

Zpráva

Analýza systémů denního osvětlování Solatube

Datum: 2. 11. 2010
Odkaz: RMV-101102-CPR-C2
Číslo projektu: 268990.031
Projekt: 90935K

Autor: P. K. Smith

Schváleno: C. P. G. Roelofsen, CFM, M.Sc.Eng

Konzultant:

Grotmij | Technical management
Computerweg 11 – 13, 3821 AA Amersfoort
P. O. Box 68, 3800 AB Amersfoort
T 033-451141
F 033-4558779
E info@grontmijTM.nl
I www.grontmijTM.nl

OBSAH

Shrnutí	3
1. Úvod	4
2. Systémy denního osvětlení.....	4
3. Měřicí vybavení	5
3.1. Integrátor	6
3.2. Korekce integrátoru světelného toku.....	7
3.3. Goniofotometr	7
3.4. Eulumdat	8
3.5. Technické podklady.....	8
3.6. Měřicí vybavení	8
4. Měření světelného výstupu	9
4.1. Stanoviště měření.....	9
4.2. Data, čas a měřený interval	11
4.3. Výsledky měření.....	11
4.4. Úplný světlovod pod jasnou oblohou	15
4.5. Úplný světlovod pod zataženou oblohou.....	17
4.6. Závěry vyvozené ze světelného výstupu.....	20
4.7. Kopule RayBender® 3000	22
4.8. Přínos kopule Raybender® 3000.....	22
4.9. Zhodnocení kopule Raybender® 3000	24
5. Měření rozptylu světla	25
5.1. Pozice.....	Chyba! Záložka není definována.
5.2. Napájecí zdroj pro umělou oblohu	25
5.3. Výsledky měření.....	25
6. Dodatek.....	30

SHRNUTÍ

Grontmij Technical management pověřil Lichtkonzult.nl zakázkou pro Techcomlight, která má za úkol zhodnotit výkonnost šesti systémů denního osvětlování od firmy Solatube. Systémy byly testovány k získání představy funkce v obou oblastech: světelný výstup pod jasnou anebo zataženou oblohou a rozptyl světla.

British Standards EN 13032-1: Světlo a osvětlení – Měření a prezentace fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel – část 1. Měření, byla použita jako základ pro vývoj měřicího vybavení. Je nutné poznamenat, že povaha testovaných výrobků a místo terénních zkoušek, určují rozsah interpretace / vyložení v rámci mezí možností.

Měření výstupu světla jsou poměrně překvapující. Výsledky měření dosažené pod jasnou oblohou mohou být použity pro vývoj reprezentativního teoretického modelu: křivka, která představuje očekávané výsledky denního měření, má tvar odpovídající tvaru všech uskutečněných měření. Pokusy byly provedeny k ukázce měření pod zcela zataženou oblohou. Výsledky těchto měření vykazují velké rozdíly. K vytvoření reprezentativního obrázku shrnujícího délku jednoho dne bylo třeba vybrané hodnoty z měření pod zataženou oblohou zkombinovat s grafy z literatury.

Kromě projektu jsme také zjišťovali přínos Raybenderu. Je důležité popsat, zdali je vskutku přínos Raybenderu viditelný. K zjištění tohoto byly výsledky měření sestav 330 DS-O a 750 DS-O dosažené 23. května 2010 detailněji studovány. Tyto světlovodné systémy jsou prakticky totožné vyjma nástřešní kopule. Zdá se, že Raybender v systému 750 DS-O má významný přínos, tato kopule zachycuje poměrně více světla při nízké pozici slunce nad obzorem. Nárůst technologie s kopulí Raybender® 3000, oproti světlovodu bez ní, může vystoupat až na 76 %. A to navzdory tomu, že systém s Raybender® 3000 má dvojitou kopuli. Jestliže je slunce vysoko nad obzorem, tato kopule zabrání vstupu intenzivního slunečního svitu, čímž je výstup ze světlovodu okolo 44 % nižší oproti čiré kopuli. Ve zkratce má však Raybender® 3000 rovnoměrnější světelný výstup během celého dne. Období, kdy Raybender® 3000 získává více světla pro světlovod, trvá asi půl roku (od října do března).

Dále byl měřen rozptyl světla různých osvětlovacích systémů. Goniofotometr a umělá obloha, byly vyvinuty speciálně pro tento účel.

1. ÚVOD

Grontmij Technical management pověřil Lichtkonzult.nl zakázkou pro Techcomlight, která má za úkol zhodnotit výkonnost šesti systémů denního osvětlování od firmy Solatube. Systémy byly testovány k získání představy funkce v obou oblastech: světelný výstup pod jasnou anebo zataženou oblohou a rozptyl světla.

Světelný výstup byl měřen při umístění světlovodů s integrátoři na otevřeném prostranství s přírodním světlem. Světelný rozptyl byl měřen s použitím měřicího zařízení v hale s goniofotometrem vyrobeným na zakázku a umělou oblohou osvětlenou halogenovými žárovkami.

2. SYSTÉMY DENNÍHO OSVĚTLENÍ

Systém denního osvětlení sestává z kopule, odrazného tubusu a stropního krytu. Při měření byly testovány následující sestavy:

- Solatube 160 DS (kopule Raybender® 3000, s průměrem tubusu 250 mm)
- Solatube 290 DS (kopule Raybender® 3000, s průměrem tubusu 350 mm)
- Solatube 330 DS-O (čirá kopule se zrcátkem LightTracker™, s průměrem tubusu 530 mm)
- Solatube 330 DS-C (čirá kopule se zrcátkem LightTracker™, s průměrem tubusu 530 mm a stropním krytem - krabicí s rozměry 600 x 600 mm)
- Solatube 750 DS-O (čirá kopule bez zrcátka LightTracker™ a s druhou kopulí Raybender® 3000, s průměrem tubusu 530 mm)
- Solatube 750 DS-C (čirá kopule bez zrcátka LightTracker™ a s druhou kopulí Raybender® 3000 s průměrem tubusu 530 mm a stropním krytem - krabicí s rozměry 600 x 600 mm)



Obr. 1 - Příklad kompletní instalace systému Solatube obsahující kopuli, tubus a stropní kryt.



Obr. 2 – Systém Solatube 290 DS na rovné střeše



Obr. 3 – Systém Solatube 330 DS-O s reflektorem (napravo)



Obr. 4 – Systém Solatube 750 DS-O nebo DS-C technologií Raybender

Všechny systémy byly testovány na rovné střeše se standardním stropním krytem. Následující tloušťky předpokládáme pro střešní sadu (od stropu po střechu):

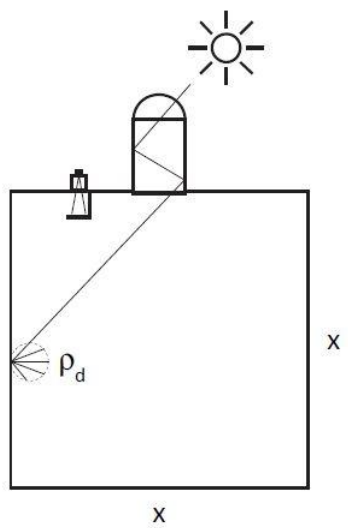
- 400 mm pro systémy 160 DS a 290 DS
- 700 mm pro systémy 330 DS-O*, 330 DS-C, 750 DS-O, 750 DS-C.

* Tyto systémy jsou koncipovány pro jednovrstevnou střechu (single roof) a sada tudíž neobsahuje stropní kryt.

3. MĚŘICÍ VYBAVENÍ

Tato kapitola popisuje měřicí vybavení. Byly použity dva typy měřicího vybavení:

- integrátor (světelného toku) pro měření světelného výstupu
- goniofotometr pro měření světelného rozptylu



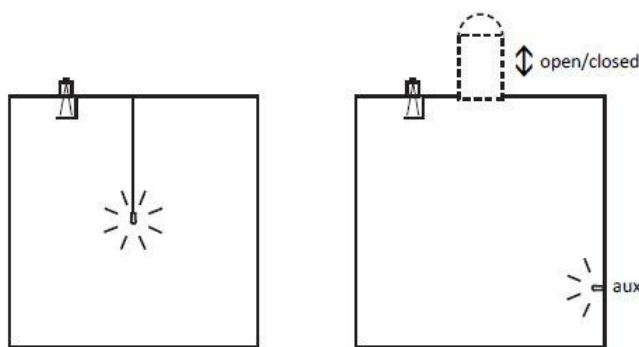
Obr. 5 – Schematické vyjádření světelného integrátoru

3.1. INTEGRÁTOR

K měření světelného výstupu různých světlovodných systémů byly použity tři integrátory. Tyto integrátory mají přesný tvar krychle umožňující přesné měření světelného výstupu.

Kromě jiného musí integrátory splňovat následující podmínky:

- vysokou a stálou hodnotu odrazivosti umožňující vnitřní odrazy, aby se předešlo chybám a v důsledku toho znehodnocení měření.
- matovaný povrch, kvůli úplné rozptýlné odrazivosti.
- velikost trojúhelníkových zářezů ve stropním krytu posuzovaných světlovodných systémů je také důležitá, neboť tyto zářezy jsou největším zdrojem světla.
- decentralizované čidlo měřící výsledek všech vnitřních odrazů (Lambertova plocha).
- kalibrace integrátoru pro přeměnu měřených veličin na výsledný světelný výstup. Kalibrovaná žárovka byla použita k popsání měřicího prostoru (k získání konstanty převodu osvětlenosti čidla a světelného toku zdroje).
- úprava měřené veličiny ke snížení efektu „otevření okna“. (Nerozumím, „effect of window opening“, pravděpodobně je tímto myšlena plocha stropního krytu světlovodu a tímto krytem unikající světlo ven z měřicího prostoru krychle.)



Obr. 6 a 7 – Schematické vyjádření kalibrace a korekce

3.2.KOREKCE INTEGRÁTORU SVĚTELNÉHO TOKU

Musíme podotknout, že umělý zdroj světla je měřen při poloze uprostřed integrátoru. V tomto případě však osvětlovací systém přenáší denní světlo dolů do krychle skrze střed stěny. Otevření stěny způsobuje odchylku integrátoru, která musí být korigována. Nadto, tato část odráží světlo pod různými úhly, což nepřispívá k rozptylu světla v integrátoru. Tato odchylka je opravena následujícím postupem: integrátor je měřen dvakrát s pomocným zdrojem umístěným na stěně integrátoru:

- Při zcela uzavřeném integrátoru, bez světlovodného systému (Z).
- S kterýmkoli světlovodným systémem (M).

Činitele C, který je použitelný pro výsledky měření, můžeme vyjádřit: $C = \frac{Z}{M}$.

