvětlenost od osy světlovodu do vzdálenosti 0,64 m ve čtyřech na sebe kolmých směrech dle metodiky [1]. Každý testovaný vzorek byl měřen ve třech opakováních a z každé sady měření se vypočítala průměrná hodnota světelného toku vstupujícího do světlovodu  $\Phi_e$  a vystupujícího ze světlovodu  $\Phi_i$ .

Pro tento vzorek světlovodu byl měřen také zpětný odraz a to pomocí dvou luxmetrů, kdy ve stejný čas byla odečtena hodnota ze senzoru luxmetru (Extech č. 14), který měřil světlo vstupující do světlovodu a druhý senzor (Extech č.15) světlo zpětně se odrážející ze světlovodu směrem zpět do kopule umělé oblohy.

**Místo vydání:** Bratislava  
**Datum vydání:** 15.8.2013

**Testovala:** Ing. Lenka Prokopová  
**Zodpovědná osoba:** Doc. Ing. Stanislav Darula, CSc

Měření 1

Číslo bodu	Rameno A				Rameno B				Rameno C				Rameno D				Vzdálenost bodu od středu [m]	Poloměr r1 [m]	Poloměr r2 [m]	Odpovídající plocha S [m <sup>2</sup> ]	Průměrná osvětlenost Ei v ploše [lx]	Světelný tok vystupující Φi [lm]
	měření Br	Ex14 [lx]	kalibrace Ex14 [lx]	měření Br	Ex14 [lx]	kalibrace Ex14 [lx]	měření Br	Ex14 [lx]	kalibrace Ex14 [lx]	měření Br	Ex14 [lx]	kalibrace Ex14 [lx]	měření Br	Ex14 [lx]	kalibrace Ex14 [lx]							
Střed	498	544	543,4	482	526	525,4	497	543	542,4	496	540	539,4	496	540	539,4	0	0,03	0,00283	493,25	1,39463		
1	493	543	542,4	484	531	530,4	491	541	540,4	502	544	543,4	502	544	543,4	0,04	0,03	0,00503	492,5	2,47558		
2	488	543	542,4	477	522	521,4	488	541	540,4	498	540	539,4	498	540	539,4	0,06	0,05	0,00754	487,75	3,67755		
3	485	541	540,4	476	523	522,4	486	539	538,4	499	534	533,4	499	534	533,4	0,08	0,07	0,01005	486,5	4,89083		
4	488	542	541,4	476	528	527,4	484	540	539,4	497	538	537,4	497	538	537,4	0,10	0,09	0,01257	486,25	6,1104		
5	483	536	535,4	476	529	528,4	442	493	492,4	494	537	536,4	494	537	536,4	0,12	0,11	0,01508	473,75	7,14398		
6	459	509	508,4	478	529	528,4	490	544	543,4	494	541	540,4	494	541	540,4	0,14	0,13	0,01759	480,25	8,449		
7	453	503	502,4	474	527	526,4	491	548	547,4	494	537	536,4	494	537	536,4	0,16	0,15	0,02011	478	9,61076		
8	458	509	508,4	474	529	528,4	492	548	547,4	494	540	539,4	494	540	539,4	0,18	0,17	0,02262	479,5	10,846		
9	462	515	514,4	468	526	525,4	489	546	545,4	482	531	530,4	482	531	530,4	0,20	0,19	0,02513	475,25	11,9443		
10	445	501	500,4	470	531	530,4	483	542	541,4	486	536	535,4	486	536	535,4	0,22	0,21	0,02765	471	13,0213		
11	458	515	514,4	470	534	533,4	477	542	541,4	481	539	538,4	481	539	538,4	0,24	0,23	0,03016	471,5	14,2201		
12	441	502	501,4	424	528	527,4	353	539	538,4	353	539	538,4	353	539	538,4	0,26	0,25	0,03267	326,075	10,6537		
13	75,9	503	502,4	2,3	537	536,4	1,616	541	540,4	0,156	542	541,4	0,156	542	541,4	0,28	0,27	0,03519	19,993	0,70347		
14	1,313	496	495,4	0,242	537	536,4	0,277	536	535,4	0,08	520	519,4	0,08	520	519,4	0,30	0,29	0,03770	0,478	0,01802		
15	0,263	505	504,4	0,069	533	532,4	0,093	540	539,4	0,048	514	513,4	0,048	514	513,4	0,32	0,31	0,04021	0,11825	0,00476		
16	0,098	505	504,4	0,045	533	532,4	0,049	535	534,4	0,031	516	515,4	0,031	516	515,4	0,34	0,33	0,04273	0,05575	0,00238		
17	0,047	504	503,4	0,02	536	535,4	0,031	537	536,4	0,025	520	519,4	0,025	520	519,4	0,36	0,35	0,04524	0,03075	0,00139		
18	0,033	534	533,4	0,019	533	532,4	0,023	537	536,4	0,017	521	520,4	0,017	521	520,4	0,38	0,37	0,04775	0,023	0,0011		
19	0,025	538	537,4	0,015	530	529,4	0,018	533	532,4	0,017	517	516,4	0,017	517	516,4	0,40	0,39	0,05027	0,01875	0,00094		
20	0,019	542	541,4	0,012	526	525,4	0,013	537	536,4	0,018	521	520,4	0,018	521	520,4	0,42	0,41	0,05278	0,0155	0,00082		
21	0,017	540	539,4	0,009	530	529,4	0,012	539	538,4	0,013	520	519,4	0,013	520	519,4	0,44	0,43	0,05529	0,01275	0,0007		
22	0,015	541	540,4	0,01	528	527,4	0,01	540	539,4	0,011	520	519,4	0,011	520	519,4	0,46	0,45	0,05781	0,0115	0,00066		
23	0,011	541	540,4	0,01	535	534,4	0,01	537	536,4	0,011	518	517,4	0,011	518	517,4	0,48	0,47	0,06032	0,0105	0,00063		
24	0,011	537	536,4	0,011	528	527,4	0,01	539	538,4	0,012	525	524,4	0,012	525	524,4	0,50	0,49	0,06283	0,011	0,00069		
25	0,01	537	536,4	0,01	536	535,4	0,01	539	538,4	0,011	523	522,4	0,011	523	522,4	0,52	0,51	0,06535	0,01025	0,00067		
26	0,011	532	531,4	0,01	537	536,4	0,014	544	543,4	0,012	517	516,4	0,012	517	516,4	0,54	0,53	0,06786	0,01175	0,0008		
27	0,01	535	534,4	0,011	541	540,4	0,009	545	544,4	0,01	518	517,4	0,01	518	517,4	0,56	0,55	0,07037	0,01	0,0007		
28	0,011	531	530,4	0,011	539	538,4	0,009	545	544,4	0,01	510	509,4	0,01	510	509,4	0,58	0,57	0,07288	0,01025	0,00075		
29	0,011	532	531,4	0,012	540	539,4	0,009	544	543,4	0,011	514	513,4	0,011	514	513,4	0,60	0,59	0,07540	0,01075	0,00081		
30	0,008	526	525,4	0,015	537	536,4	0,01	545	544,4	0,012	514	513,4	0,012	514	513,4	0,62	0,61	0,07791	0,01125	0,00088		
31	0,013	526	525,4	0,013	542	541,4	0,013	541	540,4	0,014	519	518,4	0,014	519	518,4	0,64	0,63	0,08042	0,01325	0,00107		

Měření 2

Číslo bodu	Rameno A				Rameno B				Rameno C				Rameno D				Vzdálenost bodu od středu	Poloměr r1	Poloměr r2	Odpovídající plocha S	Průměrná osvětlenost E <sub>i</sub> v ploše	Světelný tok vystupující Φ <sub>i</sub>
	měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace							
	Br	Ex14	[lx]	[lx]	Br	Ex14	[lx]	[lx]	Br	Ex14	[lx]	[lx]	Br	Ex14	[lx]	[lx]						
Střed																	0	0,03	0,00283	476,75	1,34798	
1	481	530	529,4	474	519	518,4	465	514	475	521	520,4	474	518	517,4	518,4	0,04	0,05	0,00503	474	2,38258		
2	473	528	527,4	472	517	516,4	466	514	466	513	512,4	472	512	511,4	511,4	0,06	0,07	0,00754	470,75	3,54937		
3	474	527	526,4	470	514	513,4	456	508	456	508	507,4	469	505	504,4	504,4	0,08	0,09	0,01005	467,25	4,69731		
4	475	527	526,4	472	523	522,4	452	505	452	505	504,4	476	515	514,4	514,4	0,10	0,11	0,01257	468,75	5,89049		
5	474	525	524,4	465	518	517,4	456	509	456	509	508,4	472	513	512,4	512,4	0,12	0,13	0,01508	466,75	7,03842		
6	468	520	519,4	469	520	519,4	457	508	457	508	507,4	468	512	511,4	511,4	0,14	0,15	0,01759	465,5	8,1895		
7	465	518	517,4	465	515	514,4	460	512	460	512	511,4	465	507	506,4	506,4	0,16	0,17	0,02011	463,75	9,32425		
8	468	520	519,4	467	519	518,4	461	512	461	512	511,4	469	513	512,4	512,4	0,18	0,19	0,02262	466,25	10,5463		
9	468	519	518,4	461	519	518,4	462	514	462	514	513,4	463	510	509,4	509,4	0,20	0,21	0,02513	463,5	11,649		
10	466	519	518,4	458	514	513,4	456	511	456	511	510,4	465	516	515,4	515,4	0,22	0,23	0,02765	461,25	12,7517		
11	466	522	521,4	456	519	518,4	449	509	449	509	508,4	458	515	514,4	514,4	0,24	0,25	0,03016	457,25	13,7903		
12	457	522	521,4	406	515	514,4	332	508	332	508	507,4	114,2	512	511,4	511,4	0,26	0,27	0,03267	327,3	10,6937		
13	74,8	518	517,4	1,856	517	516,4	1,434	507	1,434	507	506,4	0,207	510	509,4	509,4	0,28	0,29	0,03519	19,5743	0,68874		
14	1,342	522	521,4	0,235	519	518,4	0,217	509	0,217	509	508,4	0,083	509	508,4	508,4	0,30	0,31	0,03770	0,46925	0,01769		
15	0,27	522	521,4	0,1	515	514,4	0,073	509	0,073	509	508,4	0,046	517	516,4	516,4	0,32	0,33	0,04021	0,12225	0,00492		
16	0,101	522	521,4	0,046	520	519,4	0,036	509	0,036	509	508,4	0,034	513	512,4	512,4	0,34	0,35	0,04273	0,05425	0,00232		
17	0,053	522	521,4	0,03	514	513,4	0,022	515	0,022	515	514,4	0,025	515	514,4	514,4	0,36	0,37	0,04524	0,0325	0,00147		
18	0,034	523	522,4	0,02	514	513,4	0,017	514	0,017	514	513,4	0,019	515	514,4	514,4	0,38	0,39	0,04775	0,0225	0,00107		
19	0,026	524	523,4	0,016	509	508,4	0,014	516	0,014	516	515,4	0,015	509	508,4	508,4	0,40	0,41	0,05027	0,01775	0,00089		
20	0,019	521	520,4	0,014	516	515,4	0,012	517	0,012	517	516,4	0,014	504	503,4	503,4	0,42	0,43	0,05278	0,01475	0,00078		
21	0,016	522	521,4	0,013	512	511,4	0,01	512	0,01	512	511,4	0,011	508	507,4	507,4	0,44	0,45	0,05529	0,0125	0,00069		
22	0,013	521	520,4	0,016	517	516,4	0,01	516	0,01	516	515,4	0,011	513	512,4	512,4	0,46	0,47	0,05781	0,0125	0,00072		
23	0,013	517	516,4	0,012	517	516,4	0,009	515	0,009	515	514,4	0,011	515	514,4	514,4	0,48	0,49	0,06032	0,01125	0,00068		
24	0,011	519	518,4	0,013	516	515,4	0,008	519	0,008	519	518,4	0,011	515	514,4	514,4	0,50	0,51	0,06283	0,01075	0,00068		
25	0,011	516	515,4	0,014	521	520,4	0,009	516	0,009	516	515,4	0,01	511	510,4	510,4	0,52	0,53	0,06535	0,011	0,00072		
26	0,011	517	516,4	0,012	523	522,4	0,009	517	0,009	517	516,4	0,011	515	514,4	514,4	0,54	0,55	0,06786	0,01075	0,00073		
27	0,011	520	519,4	0,014	523	522,4	0,009	516	0,009	516	515,4	0,011	516	515,4	515,4	0,56	0,57	0,07037	0,01125	0,00079		
28	0,01	514	513,4	0,014	518	517,4	0,01	518	0,01	518	517,4	0,012	522	521,4	521,4	0,58	0,59	0,07288	0,0115	0,00084		
29	0,011	521	520,4	0,015	513	512,4	0,01	518	0,01	518	517,4	0,012	524	523,4	523,4	0,60	0,61	0,07540	0,012	0,0009		
30	0,012	523	522,4	0,017	514	513,4	0,011	519	0,011	519	518,4	0,012	517	516,4	516,4	0,62	0,63	0,07791	0,013	0,00101		
31	0,012	520	519,4	0,017	514	513,4	0,012	513	0,012	513	512,4	0,014	514	513,4	513,4	0,64	0,65	0,08042	0,01375	0,00111		



