



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**NÁVRH VEŘEJNÉHO OSVĚTLENÍ PRO ZVÝŠENÍ
BEZPEČNOSTI SILNIČNÍHO PROVOZU**

DESIGN OF PUBLIC LIGHTING FOR THE IMPROVEMENT OF ROAD SAFETY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Miroslav Krejčí

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lubor Zháňal, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Miroslav Krejčí
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojírenství
Vedoucí práce:	Ing. Lubor Zháňal, Ph.D.
Akademický rok:	2015/16

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 bakalářské práce:

Návrh veřejného osvětlení pro zvýšení bezpečnosti silničního provozu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analýza nebezpečně osvětlených míst na pozemních komunikacích a jejich následný nový světelně technický výpočet dle normy pro osvětlení pozemních komunikací.

Cíle bakalářské práce:

Student má v bakalářské práci za úkol analyzovat vybraná nebezpečně osvětlená místa na pozemních komunikacích. Následně vytvořit světelně technický návrh s původními parametry popř. provést experimentální měření a porovnat výsledky s normou. Poté provést nový světelně technický návrh a porovnat bezpečnost a ekonomické parametry původního stavu s novým řešením.

Seznam literatury:

ČSN CEN/TR 13201-1. Osvětlení pozemních komunikací - Část 1: Výběr tříd osvětlení. Praha: Český normalizační institut, 2007.

ČSN EN 13201-2. Osvětlení pozemních komunikací - Část 2: Požadavky. Praha: Český normalizační institut, 2005.

ČSN EN 13201-2 ZMĚNA Z1. Osvětlení pozemních komunikací - Část 2: Požadavky. Praha: Český normalizační institut, 2007.

ČSN EN 13201-3. Osvětlení pozemních komunikací - Část 3: Výpočet. Praha: Český normalizační institut, 2005.

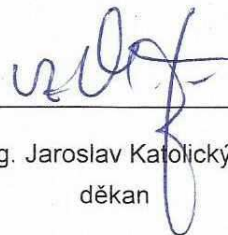
ČSN EN 13201-4. Osvětlení pozemních komunikací - Část 4: Metody měření. Praha: Český normalizační institut, 2005.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 10. 12. 2015



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu



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



Abstrakt

Práce se zabývá zhodnocením stavu vybraných soustav veřejného osvětlení. S využitím měření a výpočtu světelně technických veličin jsou tyto soustavy porovnány s normou pro osvětlení pozemních komunikací. Nevyhovující soustavy jsou s využitím software DIALux navrženy tak, aby požadavky normy splňovaly. Část práce je věnována také problematice osvětlení přechodů pro chodce, vlivu barvy ve veřejném osvětlení a ekonomickému zhodnocení.

Klíčová slova

Veřejné osvětlení, osvětlenost, bezpečnost, pozemní komunikace, přechod pro chodce.

Abstract

This paper is focused on quality assessment of public lighting systems. These systems are compared to the standard requirements of road lighting rules. Inconvenient systems are redesign with help of lighting design software DIALux in order to fulfill these rules. Part of this paper is dedicated to other issues like pedestrian crossings, color effect and economy.

Keywords

Public lighting, illuminance, road safety, pedestrian crossings.



Bibliografická citace

KREJČÍ, M. *Návrh veřejného osvětlení pro zvýšení bezpečnosti silničního provozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lubor Zháňal, Ph.D.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Lubora Zháňala, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. května 2016

.....
Jméno a příjmení



Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval panu Ing. Luboru Zháňalovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce. Dále děkuji své rodině za veškerou poskytnutou podporu a firmě Lamberga s.r.o za zapůjčení měřicí techniky.



