VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

KONCEPT MODERNÍHO LED SVÍTIDLA PRO OSVĚTLENÍ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ
MODERN LED LUMINAIRE CONCEPT FOR ROAD LIGHTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Miroslav Krejčí
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Jan Novotný, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Bc. Miroslav Krejčí**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výroba automobilových světel a technických svítidel
Vedoucí práce:	**Ing. Jan Novotný, Ph.D.**
Akademický rok:	2017/18

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:

Koncept moderního LED svítidla pro osvětlení pozemních komunikací

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V posledních letech vznikají spolu s dynamickým vývojem trhu a technologií nové požadavky na svítidla veřejného osvětlení. Oproti dřívějšímu tlaku trhu zejména na úsporu elektrické energie, se dnes klade důraz také na další aspekty osvětlování jako je řízení (Smart Cities), rušivé světlo, vliv světla na člověka apod. Řešení zvoleného tématu předpokládá komplexní návrh moderního LED svítidla s ohledem na současné trendy.

Cíle diplomové práce:

– Cílem práce je konstrukční řešení svítidla pro osvětlení pozemních komunikací s důrazem na návrh a optimalizaci optického systému pro komunikace třídy osvětlení ME.
– Při řešení je třeba zohlednit moderní trendy a současné požadavky trhu (stupeň krytí, měrný světelný výkon, servisní zásah bez použití nářadí, systém řízení apod.), s čímž souvisí i volba a konfigurace odpovídajících elektrických komponent.
– Následně je nutné ověřit fotometrická data pomocí světelně–technických výpočtů a vytvořit porovnání se stávajícími svítidly na trhu.

Seznam doporučené literatury:

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

HABEL, J. Světelná technika a osvětlování. Praha: FFC Public, 1995. 437 s. ISBN 80-901985-0-3.

SOKANSKÝ, K., T. NOVÁK, M. BÁLSKÝ, et al. Světelná technika. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. 255 s. ISBN 978-80-01-04941-9.

IIZUKA, K. Engineering optics. 2 ed. Berlin: Springer-Verlag, 1987. 489 s. ISBN 3-540-17131-2.

Lighting of roads for motor and pedestrian traffic. 2nd ed. Vienna: Commission internationale de l'éclairage, CIE Central Bureau, 2010. ISBN 978-3-901906-86-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem optického systému svítidla pro osvětlení pozemních komunikací. Na začátku jsou pospány základní fotometrické veličiny a metodika hodnocení osvětlení komunikací vybrané třídy osvětlení M. Dalším krokem je naprogramování algoritmu, který na základě několika okrajových podmínek dopočítá hodnotící kritéria osvětlení komunikací. Vstupem do algoritmu jsou mimo jiné hodnoty svítivostí svítidla, tj. prostorové hustoty světleného toku. Otočením postupu algoritmu lze dopočítat jednotlivé svítivosti na základě požadovaných hodnot osvětlení. Tyto svítivosti jsou následně použity jako nástroj při úpravě optické čočky. U upravených modelů čočky je provedeno trasování paprsků, jehož výstupem jsou tabulky svítivosti. Ty jsou zpětně ověřeny v navrženém algoritmu a je provedeno vyhodnocení výsledků spolu s porovnáním vybraných svítidel na trhu.

Klíčová slova

Osvětlení, pozemní komunikace, třída osvětlení M, optická čočka, trasování paprsků, TracePro.

ABSTRACT

This thesis deals with design of optical system for road lighting luminaire. In the beginning the basic photometric quantities and assessment methodology for requirements of lighting class M are described. The next step is the programming of algorithm which evaluates the road lighting requirements using few boundary conditions. The input of the algorithm is also luminous intensity (power emitted in a particular direction). By the turning the algorithm over, it is possible to evaluate the luminous intensity from the road lighting requirements. Those luminous intensities are used in the process of modification of optical lens. The ray tracing of modified models of lenses was performed to obtain the tables of luminous intensity. The values of luminous intensity are verified in the same algorithm. Finally, the comparison of results was made including several luminaires out there.

Key words

Lighting, road lighting, lighting class M, optical lens, ray tracing, TracePro.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREJČÍ, M. *Koncept moderního LED svítidla pro osvětlení pozemních komunikací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Novotný, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Koncept moderního LED svítidla pro osvětlení pozemních komunikací** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum	Bc. Miroslav Krejčí

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval panu Ing. Janu Novotnému, Ph.D. za vedení mé diplomové práce. Největší poděkování však patří mé rodině a přátelům za jejich nesmírnou podporu během celého studia.

OBSAH

ÚVOD 8
1 SVĚTELNĚ-TECHNICKÉ VELIČINY 9
1.1 Světelný tok 9
1.2 Prostorový úhel 9
1.3 Svítivost 10
2 METODIKA HODNOCENÍ OSVĚTLENÍ KOMUNIKACÍ 11
2.1 Horizontální osvětlenost v bodě 11
2.2 Síť kontrolních bodů 12
2.3 Zahrnutí svítidel 14
2.4 Svítivost ve fotometrických datech 14
2.5 Křivky svítivosti 15
2.6 Jas v bodě 16
2.7 Poloha pozorovatele 18
2.8 Třídy povrchu vozovek / r-tabulky 18
2.9 Uspořádání svítidel 20
2.10 Činitel údržby 22
2.11 Třída osvětlení 24
2.12 Požadavky třídy osvětlení M 25
2.13 Prahový přírůstek 27
2.14 Činitel osvětlení okolí 30
3 NÁVRH ALGORITMU PRO VÝPOČET SVÍTIVOSTI 33
3.1 Výpočet horizontální osvětlenosti v bodě 34
3.1.1 Síť kontrolních bodů 34
3.1.2 Poloha svítidel 35
3.1.3 Zahrnutí svítidel 36
3.1.4 Úhel roviny C 38
3.1.5 Úhel γ 42
3.1.6 Svítivost I pro obecné natočení C a γ 44
3.1.7 Horizontální osvětlenost v bodě 46
3.2 Výpočet jasu v bodě 47
3.2.1 Poloha pozorovatelů 47
3.2.2 Úhel β 48
3.2.3 Redukovaný součinitel jasu r_k 49
3.2.4 Součinitel jasu q 51

3.2.5 Jas v bodě 51
3.3 Vyhodnocení průměrného jasu a rovnoměrností 52
3.4 Zpětné dopočítání svítivosti 55
4 NÁVRH OPTICKÉ ČOČKY 57
4.1 3D skenování čočky 57
4.2 Vytvoření modelu z mračna bodů 59
4.3 Parametrizace modelu 60
4.4 Předpoklady při úpravě čočky 60
4.5 Trasování paprsků čočkou v TracePro 62
5 POROVNÁNÍ NÁVRHŮ A VYHODNOCENÍ 65
5.1 Porovnání upravených modelů výchozí čočky 65
5.2 Porovnání jednotlivých modelů s komerčními svítidly 70
ZÁVĚR 72
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 73

ÚVOD

Osvětlení pozemních komunikací provází celá řada kvantitativních a kvalitativních požadavků, které míří především na optický systém svítidel. Tato práce se zabývá návrhem optické čočky svítidla pro osvětlení pozemních komunikací.

Na začátku jsou zmíněny důležité veličiny a dále práce pokračuje kapitolou s popisem metodiky hodnocení osvětlení na komunikacích, která obsahuje definice a výpočty všech klíčových parametrů pro osvětlení komunikace třídy osvětlení M, pro kterou je zároveň navrhován optický systém – soustava LED a skleněné čočky.

Poté je popsaná metodika použita při programování algoritmu, který na základě vstupů (geometrické uspořádání svítidel, šířce vozovky, svítivosti svítidla atd.) vypočítá hodnotící kritéria, zejména pak jasy v kontrolních bodech. Otočením vztahů v algoritmu lze na základě požadovaných jasů a definovaných parametrů osvětlovací soustavy zpětně dopočítat potřebné svítivosti, které reprezentují prostorovou hustotu světelného toku.

Svítivosti získané algoritmem jsou dále využity pro úpravu modelu optické čočky. Pro ověření optických vlastností čočky je využita metoda trasování paprsků v softwaru TracePro. Výstupem jsou mimo jiné tabulky svítivosti, které se zpětně ověří v navrženém algoritmu.

Na závěr jsou vyhodnoceny úpravy jednotlivých modelů a je vytvořeno porovnání s vybranými svítidly na trhu.

1 SVĚTELNĚ-TECHNICKÉ VELIČINY

Pro pochopení metodiky hodnocení osvětlení komunikací (kap. 2) je třeba vysvětlit význam základních světelně-technických veličin, které se dále vyskytují v této práci.

1.1 Světelný tok

Světelný tok vyjadřuje schopnost zářivého toku (energie přenesená zářením za jednotku času) způsobit zrakový vjem. Světelný tok Φ [lm] monochromatického záření vlnové délky λ [nm] se určí dle vztahu

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda), \tag{1.1}$$

kde $K(\lambda)$ [lm · W^{-1}] je světelný účinek monochromatického záření, který se vyjádří ze vztahu

$$K(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda), \tag{1.2}$$

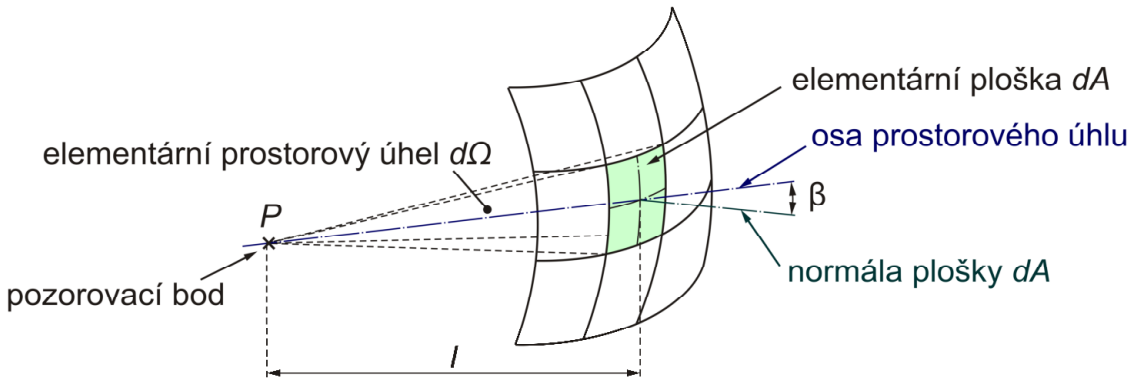
kde $V(\lambda)$ [-] je poměrná světelná účinnost monochromatického záření a K_m [lm · W^{-1}] je maximální hodnota spektrálního průběhu $K(\lambda)$. Maximum spektrálního průběhu K_m je stanoveno na 683 lm · W^{-1} při základní vlnové délce λ = 555,015 5 nm u normálního fotometrického pozorovatele při denním (fotopickém) vidění. [1]

1.2 Prostorový úhel

Obecně je prostorový úhel Ω [sr] definován velikostí plochy vyťaté obecnou kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule, jejíž střed je totožný s vrcholem uvažované kuželové plochy. Pro tuto práci je ale významnější definice elementárního prostorového úhlu $d\Omega$, který se stanoví ze vztahu

$$d\Omega = \frac{dA \cdot \cos\beta}{l^2}, \tag{1.3}$$

kde dA [m^2] je elementární ploška, kterou můžeme pozorovat z bodu P ve vzdálenosti l [m] pod prostorovým úhlem $d\Omega$ [sr], přičemž osa prostorového úhlu svírá s normálou elementární plošky úhel β viz obr. 1.1. [1]



Obr. 1.1 Elementární prostorový úhel. Zdroj: autor dle [1].

1.3 Svítivost

Svítivost $I_{\gamma C}$ [cd] reprezentuje prostorovou hustotu světelného toku v různých směrech. Úhly λ, C [°] určují její orientaci v prostoru. Určí se ze vztahu

$$I_{\gamma C} = \frac{d\Phi}{d\Omega_{\gamma C}}, \tag{1.4}$$

kde $d\Omega_{\gamma C}$ [sr] je elementární prostorový úhel, jehož osa leží ve směru určeném úhly λ, C a ve kterém světelný zdroj vyzařuje elementární světelný tok $d\Phi$ [lm]. Zdroj je umístěný ve vrcholu prostorového úhlu, což znamená, že se svítivost určuje pro bodové zdroje, kdy je vyzařovací plocha zanedbatelná vůči vzdálenosti měřícího bodu od vrcholu prostorového úhlu. [1]

Hodnoty svítivosti ve všech směrech prostoru jsou na základě úhlů λ, C definovány v tabulce svítivosti viz kap. 2.4.

2 METODIKA HODNOCENÍ OSVĚTLENÍ KOMUNIKACÍ

V této kapitole je popsán výpočet jednotlivých parametrů hodnocení osvětlení na pozemních komunikacích. Předpokladem použití řešeného svítidla jsou komunikace třídy osvětlení M (blíže popsány v kap. 2.11 a 2.12), pro které platí určitý soubor požadavků definovaný normou *ČSN EN 13201-2 Osvětlení pozemních komunikací – Část 2: Požadavky*. [3]

Kromě splnění základních konstrukčních a funkčních požadavků na samotné svítidlo je nutné zajistit, aby byla řešená komunikace osvětlena dostatečně a kvalitně. Mezi kvantitativní požadavky patří průměrná horizontální osvětlenost, resp. průměrný jas povrchu vozovky (kap. 2.1 resp. 2.6). Kvalitativními požadavky jsou celková a podélná rovnoměrnost jasu (kap. 2.12). Dále je nutné zabránit vzniku oslnění řidičů, pro které je hodnotícím kritériem tzv. prahový přírůstek (kap. 2.13). Posledním požadavkem je činitel osvětlení okolí, jenž má za úkol předejít náhlým změnám osvětlenosti u hranice vozovky (kap. 2.14). Výpočet těchto veličin popisuje norma *ČSN EN 13201-3 Osvětlení pozemních komunikací – Část 3: Výpočet*. [4]

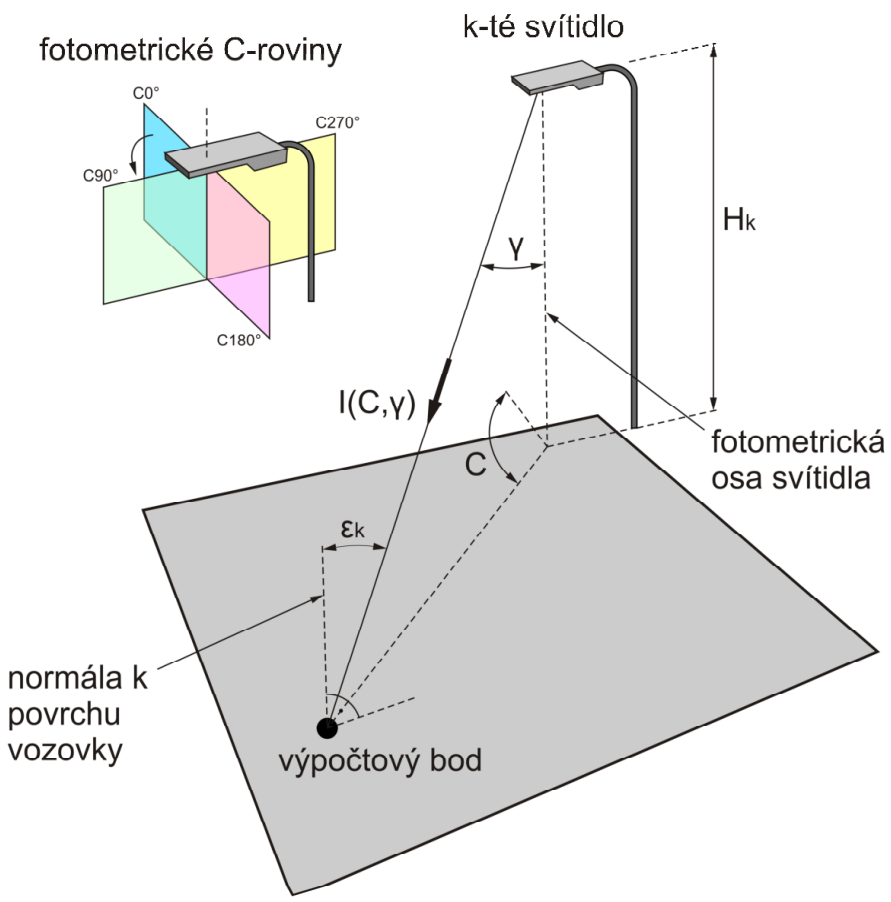
2.1 Horizontální osvětlenost v bodě

U komunikací, kde nejsou kladeny tak vysoké nároky na osvětlení a tam, kde není možné umístit pozorovatele (viz kap. 2.7) do definované vzdálenosti (krátké úseky, křižovatky apod.) se jako kritérium pro hodnocení osvětlení používá horizontální osvětlenost v bodě E_h [lx], která se vypočítá jako suma dílčích příspěvků osvětleností od zahrnutých svítidel dle vztahu

$$E_h = \sum_{k=1}^{n_{LU}} \frac{I_k(C,\gamma) \cdot f_M \cdot \cos^3 \varepsilon_k}{H_k^2}, \tag{2.1}$$

kde n_{LU} [-] je počet svítidel zahrnutých ve výpočtu, $I_k(C,\gamma)$ [cd] je svítivost *k*-tého svítidla (definovaná úhly C,γ viz kapitola 2.4), f_M [-] je činitel údržby, ε_k [°] je úhel dopadu světelného paprsku do bodu a H_k [m] je montážní výška *k*-tého svítidla. [4]

Protože je ve vztahu 2.1 již započítán činitel údržby, nazýváme tuto osvětlenost jako udržovanou. Činiteli údržby se podrobněji věnuje kapitola 2.10.



Obr. 2.1 Geometrické uspořádání veličin pro výpočet osvětlenosti. Zdroj: autor dle [1].

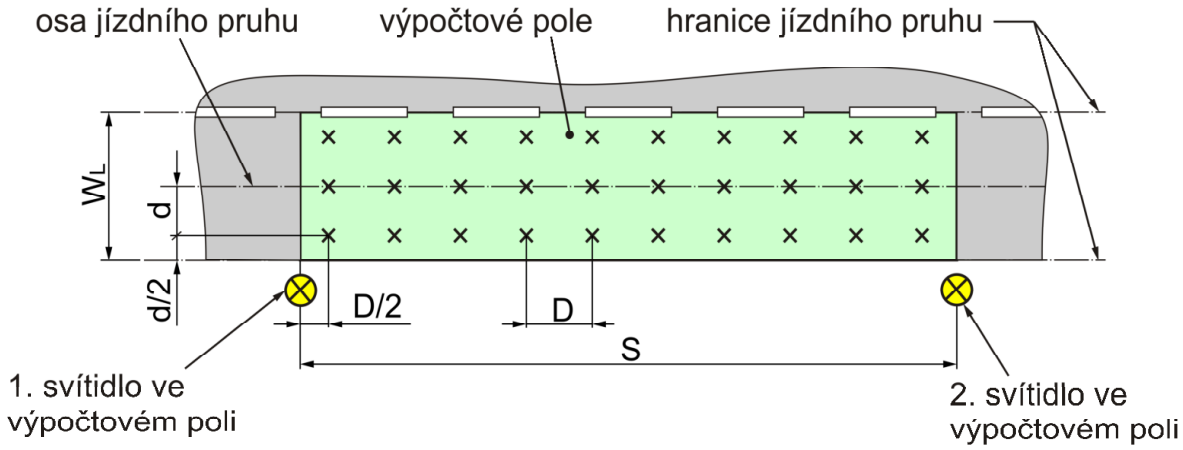
V kapitole 2.7 (poloha pozorovatele) je zmíněno, že pro třídu osvětlení M je hlavním hodnotícím kritériem jas v bodě, nikoliv horizontální osvětlenost v bodě. Jejímu výpočtu se ovšem nejde vyhnout, protože obě veličiny jsou na sobě vzájemně závislé.

Na obr. 2.1 jsou kromě parametrů pro výpočet horizontální osvětlenosti znázorněny fotometrické roviny C. Podrobněji je tato problematika popsána v kapitolách 2.4 a 2.5.

2.2 Síť kontrolních bodů

Problematika sítě kontrolních bodů se týká výpočtu horizontální osvětlenosti v bodě a jasu v bodě. Jak už z názvu veličin vyplývá, jedná se o bodovou metodu – hodnocená oblast (vozovka) je pokryta sítí výpočtových bodů. Tato metoda je nutná pro hodnocení parametrů osvětlení pozemních komunikací, protože na rozdíl od klasické tokové metody dokážeme hodnotit kvalitativní požadavky na osvětlení – podíl mezi minimální a průměrnou (případně maximální) hodnotou ze všech bodů výpočtového rastru. Tento podíl nazýváme rovnoměrnost. [1]

Aby byla zaručena jednotnost světelně-technických výpočtů a jejich následného ověření pomocí měření, byla pro pozemní komunikace normou *ČSN EN 13201-3 Osvětlení pozemních komunikací – Část 3: Výpočet* definována síť bodů, ve které mají být zmíněné veličiny hodnoceny a následné porovnány s požadavky normy *ČSN EN 13201-2 Osvětlení pozemních komunikací – Část 2: Požadavky*. [4,3]



Obr. 2.2 Pozice výpočtových bodů v jízdním pruhu komunikace. Zdroj: autor dle [4].

Pozice dle obr. 2.2 pro jeden jízdní pruh platí obdobně i pro všechny další pruhy. Vzdálenost mezi body v podélném směru *D* [m] je dána vztahem

$$D = \frac{S}{N}, \tag{2.2}$$

kde *S* [m] je vzdálenost mezi svítidly a *N* [-] je počet výpočtových bodů v podélném směru. Pro vzdálenosti $S \leq 30$ m nabývá hodnot $N = 10$. Pro větší rozteče ($S \geq 30$ m) se určí jako nejmenší celé číslo tak, aby $D \leq 3$ m. [4]

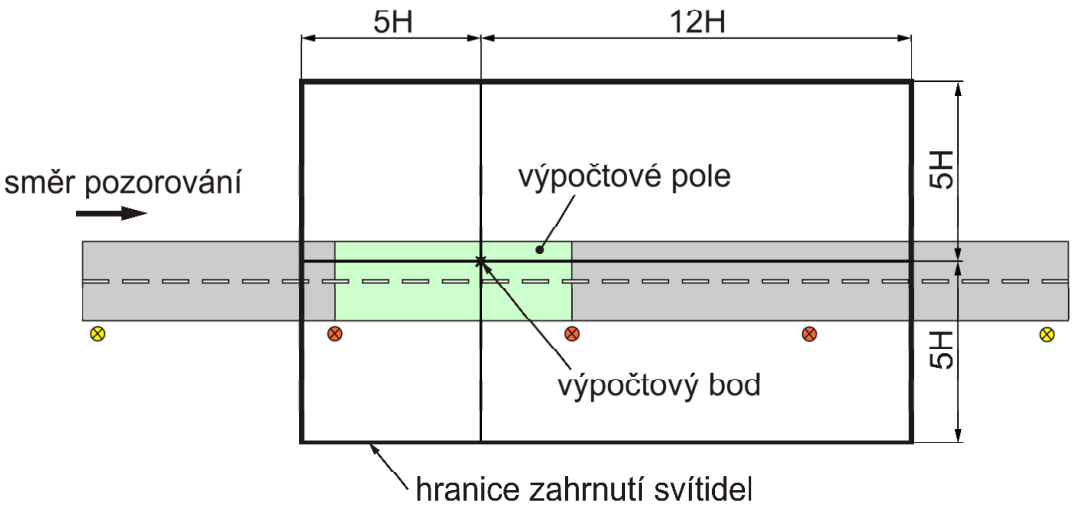
V příčném směru se vzdálenost mezi body *d* [m] vypočítá dle vztahu

$$d = \frac{W_L}{3}, \tag{2.3}$$

kde W_L [m] je šířka jízdního pruhu. Z posledního vztahu vyplývá, že počet bodů v příčném směru nezávisí na šířce jízdního pruhu. Pro komunikace se dvěma jízdními pruhy, kde je vzdálenost mezi svítidly menší nebo rovna 30 m je tedy ve výpočtové síti 10 x 6 bodů. [4]

2.3 Zahrnutí svítidel

Při výpočtu ovětlenosti, resp. jasu v bodě se do výsledné hodnoty započítává příspěvek dílčích hodnot od jednotlivých svítidel. Obr. 2.3 znázorňuje hranici definovanou kolem obecného výpočtového bodu, která je závislá na montážní výšce svítidla. Do výsledné osvětlenosti, resp. jasu se započítává příspěvek každého svítidla, které leží v této hranici. Při návrhu algoritmu je třeba počítat s tím, že dva sousední body mohou sčítat příspěvky osvětleností, resp. jasů od různého počtu svítidel, protože hranice je „plovoucí“ – mění se s polohou bodu ve výpočtovém rastru. [4]



Obr. 2.3 Hranice zahrnutí svítidel pro výpočet celkového jasu v bodě. Zdroj: autor dle [4].