3.3.GONIOFOTOMETR

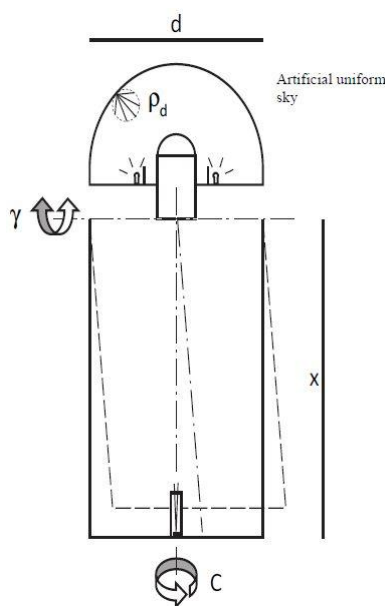
Bylo změřeno chování jednotlivých světlovodných systémů z hlediska rozptylu světla. Goniofotometr je přístroj, který měří rozptyl světla v různých směrech. Běžně se používá k měření umělých zdrojů světla a svítidel. V tomto případě jej použijeme k měření systémů denního osvětlení. Protože světlovody nemají umělý zdroj světla, použijeme k jejich měření umělou oblohu.

Umělá obloha byla vyvinuta na základě následujících podmínek:

- bílá matovaná úprava povrchu umělé oblohy pro celkový rozptylný odraz,
- průměr cca 2 m,
- světlo dosahuje obdoby zatažené denní oblohy, přímý osvit je blokován,
- vstupní světelný tok je cca 6400 lm.

Goniofotometr byl vyvinut na základě následujících podmínek:

- vzdálenost měřicího bodu a výstupu světlovodu (x) je nejméně pětinasobná oproti největšímu rozměru svítící plochy (tedy průměru stropního krytu, či průměru světlovodu),
- měřicí bod se otáčí o 30° a odklání po 5° (γ).



Obr. 8 – Schematické vyjádření systému denního osvětlení s umělou oblohou nad světlovodem a goniofotometrem

3.4.EULUMDAT

Výsledky měření goniofotometru jsou vloženy do programu určenému ke vkládání, zpracování a prezentaci dat: LumCat. Po spuštění je vytvořen digitální soubor, standardní protokol Eulumdat skoncovkou .ltd, popisující změřená data, používaný běžně v Evropě. Kromě světelného rozptýlu obsahuje i data o množství světelného toku výstupu. Tato data jsou potom spojena do souvislosti s měřením v integrátoru.

3.5.TECHNICKÉ PODKLADY

Norma BS EN 13032-1 Světlo a osvětlení - British Standards EN 13032-1: Světlo a osvětlení – Měření a prezentace photometrických údajů světelných zdrojů a svítidel – část 1. Měření, byla použita jako základ pro vývoj měřicího vybavení.

Je nutné poznamenat, že povaha testovaných výrobků a místo terénních zkoušek, určují rozsah interpretace / vyložení v rámci mezí možností.

Všechny kalibrované a pomocné světelné zdroje jsou tvořeny halogenovými žárovkami. Tyto světelné zdroje jsou méně náchylné ke změnám vlastních parametrů v závislosti na teplotě okolí oproti výbojovým zdrojům a navíc vykazují malý rozdíl světelného toku od zapnutí zdroje do provozního zahřátí.

3.6.MĚŘICÍ VYBAVENÍ

Použili jsme čtyři luxmetry, paměťový program a netbook.

Luxmetry jsou typu Mobilux A USB Luxmeter, výrobce Czibula & Grundmann GmbH, Berlin, které splňují normu DIN 5032 část 7 třídy A. Toto je nejpřesnější třída luxmetrů pro ruční použití. Calibraci luxmetrů provedla firma Annex.



Obr. 9 - Mobilux

V průběhu měření program MultiMobi po jedné minutě odečítal a ukládal změřené hodnoty do paměti.

Netbook byl Asus, Eee PC 901.

Normovaný světelný zdroj, halogenová žárovka OSRAM 50 W 12 V, byla kalibrována při napájení stabilizovaným zdrojem Mean Well RS-75-12.

4. MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO VÝSTUPU

4.1. STANOVIŠTĚ MĚŘENÍ

Měření probíhalo na otevřeném prostranství na poli. Na pozemku viz obr. č. 10. V okolí se nenacházeli vysoké stromy, či budovy, které by stály za zmínku a způsobily by odchylky při měření. Ze severní strany ve vzdálenosti větší, než 300 m, byla alej stromů, což při jejich výšce způsobilo zanedbatelné omezení 2° - 3° od horizontu.



Obr. 10 – Pozice měření (zeměpisná šířka $51,86547^\circ$ a zeměpisná délka $5,19207^\circ$)



Obr. 11 – Fotografie řady (aleje) stromů na severní straně



Obr. 12 – Fotografie jižní strany



Obr. 13 – Fotografie měřicího zařízení (vybavení) na poli

4.2.DATA, ČAS A MĚŘENÝ INTERVAL

Tři světlovodné systémy byly posuzovány zaráz. Dva s kopulí Raybender 3000® a jeden s čirou kopulí. Vodorovná nezastíněná osvětlenost oblohou byla též měřena. Měření světelného výstupu probíhala vždy po minutě od svítání do soumraku při níže uvedených dnech:

15. října 2009 od 8:05 hod. do 18:46 hod., téměř celý den jasno:

- 160 DS
- 290 DS
- 330 DS-C
- horizontální venkovní osvětlenost nezastíněného místa.

27. října 2009, od 7:26 hod. do 17:21 hod., téměř celý den zataženo:

- 160 DS
- 290 DS
- 330 DS-C
- horizontální venkovní osvětlenost nezastíněného místa.

23. května 2010, od 5:35 hod. do 21:39 hod., téměř celý den jasno:

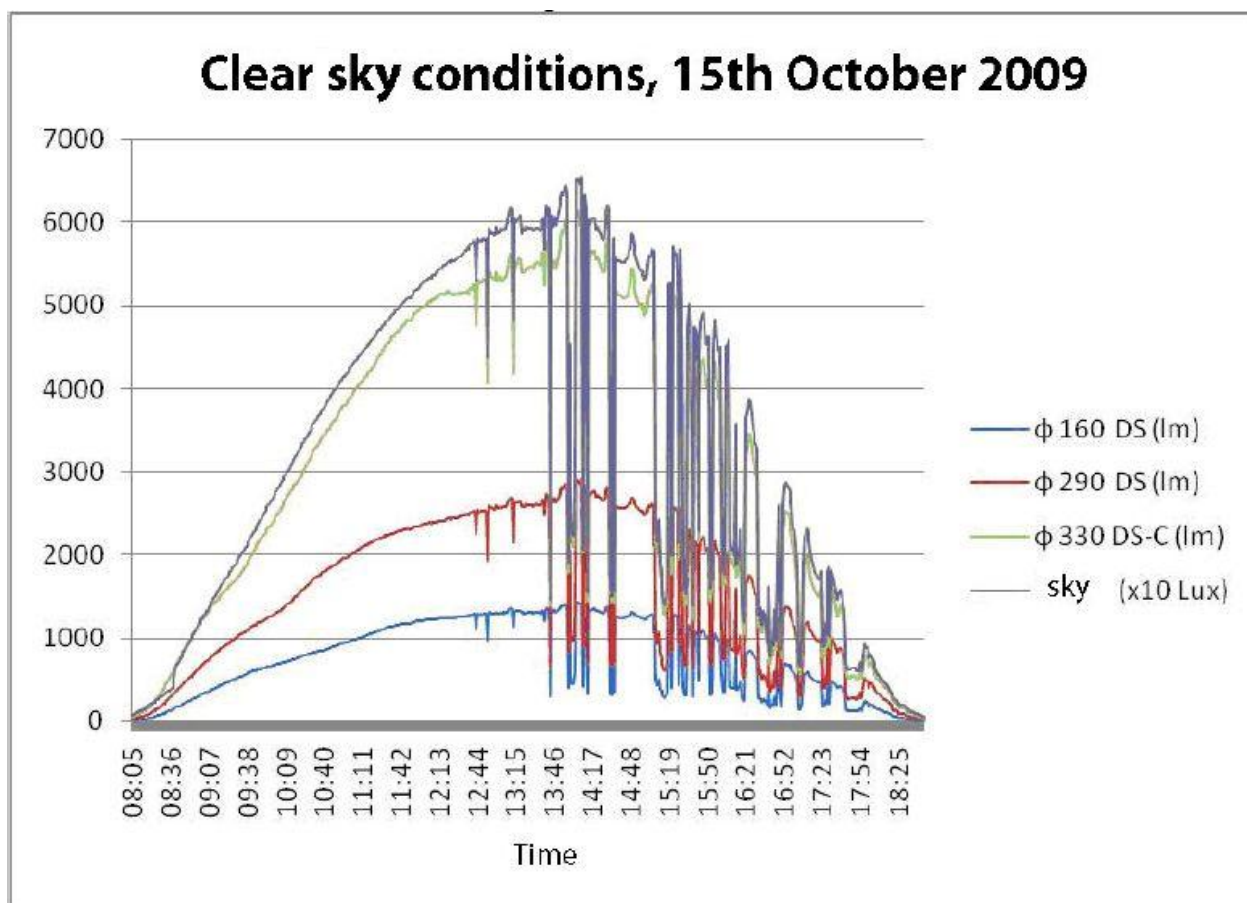
- 750 DS-C
- 750 DS-O
- 330 DS-O
- horizontální venkovní osvětlenost nezastíněného místa.

16. duben 2010, od 6:41 hod. do 20:32 hod., téměř celý den zataženo:

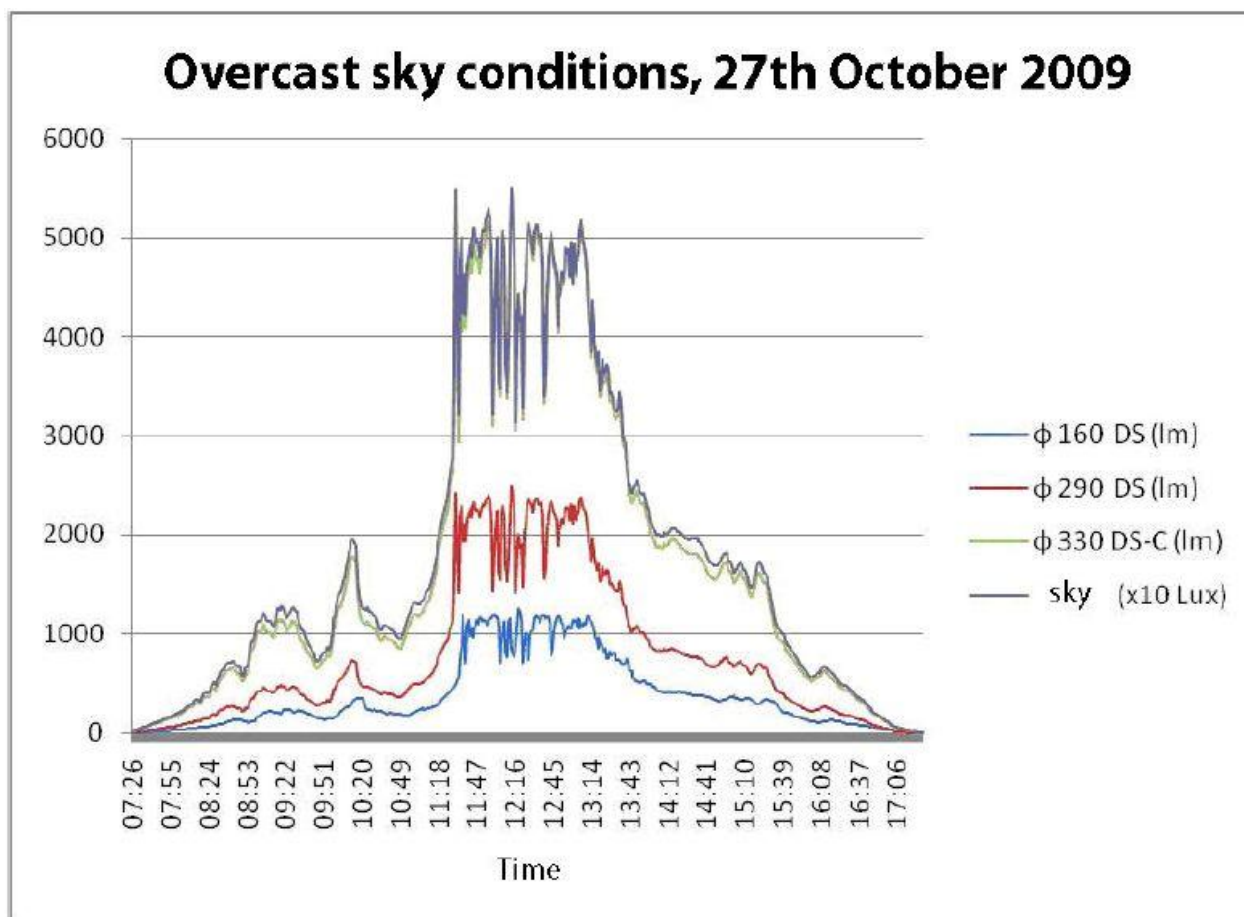
- 750 DS-C
- 750 DS-O
- 330 DS-O
- horizontální venkovní osvětlenost nezastíněného místa.

