



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH INTERIÉROVÉHO SVÍTIDLA

INTERIOR LIGHTING DESIGN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Roman Klement

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Škoda, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Roman Klement
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výroba automobilových světel a technických svítidel
Vedoucí práce:	Ing. Jan Škoda, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh interiérového svítidla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Téma je zaměřeno na návrh interiérového svítidla využívající LED zdroje. Součástí tohoto návrhu by mělo být navrženo i optické části svítidla dle pokynů vedoucího za použití vhodných softwarových nástrojů (TracePro, ...).

Cíle diplomové práce:

1. Návrh konstrukce svítidla.
2. Návrh optické části svítidla.
3. Simulace svítidla v interiéru.

Seznam doporučené literatury:

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

REA, S. Mark. The IESNA Lighting Handbook, 9th Edition, 2000. The IESNA. ISBN 0-87995-150-8.

GANSLANDT, Rüdiger, HARALD, Hofmann. Handbook of Lighting Design, ERCO Leuchten GmbH, Lüdenscheid Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden. 1. edition. 1992.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá návrhom virtuálneho prototypu svietidla. Pomocou vhodných softvérových nástrojov je vytvorená a optimalizovaná optika svietidla, svietidlo je simulované v interiéri a sú vyhodnotené jeho svetelné parametre. Nakoniec je vytvorená vhodná konštrukcia.

Kľúčové slová

Svietidlo, Optimalizácia, Simulácia, TracePro, Design

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design of a virtual prototype of a luminaire. Using suitable software tools, a luminaire optics is created and optimised. Luminaire is simulated in the interior, and lighting parameters are evaluated. Finally a suitable design is created.

Key words

Luminaire, Optimisation, Simulation, TracePro, Design

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

KLEMENT, Roman. *Návrh interiérového svietidla* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-08].

Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124269>. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Škoda.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému **Návrh interiérového svítidla** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

8. 6. 2020

.....
Datum

.....
Bc. Roman Klement

POĎAKOVANIE

Týmto ďakujem pánovi Ing. Janovi Škodovi Ph.D. za cenné rady a ochotu pri vypracovávaní diplomovej práce. Taktiež ďakujem rodine, priateľom a kolegom zo spoločnosti So:Lune Bros. za podporu.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PREHLÁSENIE.....	4
POĎAKOVANIE	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 Zadanie práce.....	10
1.1 Fyzikálne základy.....	10
1.2 Smerovanie svetelného toku	13
1.2.1 Reflektory	14
1.2.2 Refraktory	15
1.2.3 Difúzory	15
1.2.4 Tienidlá	16
1.2.5 Optické vlákna	16
1.3 Typy svietidiel.....	17
1.3.1 Stacionárne svietidlá	17
1.4 Osvetlenie miestnosti.....	19
1.5 Prehľad používaných nepriamych svietidiel.....	20
2 Návrh svietidla	22
2.1 Zadanie	22
2.2 Voľba zdroja a predradníka.....	22
2.3 TracePro	24
2.3.1 Ray Tracing.....	24
2.3.2 BSDF funkcia	24
2.3.3 Presnosť simulácie	25
2.3.4 Metodika práce	26
3 Návrh hornej časti svietidla	28
3.1 Voľba optických komponentov	29
3.2 Voľba materiálu reflektora.....	30
3.2 Poloha zdroja.....	31
3.3 Návrh číslo 1	31
3.3.1 Optimalizácia tvaru reflektora	31
3.4 Návrh číslo 2	35
4 Návrh dolnej časti svietidla.....	38
5 Simulácia svietidla v interiéri	41

5.1 Simulácia hornej časti (Návrh číslo 1).....	43
5.2 Simulácia hornej časti (Návrh číslo 2).....	44
5.3 Simulácia dolnej časti svietidla.....	45
5.4 Simulácia oboch častí svietidla	46
6 Konštrukčný návrh.....	48
6.1 Technologický postup výroby a montáže	48
7 Diskusia	52
7.1 Možnosti ďalšieho postupu.....	52
ZÁVER	53
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	54
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	57

ÚVOD

Usmerňovanie svetelného toku je disciplína, ktorá má svoj počiatok ešte dávno pred vynájdením prvej žiarovky. Už starovekí Rimania a Gréci používali zrkadlá na osvetľovanie pri písaní. Základom geometrickej optiky boli Euklidove axiómy v roku 300 pred Kristom.

- Lúče ktoré smerujú k objektu je možné spojiť priamkou.
- Lúče dopadajúce na objekt tvoria kužeľ.
- Objekty na ktoré dopadajú lúče sú viditeľné.
- Objekty pozorované pod väčším uhlom vyzerajú väčšie.
- Objekty pozorované viacerými lúčmi sú žiarivejšie.
- Objekty pozorované lúčmi vpravo sa zobrazujú vpravo a lúčmi vľavo sa zobrazujú vľavo.
- Objekty pozorované pod viacerými uhlami sú viditeľnejšie.

Euclides veril, že svetelné lúče smerujú z ľudského oka. Neskôr Hérón z Alexandrie popísal odraz svetla pomocou rohového zrkadla. Jeho princíp bol nahradený až Fermatovým princípom o 1500 rokov neskôr [1, 2].

Vznik svetelnej techniky sa datuje do osemnásteho storočia keď Labmert, Boguer a Beer popísali absorpciu svetla. Prvé svietidlá neslúžili na osvetľovanie interiérov. Prvými svietidlami boli majákové svietidlá, ktoré mali ako zdroj argandovú lampu a svetlo bolo usmerňované medeným parabolickým reflektorom, ktorý bol postriebrený. Vyrobil ho Robert Stevenson v roku 1811 (viď obrázok 1) [2].



Obr. 1 Reflektor používaný v majákoch [3].

V roku 1820 Augustin Jean Fresnel vynášiel šošovku, ktorá usmerňovala svetlo z majákov efektívnejšie. Fresnelova šošovka bola oproti tradičným oveľa ľahšia a bolo ju možné vyrobiť v rozmeroch pre potreby majáku (viď obrázok 2).

O sto rokov neskôr sa svietidlá používali bežne na nočné osvetľovanie exteriérov a osvetľovanie interiérov. Svietidlá začali byť konštruované vzhľadom na ich použitie a na vykonávanú činnosť. V tejto dobe boli spísané prvé osvetľovacie normy. Tieto však boli čisto kvantitatívne. Nebralo sa v úvahu oslnenie, farba svetla atď.

Po druhej svetovej vojne nastúpila filozofia kvalitatívneho osvetľovania. Svetelný dizajnér Richard Kelly rozdelil návrhy osvetľovania na tri základné princípy. Okolité osvetlenie, ohnisková žiara a hra briliantov (z anglického ambient luminiscence, focal glow a play of brilliants). Okolité osvetľovanie definovalo to, čo bolo definované kvantitatívnym osvetľovaním. Pre rôzne činnosti je potrebné definovať určitú osvetlenosť. Ohnisková žiara je osvetlenie predmetov záujmu v priestore. Hra briliantov je nastolenie atmosféry v priestore. Môže sa jednať napríklad o farebné svetlo, alebo sviečku [4].

V súčasnosti je vďaka technologickému pokroku možné tvoriť svietidlá s presne stanovenými požiadavkami na ich výkon, svetelný tok, určenie, smerovanie... Svetelné zdroje majú stále väčšiu účinnosť a menšie rozmery. Svietidlá môžu byť virtuálne prototypované vďaka špecializovaným softvérom. Vyrábané svetelné zdroje sú zamerané pomocou goniofotometru a v softvéri môže byť dizajnované svietidlo bez použitia reálnych súčastí.

Táto práca by má predstaviť možnosti virtuálneho prototypovania v oblasti svetelnej techniky.



Obr. 2 Fresnelova šošovka v majáku [5].

1 ZADANIE PRÁCE

Zadaním diplomovej práce je návrh interiérového svietidla. Zadané svietidlo je nástenné svietidlo, ktorého vonkajšia konštrukcia je daná. Počiatočný dizajn svietidla vychádza z modelu Izar II od firmy Lucis (viď obrázok 3). Toto svietidlo osvetľuje stenu miestnosti na ktorej je uchytené. Navrhnuté svietidlo má rovnaký vonkajší tvar. Jedná sa o hranol, ktorý má tri strany nepriesvitné a svetlo vyžaruje do priestoru cez dve horizontálne plochy. Návrh svietidla má spĺňať nasledujúce požiadavky. Svietidlo má obsahovať dve nezávisle fungujúce časti vyžarujúce do vrchného a spodného polpriestoru. Vrchná časť má plniť funkciu nepriameho osvetľovania tak, že bude osvetľovať strop miestnosti. Spodná časť bude slúžiť ako sekundárne prisvietenie pre prípad potreby vyššieho osvetlenia. Svietidlo bude umiestnené v spálni. Tento priestor nepodlieha žiadnym svetelnotechnickým normám.



Obr. 3 Ilustračný obrázok svietidla Lucis Izar II [6].

1.1 Fyzikálne základy

Svetlo je elektromagnetické žiarenie a môže byť popísané fyzikálnymi veličinami. Disciplína svetelná technika však popisuje svetlo v závislosti na jeho pôsobení na človeka. Preto boli definované svetelnotechnické jednotky a zákony, ktoré popisujú výhradne toto pôsobenie.

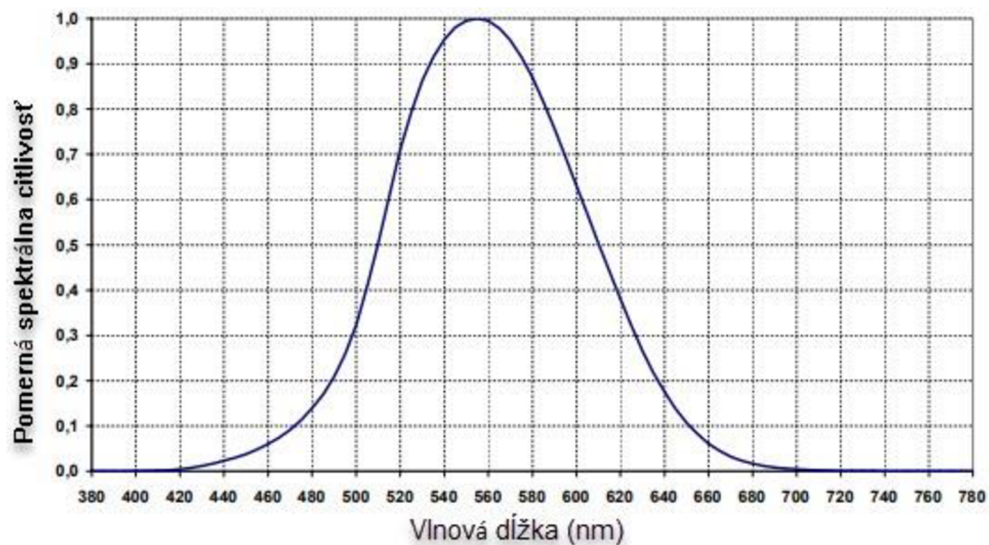
- Svetelný tok.

Svetelný tok predstavuje energetickú hodnotu svetla, ktorá sa vzťahuje na citlivosť ľudského oka. Ľudské oko vníma rôzne vlnové dĺžky svetla s rozdielnou citlivosťou. Experimentálne bola vypracovaná takzvaná V_λ krivka, ktorá sa používa ako štandard pri výpočte svetelného toku (viď obrázok 4).

Svetelný tok sa označuje gréckym písmenom Φ a jednotkou je 1 lumen [lm]. Vzťah X.X popisuje závislosť žiarivej energie na svetelnom toku.

$$\Phi = 683 \int_0^{\infty} H_{e,\lambda} V_{\lambda} d\lambda$$

Pričom $H_{e,\lambda}$ predstavuje spektrálnu hustotu žiarivého toku, V_{λ} spektrálnu citlivosť pozorovateľa. Hodnota 683 je maximálna svetelná účinnosť monochromatického žiarenia pre fotopické videnie (videnie počas dňa).



Obr. 4 Krivka V_{λ} [8].

- Priestorový uhol.

Označuje spôsob šírenia svetelného toku. Je to časť priestoru vymedzená obecnou kužeľosečkou. Označuje sa gréckym písmenom Ω a jednotkou je steradián (ozn. sr). Najvyššou hodnotou priestorového uhlu je 4π sr označujúcou povrch celej gule. Priestorový uhol je možné vypočítať podľa nasledujúceho vzťahu 1 [7, 8].

$$d\Omega = \frac{dS \cdot \cos\beta}{r^2} \quad (1)$$

β je uhol, ktorý zvierá normála elementu dS s osou elementárneho priestorového uhlu, r označuje vzdialenosť bodu pozorovania a stredu elementárnej plochy dS .

- Svetivosť.

Definuje svetelný tok prechádzajúci priestorovým uhlom. Svetivosť je vektorová veličina. Jednotkou je kandela. Počíta sa podľa vzťahu 2 [7, 8].

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (2)$$

- Osvetlenosť.

Osvetlenosť je intenzita svetelného žiarenia. V praxi je najsledovanejšou fotometrickou veličinou. Označuje sa E a jednotkou je lux [lx]. Je definovaná podľa vzťahu:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (3)$$

Pričom S je plocha na ktorú svetelný tok dopadá [7, 8].

- Jas.

Jas je najvýznamnejšou veličinou z hľadiska ľudského videnia. Je to intenzita vyžarovania plochy v danom smere. Označuje sa L a jednotkou je cd/m^2 . Počíta sa podľa nasledujúceho vzťahu:

$$L = \frac{I_\alpha}{dS \cdot \cos \alpha} \quad (4)$$

S je osvetlená plocha, uhol α je uhol pod ktorým je plocha pozorovaná [7, 8].

- Svetlenie

Svetlenie je podobná veličina osvetlenosti s rozdielom, že definuje intenzitu svetelného žiarenia odrazeného z plochy. Označuje sa H a jednotkou je lm/m^2 . Vypočíta sa podľa vzťahu 5.

$$H = \frac{d\Phi}{dS} \quad (5)$$

Pre dokonalý difúzny odraz (Lambertovský žiarič) je vzťah jasu a svetlenia nasledujúci:

$$L = \frac{H}{\pi} \quad (6)$$

Ďalej sú pri riešení problému dôležité tri zákony svetelnej techniky. Keďže pri riešení bude použitých viacero svetelných zdrojov, osvetlenosť v jednotlivých bodoch je možné vyjadriť superpozíciou jednotlivých dopadajúcich lúčov. O tomto pojednáva aditívny zákon (vzťah 7) [7, 8].

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{r_i^2} \cos \gamma_i \quad (7)$$

Zdroj LED je lambertovský alebo kosínusový žiarič, čo znamená, že vyžaruje podľa kosínusového zákona (vzťah 8), podľa ktorého sa u plošných svetelných zdrojov svietivosť znižuje podľa kosínusu uhlu φ od normály. I_N je svetelná intenzita v smere normály [7, 8].

$$I_\varphi = I_N \cdot \cos \varphi \quad (8)$$

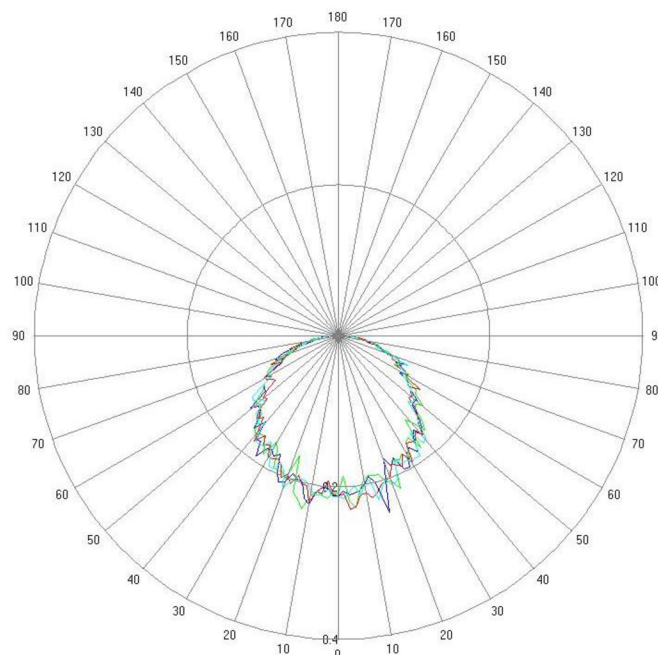
Podľa inverzného štvorcového zákona osvetlenia plochy v homogénnom prostredí klesá s druhou mocninou vzdialenosti tejto plochy od zdroja žiarenia. Dôvodom je šírenie svetla v podobe guľovej vlny, ktorá má konštantnú sumu energie na svojej ploche [7, 8].

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (9)$$

E označuje osvetlenie, r vzdialenosť osvetlenej plochy od zdroja.

1.2 Smerovanie svetelného toku

Každý svetelný zdroj vyžaruje do priestoru s unikátnou charakteristikou. V praxi sa na popis používa krivka svietivosti (viď obrázok 5). Z dôvodu účelnosti a účinnosti sa táto charakteristika usmerňuje pomocou optických prvkov. Na usmerňovanie svetelného toku sa v svietidlách používajú princípy geometrickej a vlnovej optiky. V nasledujúcej kapitole sú popísané základné optické komponenty.



Obr. 5 Krivka svietivosti LED svetelného zdroja.

1.2.1 Reflektory

Reflektory sú pravdepodobne najpoužívanejšie optické komponenty. Pri dopade svetelného lúča na povrch nepriesvitného telesa dochádza k jeho odrazu alebo reflexii. V ideálnom stave dochádza pri dopade lúča na povrch k odrazu pod rovnakým uhlom ako bol uhol dopadu. Podľa vlastností povrchu (jeho koeficientu odrazu) môže byť odraz čiastočný alebo úplný. Pôvodne sa reflektory vyrábali z pokovovaného skla, dnes sa väčšinou jedná o hliníkový alebo chrómový anodicky oxidovaný plast alebo kov. Podľa povrchu môže byť reflektor zrkadlový, polozrkadlový alebo difúzny. Pri aplikáciách vyžadujúcich vysokú presnosť sa používajú zrkadlové reflektory [10, 11, 12].

Podľa tvaru sa reflektory pre LED zdroje rozdeľujú na:

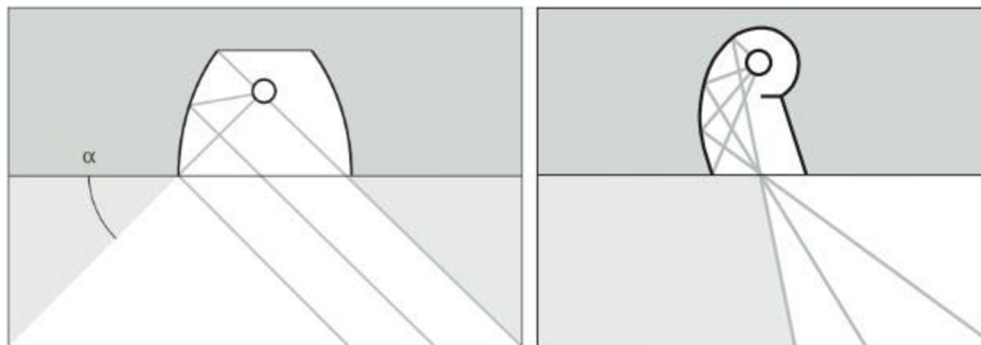
- Parabolické (viď obrázok 6 vľavo).