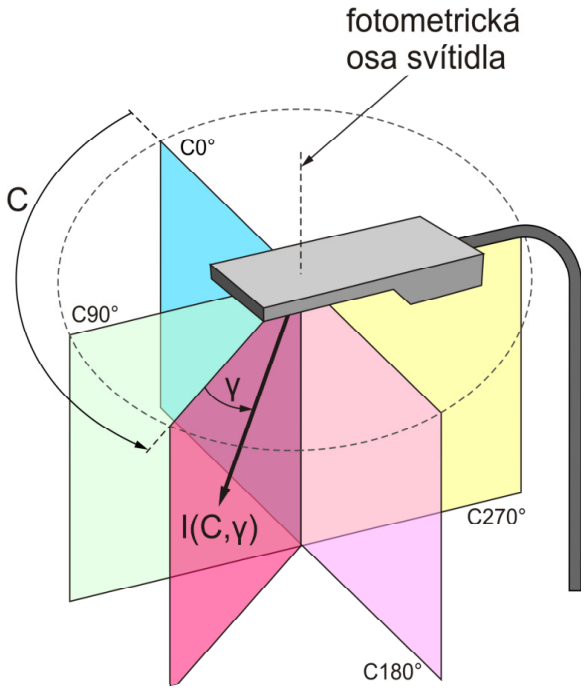
Z obr. 2.3 je patrné, že se do výpočtu jasu v bodě zahrnují svítidla ve vzdálenosti 5*H* směrem k pozorovateli, 12*H* směrem od pozorovatele a 5*H* na každou stranu příčně, kde *H* [m] je montážní výška svítidla. V tomto konkrétním případě bude pro vyznačený výpočtový bod vypočítán celkový jas v bodě jako příspěvek jednotlivých jasů od svítidel označených oranžovou barvou. [4]

2.4 Svítivost ve fotometrických datech

V úvodu bylo zmíněno, že svítivost *I* [cd] reprezentuje prostorovou hustotu světelného toku v různých směrech. Svítivost od svítidla (resp. jeho fotometrického středu) směrem k výpočtovému bodu je nutná pro stanovení veličin osvětlenosti v bodě a jasu v bodě. Většina výrobců proto ke každému svítidlu poskytuje fotometrická data, která kromě základních informací o svítidle (název, model, rozměry, světelný tok, příkon, …)

obsahují také tabulku svítivostí. Ta se získá měřením svítidla na goniofotometru, přičemž výstupem jsou svítivosti závislé na úhlovém natočení svítidla okolo fotometrické osy (roviny C) a osy kolmé na fotometrickou osu (úhel γ) viz obr. 2.4. [1]

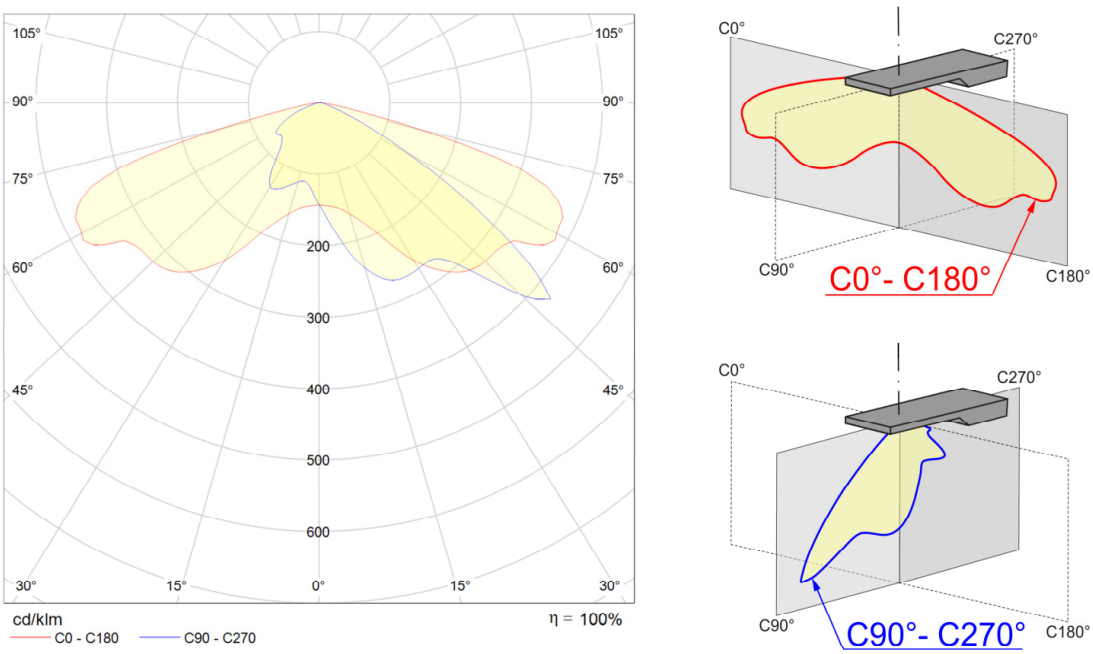
		Roviny C				
		...	C130°	C135°	C140°	...
Úhel γ	...	...	...	...	...	...
	44°	...	X	X	X	...
	45°	...	X	X	X	...
	46°	...	X	X	X	...
	...	...	...	...	...	...



Obr. 2.4 Ukázka tabulky svítivosti se znázorněním obou úhlů. Zdroj: autor dle [1].

2.5 Křivky svítivosti

Na obr. 2.4 jsou kromě parametrů pro výpočet horizontální osvětlenosti znázorněny fotometrické roviny C, stanovené Mezinárodní komisí pro osvětlování (Commission Internationale de l'éclairage, CIE). Zpravidla se pro svítidla pro osvětlení pozemních komunikací používají právě roviny C. Smyslem fotometrických rovin je výstižné zobrazení vyzařovací charakteristiky svítidla. Pro tyto účely slouží tzv. křivky svítivosti. Postup stanovení křivek svítivosti začíná vynesením jednotlivých svítivostí v prostoru ve formě radiusvektorů, vycházejících z jednoho místa (bodový zdroj). Jejich koncové body se pak spojí a tím vytvoří fotometrickou plochu svítivosti. Řezem této plochy v definované rovině lze pak získat křivku svítivosti. U svítidel pro osvětlení pozemních komunikací jsou to typicky roviny C0-C180 a C90-C270. [1]



Obr. 2.5 Křivky svítivosti v polárním diagramu a znázornění v C-rovinách. Zdroj: autor.

Na obr. 2.5 jsou zobrazeny křivky svítivosti svítidla Trilux LUMEGA IQ 90 – vlevo v polárním diagramu a vpravo poté v jednotlivých C-rovinách. Lze také pozorovat, že je svítivost v polárních diagramech vztažena na světelný tok 1000 lm. Důvodem je porovnatelnost křivek svítivosti svítidel s rozdílnými světelnými toky. [1,7]

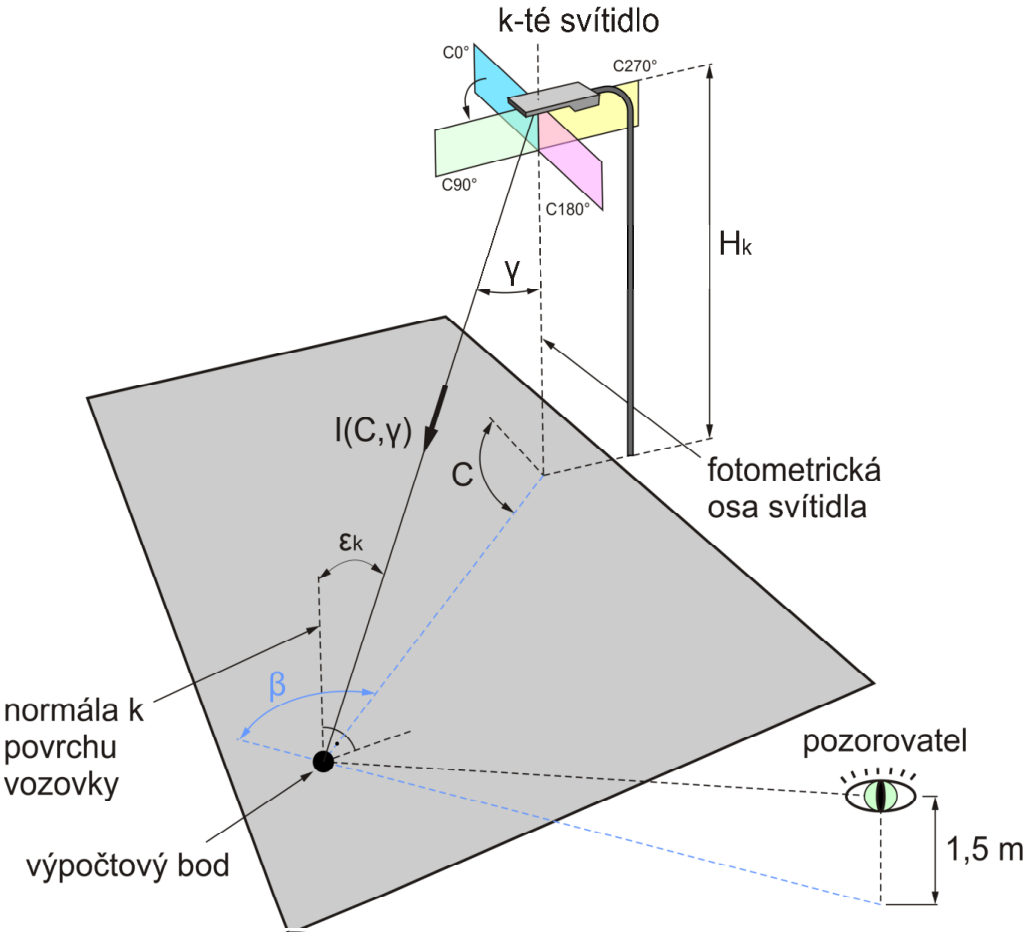
2.6 Jas v bodě

Celkový jas v bodě L [cd·m^{-2}] se vypočítá obdobně jako pro horizontální osvětlenost v bodě součtem příspěvků dílčích jasů od zahrnutých svítidel dle vztahu

$$L = \sum_{k=1}^{n_{LU}} \frac{I_k(C,\gamma) \cdot f_M \cdot r_k(\tan\varepsilon, \beta)}{H_k^2}, \tag{2.4}$$

kde n_{LU} [-] je počet svítidel zahrnutých ve výpočtu, $I_k(C,\gamma)$ [cd] je svítivost k-tého svítidla (definovaná úhly C,γ viz kapitola 2.4), f_M [-] je činitel údržby, $r_k(\tan\varepsilon,\beta)$ [sr^{-1}] je redukovaný součinitel jasu (definovaný úhlem β a tangentou úhlu ε) a H_k [m] je montážní výška k-tého svítidla. [4]

Stejně jako v případě horizontální osvětlenosti se jedná o udržovanou hodnotu jasu v bodě viz kapitola 2.10.



Obr. 2.6 Geometrické uspořádání veličin pro výpočet jasu v bodě. Zdroj: autor dle [4].

Na obr. 2.6 je zobrazen pozorovatel pro názornost v obecné poloze. Jeho přesná pozice je definována v kapitole 2.7.

Na první pohled není zřejmá zmiňovaná závislost mezi horizontální osvětleností v bodě a jasem v bodě. Důvodem je úprava dříve používaného vztahu

$$L = q \cdot E_h \,, \tag{2.5}$$

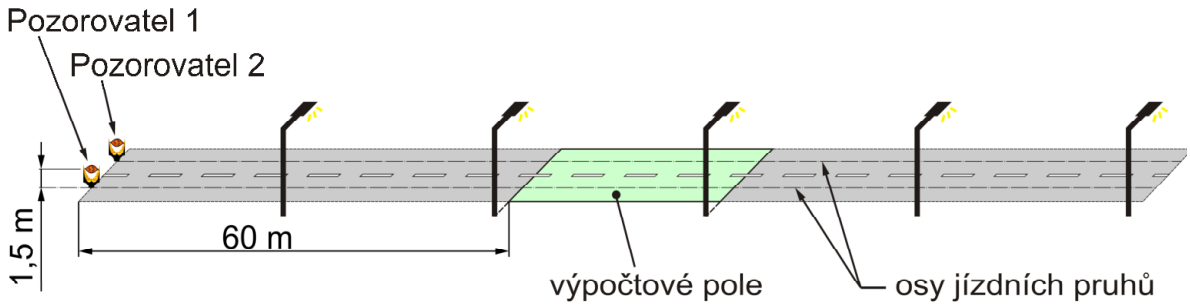
kde q [cd·m^{-2}·lx^{-1}] je součinitel jasu, který se určí dle vztahu

$$q = \frac{r_k(\tan\varepsilon, \beta)}{\cos^3 \varepsilon_k} \,. \tag{2.6}$$

Po dosazení E_h a q do vztahu 2.5 a jeho následné úpravě vznikne právě rovnice 2.6. [1]

2.7 Poloha pozorovatele

V případě třídy osvětlení M se jako hlavní kritérium používá jas v bodě, který je specifický tím, že na něj reaguje lidské oko. Do výpočtu se tedy vnáší pozorovatel, jehož poloha je pevně definovaná – v podélném směru 60 m před začátkem výpočtového pole, resp. před začátkem prvního svítidla (jež lemuje výpočtové pole), v příčném směru na ose každého jízdního pruhu a ve výšce 1,5 m nad vozovkou viz obr. 2.7. [1]



Obr. 2.7 Poloha pozorovatelů u komunikace s dvěma jízdními pruhy. Zdroj: autor dle [4].

Pozice pozorovatele ve většině případů odpovídá popisu výše. Existují ale případy komunikací s více jízdními pruhy oddělenými středícím pásem, kde při jednostranném uspořádání svítidel vnášíme pozorovatele analogicky i do každého jízdního pruhu opačného směru jízdy. Optický systém řešeného svítidla však předpokládá uspořádání svítidel a počet jízdních pruhů jako na obr. 2.7 – tedy dva jízdní pruhy a jednostranné uspořádání svítidel. [4]

Podrobněji popisuje druhy uspořádání svítidel kapitola 2.9.

2.8 Třídy povrchu vozovek / r-tabulky

Ve výpočtu jasu v bodě figuruje veličina redukovaný součinitel jasu $r_k(\tan\varepsilon, \beta)$ [sr^{-1}]. Ta reprezentuje odrazné vlastnosti povrchu vozovky ve formě tabulky, kde jsou uvedeny jednotlivé součinitele na základě úhlu β a tangentě úhlu γ, tzv. r-tabulky. [1]

Rozdílné typy povrchů mají tyto odrazné vlastnosti odlišné, proto byly specifikovány třídy povrchu vozovek a pro ně stanoveny odpovídající hodnoty redukovaných součinitelů jasu, resp. r-tabulky. Dvě hlavní organizace, jež se zasadily o stanovení r-tabulek jsou Mezinárodní komise pro osvětlování (*Commission internationale*

de l'éclairage, CIE) a Inženýrská společnost pro osvětlování (*Illuminating Engineering Society*, IES). Mezi nejpoužívanější r-tabulky patří:

- **C1** (stanovená CIE; vozovka s betonovým povrchem),
- **C2** (stanovená CIE; vozovka s asfaltovým povrchem),
- **R1** (stanovená IES; převládající difúzní odrazné vlastnosti charakteristické pro povrchy s portlandským cementem),
- **R2** (stanovená IES; kombinace difúzních a zrcadlových vlastností pro asfaltové povrchy složené ze 60 % štěrku velikosti větší než 10 mm),
- **R3** (stanovená IES; mírně zrcadlová odraznost typická pro několik měsíců staré asfaltové povrchy s tmavším povrchem a hrubou strukturou),
- **R4** (stanovená IES; převládající zrcadlové vlastnosti typické pro velmi hladké asfaltové povrchy). [1,8]

Za zmínku stojí ještě například tabulky pro mokré povrchy (W1 – W4), stanovené CIE. Své vlastní r-tabulky používá například Spojené království (UKPA), Nový Zéland (NZN2, NZN4) či Nizozemí (ZOAB). V každé zemi mohou být povrchy vozovek mírně odlišné (vlivem stavebních předpisů) a tudíž je vhodné použití hodnot pro konkrétní texturu povrchu. [8]

Různé odrazné vlastnosti povrchu vozovky, resp. redukované součinitele jasu, znamenají i jiné výsledné jasy. Při otočení výpočtu, kdy se na základě znalosti jasů dopočítávají svítivosti v jednotlivých směrech to znamená, že volba třídy povrchu vozovky přímo ovlivní následný návrh optického systému. Proto bude uvažováno s mírně zrcadlovou odrazností několik měsíců starého asfaltového povrchu s hrubou strukturou, jež reprezentuje r-tabulka R3. Ta se zároveň nejčastěji objevuje jako parametr pro světelně-technický výpočet ve výběrových řízeních.

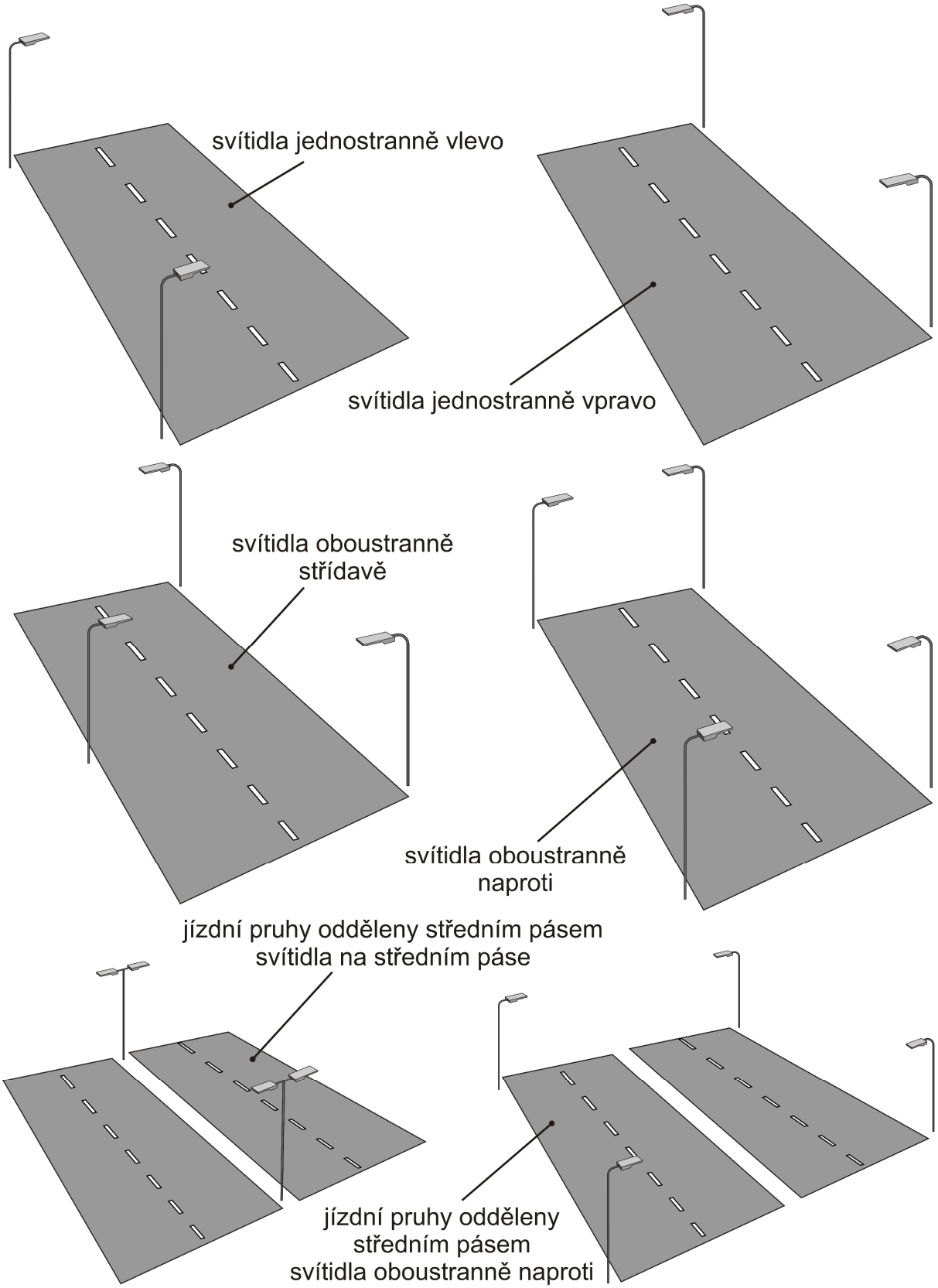
Pro ukázku jsou v tab. 2.1 uvedeny hodnoty redukovaných součinitelů jasu pro povrch komunikace R3. Hodnoty v tabulce jsou v $r \cdot 10^4$, tudíž je při výpočtu nutné tyto hodnoty přepočítat. Hodnoty jsou převzaty z publikace Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) *Design methods for lighting of roads* (1999). [9]

Tab. 2.1 Redukované součinitele jasu $r_k(\tan\varepsilon, \beta)$ [sr^{-1}] pro R3. Hodnoty v r · 10^4. [9]

CIE R3	Úhel β [°]																			
tg ε [-]	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294
0,3	326	326	321	321	317	312	308	308	303	298	294	280	271	262	258	253	249	244	240	240
0,5	344	344	339	339	326	317	308	298	289	276	262	235	217	204	199	199	199	199	194	194
0,8	357	353	353	339	321	303	285	267	244	222	204	176	158	149	149	149	145	136	136	140
1	362	362	352	326	276	249	226	204	181	158	140	118	104	100	100	100	100	100	100	100
1,3	357	357	348	298	244	208	176	154	136	118	104	83	73	70	71	74	77	77	77	78
1,5	353	348	326	267	217	176	145	117	100	86	78	72	60	57	58	60	60	60	61	62
1,8	339	335	303	231	172	127	104	89	79	70	62	51	45	44	45	46	45	45	46	47
2	326	321	280	190	136	100	82	71	62	54	48	39	34	34	34	35	36	36	37	38
2,5	289	280	222	127	86	65	54	44	38	34	25	23	22	23	24	24	24	24	24	25
3	253	235	163	85	53	38	31	25	23	20	18	15	15	14	15	15	16	16	17	17
3,5	217	194	122	60	35	25	22	19	16	15	13	9,9	9	9	9,9	11	11	12	12	13
4	190	163	90	43	26	20	16	14	12	9,9	9	7,4	7	7,1	7,5	8,3	8,7	9	9	9,9
4,5	163	136	73	31	20	15	12	9,9	9	8,3	7,7	5,4	4,8	4,9	5,4	6,1	7	7,7	8,3	8,5
5	145	109	60	24	16	12	9	8,2	7,7	6,8	6,1	4,3	3,2	3,3	3,7	4,3	5,2	6,5	6,9	7,1
5,5	127	94	47	18	14	9,9	7,7	6,9	6,1	5,7										
6	113	77	36	15	11	9	8	6,5	5,1											
6,5	104	68	30	11	8,3	6,4	5,1	4,3												
7	95	60	24	8,5	6,5	5,2	4,3	3,4												
7,5	87	53	21	7,1	5,3	4,4	3,6													
8	83	47	17	6,1	4,4	3,6	3,1													
8,5	78	42	15	5,2	3,7	3,1	2,6													
9	73	38	12	4,3	3,2	2,4														
9,5	69	34	9,9	3,8	3,5	2,2														
10	65	32	9	3,3	2,4	2														
11	62	29	8	3	2,1	1,9														
11	59	26	7,1	2,6	1,9	1,8														
12	56	24	6,3	2,4	1,8															
12	53	22	5,6	2,1	1,8															

2.9 Uspořádání svítidel

Druhy uspořádání svítidel jsou zobrazeny na obr. 2.8. Pro návrh optického systému bylo zvoleno nejčastější uspořádání svítidel a počet jízdních pruhů – jednostranná soustava se dvěma jízdními pruhy, které nejsou odděleny středním pásem.



Obr. 2.8 Druhy uspořádání svítidel. Zdroj: autor dle [4].

2.10 Činitel údržby

Pro hodnocení osvětlení komunikací se používají veličiny osvětlenost a jas v bodě. Do jejich výpočtu se vnáší činitel údržby f_M [-], také známý jako udržovací činitel s dřívějším značením *MF* (maintenance factor). Jeho úkolem je naddimenzování soustavy pro zajištění splnění požadovaných hodnot i na konci tzv. udržovacího cyklu. [1]

Výpočet osvětlenosti a jasu v bodě totiž předpokládá nové svítidlo se jmenovitým světelným tokem. Ten nicméně v průběhu času klesá a spolu s prachovými částicemi, jež se na svítidle usazují, způsobuje postupné snižování výsledné osvětlenosti, resp. jasu. V případě započítání činitele údržby, který nabývá hodnot menších než 1, uměle snížíme počítanou veličinu. Ve skutečnosti tak nastane situace, že u nové soustavy bude osvětlenost či jas vyšší než jejich vypočtené hodnoty. Postupným poklesem světelného toku a zašpiněním svítidla bude dosaženo nominálních hodnot. [1]

Pokud by byla světelná soustava provozována bez údržby, v určitém momentě by klesly hodnoty osvětlenosti či jasu pod požadavek normy, proto je čas od času nutný servisní zásah. Při něm je svítidlo očištěno a případně je vyměněn světelný zdroj (např. u výbojkových svítidel). Tento postup se nazývá udržovací cyklus a jeho pravidelnost je stanovena při návrhu osvětlovací soustavy. [1]

Činitel údržby se pro venkovní osvětlení stanoví ze vztahu

$$f_M = LLMF \cdot LSF \cdot LMF \,, \tag{2.7}$$

kde *LLMF* [-] je činitel stárnutí světelných zdrojů (lumen lamp maintenance factor), *LSF* [-] je činitel funkční spolehlivosti světelného zdroje (lamp survival factor) a *LMF* [-] je udržovací činitel svítidla (luminaire maintenance factor). [1,9]

Hodnota ***LLMF*** reprezentuje poměr mezi světelným tokem po určité době provozu a světelným tokem na začátku provozu. Přímo tedy souvisí s použitým světelným zdrojem. [1]

Hodnota ***LSF*** udává podíl funkčních zdrojů ze zkušebního souboru po určité době provozu. Jinými slovy udává poruchovost světelného zdroje a důležitá je zejména u vnitřních osvětlovacích soustav a zdrojů s častou výměnou. U LED svítidel pro osvětlení pozemních komunikací, kdy se předpokládá okamžitá výměna v případě poruchy je *LSF* = 1. [1]

Hodnota ***LMF*** charakterizuje pokles světelného toku svítidla vlivem nečistot na jeho optické části. Stanovuje se dle tab. 2.2 v závislosti na délce intervalu čištění, znečištění ovzduší a na stupni krytí optické části svítidla. [1]

Tab. 2.2 Hodnoty LMF. [6]

Stupeň krytí optické části svítidla	Znečištění ovzduší	Hodnoty *LMF* v závislosti na délce intervalu čištění (roky)				
		1	1,5	2	2,5	3
IP 2X	Malé	0,82	0,80	0,79	0,78	0,78
	Střední	0,62	0,58	0,56	0,54	0,53
	Velké	0,53	0,48	0,45	0,43	0,42
IP 5X	Malé	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88
	Střední	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82
	Velké	0,89	0,87	0,84	0,80	0,76
IP 6X	Malé	0,93	0,92	0,91	0,90	0,90
	Střední	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
	Velké	0,91	0,90	0,88	0,85	0,83

Velikost znečištění je uvedena v normě *ČSN P 36 0455 Osvětlení pozemních komunikací – Doplňující informace*. **Malým znečištěním** je rozuměno ovzduší, v jehož blízkosti se nenacházejí provozy způsobující kouř či prach a úroveň rozptýlených částic nepřesahuje 150 $mg \cdot m^{-3}$. U **středního znečištění** ovzduší už se předpokládá, že se v okolí nachází aktivity způsobující mírný kouř či prach, intenzita provozu je střední až vysoká a úroveň rozptýlených částic nepřesahuje 600 $mg \cdot m^{-3}$. Po překročení této hodnoty už se předpokládá **velké znečištění** (oblaka kouře nebo prachu). [6]

Pro účely práce uvažujeme svítidlo s IP6X, střední znečištění a interval čištění 2 roky, z čehož plyne hodnota *LMF* = 0,89. Hodnota *LLMF* pro vybranou LED je 0,9. Činitel údržby bude tedy 0,8.