Měření 3

Číslo bodu	Rameno A		Rameno B		Rameno C		Rameno D		Vzdálenost bodu od středu [m]	Poloměr r1 [m]	Poloměr r2 [m]	Odpovídající plocha S [m²]	Průměrná osvětlenost E1v ploše [lx]	Světelný tok vystupující ΔI [lm]
	měření Br [lx]	kalibrace Ex14 [lx]	měření Br [lx]	kalibrace Ex14 [lx]	měření Br [lx]	kalibrace Ex14 [lx]	měření Br [lx]	kalibrace Ex14 [lx]						
Střed	519	475	474,5	474,5	468	509	508,4	508,4	0	0	0,03	0,00283	484	1,36848
1	467	509	508,4	508,4	465	513	512,4	512,4	0,04	0,03	0,05	0,00503	470,5	2,36499
2	473	526	525,4	525,4	452	502	501,4	501,4	0,06	0,05	0,07	0,00754	469,75	3,54183
3	467	522	521,4	521,4	455	506	505,4	505,4	0,08	0,07	0,09	0,01005	469,5	4,71993
4	452	503	502,4	502,4	455	506	505,4	505,4	0,10	0,09	0,11	0,01257	460,75	5,78996
5	462	513	512,4	512,4	455	508	507,4	507,4	0,12	0,11	0,13	0,01508	462	6,9668
6	464	515	514,4	514,4	459	510	509,4	509,4	0,14	0,13	0,15	0,01759	464,75	8,17631
7	455	506	505,4	505,4	454	509	508,4	508,4	0,16	0,15	0,17	0,02011	459	9,22874
8	460	512	511,4	511,4	456	508	507,4	507,4	0,18	0,17	0,19	0,02262	460,5	10,4163
9	454	504	503,4	503,4	459	513	512,4	512,4	0,20	0,19	0,21	0,02513	458,75	11,5296
10	456	507	506,4	506,4	456	513	512,4	512,4	0,22	0,21	0,23	0,02765	458,75	12,6826
11	451	509	508,4	508,4	451	509	508,4	508,4	0,24	0,23	0,25	0,03016	453,5	13,6772
12	449	514	513,4	513,4	339	510	509,4	509,4	0,26	0,25	0,27	0,03267	310,325	10,1391
13	69,4	506	505,4	505,4	1,34	508	507,4	507,4	0,28	0,27	0,29	0,03519	18,1593	0,63895
14	1,238	515	514,4	514,4	0,217	513	512,4	512,4	0,30	0,29	0,31	0,03770	0,4295	0,01619
15	0,245	514	513,4	513,4	0,071	511	510,4	510,4	0,32	0,31	0,33	0,04021	0,102	0,0041
16	0,091	518	517,4	517,4	0,036	503	502,4	502,4	0,34	0,33	0,35	0,04273	0,0495	0,00211
17	0,046	516	515,4	515,4	0,024	514	513,4	513,4	0,36	0,35	0,37	0,04524	0,0305	0,00138
18	0,029	515	514,4	514,4	0,02	508	507,4	507,4	0,38	0,37	0,39	0,04775	0,02275	0,00109
19	0,02	511	510,4	510,4	0,014	509	508,4	508,4	0,40	0,39	0,41	0,05027	0,02275	0,00114
20	0,018	512	511,4	511,4	0,017	520	519,4	519,4	0,42	0,41	0,43	0,05278	0,0155	0,00082
21	0,016	514	513,4	513,4	0,015	503	502,4	502,4	0,44	0,43	0,45	0,05529	0,01425	0,00079
22	0,014	509	508,4	508,4	0,01	506	505,4	505,4	0,46	0,45	0,47	0,05781	0,01275	0,00074
23	0,012	511	510,4	510,4	0,009	512	511,4	511,4	0,48	0,47	0,49	0,06032	0,01175	0,00071
24	0,012	511	510,4	510,4	0,009	510	509,4	509,4	0,50	0,49	0,51	0,06283	0,013	0,00082
25	0,011	511	510,4	510,4	0,009	520	519,4	519,4	0,52	0,51	0,53	0,06535	0,01075	0,0007
26	0,011	509	508,4	508,4	0,009	519	518,4	518,4	0,54	0,53	0,55	0,06786	0,01025	0,0007
27	0,011	513	512,4	512,4	0,01	520	519,4	519,4	0,56	0,55	0,57	0,07037	0,011	0,00077
28	0,011	513	512,4	512,4	0,009	522	521,4	521,4	0,58	0,57	0,59	0,07288	0,01075	0,00078
29	0,013	514	513,4	513,4	0,009	523	522,4	522,4	0,60	0,59	0,61	0,07540	0,01125	0,00085
30	0,013	516	515,4	515,4	0,011	526	525,4	525,4	0,62	0,61	0,63	0,07791	0,012	0,00093
31	0,013	513	512,4	512,4	0,01	523	522,4	522,4	0,64	0,63	0,65	0,08042	0,012	0,00097

## Souhrnné výsledky měření:

	Označení	Měření			Průměr	Jednotky
		1	2	3		
Osvětlenost nad světlovodem	$E_e$	530	516	513	520	lx
Průměr světlovodu	$r$	0,265			0,265	m
Plocha světlovodu	$S$	0,2206			0,2206	m <sup>2</sup>
Světelný tok vstupující do světlovodu	$\Phi_e$	117,0	113,8	113,2	114,7	lm
Světelný tok vystupující ze světlovodu	$\Phi_l$	105,2	102,6	101,3	103,0	lm
Naměřená účinnost přenosu difúzního světla	$Eff_v$	0,8990	0,9018	0,8944	0,8983	-

## Protokol o měření zpětného odrazu světlovodu – vzorek č.1 , měření 1

Číslo bodu	Rameno A				Rameno B				Rameno C				Rameno D				Vzdálenost bodu od středu	Poloměr $r_1$	Poloměr $r_2$	Odpovídající plocha $S$	Průměrná osvětlenost $E_l$ v ploše	Světelný tok vystupující $\Phi_l$
	měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace							
	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14						
Střed	3,9	546	4,9	545,4	3,7	534	4,6	533,4	3,8	529	4,7	528,4	3,8	530	4,7	529,4	0	0,025	0,00196	4,7	0,00928	
1	3,4	536	4,2	535,4	3,7	536	4,6	535,4	3,6	530	4,5	529,4	3,8	537	4,7	536,4	0,05	0,025	0,01571	4,5	0,07084	
2	3,6	547	4,5	546,4	3,5	530	4,4	529,4	3,7	534	4,6	533,4	3,7	531	4,6	530,4	0,10	0,075	0,03142	4,5	0,14169	
3	3,6	542	4,5	541,4	3,7	533	4,6	532,4	3,7	535	4,6	534,4	3,8	532	4,7	531,4	0,15	0,125	0,04712	4,6	0,21693	
4	3,7	543	4,6	542,4	3,9	533	4,9	532,4	3,6	530	4,5	529,4	3,8	536	4,7	535,4	0,20	0,175	0,06283	4,7	0,29315	

**Protokol o měření zpětného odrazu světlovodu – vzorek č.1 , měření 2**

Číslo bodu	Rameno A				Rameno B				Rameno C				Rameno D				Vzdálenost bodu od středu	Poloměr r1	Poloměr r2	Odpovídající plocha S	Průměrná osvětlenost Ei v ploše	Světelný tok vystupující Φi
	měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace							
	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14						
[ - ]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[m]	
Střed	3,9	535	4,9	534,4	3,7	526	4,6	525,4	3,7	511	4,6	510,4	3,8	549	4,7	548,4	0	0,025	0,00196	4,7	0,00922	
1	3,5	537	4,4	536,4	3,6	526	4,5	525,4	3,4	517	4,2	516,4	3,7	545	4,6	544,4	0,05	0,025	0,01571	4,4	0,06938	
2	3,6	545	4,5	544,4	3,6	526	4,5	525,4	3,5	513	4,4	512,4	3,8	550	4,7	549,4	0,10	0,075	0,03142	4,5	0,14169	
3	3,8	543	4,7	542,4	3,8	529	4,7	528,4	3,5	517	4,4	516,4	3,9	549	4,9	548,4	0,15	0,125	0,04712	4,7	0,21986	
4	3,7	539	4,6	538,4	3,9	530	4,9	529,4	3,6	524	4,5	523,4	3,8	544	4,7	543,4	0,20	0,175	0,06283	4,7	0,29315	

**Protokol o měření zpětného odrazu světlovodu – vzorek č.1 , měření 3**

Číslo bodu	Rameno A				Rameno B				Rameno C				Rameno D				Vzdálenost bodu od středu	Poloměr r1	Poloměr r2	Odpovídající plocha S	Průměrná osvětlenost Ei v ploše	Světelný tok vystupující Φi
	měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace							
	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14						
[ - ]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[m]
Střed	3,9	546	4,9	545,4	3,8	541	4,7	540,4	3,8	540	4,7	539,4	3,8	547	4,7	546,4	0	0,025	0,00196	4,8	0,00934	
1	3,5	546	4,4	545,4	3,8	535	4,7	534,4	3,6	536	4,5	535,4	3,7	545	4,6	544,4	0,05	0,025	0,01571	4,5	0,07133	
2	3,5	543	4,4	542,4	3,8	542	4,7	541,4	3,7	538	4,6	537,4	3,8	539	4,7	538,4	0,10	0,075	0,03142	4,6	0,14462	
3	3,6	540	4,5	539,4	3,6	534	4,5	533,4	3,7	538	4,6	537,4	3,9	538	4,9	537,4	0,15	0,125	0,04712	4,6	0,21693	
4	3,7	535	4,6	534,4	3,5	487	4,4	486,4	3,7	543	4,6	542,4	3,8	536	4,7	535,4	0,20	0,175	0,06283	4,6	0,28728	

**Souhrnné výsledky měření – zpětný tok:**

	Označení	Měření			Průměr	Jednotky
		1	2	3		
Osvětlenost nad světlovodem	$E_e$	535	532	537	<b>535</b>	lx
Průměr světlovodu	$r$	0,265			<b>0,265</b>	m
Plocha světlovodu	$S$	0,2206			<b>0,2206</b>	m <sup>2</sup>
Světelný tok vstupující do světlovodu	$\Phi_e$	117,9	117,4	118,4	<b>117,9</b>	lm
Světelný tok vystupující ze světlovodu	$\Phi_i$	0,731	0,733	1,183	<b>0,883</b>	lm
Naměřená účinnost přenosu difúzního světla	$Eff_v$	0,0062	0,0062	0,010	<b>0,0075</b>	-

# Příloha 6

– Protokol o měření světlovodu  
vzorek 2a



# PROTOKOL O MĚŘENÍ SVĚTLOVODU

## - VZOREK 2a



<b>Předmět testování:</b>	světlovod - vzorek 2a pod umělou oblohou Alanod - Miro Silver 27, bez kopule, bez difuzoru
<b>Použité přístroje:</b>	Luxmeter Extech 450 č.14  Precision Photometer Bruel-Kjaer 1105  Luxmeter Extech 450 č.15
<b>Místo testování:</b>	Světlo-technická laboratoř Ústav stavebnictva a architektury Slovenská akadémia vied
<b>Datum testování:</b>	01.08.2013
<b>Počet stran:</b>	7

**Popis měření:** Dopadající i vystupující světlo se měřilo luxmetry se směrově a spektrálně korigovanými hlavicemi. Čidlo luxmetru měřící vystupující množství světla se posouvalo pod vzorkem světlovodu s konstantním krokem 20 mm ve vzdálenosti 3 mm mezi spodní hranou světlovodu nebo difuzoru a čidlem luxmetru. Měřila se osvětlenost od osy světlovodu do vzdálenosti 0,64 m ve čtyřech na sebe kolmých směrech dle metodiky [1]. Každý testovaný vzorek byl měřen ve třech opakováních a z každé sady měření se vypočítala průměrná hodnota světelného toku vstupujícího do světlovodu  $\Phi_e$  a vystupujícího ze světlovodu  $\Phi_i$ .

Pro tento vzorek světlovodu byl měřen také zpětný odraz a to pomocí dvou luxmetrů, kdy ve stejný čas byla odečtena hodnota ze senzoru luxmetru (Extech č. 14), který měřil světlo vstupující do světlovodu a druhý senzor (Extech č.15) světlo zpětně se odrážející ze světlovodu směrem zpět do kopule umělé oblohy.