4.3.VÝSLEDKY MĚŘENÍ

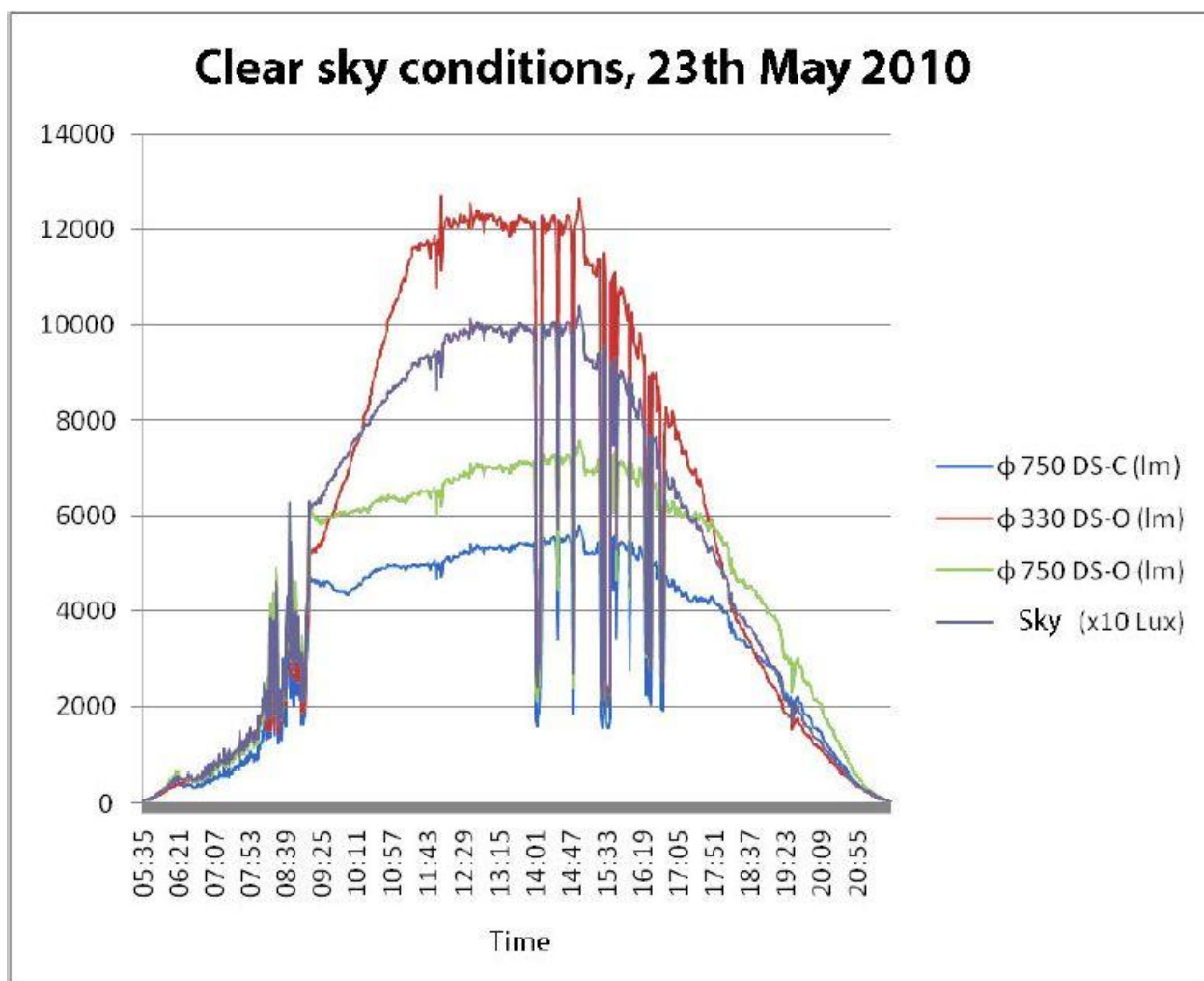
Výsledky měření jsou ukázány graficky. Pro každý systém je zakreslen výstupní světelný tok v průběhu času. Čtvrtá křivka ukazuje vodorovnou venkovní osvětlenost nezastíněného místa v desítkách luxů.



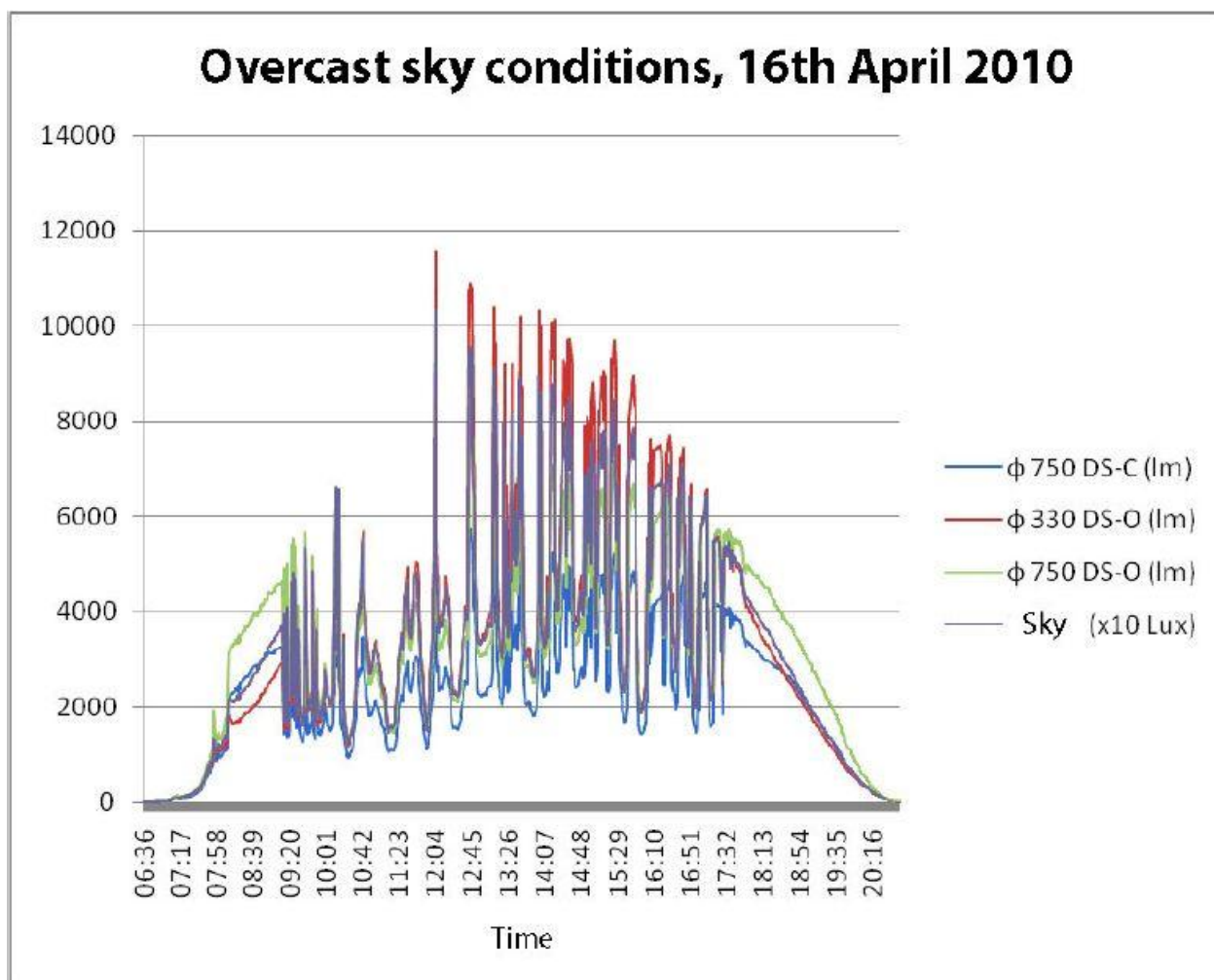
Obr. 14 – Graf znázorňující výsledky systémů Solatube 160 DS, 290 DS a 330 DS-C pod jasnou oblohou 15. října 2009



Obr. 15 – Graf znázorňující výsledky systémů Solatube 160 DS, 290 DS a 330 DS-C pod částečně zataženou oblohou 27. října 2009



Obr. 16 – Graf znázorňující výsledky systémů Solatube 750 DS-C, 330 DS-O a 750 DS-O pod jasnou oblohou 23. května 2010



Obr. 17 – Graf znázorňující výsledky systémů Solatube 750 DS-C, 330 DS-O a 750 DS-O pod částečně zataženou oblohou 16. dubna 2010