Pri týchto reflektoroch je svetelný zdroj umiestnený do ohniska paraboly. Jedná sa o najčastejšie používaný typ reflektoru. LED zdroj môže byť umiestnený jeho normálou smerujúcou k vrcholu paraboly, pričom tvorí úzky zväzok lúčov, alebo normálou smerujúcou od vrcholu pre široký zväzok [10].

- Eliptické (viď obrázok 6 vpravo).

Pri elipse platí, že lúč vyžiarený z jedného ohniska elipsy vždy po jednom alebo viacerých odrazoch dopadne do druhého ohniska. Tento druh reflektorov sa používa pri svetidlách montovaných do steny miestnosti. Zdroj je umiestnený do jedného ohniska elipsy, druhé ohnisko je na úrovni povrchu steny. Vďaka tomu je svetelný tok rovnomerne rozložený už na úrovni steny. Často sa používajú v kombinácii s parabolickým reflektorom [10].

Okrem parabolických a eliptických reflektorov existujú sférické, involute a darklight reflektory. Tieto sa ale pre LED zdroje nepoužívajú [9, 10, 12].



Obr. 6 Parabolický a eliptický reflektor [10].

1.2.2 Refraktory

K lomu alebo refrakcii svetla dochádza pri prechode medzi dvoma transparentnými prostrediami. Transparentné prostredia sú charakterizované indexom lomu. Index lomu označuje pomer rýchlosti svetla vo vákuu a v danom prostredí [7].

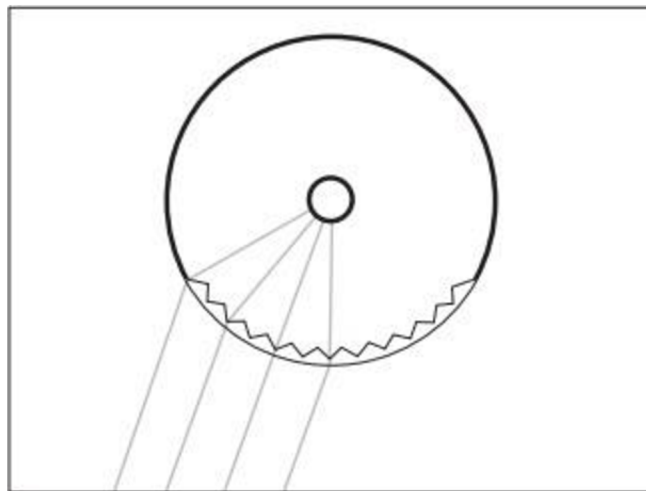
$$n = \frac{c}{v} \quad (10)$$

Lom svetla možno vypočítať pomocou Snellovho zákona.

$$n_1 \cdot \sin\varphi_1 = n_2 \cdot \sin\varphi_2 \quad (11)$$

Tento zákon využívajú optické komponenty – refraktory. Vyrobené sú z priehľadného plastu alebo skla a tvarované do podoby hranolu alebo šošovky. Vo svetelnej praxi sa používajú najmä prizmatické šošovky (viď obrázok 7), ktoré sa vyrábajú povrchovou úpravou materiálu. Môžu byť lineárne alebo trojdimenzionálne [10, 12].

V svietidlách sú často používané spojné šošovky v kombinácii s reflektorom. Reflektor nasmeruje svetelný tok do sústavy spojných šošoviek, čím sa docieli užší zväzok lúčov [10].



Obr. 7 Prizmatická šošovka [10].

1.2.3 Difúzory

Difúzory rozptyľujú dopadajúce svetlo. Týmto zamedzujú oslneniu, zatemňujú vnútro svietidla a potláčajú premietanie optických a mechanických prvkov svietidla. Difúzory sa rozdeľujú na holografické, brúsené a opálové sklo. Holografické sa vyrábajú leptaním povrchu materiálu, najčastejšie polykarbonátu. Brúsené difúzory sa vyrábajú pomocou pieskovania povrchu materiálu. Drsnosť povrchu určuje optické vlastnosti. Na rozdiel od

vyššie menovaných, pri opálovom skle nerozptyľuje svetlo povrch materiálu, ale jeho objem [10, 12, 13].

V ideálnom prípade sa po prechode alebo po odraze od difúzoru svetlo rozptýli podľa Lambertovho zákona. Príklad svetelného výkonu difúzoru je na obrázku č. 8.



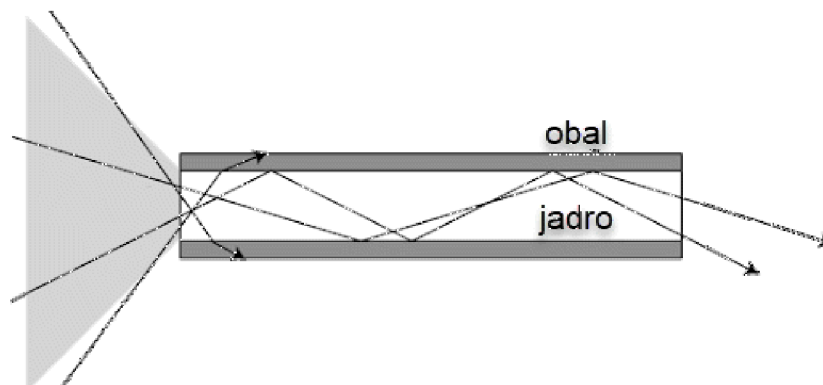
Obr. 8 Optické difúzory [13].

1.2.4 Tienidlá

Tienidlá sú nepriehľadné alebo čiastočne priehľadné materiály, zamedzujúce priamy pohľad do lampy z vonkajšej strany svietidla. Často ako tienidlo môže slúžiť aj reflektor alebo difúzor [10].

1.2.5 Optické vlákna

Hoci sa optické vlákna väčšinou používajú v experimentálnej fyzike a informatike, našli svoje uplatnenie aj v svetelnej technike. Optické vlákno je tenké vlákno v tvare valca, vyrobené z plastu alebo skla. Svetlo doň vstupuje na jednej strane kruhového prierezu a pomocou princípu totálneho odrazu prešľapuje vláknom na druhý koniec (viď obrázok 9). Vo svetelnej technike sa používajú hlavne z estetických dôvodov, alebo pri osvetľovaní denným svetlom [10, 14].



Obr. 9 Totálny odraz v optickom vlákne.

1.3 Typy svietidiel

Interiérové svietidlá je možno z konštrukčného hľadiska rozdeliť do štyroch základných kategórií. Stacionárne, pohyblivé, svetelné štruktúry a dekoratívne svietidlá. Stacionárne svietidlá sú priamou súčasťou interiéru a ich svetelné rozloženie nie je možné meniť. Na rozdiel od nich, pohyblivé svietidlá, najčastejšie svetlomety, sú konštrukčne prispôsobené zmene rozloženia svetelného toku. Používajú sa v dynamicky sa meniacich priestoroch ako napríklad múzeá a galérie. Kombináciou týchto typov sú svetelné štruktúry, ktoré majú na stacionárnom svietidle upevnené pohyblivé časti, napríklad natáčanie reflektoru. Špeciálnou kategóriou je dekoratívne osvetlenie, pri ktorom nezáleží na svetle ktoré produkujú, ale hlavne na estetike. V pokračovaní sa budem zaoberať stacionárnym osvetlením, ktoré je najrozšírenejším typom [10].

1.3.1 Stacionárne svietidlá

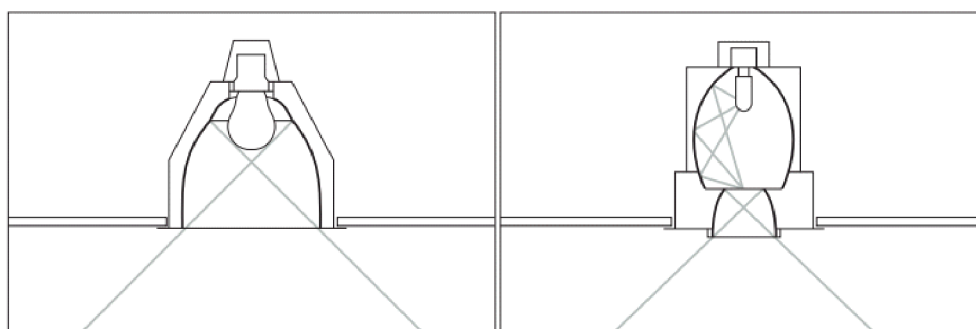
V tejto kapitole sú popísané základné druhy stacionárných svietidiel rozdelené podľa ich kriviek svietivosti.

- Downlights (viď obr. 10 vľavo).

Sú to svietidlá, ktorých svetelný tok smeruje prevažne dole. Sú montované na strop miestnosti. Ich konštrukcia pozostáva väčšinou z parabolického reflektoru, niekedy v spojení s žalúziami alebo difúzorom na minimalizáciu oslnenia. Vytvárajú priame osvetlenie. Ich krivka svietivosti je väčšinou osovo symetrická [10].

- Dvojfokusované downlights (viď obr. 10 vpravo).

Svietidlo podobné downlightu, ktoré pridaním ďalšieho eliptického reflektoru umiestňuje ohnisko do spodnej časti svietidla, čím dochádza k väčšiemu uhlu distribúcie svetla. Dôvodom je zmenšenie viditeľnej časti svietidla. Krivka svietivosti je taktiež symetrická [10].



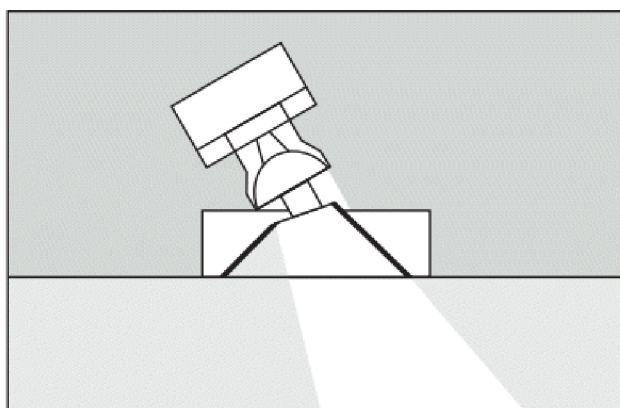
Obr. 10 Downlights [10].

- Uplights.

Na rozdiel od downlights emitujú svetelné žiarenie smerom nahor. Svetlo sa následne odráža od stropu alebo stien miestnosti. Toto svetlo je nepriame a difúzne, eliminuje oslnenie, ale je menej efektívne vplyvom viacerých odrazov. Tieto svietidlá bývajú často montované do podlahy miestnosti [10].

- Spotlights (viď obrázok 11).

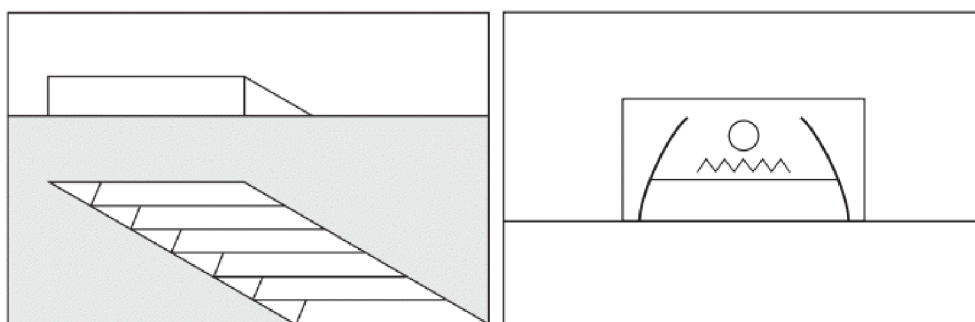
Sú to svetelné zdroje, ktoré sa vyznačujú úzkou až stredne širokou krivkou svietivosti. Využívajú sa na osvetlenie konkrétneho objektu. Príkladom použitia je osvetlenie exponátov v múzeách [10].



Obr. 11 Spotlight [10].

- Lamelové osvetlenie (viď obrázok 12).

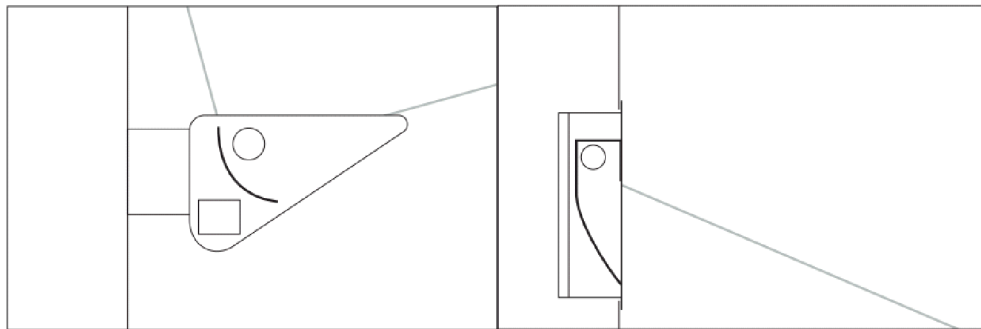
Je dizajnované pre lineárne svetelné zdroje. Väčšinou sa používajú lineárne žiarivky alebo LED zdroje. Majú tvar hranolu a osovo symetrickú krivku svietivosti. Používajú sa najmä na osvetlenie širokých priestorov. Oslnenie limitujú použitím lamiel, ktoré zakrývajú zdroj [10].



Obr. 12 Lamelové svietidlo [10].

- Washlights (viď obrázok 13).

Tieto asymetrické svietidlá majú reflektory navrhnuté tak, aby svetelný tok rozptýlili uniformne na veľké plochy. Rozdeľujú sa na wall washers (osvetlenie stien), ceiling washers (stropu) a floor washers (podlahy). Wall washers a ceiling washers sa zväčša používajú na vytvorenie nepriameho ambientného osvetlenia. Floor washers sa používajú najmä na osvetľovanie dlhých chodieb. Montované sú do relatívne nízkych výšok [10].



Obr. 13 Ceiling washer a floor washer [10].

1.4 Osvetlenie miestnosti

Jeden zo spôsobov delenia interiérových svietidiel je na priame a nepriame (viď obrázok 14). Priame osvetlenie je netienené, väčšinou smeruje od stropu nadol, zatiaľ čo nepriame osvetlenie osvetľuje miestnosť difúzne odrazeným svetlom od povrchov miestnosti.

Priame svietenie je používané najmä v situáciách, kde je potrebné fokusovať osvetlenosť. Pod priamym osvetlením sa z dôvodu vrhania tieňov ľahšie rozoznávajú tvary predmetov. Preto sú príkladom využitia pracoviská so zvýšenými nárokmi na videnie ako montážne linky, nemocničné priestory a podobne. V domácnosti sa priame osvetlenie používa v priestoroch, kde sa vykonáva manuálna činnosť. To zahŕňa kuchyne, kúpeľne, jedálne a podobne. Priame osvetlenie je vhodné použiť aj z dôvodu vyššej účinnosti, keďže vzniká menej odrazov.

Nepriame svietenie sa používa, keď chceme zamedziť výraznému zväzku lúčov. Použitie vytvára príjemnú atmosféru a opticky zväčšuje miestnosť. Používa sa na osvetlenie obývacích izieb, spální, vstupných hál, barov a podobne. Ďalšie využitie môže byť na zníženie jas (kontrastu) a oslnenia, čo má využitie napríklad v kanceláriách, kde sa používajú monitory a iné svetelné panely.

Existuje niekoľko prác zameriavajúcich sa na psychologické vplyvy nepriameho osvetľovania. Shin a kolektív sledovali EEG dáta 28 subjektov vystavených priamo a nepriamo osvetlenej miestnosti. Výsledkom štúdie je, že svetelné prostredie ovplyvňuje mozgovú aktivitu, ale na vyvodenie konkrétnych faktorov je potrebný ďalší výskum [15, 16].

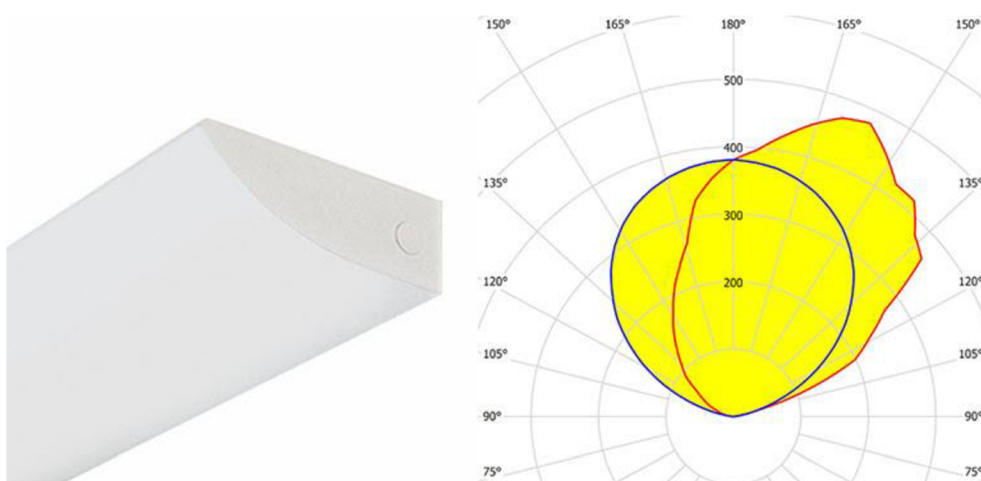


Obr. 14 Priame (vľavo) a nepriame (vpravo) osvetlenie miestnosti [16].

1.5 Prehľad používaných nepriamych svietidiel

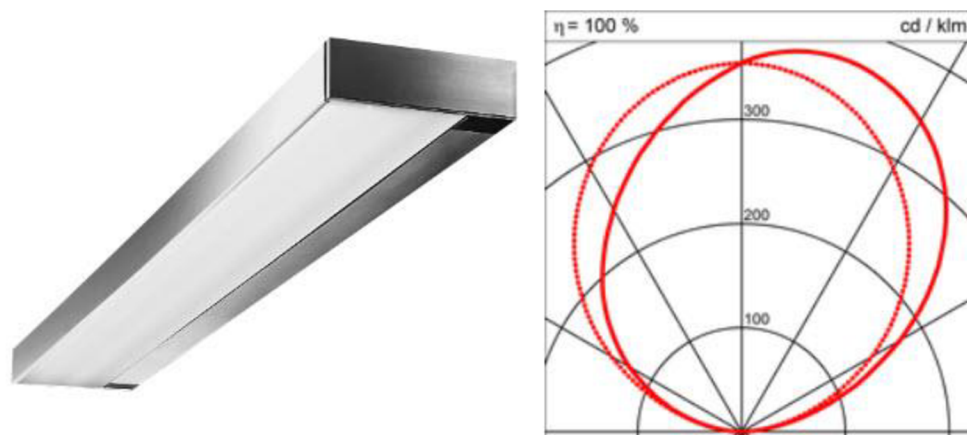
Väčšina nepriamych svietidiel je konštruovaná tak, aby osvetľovala povrch na ktorom je svietidlo umiestnené. Stropné svietidlá osvetľujú strop miestnosti a nástenné osvetľujú steny miestnosti. Konštrukčné riešenie nástenného svietidla osvetľujúceho strop miestnosti je relatívne vzácné.

Príkladom je svietidlo firmy Mira Wall LED od firmy 3F Filippi (viď obrázok 15) Svietidlo používa lineárny LED panel ako zdroj a svetelný tok usmerňuje zrkadlovým reflektorom. Svetivosť v rovine CO je najsilnejšia pod uhlom približne 155° [17].