**Místo vydání:** Bratislava  
**Datum vydání:** 15.8.2013

**Testovala:** Ing. Lenka Prokopová  
**Zodpovědná osoba:** Doc. Ing. Stanislav Darula, CSc

Protokol o měření světlovodu - vzorek 2a

Měření 1

Číslo bodu	Rameno A		Rameno B		Rameno C		Rameno D		Vzdálenost bodu od středu [m]	Poloměr r1 [m]	Poloměr r2 [m]	Odpovídající plocha S [m <sup>2</sup> ]	Průměrná osvětlenost Eiv ploše [lx]	Světelný tok vystupující [lm]	
	měření Br	Ex14 [lx]	měření Br	Ex14 [lx]	měření Br	Ex14 [lx]	měření Br	Ex14 [lx]							
Střed	452	511	510,4	509,4	439	500	499,4	439	497	496,4	0	0,03	0,00283	444,75	1,2575
1	455	515	514,4	508	449	508	507,4	435	497	496,4	0,04	0,03	0,00503	444,5	2,2343
2	445	512	511,4	511,4	427	492	491,4	448	502	501,4	0,06	0,05	0,00754	443,25	3,34203
3	471	537	536,4	521	431	497	496,4	447	496	495,4	0,08	0,07	0,01005	452	4,544
4	448	514	513,4	520	433	501	500,4	448	500	499,4	0,10	0,09	0,01257	445,75	5,60146
5	449	517	516,4	520	430	496	495,4	445	493	492,4	0,12	0,11	0,01508	444,25	6,69913
6	447	514	513,4	510,4	428	493	492,4	445	500	499,4	0,14	0,13	0,01759	441,75	7,77167
7	447	514	513,4	512,4	437	505	504,4	431	489	488,4	0,16	0,15	0,02011	440,25	8,85175
8	453	521	520,4	511,4	432	501	500,4	444	502	501,4	0,18	0,17	0,02262	442,5	10,0091
9	453	525	524,4	511,4	432	505	504,4	433	498	497,4	0,20	0,19	0,02513	438,5	11,0207
10	449	527	526,4	505,4	427	503	502,4	428	492	491,4	0,22	0,21	0,02765	432,5	11,9569
11	432	515	514,4	508,4	423	506	505,4	426	496	495,4	0,24	0,23	0,03016	425	12,8177
12	359	511	510,4	502,4	347	505	504,4	408	492	491,4	0,26	0,25	0,03267	299,7	9,79197
13	407	515	514,4	503,4	385	502	501,4	36	503	502,4	0,28	0,27	0,03519	11,1648	0,39284
14	0,494	515	514,4	502,4	0,478	500	499,4	0,852	497	496,4	0,30	0,29	0,03770	0,49225	0,01856
15	0,146	514	513,4	504,4	0,145	493	492,4	0,161	498	497,4	0,32	0,31	0,04021	0,1275	0,00513
16	0,67	511	510,4	498,4	0,068	501	500,4	0,067	493	492,4	0,34	0,33	0,04273	0,20825	0,0089
17	0,04	512	511,4	502,4	0,037	496	495,4	0,033	498	497,4	0,36	0,35	0,04524	0,033	0,00149
18	0,028	519	518,4	504,4	0,028	494	493,4	0,024	495	494,4	0,38	0,37	0,04775	0,0235	0,00112
19	0,019	513	512,4	504,4	0,019	499	498,4	0,015	489	488,4	0,40	0,39	0,05027	0,0165	0,00083
20	0,014	511	510,4	502,4	0,016	495	494,4	0,015	494	493,4	0,42	0,41	0,05278	0,01425	0,00075
21	0,012	510	509,4	504,4	0,013	502	501,4	0,011	497	496,4	0,44	0,43	0,05529	0,0115	0,00064
22	0,011	512	511,4	508,4	0,011	499	498,4	0,01	494	493,4	0,46	0,45	0,05781	0,01025	0,00059
23	0,008	514	513,4	507,4	0,011	498	497,4	0,012	493	492,4	0,48	0,47	0,06032	0,01	0,0006
24	0,009	510	509,4	500,4	0,01	499	498,4	0,011	493	492,4	0,50	0,49	0,06283	0,01	0,00063
25	0,008	517	516,4	496,4	0,01	497	496,4	0,01	496	495,4	0,52	0,51	0,06535	0,0095	0,00062
26	0,008	513	512,4	496,4	0,009	498	497,4	0,009	498	497,4	0,54	0,53	0,06786	0,00875	0,00059
27	0,008	516	515,4	498,4	0,008	502	501,4	0,009	496	495,4	0,56	0,55	0,07037	0,0085	0,0006
28	0,011	521	520,4	499,4	0,008	500	499,4	0,01	492	491,4	0,58	0,57	0,07288	0,0095	0,00069
29	0,009	516	515,4	497,4	0,008	493	492,4	0,01	489	488,4	0,60	0,59	0,07540	0,00875	0,00066
30	0,011	532	531,4	497,4	0,009	503	502,4	0,009	490	489,4	0,62	0,61	0,07791	0,00975	0,00076
31	0,01	521	520,4	499,4	0,009	494	493,4	0,011	499	498,4	0,64	0,63	0,08042	0,00975	0,00078

Protokol o měření světlovodu - vzorek 2a

Měření 2

Číslo bodu	Rameno A		Rameno B		Rameno C		Rameno D		Vzdálenost bodu od středu	Poloměr r1	Poloměr r2	Odpovídající plocha S	Průměrná osvětlenost Ei v ploše	Světelný tok vystupující $\Phi_i$
	měření		měření		měření		měření							
	Br	Ex14	Br	Ex14	Br	Ex14	Br	Ex14						
Střed									0	0	0,03	0,00283	455,75	1,2886
1	455	518	470	532	431	495	464	522	521,4	0,04	0,05	0,00503	455	2,28708
2	448	513	461	522	435	501	470	525	521,4	0,06	0,07	0,00754	453,5	3,41931
3	446	511	460	521	432	498	497,4	522	521,4	0,08	0,09	0,01005	451,25	4,53646
4	444	510	455	521	432	499	498,4	526	525,4	0,10	0,09	0,01257	450,25	5,65801
5	438	506	452	517	443	512	511,4	458	515,4	0,12	0,11	0,01508	447,75	6,75191
6	448	515	454	520	432	498	497,4	460	517,4	0,14	0,13	0,01759	448,5	7,89042
7	447	517	455	523	432	500	499,4	458	519,4	0,16	0,15	0,02011	448	9,00757
8	447	516	447	520	427	496	495,4	469	533	0,18	0,17	0,02262	447,5	10,1222
9	442	513	445	522	428	501	500,4	456	521	0,20	0,19	0,02513	442,75	11,1275
10	439	516	442	524	431	507	506,4	452	520,4	0,22	0,21	0,02765	441	12,1919
11	435	519	428	520	426	509	508,4	449	525	0,24	0,23	0,03016	434,5	13,1042
12	364	519	81,7	515	514,4	353	509	508,4	428	0,26	0,25	0,03267	306,675	10,0199
13	3,98	522	0,707	516	515,4	3,75	509	508,4	28,2	0,28	0,27	0,03519	9,15925	0,32228
14	0,504	522	0,148	527	526,4	0,515	515	514,4	0,832	0,30	0,29	0,03770	0,49975	0,01884
15	0,152	544	0,064	529	528,4	0,151	505	504,4	0,152	0,32	0,31	0,04021	0,12975	0,00522
16	0,082	521	0,036	515	514,4	0,078	500	499,4	0,073	0,34	0,33	0,04273	0,06725	0,00287
17	0,043	522	0,024	507	506,4	0,043	518	517,4	0,043	0,36	0,35	0,04524	0,03825	0,00173
18	0,026	522	0,02	509	508,4	0,029	515	514,4	0,028	0,38	0,37	0,04775	0,02575	0,00123
19	0,022	526	0,014	512	511,4	0,022	519	518,4	0,02	0,40	0,39	0,05027	0,0195	0,00098
20	0,017	535	0,01	507	506,4	0,017	499	498,4	0,014	0,42	0,41	0,05278	0,0145	0,00077
21	0,014	532	0,01	491	490,4	0,015	501	500,4	0,015	0,44	0,43	0,05529	0,0135	0,00075
22	0,013	531	0,008	508	507,4	0,01	506	505,4	0,014	0,46	0,45	0,05781	0,01125	0,00065
23	0,01	527	0,01	517	516,4	0,009	505	504,4	0,015	0,48	0,47	0,06032	0,011	0,00066
24	0,011	528	0,009	514	513,4	0,009	504	503,4	0,012	0,50	0,49	0,06283	0,01025	0,00064
25	0,01	526	0,009	508	507,4	0,009	504	503,4	0,011	0,52	0,51	0,06535	0,00975	0,00064
26	0,01	524	0,009	513	512,4	0,009	504	503,4	0,007	0,54	0,53	0,06786	0,00875	0,00059
27	0,01	521	0,009	509	508,4	0,009	501	500,4	0,008	0,56	0,55	0,07037	0,009	0,00063
28	0,01	521	0,006	511	510,4	0,009	513	512,4	0,008	0,58	0,57	0,07288	0,00825	0,0006
29	0,01	521	0,008	506	505,4	0,009	495	494,4	0,009	0,60	0,59	0,07540	0,009	0,00068
30	0,008	520	0,01	501	500,4	0,008	504	503,4	0,009	0,62	0,61	0,07791	0,00875	0,00068
31	0,009	520	0,009	501	500,4	0,009	499	498,4	0,01	0,64	0,63	0,08042	0,00925	0,00074



Měření 3

Číslo bodu	Rameno A			Rameno B			Rameno C			Rameno D			Vzdálenost bodu od středu [m]	Poloměr r1 [m]	Poloměr r2 [m]	Odpovídající plocha S [m <sup>2</sup> ]	Průměrná osvětlenost E <sub>i</sub> v ploše [lx]	Světelný tok vystupující Φ <sub>i</sub> [lm]
	měření	Ex14 [lx]	Br [lx]	měření	Ex14 [lx]	Br [lx]	měření	Ex14 [lx]	Br [lx]	měření	Ex14 [lx]	Br [lx]						
Střed	447	511	510,4	420	479	478,5	436	496	495,4	438	499	498,4	0	0,03	0,00283	435,25	1,23064	
1	449	512	511,4	422	477	476,5	431	496	495,4	441	496	495,4	0,04	0,05	0,00503	435,75	2,19032	
2	447	515	514,4	423	480	479,4	441	509	508,4	443	499	498,4	0,06	0,07	0,00754	438,5	3,30621	
3	435	449	448,5	421	480	479,4	429	497	496,4	444	499	498,4	0,08	0,09	0,01005	432,25	4,34545	
4	430	493	492,4	425	486	485,4	427	495	494,4	445	497	496,4	0,10	0,09	0,01257	431,75	5,42553	
5	431	495	494,4	422	487	486,4	431	498	497,4	445	499	498,4	0,12	0,11	0,01508	432,25	6,51818	
6	430	496	495,4	439	505	504,4	432	499	498,4	446	501	500,4	0,14	0,13	0,01759	436,75	7,68371	
7	427	492	491,4	434	503	502,4	430	498	497,4	442	502	501,4	0,16	0,15	0,02011	433,25	8,71101	
8	429	495	494,4	429	501	500,4	429	498	497,4	443	504	503,4	0,18	0,17	0,02262	432,5	9,78292	
9	420	489	488,4	423	500	499,4	423	497	496,4	442	504	503,4	0,20	0,19	0,02513	427	10,7317	
10	417	492	491,4	421	501	500,4	419	495	494,4	440	505	504,4	0,22	0,21	0,02765	424,25	11,7288	
11	412	495	494,4	416	507	506,4	422	507	506,4	434	505	504,4	0,24	0,23	0,03016	421	12,6971	
12	336	490	489,4	71,9	509	508,4	369	512	511,4	416	503	502,4	0,26	0,25	0,03267	298,225	9,74378	
13	3,43	491	490,4	0,634	507	506,4	3,83	493	492,4	32	507	506,4	0,28	0,27	0,03519	9,9735	0,35093	
14	0,425	494	493,4	0,126	513	512,4	0,432	491	490,4	1,1	509	508,4	0,30	0,29	0,03770	0,52075	0,01963	
15	0,133	491	490,4	0,055	515	514,4	0,129	499	498,4	0,131	506	505,4	0,32	0,31	0,04021	0,112	0,0045	
16	0,06	496	495,4	0,033	490	489,4	0,061	502	501,4	0,05	507	506,4	0,34	0,33	0,04273	0,051	0,00218	
17	0,036	501	500,4	0,02	500	499,4	0,035	505	504,4	0,025	499	498,4	0,36	0,35	0,04524	0,029	0,00131	
18	0,025	501	500,4	0,015	491	490,4	0,021	504	503,4	0,015	496	495,4	0,38	0,37	0,04775	0,019	0,00091	
19	0,018	498	497,4	0,011	489	488,4	0,017	501	500,4	0,013	496	495,4	0,40	0,39	0,05027	0,01475	0,00074	
20	0,016	500	499,4	0,009	490	489,4	0,013	499	498,4	0,01	493	492,4	0,42	0,41	0,05278	0,012	0,00063	
21	0,015	504	503,4	0,008	498	497,4	0,01	501	500,4	0,01	497	496,4	0,44	0,43	0,05529	0,01075	0,00059	
22	0,014	505	504,4	0,01	499	498,4	0,01	509	508,4	0,008	503	502,4	0,46	0,45	0,05781	0,0105	0,00061	
23	0,01	502	501,4	0,011	504	503,4	0,008	509	508,4	0,008	505	504,4	0,48	0,47	0,06032	0,00925	0,00056	
24	0,011	491	490,4	0,01	503	502,4	0,008	508	507,4	0,009	505	504,4	0,50	0,49	0,06283	0,0095	0,0006	
25	0,01	490	489,4	0,01	510	509,4	0,008	508	507,4	0,008	505	504,4	0,52	0,51	0,06535	0,009	0,00059	
26	0,009	487	486,4	0,009	510	509,4	0,008	505	504,4	0,005	504	503,4	0,54	0,53	0,06786	0,00775	0,00053	
27	0,01	486	485,4	0,009	500	499,4	0,006	502	501,4	0,006	502	501,4	0,56	0,55	0,07037	0,00775	0,00055	
28	0,01	482	481,4	0,008	500	499,4	0,007	498	497,4	0,007	506	505,4	0,58	0,57	0,07288	0,008	0,00058	
29	0,01	485	484,4	0,009	500	499,4	0,007	502	501,4	0,007	507	506,4	0,60	0,59	0,07540	0,00825	0,00062	
30	0,012	481	480,4	0,008	495	494,4	0,006	505	504,4	0,008	512	511,4	0,62	0,61	0,07791	0,0085	0,00066	
31	0,012	481	480,4	0,009	497	496,4	0,008	500	499,4	0,009	529	528,4	0,64	0,63	0,08042	0,0095	0,00076	