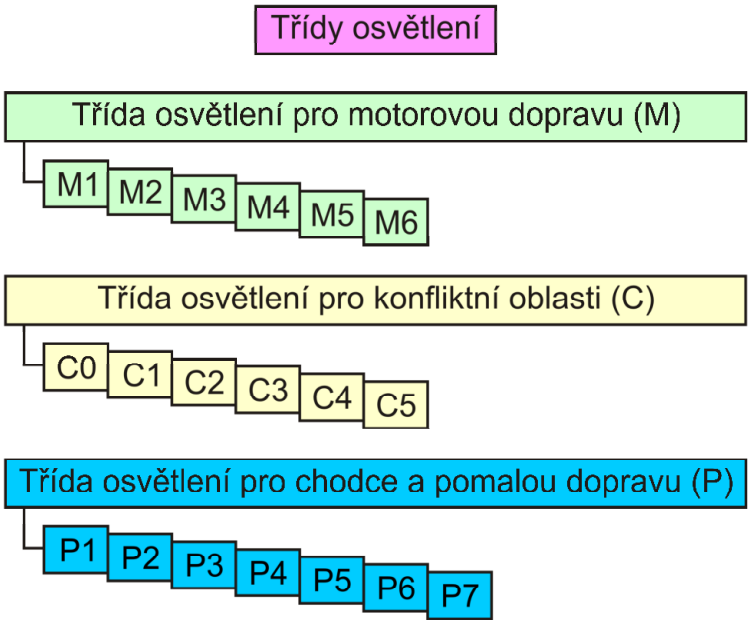
2.11 Třída osvětlení

Aby se dalo osvětlení pozemních komunikací klasifikovat, byl stanoven systém tříd osvětlení. Na základě parametrů dané komunikace (rychlosti provozu, hustotě dopravy apod.) je zvolená příslušná třída osvětlení, jež s sebou nese kvantitativní a kvalitativní požadavky na osvětlení. Třídy osvětlení se dělí na:

- **třída osvětlení pro motorovou dopravu (M, dříve označovaná ME),**
- **třída osvětlení pro konfliktní oblasti (C),**
- **třída osvětlení pro chodce a pomalou dopravu (P).** [2]

Konfliktními oblastmi rozumíme vzájemně se křížící proudy motorové a nemotorové dopravy či místa, kde se mění geometrie vozovky (zúžení, změna počtu jízdních pruhů apod.). [2]

Jednotlivé třídy se pak ještě rozdělují do úrovní podle hladiny osvětlení viz diagram na obr. 2.8. [2]



Obr. 2.8 Dělení tříd osvětlení. Zdroj: autor dle [2].

Základní dělení určuje, které parametry budou hodnoceny. V případě třídy osvětlení C je to hodnota průměrné udržované horizontální osvětlenosti $\overline{E}$ [lx] a celkové rovnoměrnosti – podílu minimální a průměrné horizontální osvětlenosti z definovaného

rastru kontrolních bodů. U třídy osvětlení P se hodnotí pouze minimální a průměrná udržovaná horizontální osvětlenost. Nejvyšší požadavky pak nese třída osvětlení M, které jsou podrobněji popsány v kapitole 2.12. [2]

2.12 Požadavky třídy osvětlení M

U navrhovaného svítidla se nepředpokládá použití u komunikací pro pomalou dopravu či konfliktní oblasti. Z podrobnějšího výčtu jednotlivých parametrů všech tříd osvětlení se proto tato práce vymezuje pouze na požadavky třídy osvětlení M, mezi které patří:

- průměrný udržovaný jas povrchu komunikace $\bar{L}$ [cd·m^{-2}],
- celková rovnoměrnost jasu povrchu vozovky U_o [-],
- podélná rovnoměrnost jasu v ose jízdního pruhu U_l [-],
- prahový přírůstek f_{Tl} [%],
- činitel osvětlení okolí R_{El} [-]. [3]

Konkrétní hodnoty pro jednotlivé úrovně jsou uvedeny v tab. 2.3.

Tab. 2.3 Požadavky třídy osvětlení M. [3]

Třída	$\bar{L}$ [cd.m^{-2}]	U_o [-]	U_l [-]	f_{Tl} [%]	R_{El} [-]
M1	2,00	0,40	0,70	10	0,35
M2	1,50	0,40	0,70	10	0,35
M3	1,00	0,40	0,60	15	0,30
M4	0,75	0,40	0,60	15	0,30
M5	0,50	0,35	0,40	15	0,30
M6	0,30	0,35	0,40	20	0,30

První tři požadavky vychází pouze ze znalosti kontrolní sítě bodů (kapitola 2.2) a výpočtu jasu v bodě (kapitola 2.6). Průměrný udržovaný jas povrchu komunikace $\bar{L}$ [cd·m^{-2}] se vypočte jako průměrná hodnota všech jasů z kontrolní sítě bodů. Celková rovnoměrnost jasu povrchu vozovky U_o [-] je podíl minimální a průměrné hodnoty jasu z kontrolní sítě bodů. Podélná rovnoměrnost jasu v ose jízdního pruhu U_l [-] je podíl minimální a maximální hodnoty jasu z bodů, které se nachází v ose jízdního pruhu. [3,4]

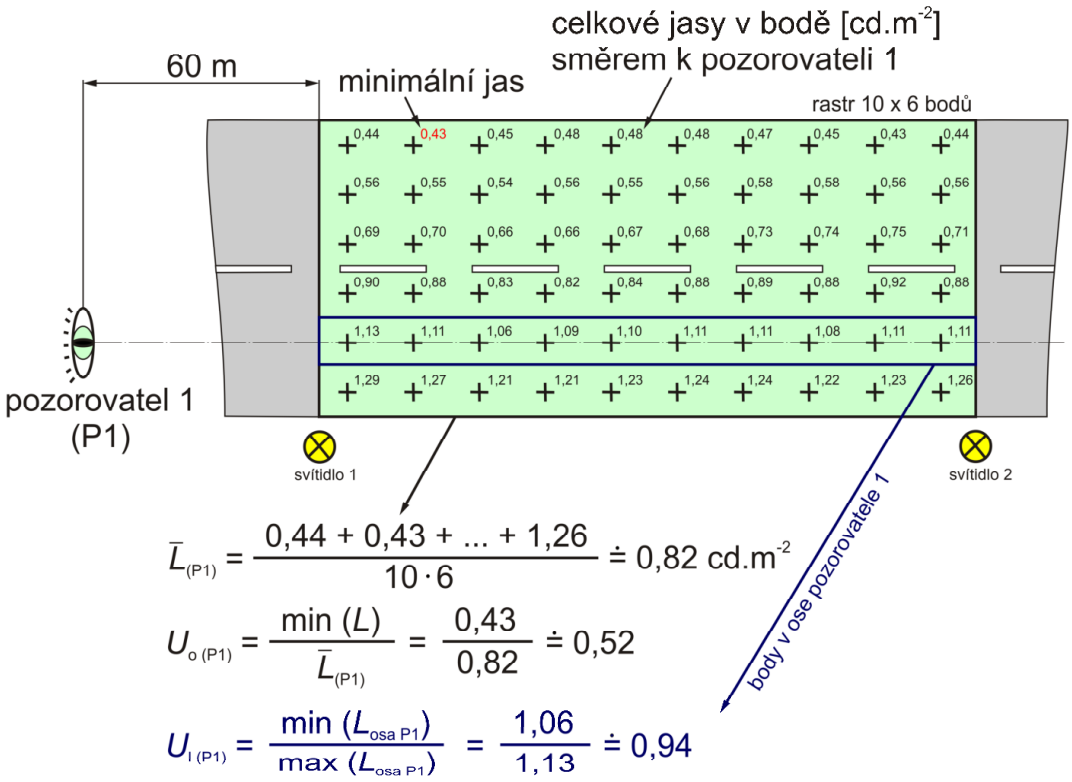
Při dvou a více jízdních pruzích se průměrný udržovaný jas povrchu komunikace a celková rovnoměrnost jasu povrchu vozovky stanovují pro každého pozorovatele

z kontrolních bodů v celé šířce vozovky, nikoliv pro každý jízdní pás jednotlivě. Pouze podélná rovnoměrnost jasu se stanovuje pro body v ose jízdního pruhu daného pozorovatele. [4]

Při vyšším počtu jízdních pruhů tedy musíme zmíněné veličiny počítat pro každého pozorovatele, tudíž vzniká více výsledků. Jako referenční se pak bere minimální hodnota, která je následně porovnána s požadavkem normy *ČSN EN 13201-2 Osvětlení pozemních komunikací – Část 2: Požadavky*. [3,4]

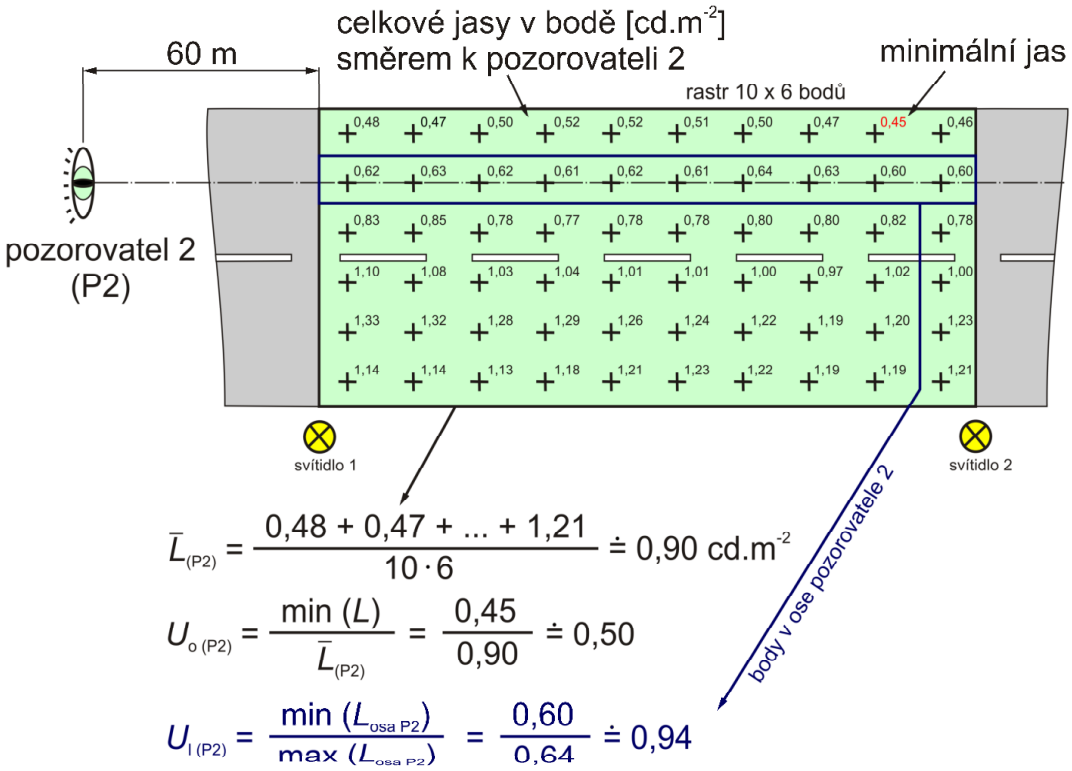
Na obr. 2.9, resp. 2.10 je uveden příklad výpočtu průměrného udržovaného jasu povrchu komunikace, celkové rovnoměrnosti jasu povrchu vozovky a podélné rovnoměrnosti jasu v ose jízdního pruhu pro komunikaci se dvěma jízdními pruhy a pozorovatele 1, resp. pozorovatele 2. Je uvažován rastr 10 x 6 bodů a vzorové hodnoty jasů v bodech. Shrnutí výsledků je uvedeno na obr. 2.11.

Výpočet parametrů pro pozorovatele 1



Obr. 2.9 Postup výpočtu $\bar{L}$, U_o a U_l pro pozorovatele 1. Zdroj: autor.

Výpočet parametrů pro pozorovatele 2



$$\bar{L}_{(P2)} = \frac{0{,}48 + 0{,}47 + \ldots + 1{,}21}{10 \cdot 6} \doteq 0{,}90 \text{ cd.m}^{-2}$$

$$U_{o\,(P2)} = \frac{\min(L)}{\bar{L}_{(P2)}} = \frac{0{,}45}{0{,}90} \doteq 0{,}50$$

$$U_{l\,(P2)} = \frac{\min(L_{osa\,P2})}{\max(L_{osa\,P2})} = \frac{0{,}60}{0{,}64} \doteq 0{,}94$$

Obr. 2.10 Postup výpočtu $\bar{L}$, U_o a U_l pro pozorovatele 2. Zdroj: autor.

Shrnutí výsledků

$$\bar{L} = \min(\bar{L}_{(P1)}, \bar{L}_{(P2)}) = 0{,}82 \text{ cd.m}^{-2}$$
$$U_o = \min(U_{o\,(P1)}, U_{o\,(P2)}) = 0{,}50$$
$$U_l = \min(U_{l\,(P1)}, U_{l\,(P2)}) = 0{,}94$$

Obr. 2.11 Shrnutí výsledků pro oba pozorovatele. Zdroj: autor.

Výpočty prahového přírůstku a činitele osvětlení okolí jsou již komplexnější, proto jsou jim věnovány samostatné kapitoly 2.13 a 2.14.

2.13 Prahový přírůstek

Prahovému přírůstku je přiřazena samostatná kapitola. Při jeho výpočtu již neplatí zahrnutí svítidel a poloha pozorovatele definované v kapitolách 2.3 a 2.7.

U soustav veřejného osvětlení je (kromě dodržení požadavků na osvětlení vozovky) nutné zajistit, aby samotná svítidla neoslňovala řidiče. K oslnění dochází tehdy, převyšuje-li jas svítidel adaptační jas, kterému se lidské oko přizpůsobuje. Pro popis míry oslnění bylo zavedeno hodnocení tzv. prahového přírůstku, který je definován

jako zvýšení prahu rozlišitelnosti daného zkušebního objektu, jež je typický pro zrakové vnímání řidiče. Stejně jako v případě jasu v bodě se při stanovení prahového přírůstku zahrnuje do výpočtu pozorovatel, resp. jeho poloha. Ta se nicméně liší od polohy pozorovatele pro výpočet jasu v bodě. [1,4]

Prahový přírůstek f_{TI} (dřívější značení *TI*) [%] se určí dle vztahu

$$f_{TI} = 65 \frac{L_v}{\left(\overline{L}_i\right)^{0,8}}, \tag{2.8}$$

kde L_v [cd·m^{-2}] je počáteční ekvivalentní závojový jas a $\overline{L}_i$ [cd·m^{-2}] je počáteční průměrný jas povrchu komunikace. Oproti udržovaným hodnotám se při počátečním jasu rozumí soustava nových svítidel s jmenovitým světelným tokem (tzn. při činiteli údržby f_M = 1). Vztah 2.8 platí pro 0,05 cd·m^{-2} < $\overline{L}_i$ ≤ 5 cd·m^{-2}. V případě tříd osvětlení M, na jejichž osvětlení je navrhováno řešené svítidlo, se hodnota průměrného (udržovaného) jasu vozovky pohybuje mezi 0,3 cd·m^{-2} a 2 cd·m^{-2} a tudíž je možné vztah použít. [3,4]

Počáteční průměrný jas povrchu komunikace se spočítá jako podíl průměrného udržovaného jasu povrchu komunikace a činitele údržby dle vztahu

$$\overline{L}_i = \frac{\overline{L}}{f_M}. \tag{2.9}$$

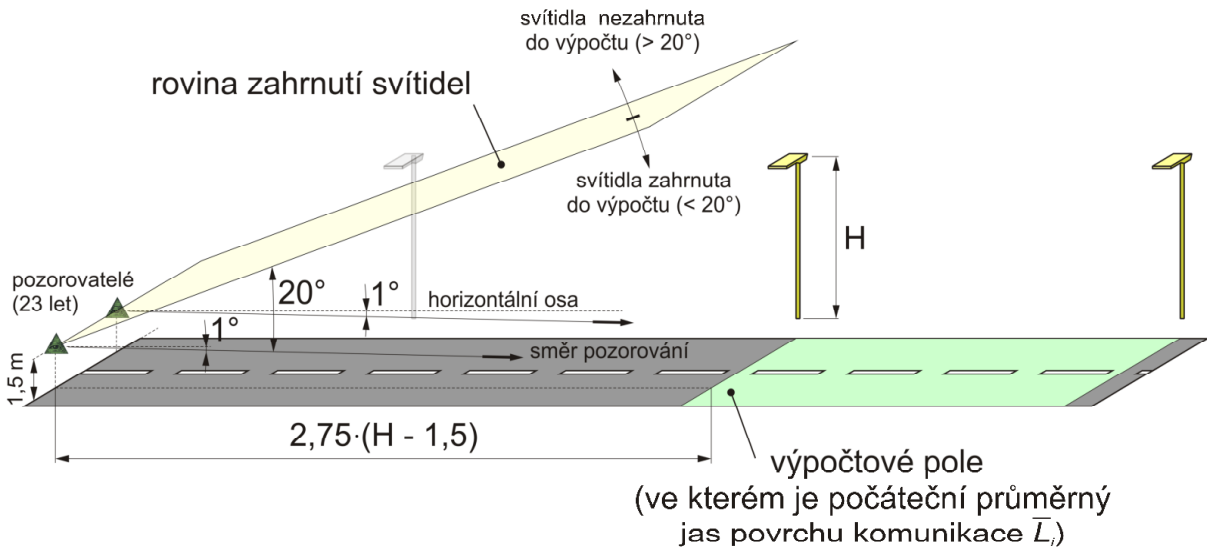
Počáteční ekvivalentní závojový jas se vypočte jako součet příspěvků dílčích závojových jasů od zahrnutých svítidel dle vztahu

$$L_v = \sum_{k=1}^{n_{LU}} L_{vk} = \sum_{k=1}^{n_{LU}} \left\{ 9{,}86 \cdot \left[1 + \left(\frac{A_y}{66{,}4} \right)^4 \right] \cdot \frac{E_k}{\theta_k^2} \right\}, \tag{2.10}$$

kde n_{LU} [-] je počet svítidel zahrnutých ve výpočtu, L_{vk} [cd·m^{-2}] je příspěvek závojového jasu od *k*-tého svítidla, A_y [roky] je věk pozorovatele, E_k [lx] je počáteční osvětlenost oka pozorovatele od *k*-tého svítidla v normálové rovině na směr pozorování a θ_k [°] je úhel mezi směrem pozorování a středem *k*-tého svítidla. [4]

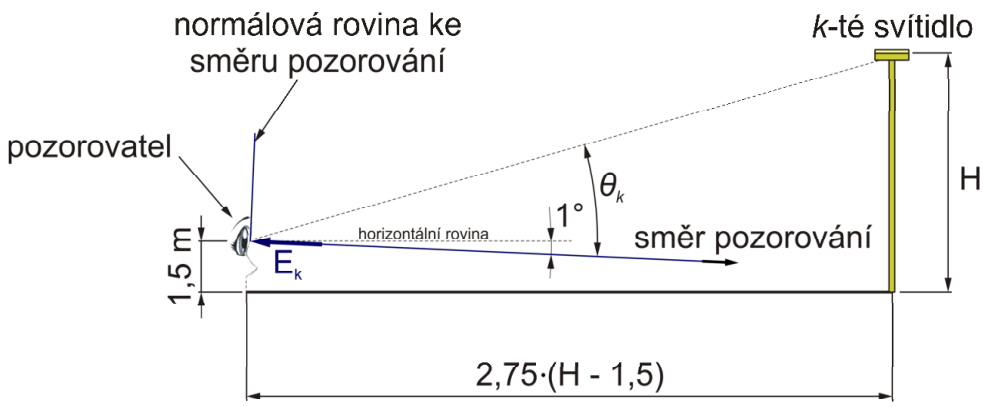
Konvenčně používanými hodnotami jsou věk pozorovatele 23 let a směr pozorování 1 ° pod horizontální osou. Při výpočtu se stejně jako u jasu v bodě zahrnuje

pozorovatel v každém jízdním pruhu ve výšce 1,5 m nad povrchem komunikace. Jejich podélná vzdálenost od začátku výpočtového pole je 2,75·(*H*-1,5), kde *H* [m] je montážní výška svítidla. Do výpočtu jsou zahrnuta všechna svítidla, která se nacházejí pod rovinou, která prochází všemi pozorovateli a s horizontální rovinou svírá úhel 20 ° (viz obr. 2.12) až do vzdálenosti 500 m od pozice pozorovatele. [4]



Obr. 2.12 Geometrické uspořádání pro výpočet prahového přírůstku. Zdroj: autor dle [4].

Na obr. 2.13 je ještě znázorněno geometrické uspořádání počáteční osvětlenosti oka pozorovatele od *k*-tého svítidla v normálové rovině na směr pozorování E_k a úhel mezi směrem pozorování a středem *k*-tého svítidla θ_k.

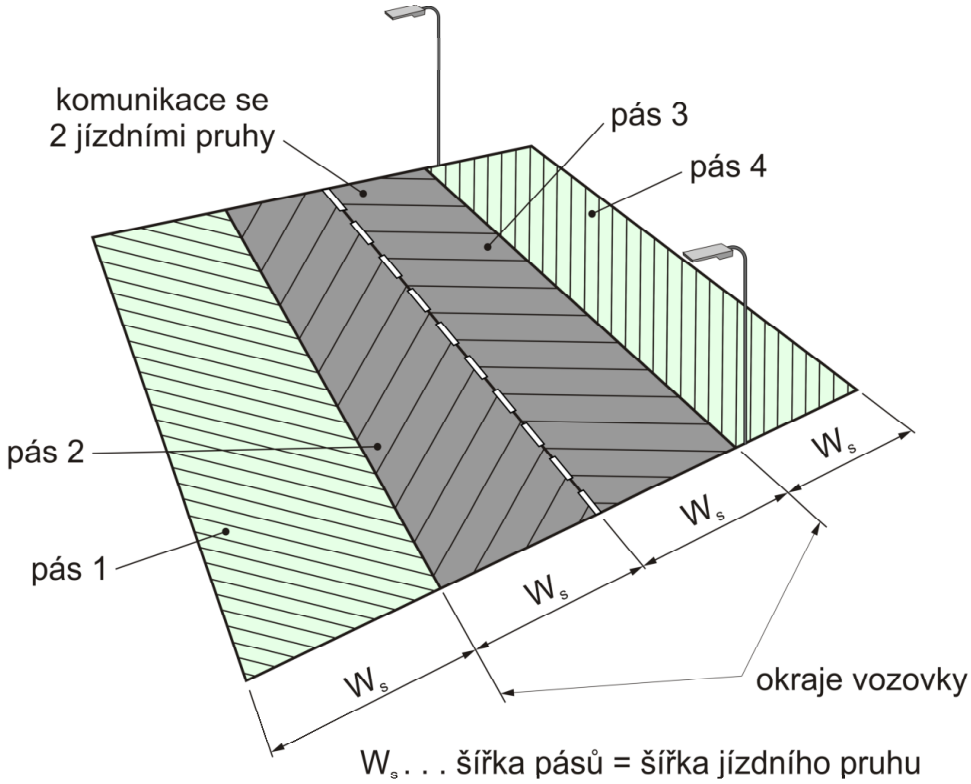


Obr. 2.13 Geometrické uspořádání pro výpočet osvětlenosti oka. Zdroj: autor dle [1]

Při více jízdních pruzích (resp. více pozorovatelích) se jako referenční bere maximální hodnota f_{TI}, která je následně porovnána s požadavkem normy *ČSN EN 13201-2 Osvětlení pozemních komunikací – Část 2: Požadavky*. [3]

2.14 Činitel osvětlení okolí

Poslední z hodnocených veličin u třídy osvětlení M je činitel osvětlení okolí. Jeho funkcí je zabránit náhlým změnám osvětlenosti mezi vozovkou a jejím okolím, které by jinak mohly vést k nebezpečí přehlédnutí chodců či zvěře za hranou vozovky. Činitel osvětlení okolí je definován jako podíl průměrné osvětlenosti pásu definované šířky přiléhajícímu k okraji vozovky z vnější strany ku průměrné osvětlenosti pásu shodné šířky, který přiléhá ke stejnému okraji komunikace ze strany vnitřní. Délka pásu je definována délkou výpočtového pole (viz výpočet horizontální osvětlenosti či jasu v bodě) resp. vzdáleností mezi prvním a druhým svítidlem. Tento poměr se stanovuje u obou okrajů vozovky viz obr. 2.14, kde je znázorněna situace pro vozovku o dvou jízdních pruzích. [4]



Obr. 2.14 Pásy osvětlenosti u komunikace se dvěma pruhy. Zdroj: autor dle [4].