Obsah

Obsah	9
Úvod	11
1. Veličiny ve světelné technice.....	12
1.1. Světelný tok.....	12
1.2. Prostorový úhel.....	14
1.3. Svítivost.....	15
1.4. Osvětlenost	16
1.5. Jas svazku paprsků	17
1.6. Světlení.....	17
2. Měření světelně technických veličin.....	18
2.1. Podmínky při měření	18
2.2. Umístění kontrolních bodů a pozorovatele	18
2.3. Měření osvětlenosti	18
2.4. Měření jasu	19
3. Světelně technické výpočty.....	21
3.1. Sít kontrolních bodů.....	21
3.2. Vodorovná osvětlenost v bodě.....	22
3.3. Jas v bodě	23
3.4. Doplňující výpočty.....	24
3.4.1. Průměrný jas povrchu pozemní komunikace	24
3.4.2. Podélná rovnoměrnost jasu.....	24
3.4.3. Průměrná osvětlenost.....	24
3.4.4. Minimální osvětlenost.....	24
3.4.5. Celková rovnoměrnost (jasu či osvětlenosti)	24
3.4.6. Prahový přírůstek.....	25
3.4.7. Činitel osvětlení okolí	25
3.5. Vzorový výpočet vodorovné osvětlenosti.....	26
3.6. Výpočty pomocí software DIALux.....	29
4. Třídy osvětlení	30
4.1. Volba třídy osvětlení.....	30
4.2. Třídy osvětlení ME.....	32
4.3. Třídy osvětlení S.....	33
4.4. Třídy osvětlení CE	33
5. Popis hodnocených míst.....	34
5.1. Osvětlení v obci XY.....	34
5.2. Výměna svítidel před budovou A1 FSI VUT v Brně	34
5.3. Osvětlení přechodu pro chodce.....	34
5.4. Kompletní výměna osvětlení v obci XZ	35
6. Osvětlení v obci XY.....	36
6.1. Stanovení kontrolní sítě.....	36
6.2. Měření vodorovné osvětlenosti.....	37
6.3. Nebezpečí od nevhodného osvětlení	38
6.4. Volba třídy osvětlení.....	39
6.5. Světelně technický výpočet.....	39
6.6. Nový návrh VO	41



6.7.	Rozdíly mezi původním a novým návrhem	42
6.8.	Ekonomické parametry	43
6.9.	Závěr	43
7.	Výměna svítidel před budovou A1 FSI VUT v Brně	44
7.1.	Stanovení kontrolní sítě	44
7.2.	Měření vodorovné osvětlenosti a hodnocení rovnoměrnosti	45
7.3.	Ekonomické parametry	46
7.4.	Vliv barvy světla	46
7.5.	Závěr	49
8.	Osvětlení přechodu pro chodce	50
8.1.	Hodnocení pomocí světlených simulací	51
8.2.	Návrh možného řešení	52
8.3.	Volba třídy osvětlení a výpočet osvětlenosti chodce	52
8.4.	Světelná simulace	52
8.5.	Výměna svítidel přechodu	53
8.6.	Ekonomické parametry	55
8.7.	Závěr	55
9.	Kompletní výměna osvětlení v obci XZ	56
9.1.	Řešení problematiky	56
9.2.	Závěr	56
	Závěr	57
	Seznam symbolů a zkratk	58
	Seznam použité literatury	59
	Seznam příloh	61



Úvod

Veřejné osvětlení (dále VO) je jedním ze základních kamenů moderní civilizace. Jeho počátky sahají až do antické doby, kdy si staří Řekové osvětlovali ulice svých měst olejovými lampami. [21] Jednak z důvodů ochrany zdraví obyvatel, ale také kvůli ochraně majetku a celkovému snížení kriminality. Stejně priority zůstávají zachovány i dnes, ačkoliv se vývoj VO dynamicky mění. Nové světelné zdroje a technologie řízení ale nedokážou zabránit nekvalitně navržené soustavě VO. Proto nastupuje obor *světelná technika*, který se zabývá vznikem světla a jeho využitím pro potřeby člověka. Ta má za úkol vytváření co nejlepšího světelného prostředí s přihlédnutím na dané technologické, energetické a ekonomické možnosti. Lidskou činnost spojenou s vytvářením požadovaného světelného prostředí nazýváme *osvětlování*.

Při návrhu VO z hlediska dostatečného množství a kvality světla se řídíme příslušnými technickými normami (ČSN EN 13 201 a jejími částmi), popř. doporučeními Mezinárodní komise pro osvětlování CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*). Tyto dokumenty ale vznikly zpravidla až po roce 2000, přičemž stáří většiny soustav VO sahá mnohem dále. V praxi se tak často setkáváme s osvětlením, které je vlivem poklesu světelného toku na konci životnosti popř. novým osvětlením, u kterého nebyl proveden světelně technický výpočet apod. Nejenže tyto soustavy nesplňují technické normy, ale můžou svým nešťastným návrhem (příliš velkou roztečí apod.) ohrozit zdraví a život účastníků provozu na pozemních komunikacích.