**Protokol o měření zpětného odrazu světlovodu – vzorek č.2a , měření 2**

Číslo bodu	Rameno A				Rameno B				Rameno C				Rameno D				Vzdálenost bodu od středu	Poloměr r1	Poloměr r2	Odpovídající plocha S	Průměrná osvětlenost EI v ploše	Světelný tok vystupující Φi
	měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace							
	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14						
[ - ]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lm]		
Střed	5,4	506	6,7	505,4	5,3	496	6,6	495,4	5,2	495	6,5	494,4	5,3	490	6,6	489,4	0	0,025	0,00196	6,6	0,01295	
1	5,6	503	7,0	502,4	5,8	497	7,2	496,4	5,5	501	6,8	500,4	5,9	508	7,3	507,4	0,05	0,025	0,01571	7,1	0,1114	
2	6	503	7,5	502,4	6,1	502	7,6	501,4	6	504	7,5	503,4	6,1	505	7,6	504,4	0,10	0,075	0,03142	7,5	0,23647	
3	6,2	506	7,7	505,4	6,2	497	7,7	496,4	6,1	501	7,6	500,4	6,2	503	7,7	502,4	0,15	0,125	0,04712	7,7	0,36204	
4	6,2	503	7,7	502,4	5,9	490	7,3	489,4	5,8	499	7,2	498,4	6	505	7,5	504,4	0,20	0,175	0,06283	7,4	0,46708	

**Protokol o měření zpětného odrazu světlovodu – vzorek č.2a, měření 3**

Číslo bodu	Rameno A				Rameno B				Rameno C				Rameno D				Vzdálenost bodu od středu	Poloměr r1	Poloměr r2	Odpovídající plocha S	Průměrná osvětlenost EI v ploše	Světelný tok vystupující Φi
	měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace							
	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14						
[ - ]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lm]	
Střed	5,4	499	6,7	498,4	5,4	506	6,7	505,4	5,1	479	6,3	478,5	5,4	505	6,7	504,4	0	0,025	0,00196	6,6	0,01301	
1	5,8	506	7,2	505,4	5,9	504	7,3	503,4	5,5	485	6,8	484,4	5,9	508	7,3	507,4	0,05	0,025	0,01571	7,2	0,11286	
2	6,1	501	7,6	500,4	6,1	502	7,6	501,4	5,9	494	7,3	493,4	6,2	508	7,7	507,4	0,10	0,075	0,03142	7,6	0,23745	
3	6,2	497	7,7	496,4	6,2	503	7,7	502,4	6	489	7,5	488,4	6,2	502	7,7	501,4	0,15	0,125	0,04712	7,7	0,36057	
4	6	494	7,5	493,4	6	499	7,5	498,4	5,8	495	7,2	494,4	5,9	489	7,3	488,4	0,20	0,175	0,06283	7,4	0,46317	

**Souhrnné výsledky měření – zpětný tok:**

	Označení	Měření			Průměr	Jednotky
		1	2	3		
Osvětlenost nad světlovodem	$E_e$	520	500	498	<b>506</b>	lx
Průměr světlovodu	r	0,265			<b>0,265</b>	m
Plocha světlovodu	S	0,2206			<b>0,2206</b>	m <sup>2</sup>
Světelný tok vstupující do světlovodu	$\Phi_e$	114,7	110,3	109,8	<b>111,6</b>	lm
Světelný tok vystupující ze světlovodu	$\Phi_i$	1,244	1,190	1,187	<b>1,207</b>	lm
Naměřená účinnost přenosu difúzního světla	$Eff_v$	0,0108	0,0108	0,01018	<b>0,0108</b>	-

# Příloha 7

– Protokol o měření světlovodu  
vzorek 2b



# PROTOKOL O MĚŘENÍ SVĚTLOVODU

## - VZOREK 2b



<b>Předmět testování:</b>	světlovod - vzorek 2b pod umělou oblohou Alanod - Miro Silver 27, s kopulí, bez difuzoru
<b>Použité přístroje:</b>	Luxmeter Extech 450 č.14 Precision Photometer Bruel-Kjaer 1105
<b>Místo testování:</b>	Světlo-technická laboratoř Ústav stavebnictva a architektury Slovenská akadémia vied
<b>Datum testování:</b>	05.08.2013
<b>Počet stran:</b>	5

**Popis měření:** Dopadající i vystupující světlo se měřilo luxmetry se směrově a spektrálně korigovanými hlavicemi. Čidlo luxmetru měřící vystupující množství světla se posouvalo pod vzorkem světlovodu s konstantním krokem 20 mm ve vzdálenosti 3 mm mezi spodní hranou světlovodu nebo difuzoru a čidlem luxmetru. Měřila se osvětlenost od osy světlovodu do vzdálenosti 0,64 m ve čtyřech na sebe kolmých směrech dle metodiky [1]. Každý testovaný vzorek byl měřen ve třech opakováních a z každé sady měření se vypočítala průměrná hodnota světelného toku vstupujícího do světlovodu  $\Phi_e$  a vystupujícího ze světlovodu  $\Phi_i$ .

Měření 1

Číslo bodu [-]	Rameno A		Rameno B		Rameno C		Rameno D		Vzdálenost bodu od středu [m]	Poloměr r1 [m]	Poloměr r2 [m]	Odpovídající plocha S [m²]	Průměrná osvětlenost Ei v ploše [lx]	Světelný tok vystupující [lm]
	Br	Ex14	měření	kalibrace	Br	Ex14	měření	kalibrace						
Střed	388	492	491,4	397	505	504,4	388	491	490,4	0	0,03	0,00283	388,75	1,09916
1	415	528	527,4	404	511	510,4	384	492	491,4	0,04	0,03	0,00503	397	1,99554
2	416	533	532,4	404	513	512,4	383	492	491,4	0,06	0,05	0,00754	397,75	2,99896
3	414	531	530,4	403	513	512,4	381	491	490,4	0,08	0,07	0,01005	396,75	3,98857
4	415	533	532,4	421	541	540,4	382	493	492,4	0,10	0,09	0,01257	402,75	5,06111
5	415	534	533,4	401	514	513,4	390	504	503,4	0,12	0,11	0,01508	405,25	6,11103
6	414	532	531,4	400	514	513,4	390	502	501,4	0,14	0,13	0,01759	398	7,00198
7	413	532	531,4	397	512	511,4	389	503	502,4	0,16	0,15	0,02011	397,25	7,98719
8	405	522	521,4	389	507	506,4	385	499	498,4	0,18	0,17	0,02262	391,75	8,86118
9	405	528	527,4	411	542	541,4	381	499	498,4	0,20	0,19	0,02513	395,25	9,93372
10	399	528	527,4	382	509	508,4	379	502	501,4	0,22	0,21	0,02765	385,25	10,6506
11	388	524	523,4	372	509	508,4	373	501	500,4	0,24	0,23	0,03016	375,75	11,3324
12	311	529	528,4	140,2	512	511,4	334	501	500,4	0,26	0,25	0,03267	290,05	9,47668
13	2,87	529	528,4	0,648	516	515,4	4,12	497	496,4	0,28	0,27	0,03519	5,0145	0,17644
14	0,338	529	528,4	0,119	507	506,4	0,43	496	495,4	0,30	0,29	0,03770	0,345	0,01301
15	0,112	531	530,4	0,046	506	505,4	0,123	494	493,4	0,32	0,31	0,04021	0,09275	0,00373
16	0,054	530	529,4	0,026	530	529,4	0,063	493	492,4	0,34	0,33	0,04273	0,046	0,00197
17	0,031	526	525,4	0,014	514	513,4	0,032	489	488,4	0,36	0,35	0,04524	0,02425	0,0011
18	0,021	532	531,4	0,009	504	503,4	0,02	487	486,4	0,38	0,37	0,04775	0,016	0,00076
19	0,015	529	528,4	0,008	501	500,4	0,014	488	487,4	0,40	0,39	0,05027	0,01225	0,00062
20	0,014	529	528,4	0,006	499	498,4	0,013	490	489,4	0,42	0,41	0,05278	0,0105	0,00055
21	0,011	532	531,4	0,008	494	493,4	0,009	485	484,4	0,44	0,43	0,05529	0,00975	0,00054
22	0,009	527	526,4	0,008	497	496,4	0,008	485	484,4	0,46	0,45	0,05781	0,008	0,00046
23	0,008	534	533,4	0,007	493	492,4	0,007	485	484,4	0,48	0,47	0,06032	0,007	0,00042
24	0,008	532	531,4	0,007	494	493,4	0,006	486	485,4	0,50	0,49	0,06283	0,00725	0,00046
25	0,008	522	521,4	0,007	490	489,4	0,006	487	486,4	0,52	0,51	0,06535	0,007	0,00046
26	0,009	537	536,4	0,006	492	491,4	0,006	485	484,4	0,54	0,53	0,06786	0,00675	0,00046
27	0,007	537	536,4	0,006	495	494,4	0,006	480	479,4	0,56	0,55	0,07037	0,0065	0,00046
28	0,008	534	533,4	0,007	488	487,4	0,006	485	484,4	0,58	0,57	0,07288	0,007	0,00051
29	0,009	536	535,4	0,006	498	497,4	0,007	481	480,4	0,60	0,59	0,07540	0,00675	0,00051
30	0,009	535	534,4	0,007	495	494,4	0,007	485	484,4	0,62	0,61	0,07791	0,00725	0,00056
31	0,016	534	533,4	0,005	492	491,4	0,007	486	485,4	0,64	0,63	0,08042	0,00875	0,0007

Měření 2

Číslo bodu	Rameno A		Rameno B		Rameno C		Rameno D		Vzdálenost bodu od středu	Poloměr r1	Poloměr r2	Odpovídající plocha S	Průměrná osvětlenost E <sub>i</sub> v ploše	Světelný tok vystupující Φ <sub>i</sub>
	měření	kalibrace	měření	kalibrace	měření	kalibrace	měření	kalibrace						
[-]	Br	Ex14	Br	Ex14	Br	Ex14	Br	Ex14	[m]	[m]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[lx]	[lm]
Střed	484	488	412	524	485	484,4	369	466	465,5	0	0,03	0,00283	411,75	1,1642
1	398	510	415	525	481	480,4	398	503	502,4	0,04	0,03	0,00503	396,75	1,99428
2	377	484	419	533	482	491,4	395	497	496,4	0,06	0,05	0,00754	393,25	2,96504
3	377	486	414	528	486	485,4	390	491	490,4	0,08	0,07	0,01005	388,25	3,90311
4	371	477	412	529	483	482,4	364	458	457,5	0,10	0,09	0,01257	380	4,77522
5	375	482	412	529	486	485,4	369	464	463,5	0,12	0,11	0,01508	383	5,7755
6	376	484	412	531	487	486,4	366	463	462,5	0,14	0,13	0,01759	382,75	6,73369
7	373	484	411	530	489	488,4	363	464	463,5	0,16	0,15	0,02011	381	7,66046
8	371	479	408	534	490	489,4	362	464	463,5	0,18	0,17	0,02262	379	8,57278
9	368	481	410	541	489	488,4	359	462	461,5	0,20	0,19	0,02513	377,5	9,48761
10	364	481	403	538	489	488,4	358	465	464,5	0,22	0,21	0,02765	373,5	10,3258
11	360	486	485,4	537	491	490,4	346	462	461,5	0,24	0,23	0,03016	365	11,0081
12	265	485	484,4	532	490	489,4	322	454	453,5	0,26	0,25	0,03267	257,725	8,42054
13	2,19	483	482,4	537	490	489,4	7,61	461	460,5	0,28	0,27	0,03519	3,6735	0,12926
14	0,289	481	480,4	539	486	485,4	0,385	456	455,5	0,30	0,29	0,03770	0,30275	0,01141
15	0,093	487	486,4	534	484	483,4	0,089	464	463,5	0,32	0,31	0,04021	0,0855	0,00344
16	0,051	528	527,4	538	480	479,4	0,03	464	463,5	0,34	0,33	0,04273	0,03875	0,00166
17	0,028	489	488,4	534	481	480,4	0,015	470	469,5	0,36	0,35	0,04524	0,02175	0,00098
18	0,019	487	486,4	530	478	477,5	0,011	463	462,5	0,38	0,37	0,04775	0,01475	0,0007
19	0,014	488	487,4	525	484	483,4	0,007	465	464,5	0,40	0,39	0,05027	0,011	0,00055
20	0,012	490	489,4	531	483	482,4	0,009	496	495,4	0,42	0,41	0,05278	0,01	0,00053
21	0,009	492	491,4	527	483	482,4	0,007	501	500,4	0,44	0,43	0,05529	0,00825	0,00046
22	0,008	488	487,4	529	483	482,4	0,007	497	496,4	0,46	0,45	0,05781	0,007	0,0004
23	0,008	488	487,4	527	477	476,5	0,006	483	482,4	0,48	0,47	0,06032	0,007	0,00042
24	0,007	485	484,4	529	475	474,5	0,005	467	466,5	0,50	0,49	0,06283	0,0065	0,00041
25	0,007	521	520,4	516	480	479,4	0,007	470	469,5	0,52	0,51	0,06535	0,00675	0,00044
26	0,006	529	528,4	535	465	464,5	0,004	473	472,5	0,54	0,53	0,06786	0,006	0,00041
27	0,007	527	526,4	536	462	461,5	0,005	469	468,5	0,56	0,55	0,07037	0,0065	0,00046
28	0,007	520	519,4	525	460	459,5	0,006	472	471,5	0,58	0,57	0,07288	0,0065	0,00047
29	0,007	525	524,4	521	461	460,5	0,005	472	471,5	0,60	0,59	0,07540	0,0065	0,00049
30	0,008	528	527,4	517	463	462,5	0,005	477	476,5	0,62	0,61	0,07791	0,0065	0,00051
31	0,008	523	522,4	488	487,4	487,4	0,005	455	454,5	0,64	0,63	0,08042	0,00625	0,0005