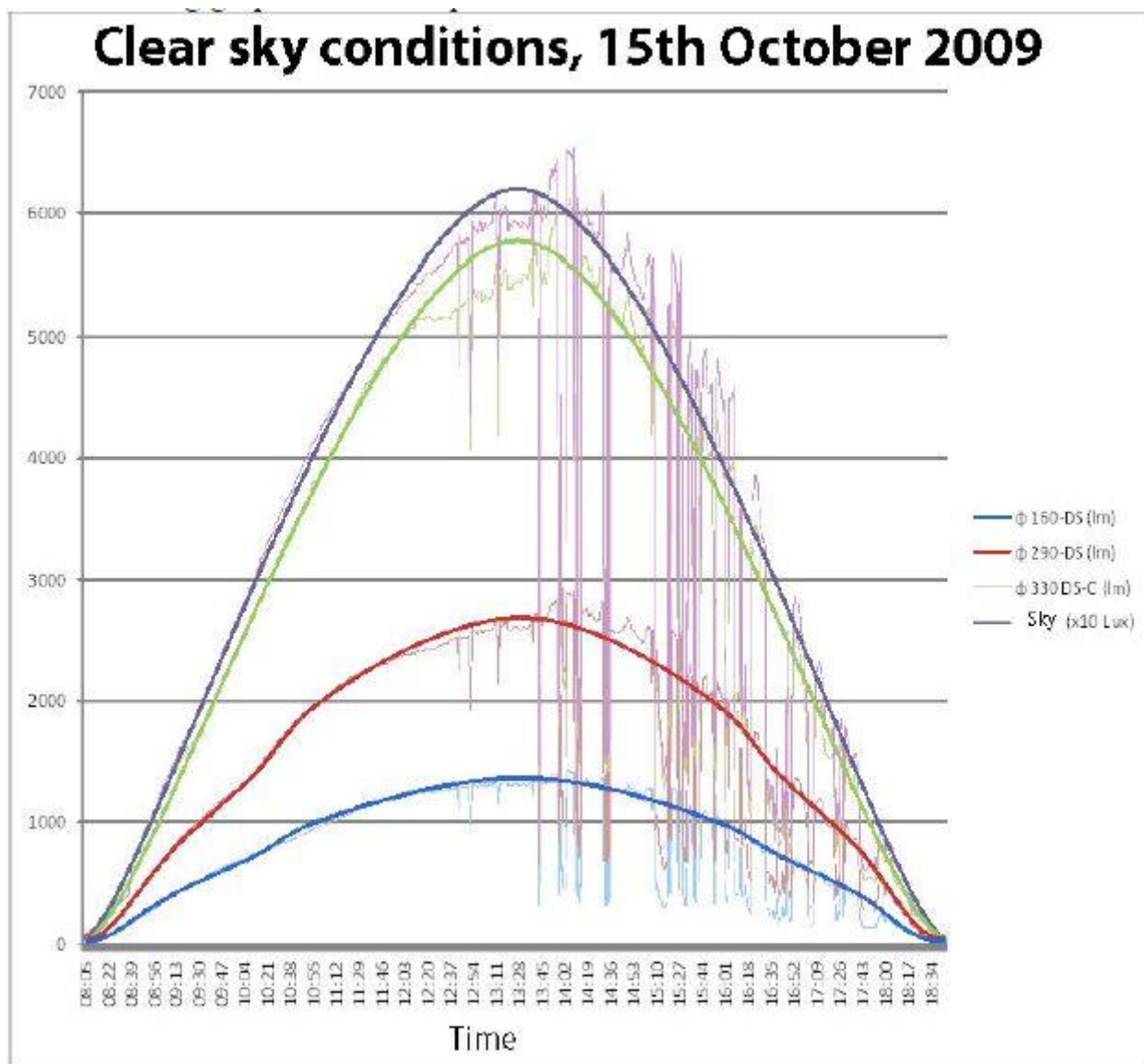
4.4.ÚPLNÝ SVĚTLOVOD POD JASNOU OBLOHOU

Výsledky měření jsou poměrně překvapivé. Denní osvětlení se neustále mění a to způsobuje rozdíly velikosti měřených veličin v grafech. Kromě toho není venkovní měření bohužel opakovatelné.

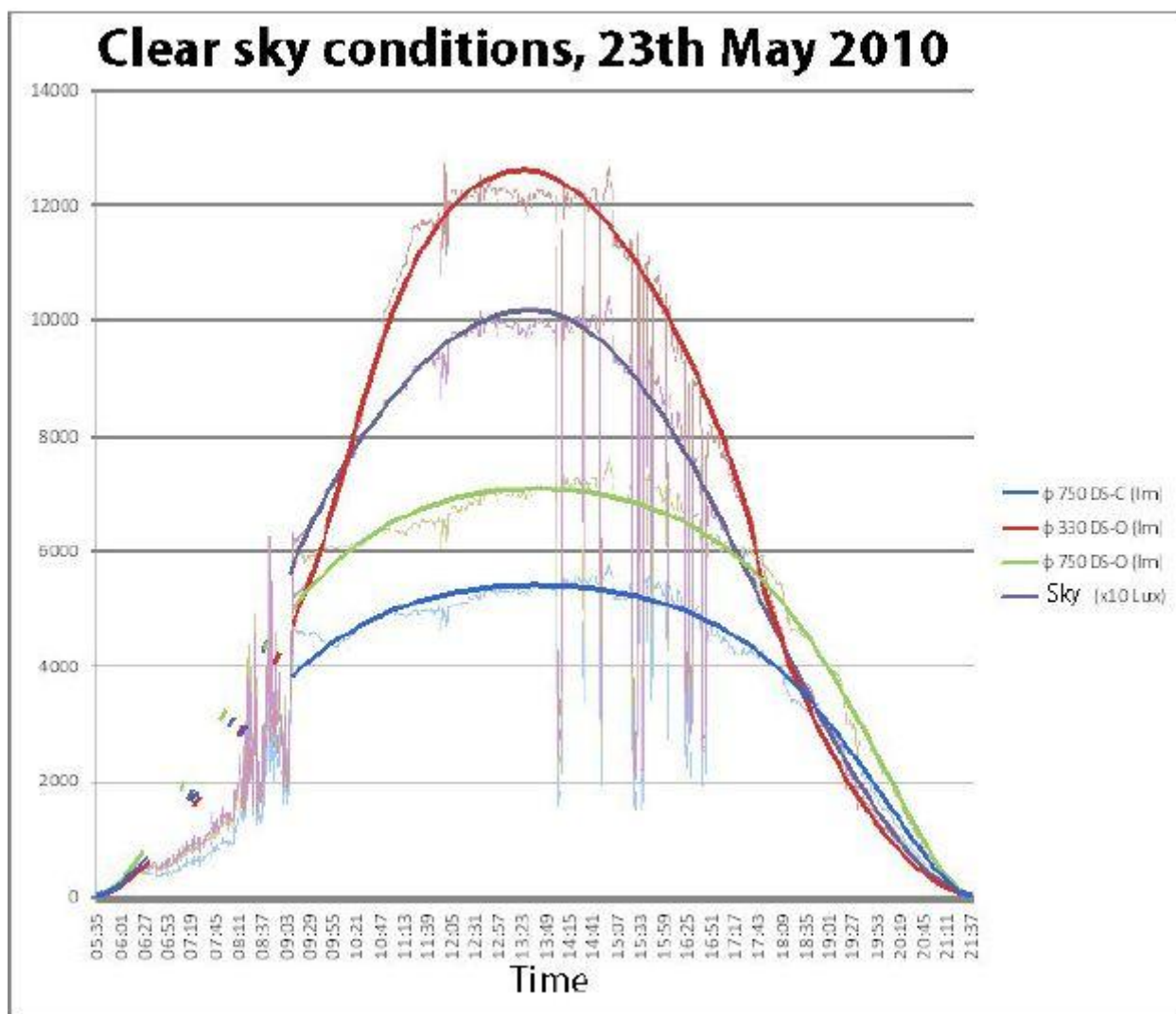
Výsledky měření dosažené pod jasnou oblohou mohou být použity pro vývoj reprezentativního teoretického modelu: křivka, která představuje očekávané výsledky od denního měření, má tvar odpovídající tvarům křivek všech uskutečněných měření. Počáteční body křivky jsou:

- křivka má stejný začátek a konec (odpovídající východu a západu slunce),
- vrchol křivky je ve stejný čas, jako je nejvyšší poloha slunce nad obzorem,
- křivka představuje hlavní výsledky měření. Jinými slovy může být místy nad měřenou hodnotou a místy naopak pod ní,
- křivka je symetrická vůči výšce slunce nad obzorem.

Následující grafy ukazují reprezentativní křivky výsledků měření:



Obr. 18 – Graf s výsledky měření a reprezentativní křivka systémů 160 DS, 290 DS, 330 DS-C od fy Solatube pod jasnou oblohou, měřeno 15. října 2009.



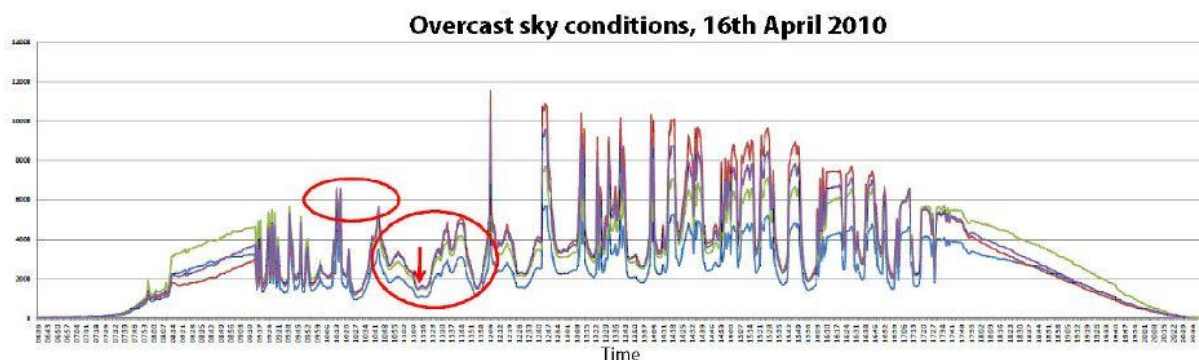
Obr. 19 – Graf s výsledky měření a reprezentativní křivka systémů 750 DS-C, 330 DS-O a 750-DS-O pod jasnou oblohou 23. května 2010. Kolísání nalevo v grafu ukazuje, jak přechod oblačnosti ovlivní výsledné měření.

4.5. ÚPLNÝ SVĚTLOVOD POD ZATAŽENOU OBLOHOU

Zde jsme se pokusili o měření pod zcela zataženou oblohou. Výsledky těchto měření vykazují velké rozdíly (viz grafy 15. a 17.), které jsou způsobeny následujícími důvody:

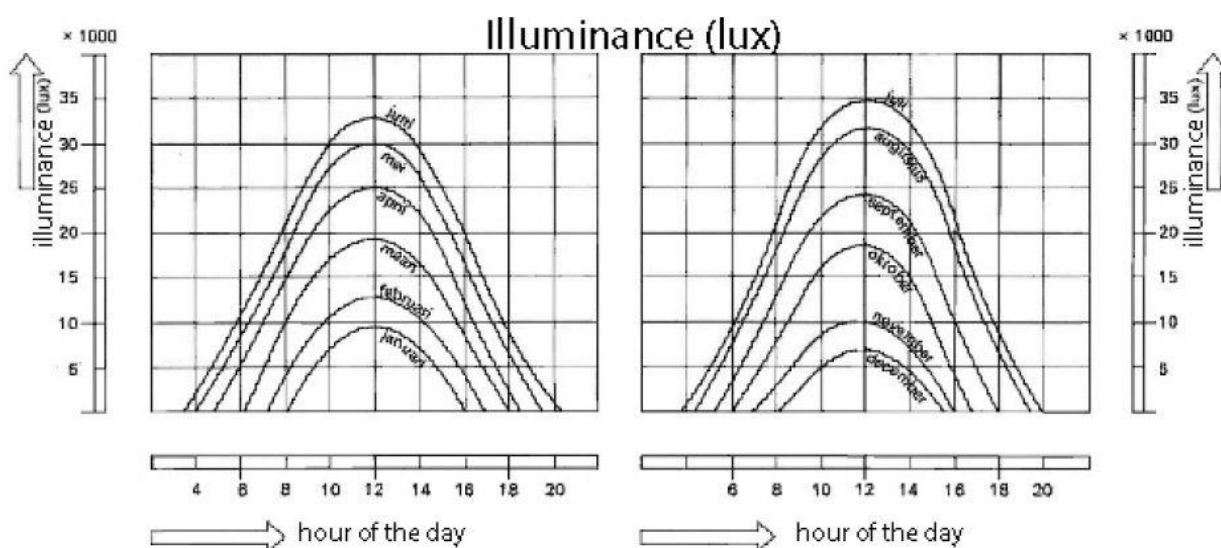
- oblačnost není homogenní, nemá stejnou světelnou prostupnost. Měření vykazuje velké odchylky, kterých si však lidské oko příliš nevšimne (neustále se změnám přizpůsobuje).
- mraky na nebi při svém pohybu občas vytváří na krátkou dobu tenčí vrstvy páry, či dokonce „okna“, jimiž prochází přímé sluneční paprsky.