Cílem této práce je popsat metodiku hodnocení stavu veřejného osvětlení a u vybraných míst (spolu s měřením osvětlenosti luxmetrem, světelnými výpočty a simulacemi v softwaru DIALux) zhodnotit jejich stav a porovnat jej s příslušnými normativními požadavky. V případě, že dané místo tyto požadavky nesplňuje, je úkolem navrhnout vhodné řešení, jak situaci napravit. Práce by měla být zaměřena především na nebezpečně osvětlená místa na pozemních komunikacích s čímž souvisí i problematika vlivu barvy ve veřejném osvětlení, osvětlení přechodů pro chodce a také ekonomické parametry soustav.



1. Veličiny ve světelné technice

Pro pochopení dané problematiky je třeba nejdříve vysvětlit význam veličin, které nám pomáhají posoudit vlastnosti a kvalitu osvětlení. Při jejich hodnocení se posuzuje, jak dobře osvětlení napomáhá zpracovat informace přinášené světlem a jak ovlivňuje proces vidění. Ve světelné technice neposuzujeme energetické veličiny jako *zářivý tok*, *zářivost* apod., protože nerespektují změnu citlivosti lidského oka při záření s různými vlnovými délkami. Používáme proto takzvané *fotometrické veličiny*, které při návrhu zahrnují vliv zraku člověka. Aby se předešlo neshodám ve světelně technických výpočtech vlivem různé citlivosti zraku každého pozorovatele, byla přijata Mezinárodní komisí pro osvětlování (CIE) dohoda o hodnotách spektrální citlivosti tzv. *normálního fotometrického pozorovatele*. [1]

1.1 Světelný tok

Světelně technická veličina vyjadřující schopnost zářivého toku (energie přenesená zářením za jednotku času) způsobit zrakový vjem. Jednotkou světelného toku je *lumen* (lm). Světelný tok Φ monochromatického záření vlnové délky λ , jehož zářivý tok je Φ_e (W) se určí ze vztahu

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \times \Phi_e(\lambda), \quad (1.1)$$

kde $K(\lambda)$ ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$) je *světelný účinek monochromatického záření* rovný poměru světelného toku a jemu odpovídajícímu zářivému toku. Můžeme ho dále vyjádřit vztahem

$$K(\lambda) = K_m \times V(\lambda), \quad (1.2)$$

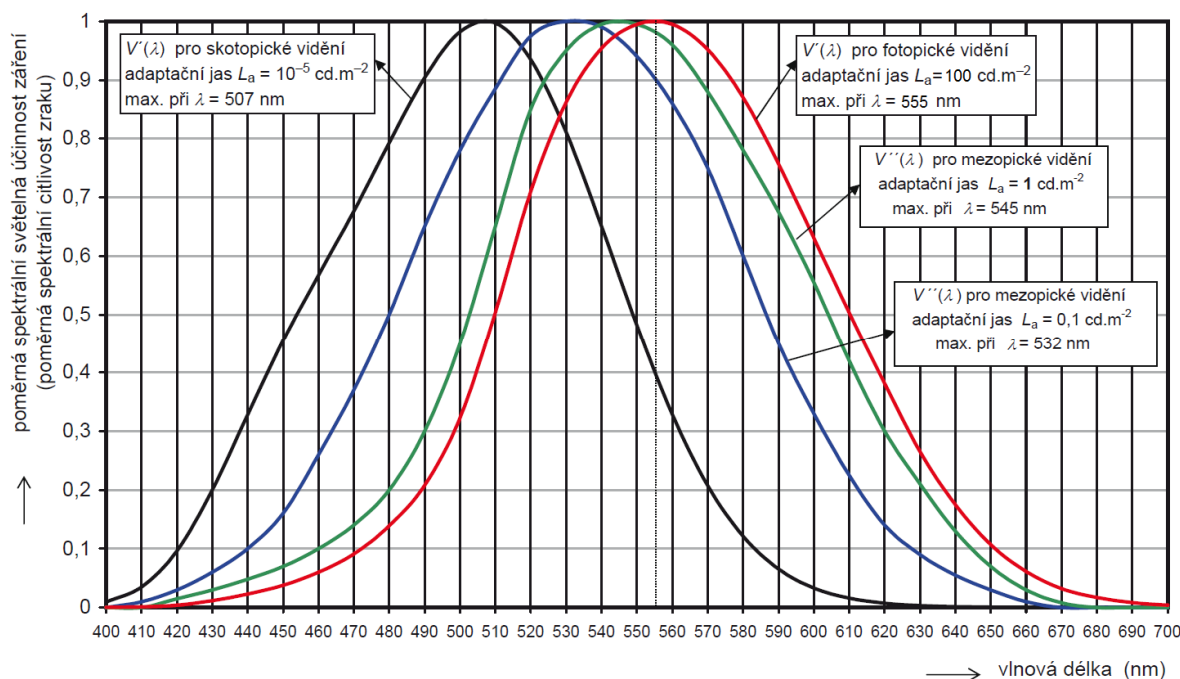
resp.