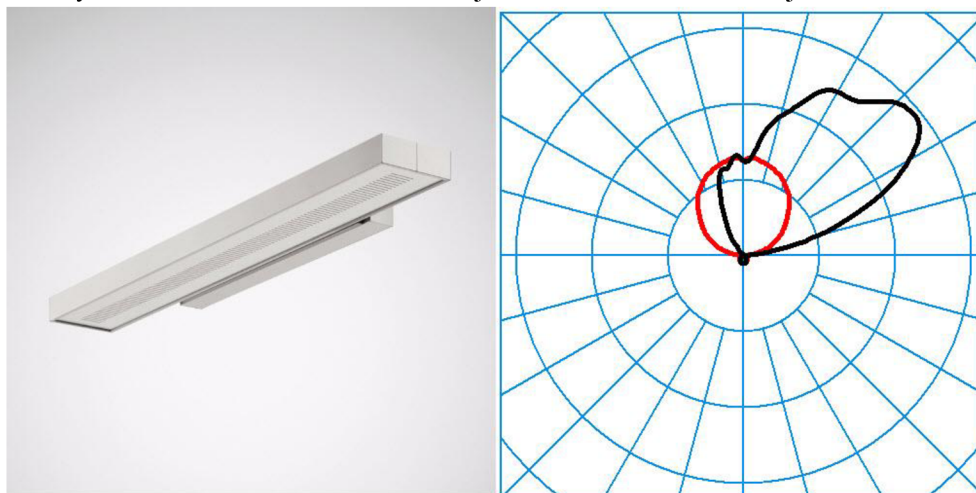
Obr. 15 Svietidlo Mira Wall LED (vľavo) a jeho krivka svetivosti (vpravo) [17].

Príkladom svietidla, ktoré využíva refrakčné optické prvky je VANERA LED od firmy Wandleuchte. Toto svietidlo taktiež používa LED modul, ale svetelný tok usmerňuje pomocou štruktúry krycieho skla. Týmto však nezabezpečuje veľké priestorové smerovanie. Jeho svetivosť je najvyššia pod uhlom približne 170° . Svietidlo je na obrázku 16 [18].



Obr. 16 Svetidlo VANERA LED (vľavo) a jeho krivka svietivosti (vpravo) [18].

Svetidlom s väčším smerovaním svetelného toku je OFFSET W2 RAX od spoločnosti Trilux. Toto svetidlo používa ako zdroj lineárnu žiarivku a ako optiku asymetrický reflektor. Tento reflektor má podobný tvar ako reflektor v svetidle Mira Wall LED. Dôvodom väčšieho rozptylu sú väčšie rozmery svetidla. Maximálna svietivosť je v smere 140° . Svetidlo je na obrázku 17 [19].

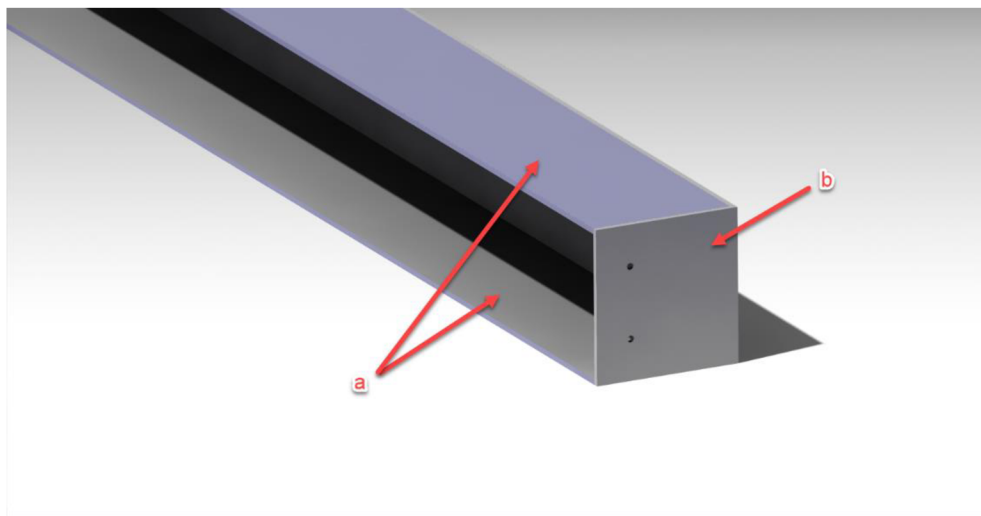


Obr. 17 Svetidlo OFFSET W2 RAX (vľavo) a jeho krivka svietivosti (vpravo) [19].

2 NÁVRH SVIETIDLA

Návrh svietidla vychádza zo súčasne vyrábaného svietidla, ktoré je na obrázku 1. To znamená, že sa jedná o nástenné svietidlo tvaru hranolu, ktoré má tri plochy nepriehľadné a dve priehľadné. Vyrába sa ohnutím plastovej časti do tvaru U a následnom prilepení priehľadných panelov (viď obrázok 18). Pri návrhu je treba dbať na to, že sa jedná o prototyp, vyrobený v sérii jedného kusu a tak by mala byť jeho konštrukcia čo najjednoduchšie vyrobiteľná a zostaviteľná bez uvažovania montážnej linky alebo jednoúčelových strojov.

Ako svetelný zdroj bude použitý LED zdroj. Jedná sa o najlepšiu voľbu z dôvodu rozmeru svietidla a taktiež účinnosti.



Obr. 18 Kryt svietidla a) priehľadná časť, b) nepriehľadná časť.

2.1 Zadanie

Svietidlo bude umiestnené v miestnosti rozmerov 4 100 x 2 380 x 2 560 mm. Budú použité celkovo 4 svietidlá. Každé svietidlo bude kombinovať priame a nepriame osvetlenie. Cieľom je aby svietidlo osvetľovalo rovnomerne strop miestnosti a do spodného polpriestoru prisvetľovalo v prípade potreby. Osvetľovanie horného a dolného polpriestoru bude na sebe nezávislé z hľadiska ovládania.

Elektrické vývody v miestnosti sú 4 a sú umiestnené vo výške 2 000 mm. Svetidlo má mať rozmery približne 900 x 80 x 80 mm.

2.2 Voľba zdroja a predradníka

Zdroj pre svietidlo bol vybraný z katalógu firmy Tridonic ako jedného z najvýznamnejších výrobcov LED svetelných zdrojov. Firma vyrába niekoľko rád lineárnych modulov. Zdroje rady LLE sú lineárne jednoradové moduly so šírkou 24 mm. Dvojradowý modul nie je dobrá voľba z dôvodu rozmerov svietidla. Rad LLE obsahuje niekoľko podkategórií. LLE FLEX, LLE premium, LLE excite, LLE advanced a LLE essence. [20]

Bol zvolený rad LLE advanced (viď obrázok 19 vľavo). Tieto moduly sú prispôsobené montáži v sérii a ponúkajú uniformné osvetlenie v ich osi. Taktiež ponúkajú možnosť zapojenia do série. V svietidle bude použitých šesť modulov s dĺžkou 240 mm. Zo stránky výrobcu boli získané ray súbory, pomocou ktorých je možné svietidlo navrhnuť.

K tomuto zdroju bol vybraný 35 W nízko profilový stmievajúci predradník podľa doporučovanej kalkulačky výrobcu (viď obrázok 19 vpravo).



Obr. 19 Plošný LED modul (vľavo) a predradník (vpravo) [20].

Špecifikácia modulu Tridonic LLE G4 24 mm 1 250 lm ADV:

- Rozmery 240 x 24 mm
- 2 svorkovnice pre sériové zapojenie, 4 pre paralelné
- Svetelný tok 1 250 lm
- Účinnosť 187 lm/W
- CRI > 80
- Teplota farby 5000 K
- Maximálny prúd 500 mA
- Ochrana IP00
- Životnosť 50 000 hodín

Špecifikácia predradníka Tridonic LC 35W 80–400mA 95V o4a NFC h11 PRE3:

- Nastaviteľný prúd 80 až 400 mA pomocou DALI
- Maximálny príkon 41 W
- Maximálny výkon 35 W

- Ochrana IP 20
- Životnosť 100 000 hodín
- Obsahuje svorkovnice

2.3 TracePro

TracePro je softvér, pomocou ktorého je možné dizajnovat' a analyzovat' osvetľovacie a optické systémy. Využíva integrovaný CAD modelár, ray tracing pomocou metódy Monte Carlo a interaktívny optimalizátor [21].

2.3.1 Ray Tracing

Ray tracing alebo metóda sledovania lúčov je metóda výpočtu trasy vln alebo častíc cez systém pozostávajúci z oblastí s rôznou rýchlosťou častíc, hodnotou absorpcie a reflexných povrchov. Vlnoplochy v ňom menia smer, ohýbajú sa, odrážajú atď. Vlnoplochy sú aproximované na lúče, ktoré sú na definovanej vzdialenosti rovné a algoritmus posunie lúč o túto vzdialenosť a deriváciou funkcie vypočíta nový smer lúča [22].

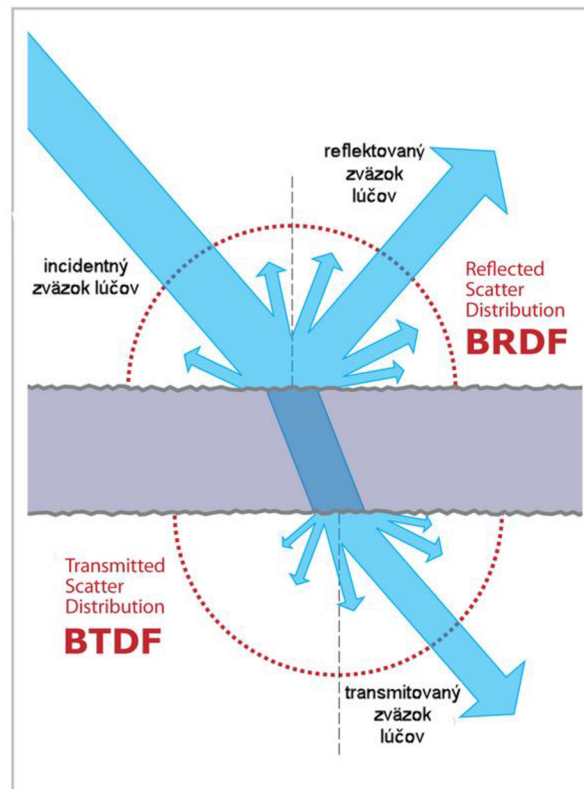
Pre každý odraz alebo prechod prostrediami existuje zobrazovacia rovnica, ktorá je numericky integrovaná pomocou metódy Monte Carlo. Monte Carlo prebieha v niekoľkých krokoch. Softvér prevedie N náhodných simulácií a určí n počet prípadov kedy nastal požadovaný dej. Z pomeru vypočíta pravdepodobnosť deja. Pravdepodobnosť je možné vypočítať s neurčitou. Softvér znižuje neurčitosť rozdeľovaním lúčov. Keď lúč dopadne na povrch, môže byť rozdelený na niekoľko lúčov. Menovite: absorbované, zrkadlovo reflektované, difúzne reflektované, transmitované a difúzne transmitované. Ich svetelný tok je taktiež rozdelený vzhľadom na vlastnosti povrchu. Celý proces je opakovaný pri každom dopade lúča. Lúč je rozdelený na základe BSDF funkcie [22, 23].

2.3.2 BSDF funkcia

V softvéri je každý povrch materiálu charakterizovaný BSDF (bidirectional scattering distribution function) funkciou. Rozdeľuje sa na BRDF (bidirectional reflectance distribution function) a BTDF (bidirectional transmittance distribution function), pre odraznosť a transmitanciu (viď obrázok 20).

V praxi je pre každý materiál vzhľadom na incidentný uhol lúča definovaný pomer energie výstupných lúčov a ich výstupný uhol. Materiál je tak charakterizovaný premennými funkcie A , B a g [23].

$$BSDF(\beta - \beta_0) = \frac{A}{B + (\beta - \beta_0)^g} \quad (12)$$



Obr. 20 Grafické znázornenie rozdelenia lúčov po dopade na plochu.

2.3.3 Presnosť simulácie

Keďže algoritmus výpočtu počíta s náhodnými javmi, je nutné softvér nastaviť tak, aby výsledok mohol byť považovaný za relevantný. Ako základné odporúčanie vývojárov je sledovanie najmenej 100000 lúčov [22].

Pri sledovaní osvetlenosti plochy je možné znižovať šum pomocou niekoľkých techník. V praxi je prvým krokom nájdenie závislosti medzi počtom sledovaných lúčov, počtom sledovaných pixelov a vyhladzovaním [22, 23].

- Počet sledovaných lúčov.

Z pravidla platí, že čím je väčší počet lúčov, tým je dosiahnutý presnejší výsledok. Takáto simulácia trvá dlhšie, čo býva problém hlavne pri optimalizácii použitím iteračnej metódy.

- Počet sledovaných pixelov.

Týmto je myslené rozdelenie sledovanej plochy na mriežku v ktorej je sledovaná osvetlenosť. Čím je väčší počet pixelov, tým je väčšia presnosť simulácie. Toto však úzko súvisí s celkovou veľkosťou sledovanej plochy a taktiež na jej polohe a polohe zdroja. Pri zväčšovaní počtu pixelov by sa mal zväčšovať aj počet sledovaných lúčov. Závislosť medzi týmito veličinami je však pre každý experiment iná a je ju nutné experimentálne zistiť.

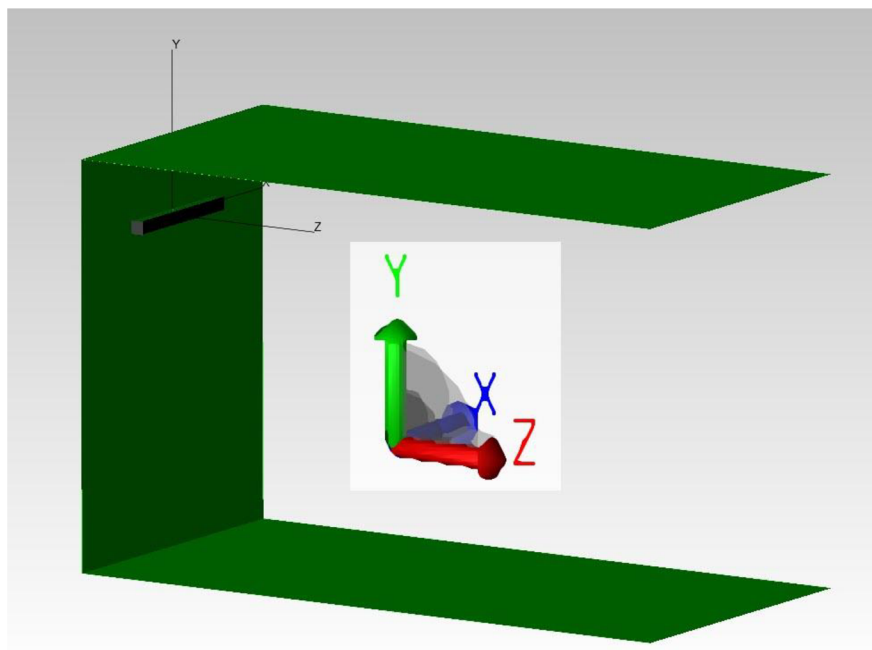
- Vyhladzovanie.

TracePro ponúka aj možnosť vyhladzovania. Tento nástroj je ideálny na zisťovanie závislosti medzi spomínanými veličinami a taktiež slúži na spresnenie simulácie pri sledovaní malého počtu lúčov. Na každý pixel je aplikovaná funkcia normálneho rozdelenia pomocou ktorej je znížený kontrast medzi pixelmi. Pomocou tejto funkcie je možné pozorovať rozdelenie osvetlenia aj pri nízkom počte lúčov.

2.3.4 Metodika práce

Prvým krokom práce bolo rozdelenie priestoru v svietidle pre jednotlivé optické a neoptické komponenty. V svietidle sú umiestnené optické komponenty, dva predradníky (z dôvodu individuálneho ovládania hornej a dolnej časti svietidla), šesť LED modulov a kabeláž. Po rozdelení priestoru nasledoval návrh optiky. Na toto bol použitý softvér Tracepro od Lambda Research Corporation. Ako prvá bola spracovaná z dôvodu komplexnejšej krivky svietivosti optická časť osvetlenia stropu. Následne bola spracovaná dolná časť. V softvéri boli nakoniec vytvorené krivky svietivosti. Tieto boli exportované do softvéru ReluxDesktop, v ktorom bolo simulované osvetlenie miestnosti. Poslednou časťou bolo konštrukčné riešenie. Vytvorené optické prvky boli exportované do CAD systému, kde bol vytvorený 3D model svietidla. Celý vývojový diagram je na obrázku 22 [24].

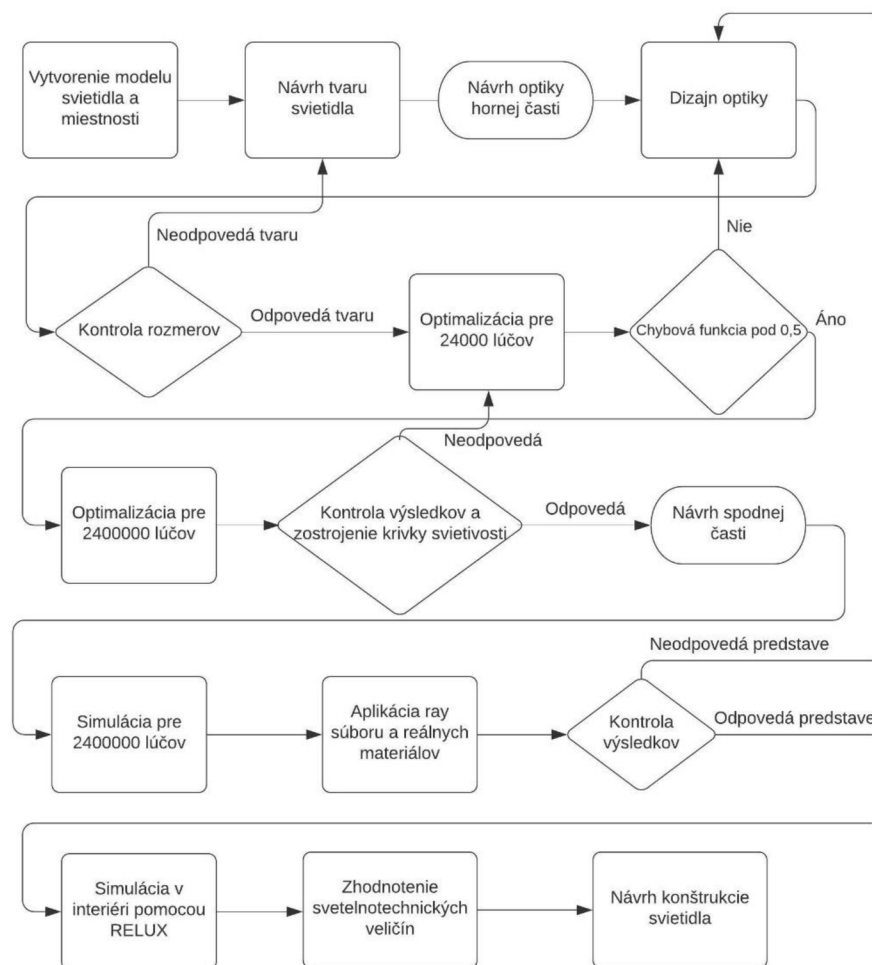
Ako prvý bol v softvéri vytvorený model miestnosti s vonkajším povrchom svietidla. Model miestnosti a použitý súradnicový systém je na obrázku 21. Na steny miestnosti bol aplikovaný povrch diffuse white, charakterizujúci bielu farbu. Do svietidla bolo umiestnených 24 plošných zdrojov svetla o rozmeroch 3,2 x 2,8 mm reprezentujúcich LED modul Tridonic. Na každú plochu bol umiestnený ray súbor zdroja. Takto vytvorený model zabezpečil dostatočnú názornosť tvaru svietidla. Ostatné moduly neboli použité, z dôvodu optimalizácie tvaru krivky svietivosti iba v rovine C0.