Nicméně i přes negativa, jsme použili tuto metodu, abychom mohli vytvořit reprezentativní obrázek výsledků z měření pod zataženou oblohou.



Obr. 20 – Graf výsledků měření provedeného 16. dubna 2010 pod částečně zataženou oblohou.

- Zaznamenali jsme během měření pod zataženou oblohou velké množství dat. Oblast velkých výkyvů byla vybrána z měřených dat (zakroužkované oblasti v grafu č. 20).
- Špičky měření viditelné dříve a později během dne ukazují, že vybraná oblast je přibližné minimum. Je to navíc potvrzené měřením při nezastíněné zatažené obloze (unobstructed sky conditions), kdy kupříkladu osvětlenost kulminuje okolo hodnoty 15 klx, ale ve stejný okamžik při přímém slunečním světle to může být okolo 70 klx.
- Sedm po sobě jdoucích měření bylo vybráno z oblasti středu grafu, přičemž před a po měření se nevyskytnul přímý osvit sluncem. Tento případ je ukázán níže.
- Průměr byl stanoven na základě těchto sedmi měření.
- Průměrný měřený světelný výstup a průměrná venkovní osvětlenost nezastíněného místa měly stálý poměr. Z toho můžeme vyvodit další závěr a tedy existenci činitele popisující velikost denní osvětlenosti v závislosti na denní době.



Obr. 21 – Očekávaná minima denní osvětlenosti zatažené oblohy. Zdroj: Licht in de architectuur: Een beschouwing over dag – en kunstlicht, by Christa van Santen and A. J. Hansen.

- V literatuře můžeme najít křivky ukazující osvětlenost nezastíněné zatažené oblohy. V knize „Licht in der architectuur“ od autorů Christa van Santena a A. J. Hansena jsou tyto křivky zobrazeny pro očekávanou nejmenší osvětlenost přes den a to pro všechny měsíce (viz Obr. 21).

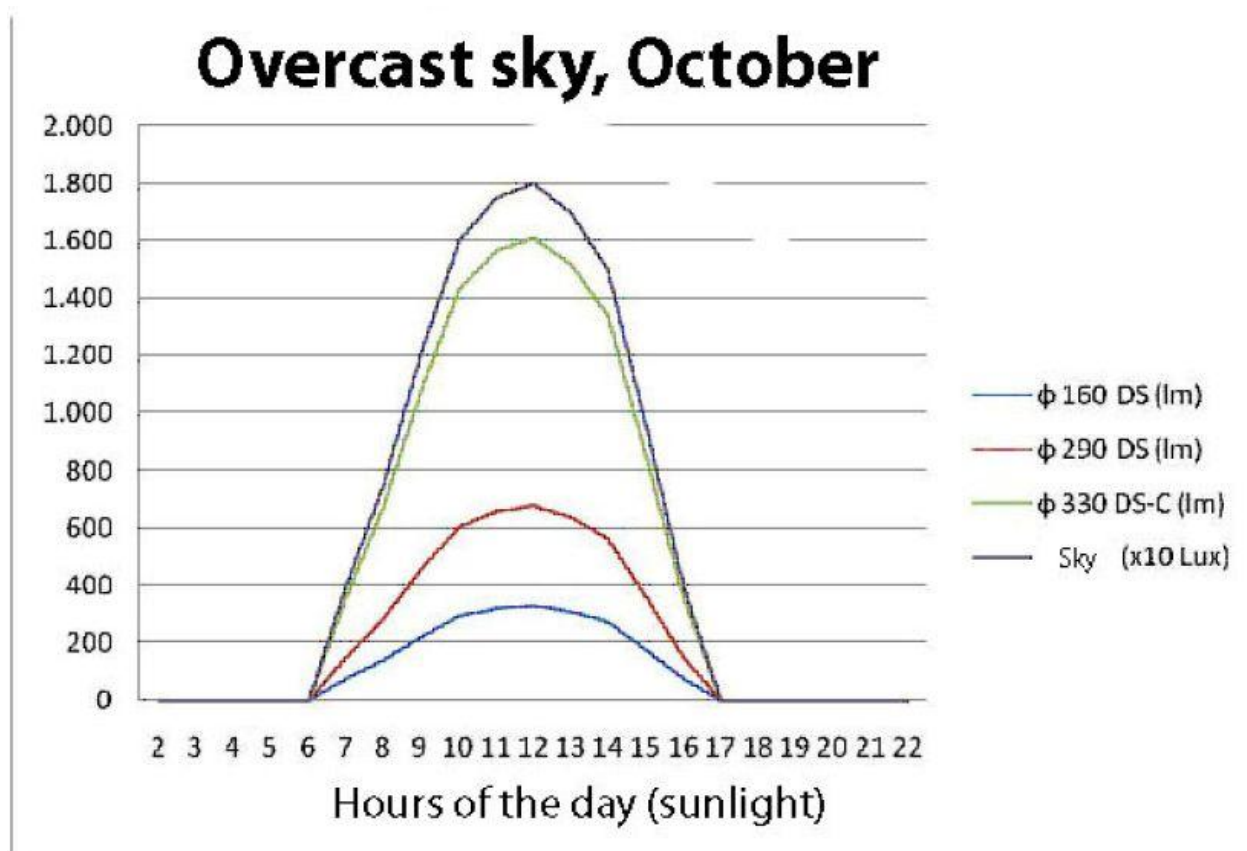
- Na základě této knihy (tedy činitele popisující denní osvětlenost v závislosti na denní a roční době zároveň) a poměru přenosu světla ze vstupu světlovodu na výstup můžeme předpovědět světelný výstup světlovodu.

Průměrná osvětlenost zatažené nezastíněné oblohy, světelný výstup světlovodu ve stejnou dobu a s tím spojené další údaje jsou uvedeny níže v tabulce:

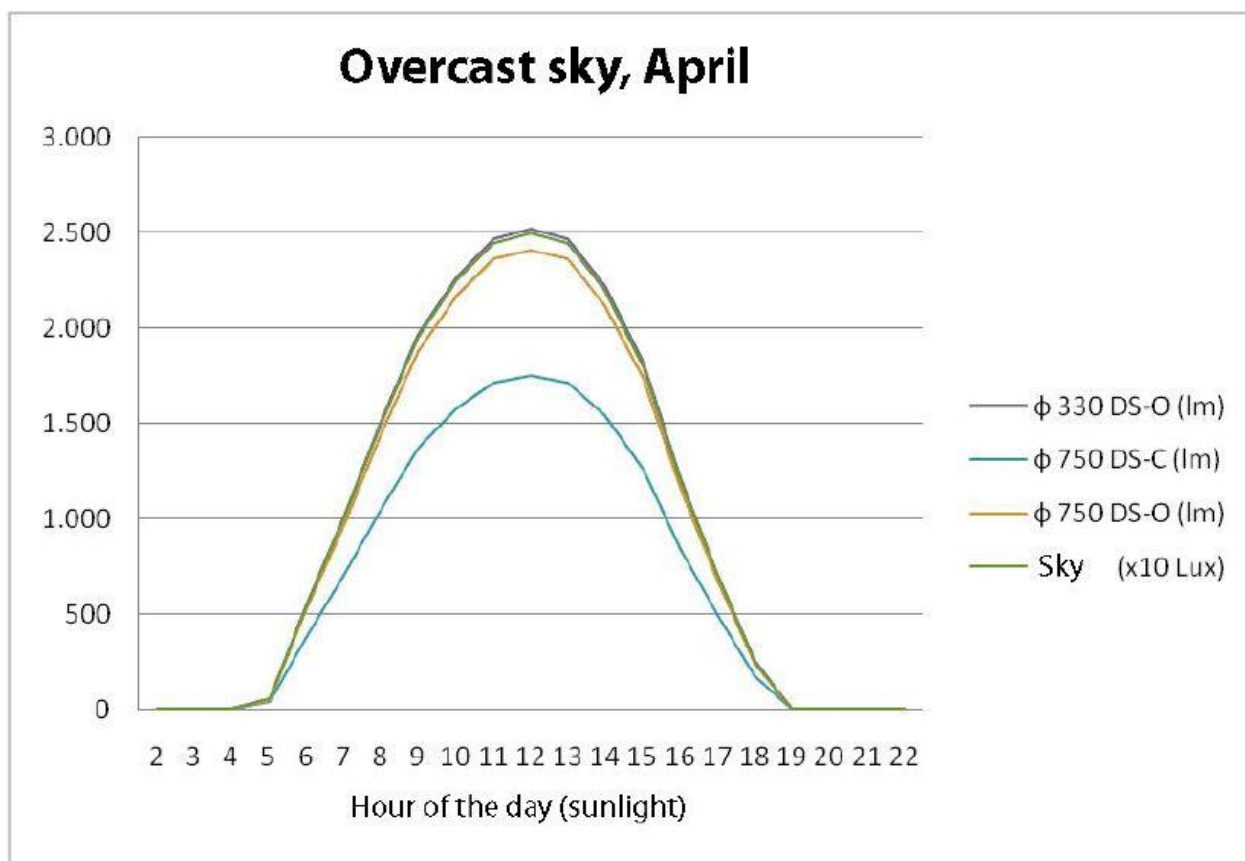
Tab. 1 – Průměrná osvětlenost zatažené nezastíněné oblohy, světelný výstup světlovodu ve stejnou dobu a s tím spojené údaje.

<i>Overcast sky</i>				
Type	Time interval measurement	Average light output (lumen)	Average illuminance under obstructed sky (lux)	Factor
Solatube 160 DS	27 Oct 10:45-10:51	177	9746	0.018
Solatube 290 DS	27 Oct 10:45-10:51	368	9746	0.038
Solatube 330 DS-C	27 Oct 10:45-10:51	872	9746	0.089
Solatube 330 DS-O	16 Apr 11:10-11:16	1617	16064	0.101
Solatube 750 DS-C	16 Apr 11:10-11:16	1123	16064	0.070
Solatube 750 DS-O	16 Apr 11:10-11:16	1548	16064	0.096

Následující grafy představují reprezentativní křivky světelného výstupu pod zataženou oblohou získanými výše uvedenou metodou.