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m}, \quad (1.3)$$

kde K_m ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$) je maximální hodnota spektrálního průběhu veličiny $K(\lambda)$ a $V(\lambda)$ (–) je poměrná světelná účinnost monochromatického záření.

Instituce CIE a ISO schválily, že maximum K_m světelné účinnosti záření $K(\lambda)$ odpovídající monofrekvenčnímu záření základní vlnové délky $\lambda = \lambda_m = 555,0155 \text{ nm}$ dosahuje u normálního fotometrického pozorovatele při fotopickém vidění hodnoty $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. [1]

Průběh poměrné spektrální světelné účinnosti monochromatického záření $V(\lambda)$ resp. poměrné spektrální citlivosti oka pro různé adaptační jasy můžeme vidět na obr. 1. [8]



Obr. 1: Průběhy poměrné spektrální citlivosti zraku (resp. poměrné světelné účinnosti) pro různé adaptační jasy (skotopické, fotopické a mezopické vidění) [8]

Znázorněny jsou průběhy pro skotopické, fotopické a mezopické vidění. Rozdíl mezi těmito typy vidění závisí na receptorech lidského oka, které se při daném osvětlení spouští.

- Skotopické vidění – noční vidění oka adaptovaného na tmu (tyčinkové receptory)
- Fotopické vidění – vidění za plného denního světla (čípkové receptory)
- Mezopické vidění – smíšené vidění oběma typy receptorů (za šera, soumraku apod.) [1]

S oblastí mezopického vidění se setkáváme právě ve veřejném osvětlení při osvětlování komunikací a v nouzovém osvětlení. Problém ale nastává při posuzování konkrétních případů osvětlení. Průběh poměrné světelné účinnosti je definován v oblasti mezopického vidění pro adaptační jasy $0,1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ a $1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Pro různé adaptační jasy by bylo třeba stanovit odpovídající průběhy poměrné spektrální citlivosti a poté vypracovat světelně technický výpočet. Uniformní postup ani v rámci CIE zatím neexistuje. V praxi se tak můžeme setkat s odchylkami mezi subjektivním vjemem pozorovatele a objektivními hodnotami fotometrických veličin. Tyto veličiny byly totiž naměřeny přístroji, jejichž poměrná spektrální citlivost se shoduje s dohodnutým průběhem poměrné spektrální citlivosti *normálního fotometrického pozorovatele* v podmínkách fotopického vidění. Komplikovanost problému a rozdíly ve vnímání světla vůči fotometrickým veličinám umocňuje kromě adaptačních jasů i různé spektrální složení použitých zdrojů světla. O významu mezopického vidění pro praxi podrobněji píše prof. Ing. Jiří Habel, DrSc. v článku pro časopis Světlo č.6/2007. [8]