Obr. 21 Model pre simuláciu v TracePro.

Optika bola navrhovaná v nadstavbe programu Tracepro Interactive Optimizer. Funguje pomocou Nelder-Meadovej numerickej metódy. Jedná sa o iteračnú metódu, hľadajúcu maximálnu hodnotu objektívnej funkcie. V programe algoritmus vyhodnocuje chybovú funkciu, ktorú minimalizuje. Táto numerická metóda hľadá lokálne minimum objektívnej funkcie. Z tohto dôvodu je veľmi dôležitý počítačový návrh pred optimalizáciou. Prvou fázou bolo vytvorenie počítačového modelu optiky. Tvar povrchu komponentov je stanovený pomocou spline krivky. Polohy radiacích bodov krivky boli nastavené ako premenné s pevne definovaným maximom a minimom.

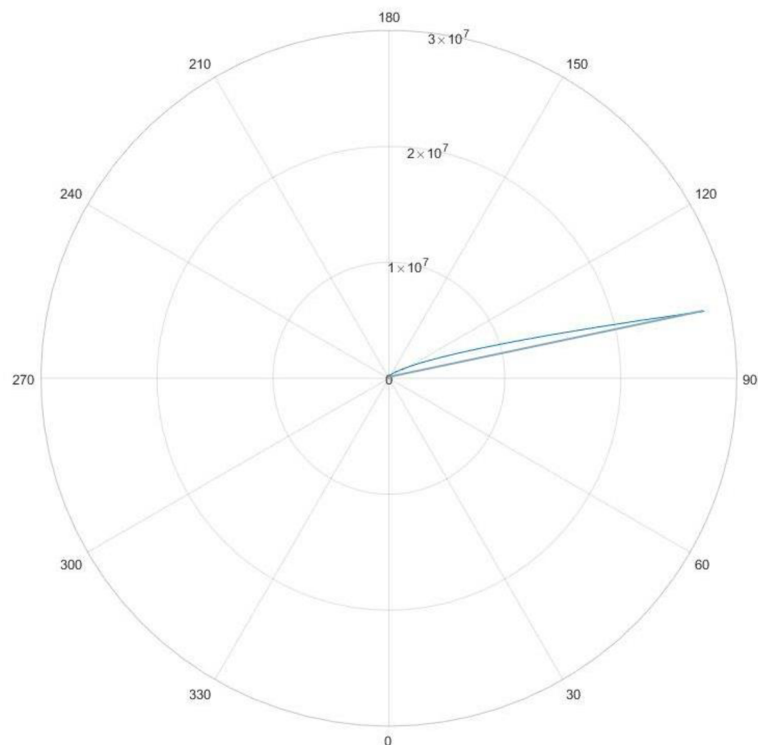
V praxi bolo zistené, aby optimalizačný algoritmus fungoval správne pre použité rozmery svietidla, interval hodnôt by nemal byť väčší ako 2 milimetre. Ako operand optimalizácie môže byť nastavených niekoľko sledovaných veličín. Príkladom je maximálna alebo minimálna intenzita žiarenia na danom povrchu, uniformita na danom povrchu alebo profil krivky svietivosti. Operand aj model môže byť počas optimalizácie predefinovaný pomocou makra. V počítačovej fáze bol systém simulovaný s celkovým počtom lúčov 240 000 (10 000 pre každý zdroj), čo zabezpečilo rýchlu optimalizáciu v ráde desiatok minút. Po stanovení dizajnu bola optimalizácia spustená opäť pre počet lúčov 2400000 s menším intervalom pre premenné.



Obr. 22 Vývojový diagram procesu návrhu svietidla.

3 NÁVRH HORNEJ ČASTI SVIETIDLA

Cieľom návrhu hornej časti svietidla je rovnomerné osvetľovanie stropu miestnosti. Na základe fotometrických zákonov bola vypočítaná teoretická krivka svietivosti. Krivka je na obrázku 23. Osvetlenosť povrchu stropu klesá s druhou mocninou vzdialenosti a kosínusom incidentného uhla. Z výpočtu je možné vyčítať, že potrebná svietivosť v uhle 180° je približne 0,9 % svietivosti v uhle 102° - na druhej strane stropu.



Obr. 23 Ideálna krivka svietivosti v rovine C0.

$$E_1 = \frac{I_1}{r_1^2} \cdot \cos \varphi_1 \quad (13)$$

$$E_2 = \frac{I_2}{r_2^2} \cdot \cos \varphi_2 \quad (14)$$

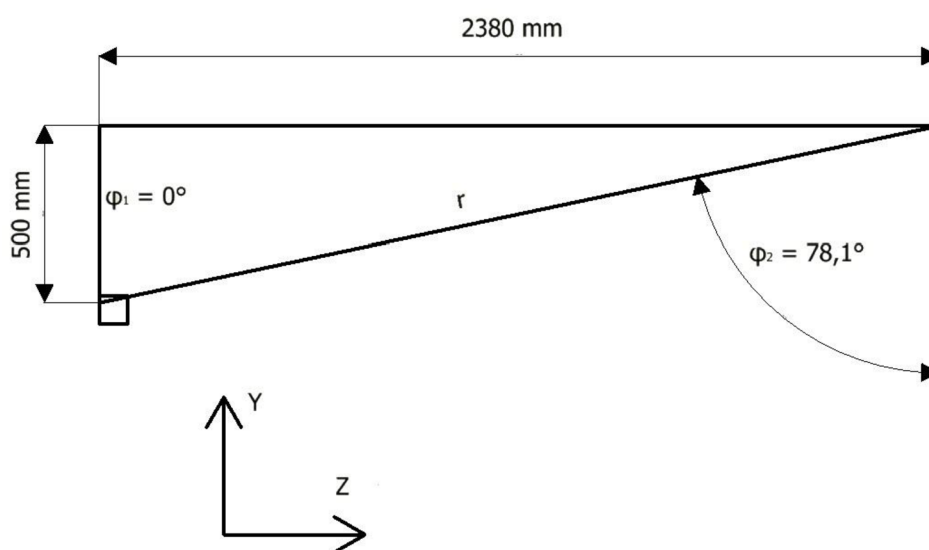
$$E_2 = E_1 \quad (15)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_2^2 \cdot \cos \varphi_1}{r_1^2 \cdot \cos \varphi_2} \quad (16)$$

Ďalej je možné vyjadriť r_1 a r_2 v závislosti na uhle φ (viď obrázok 24).

$$r = \frac{500}{\cos \varphi} \quad (17)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\cos \varphi_2^3}{\cos \varphi_1^3} \quad (18)$$

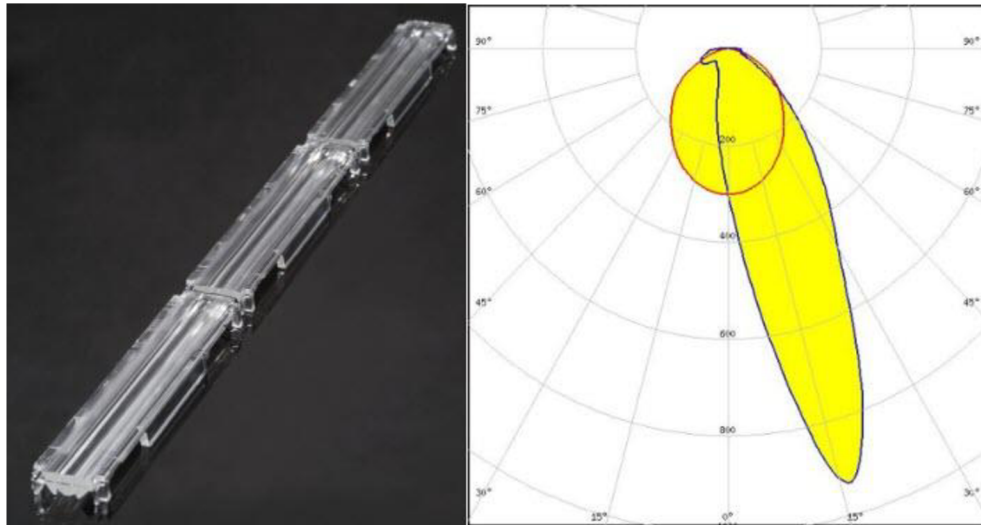


Obr. 24 Schéma výpočtu

Z dôvodu tak extrémneho rozdielu nebolo možné rozprestrieť svetivosť rovnomerne po celej hĺbke stropu. Pri jednotlivých návrhoch je hlavná úloha optimalizovať pomer účinnosti osvetlenia a uniformite osvetlenosti stropu miestnosti.

3.1 Voľba optických komponentov

Svetelný tok pre prípad tohto svietidla je ideálne usmerniť dvomi optickými komponentami. Šošovka alebo reflektor. Výroba šošovky je oveľa náročnejšia, zvlášť keď sa jedná o výrobu jedného kusu svietidla. Dostupné riešenie je použitie sériovo vyrábaných šošoviek. Dodávatelia ponúkajú množstvo panelov pre LED zdroje. Príkladom je panel FLORENCE-1R-ZT25 od firmy Ledil. Tento a podobné wall-washery však usmerňujú intenzitu v uhle 15° od normály zdroja (viď obrázok 25). V svietidle nemôže byť použitý z dôvodu clonenia od nepriesvitnej steny. Z týchto dôvodov bolo upustené od dizajnu s šošovkami. Reflektor je možné jednoducho vyrobiť aj pre jeden kus svietidla. Najjednoduchší variant je použitie predpripraveného reflexného materiálu a následné ohýbanie do požadovaného tvaru. Keďže je svietidlo lineárne, reflektor bude tvarovaný len v jednej osi [25].

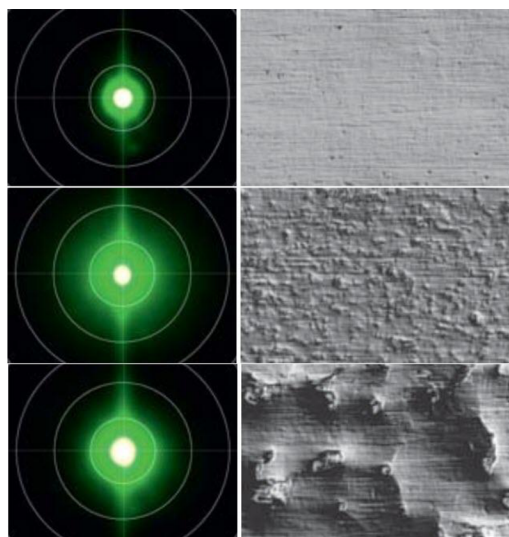


Obr. 25 Panel šošovky a jeho krivka svietivosti [25].

3.2 Vol'ba materiálu reflektora

Na reflektor boli v softvéri aplikované vlastnosti reálnych materiálov. Materiály boli volené z katalógu Alanod ako jedného z popredných výrobcov reflexných povrchov materiálov. Knižnica povrchov v TracePro obsahuje tieto materiály. Volené boli povrchy, ktoré rozptyľujú svetlo bez preferovaného smeru. Príkladom na obrázku 26 je Miro 2 s udávanou difúznosťou pod 5 %, Miro 6 s difúznosťou 50 % a Miro 8 s difúznosťou 60–67 %. Vľavo sú fotky zväzku lúčov rozptýlené na difúznom povrchu po odraze od materiálu, vpravo sú fotky materiálu pod mikroskopom [26].

Bolo vytvorených niekoľko simulácií s rôznymi materiálmi na rôznych reflektoroch. Z dôvodu uniformného osvetlenia v osi X bol pre všetky reflektory zvolený rovnaký materiál. Za najvhodnejší materiál bol zvolený Miro 6.



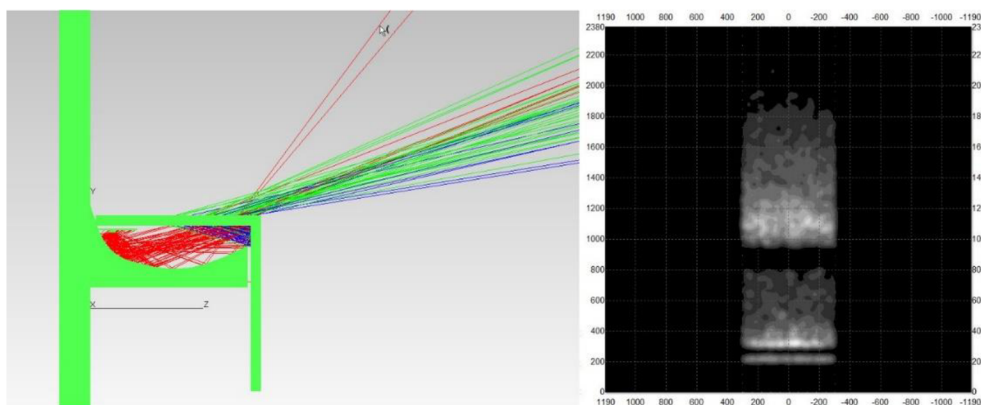
Obr. 26 Zhora materiál Miro 2, Miro 6 a Miro 8 [26].

3.2 Poloha zdroja

Prvým krokom je určenie polohy zdroja v svetidle. Poloha závisí od rozloženia mechanických prvkov v svetidle a určuje polohu reflektora. Zdroj LED vyžaruje do polpriestoru a preto je výhodné jeho smerovanie do reflektora, aby bolo možné ovplyvniť jeho celý svetelný tok. Optimálny návrh reflektora by mal obsahovať minimum viacnásobných odrazov. Z dôvodu konštrukčných obmedzení nie je možné viacnásobné odrazy eliminovať úplne. Druhým obmedzením je odraz od krycieho skla. Sklo je vyrobené z PMMA s indexom lomu $n = 0,5461$. Dosadením do snellovho zákona vychádza uhol totálneho odrazu 33° . Reflektor by preto mal odrážať najintenzívnejšie lúče pod menším uhlom. Po prechode funguje krycie sklo ako planoparalelná doska, takže krivku svietivosti neovplyvní. Z konštrukčného hľadiska je najjednoduchšie stanoviť polohu zdroja rovnobežne so stenou alebo kolmo na stenu. Bol zvolený variant kolmo na stenu, normála proti smeru osi Y podľa zvoleného súradnicového systému (viď obrázok 21).

3.3 Návrh číslo 1

Návrh číslo 1 je parabolický reflektor usmerňujúci svetelné lúče tak, aby po odraze divergovali, čím sa vytvorí rovnomerné osvetlenie. Toto riešenie zamedzuje väčšine odrazov od opticky nefunkčných častí svetidla. Toto riešenie však vytvára dve tmavé plochy na cieľovom povrchu. Dôvodom sú viacnásobné odrazy v telese svetidla. Dvojitý odraz tvoria lúče vyžarujúce v zápornom smere osi X a lúče odrazené od krycieho skla svetidla. Reflektor je zobrazený na obrázku 27. V pravej časti zobrazená osvetlenosť stropu miestnosti.



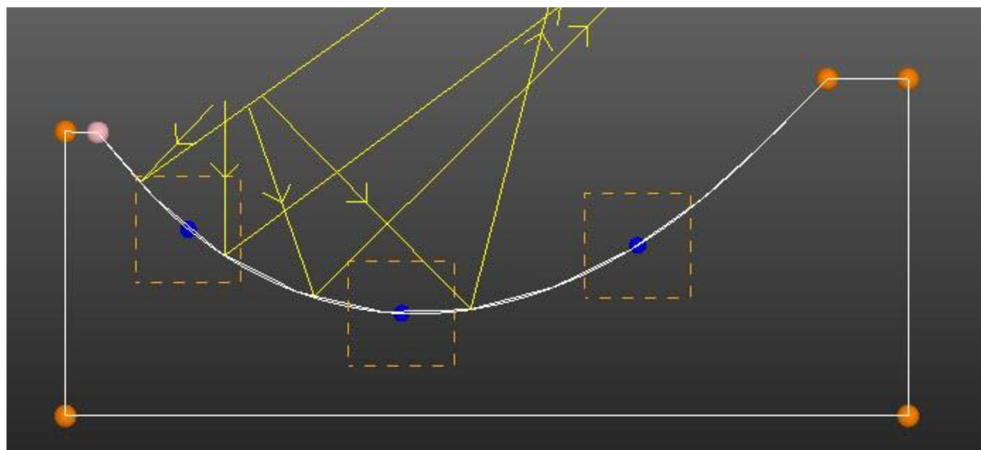
Obr. 27 Návrh č. 1.

3.3.1 Optimalizácia tvaru reflektora

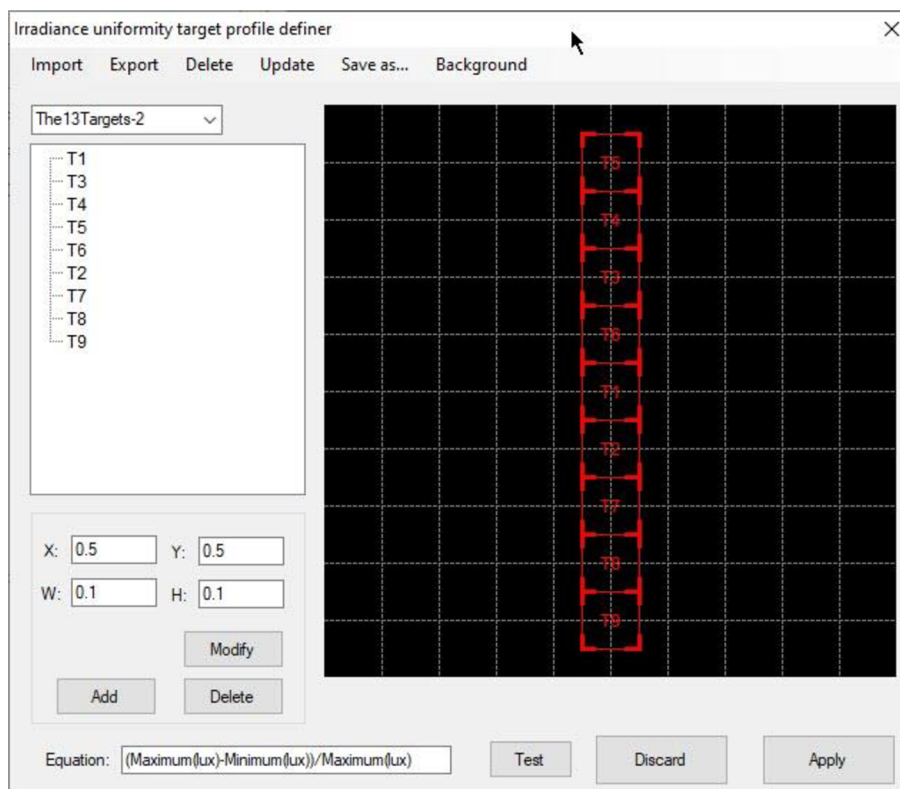
Presný tvar reflektora bol vytvorený pomocou nadstavby Tracepro - Interactive Optimizer. Vstupom do algoritmu bola poloha riadiacich bodov krivky reflektora. Grafické rozhranie v programe je zobrazené na obrázku 28. Modré body sú riadiace body krivky, okolo ktorých je oranžovou farbou definovaná ich maximálna a minimálna súradnica. Maximálne a minimálne hodnoty polohy súradníc jednotlivých bodov boli nastavené tak, aby sa nezmenil smer vyžarovania lúčov. Operandom je uniformita. V softvéri je uniformita definovaná pomocou modulu Irradiance uniformity target profile definer. V ňom je potrebné definovať veľkosť a polohu plôch, v ktorých sa bude uniformita sledovať. V jednotlivých plochách bola hodnota osvetlenosti definovaná rozdielom najvyššej a najnižšej osvetlenosti.