Obr. 22 – Graf s reprezentativními křivkami světelného výstupu systémů od fy Solatube 160 DS, 290 DS a 330 DS-C měřenými pod zataženou oblohou 27. října 2009 a křivka očekávané nejmenší osvětlenosti podle literatury.



Obr. 23 - Graf s reprezentativními křivkami světelného výstupu systémů od fy Solatube 330 DS-O, 750 DS-C a 750 DS-O měřeními pod zataženou oblohou 16. dubna 2010 a křivka očekávané nejmenší osvětlenosti podle literatury.

4.6. ZÁVĚRY VYVOZENÉ ZE SVĚTELNÉHO VÝSTUPU

Na základě výsledků měření a křivek výše uvedených byly dopočítány aproximací následující hodnoty světelných toků ze světlovodu v daném čase.

Tab. 2 – Světelný výstup – jasná obloha, 15. října 2009

Light output under clear sky conditions, 15 October 2009			
System	Low (about 8:30am and 6:15pm)	Average (about 10am and 5pm)	Maximum (about 1:30pm)
Solatube 160 DS	170 lumens	800 lumens	1,400 lumens
Solatube 290 DS	280 lumens	1,500 lumens	2,800 lumens
Solatube 330 DS-C	450 lumens	2,900 lumens	5,800 lumens
Unobstructed sky (horizontal illuminance)	5,500 lux	31,000 lux	62,000 lux

Tab. 3 – Světelný výstup – zatažená obloha, říjen

Light output under overcast sky conditions*, October			
<i>System</i>	<i>Low (about 8am and 7pm)</i>	<i>Average (about 10am and 5pm)</i>	<i>Maximum (about 1:30pm)</i>
Solatube 160 DS	35 lumens	160 lumens	330 lumens
Solatube 290 DS	70 lumens	350 lumens	680 lumens
Solatube 330 DS-C	160 lumens	800 lumens	1,610 lumens
Unobstructed sky (horizontal illuminance)	1,800 lux	9,000 lux	18,000 lux

Tab. 4 – Světelný výstup – jasná obloha, 23. května 2010

Light output under overcast sky conditions, 23th May 2010			
<i>System</i>	<i>Low (about 7am and 8pm)</i>	<i>Average (about 9am and 6pm)</i>	<i>Maximum (about 1:30pm)</i>
Solatube 750 DS-C	1,400 lumens	4,200 lumens	5,300 lumens
Solatube 330 DS-O	800 lumens	5,500 lumens	12,600 lumens
Solatube 750 DS-O	1,800 lumens	5,500 lumens	7,200 lumen
Unobstructed sky (horizontal illuminance)	10,000 lux	50,000 lux	102,000 lux

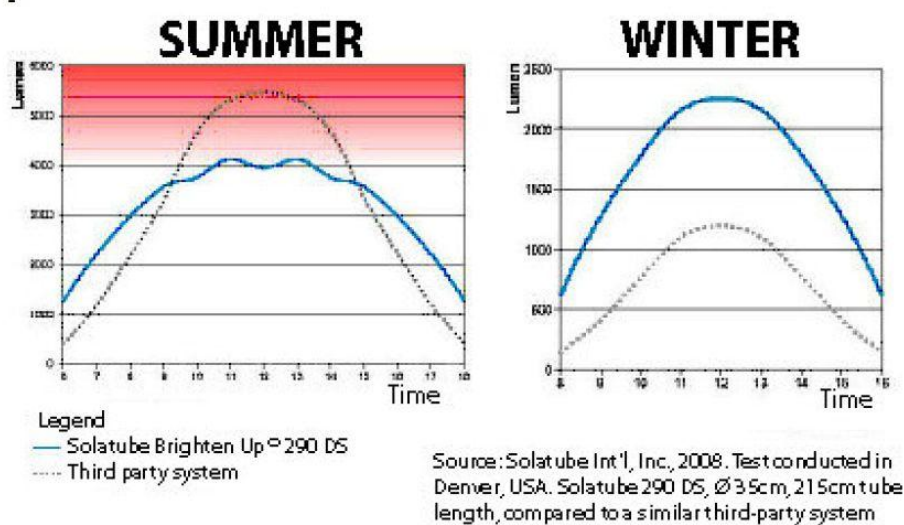
Tab. 5 – Světelný výstup – zatažená obloha, duben

Light output under overcast sky conditions*, April			
<i>System</i>	<i>Low (about 7am and 8pm)</i>	<i>Average (about 9am and 6pm)</i>	<i>Maximum (about 1:30pm)</i>
Solatube 750 DS-C	200 lumens	880 lumens	1,750 lumens
Solatube 330 DS-O	250 lumens	1,260 lumens	2,520 lumens
Solatube 750 DS-O	250 lumens	1,200 lumens	2,410 lumens
Unobstructed sky (horizontal illuminance)	2,500 lux	12,500 lux	25,000 lux

4.7.KOPULE RAYBENDER® 3000

Kromě projektu si zaslouží Vaši pozornost také kopule Raybender, která tvoří společný rys různých osvětlovacích systémů od fy Solatube. Podle popisu od výrobce tyto trojúhelníkové kruhové zářezy na vnitřním povrchu kopule zvyšují množství světla zachyceného kopulí. Citace z webu fy Solatube, která definuje výhody:

„V létě tento systém zachycuje ranní a podvečerní světlo z jasné oblohy, čímž významně zvyšuje množství denního světla, zatímco polední přímé a příliš silné světlo odklání – když je slunce v létě přímo v nadhlavníku. Raybender® 3000 je obzvlášť přínosný v zimě, kdy je slunce nízko nad obzorem a kopule dokáže přeměrovat paprsky s nízkým úhlem odklonu od horizontální roviny do tubusu světlovodu. To znamená, že chytře provedená kopule od fy Solatube zajistí skvělý světelný výstup.“



Obr. 24 – Grafy z oficiálních internetových stránek www.solatube.nl se schematickým znázorněním funkce Raybenderů.

4.8.PŘÍNOS KOPULE RAYBENDER® 3000

Je zajímavé studovat, za jakých podmínek je přínos kupule pozorovatelný. K ohodnocení posloužily výsledky měření systémů 330-DS-O a 750-DS-O ze dne 23. května 2010 zkoumané do větších detailů. Tyto dva systémy jsou identické vyjma nástřešní kopule. Systém 330-DS-O má čirou kopuli s reflektorem Light-Tracker™. Systém 750-DS-O má dvojitou kopuli bez reflektoru. Dvojitá kopule sestává z vnitřní čiré kopule a vnější kopule Raybender® 3000 (viz obr. 25 a 26).



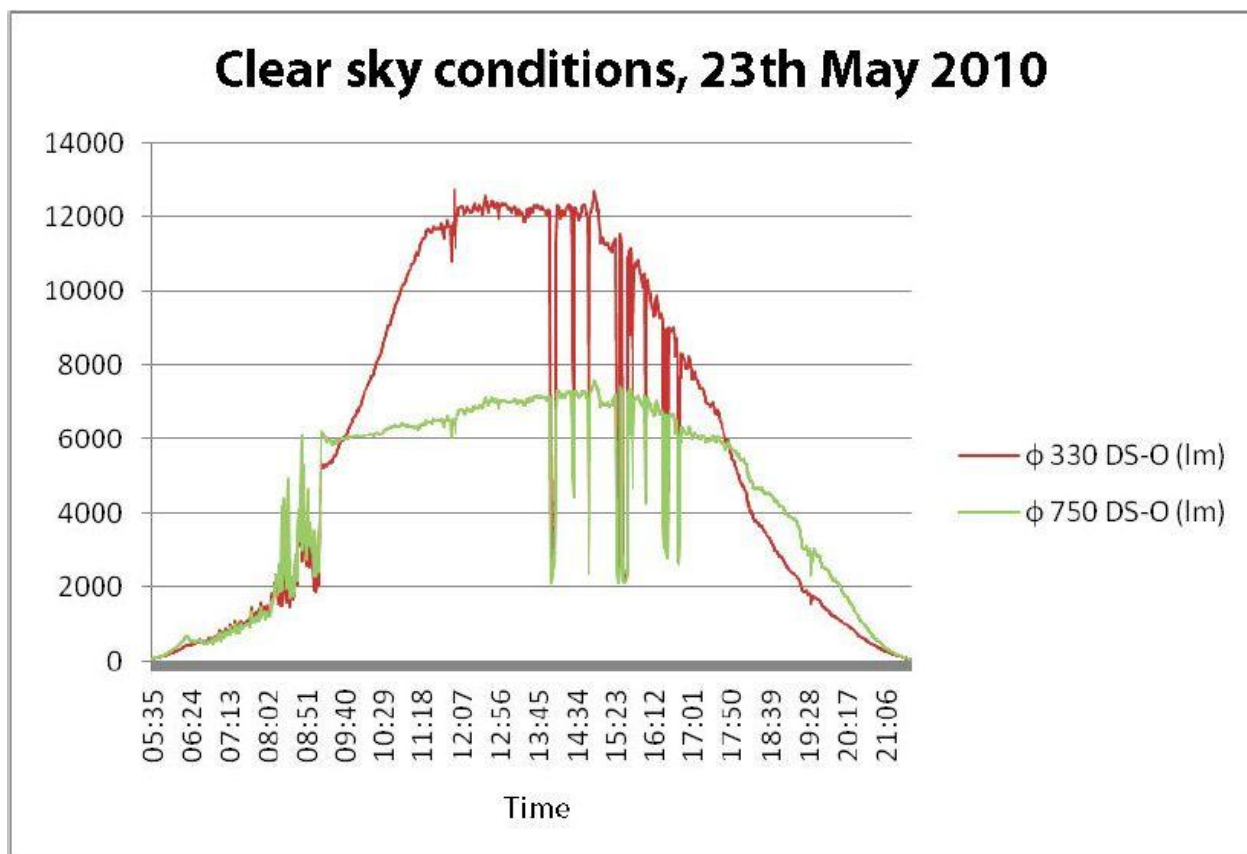
Obr. 25 – Systém 330-DS-O s čirou kopulí a reflektorem LightTracker™



Obr. 26 - Systém 750-DS-O s čirou vnitřní kopulí a vnější kopulí Raybender® 3000

Měření obou systémů probíhalo současně, tzn. hodnoty byly zaznamenávány ve stejný okamžik. Pro úplnost jsou výsledky vyneseny ve stejném grafu. Na první pohled vidíme rozdíly.

- Kolem poledne, resp. od 10 do 17 hodin, systém 330-DS-O přinášel větší světelný tok na výstup.
- V podvečer, tedy od 17 hodin do setmění, naopak systém 750-DS-O přinášel větší zisk.



Obr. 27 – Graf s výsledky měření systémů 330-DS-O a 750-DS-O při jasné obloze dne 25. května 2010

Následující tabulka shrnuje velké množství dat získaných při měření. Tabulka ukazuje průměrnou velikost světelného výstupu v intervalu jedné hodiny. V posledním sloupci je

vypočten procentní rozdíl, kde jako referenční je brán systém 330-DS-O. Tedy o kolik více, či méně světla přenáší systém 750-DS-O v danou hodinu oproti systému 330-DS-O.