Měření 3

Číslo bodu	Rameno A			Rameno B			Rameno C			Rameno D			Vzdálenost bodu od středu [m]	Poloměr r1 [m]	Poloměr r2 [m]	Odpovídající plocha S [m <sup>2</sup> ]	Průměrná osvětlenost Ei v ploše [lx]	Světelný tok vystupující Φi [lm]
	měření	kalibrace		měření	kalibrace		měření	kalibrace		měření	kalibrace							
	Br	Ex14	[lx]	Br	Ex14	[lx]	Br	Ex14	[lx]	Br	Ex14	[lx]	Br	Ex14	[lx]			
Střed	379	476	475,5	400	509	508,4	398	508	507,4	397	508	507,4	0	0	0,03	0,00283	393,5	1,1126
1	387	498	497,4	405	514	513,4	394	507	506,4	405	513	512,4	0,04	0,03	0,05	0,00503	397,75	1,99931
2	391	505	504,4	413	520	519,4	394	510	509,4	403	508	507,4	0,06	0,05	0,07	0,00754	400,25	3,01781
3	383	495	494,4	402	511	510,4	396	512	511,4	407	512	511,4	0,08	0,07	0,09	0,01005	397	3,99108
4	388	500	499,4	401	514	513,4	393	513	512,4	407	513	512,4	0,10	0,09	0,11	0,01257	397,25	4,99199
5	386	501	500,4	401	516	515,4	396	515	514,4	408	513	512,4	0,12	0,11	0,13	0,01508	397,75	5,99793
6	385	501	500,4	400	516	515,4	399	515	514,4	407	514	513,4	0,14	0,13	0,15	0,01759	397,75	6,99758
7	383	494	493,4	401	518	517,4	393	509	508,4	402	513	512,4	0,16	0,15	0,17	0,02011	394,75	7,93692
8	382	496	495,4	397	519	518,4	394	516	515,4	402	513	512,4	0,18	0,17	0,19	0,02262	393,75	8,90642
9	378	497	496,4	393	519	518,4	393	518	517,4	398	514	513,4	0,20	0,19	0,21	0,02513	390,5	9,81434
10	378	504	503,4	388	519	518,4	387	514	513,4	394	515	514,4	0,22	0,21	0,23	0,02765	386,75	10,6921
11	400	542	541,4	377	517	516,4	383	517	516,4	389	518	517,4	0,24	0,23	0,25	0,03016	387,25	11,6792
12	251	521	520,4	146,9	518	517,4	336	510	509,4	363	517	516,4	0,26	0,25	0,27	0,03267	274,225	8,95963
13	1,92	512	511,4	0,58	515	514,4	3,55	517	516,4	5,63	521	520,4	0,28	0,27	0,29	0,03519	2,92	0,10274
14	0,275	519	518,4	0,102	515	514,4	0,386	516	515,4	0,366	517	516,4	0,30	0,29	0,31	0,03770	0,28225	0,01064
15	0,093	551	550,4	0,049	516	515,4	0,111	516	515,4	0,089	517	516,4	0,32	0,31	0,33	0,04021	0,0855	0,00344
16	0,045	525	524,4	0,027	519	518,4	0,05	515	514,4	0,032	529	528,4	0,34	0,33	0,35	0,04273	0,0385	0,00164
17	0,028	515	514,4	0,024	519	518,4	0,028	520	519,4	0,016	520	519,4	0,36	0,35	0,37	0,04524	0,024	0,00109
18	0,018	519	518,4	0,014	514	513,4	0,018	513	512,4	0,013	520	519,4	0,38	0,37	0,39	0,04775	0,01575	0,00075
19	0,015	520	519,4	0,01	505	504,4	0,013	511	510,4	0,009	515	514,4	0,40	0,39	0,41	0,05027	0,01175	0,00059
20	0,011	521	520,4	0,008	505	504,4	0,01	519	518,4	0,008	516	515,4	0,42	0,41	0,43	0,05278	0,00925	0,00049
21	0,009	556	555,4	0,007	506	505,4	0,009	504	503,4	0,006	513	512,4	0,44	0,43	0,45	0,05529	0,00775	0,00043
22	0,008	543	542,4	0,005	496	495,4	0,007	510	509,4	0,005	510	509,4	0,46	0,45	0,47	0,05781	0,00625	0,00036
23	0,006	515	514,4	0,006	501	500,4	0,008	513	512,4	0,006	504	503,4	0,48	0,47	0,49	0,06032	0,0065	0,00039
24	0,006	522	521,4	0,004	505	504,4	0,006	512	511,4	0,007	509	508,4	0,50	0,49	0,51	0,06283	0,00575	0,00036
25	0,006	550	549,4	0,005	512	511,4	0,006	509	508,4	0,006	506	505,4	0,52	0,51	0,53	0,06535	0,006	0,00039
26	0,006	538	537,4	0,005	508	507,4	0,007	513	512,4	0,005	510	509,4	0,54	0,53	0,55	0,06786	0,00575	0,00039
27	0,005	532	531,4	0,005	511	510,4	0,007	513	512,4	0,005	510	509,4	0,56	0,55	0,57	0,07037	0,0055	0,00039
28	0,006	524	523,4	0,004	524	523,4	0,006	513	512,4	0,006	551	550,4	0,58	0,57	0,59	0,07288	0,0055	0,0004
29	0,006	554	553,4	0,004	512	511,4	0,006	513	512,4	0,005	549	548,4	0,60	0,59	0,61	0,07540	0,00525	0,0004
30	0,006	514	513,4	0,006	508	507,4	0,006	515	514,4	0,006	550	549,4	0,62	0,61	0,63	0,07791	0,006	0,00047
31	0,007	513	512,4	0,005	510	509,4	0,007	518	517,4	0,005	548	547,4	0,64	0,63	0,65	0,08042	0,006	0,00048

## Souhrnné výsledky měření:

	Označení	Měření			Průměr	Jednotky
		1	2	3		
Osvětlenost nad světlovodem	$E_e$	506	494	515	<b>505</b>	lx
Průměr světlovodu	r	0,265			<b>0,265</b>	m
Plocha světlovodu	S	0,2206			<b>0,2206</b>	m <sup>2</sup>
Světelný tok vstupující do světlovodu	$\Phi_e$	111,6	108,9	113,6	<b>111,4</b>	lm
Světelný tok vystupující ze světlovodu	$\Phi_i$	86,7	82,9	86,2	<b>85,3</b>	lm
Naměřená účinnost přenosu difúzního světla	Eff <sub>v</sub>	0,7771	0,7615	0,7589	<b>0,7658</b>	-

# Příloha 8

– Protokol o měření světlovodu  
vzorek 2c



# PROTOKOL O MĚŘENÍ SVĚTLOVODU

## - VZOREK 2c



<b>Předmět testování:</b>	světlovod - vzorek 2c pod umělou oblohou Alanod - Miro Silver 27, bez kopule, s difuzorem
<b>Použité přístroje:</b>	Luxmeter Extech 450 č.14  Precision Photometer Bruel-Kjaer 1105  Luxmeter Extech 450 č.15
<b>Místo testování:</b>	Světlo-technická laboratoř Ústav stavebnictva a architektury Slovenská akadémia vied
<b>Datum testování:</b>	07.08.2013
<b>Počet stran:</b>	7

**Popis měření:** Dopadající i vystupující světlo se měřilo luxmetry se směrově a spektrálně korigovanými hlavicemi. Čidlo luxmetru měřící vystupující množství světla se posouvalo pod vzorkem světlovodu s konstantním krokem 20 mm ve vzdálenosti 3 mm mezi spodní hranou světlovodu nebo difuzoru a čidlem luxmetru. Měřila se osvětlenost od osy světlovodu do vzdálenosti 0,64 m ve čtyřech na sebe kolmých směrech dle metodiky [1]. Každý testovaný vzorek byl měřen ve třech opakováních a z každé sady měření se vypočítala průměrná hodnota světelného toku vstupujícího do světlovodu  $\Phi_e$  a vystupujícího ze světlovodu  $\Phi_i$ .

Pro tento vzorek světlovodu byl měřen také zpětný odraz a to pomocí dvou luxmetrů, kdy ve stejný čas byla odečtena hodnota ze senzoru luxmetru (Extech č. 14), který měřil světlo vstupující do světlovodu a druhý senzor (Extech č.15) světlo zpětně se odrážející ze světlovodu směrem zpět do kopule umělé oblohy.

**Místo vydání:** Bratislava  
**Datum vydání:** 16.8.2013

**Testovala:** Ing. Lenka Prokopová  
**Zodpovědná osoba:** Doc. Ing. Stanislav Darula, CSc

Měření 1

Číslo bodu	Rameno A		Rameno B		Rameno C		Rameno D		Vzdálenost bodu od středu [m]	Poloměr r1 [m]	Poloměr r2 [m]	Odpovídající plocha S [m <sup>2</sup> ]	Průměrná osvětlenost Ei v ploše [lx]	Světelný tok vystupující [lm]			
	Br	Ex14	Br	Ex14	Br	Ex14	Br	Ex14									
Střed	340	506	505,4	345	514	513,4	308	459	458,5	311	464	463,5	0	0,03	0,00283	326	0,92174
1	339	504	503,4	353	518	517,4	309	457	456,5	320	467	466,5	0,04	0,03	0,00503	330,25	1,66002
2	339	505	504,4	354	520	519,4	311	465	464,5	320	465	464,5	0,06	0,05	0,00754	331	2,49568
3	333	498	497,4	353	521	520,4	306	459	458,5	324	469	468,5	0,08	0,07	0,01005	329	3,30747
4	331	494	493,4	351	522	521,4	309	464	463,5	322	465	464,5	0,10	0,09	0,01257	328,25	4,12491
5	330	494	493,4	351	522	521,4	314	473	472,5	318	462	461,5	0,12	0,11	0,01508	328,25	4,94989
6	335	502	501,4	345	514	513,4	319	480	479,4	310	455	454,5	0,14	0,13	0,01759	327,25	5,75728
7	339	508	507,4	343	516	515,4	317	478	477,5	311	460	459,5	0,16	0,15	0,02011	327,5	6,58478
8	340	512	511,4	339	514	513,4	310	473	472,5	314	470	469,5	0,18	0,17	0,02262	325,75	7,36829
9	333	509	508,4	334	514	513,4	307	472	471,5	312	470	469,5	0,20	0,19	0,02513	321,5	8,08018
10	325	512	511,4	328	516	515,4	302	475	474,5	300	463	462,5	0,22	0,21	0,02765	313,75	8,67394
11	301	510	509,4	307	514	513,4	288	482	481,4	283	466	465,5	0,24	0,23	0,03016	294,75	8,88945
12	42,5	513	512,4	21,4	511	510,4	64,3	473	472,5	64,8	474	473,5	0,26	0,25	0,03267	48,25	1,57645
13	1,82	514	513,4	0,458	517	516,4	1,696	468	467,5	0,998	480	479,4	0,28	0,27	0,03519	1,243	0,04374
14	0,351	517	516,4	0,12	516	515,4	0,324	464	463,5	0,167	467	466,5	0,30	0,29	0,03770	0,2405	0,00907
15	0,145	516	515,4	0,049	517	516,4	0,117	464	463,5	0,066	466	465,5	0,32	0,31	0,04021	0,09425	0,00379
16	0,075	517	516,4	0,027	519	518,4	0,055	468	467,5	0,034	460	459,5	0,34	0,33	0,04273	0,04775	0,00204
17	0,045	518	517,4	0,016	516	515,4	0,034	483	482,4	0,022	457	456,5	0,36	0,35	0,04524	0,02925	0,00132
18	0,032	523	522,4	0,012	522	521,4	0,022	477	476,5	0,024	456	455,5	0,38	0,37	0,04775	0,0225	0,00107
19	0,023	528	527,4	0,011	516	515,4	0,016	472	471,5	0,012	456	455,5	0,40	0,39	0,05027	0,0155	0,00078
20	0,019	526	525,4	0,009	471	470,5	0,012	467	466,5	0,01	449	448,5	0,42	0,41	0,05278	0,0125	0,00066
21	0,013	521	520,4	0,007	477	476,5	0,01	468	467,5	0,009	453	452,5	0,44	0,43	0,05529	0,00975	0,00054
22	0,012	521	520,4	0,007	471	470,5	0,007	458	457,5	0,008	447	446,5	0,46	0,45	0,05781	0,0085	0,00049
23	0,012	519	518,4	0,007	474	473,5	0,007	459	458,5	0,008	459	458,5	0,48	0,47	0,06032	0,0085	0,00051
24	0,009	520	519,4	0,005	480	479,4	0,008	464	463,5	0,007	453	452,5	0,50	0,49	0,06283	0,00725	0,00046
25	0,009	522	521,4	0,004	475	474,5	0,008	462	461,5	0,007	456	455,5	0,52	0,51	0,06535	0,007	0,00046
26	0,007	518	517,4	0,005	467	466,5	0,006	458	457,5	0,007	453	452,5	0,54	0,53	0,06786	0,00625	0,00042
27	0,007	516	515,4	0,004	472	471,5	0,007	460	459,5	0,006	460	459,5	0,56	0,55	0,07037	0,006	0,00042
28	0,007	519	518,4	0,004	474	473,5	0,006	461	460,5	0,006	472	471,5	0,58	0,57	0,07288	0,00575	0,00042
29	0,007	515	514,4	0,003	476	475,5	0,005	469	468,5	0,005	467	466,5	0,60	0,59	0,07540	0,005	0,00038
30	0,007	520	519,4	0,004	465	464,5	0,005	469	468,5	0,006	457	456,5	0,62	0,61	0,07791	0,0055	0,00043
31	0,007	515	514,4	0,004	471	470,5	0,005	465	464,5	0,007	463	462,5	0,64	0,63	0,08042	0,00575	0,00046