Činitel osvětlení okolí R_{EI} [-] se pro pás 1 a 2 vypočítá dle vztahu

$$R_{EI12} = \frac{\overline{E}_{h,pás1}}{\overline{E}_{h,pás2}}, \tag{2.11}$$

kde $\overline{E}_h$ [lx] je průměrná horizontální osvětlenost daného pásu, která se určí průměrem jednotlivých osvětleností v bodech kontrolní sítě daného pásu. Jejich výpočet a kontrolní síť bodů je stejná jako v kap. 2.1 a 2.2. [4]

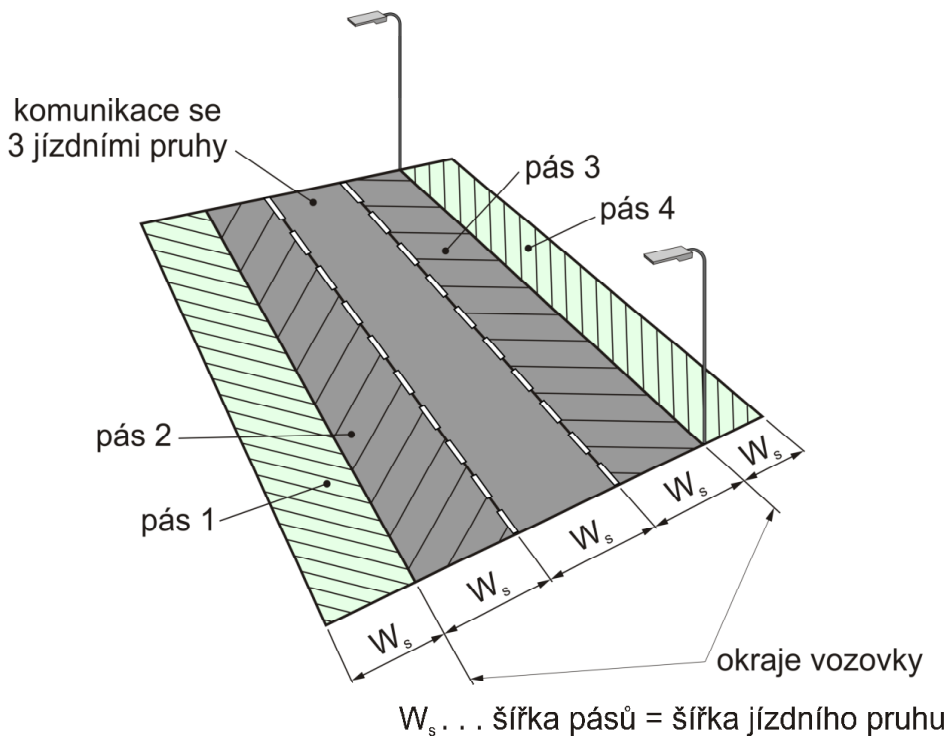
Analogicky se vypočte činitel osvětlení okolí pro pásy 3 a 4

$$R_{EI34} = \frac{\overline{E}_{h,pás4}}{\overline{E}_{h,pás3}}. \tag{2.12}$$

Výsledná hodnota se určí jako minimum z obou činitelů dle vztahu

$$R_{EI} = \min(R_{EI12}; R_{EI34}). \tag{2.13}$$

Při více jízdních pruzích je výpočet analogický, nicméně se uvažují pouze krajní jízdní pruhy viz obr. 2.15. [4]



Obr. 2.15 Pásy osvětlenosti u komunikace se třemi pruhy. Zdroj: autor dle [4].

Pokud jsou jízdní pruhy odděleny středním pásem, který je zároveň užší než 10 m, uvažují se opět pouze dva nejvzdálenější krajní jízdní pruhy. Při středním pásu širším než 10 m se už jednotlivé komunikace posuzují samostatně. [4]

3 NÁVRH ALGORITMU PRO VÝPOČET SVÍTIVOSTI

V kapitole 2 byla popsána metodika výpočtu hodnotících parametrů pro třídu osvětlení M. V této kapitole je popsán návrh algoritmu, jenž všechny popsané veličiny po zadání vstupních údajů vypočítá. Důvody pro vytvoření algoritmu jsou dva. V prvé řadě slouží pro ověření jednotlivých návrhů optických čoček, kdy výstupem z optického softwaru je tabulka svítivostí, jež následně vstupuje do algoritmu, který dopočítá všechny kýžené hodnoty pro následné porovnání s normou. Primárním účelem návrhu je ale úprava algoritmu, při které se výpočet otočí a na základě vstupních jasů v jednotlivých bodech výpočtové sítě budou dopočítány svítivosti. Právě tyto svítivosti budou cenným vodítkem při návrhu optické čočky.

Jako programovací jazyk byl zvolen Visual Basic for Applications, který je využíván v balíčku Microsoft Office. Celý algoritmus bude naprogramován v prostředí softwaru Microsoft Excel. Na začátku je nutné si stanovit vstupy a výstupy algoritmu. Mezi **vstupy** do výpočtu patří:

- tabulka svítivosti,
- světelný tok svítidla,
- činitel údržby,
- pozice pozorovatelů,
- r-tabulky,
- geometrické uspořádání světelných bodů (rozteč, výška, přesah),
- šířka komunikace.

Výstupem výpočtu jsou parametry pro hodnocení osvětlení třídy M, tedy:

- průměrný udržovaný jas povrchu komunikace $\bar{L}$ [cd·m^{-2}],
- celková rovnoměrnost jasu povrchu vozovky U_o [-],
- podélná rovnoměrnost jasu v ose jízdního pruhu U_l [-],
- prahový přírůstek f_{Tl} [%],
- činitel osvětlení okolí R_{El} [-].

Algoritmus by měl být nastaven tak, že při změně vstupů automaticky přepočítá výstupní hodnoty. V následujících kapitolách bude popsán postup tvorby jednotlivých částí algoritmu.

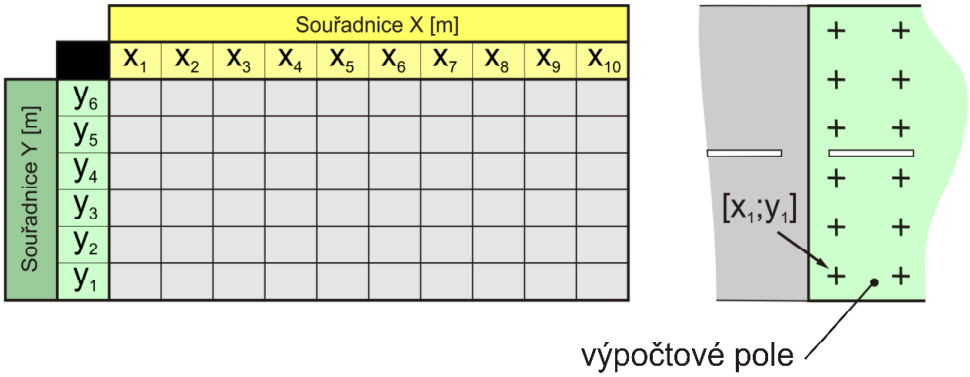
3.1 Výpočet horizontální osvětlenosti v bodě

Z rovnice 2.1 plyne, že pro výpočet horizontální osvětlenosti v bodě je nutná znalost svítivosti $I_k(C,\gamma)$ [cd] *k*-tého svítidla (definovaná úhly C, γ), činitele údržby f_M [-], úhlu dopadu světelného paprsku do bodu vůči normále povrchu vozovky ε_k [°] a montážní výšky *k*-tého svítidla H_k [m].

Z těchto parametrů jsou činitel údržby a montážní výška vstupními veličinami algoritmu, a tudíž je není nutné počítat. Pro výpočet ostatních parametrů je nutné nejdříve určit pozice výpočtových bodů viz kap. 2.2.

3.1.1 Síť kontrolních bodů

Pro zkušební návrh optické čočky se uvažuje rozteč mezi svítidly 30 m. Počet bodů v podélném směru pro rozteče $S \leq 30$ m je 10 viz kapitola 2.2. V příčném směru se uvažují 3 body pro jízdní pás – celkem tedy 6. Uvažovaný rastr je tedy 10 x 6 bodů viz obr. 3.1.



Obr. 3.1 Souřadnice v tabulce a znázornění v rastru bodů. Zdroj: autor.

Souřadnice v obou směrech je nutné spočítat pro obecnou rozteč S, resp. šířku jízdního pruhu W_L. Ze znalosti a úpravy vztahů v kap. 2.2 je možné definovat vzdálenost souřadnice *x* jako

$$x_i = \frac{S}{20} + (i-1)\cdot\frac{S}{10}, \tag{3.1}$$

kde x_i [m] je *i*-tá souřadnice výpočtového bodu v podélném směru viz obr. 3.1. Vztah 3.1 platí pro rozteč svítidel menší než 30 metrů, resp. 10 bodů v podélném směru.

Obdobně se souřadnice ve směru *y* určí jako

$$y_j = \frac{W_L}{6} + (j-1)\cdot\frac{W_L}{3}, \tag{3.2}$$

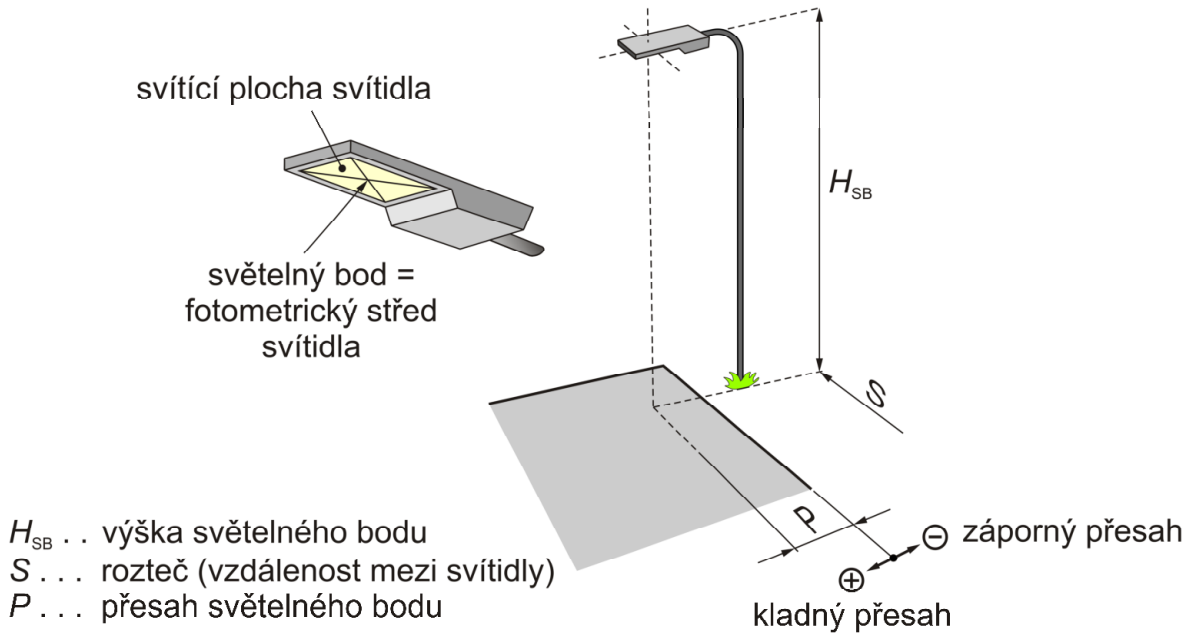
kde y_j [m] je *j*-tá souřadnice výpočtového bodu v příčném směru viz obr. 3.1. Vztah 3.2 platí pro uvažovanou komunikaci se dvěma jízdními pruhy, resp. 6 body v příčném směru.

Protože vstupem do výpočtu má být šířka komunikace W_R [m], nikoliv šířka jízdního pruhu, je nutná úprava vztahu 3.2 na

$$y_j = \frac{W_R}{12} + (j-1)\cdot\frac{W_R}{6}. \tag{3.3}$$

3.1.2 Poloha svítidel

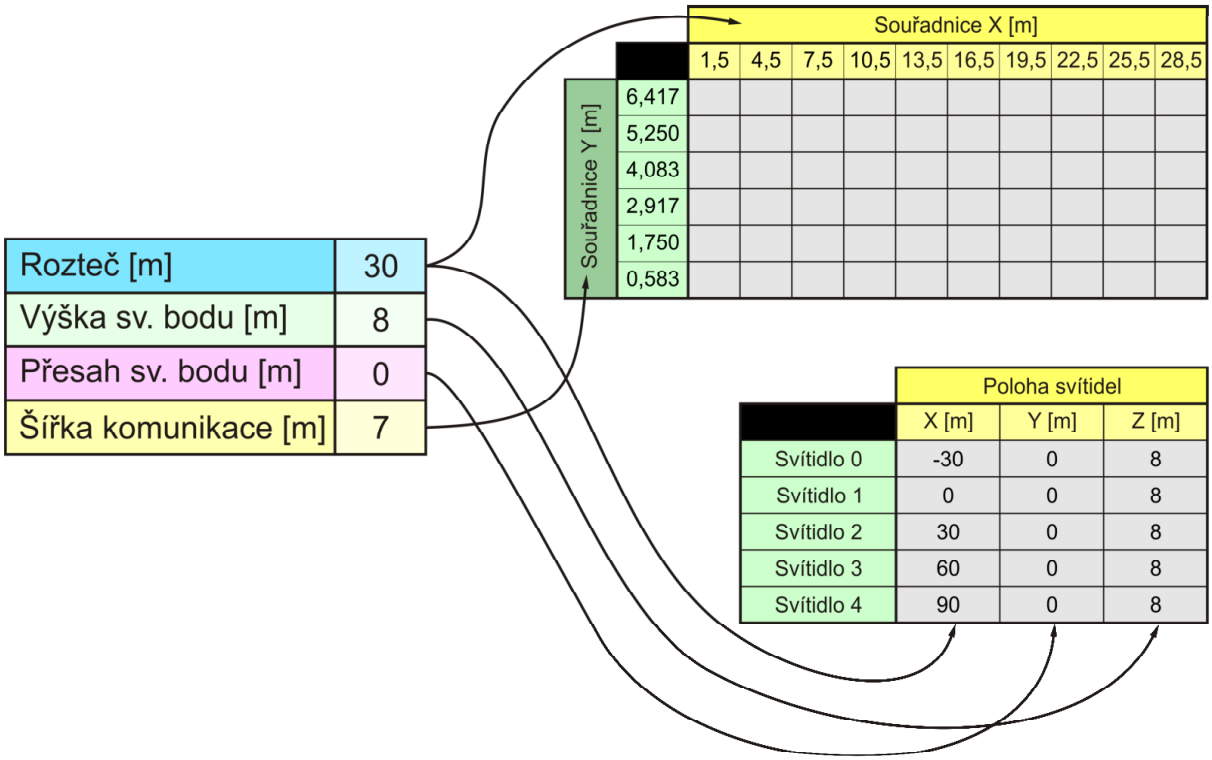
Poloha svítidel, resp. jejich světelných bodů se dá určit na základě třech vstupních parametrů – výšky světelného bodu H_{SB} [m], rozteče svítidel S [m] a přesahu světelného bodu P [m]. Všechny tři veličiny a poloha světelného bodu je znázorněna na obr. 3.2.



Obr. 3.2 Znázornění rozteče, výšky, přesahu a polohy světelného bodu. Zdroj: autor.

Kontrolní síť bodů je rozmístěna tak, že předpokládá pozici prvního svítidla na nulové souřadnici v *x*-ovém směru. Na obě strany jsou pak svítidla rozmístěna o násobek vzdálenosti rozteče *S*. Ve směru *y* jsou všechny světelné body v řadě ustaveny na hodnotu přesahu *P*, který může nabývat kladných a záporných hodnot viz obr. 3.2. Konečně *z*-ová souřadnice vyjadřuje výšku světelného bodu H_{SB} a pro všechny svítidla v řadě je stejná.

Návrh optické čočky bude vycházet z varianty, kdy je rozteč $S = 30$ m, výška světelného bodu $H_{SB} = 8$ m, přesah světelného bodu $P = 0$ m (tedy případ, kdy průmět světelného bodu leží na hraně vozovky) a šířka vozovky $W_R = 7$ m. S využitím předchozích vztahů a úvah bude pro zmíněnou konfiguraci vypadat postup algoritmu viz obr. 3.3.



Obr. 3.3 Ukázka postupu výpočtu souřadnic výpočtových bodů a poloh svítidel. Zdroj: autor.

3.1.3 Zahrnutí svítidel

Kapitola 2.3 popisuje, která svítidla se započítávají do příspěvku horizontální osvětlenosti v bodě. Protože tento návrh uvažuje jednostrannou soustavu, tj. podélnou řadu svítidel, stačí nastavit algoritmus tak, aby vytyčil hranici zahrnutí svítidel pouze

v podélném směru. Nejdříve se vezme vzdálenost první příčné řady (reprezentuje jí veličina x_1), od které se odečte vzdálenost $5 \cdot H_{SB}$, čímž se určí hranice směrem k pozorovateli. Poté se určí vzdálenost hranice pro poslední příčnou řadu bodů tak, že se k její souřadnici x_{10} přičte délka $12 \cdot H_{SB}$. Tím je vytvořena oblast svítidel, jejichž příspěvek se bude alespoň jednou ve výpočtu přičítat k celkové hodnotě horizontální osvětlenosti v bodě. Protože je ale hranice „plovoucí“, může nastat situace, kdy dva vedlejší výpočtové body budou přičítat příspěvek od jiného počtu svítidel. Taková situace je pro uvažovanou konfiguraci (S = 30 m, H_{SB} = 8 m) znázorněna na obr. 3.4.

Obr. 3.4 Ukázka (ne)zahrnutí svítidel pro dva vedlejší body. Zdroj: autor.

Na základě popsání principu je možné formulovat podmínku pro svítidla před začátkem výpočtového pole

$$\text{KDYŽ } \left[\left(x_i - 5 \cdot H_{SB}\right) \leq X_{Sk}\right], \tag{3.4}$$

kde x_i [m] je i-tá souřadnice výpočtového bodu v podélném směru a X_{Sk} [m] je x-ová souřadnice k-tého svítidla před výpočtovým bodem (směrem k pozorovateli). V případě, že je podmínka splněna, vypočítaný příspěvek horizontální osvětlenosti v bodě se přičte k celkové hodnotě.

Analogicky se stanoví podmínka pro svítidla za výpočtovým bodem (směrem od pozorovatele), tj.

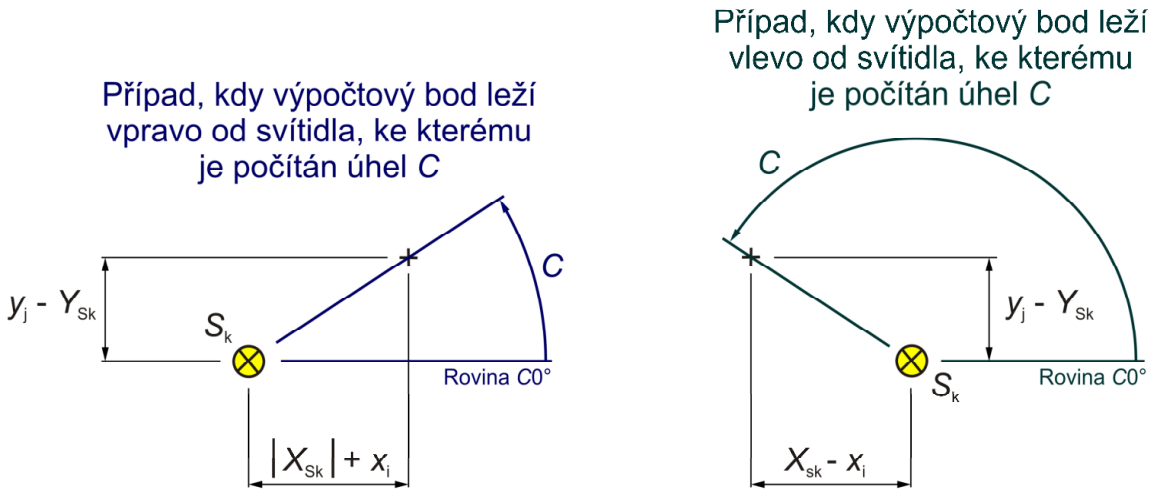
$$\text{KDYŽ } \left[\left(x_i + 12 \cdot H_{SB}\right) \geq X_{Sk}\right]. \tag{3.5}$$

3.1.4 Úhel roviny C

Dle kap. 2.1 vstupuje do výpočtu horizontální osvětlenosti v bodě mj. i svítivost *k*-tého svítidla $I_k(C,\gamma)$ [cd] (definovaná úhly C,γ) od svítidla směrem k výpočtovému bodu. Nejprve je tedy nutné vypočítat oba úhly a na jejich základě přiřadit hodnotu svítivosti z tabulky. V této kapitole je popsán výpočet pro úhel, resp. rovinu *C*.

Vstupem do výpočtu jsou pouze souřadnice výpočtového bodu a souřadnice svítidla. Úhel *C* je nutné vypočítat pro všechny body v rastru, a to postupně pro každé zahrnuté svítidlo. Využijeme k tomu seznam svítidel viz. kap. 3.1.3. Úhel vypočteme pro všechna zahrnutá svítidla a podmínku pro sčítání příspěvků osvětlenosti využijeme teprve až při celkovém součtu v dalších krocích. V opačném případě by bylo nutné tuto podmínku aplikovat pro všechny dílčí výpočty celkové horizontální osvětlenosti. Jednodušším způsobem je tedy vypočítat dílčí veličiny až po příspěvky horizontální osvětlenosti všech svítidel ke všem bodům ve výpočtové síti a na konci si podmínkami určit, které z příspěvků do celkové hodnoty zahrnout.

Pro stanovení úhlu *C* je ještě nutné si uvědomit, jak jsou definované roviny pro svítidla veřejného osvětlení. Úhel počítáme od roviny *C*0 °, nicméně není třeba vždy určovat úhel v kladném směru. Hodnota úhlu může nabývat i záporných hodnot, pokud však adekvátně upravíme tabulku svítivosti. Problematiku rovin *C* popisuje kap. 2.4 a znázornění úhlu *C* od svítidla k obecnému bodu je zobrazena na obr. 3.5. Popsány jsou dvě situace – případ, kdy se výpočtový bod nachází vpravo od svítidla a případ, kdy je výpočtový bod blíže k pozorovateli než samotné svítidlo.



Obr. 3.5 Výpočet úhlu C pro dva případy uspořádání. Zdroj: autor.

Z obr. 3.5 vyplývá, že se úhel *C* [°] pro situaci, kdy výpočtový bod leží vpravo od svítidla určí dle vztahu

$$C = \arctan\left(\frac{y_j - Y_{Sk}}{|X_{Sk}| + x_i}\right), \tag{3.6}$$

kde y_j [m] je souřadnice výpočtového bodu ve směru *y*, Y_{Sk} [m] je souřadnice svítidla ve směru *Y*, X_{Sk} [m] je souřadnice svítidla ve směru *X* a x_i [m] je souřadnice výpočtového bodu ve směru *x*.

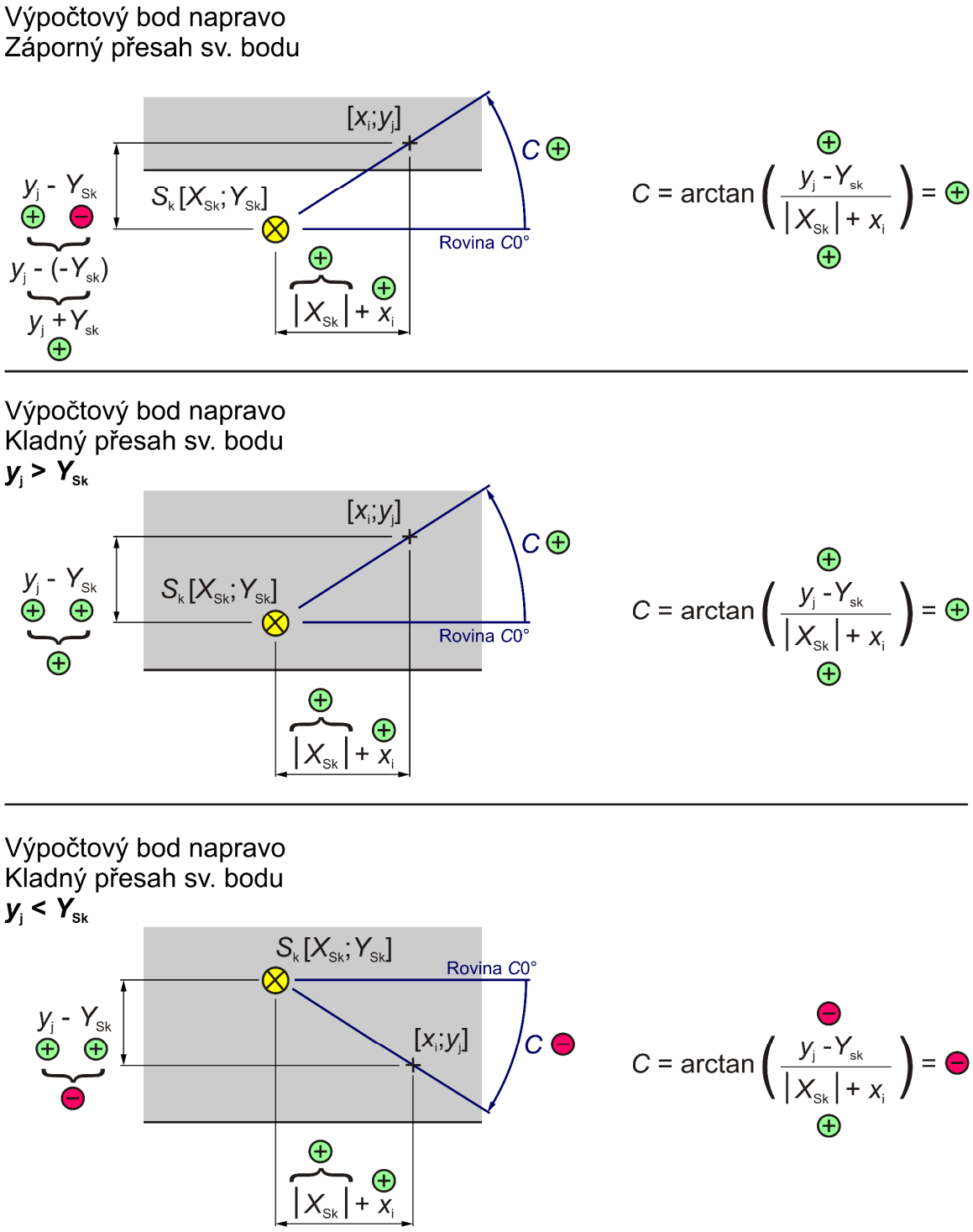
Pro situaci, kdy výpočtový bod leží vlevo od svítidla se použije rovnice

$$C = 180 - \arctan\left(\frac{y_j - Y_{Sk}}{X_{Sk} - x_i}\right). \tag{3.7}$$

Z předchozích kapitol je zřejmé, že souřadnice výpočtových bodů nabývají vždy hodnot větších než 1, protože se určují z kladných hodnot rozteče svítidel a šířky komunikace. To ovšem neplatí pro souřadnice svítidel, které mohou nabývat záporných hodnot ve směru *x* a *y*. Problém záporné *X*-ové souřadnice svítidla v případě, že svítidlo leží vlevo od výpočtového bodu (resp. před výpočtovým bodem směrem k pozorovateli) je vyřešen absolutní hodnotou. Pokud počítáme úhel *C* k bodu od svítidla, jež leží vpravo (tedy za výpočtovým bodem směrem od pozorovatele) není nutné používat absolutní hodnotu, protože *X*-ové souřadnice těchto svítidel jsou z principu vždy kladné.