Uniformita bola hľadaná v jednej osi. Na cieľovej ploche bolo nastavených 9 plôch s rozmerom desatiny celkovej dĺžky plochy (viď obrázok 29). V priebehu optimalizácie softvér počíta chybovú funkciu, ktorú minimalizuje. Účinnosť optimalizácie sa zvyšuje s vyšším počtom sledovaných lúčov a menším počtom premenných. Ďalším operandom bolo minimalizovanie svetelného toku na stenu miestnosti, na ktorej je svietidlo prichytené. Bez tohto operandu by softvér vyhodnotil najväčšiu uniformitu pri nulovej osvetlenosti. Druhým vstupom optimalizácie bol celkový rozmer plochy, na ktorej sa sleduje uniformita. Pri celkovej dĺžke plochy 2380 mm nebolo možné vytvoriť uniformné osvetlenie. Tento rozmer bol následne zmenšovaný na 2000 mm, 1750 mm, 1500 mm, 1250 mm a 1000 mm.

Optimalizácia prebiehala v niekoľkých fázach. Prvou fázou bolo nastavenie približného tvaru reflektoru. Bolo nastavených 5 riadiacich bodov krivky, s intervalom hodnôt ich polohy 5 mm. Pri každej iterácii prebehla simulácia s počtom lúčov 1000 pre každý zdroj (celkový počet 24000). Po vyhodnotení optimalizácie bola spustená finálna optimalizácia s počtom lúčov 240000 a intervalom hodnôt polohy 1 mm.

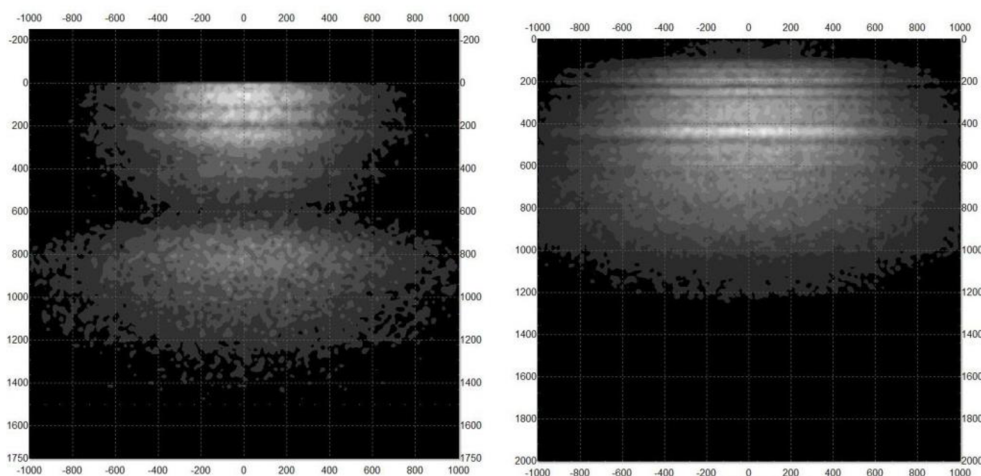


Obr. 27 Nastavenie premenných v optimalizátore.

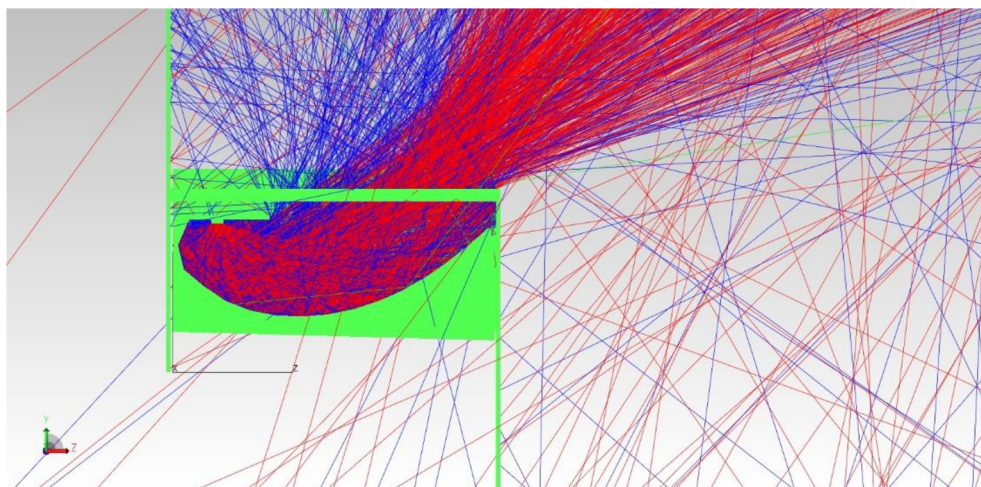


Obr. 29 Nastavenie operandu uniformity v optimalizátore.

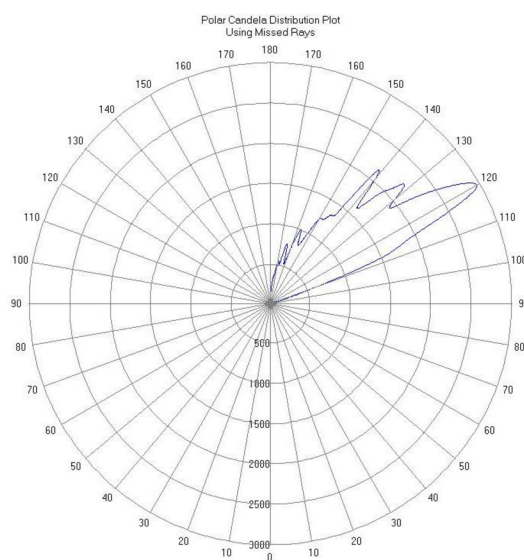
Optimalizácia podľa očakávaní bola najúspešnejšia pre najmenšiu cieľovú plochu s rozmerom 1 m. Ostatné simulácie vytvárali tmavé plochy na povrchu cieľovej plochy. Účinnosť bola počítaná pomerom emitovaného svetelného toku k svetelnému toku, ktorý dopadol na cieľový povrch. Účinnosť tohto návrhu je 67 %. Na obrázku 30 je zobrazená osvetlenosť plochy pre 1000 mm a 1250 mm. Účinnosť tohto návrhu je 70 %. Krivka svietivosti návrhu 1 je na obrázku 32 a výsledný tvar reflektoru na obrázku 31.



Obr. 30 výsledky optimalizácie.



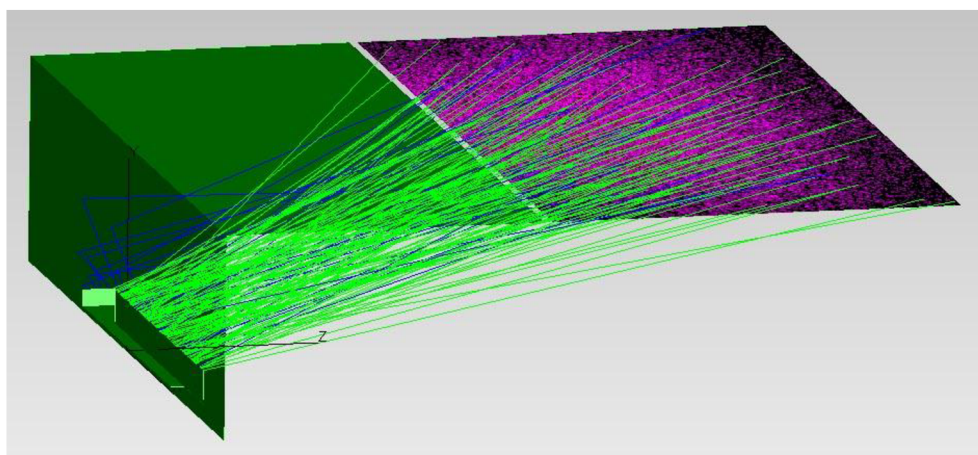
Obr. 31 Výsledný tvar reflektoru.



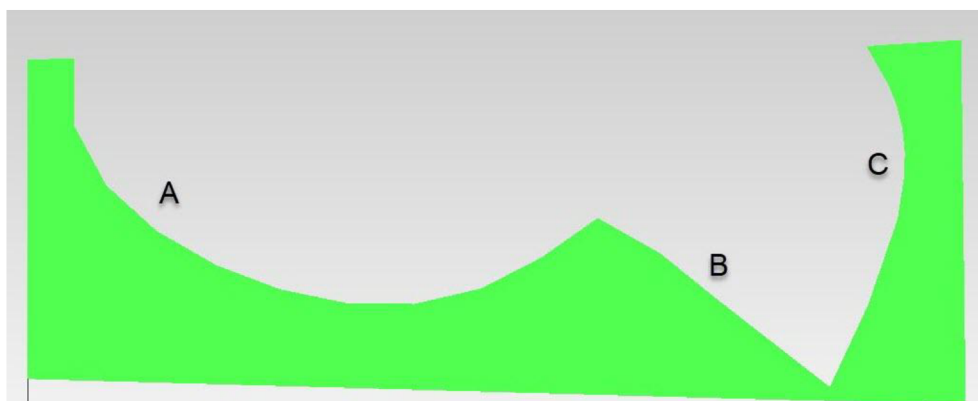
Obr. 32 Krivka svietivosti v rovine C0.

3.4 Návrh číslo 2

Z dôvodu nedostatočnej dĺžky plochy na ktorej bolo vytvorené uniformné osvetlenie, bol vytvorený druhý návrh. Podľa predchádzajúcich simulácií bolo zistené, že ľavá strana reflektoru môže vytvoriť divergujúci zväzok lúčov, ktorý svieti na plochu s rozmerom v osi Z 1 meter. Reflektor bol skráteneý na dve tretiny (ďalej reflektor A). Operandom prvej optimalizácie bolo vytvorenie uniformného osvetlenia plochy s dĺžkou 1 m, ktorá menila súradnicu svojho súradnicového systému v osi Y. Zmenou tvaru bolo možné vytvoriť uniformné osvetlenie na ploche so súradnicou stredu 1325 mm (viď obrázok 33). Za reflektor A boli umiestnené dve ďalšie časti (viď obrázok 34).

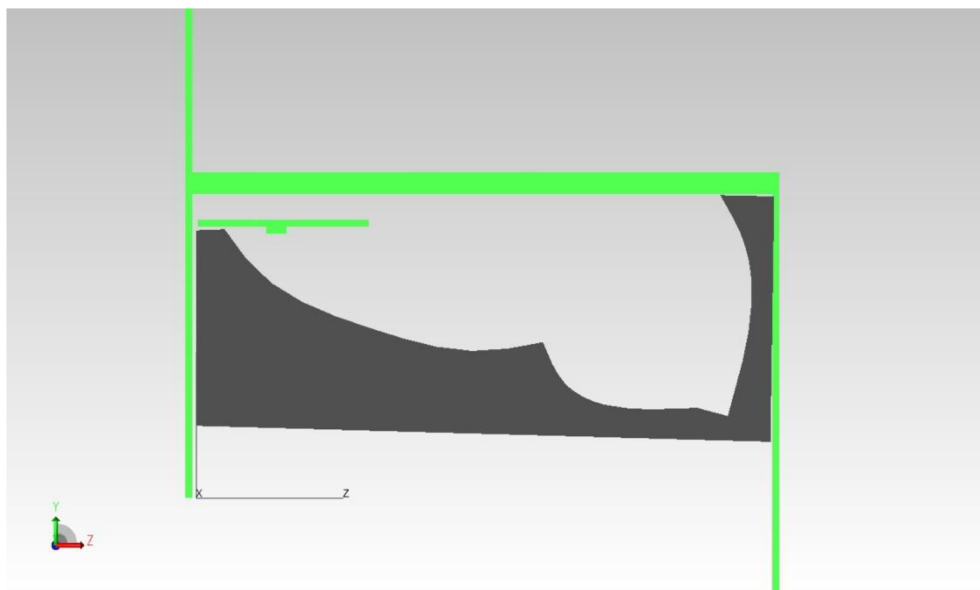


Obr. 33 Osvetlenie od reflektoru A.

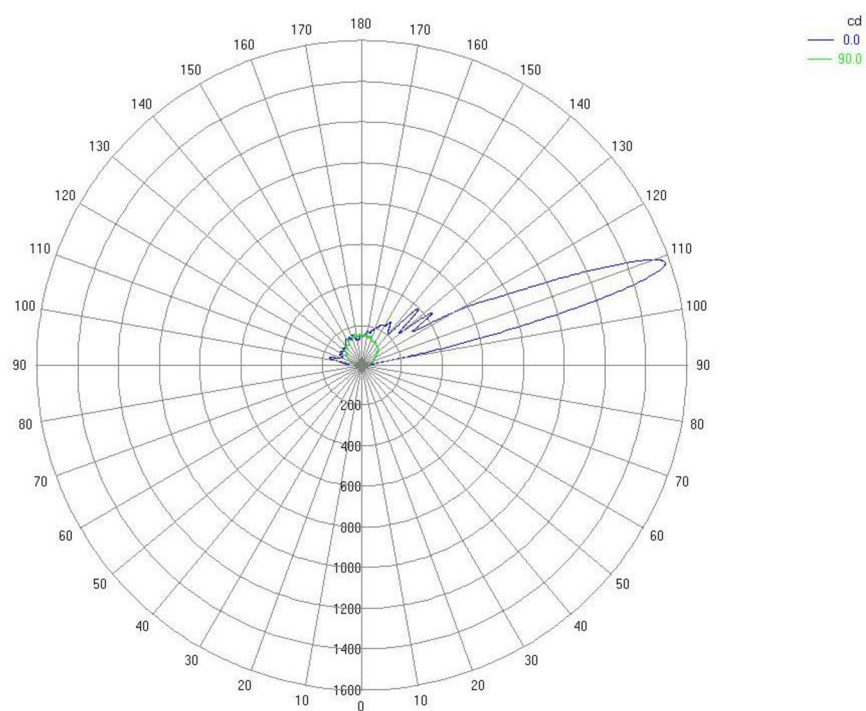


Obr. 34 Rozdelenie častí reflektoru.

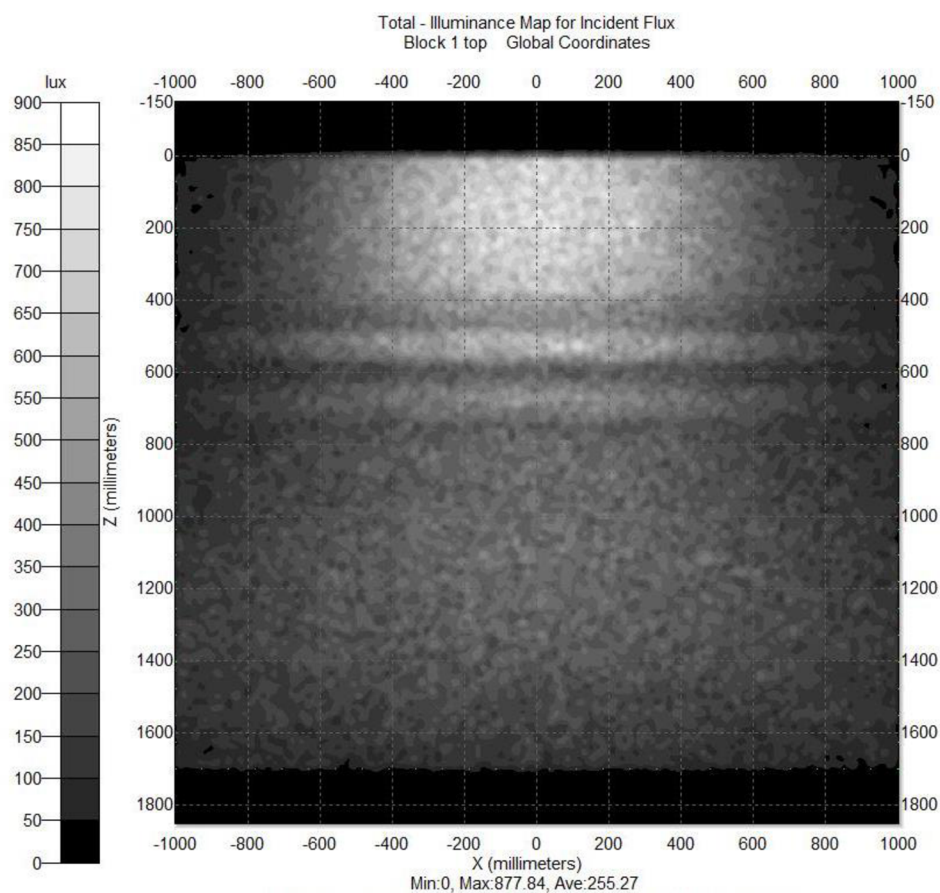
Po skončení optimalizácie reflektoru A bola spustená ďalšia optimalizácia. Premenné boli riadiace body reflektoru C a operandom maximálna osvetlenosť reflektoru B. Toto umožnilo prácu s lúčmi, ktoré boli odrazené od krycieho skla a s nízko intenzívnymi lúčmi vyžiarenými pod veľkým uhlom od normály zdroja. Premennými poslednej optimalizácie boli riadiace body všetkých reflektorov a operandom uniformita na celej sledovanej časti stropu miestnosti. Svetelná účinnosť svietidla (Light output ratio) je 79 %. Výsledný tvar reflektoru je na obrázku 35. Krivka svietivosti je na obrázku 36. Obrázok 37 znázorňuje rozloženie osvetlenosti na strope.



Obr. 35 Finálny tvar reflektoru.

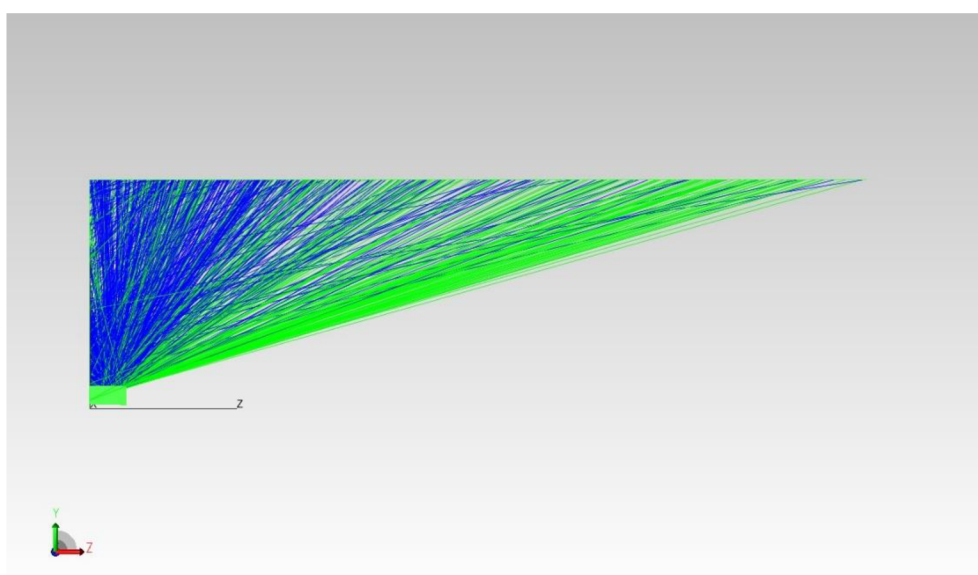


Obr. 36 Výsledná krivka svietivosti.