Měření 2

Číslo bodu	Rameno A		Rameno B		Rameno C		Rameno D		Vzdálenost bodu od středu	Poloměr r1	Poloměr r2	Odpovídající plocha S	Průměrná osvětlenost E <sub>i</sub> v ploše	Světelný tok vystupující Φ <sub>i</sub>
	měření		kalibrace		měření		kalibrace							
	Br	Ex14	[lx]	[lx]	Br	Ex14	[lx]	[lx]						
Střed									0	0,03	0,00283	324,25	0,9168	
1	324	481	480,4	482	482	481,4	483	482,4	0,04	0,05	0,00503	327	1,64368	
2	322	481	480,4	330	486	485,4	327	486	0,06	0,07	0,00754	328	2,47306	
3	322	480	479,4	327	482	481,4	326	488	0,08	0,09	0,01005	327,5	3,29239	
4	322	481	480,4	323	480	479,4	324	486	0,10	0,11	0,01257	326	4,09664	
5	322	481	480,4	324	485	484,4	322	484	0,12	0,13	0,01508	324,75	4,89711	
6	322	481	480,4	324	485	484,4	321	483	0,14	0,15	0,01759	323,75	5,69571	
7	313	478	477,5	324	487	486,4	322	486	0,16	0,17	0,02011	321,5	6,46414	
8	317	479	478,5	318	483	482,4	320	486	0,18	0,19	0,02262	320	7,23823	
9	314	481	480,4	315	485	484,4	315	485	0,20	0,21	0,02513	315,5	7,92938	
10	305	480	479,4	309	485	484,4	307	484	0,22	0,23	0,02765	307,75	8,50806	
11	285	483	482,4	292	489	488,4	292	490	0,24	0,25	0,03016	290,5	8,76127	
12	44,3	478	477,5	21,4	488	487,4	63,8	490	0,26	0,27	0,03267	48,375	1,58054	
13	1,626	482	481,4	0,421	490	489,4	1,799	492	0,28	0,29	0,03519	1,19975	0,04221	
14	0,322	479	478,5	0,104	488	487,4	0,314	488	0,30	0,31	0,03770	0,22525	0,00849	
15	0,121	480	479,4	0,043	489	488,4	0,124	486	0,32	0,33	0,04021	0,08825	0,00355	
16	0,065	481	480,4	0,021	486	485,4	0,057	483	0,34	0,35	0,04273	0,0445	0,0019	
17	0,043	481	480,4	0,014	489	488,4	0,036	484	0,36	0,37	0,04524	0,02875	0,0013	
18	0,036	482	481,4	0,011	485	484,4	0,025	481	0,38	0,39	0,04775	0,022	0,00105	
19	0,022	481	480,4	0,009	481	480,4	0,018	489	0,40	0,41	0,05027	0,0155	0,00078	
20	0,018	482	481,4	0,008	478	477,5	0,014	489	0,42	0,43	0,05278	0,01275	0,00067	
21	0,014	482	481,4	0,007	480	479,4	0,012	485	0,44	0,45	0,05529	0,01	0,00055	
22	0,013	479	478,5	0,006	483	482,4	0,01	485	0,46	0,47	0,05781	0,00975	0,00056	
23	0,011	483	482,4	0,005	484	483,4	0,009	482	0,48	0,49	0,06032	0,00875	0,00053	
24	0,011	484	483,4	0,005	484	483,4	0,008	482	0,50	0,51	0,06283	0,008	0,0005	
25	0,01	485	484,4	0,004	484	483,4	0,008	487	0,52	0,53	0,06535	0,00725	0,00047	
26	0,008	476	475,5	0,005	481	480,4	0,007	485	0,54	0,55	0,06786	0,007	0,00048	
27	0,008	478	477,5	0,005	484	483,4	0,008	489	0,56	0,57	0,07037	0,00725	0,00051	
28	0,008	480	479,4	0,004	483	482,4	0,006	489	0,58	0,59	0,07288	0,00625	0,00046	
29	0,007	484	483,4	0,004	485	484,4	0,005	486	0,60	0,61	0,07540	0,00575	0,00043	
30	0,008	482	481,4	0,005	488	487,4	0,005	485	0,62	0,63	0,07791	0,006	0,00047	
31	0,007	482	481,4	0,004	483	482,4	0,004	484	0,64	0,65	0,08042	0,00575	0,00046	

Měření 3

Číslo bodu	Rameno A			Rameno B			Rameno C			Rameno D			Vzdálenost bodu od středu [m]	Poloměr r1 [m]	Poloměr r2 [m]	Odpovídající plocha S [m <sup>2</sup> ]	Průměrná osvětlenost Ei v ploše [lx]	Světelný tok vystupující Φi [lm]
	měření		kalibrace	měření		kalibrace	měření		kalibrace	měření		kalibrace						
	Br	Ex14	Ex14	Br	Ex14	Ex14	Br	Ex14	Ex14	Br	Ex14	Ex14						
[-]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]
Střed	316	472	471,5	317	474	473,5	309	461	460,5	312	464	463,5	0	0	0,03	0,00283	313,5	0,8864
1	318	473	472,5	322	473	472,5	311	465	464,5	316	462	461,5	0,04	0,03	0,05	0,00503	316,75	1,59216
2	317	474	473,5	323	475	474,5	310	464	463,5	321	464	463,5	0,06	0,05	0,07	0,00754	317,75	2,39578
3	318	476	475,5	322	473	472,5	311	467	466,5	324	469	468,5	0,08	0,07	0,09	0,01005	318,75	3,20442
4	318	416	415,5	319	475	474,5	311	468	467,5	325	470	469,5	0,10	0,09	0,11	0,01257	318,25	3,99925
5	315	471	470,5	321	480	479,4	308	464	463,5	321	467	466,5	0,12	0,11	0,13	0,01508	316,25	4,76894
6	315	474	473,5	319	477	476,5	308	462	461,5	320	470	469,5	0,14	0,13	0,15	0,01759	315,5	5,55057
7	316	474	473,5	315	474	473,5	305	461	460,5	318	470	469,5	0,16	0,15	0,17	0,02011	313,5	6,30329
8	313	472	471,5	313	475	474,5	305	464	463,5	314	469	468,5	0,18	0,17	0,19	0,02262	311,25	7,04031
9	311	475	474,5	308	476	475,5	303	467	466,5	310	466	465,5	0,20	0,19	0,21	0,02513	308	7,74088
10	304	477	476,5	303	477	476,5	296	466	465,5	303	469	468,5	0,22	0,21	0,23	0,02765	301,5	8,33527
11	280	474	473,5	286	477	476,5	279	468	467,5	284	468	467,5	0,24	0,23	0,25	0,03016	282,25	8,51246
12	44	473	472,5	19,3	478	477,5	61,9	463	462,5	60,8	467	466,5	0,26	0,25	0,27	0,03267	46,5	1,51927
13	1,542	476	475,5	0,37	473	472,5	1,72	465	464,5	0,915	470	469,5	0,28	0,27	0,29	0,03519	1,13675	0,04
14	0,301	477	476,5	0,096	478	477,5	0,292	464	463,5	0,153	471	470,5	0,30	0,29	0,31	0,03770	0,2105	0,00794
15	0,116	474	473,5	0,04	482	481,4	0,119	464	463,5	0,06	470	469,5	0,32	0,31	0,33	0,04021	0,08375	0,00337
16	0,061	474	473,5	0,021	477	476,5	0,056	464	463,5	0,031	469	468,5	0,34	0,33	0,35	0,04273	0,04225	0,00181
17	0,038	477	476,5	0,015	482	481,4	0,035	464	463,5	0,02	472	471,5	0,36	0,35	0,37	0,04524	0,027	0,00122
18	0,028	480	479,4	0,012	475	474,5	0,029	464	463,5	0,016	473	472,5	0,38	0,37	0,39	0,04775	0,02125	0,00101
19	0,021	480	479,4	0,008	477	476,5	0,017	463	462,5	0,013	472	471,5	0,40	0,39	0,41	0,05027	0,01475	0,00074
20	0,017	480	479,4	0,007	477	476,5	0,013	467	466,5	0,015	469	468,5	0,42	0,41	0,43	0,05278	0,013	0,00069
21	0,013	481	480,4	0,007	473	472,5	0,012	465	464,5	0,012	470	469,5	0,44	0,43	0,45	0,05529	0,011	0,00061
22	0,012	479	478,5	0,006	469	468,5	0,01	464	463,5	0,01	468	467,5	0,46	0,45	0,47	0,05781	0,0095	0,00055
23	0,01	477	476,5	0,006	470	469,5	0,009	464	463,5	0,012	466	465,5	0,48	0,47	0,49	0,06032	0,00925	0,00056
24	0,01	477	476,5	0,005	470	469,5	0,007	465	464,5	0,009	468	467,5	0,50	0,49	0,51	0,06283	0,00775	0,00049
25	0,009	477	476,5	0,005	471	470,5	0,007	463	462,5	0,006	470	469,5	0,52	0,51	0,53	0,06535	0,00675	0,00044
26	0,008	476	475,5	0,005	469	468,5	0,006	463	462,5	0,007	469	468,5	0,54	0,53	0,55	0,06786	0,0065	0,00044
27	0,007	473	472,5	0,004	470	469,5	0,006	464	463,5	0,007	468	467,5	0,56	0,55	0,57	0,07037	0,006	0,00042
28	0,007	475	474,5	0,004	467	466,5	0,005	465	464,5	0,006	470	469,5	0,58	0,57	0,59	0,07288	0,0055	0,0004
29	0,006	478	477,5	0,004	467	466,5	0,005	464	463,5	0,006	465	464,5	0,60	0,59	0,61	0,07540	0,00525	0,0004
30	0,006	475	474,5	0,005	469	468,5	0,006	480	479,4	0,006	462	461,5	0,62	0,61	0,63	0,07791	0,00575	0,00045
31	0,006	477	476,5	0,005	467	466,5	0,006	465	464,5	0,007	462	461,5	0,64	0,63	0,65	0,08042	0,006	0,00048

Souhrnné výsledky měření:

	Označení	Měření			Průměr	Jednotky
		1	2	3		
Osvětlenost nad světlovodem	$E_e$	485	483	470	<b>479</b>	lx
Průměr světlovodu	$r$	0,265			<b>0,265</b>	m
Plocha světlovodu	$S$	0,2206			<b>0,2206</b>	m <sup>2</sup>
Světelný tok vstupující do světlovodu	$\Phi_e$	107,1	106,5	103,6	<b>105,7</b>	lm
Světelný tok vystupující ze světlovodu	$\Phi_l$	64,5	63,6	61,9	<b>63,3</b>	lm
Naměřená účinnost přenosu difúzního světla	$Eff_v$	0,602	0,597	0,597	<b>0,599</b>	-

Protokol o měření zpětného odrazu světlovodu – vzorek č.2c, měření 1

Číslo bodu	Rameno A			Rameno B			Rameno C			Rameno D			Vzdálenost bodu od středu	Poloměr $r_1$	Poloměr $r_2$	Odpovídající plocha $S$	Průměrná osvětlenost $E_l$ v ploše	Světelný tok vystupující $\Phi_l$			
	měření		kalibrace	měření		kalibrace	měření		kalibrace	měření		kalibrace									
	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14									
Střed	82,3	524	102,4	523,4	80,9	516	100,7	515,4	80,9	517	100,7	516,4	80,8	505	100,5	504,4	0	0,025	0,00196	101,1	0,19842
1	83,2	514	103,5	513,4	83,9	522	104,4	521,4	82,2	514	102,3	513,4	83,4	521	103,8	520,4	0,05	0,025	0,01571	103,5	1,6255
2	83,5	512	103,9	511,4	84,3	517	104,9	516,4	83,7	519	104,1	518,4	83,9	517	104,4	516,4	0,10	0,075	0,03142	104,3	3,27739
3	84,6	518	105,3	517,4	83,7	512	104,1	511,4	84,2	521	104,8	520,4	84,4	518	105,0	517,4	0,15	0,125	0,04712	104,8	4,93808
4	84,2	518	104,8	517,4	82,8	513	103,0	512,4	82,5	514	102,6	513,4	83,7	517	104,1	516,4	0,20	0,175	0,06283	103,6	6,51179



**Protokol o měření zpětného odrazu světlovodu – vzorek č.2c, měření 2**

Číslo bodu	Rameno A				Rameno B				Rameno C				Rameno D				Vzdálenost bodu od středu	Poloměr r1	Poloměr r2	Odpovídající plocha S	Průměrná osvětlenost E <sub>I</sub> v ploše	Světelný tok vystupující Φ <sub>I</sub>
	měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace							
	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14						
[-]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lm]		
Střed	81,8	522	101,8	521,4	80,9	521	100,7	520,4	80,2	516	99,8	515,4	80,2	514	99,8	513,4	0	0,025	0,00196	100,5	0,19733	
1	83,8	521	104,3	520,4	82,9	520	103,1	519,4	81,4	513	101,3	512,4	82,6	516	102,8	515,4	0,05	0,025	0,01571	102,9	1,61573	
2	85	525	105,8	524,4	83,9	519	104,4	518,4	82,2	513	102,3	512,4	84,4	519	105,0	518,4	0,10	0,075	0,03142	104,4	3,27837	
3	83,8	516	104,3	515,4	83,3	515	103,6	514,4	82,1	514	102,1	513,4	83,9	514	104,4	513,4	0,15	0,125	0,04712	103,6	4,88238	
4	84,2	521	104,8	520,4	83,1	516	103,4	515,4	80,9	510	100,7	509,4	83,9	519	104,4	518,4	0,20	0,175	0,06283	103,3	6,49029	