Se zkracováním dlouhých letních dnů na krátké zimní se bude šedá plocha tabulky zmenšovat. V nejkratším dni v zimě vystoupá slunce pouze 15°nad obzor. Pro ilustraci v den měření (23. květen) to odpovídá času 7:30 hodin a pak 19:45 hodin.

Tab. 6 - Výkonnost systémů 750-DS-O a 330-DS-O při jasné obloze 23. května 2010

Average light output per time interval (1 hour)				Difference % (330 DS-O = 100%)
	φ 330 DS-O (lumen)	φ 750 DS-O (lumen)		
Sunrise-6am	107.3	136.1		26.8%
6-7am	426.7	500.7		17.4%
7-8am	990.9	924.7		-6.7%
8-9am	2370.0	2721.7		14.8%
9-10am	5313.3	5513.4		3.8%
10-11am	8595.2	6231.4		-27.5%
11am-12pm	11357.4	6436.8		-43.3%
12-1pm	12194.2	6856.2		-43.8%
1-2pm	12157.6	7044.5		-42.1%
2-3pm	10823.0	6513.9		-39.8%
3-4pm	9439.2	6149.4		-34.9%
4-5pm	7996.7	5956.5		-25.5%
5-6pm	6637.2	5930.8		-10.6%
6-7pm	3654.3	4693.5		28.4%
7-8pm	1857.7	3095.4		66.6%
8-9pm	752.6	1323.4		75.8%
9pm-Sunset	160.2	213.2		33.1%

4.9.ZHODNOCENÍ KOPULE RAYBENDER® 3000

Raybendery (mohli bychom říci kopule optickými hranoly, lámající sluneční paprsky) mají v měřených systémech významný vliv. Tyto optické prvky zajistí značný nárůst zachycení světla při malých uhlech dopadu (tzn. nízké výšce slunce nad obzorem) a přesměrování do tubusu, což má velký vliv na výkonnost světlovodného systému. Nárůst v porovnání s čistou kopulí může dosáhnout až na 76 % a to přes fakt, že světlovodné systémy vybavené kopulí Raybender® 3000 mají ještě kopuli vnitřní. Při přímém slunečním světle, je-li slunce v nadhlavníku, tato kopule přesměruje 44 % přichozího světla mimo tubus (oproti čiré kopuli). Tedy závěrem lze říci, že kopule Raybender® 3000 zajišťuje stálější světelný výstup během celého dne.

5. MĚŘENÍ ROZPTYLU SVĚTLA

5.1. UMÍSTĚNÍ

Světelní difúze byla měřena podle měřicí aparatury zmíněné výše, která byla na zakázku zkonstruována a vestavěna do měřicí haly (budovy).



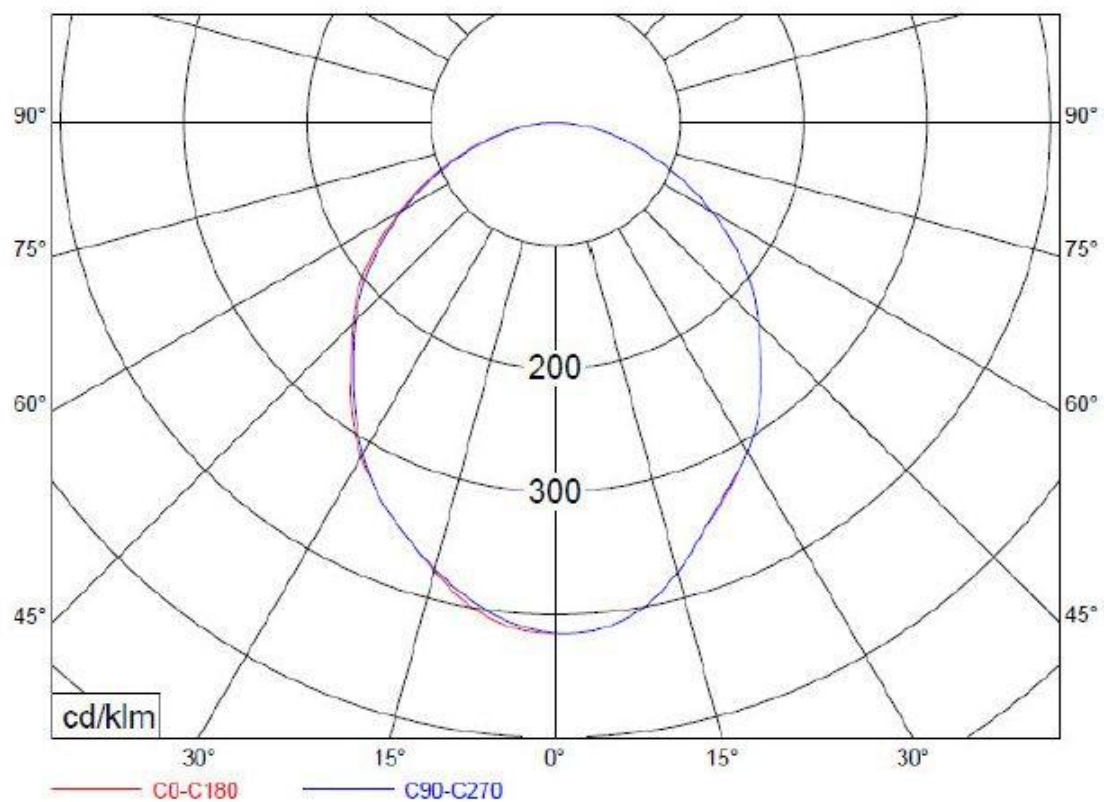
Obr. 28 – Goniofotometr s umělou oblohou

5.2. NAPÁJECÍ ZDROJ PRO UMĚLOU OBLOHU

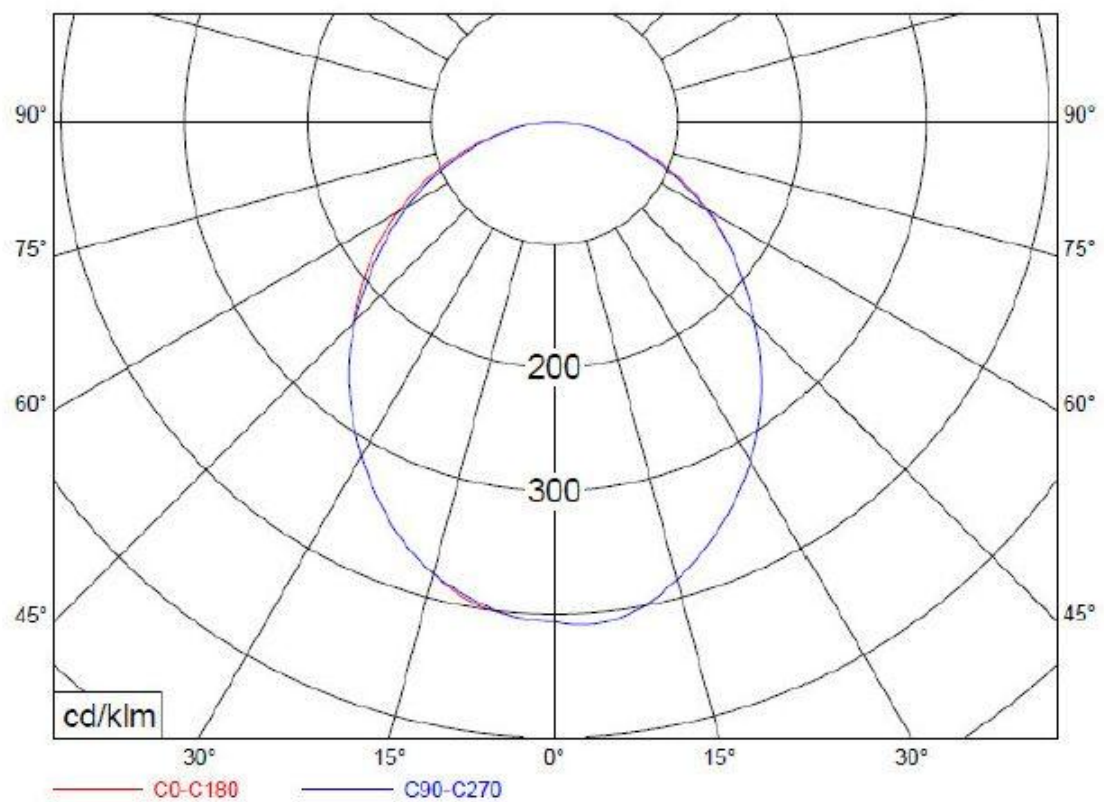
Umělá obloha obsahuje osm halogenových žárovek. Napájecí zdroj je sledován během měření a zaznamenaný rozdíl dosáhnul $\pm 1\%$.

5.3. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

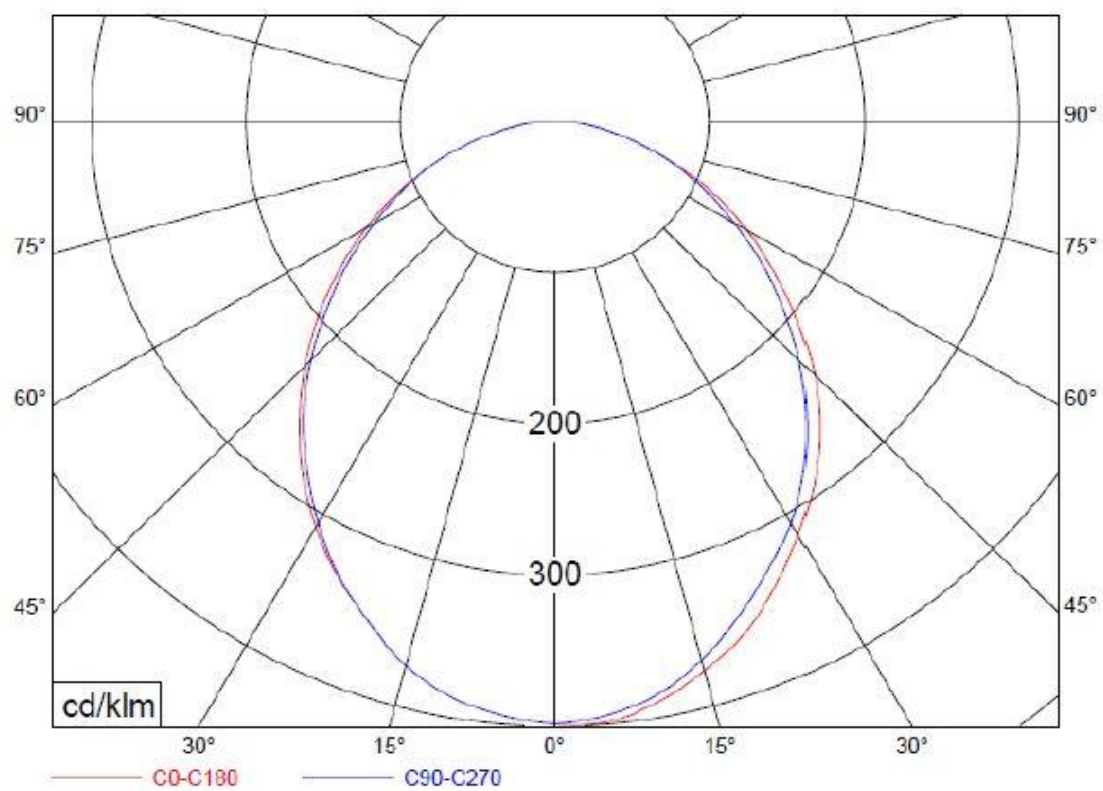
Po zpracování výsledků měření v programu LumCat byly získány následující křivky svítivosti.