Možný problém nastává při výpočtu vzdálenosti *y*. V případě velkého kladného přesahu může vyjít vzdálenost $(y_j - Y_{Sk})$ záporná a tím i záporný úhel *C*, což samo o sobě není chyba. V tabulce svítivostí pak stačí pro roviny *C* definovat rozsah od - 90 ° až po 270 ° namísto rozsahu 0 °až 360 °.

Na obr. 3.6 jsou ještě shrnuty všechny obecné situace, které mohou nastat v případě, že je výpočtový bod napravo od svítidla.

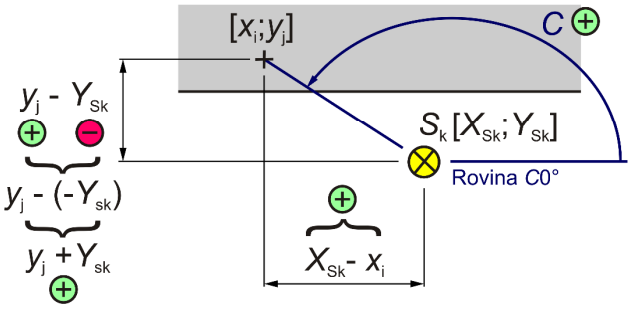


Obr. 3.6 Výpočet úhlu C pro bod vpravo od svítidla a různé varianty pozic. Zdroj: autor.

Z obr. 3.6 je patrné, že rovnice 3.6 funguje pro všechny tři zmíněné varianty pozice svítidla a výpočtového bodu. Existuje ještě jedna speciální pozice, kdy jsou souřadnice *y* totožné. V ten moment je úhel *C* rovný nule.

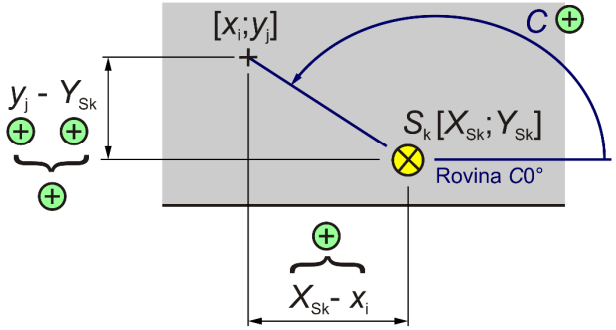
Stejně tak je třeba ověřit všechny situace pro výpočtový bod, jež leží vlevo od svítidla.

Výpočtový bod nalevo
Záporný přesah sv. bodu



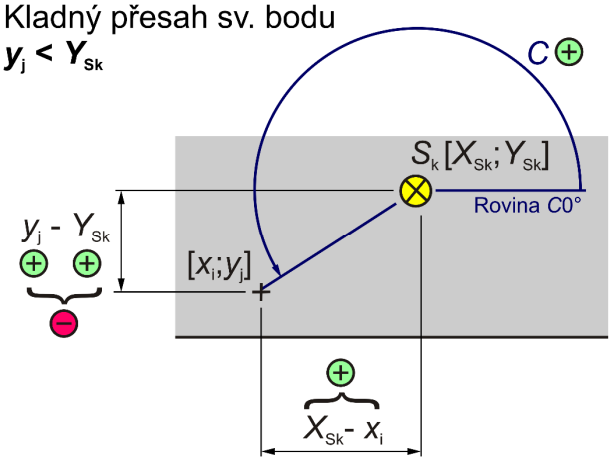
$$C = 180 - \arctan\left(\frac{y_j - Y_{sk}}{X_{Sk} - x_i}\right) = \oplus$$

Výpočtový bod nalevo
Kladný přesah sv. bodu
$y_j > Y_{Sk}$



$$C = 180 - \arctan\left(\frac{y_j - Y_{sk}}{X_{Sk} - x_i}\right) = \oplus$$

Výpočtový bod nalevo
Kladný přesah sv. bodu
$y_j < Y_{Sk}$



$$C = 180 - \underbrace{\arctan\left(\frac{y_j - Y_{sk}}{X_{Sk} - x_i}\right)}_{C = 180 - (\ominus) = \oplus}$$

Obr. 3.7 Výpočet úhlu C pro bod vlevo od svítidla a různé varianty pozic. Zdroj: autor.

Na obr. 3.7 je ověření správnosti výpočtu úhlu *C* pro varianty, kdy je výpočtový bod vlevo od svítidla. Stejně jako v předchozím případě nastává ještě možnost, kdy jsou souřadnice *y* totožné. V tu chvíli je úhel *C* roven 180 °.

Jestliže jsme si v předchozím textu ověřili správnost obou vzorců, zbývá už jenom formulovat podmínku, která stanoví, který ze vzorců se má použít. V prostředí MS Excel proto využijeme funkci KDYŽ, která má syntaxi

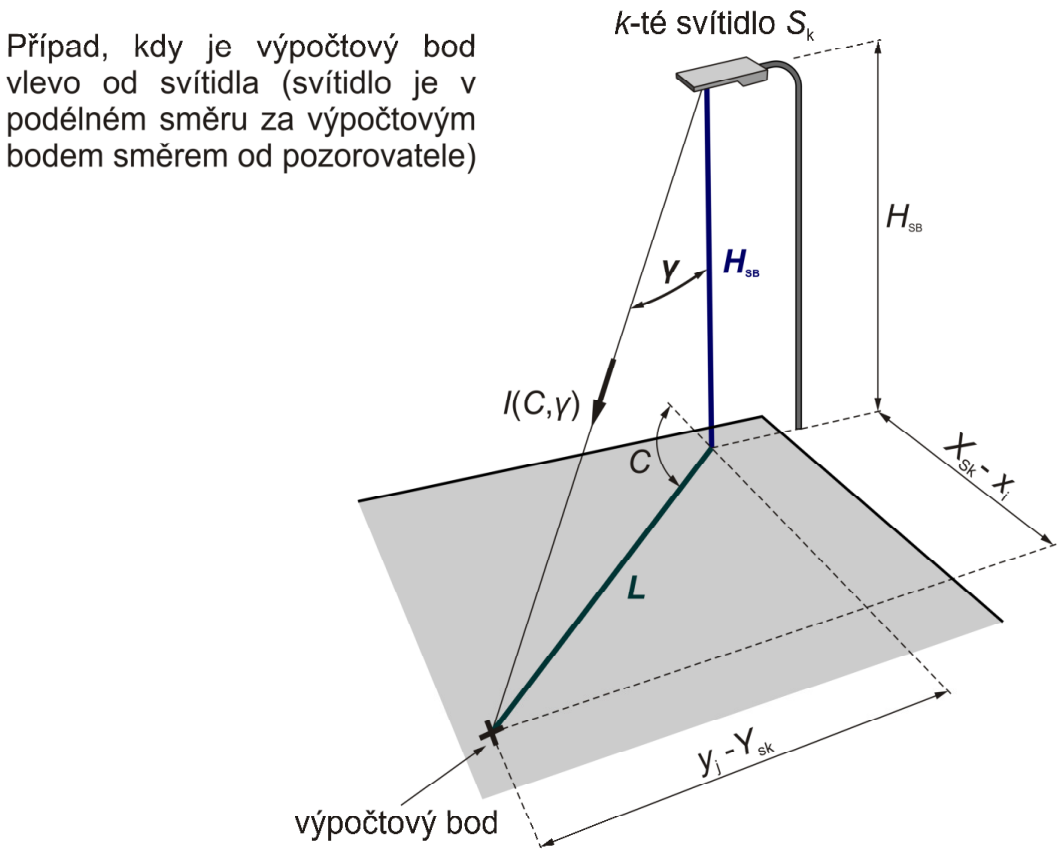
$$\text{KDYŽ (PODMÍNKA; ANO; NE).} \tag{3.7}$$

Jako podmínku využijeme porovnání x-ové souřadnice výpočtového bodu a svítidla. Pak bude vzorec formulován jako

$$\text{KDYŽ}\left(X_{Sk} < x_i\,;\arctan\left(\frac{y_j - Y_{Sk}}{|X_{Sk}| + x_i}\right);180 - \arctan\left(\frac{y_j - Y_{Sk}}{X_{Sk} - x_i}\right)\right). \tag{3.8}$$

3.1.5 Úhel *γ*

Druhým úhlem pro stanovení svítivosti $I_k(C,\gamma)$ je úhel γ [°], tj. úhel dopadu paprsku od svítidla (resp. světelného bodu) k výpočtovému bodu.



Obr. 3.8 Geometrické uspořádání pro výpočet úhlu γ pro bod vlevo od svítidla. Zdroj: autor.

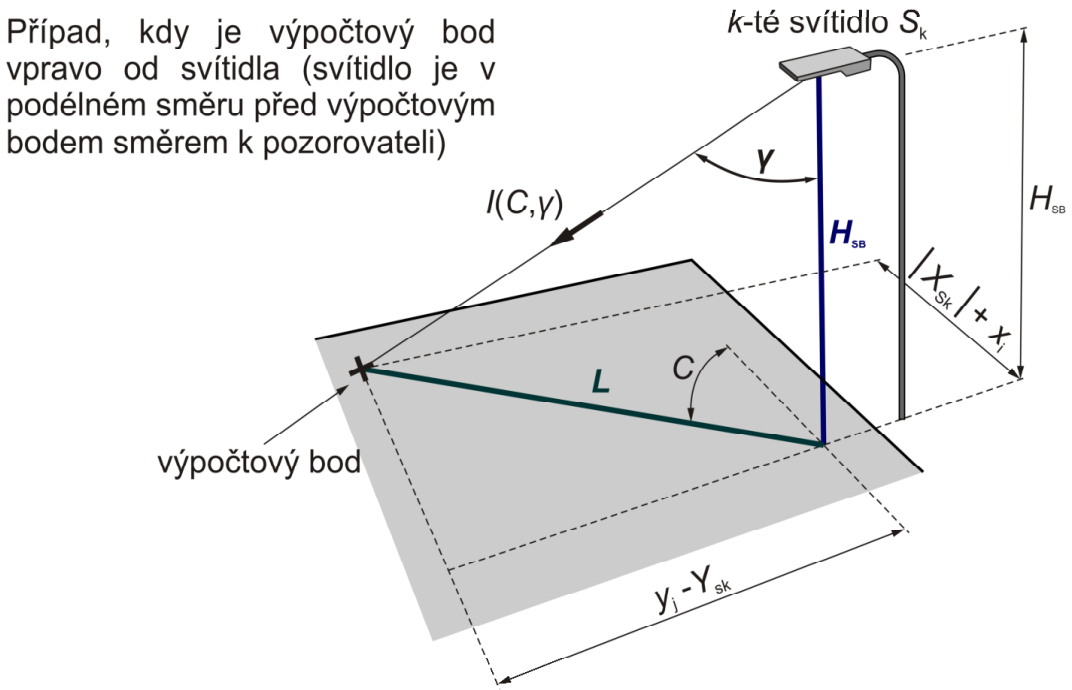
Geometrické uspořádání je možné pozorovat na obr. 3.8, kde je situace zobrazena pro případ, kdy je výpočtový bod vlevo od svítidla. Vstupem do výpočtu jsou souřadnice světelného bodu (*X*, *Y* i *Z*) a souřadnice výpočtového bodu (*x* a *y*). Kromě *Z*-ové souřadnice světelného bodu, jíž reprezentuje výška světelného bodu H_{SB} [m], byly ostatní souřadnice již popsány v kapitole 3.1.4. Principem také výpočet odpovídá předchozí kapitole, kde se počítal úhel v trojúhelníku. Ve výpočtu úhlu γ se ve stejném trojúhelníku počítá jeho přepona. Je tedy možné využít všechny předpoklady z předchozí kapitoly a pro případ, kdy je výpočtový bod vlevo od svítidla počítat úhel γ dle vztahu

$$\gamma = \arctan\left(\frac{L}{H_{SB}}\right) = \arctan\left(\frac{\sqrt{\left(X_{Sk} - x_i\right)^2 + \left(y_j - Y_{Sk}\right)^2}}{H_{SB}}\right), \tag{3.9}$$

kde *L* [m] je délka odvěsny.

Pouze v případě, že je $y_j < Y_{Sk}$ bude mít jedna strana trojúhelníku zápornou hodnotu, nicméně tento problém je hned vzápětí vyřešen druhou mocninou celého výrazu.

Druhým případem je pozice výpočtového bodu vpravo od svítidla viz obr. 3.9.



Obr. 3.9 Uspořádání pro výpočet úhlu γ pro bod vpravo od svítidla. Zdroj: autor.

Pro tuto situaci na obr. 3.9 se úhel γ vypočítá dle vztahu

$$\gamma = \arctan\left(\frac{L}{H_{SB}}\right) = \arctan\left(\frac{\sqrt{\left(\left|X_{Sk}\right| + x_i\right)^2 + \left(y_j - Y_{Sk}\right)^2}}{H_{SB}}\right). \tag{3.10}$$

Ve finále už zbývá pouze formulovat podmínku, která určí, který ze vzorců bude použit. Stejně jako v kap. 3.1.4 použijeme porovnání *x*-ových souřadnic výpočtového bodu a svítidla. Potom bude výpočet úhlu γ zastřešovat podmínka

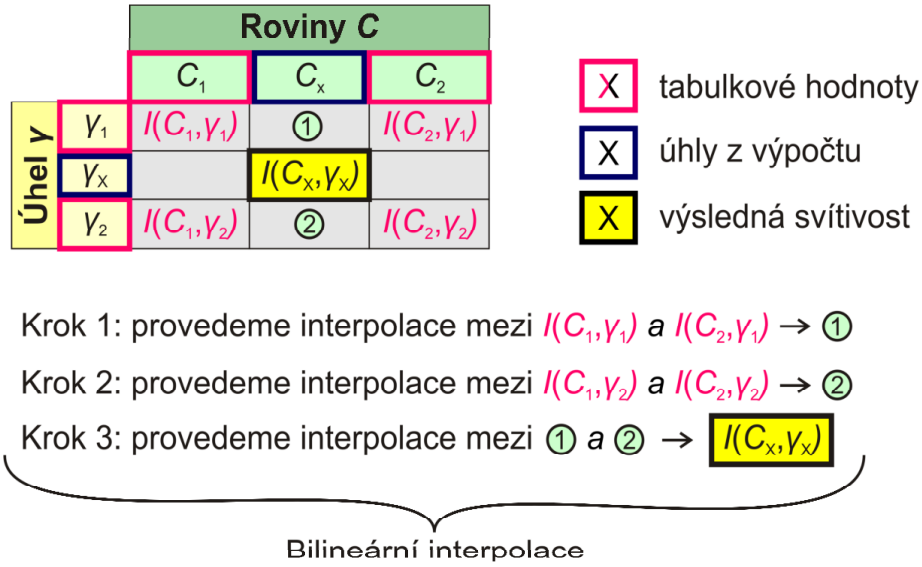
$$\text{KDYŽ} \begin{pmatrix} X_{Sk} < x_i \,; \arctan\left(\frac{\sqrt{\left(\left|X_{Sk}\right| + x_i\right)^2 + \left(y_j - Y_{Sk}\right)^2}}{H_{SB}}\right); \\ \arctan\left(\frac{\sqrt{\left(X_{Sk} - x_i\right)^2 + \left(y_j - Y_{Sk}\right)^2}}{H_{SB}}\right) \end{pmatrix}. \tag{3.11}$$

3.1.6 Svítivost *I* pro obecné natočení *C* a *γ*

S využitím rovnic a podmínek v kapitolách 3.1.4 a 3.1.5 je nyní možné spočítat úhly *C* a γ ve všech bodech výpočtové sítě postupně pro všechna svítidla. Pro náš případ geometrického uspořádání, kdy bude alespoň jednou ve výpočtu zahrnuto 5 svítidel a výpočtová síť má 10 x 6 bodů, to znamená 300 výsledků pro každý z úhlů. Odpovídající dva úhly pak dají výsledný směr pro stanovení svítivosti z tabulky.

Svítivost v tabulce, která je získaná měřením na goniometru (viz kap. 2.4) je však stanovena pro oba zmíněné úhly s určitým úhlovým krokem. Například po 5 ° v rovině *C* a po 1 ° pro úhly γ. Vypočítané úhly ale nekorespondují s tabulkovými hodnotami, proto je nutné přesnou hodnotu určit lineární interpolací, přesněji bilineární interpolací, protože pracujeme se dvěma proměnnými.

Na obr. 3.10 je nastíněn postup stanovení svítivosti $I(C_X, \gamma_X)$ [cd] pro obecné úhlové natočení C_X [°] a γ_X [°]. Je zřejmé, že podstatou bilineární interpolace je rozdělení na 3 dílčí kroky – nejprve se provedou dvě interpolace po řádcích, čímž získáme hodnoty označené 1 a 2. Z těchto hodnot se poté provede třetí interpolace ve sloupci.



Obr. 3.10 Jednotlivé kroky bilineární interpolace pro výpočet svítivosti v obecných úhlových natočeních C a γ. Zdroj: autor.

Analogicky je možné postup otočit – nejprve provést dvě interpolace ve sloupcích a poté až v řádku.

Po vyjádření jednotlivých interpolací, dosazení a úpravě se svítivost $I(C_X,\gamma_X)$ [cd] vypočítá dle vztahu

$$I(C_X,\gamma_X) \approx \frac{(C_2-C_X)\cdot(\gamma_2-\gamma_X)}{(C_2-C_1)\cdot(\gamma_2-\gamma_1)}\cdot I(C_1,\gamma_1)+\frac{(C_X-C_1)\cdot(\gamma_2-\gamma_X)}{(C_2-C_1)\cdot(\gamma_2-\gamma_1)}\cdot I(C_2,\gamma_1)+ \\ +\frac{(C_2-C_X)\cdot(\gamma_X-\gamma_1)}{(C_2-C_1)\cdot(\gamma_2-\gamma_1)}\cdot I(C_1,\gamma_2)+\frac{(C_X-C_1)\cdot(\gamma_X-\gamma_1)}{(C_2-C_1)\cdot(\gamma_2-\gamma_1)}\cdot I(C_2,\gamma_2), \qquad (3.12)$$

kde C_1 [°] resp. C_2 [°] je nejbližší nižší, resp. nejbližší vyšší hodnota z tabulky k obecnému úhlu C_X [°] a γ_1 [°] resp. γ_2 [°] je nejbližší nižší, resp. nejbližší vyšší hodnota z tabulky k obecnému úhlu γ_X [°]. $I(C_i,\gamma_j)$ pak reprezentuje tabulkovou hodnotu svítivosti k odpovídajícím úhlům viz obr. 3.10. [10]

Z pohledu algoritmu však nastává situace, že vstupem do výpočtu výsledné svítivosti je pouze obecný úhel C_X a γ_X. Proto je nejdříve nutné vyhledat v tabulce svítivosti jejich nejbližší nižší, resp. nejbližší vyšší hodnoty a s nimi provést celkový výpočet. Využijeme proto kombinaci tří funkcí prostředí MS Excel – INDEX, VYHLEDAT a POZVYHLEDAT.

S pomocí těchto funkcí najdeme nejprve nejbližší nižší a nejbližší vyšší hodnoty k obecným úhlům, následně je k těmto hodnotám přiřazena tabulková hodnota svítivosti a provedena bilineární interpolace. To vše je nutné provést pro všechny body výpočtové sítě a postupně pro každé zahrnuté svítidlo.

3.1.7 Horizontální osvětlenost v bodě

Celková horizontální osvětlenost v bodě se pak vypočítá jako součet dílčích příspěvků od všech zahrnutých svítidel (viz kap. 2.1) dle dříve zmíněného vztahu

$$E_h = \sum_{k=1}^{n_{LU}} \frac{I_k(C,\gamma)\cdot f_M \cdot \cos^3 \varepsilon_k}{H_k^2}. \tag{3.13}$$

V tomto vztahu však vystupují nespecifikované veličiny – úhel dopadu světleného paprsku *k*-tého svítidla do bodu ε_k [°] a montážní výška *k*-tého svítidla H_k [m]. Z obr. 2.1 je však patrné, že úhel ε_k se rovná úhlu γ a dle kap. 3.1.2 uvažujeme namísto montážní výšky svítidla výšku světleného bodu H_{SB} - obě veličiny vztahujeme také ke *k*-tému svítidlu.

Posledním krokem před výpočtem celkové horizontální osvětlenosti v bodě je stanovení podmínky, kdy má být příspěvek od *k*-tého svítidla přičten do celkové hodnoty. Využijeme k tomu poznatků z kap. 3.1.3, kde byly stanoveny podmínky zahrnutí svítidel, které je třeba zakomponovat do kompletní syntaxe. Příspěvek horizontální osvětlenosti se pak určí dle vztahu

$$KDYŽ\left(\begin{array}{l} X_{Sk} < x_i; KDYŽ\left((x_i - 5\cdot H_{SB}) \le X_{Sk}; \sum_{k=1}^{n_{LU}} \frac{I_k(C,\gamma)\cdot f_M \cdot \cos^3 \gamma_k}{H_{SBk}^2}; 0\right); \\ KDYŽ\left((x_i + 12\cdot H_{SB}) \ge X_{Sk}; \sum_{k=1}^{n_{LU}} \frac{I_k(C,\gamma)\cdot f_M \cdot \cos^3 \gamma_k}{H_{SBk}^2}; 0\right) \end{array}\right). \tag{3.14}$$

Podmínka je nastavena tak, že jsou nejdříve porovnány *x*-ové souřadnice světelného a výpočtového bodu. Pokud je svítidlo vlevo (hlavní podmínka je splněna), ověří se další vnořenou podmínkou, zda leží výpočtový bod v hranici pro zahrnutí. Pokud ano, spočítá se příspěvek osvětlenosti od *k*-tého svítidla k výpočtovému bodu. V opačném případě je výsledek 0. Reálně je možné, že svítidlo vytvoří v bodě malý příspěvek horizontální osvětlenosti, ale díky hranici zahrnutí svítidel nebude započten. V případě,

že není splněna hlavní podmínka (výpočtový bod leží vpravo), opět se vnořenou podmínkou ověří, zda svítidlo leží v hranici pro zahrnutí svítidla a podle toho se určí, zda bude příspěvek vypočítán nebo bude výsledek 0.

Posledním krokem je prostý součet všech horizontálních osvětleností v bodě od všech svítidel.

3.2 Výpočet jasu v bodě

V kapitole 2.6 bylo zmíněno, že je možné jas v bodě L [cd·m^{-2}] vypočítat jako součin horizontální osvětlenosti v bodě E_h [lx] a součinitele jasu q [cd·m^{-2}·lx^{-1}] dle vztahu

$$L = q \cdot E_h \,. \tag{3.15}$$

Využijeme znalost horizontální osvětlenosti z kap. 3.1.7, takže stačí určit součinitele jasu, který se dle kap. 2.6 stanoví dle vztahu

$$q = \frac{r_k(\tan\varepsilon, \beta)}{\cos^3 \varepsilon_k} \,. \tag{3.16}$$

Do jeho výpočtu vstupuje redukovaný součinitel jasu $r_k(\tan\varepsilon, \beta)$ [sr^{-1}], který se na základě úhlu β a tangenty úhlu ε k bodu od k-tého svítidla určí z r-tabulky viz kap. 2.8. Principiálně se tento výběr podobá stanovení svítivosti z kap. 3.1.6. Z obr. 2.1 již víme, že úhel ε je roven úhlu γ (kap. 3.1.5), z čehož plyne, že pro výpočet součinitele jasu zatím neznáme pouze úhel β, který je závislý na poloze světelného bodu, výpočtového bodu a pozorovatele.

3.2.1 Poloha pozorovatelů

Z kap. 2.7 je patrné, že pozorovatel se vnáší do osy každého jízdního pruhu, vzdálenosti 60 m před výpočtové pole a výšky 1,5 m nad povrch komunikace. Z toho plyne, že neměnnými parametry jsou jeho souřadnice ve směru x a z. Jediným proměnným parametrem je souřadnice y, která se určí dle vztahu

$$y_{Pi} = \frac{W_r}{2 \cdot n_{JP}} + (i-1) \cdot \frac{W_r}{n_{JP}} \,, \tag{3.17}$$

kde W_r [m] je šířka komunikace, y_{Pi} [m] je *y*-ová souřadnice *i*-tého pozorovatele a n_{JP} [-] je počet jízdních pruhů.

V našem případě, kdy uvažujeme komunikaci o dvou jízdních pruzích (2 pozorovatelé) a šířce komunikace 7 m bude poloha pozorovatelů *P1* a *P2* ve směru *y* rovna

$$y_{P1} = \frac{7}{2 \cdot 2} + (1-1) \cdot \frac{7}{2} = 1{,}75 \text{ m}, \tag{3.18}$$

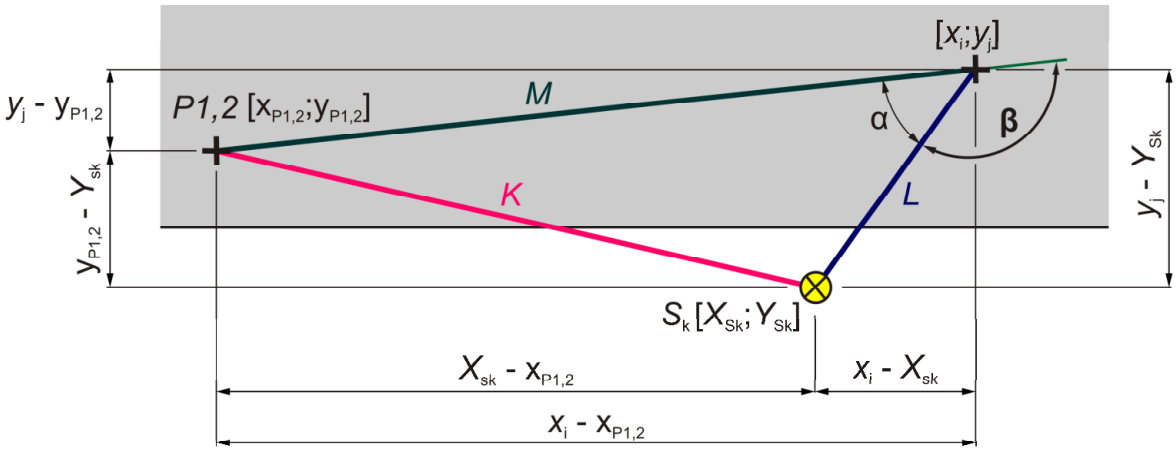
resp.

$$y_{P2} = \frac{7}{2 \cdot 2} + (2-1) \cdot \frac{7}{2} = 5{,}25 \text{ m}. \tag{3.19}$$

3.2.2 Úhel β

Úhel β [°] je úhel odchylky od průmětu spojnice světelného bodu s výpočtovým bodem a průmětu spojnice pozorovatele s výpočtovým bodem viz obr. 2.6. Je závislý na souřadnicích světelného bodu, výpočtového bodu a pozorovatele.