**Protokol o měření zpětného odrazu světlovodu – vzorek č.2c, měření 3**

Číslo bodu	Rameno A				Rameno B				Rameno C				Rameno D				Vzdálenost bodu od středu	Poloměr r1	Poloměr r2	Odpovídající plocha S	Průměrná osvětlenost E <sub>I</sub> v ploše	Světelný tok vystupující Φ <sub>I</sub>
	měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace		měření		kalibrace							
	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14	Ex15	Ex14						
[-]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[m]	[m]	[m²]	[lx]	[lm]	
Střed	81	513	100,8	512,4	78,7	506	97,9	505,4	80,2	516	99,8	515,4	80,1	514	99,7	513,4	0	0,025	0,00196	99,5	0,19543	
1	82,6	510	102,8	509,4	81	506	100,8	505,4	83	524	103,3	523,4	81,8	515	101,8	514,4	0,05	0,025	0,01571	102,1	1,6045	
2	82,5	506	102,6	505,4	81,9	504	101,9	503,4	83,8	523	104,3	522,4	83,5	518	103,9	517,4	0,10	0,075	0,03142	103,2	3,24124	
3	83,1	510	103,4	509,4	81,5	500	101,4	499,4	83,2	520	103,5	519,4	84,2	520	104,8	519,4	0,15	0,125	0,04712	103,3	4,86625	
4	83	513	103,3	512,4	80,9	499	100,7	498,4	83	524	103,3	523,4	83,4	518	103,8	517,4	0,20	0,175	0,06283	102,7	6,45512	

**Souhrnné výsledky měření – zpětný tok:**

	Označení	Měření			Průměr	Jednotky
		1	2	3		
Osvětlenost nad světlovodem	$E_e$	516	617	512	<b>515</b>	lx
Průměr světlovodu	$r$	0,265			<b>0,265</b>	m
Plocha světlovodu	$S$	0,2206			<b>0,2206</b>	m <sup>2</sup>
Světelný tok vstupující do světlovodu	$\Phi_e$	113,8	114,0	113,0	<b>113,6</b>	lm
Světelný tok vystupující ze světlovodu	$\Phi_i$	16,55	16,46	16,36	<b>16,45</b>	lm
Naměřená účinnost přenosu difúzního světla	$Eff_v$	0,1454	0,1445	0,1448	<b>0,1449</b>	-

# Příloha 9

– Protokol o měření světlovodu  
vzorek 2d

# PROTOKOL O MĚŘENÍ SVĚTLOVODU

## - VZOREK 2d



<b>Předmět testování:</b>	světlovod - vzorek 2d pod umělou oblohou Alanod - Miro Silver 27, s kopulí, s difuzorem
<b>Použité přístroje:</b>	Luxmeter Extech 450 č.14  Precision Photometer Bruel-Kjaer 1105
<b>Místo testování:</b>	Světlo-technická laboratoř Ústav stavebnictva a architektúry Slovenská akadémia vied
<b>Datum testování:</b>	06.08.2013
<b>Počet stran:</b>	5

**Popis měření:** Dopadající i vystupující světlo se měřilo luxmetry se směrově a spektrálně korigovanými hlavicemi. Čidlo luxmetru měřící vystupující množství světla se posouvalo pod vzorkem světlovodu s konstantním krokem 20 mm ve vzdálenosti 3 mm mezi spodní hranou světlovodu nebo difuzoru a čidlem luxmetru. Měřila se osvětlenost od osy světlovodu do vzdálenosti 0,64 m ve čtyřech na sebe kolmých směrech dle metodiky [1]. Každý testovaný vzorek byl měřen ve třech opakováních a z každé sady měření se vypočítala průměrná hodnota světelného toku vstupujícího do světlovodu  $\Phi_e$  a vystupujícího ze světlovodu  $\Phi_i$ .

Protokol o měření světlovodu - vzorek 2d

Měření 1

Číslo bodu	Rameno A		Rameno B		Rameno C		Rameno D		Vzdálenost bodu od středu [m]	Poloměr r1 [m]	Poloměr r2 [m]	Odpovídající plocha S [m <sup>2</sup> ]	Průměrná osvětlenost Ei v ploše [lx]	Světelný tok vystupující [lm]			
	měření [x]	Ex14 [lx]	měření [x]	Ex14 [lx]	měření [x]	Ex14 [lx]	měření [x]	Ex14 [lx]									
Střed	292	484	483,4	292	485	484,4	287	475	474,5	286	476	475,5	0	0,03	0,00283	289,25	0,81784
1	292	481	480,4	288	482	481,4	290	480	479,4	296	479	478,5	0,04	0,03	0,00503	291,5	1,46524
2	289	479	478,5	296	485	484,4	290	480	479,4	297	477	476,5	0,06	0,05	0,00754	293	2,20917
3	290	481	480,4	295	484	483,4	290	482	481,4	297	479	478,5	0,08	0,07	0,01005	293	2,94556
4	291	482	481,4	293	485	484,4	288	480	479,4	296	477	476,5	0,10	0,09	0,01257	292	3,66938
5	289	478	477,5	290	482	481,4	289	483	482,4	294	477	476,5	0,12	0,11	0,01508	290,5	4,38064
6	289	482	481,4	293	486	485,4	287	480	479,4	295	482	481,4	0,14	0,13	0,01759	291	5,11954
7	289	481	480,4	291	486	485,4	285	478	477,5	291	480	479,4	0,16	0,15	0,02011	289	5,81069
8	287	481	480,4	287	486	485,4	282	477	476,5	288	467	466,5	0,18	0,17	0,02262	286	6,46917
9	283	481	480,4	283	486	485,4	277	473	472,5	286	479	478,5	0,20	0,19	0,02513	282,25	7,09372
10	274	481	480,4	276	485	484,4	272	477	476,5	279	479	478,5	0,22	0,21	0,02765	275,25	7,60957
11	255	483	482,4	253	484	483,4	254	477	476,5	259	477	476,5	0,24	0,23	0,03016	255,25	7,69816
12	37,4	484	483,4	11,68	482	481,4	60,9	476	475,5	55,4	478	477,5	0,26	0,25	0,03267	41,345	1,35085
13	1,236	490	489,4	0,284	483	482,4	1,433	481	480,4	0,617	478	477,5	0,28	0,27	0,03519	0,8925	0,0314
14	0,247	487	486,4	0,076	481	480,4	0,271	480	479,4	0,101	473	472,5	0,30	0,29	0,03770	0,17375	0,00655
15	0,099	487	486,4	0,033	479	478,5	0,091	480	479,4	0,041	475	474,5	0,32	0,31	0,04021	0,066	0,00265
16	0,051	485	484,4	0,025	480	479,4	0,045	478	477,5	0,024	475	474,5	0,34	0,33	0,04273	0,03625	0,00155
17	0,031	486	485,4	0,011	483	482,4	0,029	482	481,4	0,017	472	471,5	0,36	0,35	0,04524	0,022	0,001
18	0,02	482	481,4	0,017	483	482,4	0,02	480	479,4	0,01	474	473,5	0,38	0,37	0,04775	0,01675	0,0008
19	0,015	485	484,4	0,007	479	478,5	0,025	473	472,5	0,008	472	471,5	0,40	0,39	0,05027	0,01375	0,00069
20	0,012	486	485,4	0,007	480	479,4	0,011	476	475,5	0,007	473	472,5	0,42	0,41	0,05278	0,00925	0,00049
21	0,01	485	484,4	0,006	484	483,4	0,009	479	478,5	0,005	472	471,5	0,44	0,43	0,05529	0,0075	0,00041
22	0,009	481	480,4	0,005	486	485,4	0,008	476	475,5	0,005	470	469,5	0,46	0,45	0,05781	0,00675	0,00039
23	0,008	485	484,4	0,004	484	483,4	0,007	474	473,5	0,006	471	470,5	0,48	0,47	0,06032	0,00625	0,00038
24	0,007	492	491,4	0,004	477	476,5	0,005	478	477,5	0,004	473	472,5	0,50	0,49	0,06283	0,005	0,00031
25	0,007	489	488,4	0,003	477	476,5	0,005	476	475,5	0,005	498	497,4	0,52	0,51	0,06535	0,005	0,00033
26	0,006	488	487,4	0,005	475	474,5	0,005	477	476,5	0,005	473	472,5	0,54	0,53	0,06786	0,00525	0,00036
27	0,006	490	489,4	0,004	476	475,5	0,005	476	475,5	0,004	473	472,5	0,56	0,55	0,07037	0,00475	0,00033
28	0,005	489	488,4	0,004	474	473,5	0,004	476	475,5	0,005	471	470,5	0,58	0,57	0,07288	0,0045	0,00033
29	0,005	487	486,4	0,004	476	475,5	0,005	476	475,5	0,004	471	470,5	0,60	0,59	0,07540	0,0045	0,00034
30	0,005	487	486,4	0,004	474	473,5	0,004	475	474,5	0,006	469	468,5	0,62	0,61	0,07791	0,00475	0,00037
31	0,005	482	481,4	0,004	477	476,5	0,005	477	476,5	0,004	470	469,5	0,64	0,63	0,08042	0,0045	0,00036

Měření 2

Číslo bodu	Rameno A		Rameno B		Rameno C		Rameno D		Vzdálenost bodu od středu	Poloměr r1	Poloměr r2	Odpovídající plocha S	Průměrná osvětlenost Ei v ploše	Světelný tok vystupující φi	
	měření		měření		měření		měření								
	Br	Ex14	Br	Ex14	Br	Ex14	Br	Ex14							
[ - ]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[m]	[m]	[m]	[m²]	[lx]	[lm]	
Střed	281	466	457	456,5	299	496	495,4	283	469	468,5	0	0,03	0,00283	284,5	0,8044
1	286	471	461	460,5	281	482	461,5	290	471	470,5	0,04	0,03	0,00503	284,5	1,43005
2	285	473	472,5	472,5	282	460	459,5	278	458	457,5	0,06	0,05	0,00754	283,75	2,13942
3	284	473	472,5	472,5	280	460	459,5	276	457	456,5	0,08	0,07	0,01005	282,5	2,84
4	284	474	473,5	473,5	278	460	459,5	278	462	461,5	0,10	0,09	0,01257	283	3,55628
5	283	471	470,5	470,5	277	461	460,5	280	466	465,5	0,12	0,11	0,01508	281,5	4,24492
6	281	469	468,5	468,5	275	457	456,5	283	471	470,5	0,14	0,13	0,01759	281,5	4,95241
7	278	464	463,5	463,5	274	457	456,5	278	467	466,5	0,16	0,15	0,02011	278,25	5,59455
8	278	465	464,5	464,5	271	459	458,5	280	469	468,5	0,18	0,17	0,02262	278	6,28821
9	275	467	466,5	466,5	269	460	459,5	274	469	468,5	0,20	0,19	0,02513	274,25	6,89265
10	267	468	467,5	467,5	261	459	458,5	268	467	466,5	0,22	0,21	0,02765	266,5	7,36766
11	246	467	466,5	466,5	248	465	464,5	250	468	467,5	0,24	0,23	0,03016	249	7,50966
12	34,8	468	467,5	467,5	16,56	468	467,5	63,2	466	465,5	0,26	0,25	0,03267	43,665	1,42665
13	1,128	465	464,5	464,5	0,295	469	468,5	1,419	461	460,5	0,28	0,27	0,03519	0,84775	0,02983
14	0,225	466	465,5	465,5	0,071	467	466,5	0,259	467	466,5	0,30	0,29	0,03770	0,16225	0,00612
15	0,091	468	467,5	467,5	0,039	462	461,5	0,095	469	468,5	0,32	0,31	0,04021	0,066	0,00265
16	0,047	465	464,5	464,5	0,015	461	460,5	0,046	468	467,5	0,34	0,33	0,04273	0,03225	0,00138
17	0,029	466	465,5	465,5	0,011	460	459,5	0,03	468	467,5	0,36	0,35	0,04524	0,021	0,00095
18	0,021	466	465,5	465,5	0,009	461	460,5	0,019	468	467,5	0,38	0,37	0,04775	0,01475	0,0007
19	0,019	465	464,5	464,5	0,006	464	463,5	0,013	468	467,5	0,40	0,39	0,05027	0,01175	0,00059
20	0,012	464	463,5	463,5	0,005	462	461,5	0,01	469	468,5	0,42	0,41	0,05278	0,0085	0,00045
21	0,011	461	460,5	460,5	0,004	461	460,5	0,009	468	467,5	0,44	0,43	0,05529	0,00775	0,00043
22	0,01	462	461,5	461,5	0,005	458	457,5	0,008	469	468,5	0,46	0,45	0,05781	0,007	0,0004
23	0,007	458	457,5	457,5	0,004	461	460,5	0,007	469	468,5	0,48	0,47	0,06032	0,006	0,00036
24	0,007	461	460,5	460,5	0,003	464	463,5	0,006	468	467,5	0,50	0,49	0,06283	0,00525	0,00033
25	0,007	462	461,5	461,5	0,004	458	457,5	0,005	467	466,5	0,52	0,51	0,06535	0,005	0,00033
26	0,006	465	464,5	464,5	0,004	465	464,5	0,004	469	468,5	0,54	0,53	0,06786	0,0045	0,00031
27	0,006	465	464,5	464,5	0,003	465	464,5	0,005	471	470,5	0,56	0,55	0,07037	0,0045	0,00032
28	0,005	463	462,5	462,5	0,005	464	463,5	0,004	470	469,5	0,58	0,57	0,07288	0,0045	0,00033
29	0,006	463	462,5	462,5	0,004	460	459,5	0,004	466	465,5	0,60	0,59	0,07540	0,00425	0,00032
30	0,006	461	460,5	460,5	0,004	463	462,5	0,004	461	460,5	0,62	0,61	0,07791	0,0045	0,00035
31	0,005	461	460,5	460,5	0,004	463	462,5	0,004	467	466,5	0,64	0,63	0,08042	0,00425	0,00034