Obr. 37 Rozloženie osvetlenia stropu miestnosti.

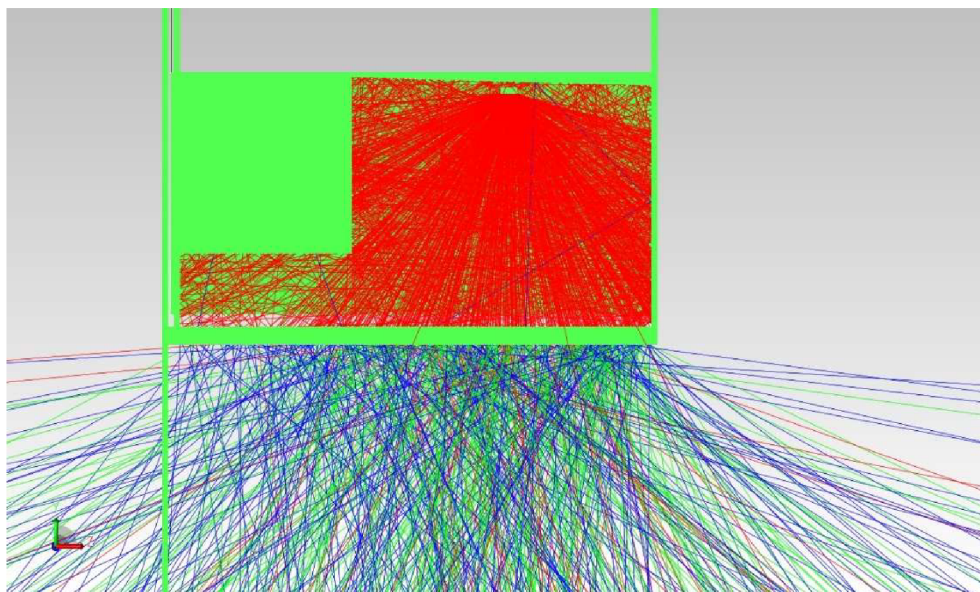
Na obrázku 38 sú zobrazené vyžiarené lúče. Najintenzívnejšie lúče smerujú do najvzialenejšej časti stropu, zatiaľ čo viackrát odrazené lúče osvetľujú povrch nad svietidlom.



Obr. 38 Lúče vyžiarené na strop miestnosti.

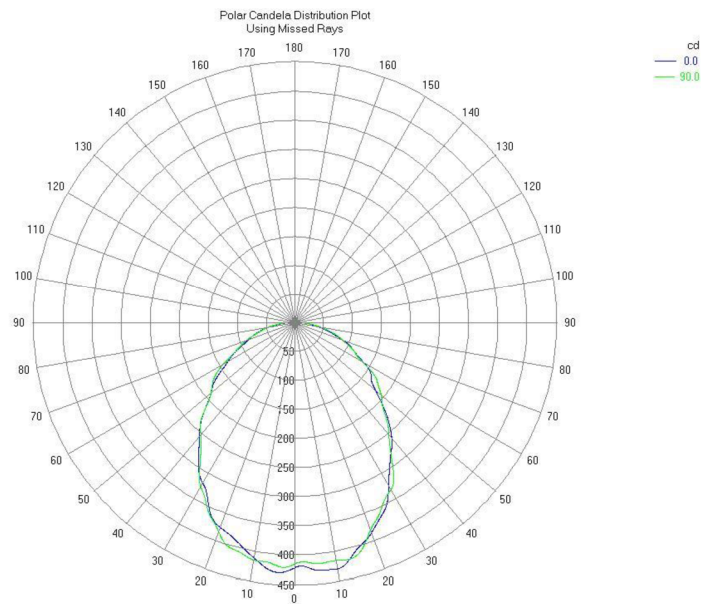
4 NÁVRH DOLNEJ ČASTI SVIETIDLA

Dolná časť svietidla slúži ako sekundárne osvetlenie miestnosti v prípade, že je potrebná väčšia osvetlenosť. Z dôvodu zníženia oslnenia bol ako krycie sklo zvolený polopriepustný difúzor, ktorý značne obmedzuje optické vlastnosti svietidla. Taktiež je obmedzená poloha LED zdroja, z dôvodu umiestnenia predradníkov v dolnej časti svietidla. Model svietidla bol vytvorený s umiestnenými predradníkmi (viď obrázok 39).



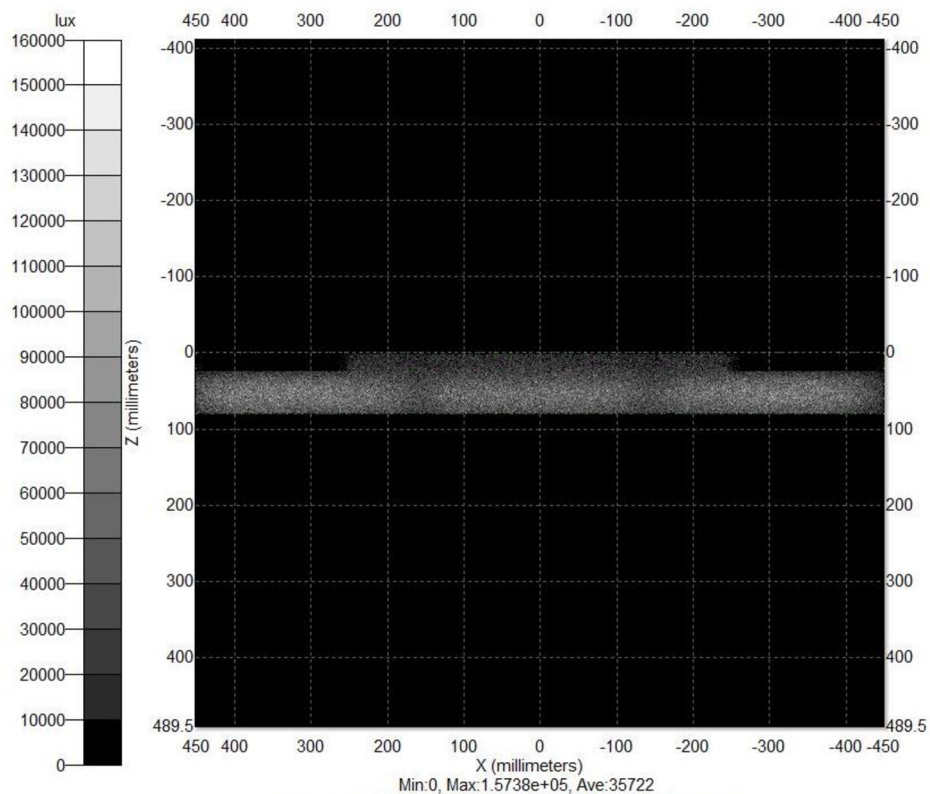
Obr. 39 Simulácia dolnej časti svietidla.

Predmetom optimalizácie bolo vytvorenie kosínusovej krivky svietivosti. V optimalizátore bol ako operand zvolená krivka svietivosti. Vzhľadom na obmedzený priestor, jediná prístupná premenná bola poloha zdroja v osi Y – vertikálne steny miestnosti. Podľa očakávania bola krivka svietivosti najpodobnejšia lambertovskému žiaríču pri najvzdialenejšej polohe zdroja od krycieho skla. Krivka je symetrická v ose C0 aj v ose C90. Krivka svietivosti je na obrázku 40.

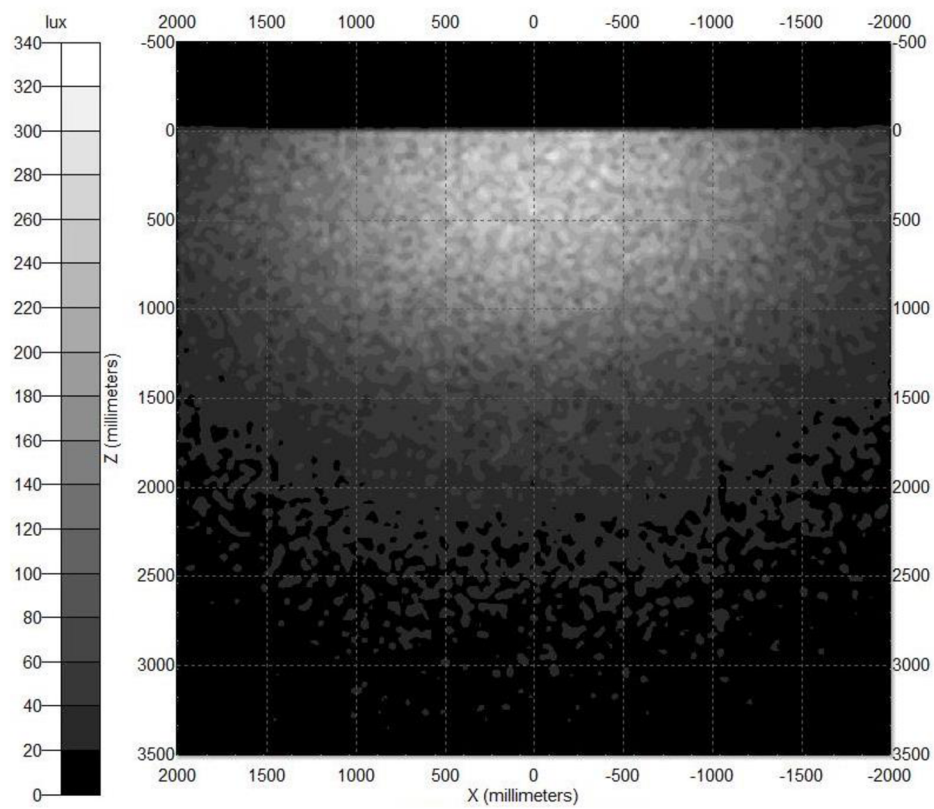


Obr. 40 Krivka svietivosti dolnej časti svietidla.

Ako materiál difúzoru bolo zvolené opáľové akrylátové sklo. Keď je difúzor pravidelne osvetlený, vytvára charakteristiku podobnú kosínusovej funkcii. Účinnosť dolnej časti je 57 %. Osvetlenosť difúzoru je na obrázku 41. Na krajoch je difúzor clonený predradníkmi. Osvetlenosť podlahy miestnosti je na obrázku č. 42.



Obr. 41 Osvetlenosť difúzoru.



Obr. 42 Osvetlenosť podlahy miestnosti.

5 SIMULÁCIA SVIETIDLA V INTERIÉRI

Finálny návrh svietidla bol simulovaný v softvéri Relux. Slúži na simuláciu denného a umelého svetla v interiéri a exteriéri. Obsahuje medzinárodné svetelnotechnické štandardy. Pre túto prácu poslúži ako najjednoduchší spôsob prezentovania virtuálneho prototypu svietidla.

Ako prvá bola vymodelovaná miestnosť podľa reálnej miestnosti, kde má byť svetlo umiestnené. Miestnosť obsahuje dve okná na protiľahlej stene od svietidiel. Taktiež je v nej umiestnená posteľ a písací stôl. Osvetlenosť bola sledovaná na dvoch zrovnávacích rovinách. Prvá zrovnávacia rovina je totožná so stropom miestnosti. Druhá rovina je s ňou rovnobežná a je umiestnená 1 meter od podlahy. Plocha stola sa ako zrovnávacia rovina neuvažuje. Model miestnosti je na obrázku 43.



Obr. 43 model miestnosti.

Softvér vyhodnocuje nasledujúce veličiny:

- Priemerné osvetlenie.

Označuje sa E_m . Softvér počíta osvetlenie v plochách veľkých $0,25 \text{ m}^2$. Pre zadanú miestnosť sa jedná o 72 hodnôt osvetlenia. Z týchto hodnôt sa následne vypočíta priemerná hodnota. Pomocou priemernej osvetlenia možno určiť účinnosť jednotlivých návrhov svietidla.

- Minimálna osvetlenie

Označuje sa E_{min} . Najnižšia hodnota osvetlenia a jej umiestnenie na ploche.

- Maximálna osvetlenosť

Označuje sa E_{max} . Najvyššia hodnota osvetlenosti a jej umiestnenie na ploche.

- Uniformita osvetlenosti

Označuje sa U_0 . Vyjadruje pomer minimálnej osvetlenosti k priemernej. Podľa tejto veličiny je možné posúdiť kvalitu návrhu.

- Oslnenie

Označuje sa UGR (Unified glare rating). Oslnenie je nepriaznivý stav zraku, pri ktorom je sieťnica vystavená rozdielnemu alebo vyššiemu jasú ako na ktorý je adaptovaná. Oslnenie sa v softvéri počíta podľa štandardizovaného vzťahu 19.

$$UGR = 8 \cdot \log \left[\frac{0,25}{I_b} \sum \left(\frac{I^2 \cdot \omega}{p^2} \right) \right] \quad (19)$$

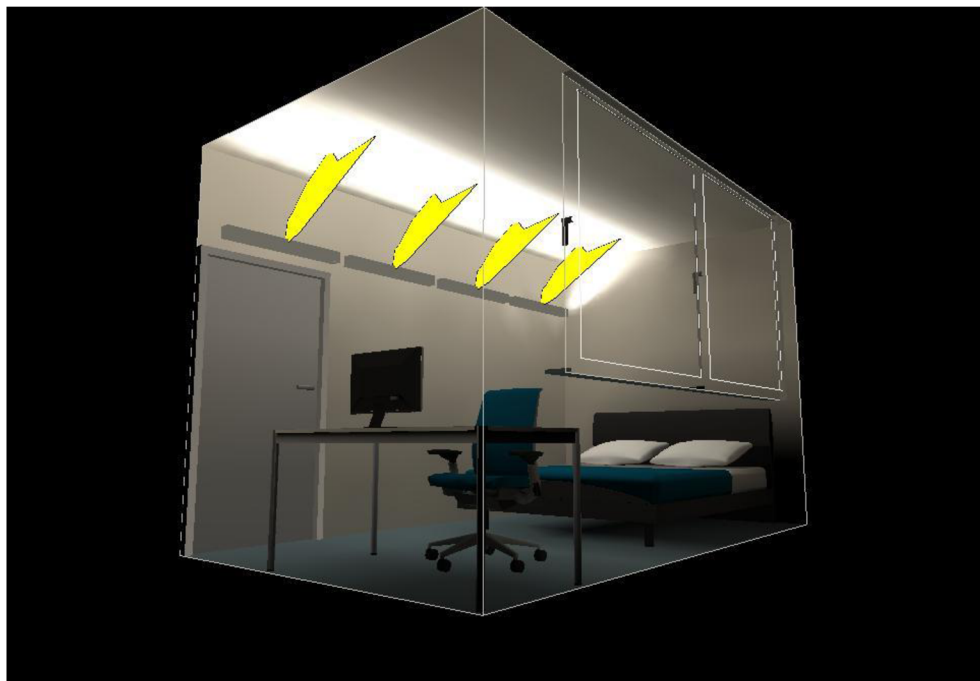
I označuje svietivosť svietidla, I_b svietivosť pozadia, ω uhol pod ktorým je svietidlo pozorované, p je Guthov index, ktorý udáva pozíciu svietidla od pozorovateľa.

Dovolené UGR je definované Európskou normou. V praxi platí, že by UGR nemalo prevyšovať hodnotu 30 [27].

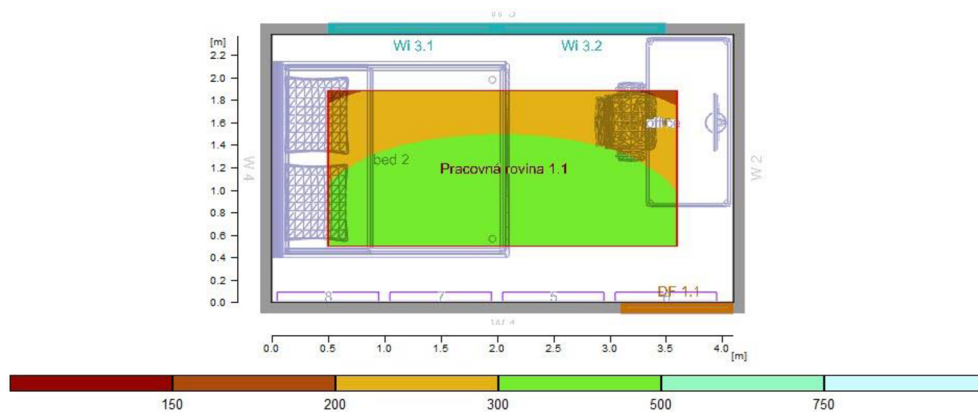
V Tracepro boli vytvorené krivky svietivosti. Krivky boli uložené ako súbor .ldt (light distribution curve) a následne importované do Reluxu. V Reluxe boli umiestnené do miestnosti podľa umiestenia elektrických vývodov. Farba stien je biela s difúznym odrazom 88%. Simulované boli celkovo 3 prípady. Horná časť svietidla, dolná časť svietidla, obe časti svietidla naraz. Výpočtový algoritmus bol nastavený na vysoký podiel nepriameho osvetlenia. Denné svetlo nebolo uvažované.

5.1 Simulácia hornej časti (Návrh číslo 1)

Na obrázku 44 je možné vidieť simuláciu návrhu č. 1 Svetlo osvetľuje približne polovicu stropu miestnosti. Rozloženie osvetlenosti je na obrázku 45. Výsledky simulácie sú v tabuľke 1.



Obr. 44 Simulácia návrhu 1.



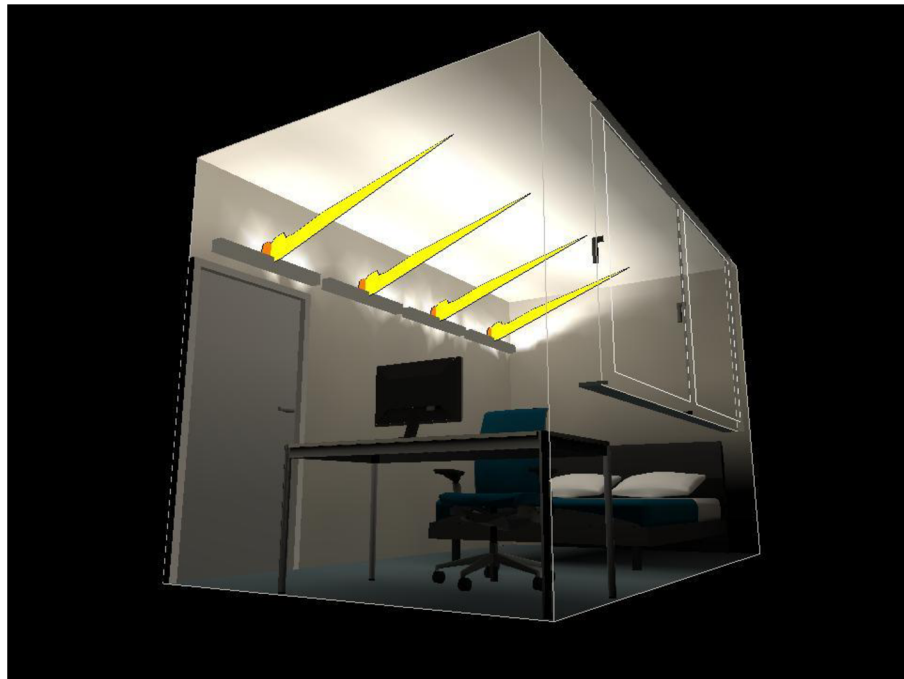
Obr. 45 Rozloženie osvetlenosti na zrovnávacej rovine.