Obr. 3.11 znázorňuje geometrické uspořádání a výpočet jednotlivých odvěsen pro průměty *K*, *L* a *M*.



K . . průmět spojnice pozorovatele a světelného bodu
L . . průmět spojnice světelného bodu a výpočtového bodu
M . . průmět spojnice pozorovatele a výpočtového bodu

Obr. 3.11 Geometrické uspořádání pro výpočet úhlu β. Zdroj: autor.

Dle obr. 3.11 nejprve určíme úhel α [°] pomocí kosinové věty dle vztahu

$$\alpha = \arccos\left(\frac{L^2 + M^2 - K^2}{2 \cdot L \cdot M}\right). \tag{3.20}$$

Úhel β se určí jako dopočet do 180 ° dle vztahu

$$\beta = 180 - \alpha\,. \tag{3.21}$$

Po dosazení a úpravě rovnice 3.21 dostaneme vztah

$$\beta = 180 - \arccos\left(\frac{L^2 + M^2 - K^2}{2 \cdot L \cdot M}\right). \tag{3.22}$$

Vzdálenost *L* [m] (průmět spojnice světelného bodu a výpočtového bodu) se určí z Pythagorovy věty dle vztahu

$$L = \sqrt{(x_i - X_{Sk})^2 + (y_j - Y_{Sk})^2}\,. \tag{3.23}$$

Vzdálenost *M* [m] (průmět spojnice pozorovatele a výpočtového bodu) se určí z Pythagorovy věty dle vztahu

$$M = \sqrt{(x_i - x_{P1,2})^2 + (y_j - y_{P1,2})^2}\,. \tag{3.24}$$

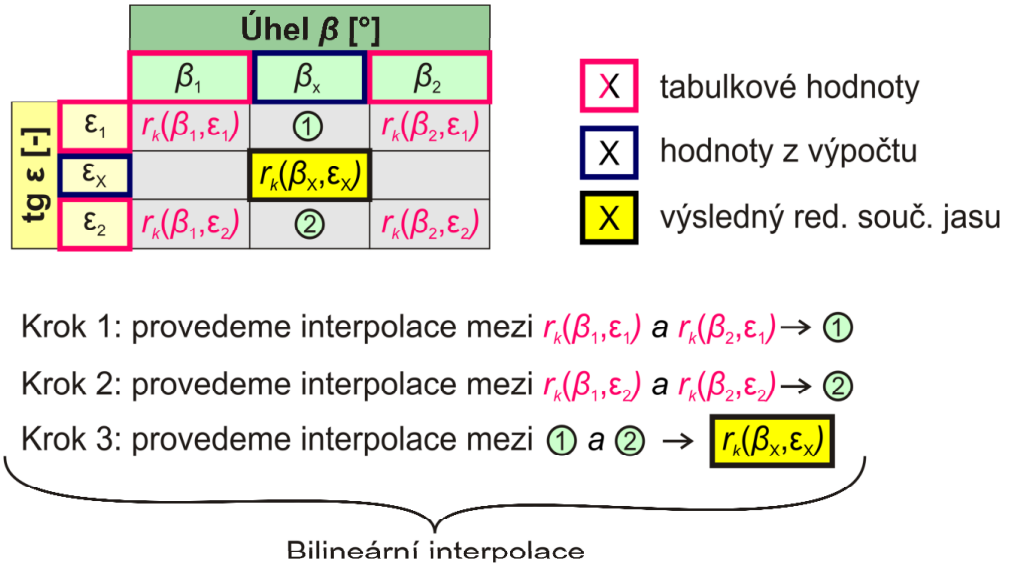
Vzdálenost *K* [m] (průmět spojnice pozorovatele a světelného bodu) se určí z Pythagorovy věty dle vztahu

$$K = \sqrt{(X_{Sk} - x_{P1,2})^2 + (y_{P1,2} - Y_{Sk})^2}\,. \tag{3.25}$$

3.2.3 Redukovaný součinitel jasu r_k

Ze znalosti výpočtu úhlu β z kapitoly 3.2.2 a tangenty úhlu γ (resp. ε) z kapitoly 3.1.5 je možné určit tabulkovou hodnotu redukovaného součinitele jasu $r_k(\tan\varepsilon, \beta)$. Stejně jako v případě svítivosti je r-tabulka definované pro obě veličiny s určitým krokem, a proto je nutné opět provést bilineární interpolaci (viz kap. 3.1.6) pro získání redukovaného součinitele jasu pro obecný úhel β a obecnou hodnotu $\tan\varepsilon$.

Postup je analogický jako v kapitole 3.1.6 viz obr. 3.12.



Obr. 3.12 Jednotlivé kroky bilineární interpolace pro výpočet redukovaného součinitele jasu pro obecný úhel β a obecnou hodnotu tan ε. Zdroj: autor.

Redukovaný součinitel jasu $r_k(\tan\varepsilon,\beta)$ se po vyjádření jednotlivých interpolací, dosazení a úpravě určí z rovnice

$$r_k(\beta_X,\varepsilon_X) \approx \frac{(\beta_2-\beta_X)\cdot(\varepsilon_2-\varepsilon_X)}{(\beta_2-\beta_1)\cdot(\varepsilon_2-\varepsilon_1)}\cdot r_k(\beta_1,\varepsilon_1)+\frac{(\beta_X-\beta_1)\cdot(\varepsilon_2-\varepsilon_X)}{(\beta_2-\beta_1)\cdot(\varepsilon_2-\varepsilon_1)}\cdot r_k(\beta_2,\varepsilon_1)+ \\ +\frac{(\beta_2-\beta_X)\cdot(\varepsilon_X-\varepsilon_1)}{(\beta_2-\beta_1)\cdot(\varepsilon_2-\varepsilon_1)}\cdot r_k(\beta_1,\varepsilon_2)+\frac{(\beta_X-\beta_1)\cdot(\varepsilon_X-\varepsilon_1)}{(\beta_2-\beta_1)\cdot(\varepsilon_2-\varepsilon_1)}\cdot r_k(\beta_2,\varepsilon_2), \qquad (3.26)$$

kde β_1 [°] resp. β_2 [°] je nejbližší nižší, resp. nejbližší vyšší hodnota z tabulky k obecnému úhlu β_X [°] a ε_1 [°] resp. ε_2 [°] je nejbližší nižší, resp. nejbližší vyšší hodnota z tabulky k obecnému úhlu ε_X [°]. Poté $r_k(\tan\varepsilon,\beta)$ reprezentuje tabulkovou hodnotu redukovaného součinitele jasu k odpovídajícím úhlům viz obr. 3.12. [10]

Analogicky je možné postup otočit – nejprve provést dvě interpolace ve sloupcích a poté až v řádku.

3.2.4 Součinitel jasu *q*

V předchozí kapitole byl stanoven výpočet redukovaného součinitele jasu, který vstupuje do výpočtu součinitele jasu q [cd·m^{-2}·lx^{-1}], jež se určí dle vztahu

$$q = \frac{r_k(\tan\varepsilon, \beta)}{\cos^3 \varepsilon_k}, \tag{3.27}$$

kde $r_k(\tan\varepsilon, \beta)$ [sr^{-1}] je redukovaný součinitel jasu pro obecnou hodnotu $\tan\varepsilon$ [-] a obecný úhel β [°] a ε_k [°] je úhel dopadu paprsku do bodu od *k*-tého svítidla (odpovídá úhlu ε pro stanovení r_k).

3.2.5 Jas v bodě

Vztah 2.5 popsaný v kapitole 2.6 popisuje výpočet jasu v bodě na základě součinitele jasu a horizontální osvětlenosti. Je však nutné si uvědomit, že součinitel jasu q se mění s pozicí světelného bodu, výpočtového bodu i pozorovatele. Proto nemůžeme určit jas v bodě z celkové horizontální osvětlenosti v bodě, ale musíme součinitelem jasu vynásobit dílčí příspěvky horizontální osvětlenosti pro získání dílčích příspěvků jasů v bodě a teprve ty sečíst pro získání celkového jasu v bodě.

Situaci ještě komplikuje fakt, že ve výpočtu vystupuje více pozorovatelů. Jestliže jsme u horizontální osvětlenosti počítali 300 hodnot (5 svítidel x 60 bodů), u dvou pozorovatelů už je to dvojnásobek.

Příspěvek jasu v bodě $L_{k,P1}$ [cd·m^{-2}] od *k*-tého svítidla pro pozorovatele *P1* se vypočítá dle vztahu

$$L_{k,P1} = \frac{r_{k,P1}(\tan\varepsilon_k, \beta_{k,P1})}{\cos^3 \varepsilon_k} \cdot E_{h,k}, \tag{3.28}$$

kde $r_{k,P1}(\tan\varepsilon_k, \beta_{k,P1})$ [sr^{-1}] je redukovaný součinitel jasu pro tangens úhlu ε_k (úhlu dopadu paprsku do výpočtového bodu od *k*-tého svítidla) a úhel $\beta_{k,P1}$ (úhel odchylky od průmětu spojnice světelného bodu *k*-tého svítidla s výpočtovým bodem a průmětu spojnice pozorovatele *P1* s výpočtovým bodem) a $E_{h,k}$ [lx] je příspěvek horizontální osvětlenosti ve výpočtovém bodě od *k*-tého svítidla. Analogicky se určí příspěvek jasu v bodě pro pozorovatele *P2* (případně další pozorovatele).

Součtem příspěvků jasů od všech zahrnutých svítidel dostáváme celkový jas v bodě L_{P1} pro pozorovatele *P1* resp. L_{P2} pro pozorovatele *P2*.

Není již nutné řešit podmínku zahrnutí svítidel. Ta je již zahrnuta ve výpočtu horizontální osvětlenosti v bodě, který je vstupem do výpočtu jasu v bodě. V případě, že není svítidlo do výpočtu zahrnuto je horizontální osvětlenost nulová a tím pádem i jas v bodě.

3.3 Vyhodnocení průměrného jasu a rovnoměrností

Po stanovení jasů v bodě z kapitoly 3.2.5 získáme dvě tabulky – celkové jasy v bodech výpočtové sítě pro pozorovatele *P1* a *P2*. Pro každou z nich je nutné vypočítat průměrný jas (viz kap. 2.12) pomocí funkce průměr v prostředí MS Excel jako

PRŮMĚR (☺BLAST DAT). (3.29)

Ve výpočtu horizontální osvětlenosti v bodě, který je vstupem do výpočtu jasu v bodě, byl již zahrnut činitel údržby (viz kap. 2.10), a proto mluvíme o průměrném udržovaném jasu povrchu komunikace $\overline{L}_{P1,2}$ [cd · m^{-2}] pro pozorovatele *P1*, resp. *P2*.

Celková rovnoměrnost jasu povrchu vozovky U_o [-] se stanoví dle kap. 2.12 jako

MIN (OBLAST DAT) / PRŮMĚR (OBLAST DAT). (3.30)

Opět ji stanovujeme pro oba pozorovatele.

Podélná rovnoměrnost jasu v ose jízdního pruhu U_l [-] se stanoví dle kap. 2.12 jako

MIN (HODNOTY V OSE J.P.) / MAX (HODNOTY V OSE J.P.), (3.31)

přičemž se uvažují pouze hodnoty v ose jízdního pruhu.

Jako referenční hodnoty průměrného jasu a obou rovnoměrností se berou minima z hodnot pro oba pozorovatele. V tab. 3.1 je ukázka algoritmu s hodnotami jasů v bodě pro oba pozorovatele s celkovým vyhodnocením.

Tab. 3.1 Ukázka jasů v bodě pro oba pozorovatele s jejich vyhodnocením. Zdroj: autor.

Celkový jas v bodě [cd.m-2] pro pozorovatele 1

m		1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,417	A	0,44	0,43	0,45	0,48	0,48	0,48	0,47	0,45	0,43	0,44
5,250	B	0,56	0,55	0,54	0,55	0,55	0,56	0,58	0,58	0,56	0,56
4,083	C	0,69	0,70	0,66	0,66	0,67	0,68	0,73	0,74	0,75	0,71
2,917	D	0,90	0,88	0,83	0,81	0,84	0,88	0,89	0,88	0,92	0,88
→ 1,750	E	1,13	1,11	1,06	1,09	1,10	1,11	1,11	1,08	1,11	1,11
0,583	F	1,29	1,27	1,21	1,21	1,23	1,24	1,24	1,22	1,23	1,26

Vyhodnocení (Pozorovatel 1)

L	**0,82**
Uo	**0,52**
Ul	**0,94**

Celkové vyhodnocení

L	**0,82**
Uo	**0,50**
Ul	**0,93**

Celkový jas v bodě [cd.m-2] pro pozorovatele 2

m		1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,417	A	0,48	0,47	0,50	0,51	0,52	0,51	0,50	0,47	0,45	0,46
→ 5,250	B	0,62	0,63	0,62	0,61	0,62	0,61	0,64	0,63	0,60	0,60
4,083	C	0,83	0,85	0,78	0,76	0,78	0,78	0,80	0,80	0,82	0,78
2,917	D	1,10	1,08	1,03	1,04	1,01	1,01	1,00	0,97	1,02	1,00
1,750	E	1,33	1,32	1,28	1,29	1,26	1,24	1,22	1,19	1,20	1,23
0,583	F	1,14	1,14	1,13	1,18	1,21	1,23	1,22	1,19	1,19	1,21

Vyhodnocení (Pozorovatel 2)

L	**0,89**
Uo	**0,50**
Ul	**0,93**

Tab. 3.1 je vyňata z finální verze algoritmu. Pro získání celkového vyhodnocení byly využity všechny předpoklady zmíněné v předchozích kapitolách a následující vstupy:

- tabulka svítivosti svítidla Lada 16 C40-1000-M2 [11],
- světelný tok zdroje zmíněného svítidla (7842 lm) [11],
- činitel údržby (předpokládáme 0,8),
- r-tabulka R3 [9],
- geometrické uspořádání světelných bodů (rozteč 30 m, výška 8 m, přesah 0 m),
- šířka komunikace 7 m,
- 2 jízdní pruhy.

Pro ověření správnosti algoritmu byly stejné vstupy použity ve výpočtu osvětlení pozemní komunikace v modulu Plánování silnic softwaru DIALux evo 6.2. Po provedení výpočtu bylo vyexportováno celkové vyhodnocení (výsledky plánování) a tabulka jednotlivých jasů v bodech pro oba pozorovatele.

Ověřovací výpočet (M4)

Lm [cd/m²] ≥ 0.75	Uo ≥ 0.40	Ul ≥ 0.60	TI [%] ≤ 15	EIR ≥ 0.30
✔ 0.82	✔ 0.50	✔ 0.93	✔ 11	✔ 0.61

Obr. 3.13 Ověření výsledků v softwaru DIALux evo 6.2. Zdroj: autor dle [12].

Z obr. 3.13 je patrné, že výsledné hodnoty se shodují s hodnotami vypočtenými navrženým algoritmem. Na obr. 3.14 jsou ještě znázorněny celkové jasy v bodě pro celý kontrolní rastr bodů a oba pozorovatele.

Pozorovatel 1

Jas při suché vozovce [cd/m²]

6.417	0.44	0.43	0.45	0.48	0.48	0.48	0.47	0.45	0.43	0.44
5.250	0.56	0.55	0.54	0.56	0.55	0.56	0.58	0.58	0.56	0.56
4.083	0.69	0.70	0.66	0.66	0.67	0.68	0.73	0.74	0.75	0.71
2.917	0.90	0.88	0.83	0.82	0.84	0.88	0.89	0.88	0.92	0.88
1.750	1.14	1.11	1.06	1.09	1.10	1.11	1.11	1.08	1.11	1.11
0.583	1.29	1.27	1.21	1.21	1.23	1.24	1.24	1.22	1.23	1.26
m	1.500	4.500	7.500	10.500	13.500	16.500	19.500	22.500	25.500	28.500

Rastr: 10 x 6 Body

Pozorovatel 2

Jas při suché vozovce [cd/m²]

6.417	0.48	0.47	0.50	0.52	0.52	0.51	0.50	0.47	0.45	0.46
5.250	0.62	0.63	0.62	0.61	0.62	0.61	0.64	0.63	0.60	0.60
4.083	0.83	0.85	0.78	0.77	0.78	0.78	0.80	0.80	0.82	0.78
2.917	1.10	1.08	1.03	1.04	1.01	1.01	1.00	0.97	1.03	1.00
1.750	1.33	1.32	1.29	1.29	1.26	1.24	1.22	1.19	1.20	1.23
0.583	1.14	1.14	1.13	1.18	1.21	1.23	1.22	1.19	1.19	1.21
m	1.500	4.500	7.500	10.500	13.500	16.500	19.500	22.500	25.500	28.500

Rastr: 10 x 6 Body

Obr. 3.14 Celkové jasy v bodě v softwaru DIALux evo 6.2. Zdroj: autor dle [12].

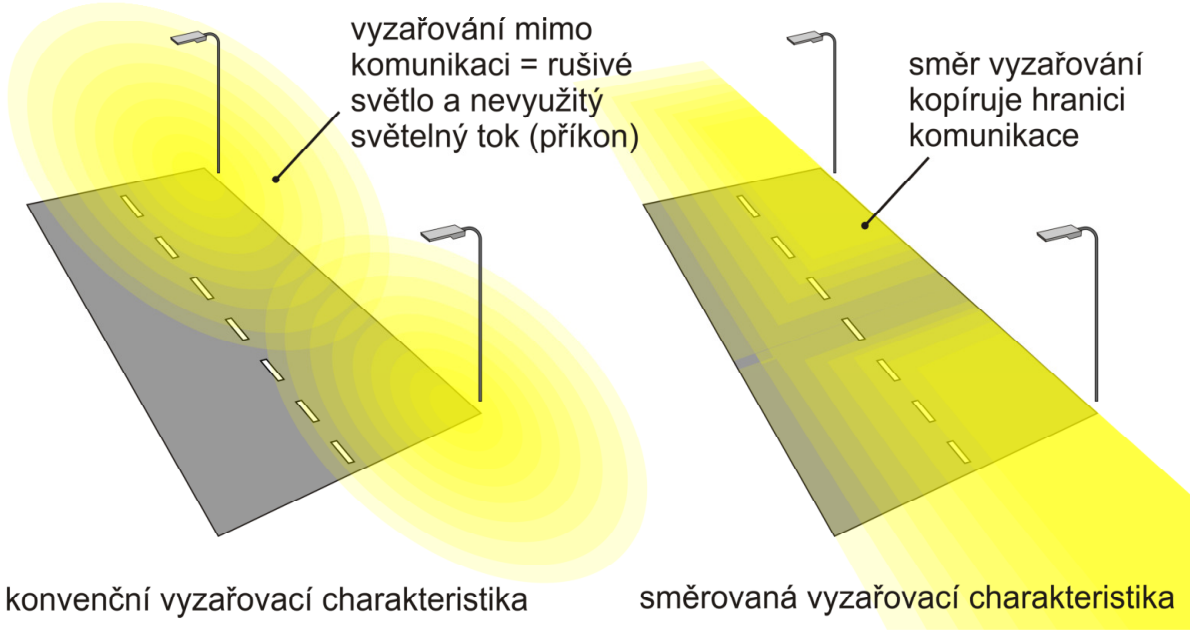
Z obr. 3.14 lze pozorovat, že jednotlivé jasy v bodě, vypočítané softwarem DIALux evo, jsou totožné s hodnotami vypočítaným navrženým algoritmem (viz tab. 3.1). Po ověření dalších kombinací vstupů nebyly zjištěny odchylky mezi oběma výpočty, tudíž je možné předpokládat správnost navrženého algoritmu.

Algoritmus je nyní možné použít k ověřovacím výpočtům osvětlení komunikací, popř. jako okamžitou kontrolu svítivostí jednotlivých návrhů optických čoček. Primárním účelem jeho návrhu je ale možnost jej nadále upravovat k jinému účelu – zpětnému dopočítání jednotlivých svítivostí, které slouží jako odrazový můstek pro návrh optické čočky.

3.4 Zpětné dopočítání svítivosti

Účelem úpravy algoritmu pro zpětné dopočítání svítivosti je snaha získat představu o nutném prostorovém rozložení světleného toku pro dané geometrické uspořádání komunikace a světelných bodů, popř. různé typy povrchů komunikace.

Znalosti tohoto prostorového rozložení lze následně využít při návrhu optické čočky. Smyslem celého řešení je návrh takového tvaru čočky, aby jeho vyzařovací charakteristika co nejblíže kopírovala hranici prostoru, pro který se navrhuje. Pak dokážeme veškerý vyzářený světelný tok nasměrovat do prostoru komunikace, omezíme rušivé světlo a snížíme potřebný světelný tok svítidla (a s ním související příkon) viz obr. 3.15.



Obr. 3.15 Porovnání konvenční a směrované vyzařovací charakteristiky. Zdroj: autor.

Nejprve si je nutné definovat celkové jasy v jednotlivých bodech. Hodnoty musí být stanovené tak, aby byly splněny požadavky pro námi vybranou třídu osvětlení. Využijeme proto výsledné jasy a osvětlenosti pro stávající svítidlo (resp. čočku) viz kap. 4. Z výsledných hodnot určíme součinitel q_c dle vztahu

$$q_c = \frac{L}{E_h}. \tag{3.32}$$

Ze vztahu 3.32 jsme schopni získat poměr mezi celkovým jasem v bodě a horizontální osvětleností v bodě. Nejedná se přímo o součinitel jasu, protože neporovnáváme

příspěvky jasu v bodě a horizontální osvětlenosti v bodě od jednotlivých svítidel, nýbrž jejich celkové hodnoty. Stanovením q_c tak získáme poměr pro všechny body kontrolní sítě (v našem případě 10 x 6 hodnot). Tímto poměrem můžeme poté vynásobit jasy v bodě, které jsme si navolili tak, aby odpovídali požadavkům pro danou třídu osvětlení. Je třeba poznamenat, že se tímto postupem částečně vnáší do návrhu vlastnosti výchozího použitého svítidla (resp. jeho svítivostí).

Následujícím postupem je výpočet svítivosti z hodnot horizontální osvětlenosti. Nejdříve je však nutné stanovit poměry mezi horizontálními osvětlenostmi od jednotlivých svítidel, kdy se omezíme pouze na dvě nejbližší svítidla, která mají na osvětlenosti největší podíl. Z původního výpočtu využijeme hodnoty a stanovíme poměr m_1 osvětlenosti od svítidla 1 dle vztahu

$$m_1 = \frac{E_{h,S1}}{E_{h,S1} + E_{h,S2}}, \tag{3.33}$$

kde $E_{h,S1}$ [lx] je horizontální osvětlenost v bodě od svítidla 1 a $E_{h,S2}$ [lx] je horizontální osvětlenost v bodě od svítidla 2. Analogicky se stanoví poměr m_2 osvětlenosti od svítidla 2.

Dále se pro libovolnou sadu hodnot celkových jasů v kontrolních bodech zpětně dopočítají hodnoty celkové horizontální osvětlenosti úpravou vztahu 3.32 jako

$$E_h = \frac{L_Z}{q_c}, \tag{3.34}$$

kde L_Z [cd·m^{-2}] je zvolená hodnota jasu v bodě. Dle poměru m_1 a m_2 se určí rozdělení osvětleností pro jednotlivá svítidla, čímž vzniknou dvě sady hodnot (2 x 10 x 6 bodů). Pro každou sadu stanovíme svítivost úpravou vztahu 2.1 jako

$$I_{Si}(C,\gamma) = \frac{E_{h,Si} \cdot H_k^2}{f_M \cdot \cos^3 \varepsilon_{Si}}, \tag{3.35}$$

kde $I_{Si}(C,\gamma)$ [cd] je svítivost od *i*-tého svítidla (definovaná úhly C,γ), $E_{h,Si}$ [lx] je horizontální osvětlenost v bodě od *i*-tého svítidla a ε_{Si} [°] je úhel dopadu paprsku do bodu od *i*-tého svítidla.

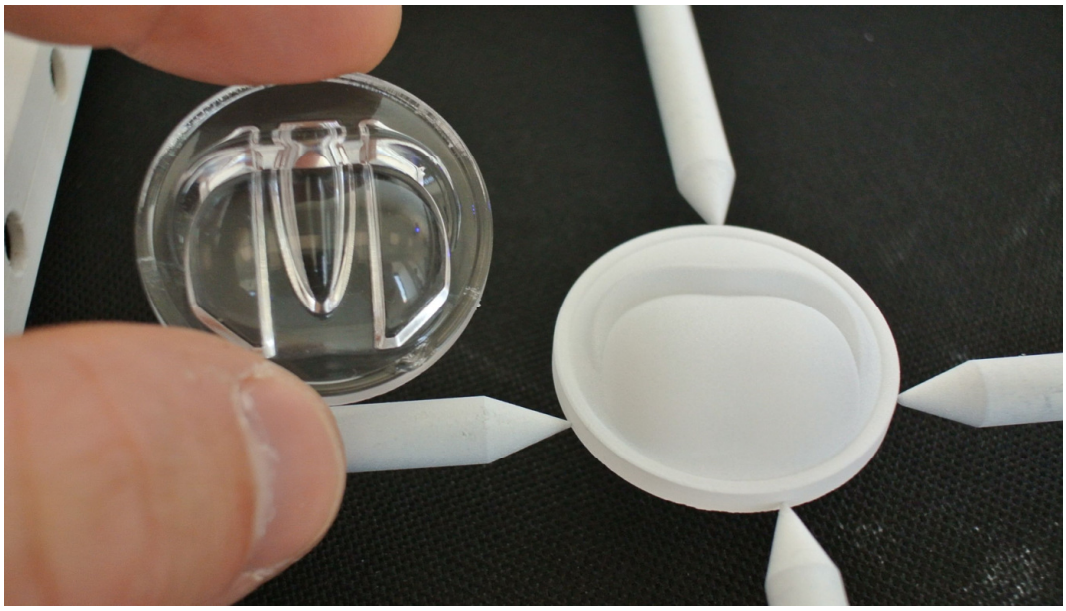
4 NÁVRH OPTICKÉ ČOČKY

Se znalostí metodiky stanovení jednotlivých parametrů, které se používají pro hodnocení osvětlení na pozemních komunikacích a prostorové hustoty světelného toku, je možné započít návrh optického prvku – skleněné čočky. V našem případě se nebude jednat o kompletně nový návrh, nýbrž o vylepšení stávajícího řešení. Tím je skleněná čočka s označením „M2“ svítidla Lada firmy Lamberga, které se používá k osvětlení pozemních komunikací.