Měření 3

Číslo bodu	Rameno A		Rameno B		Rameno C		Rameno D		Vzdálenost bodu od středu [m]	Poloměr r1 [m]	Poloměr r2 [m]	Odpovídající plocha S [m <sup>2</sup> ]	Průměrná osvětlenost E <sub>i</sub> v ploše [lx]	Světelný tok vystupující φ <sub>i</sub> [lm]
	měření	kalibrace	měření	kalibrace	měření	kalibrace	měření	kalibrace						
	Br	Ex14	Br	Ex14	Br	Ex14	Br	Ex14						
Střed	279	463	284	470	280	465	280	464	463,5	0	0,03	0,00283	280,75	0,7938
1	281	464	290	473	284	469	285	463	462,5	0,04	0,05	0,00503	285	1,43257
2	275	456	292	477	285	472	287	465	464,5	0,06	0,07	0,00754	284,75	2,14696
3	278	461	288	473	282	467	288	464	463,5	0,08	0,09	0,01005	284	2,85508
4	277	461	284	469	281	467	288	464	463,5	0,10	0,11	0,01257	282,5	3,55
5	280	464	285	473	277	461	287	465	464,5	0,12	0,13	0,01508	282,25	4,25623
6	277	462	283	469	276	461	286	467	466,5	0,14	0,15	0,01759	280,5	4,93481
7	273	453	284	473	277	465	282	464	463,5	0,16	0,17	0,02011	279	5,60963
8	274	458	280	472	275	463	276	458	457,5	0,18	0,19	0,02262	276,25	6,24863
9	275	467	274	469	265	452	270	452	451,5	0,20	0,21	0,02513	271	6,81097
10	267	467	269	472	257	450	263	453	452,5	0,22	0,23	0,02765	264	7,29855
11	245	465	250	467	241	450	251	459	458,5	0,24	0,25	0,03016	246,75	7,4418
12	33,7	467	17,69	469	60,7	461	63,9	453	452,5	0,26	0,27	0,03267	43,9975	1,43751
13	1,096	465	0,291	465	1,461	461	0,505	456	455,5	0,28	0,29	0,03519	0,83825	0,02949
14	0,219	466	0,077	472	0,249	462	0,087	463	462,5	0,30	0,31	0,03770	0,158	0,00596
15	0,085	465	0,034	472	0,098	462	0,033	451	450,5	0,32	0,33	0,04021	0,0625	0,00251
16	0,046	463	0,019	472	0,047	462	0,021	451	450,5	0,34	0,35	0,04273	0,03325	0,00142
17	0,028	464	0,012	474	0,032	462	0,013	465	464,5	0,36	0,37	0,04524	0,02125	0,00096
18	0,02	462	0,009	473	0,037	464	0,01	456	455,5	0,38	0,39	0,04775	0,019	0,00091
19	0,015	453	0,007	471	0,014	465	0,008	462	461,5	0,40	0,41	0,05027	0,011	0,00055
20	0,011	462	0,005	472	0,011	466	0,007	465	464,5	0,42	0,43	0,05278	0,0085	0,00045
21	0,01	464	0,005	470	0,009	464	0,007	462	461,5	0,44	0,45	0,05529	0,00775	0,00043
22	0,007	464	0,005	471	0,007	460	0,006	463	462,5	0,46	0,47	0,05781	0,00625	0,00036
23	0,007	465	0,004	470	0,005	463	0,006	464	463,5	0,48	0,49	0,06032	0,006	0,00036
24	0,006	464	0,003	466	0,005	468	0,007	464	463,5	0,50	0,51	0,06283	0,00525	0,00033
25	0,006	464	0,003	468	0,005	466	0,005	464	463,5	0,52	0,53	0,06535	0,00475	0,00031
26	0,005	467	0,003	468	0,004	465	0,005	462	461,5	0,54	0,55	0,06786	0,00425	0,00029
27	0,004	466	0,003	468	0,005	463	0,005	463	462,5	0,56	0,57	0,07037	0,00425	0,0003
28	0,005	466	0,003	469	0,004	461	0,006	464	463,5	0,58	0,59	0,07288	0,0045	0,00033
29	0,004	469	0,004	467	0,004	461	0,005	464	463,5	0,60	0,61	0,07540	0,00425	0,00032
30	0,005	469	0,003	465	0,004	463	0,005	462	461,5	0,62	0,63	0,07791	0,00425	0,00033
31	0,007	470	0,005	465	0,004	461	0,006	452	451,5	0,64	0,65	0,08042	0,0055	0,00044

Protokol o měření světlovodu - vzorek 2d

**Souhrnné výsledky měření:**

	Označení	Měření			Průměr	Jednotky
		1	2	3		
Osvětlenost nad světlovodem	$E_e$	479	464	464	<b>469</b>	lx
Průměr světlovodu	r	0,265			<b>0,265</b>	m
Plocha světlovodu	S	0,2206			<b>0,2206</b>	m <sup>2</sup>
Světelný tok vstupující do světlovodu	$\Phi_e$	105,7	102,4	102,3	<b>103,5</b>	lm
Světelný tok vystupující ze světlovodu	$\Phi_i$	56,69	55,09	54,86	<b>55,55</b>	lm
Naměřená účinnost přenosu difúzního světla	$Eff_v$	0,5362	0,5378	0,5362	<b>0,5367</b>	-



# Příloha 10

– Fotodokumentace

## Příprava vzorků pro experimentální měření



Obrázek 1: Montáž vzorku světlovodu č. 1 z jednotlivých segmentů



Obrázek 2: Montáž vzorku světlovodu č. 1 pomocí hliníkové fólie



Obrázek 3: Příprava měřicího stolu pod umělou oblohou pro osazení vzorků světlovodů

## Měření světelné účinnosti světlovodu- vzorek č.1



Obrázek 4: Usazení vzorku světlovodu pod umělou oblohu



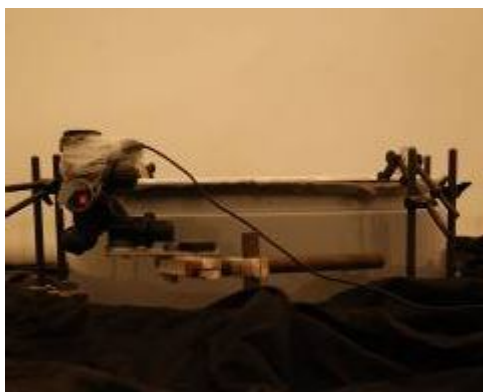
Obrázek 5: Usazení vzorku světlovodu včetně pohledu na reflektory a bezpečnostní prvky



Obrázek 6: Usazení vzorku světlovodu s pohledem pod měřicí stůl



Obrázek 7: Pohled na světlovod ze spodu měřicího stolu a utěsnění průsvitů



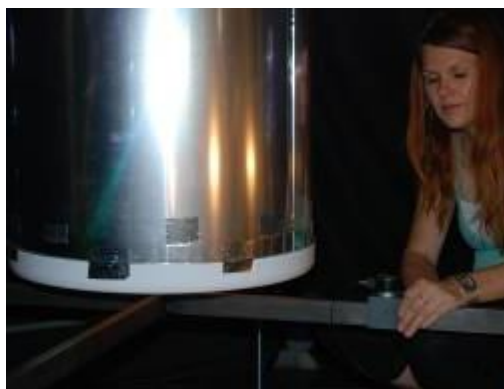
Obrázek 8: Límec světlovodu na měřícím stole s čidlem luxmetru Extech č. 14



Obrázek 9: Pohled na měřící stůl s luxmetry Extech č. 14 a Brüel



Obrázek 10: Čidlo luxmetru Brüel na vodícím kříži



Obrázek 11: Posun čidla luxmetru Brüel pod hranou světlovodu



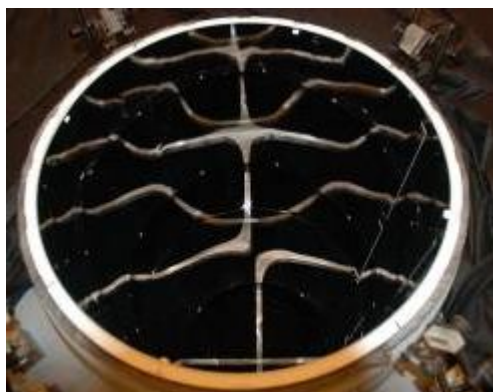
Obrázek 12: Příprava pozice čidla pro měření zpětného odrazu



Obrázek 13: Pohled na vodící lištu pro měření zpětného odrazu a na luxmetry Extech č.14 a č.15



Obrázek 14: Pohled do světlovodu, na spodu patrný vodící kříž a na podlaze sametová látka



Obrázek 15: Pohled na stěny světlovodu s odrazem vodícího kříže

## Měření světelné účinnosti světlovodu- vzorek č.2



Obrázek 16: Vzorek světlovodu č. 2 pod umělou oblohou, včetně nasvícených reflektorů



Obrázek 17: Luxmetry Extech č. 14 a č. 15 na měřícím stole, včetně límce světlovodu vodící lišty pro měření zpětného odrazu



Obrázek 18: Tubus světlovodu vzorku č. 2 pod měřícím stolem společně s nasazeným difuzorem



Obrázek 19: Pohled na difuzor, který byl po okraji přelepen hliníkovou páskou a demonstrace osvětlení těsně pod difuzorem



Obrázek 20: Pohled na stěnu světlovodu s osazeným difuzorem



Obrázek 21: Pohled na stěnu světlovodu s osazeným difuzorem, větší úhel pohledu

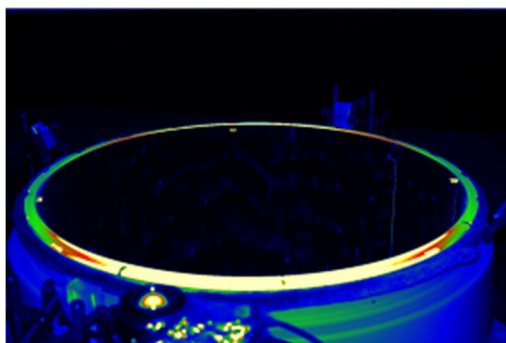


Obrázek 22: Pohled do světlovodu s difuzorem na spodní hraně

### **Vlastnosti prvků světlovodu - Jasové mapy vytvořené v programu LumiDISP.**



Obrázek 23: Pohled na horní hranu světlovodu – vzorek č. 2

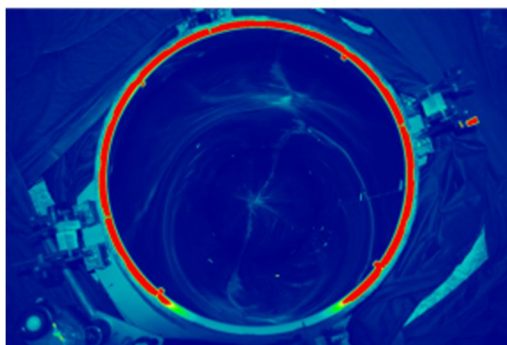


Obrázek 24: Jasová mapa horní hrany světlovodu – vzorek č. 2





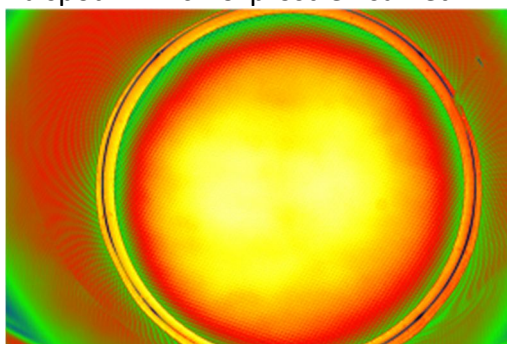
Obrázek 25: Pohled do světlovodu, na spodním líci rozprostřen samet



Obrázek 26: Jasová mapa světlovodu, na spodním líci rozprostřen samet



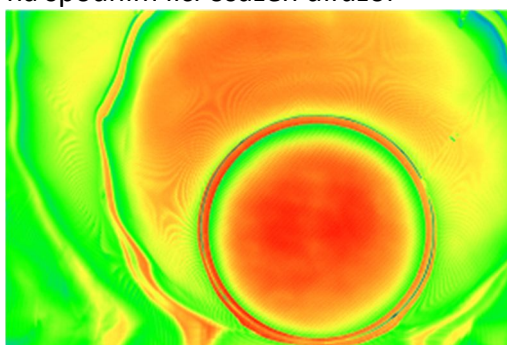
Obrázek 27: Pohled do světlovodu, na spodním líci osazen difuzor



Obrázek 28: Jasová mapa světlovodu, na spodním líci osazen difuzor



Obrázek 29: Pohled do světlovodu s odrazy světla na stěnách tubusu, na spodním líci osazen difuzor



Obrázek 30: Jasová mapa světlovodu s odrazy světla na stěnách tubusu, na spodním líci osazen difuzor