Tab. 1 Výsledky hornej časti svietidla.

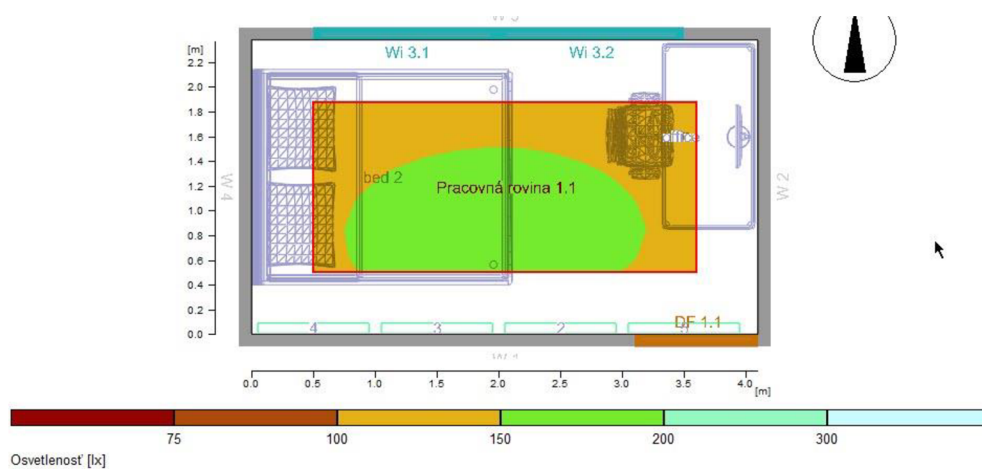
Zrovnávacia rovina	
Em	305 lx
Emin	195 lx
Uo	0,64
UGR	<10
Strop miestnosti	
Em	846 lx
Uo	0,1

5.2 Simulácia hornej časti (Návrh číslo 2)

Na obrázku 46 je zobrazená simulácia hornej časti svietidla. Na obrázku sú názorne zobrazené aj jednotlivé krivky svietivosti svietidiel. Okrem toho, že svietidlo svieti na strop miestnosti, odráža taktiež časť svetelného toku na stenu, na ktorej je namontované. Toto je spôsobené viacnásobnými odrazmi lúčov v svietidle, ktoré nebolo možné eliminovať z dôvodu charakteristiky krivky svietivosti samotného zdroja. Celkovému efektu nepriameho osvetlenia to však nebráni. Na obrázku 47 je zobrazená osvetlenosť na zrovnávacej rovine. Výsledky simulácie na zrovnávacej rovine sú v tabuľke 2.



Obr. 46 Simulácia hornej časti svietidla.



Obr. 47 Rozloženie osvetlenosti na zrovnávacej rovine.

Tab. 2 Výsledky hornej časti svietidla.

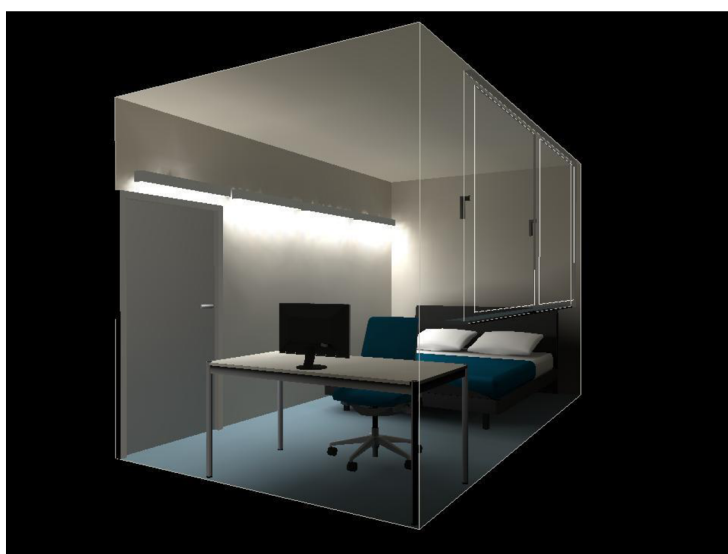
Zrovnávacia rovina	
Em	264 lx
Emin	212 lx
Emin/Em (Uo)	0,80
UGR	<10,0
Strop miestnosti	
Eav	444 lx
Emin/Em (Uo)	0,59

5.3 Simulácia dolnej časti svietidla

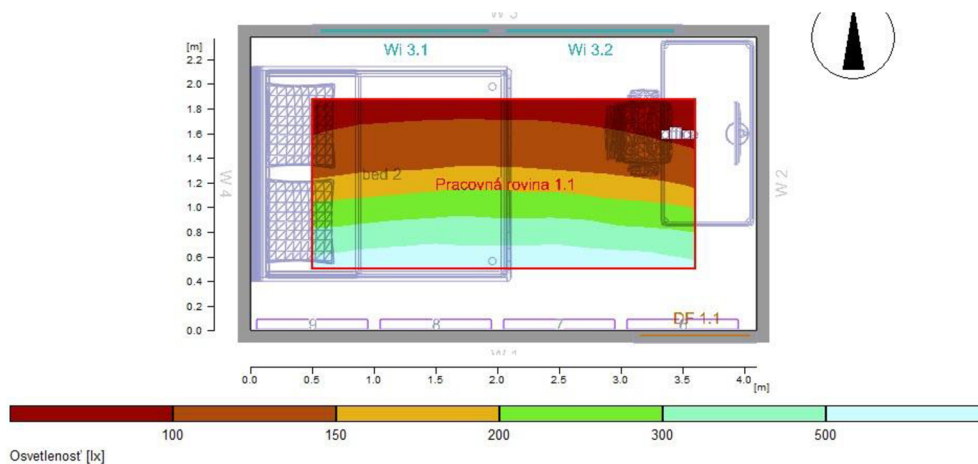
Dolná časť svietidla neslúži ako atmosférické osvetlenie. Má slúžiť ako osvetlenie pre prípad, keď je v miestnosti nárok vykonávaná práca vyžadujúca zvýšenú viditeľnosť (upratovanie, vysávanie atď.). Na obrázku 48 je zobrazený výsledok simulácie. Na obrázku 49 je zobrazená osvetlenosť na zrovnávacej rovine. Svetelnotechnické výsledky na zrovnávacej rovine sú v tabuľke 3.

Tab. 3 Výsledky hornej časti svietidla.

Zrovnávacia rovina	
Em	358 lx
Emin	178 lx
Emin/Em (Uo)	0,50
UGR	<21,2
Strop miestnosti	
Eav	192 lx
Emin/Em (Uo)	0,68



Obr. 48 Simulácia dolnej časti svietidla.



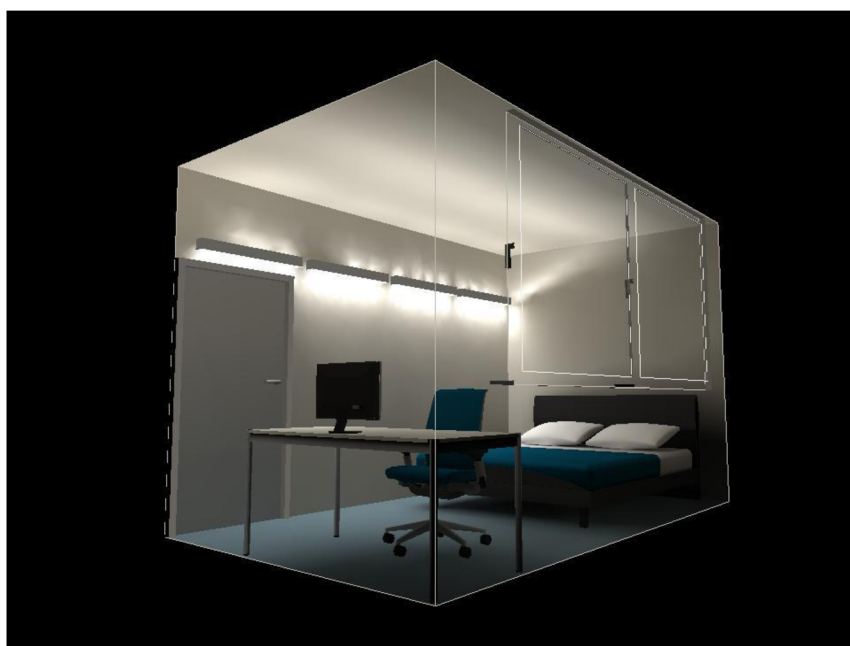
Obr. 49 Rozloženie osvetlenosti na zrovnávacej rovine.

5.4 Simulácia oboch častí svietidla

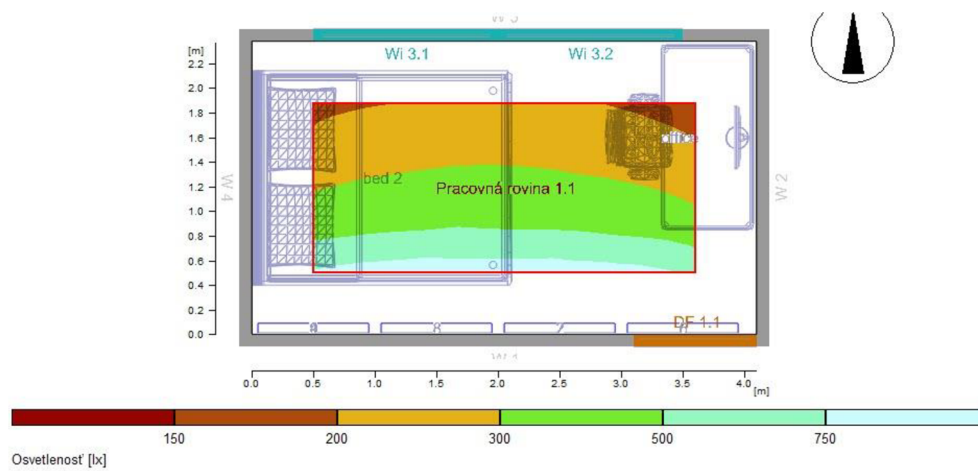
Obe časti svietidla naraz je možné použiť v prípade potreby najväčšej osvetlenosti. Simulácia je zobrazená na obrázku 50, rozloženie osvetlenosti na obrázku 51 a v tabuľke 3.

Tab. 3 Výsledky simulácie hornej časti svietidla.

Zrovnávacia rovina	
Em	619 lx
Emin	386 lx
Emin/Em (Uo)	0,62
Strop miestnosti	
Eav	633 lx
Emin/Em (Uo)	0,63



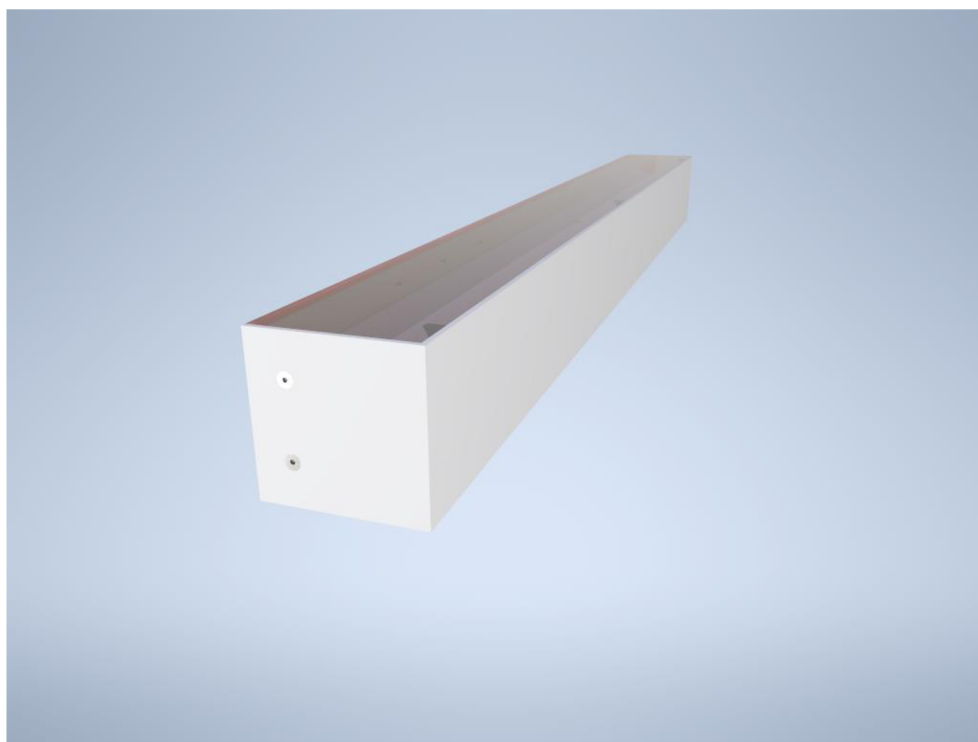
Obr. 50 Simulácia oboch častí svietidla.



Obr. 51 Rozloženie osvetlenosti na zrovnávacej rovinu.

6 KONŠTRUKČNÝ NÁVRH

Konštrukcia svietidla bola navrhnutá tak, aby svietidlo mohlo byť vyrobené s použitím bežných nástrojov strojníckej výroby a v sérii jedného kusu. Samotný reflektor má komplexný tvar a jeho ohýbanie by bolo náročné. Jedna možnosť je aproximovať krivky priamkami. Týmto spôsobom by sa vytvoril fazetovaný reflektor. Druhá možnosť je vytvorenie presného držiaku, ktorý bude udržiavať tvar reflektoru napätím. Pre finálny návrh bola zvolená druhá možnosť. Držiaky môžu byť vyrezané podľa CAD modelu z plastu. Návrh obsahuje celkovo tri držiaky zaisťujúce konštantný tvar po celej dĺžke reflektoru. Z dôvodu montáže bola krivka reflektoru B a C dotyčne spojená kružnicou. Tak sa vytvoria dve časti držiaku reflektoru, ktoré sú následne spojené. Celé svietidlo je na obrázku 52.



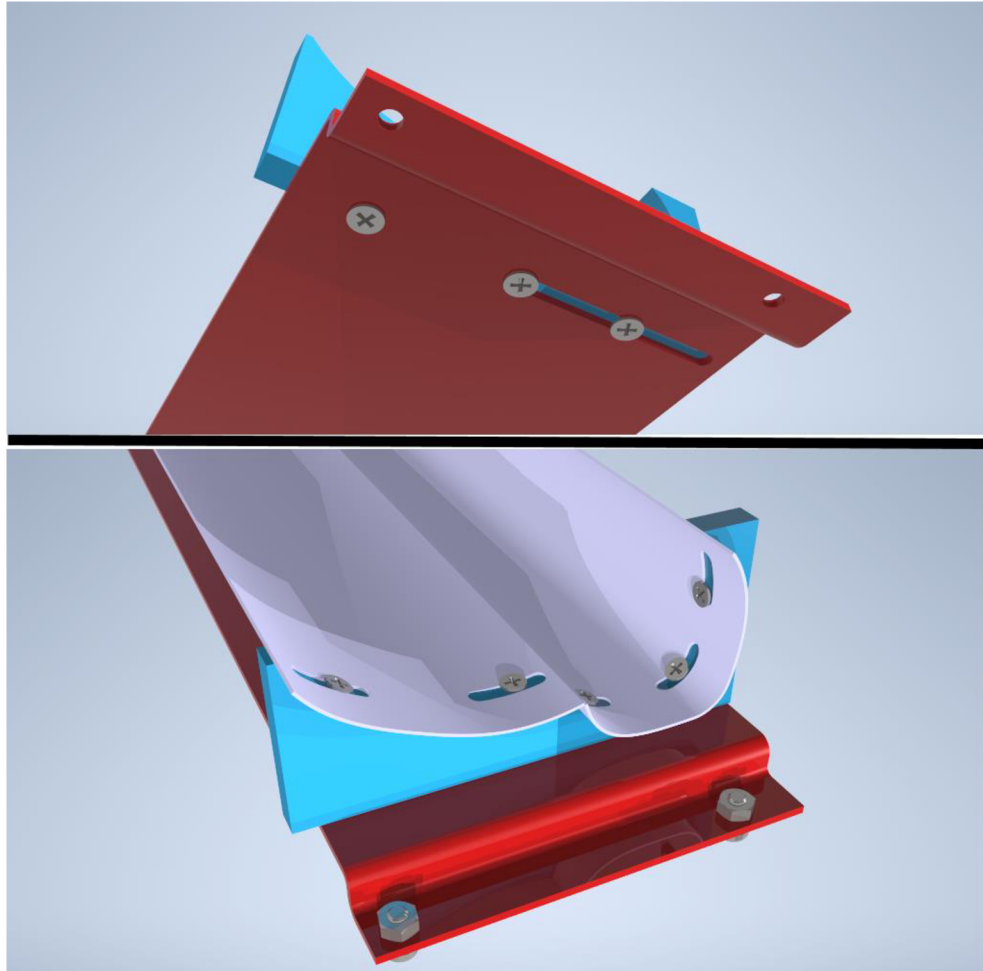
Obr. 52 Renderovaný obrázok svietidla

6.1 Technologický postup výroby a montáže

Polotovary kostry je oceľový plech valcovaný za studena hrúbky 1,5 mm a rozmeroch 970 x 310 mm. Z plechu sú vypálené 3 časti o rozmeroch 960 x 80, 870 x 147 a 890 x 75. Do plechov sú následne podľa výkresu vyvrtané diery pomocou tvárniaceho kužeľu. Toto zaisťuje aby do nich mohli byť vyvrtané závit. Všetky súčasti sú relatívne ľahké a nie je nutné použitie lisovaných matic. Potom sú jednotlivé plechy zohnuté na ohýbačke s polomerom ohybu 2 mm. Ďalším polotovarom je doska PVC hrúbky 5 mm s rozmerom 80 x 120 mm. Pomocou frézy alebo vodného lúču sú z neho obrobene držiaky reflektoru. Do každého je sú vyvrtané diery a závit na uchytenie reflektoru. Reflektor je vyrobený z pokovovaného plechu MIRO 6 s rozmerom 840 x 100 mm.

Prvým krokom montáže je upevnenie držiakov reflektoru k upevňovacej doske (viď obrázok 52 hore). Každý držiak reflektoru A je priskrutkovaný dvoma skrutkami M1,6x2.