Protože k čočce nebyl poskytnut 3D model, bylo nutné nejdříve provést 3D skenování a následně vytvořit model čočky na základě mračna bodů. Model byl následně parametrizován – vytvořením řezů, zbavením se jejich závislosti na původním modelu a vztažením všech rozměrů k referenčnímu bodu, bylo docíleno možnosti jednoduchou změnou rozměrů upravovat původní tvar optických ploch, a tím dosáhnout změny vyzařovací charakteristiky.

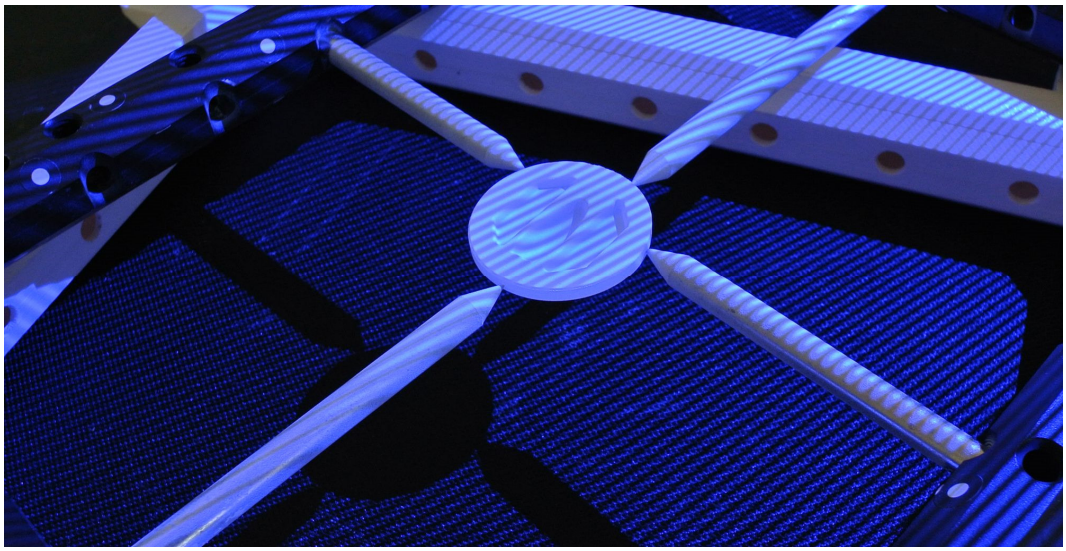
4.1 3D skenování čočky

Metoda 3D skenování patří do skupiny procesů reverzního inženýrství. Principem je převedení tvaru objektu na digitální model využitím triangulace. Výstupem je polygonová síť bodů (tzv. mračno bodů). Ke skenování modelu byl využit 3D skener ATOS Triple Scan. Na čočku bylo nutné nanést antireflexní vrstvu viz obr. 4.1. [13,14]



Obr. 4.1 Čočka před a po nanesení antireflexní vrstvy. Zdroj: autor.

Antireflexní vrstva slouží k eliminaci odrazů promítaných pruhů při lesklém povrchu součástí. Následně bylo provedeno samotné skenování viz obr. 4.2.



Obr. 4.2 Promítání pruhů na čočku. Zdroj: autor.

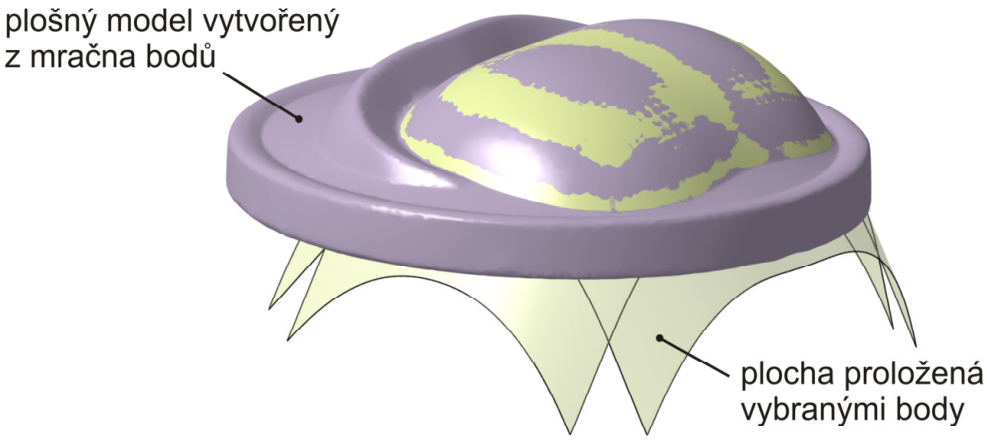
Promítané pruhy snímají dvě kamery. Na základě porovnání obou fotografií a využití metody geometrické triangulace lze získat prostorovou informaci o modelu z 2D snímků. Po proložení bodů plochou je získán plošný model součásti ve formátu STL viz obr. 4.3. [13]

Obr. 4.3 Plošný model čočky ve formátu STL. Zdroj: autor.

4.2 Vytvoření modelu z mračna bodů

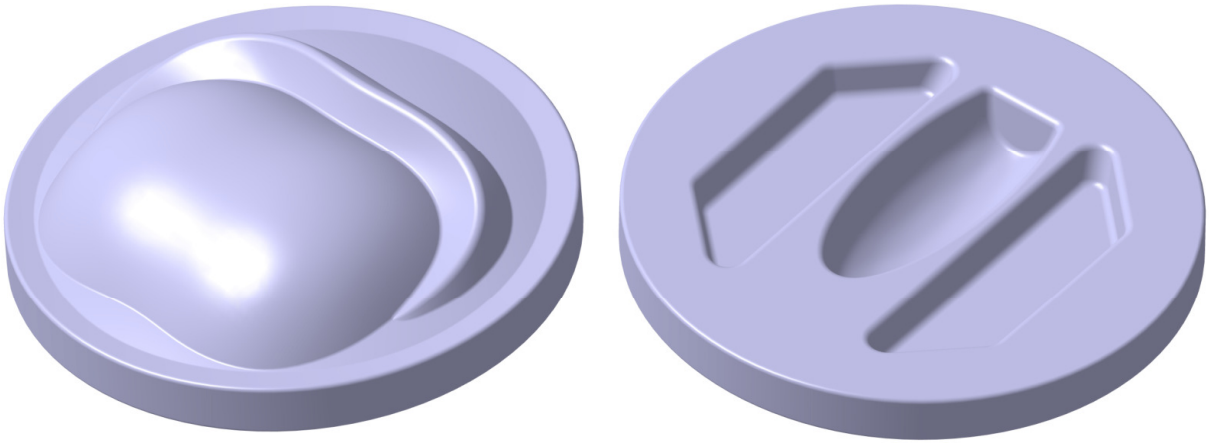
Výstupem z 3D skenování není plnohodnotný parametrický model, ale pouze plošné propojení mračna bodů pomocí trojúhelníků. Při vytváření modelu se těmito body proloží plochy, ze kterých se následně vytvoří 3D těleso. Pro tvorbu modelu byl využit software CATIA verze V5R20.

Po vytvoření ploch z referenčních bodů a jejich proložením (viz obr. 4.4) pomocí funkce Power Fit v modulu Quick Surface Reconstruction, se mezi sebou ořežou tak, aby kompletně obalily a uzavřely mračno bodů. Po spojení všech ploch je možné využít funkce Close Surface v modulu Part Design, která z uzavřené soustavy ploch vytvoří 3D model.



Obr. 4.4 Plocha proložená mračnem bodů. Zdroj: autor.

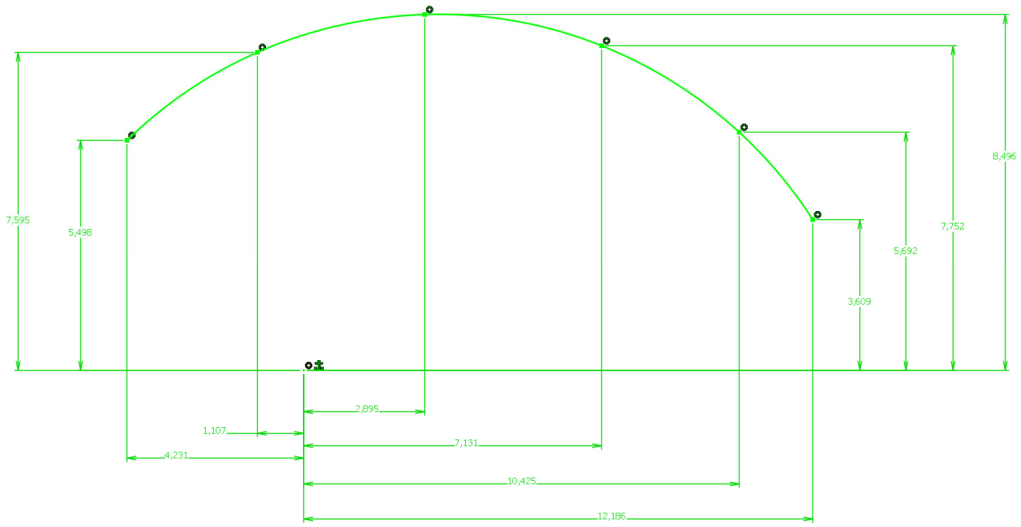
Na obr. 4.5 je pak ukázka hotového modelu.



Obr. 4.5 Vytvořený model z proložených ploch. Zdroj: autor.

4.3 Parametrizace modelu

Snahou je výsledný model (viz kap. 4.2) parametrizovat tak, aby byl plně editovatelný. V tuto chvíli je stále závislý na poloze bodů ze 3D skenování. Proto byly vytvořeny řezy modelem, které byly zbaveny původní reference a všechny rozměry byly zakótovány k počátku souřadného systému. Na obr. 4.6 je znázorněno zakótování řídících bodů k počátku jedné ze spline křivek, jež vznikla řezem modelu v definované rovině.



Obr. 4.6 Parametrizace jedné ze spline křivek. Zdroj: autor.

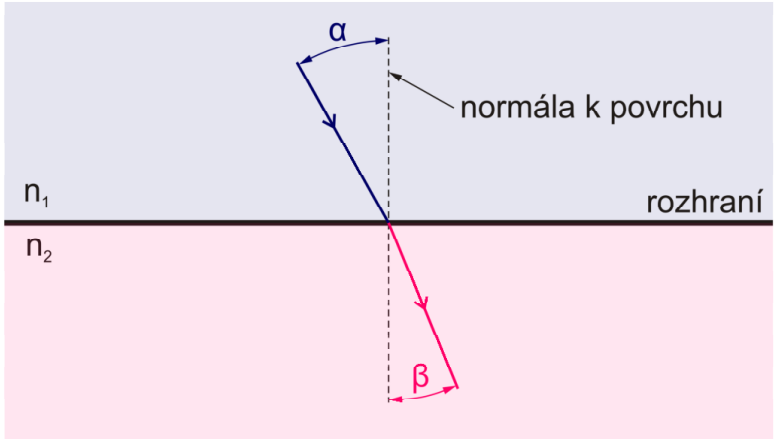
Pomocí jednotlivých řezů byly zpětně vytvořeny plochy a stejným postupem jako v kap. 4.2 se vytvořil výsledný parametrický model.

4.4 Předpoklady při úpravě čočky

Před samotnými úpravami čočky je třeba zohlednit základní optický princip při navrhování čoček – Snellův zákon lomu, který popisuje lom paprsku na rozhraní dvou prostředí a má tvar rovnice

$$n_1 \cdot \sin\alpha = n_2 \cdot \sin\beta\,, \tag{4.1}$$

kde n_1 [-], n_2 [-] jsou indexy lomu jednotlivých prostředí, α [°] je úhel dopadu a β [°] je úhel lomu viz obr. 4.7. [15]



Obr. 4.7 Znázornění lomu na rozhraní dvou prostředí. Zdroj: autor dle [15].

Při úpravě vztahu 4.1 můžeme vyjádřit úhel lomu β jako

$$\beta = \arcsin \frac{n_1 \cdot \sin \alpha}{n_2}. \tag{4.2}$$

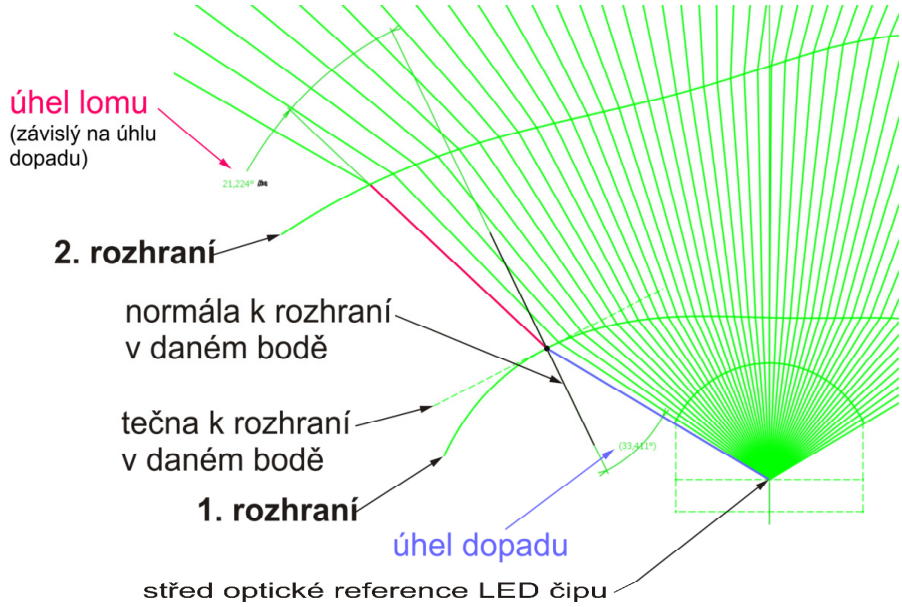
Upravený vztah 4.2 je následně využit při úpravě modelu v softwaru Catia. Pro jednotlivé řezy modelem jsou zobrazeny jednotlivá rozhraní. V každém řezu jsou nejprve ze středu optické reference LED čipu vyneseny paprsky k prvnímu rozhraní. V jejich průsečíku je vytvořena normála k rozhraní a k této normále zakótován úhel dopadu. Na opačnou stranu je ze stejného průsečíku vynesen druhý paprsek a zakótuje se úhel lomu. Poté se u úhlové kóty využije funkce Edit Formula, do které se specifikuje vztah 4.2. Jako úhel α se využije referenční kóta úhlu dopadu.

Paprsek je poté prodloužen až k druhému rozhraní, kde se opakuje stejný postup. Při stanovení úhlu lomu na druhém rozhraní se ovšem musí otočit hodnoty indexu lomu. Paprsek se při vstupu do čočky nejdříve láme na prvním rozhraní vzduch – sklo a poté na druhém rozhraní sklo – vzduch. Hodnoty indexů lomu jsou pro:

- vzduch n = 1,
- sklo n = 1,52.

Celý postup se opakuje pro všechny paprsky v rozsahu úhlu vyzařování LED čipu. V případě zvoleného čipu XP-L2 je to 125 ° dle [16]. Na obr. 4.8 je pak ukázka lomu paprsků v konkrétním řezu čočky na prvním rozhraní. Značnou výhodou je zejména parametrické řešení – při změně tvaru obou rozhraní (např. změnou pozice kontrolních

bodů spline křivky) se automaticky přepočítají všechny úhly a lze pozorovat, směr vyzařování konkrétních paprsků.



Obr. 4.8 Lom paprsků na 1. rozhraní v konkrétním řezu čočkou. Zdroj: autor.

Vyzařovací charakteristiku lze pak porovnat s výstupem algoritmu pro zjištění svítivosti v jednotlivých směrech (viz kap. 3) a upravit tvar jednotlivých rozhraní tak, abychom dosáhli podobných směrů. Tímto způsobem bylo vytvořeno několik úprav čočky, u kterých se následně provedlo trasování paprsků v softwaru TracePro.

4.5 Trasování paprsků čočkou v TracePro

Principem této metody je sledování dráhy paprsků, které vycházejí ze zdroje a interagují s objekty, které jim stojí v cestě. V tomto konkrétním případě je zdrojem LED a objektem skleněná čočka. Paprsky vycházejí z optické reference LED, zlomí se na prvním rozhraní, pokračují až na druhé rozhraní, kde nastává další lom a dále pokračují až na stínítko, kde se zastaví. Na stínítku pak můžeme pozorovat distribuci světelného toku v podobě mapy osvětlenosti.

Zvolenou LED je XP-L2 výrobce CREE. Výrobce k danému typu poskytuje soubor paprsků (tzv. ray-file) pro softwary LightTools, ZEMAX nebo také TracePro. Tento ray-file obsahuje v případě XP-L2 1 000 000 paprsků.

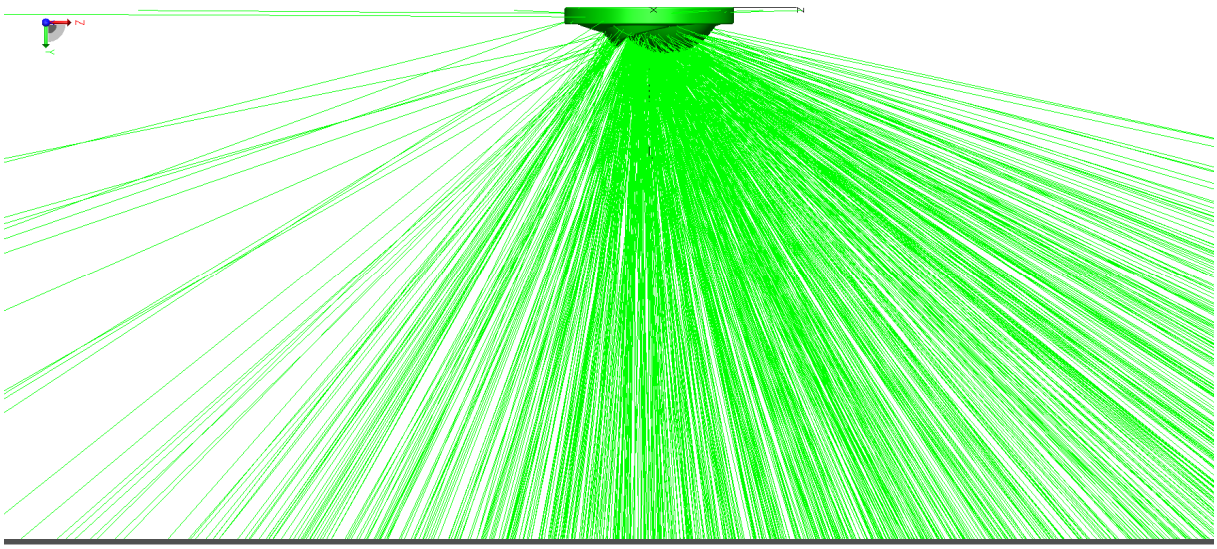
V TracePro je tedy nejdříve nutné nadefinovat zdroj světla. Tím je právě poskytnutý ray-file. U něj lze nastavit procentuální podíl paprsků, které se mají trasovat. V našem

případě, kdy budeme porovnávat velké množství modelů, je klíčová doba trasování. Proto bylo sníženo množství trasovaných paprsků na 50 %, tj. 500 000.

Dále je nutné nadefinovat stínítko, které slouží k promítnutí trasovaných paprsků. Stínítkem může být jakákoliv plocha, u které definujeme vlastnost jejího povrchu jako Perfect Absorber, tedy vlastnost odpovídající absolutně černému tělesu, kdy je pohlceno 100 % veškerého světla. Tím jsme schopni sledovat veškeré dopadené paprsky a vykreslovat mapu osvětlenosti.

Po vložení modelu čočky nadefinujeme jeho přesnou pozici vůči čipu a nastavíme materiál na sklo s indexem lomu $n = 1{,}520$. Nyní je připravena celá sestava k trasování. Před ní je třeba zvolit jednotky na fotometrické (řešíme pouze viditelné světlo) a mód trasování Analysis Mode.

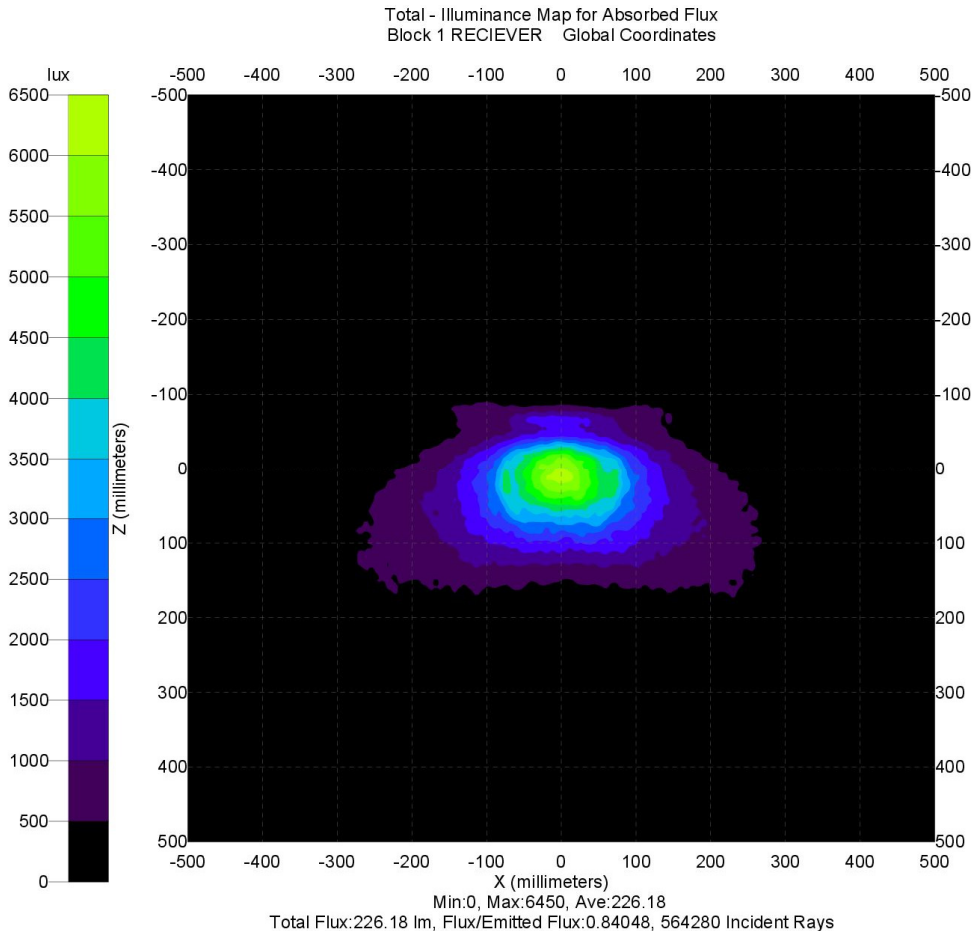
Na obr. 4.9 je ukázka paprsků po trasování čočkou. Pro vyšší názornost je zobrazeno pouze 1000 paprsků, které mají intenzitu vyšší než 40 % z maximální intenzity paprsku pro danou LED a zároveň dopadají na stínítko.



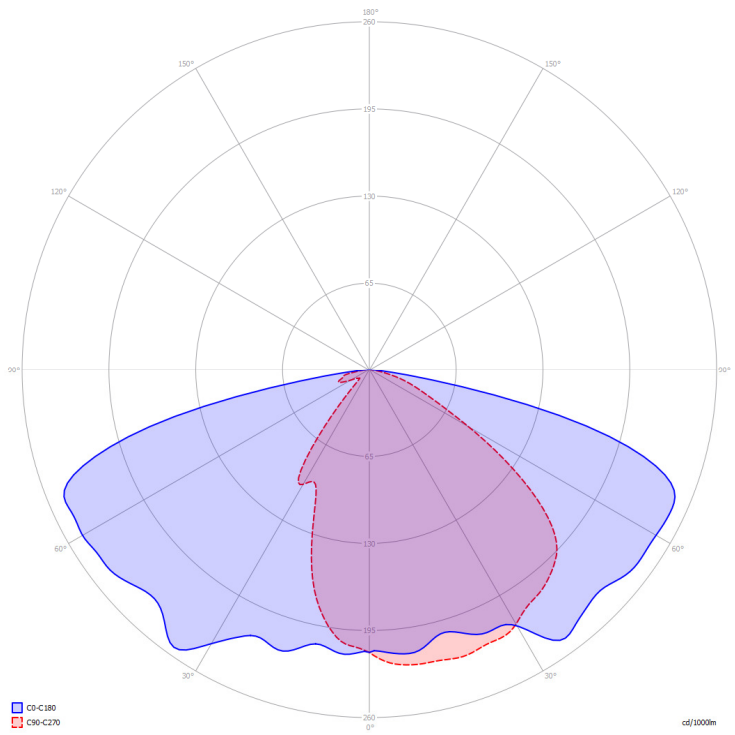
Obr. 4.9 Paprsky po trasování čočkou. Zdroj: autor.

Na obr. 4.10 je zobrazena osvětlenost (znázorněna v nepravých barvách) na stínítku.