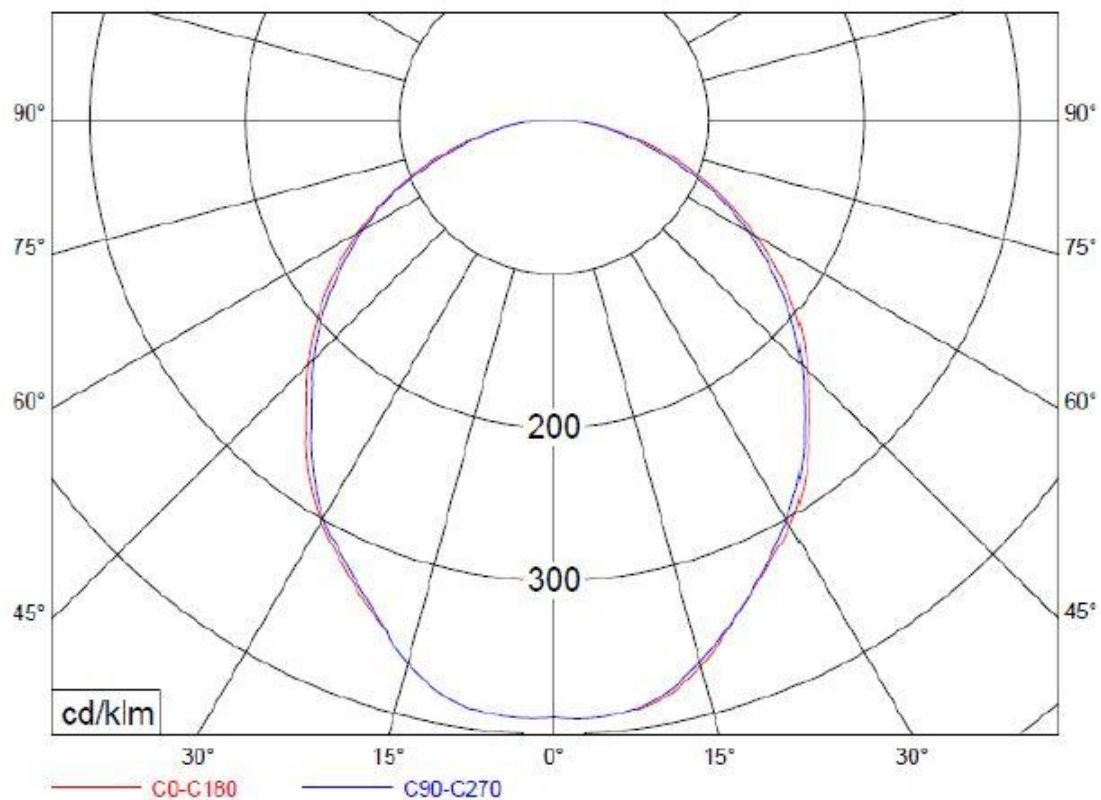
Obr. 29 – Nesymetrický světelný rozptyl systému 160 DS



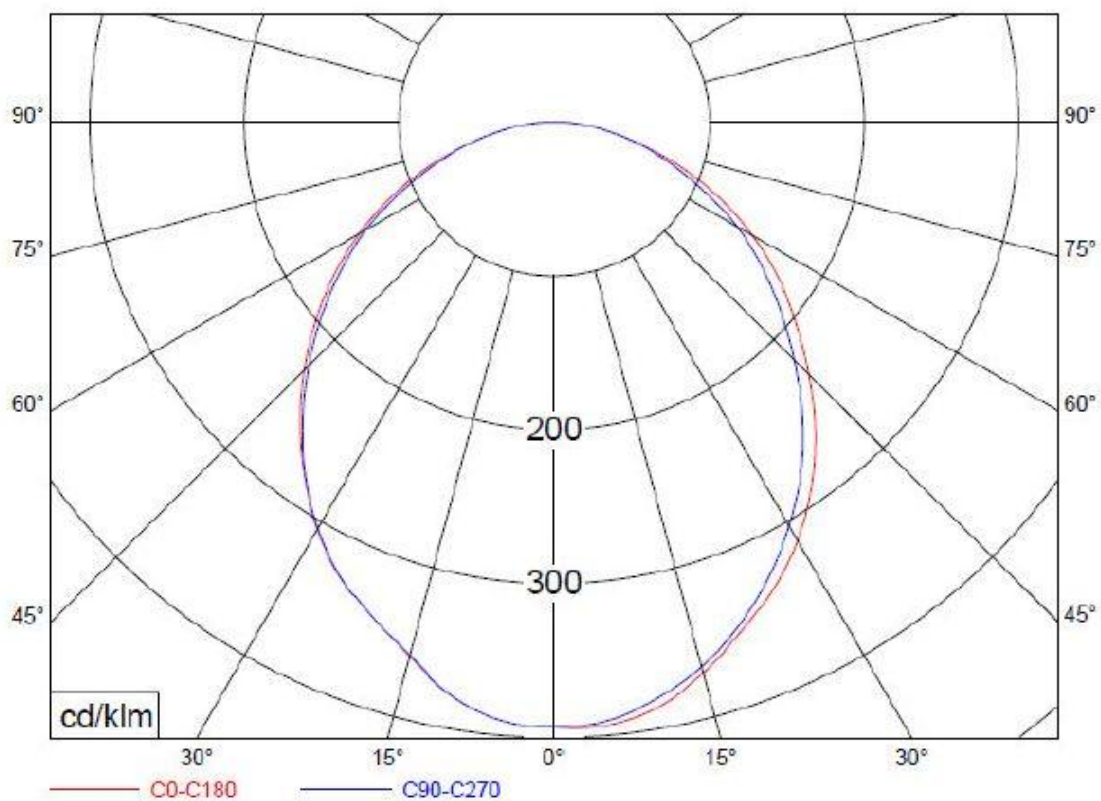
Obr. 30 - Nesymetrický světelný rozptyl systému 290 DS



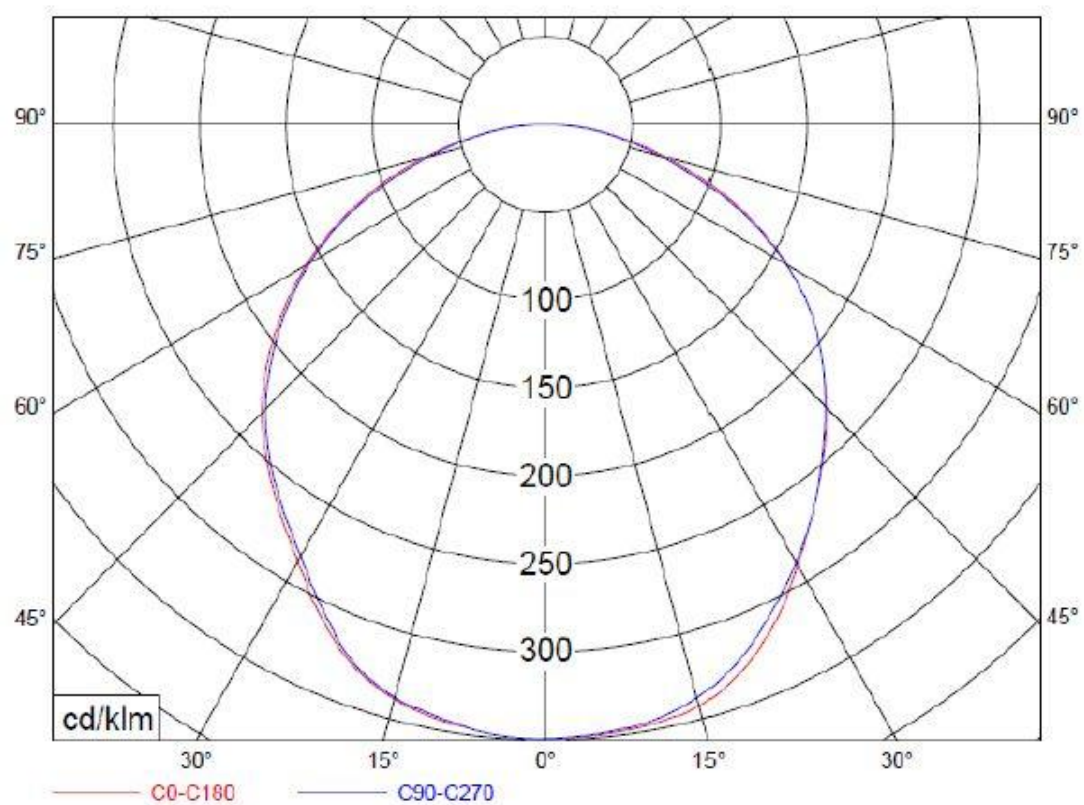
Obr. 31 - Nesymetrický světelný rozptyl systému 330 DS-C



Obr. 32 - Nesymetrický světelný rozptyl systému 330 DS-O



Obr. 33 - Nesymetrický světelný rozptyl systému 750 DS-C



Obr. 34 - Nesymetrický světelný rozptyl systému 750 DS-0

6. DODATEK

Poznámky k jednotlivým měřením.

Měření provedené 15. října 2009, obloha bez mraků:

- Tabulka s výsledky měření systémů Solatube 160 DS, 290 DS a 330 DS-C
- Hodnoty z meteorologické stanice pro daný den (viditelnost, teplota a rychlost větru)

Měření provedené 27. října 2009, obloha bez mraků:

- Tabulka s výsledky měření systémů Solatube 160 DS, 290 DS a 330 DS-C
- Hodnoty z meteorologické stanice pro daný den (viditelnost, teplota a rychlost větru)

Měření provedené 23. května 2010, obloha bez mraků:

- Tabulka s výsledky měření systémů Solatube 750 DS-C, 330 DS-O a 750 DS-O
- Hodnoty z meteorologické stanice pro daný den (viditelnost, teplota a rychlost větru)

Měření provedené 16. dubna 2010, obloha s mraky:

- Tabulka s výsledky měření systémů Solatube 750 DS-C, 330 DS-O a 750 DS-O
- Hodnoty z meteorologické stanice pro daný den (viditelnost, teplota a rychlost větru)

Goniofotometr:

- fotografie goniofotometru
- fotografie vnitřku umělé oblohy

Měřicí vybavení:

- zpráva o kalibraci přístroje Mobilux A USB Luxmeter (DIN5032, část 7, třída A), No. 070406
- zpráva o kalibraci přístroje Mobilux A USB Luxmeter (DIN5032, část 7, třída A), No. 081109
- zpráva o kalibraci přístroje Mobilux A USB Luxmeter (DIN5032, část 7, třída A), No. 090319
- zpráva o kalibraci přístroje Mobilux A USB Luxmeter (DIN5032, část 7, třída A), No. 090707

Odkaz:

- Strana 86, „Licht in de architectuur“, Christa van Santen a A. J. Hansen, publikováno J. H. de Bussy Amsterdam, ISBN 90 6054 722 5.