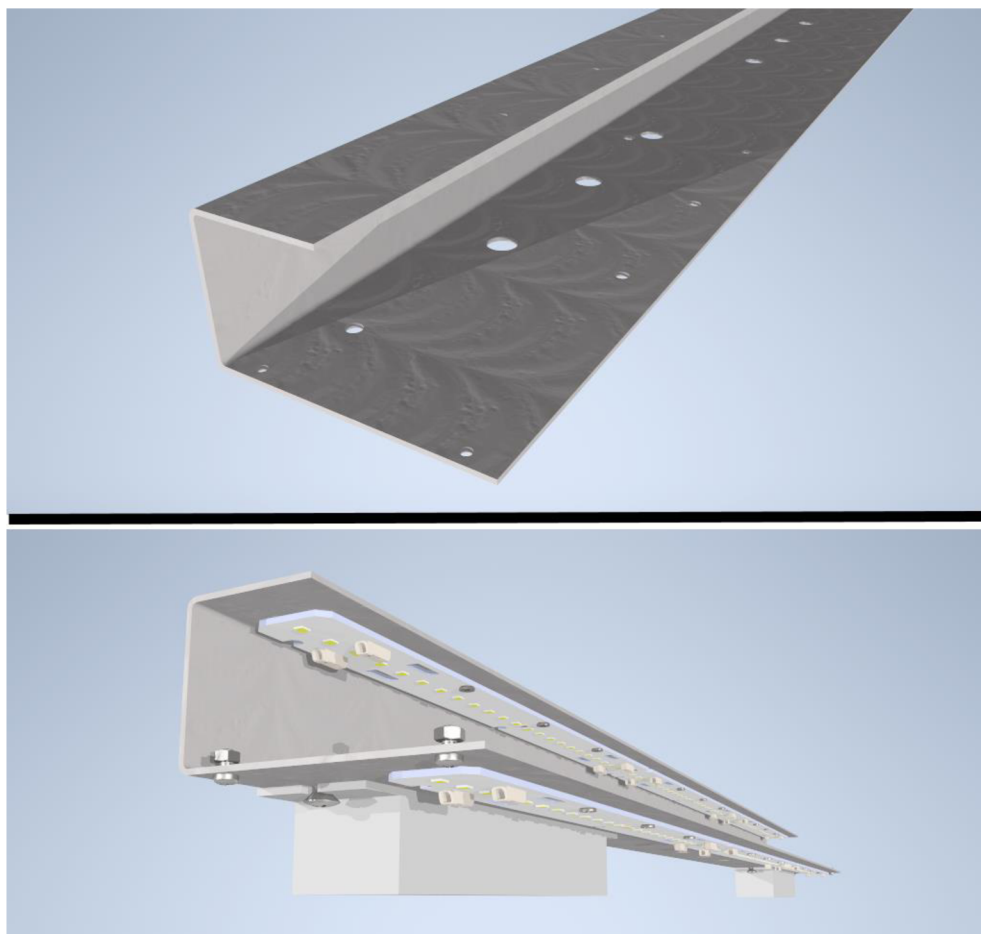
K nemu je priložený držiak reflektoru B a priskrutkovaný jednou skrutkou. Následne sú priskrutkované 0,5 mm hrubé plechy reflektoru (viď obrázok 53).



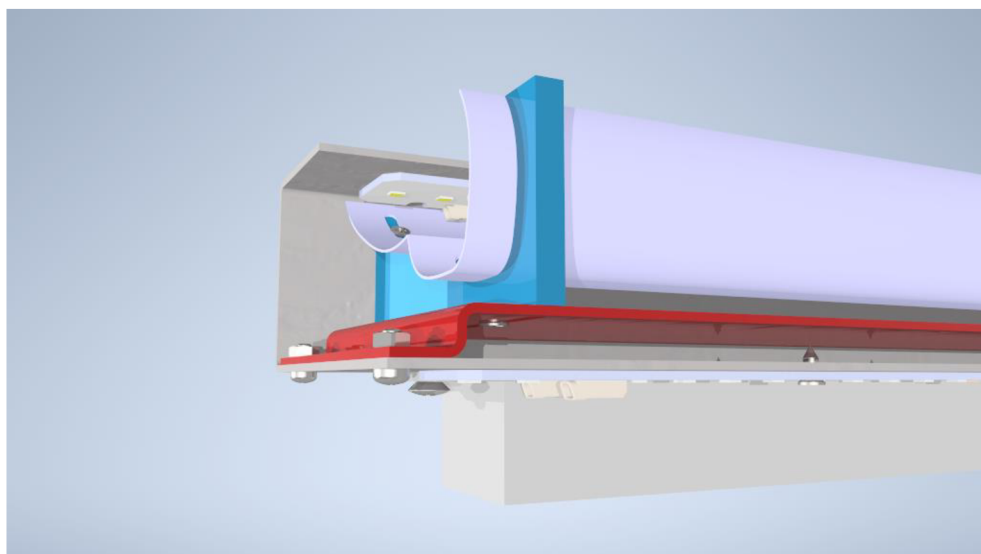
Obr. 53 Držiak reflektoru.

Ďalší ohýbaný plech slúži na prichytenie LED modulov, predradníkov a svorkovnice. Plech je zobrazený na obrázku 53 hore. Jednotlivé moduly sú sériovo spojené a kabeláž následne vedie do predradníkov. Ako prvé sú sériovo prepojené a následne priskrutkované moduly 1, 2 a 3. Sú priskrutkované deviatimi samoreznými skrutkami 3,5x9,5. Na zjednodušenie sú v plechu vyrezané otvory pre skrutkovač. Na druhú stranu sú rovnakým postupom prichytené moduly 4, 5 a 6. Pod moduly sú prichytené predradníky Tridonic pomocou 4 skrutiek 3,5x9,5 (viď obrázok 54). Výstupy so svorkovnicou smerujú do stredu svetidla. Posledným krokom je zapojenie kabeláže, ktorá vedie poza predradníky.

Po zmontovaní oboch súčastí sú obe časti spojené štyrmi skrutkami M3x4 s maticou. Vytvorený priestor medzi súčastami zaisťuje spoľahlivosť skrutkových spojov (viď obrázok 55).

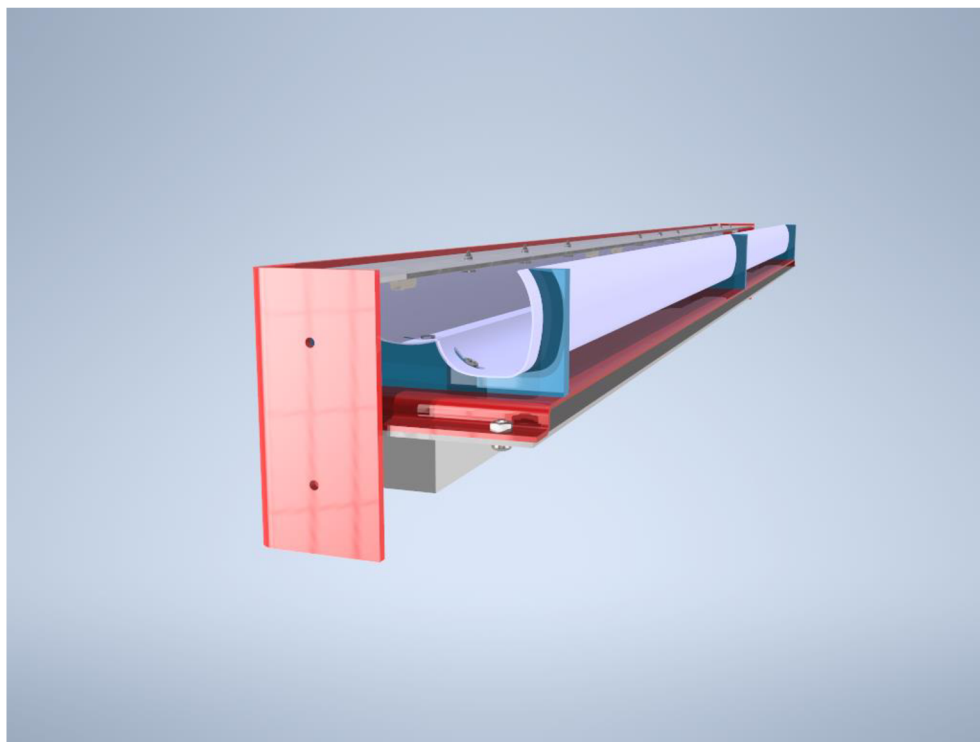


Obr. 54 Kostra svietidla (hore) a nainštalované komponenty (dole).



Obr. 55 Zostava kostry svietidla a reflektorovej časti.

Celá zostava je privarená štyrmi bodovými zvarmi na hlavný plech držiaci svietidlo na stene miestnosti (viď obrázok 56). Hlavný plech taktiež slúži na prichytenie krycích skiel ktoré boli zlepené do tvaru kvádra. Na plech sú prichytené štyrmi zapustenými skrutkami. Celá zostava je na obrázku 51.



Obr. 56 Zostava vnútornej časti svietidla.

7 DISKUSIA

Hlavným cieľom práce bolo vytvoriť nástenné svietidlo, ktoré osvetľuje strop miestnosti. Riešenie hlavného osvetlenia takejto miestnosti nástenným svietidlom nie je konvenčné, väčšinou sa používa stropné svietidlo. Hoci pre konkrétnu miestnosť nebolo možné vytvoriť uniformné osvetlenie na celej ploche stropu, uniformita osvetlenia v miestnosti je pomerne veľká a svietidlo môže byť použité. Osvetlenosť miestnosti pri použití hornej časti je 264 lx, čo presahuje doporučených 100 lx pre osvetlenie podobných priestorov. Pri kombinovanom osvetlení je osvetlenosť 619 lx. 500 lx je doporučená osvetlenosť, pre bežnú prácu v kancelárii.

Existuje niekoľko možností ako by uniformita na celej ploche mohla byť docielená.

- Zmena tvaru vonkajšieho obalu svietidla.

Keďže celá predná strana svietidla je nepriesvitná, bolo nutné vytvárať dvojitý reflektor, vytvárajúci viacnásobné odrazy. V prípade väčšej vyžarovacej plochy svietidla by bolo možné vytvoriť viac divergujúci zväzok lúčov. Svietidlo by taktiež mohlo byť účinnejšie. Nevýhodou takéhoto riešenia je menej minimalistický dizajn svietidla. V takomto prípade by bolo vytvorené aj väčšie oslnenie, keďže niektoré lúče odrazené od krycieho skla by sa odrážali do dolného polpriestoru miestnosti.

- Použitie iného svetelného zdroja.

LED zdroj je jedným z mála zdrojov, ktorý vyžaruje do polpriestoru. V prípade použitia lineárnej žiarivky by nedošlo k tieneniu za svietidlom. Došlo by k zjednodušeniu tvaru reflektora, avšak svietidlo by muselo mať väčšie rozmery.

- Montáž svietidiel na obe strany miestnosti.

V zadanej miestnosti táto možnosť neprichádza do úvahy. Pri svietení z oboch strán by reflektor mohol byť nastavený tak, aby osvetľoval polovicu stropu z každej strany. V tomto prípade by mohlo byť dosiahnuté veľmi uniformné osvetlenie.

- Osvetľovanie strelu stropu.

Toto riešenie neponúka uniformné osvetlenie celého stropu. Parabolický reflektor však môže byť nastavený tak, aby osvetľoval stred stropu miestnosti. Na zrovnávacej rovine by bolo vytvorené rovnomerné osovo symetrické osvetlenie.

Výhoda konštrukčného návrhu svietidla je, že vďaka upevneniu reflektora pomocou plastových držiakov je možné upevnenie reflektora, dizajnovaného pre konkrétny rozmer miestnosti. Riešenie v tejto diplomovej práci sa dá považovať za maximálny rozmer uniformného osvetlenia pre danú konštrukciu svietidla.

7.1 Možnosti ďalšieho postupu

Pokračovaním práce môže byť návrh série držiakov reflektora a definovanie rozmerov miestností do ktorých bude svietidlo umiestnené. Vďaka jednoduchej konštrukcii by bolo možné vyrábať zákazkové svietidlá bez výraznej zmeny výrobného postupu. V súčasnej konštrukcii by tak najväčší rozmer miestnosti s použitím dvoch svietidiel bol

ZÁVER

Práca sa zaoberá vytvorením virtuálneho prototypu svietidla. Optika svietidla bola vytvorená v programe TracePro. Z dôvodu konštrukčných obmedzení bol pre hornú časť svietidla vytvorený nekonvenčný tvar reflektoru, ktorého materiál vytvára čiastočne difúzny odraz, aby sa predišlo prílišnému fokusovaniu zväzku v niektorých miestach. Účinnosť svietidla 79 %. Dolná časť bola vytvorená vzhľadom na zníženie oslnenia od svietidla. Účinnosť dolnej časti je 57 %.

Svetelnotechnické veličiny boli vyhodnocované v softvéri Relux. Svietidlo pri maximálnom výkone vytvára na zrovnávacej rovine vo výške 1 meter priemernú osvetlenosť 619 lx.

Konštrukcia svietidla bola vytvorená tak, aby svietidlo mohlo byť vyrobené ekonomicky nenáročne použitím ľahko dostupných materiálov a nástrojov.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. SMITH, A. Mark. *From Sight to Light: The Passage from Ancient to Modern Optics*. United States: The University of Chicago Press, 2017. ISBN 978-0-226-52857-1.
2. TOBIN, Richard. Ancient Perspective and Euclid's Optics. *Journal of the Warburg and Courtauld Institutes* [online]. 1990, **53** [cit. 2020-06-02]. DOI: 10.2307/751337. ISSN 00754390. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/751337?origin=crossref>
3. GIBB, Julie. A flash of inspiration. *National Museums Scotland* [online]. Edinburgh: National Museums Scotland, 2010 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://blog.nms.ac.uk/2010/10/15/a-flash-of-inspiration/>
4. KELLY, Richard. Lighting as an Integral Part of Architecture. *College Art Journal* [online]. 1952, **12**(1), 24-30 [cit. 2020-05-28]. DOI: 10.2307/773361. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/773361?seq=1>
5. BECK, Adam. The Million Dollar Lens: The Science and History behind the Fresnel Lighthouse Lens. *PARTsolutions* [online]. Cincinnati: PARTsolutions, 2018 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://partsolutions.com/the-million-dollar-lens-the-science-and-history-behind-the-fresnel-lighthouse-lens/>
6. *IZAR II* [online]. Brno: LUCIS, 2020 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.lucis.eu/cz/produkty/katalog-lucis/nastenna-svitidla/izar-ii-nastenna-svitidla.html>
7. HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
8. Baxant, P. *Světelná technika, Elektronický text č. EEN608, Přednášky a cvičení*. Brno: 2006. p. 1 (p.)
9. CRAFORD, M. George, Ian T. FERGUSON, John C. CARRANO, Tsunemasa TAGUCHI a Ian E. ASHDOWN. *LEDs for solid state lighting and other emerging applications: status, trends, and challenges* [online]. In: . 2005-8-18, s. 594101- [cit. 2020-06-02]. DOI: 10.1117/12.625918. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.625918>
10. REA, Mark S. a Mark S. REA. *The IESNA Lighting Handbook: references & application*. 9th Ed. New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2000. ISBN 0-87995-150-8.
11. RHIND-TUTT, A. J. Paints and Surface Coatings for Lighting Fittings. *Lighting Research & Technology* [online]. 1967, **32**(2) [cit. 2020-05-28]. DOI: <https://doi.org/10.1177/147715356703200204>. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/147715356703200204?journalCode=lrt>
12. GANSLANDT, Rüdiger, HARALD, Hofmann. *Handbook of Lighting Design*, ERCO Leuchten GmbH, Lüdenscheid Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden. 1. edition. 1992.

13. BRYAN, Ruby. Everything You Need To Know About 'Optical Diffusers'. *AG Tech South* [online]. Alpharetta: AG Tech South, 2020 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://agtechsouth.com/everything-you-need-to-know-about-optical-diffusers/>
14. LEE, ByoungHo. Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology* [online]. 2003, **9**(2), 57-79 [cit. 2020-06-09]. DOI: 10.1016/S1068-5200(02)00527-8. ISSN 10685200. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1068520002005278>
15. FOSTERVOLD, K. Proportions of direct and indirect indoor lighting: The effect on health, well-being and cognitive performance of office workers. *Lighting Research and Technology* [online]. 2008, **40**(3), 175-200 [cit. 2020-05-28]. DOI: doi:10.1177/1477153508090917. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1477153508090917>
16. The effect on emotions and brain activity by the direct/indirect lighting in the residential environment. *Neuroscience Letters* [online]. 2015, **1**(584), 28-32 [cit. 2020-05-28]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2014.09.046>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304394014007940>
17. *Mira Wall LED* [online]. Bologna: 3F Filippi, 2020 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.3f-filippi.com/en/Products/Surface-luminaires-and-suspensions/Mira/Mira-Wall-LED>
18. *Wall-Mounted Luminaire VANERA LED* [online]. Villingen-Schwenningen: Waldmann, 2020 [cit. 2020-05-28].
19. *OFFSET W2 RAX 121/39 E, 5279304* [online]. Arnsberg: TRILUX GmbH & Co., 2020 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.trilux.com/products/en/Offset-W2-RAX-121-39-E/>
20. *Products* [online]. Dornbirn: Tridonic, 2020 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.tridonic.com/com/en/index.asp>
21. TracePro. *TracePro* [online]. Littleton: LAMBDA reserach corporation, 2019 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: https://www.lambdare.com/raytrace2020/?utm_campaign=international&qclid=Cj0KCQjwIN32BRCCARIsADZ-J4vz0KbAuuuJkgwAVpkpetrZ-LpB8iMnJvUBRt26Rjyr3W5Fi0E_0aAg5WEALw_wcB
22. CLASSNER ANDREW S. *Ray Tracing*. Vyd. 2. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2002. ISBN isbn:9780122861604.
23. KROESE, Dirk P., Tim BRERETON, Thomas TAIMRE a Zdravko I. BOTEV. Why the Monte Carlo method is so important today. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* [online]. 2014, **6**(6), 386-392 [cit. 2020-06-03]. DOI: 10.1002/wics.1314. ISSN 19395108. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/wics.1314>
24. YAN, Jinren. A Practical Method to Design Reflector-Based Light-Emitting Diode Luminaire for General Lighting. *Advances in OptoElectronics* [online]. 2018, **2018**, 1-10 [cit. 2020-06-02]. DOI: 10.1155/2018/7138592. ISSN 1687-563X. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/aoe/2018/7138592/>

25. Florence. *Ledil* [online]. Salo: LEDiL, 2018 [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <https://www.ledil.com/product-landing/linear/florence/>

26. Alanod Miro. *Alanod* [online]. North Ridgeville: Alanod-Westlake, 2020 [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <https://alanod-westlake.com/products>

27. SCHEIR, Gertjan H., Peter HANSELAER, Peter BRACKE, Geert DECONINCK a Wouter R. RYCKAERT. Calculation of the Unified Glare Rating based on luminance maps for uniform and non-uniform light sources. *Building and Environment* [online]. 2015, **84**, 60-67 [cit. 2020-06-09]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.10.027. ISSN 03601323. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132314003485>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratka	Popis
3D	Three-dimensional
CAD	Computer aided design
CRI	Colour rendering index
EEG	Elektroencefalografia
IP	International protection (rating)
PMMA	Polymetylmetakrylát
UGR	Unified glare rating

Symbol	Jednotka	Popis
Φ	[lm]	Svetelný tok
$H_{e,\lambda}$	[W]	Spektrálna hustota žiarivého toku
V_{λ}	[-]	Spektrálna citlivosť pozorovateľa
Ω	[sr]	Priestorový uhol
S	[m ²]	Plocha
r	[m]	Vzdialenosť
I	[cd]	Svietivosť
E	[lx]	Osvetlenosť
L	[cd/m ²]	Jas
H	[lm/m ²]	Svetlenie
UGR	[-]	Unified glare rating