Finálním krokem je pak získání tabulky svítivostí z trasování paprsků. TracePro umožňuje exportovat svítivosti se zvoleným úhlovým krokem ve směrech roviny *C* a ve směru úhlu *γ*. Na obr. 4.11 je ukázka křivek svítivosti v rovinách C0-C180 a C90-C290 (viz kap. 2.5).



Obr. 4.10 Mapa osvětlenosti v nepravých barvách. Zdroj: autor.



Obr. 4.11 Křivky svítivosti v rovinách C0-C180 a C90-C270. Zdroj: autor.

5 POROVNÁNÍ NÁVRHŮ A VYHODNOCENÍ

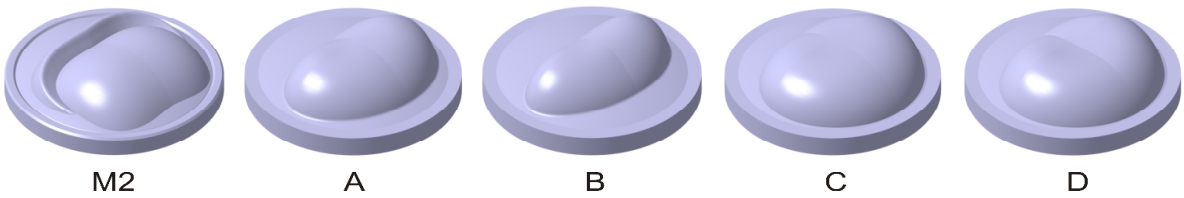
Na základě principů v kapitole 4.4 bylo vytvořeno několik různých úprav modelu původní čočky. Z těchto úprav byl vybrán reprezentativní vzorek čtyř modelů čoček. Vyzařovací charakteristiky jednotlivých modelů budou porovnány s výchozím řešením a pak také s vybranými svítidly na trhu (resp. s jejich vyzařovacími charakteristikami). Pro porovnání využijeme navržený algoritmus (viz kap. 3) se vstupními parametry:

- činitel údržby 0,8,
- povrch komunikace R3,
- uspořádání světelných bodů – rozteč 30 m, výška 8 m, přesah 0 m,
- šířka komunikace 7 m,
- 2 jízdní pruhy.

Při vyhodnocení jsou všechny porovnávané varianty nastaveny na totožný světelný tok svítidla. Tím docílíme nestranného srovnání jednotlivých optik. Dalším hodnotícím kritériem bude rozdíl mezi jednotlivými příkony.

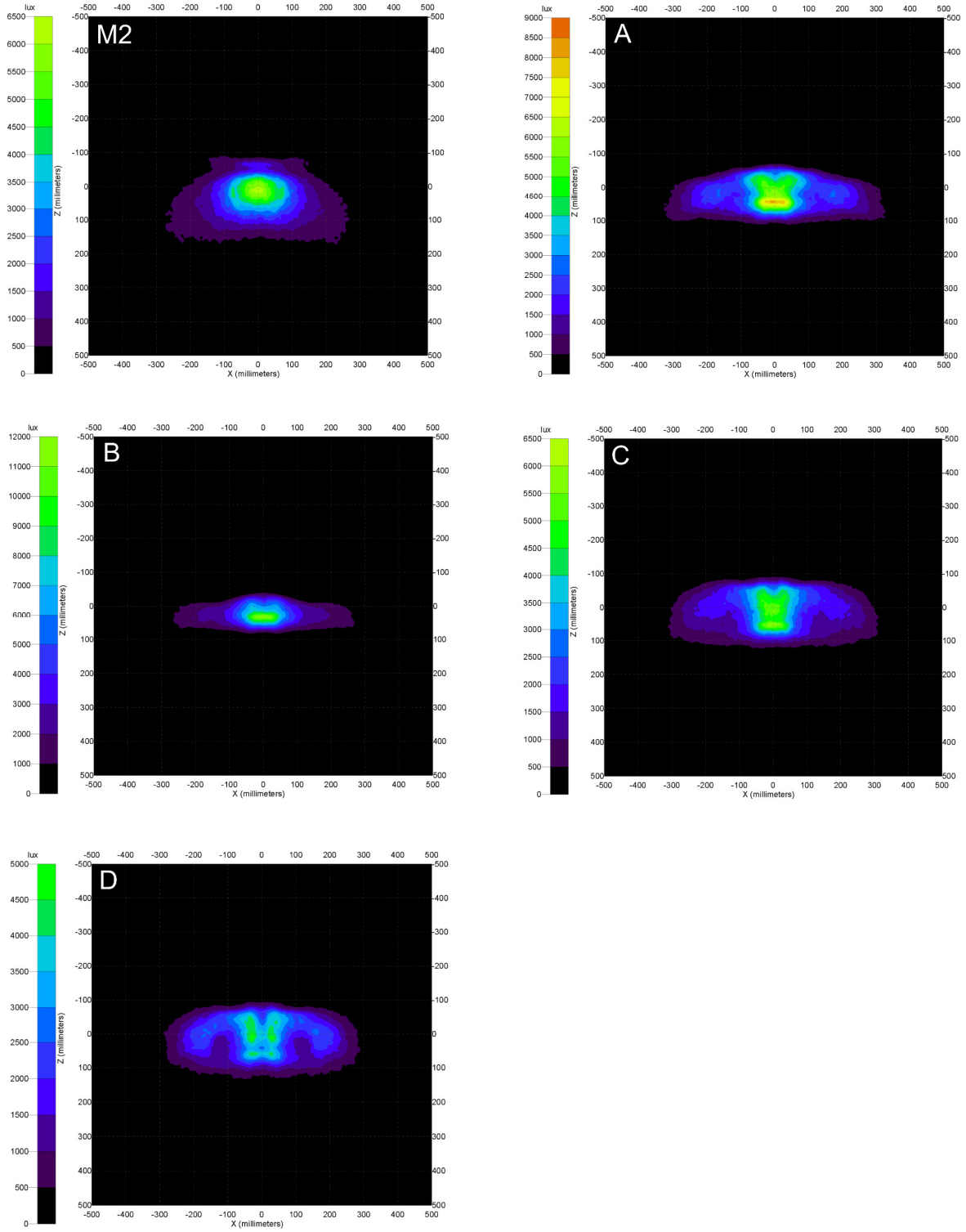
5.1 Porovnání upravených modelů výchozí čočky

Po úpravách původního modelu čočky (s označením M2) s pomocí předpokladů v kapitole 4.4 s následným trasováním paprsků, byly vybrány 4 modifikované modely (označené A, B, C a D), u kterých byly exportovány tabulky svítivosti. Tvary jednotlivých modelů jsou znázorněny na obr. 5.1.



Obr. 5.1 Jednotlivé čočky upravené z původní M2. Zdroj: autor.

Na obr. 5.2 je pro názornost ukázka map osvětlenosti jednotlivých modelů.



Obr. 5.2 Mapy osvětleností jednotlivých modelů. Zdroj: autor.

Po exportu tabulky svítivosti všech modelů byly hodnoty zaneseny do navrženého algoritmu. Pro každý vzorek byl stanoven požadovaný světelný tok zdroje tak, aby byla splněna minimální hodnota průměrného jasu vozovky pro komunikaci třídy osvětlení M5, tj. $\bar{L}$ = 0,5 cd·m^{-2}. V následujících tabulkách (tab. 5.1 až tab. 5.5) jsou výstupy z algoritmu pro jednotlivé verze čoček.

*Tab. 5.1 Vyhodnocení pro původní model **M2**. Světelný tok zdroje 5 650 lm. Zdroj: autor.*

Celkový jas v bodě [cd.m-2] pro pozorovatele 1

m		1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,417	A	0,29	0,30	0,29	0,31	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,28
5,250	B	0,35	0,37	0,34	0,36	0,35	0,35	0,36	0,37	0,38	0,35
4,083	C	0,43	0,43	0,41	0,41	0,43	0,43	0,45	0,46	0,47	0,44
2,917	D	0,54	0,52	0,49	0,50	0,53	0,54	0,54	0,56	0,59	0,53
→ 1,750	E	0,65	0,62	0,61	0,65	0,67	0,67	0,67	0,70	0,69	0,65
0,583	F	0,69	0,68	0,65	0,68	0,72	0,72	0,74	0,79	0,74	0,71

Vyhodnocení (Pozorovatel 1)

L	**0,50**
Uo	**0,56**
Ul	**0,87**

Celkové vyhodnocení

L	**0,50**
Uo	**0,54**
Ul	**0,87**

Celkový jas v bodě [cd.m-2] pro pozorovatele 2

m		1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,417	A	0,31	0,32	0,33	0,33	0,34	0,33	0,32	0,31	0,31	0,29
→ 5,250	B	0,39	0,41	0,39	0,39	0,40	0,39	0,40	0,40	0,40	0,37
4,083	C	0,50	0,51	0,48	0,48	0,50	0,49	0,50	0,50	0,51	0,48
2,917	D	0,64	0,63	0,61	0,64	0,64	0,63	0,62	0,63	0,66	0,60
1,750	E	0,73	0,72	0,72	0,76	0,77	0,75	0,75	0,77	0,75	0,71
0,583	F	0,62	0,61	0,61	0,65	0,70	0,70	0,71	0,76	0,71	0,69

Vyhodnocení (Pozorovatel 2)

L	**0,54**
Uo	**0,54**
Ul	**0,89**

*Tab. 5.2 Vyhodnocení pro model **A**. Světelný tok zdroje 3 500 lm. Zdroj: autor.*

Celkový jas v bodě [cd.m-2] pro pozorovatele 1

m		1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,417	A	0,32	0,30	0,28	0,30	0,28	0,25	0,23	0,23	0,27	0,31
5,250	B	0,40	0,35	0,36	0,40	0,39	0,34	0,29	0,27	0,32	0,40
4,083	C	0,39	0,39	0,45	0,52	0,57	0,48	0,36	0,32	0,34	0,39
2,917	D	0,43	0,48	0,59	0,72	0,80	0,68	0,45	0,35	0,36	0,39
→ 1,750	E	0,50	0,60	0,78	1,03	1,11	0,91	0,61	0,44	0,43	0,44
0,583	F	0,50	0,65	0,81	1,04	1,15	0,99	0,70	0,55	0,50	0,46

Vyhodnocení (Pozorovatel 1)

L	**0,50**
Uo	**0,46**
Ul	**0,40**

Celkové vyhodnocení

L	**0,50**
Uo	**0,44**
Ul	**0,40**

Celkový jas v bodě [cd.m-2] pro pozorovatele 2

m		1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,417	A	0,35	0,33	0,33	0,33	0,30	0,26	0,25	0,24	0,29	0,33
→ 5,250	B	0,45	0,42	0,43	0,45	0,45	0,37	0,32	0,30	0,35	0,42
4,083	C	0,49	0,51	0,57	0,63	0,66	0,54	0,39	0,34	0,37	0,44
2,917	D	0,55	0,63	0,78	0,95	0,97	0,77	0,51	0,39	0,42	0,45
1,750	E	0,60	0,74	0,98	1,24	1,28	1,02	0,67	0,49	0,47	0,50
0,583	F	0,43	0,58	0,76	1,01	1,14	0,99	0,69	0,53	0,48	0,44

Vyhodnocení (Pozorovatel 2)

L	**0,56**
Uo	**0,44**
Ul	**0,67**

*Tab. 5.3 Vyhodnocení pro model **B**. Světelný tok zdroje 3 700 lm. Zdroj: autor.*

Celkový jas v bodě [cd.m-2] pro pozorovatele 1

m		1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,417	A	0,31	0,28	0,26	0,27	0,25	0,24	0,24	0,23	0,26	0,30
5,250	B	0,44	0,38	0,36	0,39	0,37	0,35	0,34	0,34	0,37	0,44
4,083	C	0,56	0,48	0,47	0,51	0,53	0,49	0,45	0,45	0,51	0,58
2,917	D	0,56	0,57	0,58	0,65	0,71	0,67	0,57	0,53	0,59	0,56
→ 1,750	E	0,55	0,62	0,69	0,82	0,85	0,77	0,65	0,58	0,59	0,53
0,583	F	0,52	0,60	0,65	0,74	0,76	0,64	0,50	0,51	0,55	0,49

Vyhodnocení (Pozorovatel 1)

L	**0,50**
Uo	**0,47**
Ul	**0,63**

Celkový jas v bodě [cd.m-2] pro pozorovatele 2

m		1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,417	A	0,33	0,30	0,30	0,30	0,28	0,25	0,25	0,25	0,27	0,32
→ 5,250	B	0,48	0,43	0,42	0,44	0,42	0,38	0,37	0,37	0,40	0,46
4,083	C	0,64	0,59	0,57	0,60	0,62	0,56	0,50	0,49	0,55	0,62
2,917	D	0,67	0,70	0,74	0,84	0,86	0,77	0,63	0,58	0,65	0,62
1,750	E	0,64	0,74	0,84	0,98	0,98	0,86	0,72	0,64	0,64	0,59
0,583	F	0,45	0,54	0,60	0,71	0,75	0,63	0,49	0,50	0,54	0,47

Vyhodnocení (Pozorovatel 2)

L	**0,55**
Uo	**0,45**
Ul	**0,77**

Celkové vyhodnocení

L	**0,50**
Uo	**0,45**
Ul	**0,63**

*Tab. 5.4 Vyhodnocení pro model **C**. Světelný tok zdroje 4 150 lm. Zdroj: autor.*

Celkový jas v bodě [cd.m-2] pro pozorovatele 1

m		1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,417	A	0,28	0,26	0,24	0,24	0,23	0,21	0,20	0,20	0,24	0,27
5,250	B	0,37	0,32	0,32	0,34	0,31	0,27	0,25	0,25	0,30	0,36
4,083	C	0,38	0,39	0,43	0,47	0,45	0,37	0,32	0,30	0,33	0,38
2,917	D	0,45	0,51	0,61	0,69	0,67	0,54	0,40	0,35	0,38	0,41
→ 1,750	E	0,58	0,68	0,89	1,08	1,03	0,78	0,54	0,43	0,45	0,50
0,583	F	0,65	0,81	1,08	1,33	1,33	1,04	0,70	0,52	0,51	0,56

Vyhodnocení (Pozorovatel 1)

L	**0,50**
Uo	**0,40**
Ul	**0,40**

Celkový jas v bodě [cd.m-2] pro pozorovatele 2

m		1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,417	A	0,30	0,29	0,28	0,27	0,25	0,22	0,21	0,21	0,25	0,29
→ 5,250	B	0,41	0,38	0,38	0,38	0,35	0,30	0,27	0,28	0,32	0,38
4,083	C	0,47	0,50	0,55	0,57	0,53	0,42	0,34	0,33	0,36	0,42
2,917	D	0,58	0,67	0,82	0,92	0,82	0,62	0,45	0,39	0,43	0,47
1,750	E	0,70	0,86	1,12	1,31	1,19	0,87	0,59	0,48	0,49	0,56
0,583	F	0,56	0,71	1,00	1,30	1,32	1,03	0,68	0,51	0,49	0,53

Vyhodnocení (Pozorovatel 2)

L	**0,55**
Uo	**0,40**
Ul	**0,67**

Celkové vyhodnocení

L	**0,50**
Uo	**0,40**
Ul	**0,40**

*Tab. 5.5 Vyhodnocení pro model **D**. Světelný tok zdroje 4 100 lm. Zdroj: autor.*

Celkový jas v bodě [cd.m-2] pro pozorovatele 1

m		1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,417	A	0,19	0,21	0,21	0,25	0,28	0,27	0,22	0,19	0,21	0,19
5,250	B	0,29	0,28	0,27	0,34	0,39	0,37	0,28	0,23	0,29	0,29
4,083	C	0,34	0,34	0,36	0,46	0,57	0,51	0,35	0,28	0,33	0,35
2,917	D	0,38	0,43	0,50	0,67	0,86	0,75	0,42	0,32	0,36	0,36
→ 1,750	E	0,51	0,58	0,73	1,03	1,28	1,06	0,55	0,40	0,44	0,46
0,583	F	0,62	0,72	0,92	1,28	1,61	1,36	0,70	0,48	0,52	0,56

Vyhodnocení (Pozorovatel 1)

L	**0,50**
Uo	**0,39**
Ul	**0,31**

Celkové vyhodnocení

L	**0,50**
Uo	**0,39**
Ul	**0,31**

Celkový jas v bodě [cd.m-2] pro pozorovatele 2

m		1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,417	A	0,21	0,23	0,24	0,27	0,30	0,29	0,24	0,21	0,22	0,21
→ 5,250	B	0,32	0,33	0,32	0,38	0,44	0,40	0,32	0,26	0,31	0,31
4,083	C	0,41	0,43	0,45	0,56	0,67	0,59	0,38	0,31	0,37	0,39
2,917	D	0,49	0,56	0,67	0,90	1,05	0,86	0,48	0,37	0,42	0,42
1,750	E	0,62	0,72	0,92	1,26	1,48	1,19	0,61	0,45	0,49	0,53
0,583	F	0,52	0,63	0,84	1,24	1,59	1,34	0,67	0,45	0,49	0,53

Vyhodnocení (Pozorovatel 2)

L	**0,55**
Uo	**0,40**
Ul	**0,59**

Hodnoty z tab. 5.1 až 5.5 byly porovnány s požadavky třídy osvětlení M5. Srovnání je uvedeno v tab. 5.6.

Tab. 5.6 Srovnání parametrů jednotlivých modelů. Zdroj: autor.

Model	Světelný tok zdroje [lm]	Třída osvětlení	Průměrný jas povrchu vozovky L [cd.m^{-2}]			Celková rovnoměrnost *Uo* [-]			Podélná rovnoměrnost *Ul* [-]		
			Min.	Výpočet		Min.	Výpočet		Min.	Výpočet	
M2	5650	M5	≥ 0,5	0,5	OK	≥ 0,35	0,54	OK	≥ 0,40	0,87	OK
A	3500	M5	≥ 0,5	0,5	OK	≥ 0,35	0,44	OK	≥ 0,40	0,40	OK
B	3700	M5	≥ 0,5	0,5	OK	≥ 0,35	0,45	OK	≥ 0,40	0,63	OK
C	4150	M5	≥ 0,5	0,5	OK	≥ 0,35	0,40	OK	≥ 0,40	0,40	OK
D	4100	M5	≥ 0,5	0,5	OK	≥ 0,35	0,39	OK	≥ 0,40	0,31	NOK

Z tab. 5.6 je patrné, že u všech upravených variant čočky M2 (A, B, C a D) se snížila celková i podélná rovnoměrnost, ale také došlo k výraznému snížení potřebného světelného toku. Model D nicméně již nevyhovuje požadavku podélné rovnoměrnosti, a proto nebude uvažován v dalším srovnání.

5.2 Porovnání jednotlivých modelů s komerčními svítidly

Následující závěrečná kapitola porovnává optické vlastnosti upravených modelů s vybranými svítidly na trhu. Mezi ně patří:

- Philips Luma (BGP621 1xECO49_740),
- Schréder Voltana 3 (5141 24 LG Innotek 3535 Gen4 700mA WW).

Údaje o světelném toku, příkonu a tabulky svítivosti jsou převzaty z webových stránek výrobců [17,18]. Volba těchto dvou svítidel byla provedena záměrně. Philips je světovým lídrem v oblasti osvětlení a Artechnic – Schréder je přední český výrobce svítidel.

Porovnání je provedeno stejně jako v kap. 5.1 při přibližně stejném průměrném jasu povrchu vozovky třídy osvětlení M5, tj. $\bar{L}$ = 0,5 cd·m^{-2} a vstupních parametrech uvedených v kap. 5. Sledován bude potřebný světelný tok zdroje a příkon. U upravených modelů, u kterých neznáme konkrétní elektronickou konfiguraci bude příkon svítidla určen na základě potřebného světelného toku zdroje a měrného světelného výkonu svítidla, z nějž pochází původní model čočky (Lada 16 C40-1000-M2). Měrný výkon odpovídá 133 lm · W^{-1} dle [11].

Abychom porovnali skutečně pouze optické vlastnosti, bude přes stejný měrný výkon dopočten příkon ostatních svítidel. Tím zajistíme, že nebude srovnání ovlivněno měrným výkonem LED u zmíněných svítidel.

Výsledné porovnání je v tab. 5.7. Jednotlivá svítidla/modely jsou seřazeny vzestupně podle příkonu svítidla.

Tab. 5.7 Porovnání všech variant. Zdroj: autor.

Model	Třída osvětlení	Průměrný jas povrchu vozovky L [cd.m^{-2}]		Světelný tok zdroje [lm]	Příkon svítidla [W] *
		Min.	Výpočet		
A	M5	≥ 0,5	0,50	3500	26
B	M5	≥ 0,5	0,50	3700	28
C	M5	≥ 0,5	0,50	4150	31
Philips Luma	M5	≥ 0,5	0,52	4900	37
M2	M5	≥ 0,5	0,50	5650	42
Voltana 3	M5	≥ 0,5	0,53	6132	46

**Při měrném výkonu 133 lm · W^{-1}.*

Z tab. 5.7 je patrné, že mezi prvním a posledním svítidlem je téměř dvojnásobný rozdíl v příkonu svítidla. Díky tomu, že byla svítidla porovnána při stejném měrném výkonu můžeme konstatovat, že rozdíl v příkonech, resp. potřebných světelných tocích je primárně závislý na optické části svítidla. Při pouhém porovnání mezi samotnými úpravami čočky M2 lze zjistit, že největší úspora na příkonu (mezi původní verzí čočky a verzí A) je při definovaných parametrech 16 W, tj. 38 %.

S ohledem na kvalitu osvětlení je však nejlepší volbou model B, s nímž by sice svítidlo mělo o 2 W vyšší příkon, ale oproti modelu A má o 58 % vyšší podélnou rovnoměrnost (viz tab. 5.6 a 5.7).

Na druhou stranu se po úpravách zhoršila rovnoměrnost osvětlení. Pro třídu osvětlení M5 byly požadavky splněny jen s malou rezervou. Pro třídu osvětlení M4 by již nebyly požadavky na rovnoměrnost splněny a bylo by třeba zajistit další úpravu tvaru pro zvýšení rovnoměrnosti.

ZÁVĚR

Tato práce se zabývala návrhem optické čočky svítidla pro osvětlení pozemních komunikací. Na začátku práce byly zmíněny důležité světelně-technické veličiny a dále popsána metodika hodnocení osvětlení komunikací s definicemi a výpočty všech klíčových parametrů pro osvětlení vybrané třídy osvětlení M, pro kterou byl v závěru práce navrhován optický sytém – soustava LED a skleněné čočky.

Před samotným návrhem byla popsaná metodika použita k naprogramování algoritmu, který byl navržen tak, aby na základě geometrického uspořádání svítidel, šířky vozovky či svítivosti svítidla vypočítal hodnotící kritéria, zejména pak jasy v kontrolních bodech. Otočením vztahů v algoritmu se na základě požadovaných jasů a definovaných parametrů osvětlovací soustavy zpětně dopočítaly potřebné svítivosti.

Svítivosti získané algoritmem byly dále využity pro úpravu modelu optické čočky. Pro ověření optických vlastností čočky byla využita metoda trasování paprsků v softwaru TracePro. Výstupem byly mimo jiné tabulky svítivosti, které zpětně ověřily optické vlastnosti čoček v navrženém algoritmu. Na závěr byly vyhodnoceny úpravy jednotlivých modelů a bylo vytvořeno porovnání s vybranými svítidly na trhu.

Úpravou čočky se povedlo u jednoho z návrhů docílit snížení potřebného příkonu svítidla o 38 % oproti původnímu řešení. Účelem práce však nebylo vytvoření konkrétního tvaru čočky pro konkrétní vstupní parametry osvětlovací soustavy, nýbrž popsání a navržení metodiky konstrukce čoček pro obecné zadání. Stejným postupem lze navrhovat či upravovat čočky při různém geometrickém uspořádání světelných bodů, šířce vozovky a povrchu komunikace.

V budoucnu by se dala tato metodika rozšířit o naprogramování algoritmu, který by na základě dopočtených svítivostí rovnou navrhl tvary optických ploch, čímž by odpadla nutnost ručního modelování. V kombinaci s vyvíjející se technologií 3D tisku optických čoček by v budoucnu mohla nastat situace, kdy se budou 3D tiskem vyrábět optické čočky na míru parametrům osvětlovacích soustav. Každé svítidlo, resp. jeho optická část by mohla být originální. Oproti dnešním konvenčním svítidlům by byly osvětlované oblasti přesně definované, omezilo by se tím rušivé světlo a snížil příkon svítidel.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

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

[2] ČSN CEN/TR 13201-1. *Osvětlení pozemních komunikací – Část 1: Návod pro výběr tříd osvětlení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

[3] ČSN EN 13201-2. *Osvětlení pozemních komunikací – Část 2: Požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

[4] ČSN EN 13201-3. *Osvětlení pozemních komunikací – Část 3: Výpočet*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

[5] ČSN P 36 0455. *Osvětlení pozemních komunikací – Doplňující informace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

[6] ČSN P 36 0455. *Osvětlení pozemních komunikací – Doplňující informace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

[7] Trilux LUMEGA IQ 90. *Trilux* [online]. TRILUX GmbH & Co., 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: https://bit.ly/2s8ZG6c

[8] R-Tables for Roadway Lighting. *AGi32* [online]. Lighting Analysts, Inc., 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: https://bit.ly/2IKT4pO

[9] CIE a COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE. *Design methods for lighting of roads*. Vienna: CIE Central Bureau, 1999. ISBN 978-390-0734-923.

[10] Bilinear Interpolation Equation Calculator. *AJ Design Software* [online]. Jimmy Raymond [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: https://bit.ly/2s6m5Sn

[11] Poskytnutá data svítidel firmy Lamberga

[12] Výstupy softwaru DIALux evo 6.2

[13] 3D skenování. *CAD.cz* [online]. CAD.cz [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: https://bit.ly/2KPycKI

[14] 3D skenování - zpracování dat, reverzní inženýrství, kontrola kvality. *SolidVision* [online]. SolidVision, s.r.o. [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: https://bit.ly/2sazDLY

[15] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.

[16] XLamp XP-L2. *CREE* [online]. Cree, Inc., 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: https://bit.ly/2IOZyQB

[17] Philips Product Selector 5.2.8.1. *Philips Lighting* [online]. Signify Holding, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: https://philips.to/2xcT4JG

[18] Schréder Voltana 3. *Artechnic – Schréder* [online]. Artechnic – Schréder, 2018 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: https://bit.ly/2sbcCbz