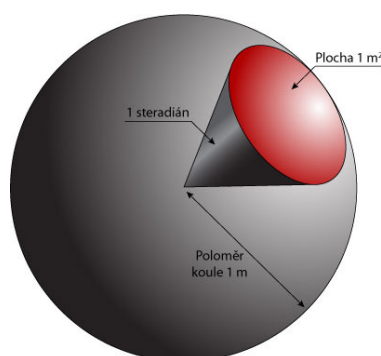


1.2 Prostorový úhel

Tato geometrická veličina má velký význam ve světelně technických výpočtech. Je definován velikostí plochy vyřaté obecnou kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule, jejíž střed (vrchol prostorového úhlu) je totožný s vrcholem uvažované kuželové plochy. Prostorový úhel se značí Ω a stanoví se z následujícího vztahu

$$\Omega = \frac{A}{r^2}, \quad (1.4)$$

přičemž jednotkou prostorového úhlu je steradián (sr), určený jednotkovou plochou A (1 m^2) na povrchu jednotkové koule o poloměru r (1 m). Největší hodnoty ($\Omega_{\max} = 4 \times \pi$) nabývá prostorový pro plochu povrchu celé koule, tedy $A = 4 \times \pi \times r^2$. [1]

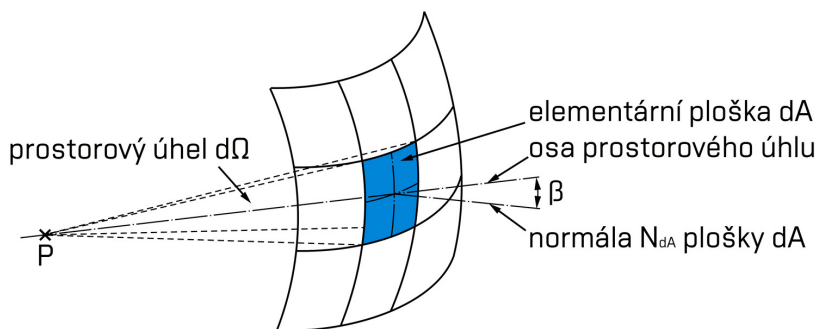


Obr. 2: Prostorový úhel 1 sr [12]

Pokud se zaměříme na elementární plošku, dostaneme vztah

$$d\Omega = \frac{dA \times \cos \beta}{l^2}, \quad (1.5)$$

kde dA (m^2) je elementární ploška, která je z pozorovacího bodu P ve vzdálenosti l (m), vidět pod prostorovým úhlem $d\Omega$ (sr), kdy osa prostorového úhlu svírá s normálou N_{dA} plošky dA úhel β . Tato situace je znázorněna na obr. 3. [1,8]



Obr. 3: Elementární ploška ze vztahu (1.5) [1]

1.3 Svítivost

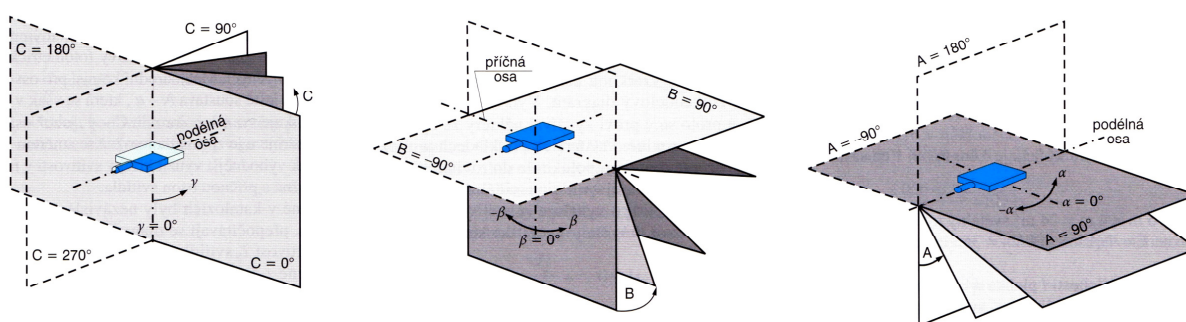
Protože v praxi svítidla nemají rovnoměrný světelný tok, je třeba znát prostorovou hustotu světelného toku v různých směrech, kterou nazýváme svítivost. Svítivost zdroje (či svítidla) se značí $I_{\gamma\zeta}$, přičemž úhly γ , ζ určují její směr. Jednotkou je *kandela* (cd). Určí se ze vztahu

$$I_{\gamma\zeta} = \frac{d\Phi}{d\Omega_{\gamma\zeta}}, \quad (1.6)$$

kde $d\Omega_{\gamma\zeta}$ (sr) je prostorový úhel, jehož osa leží ve směru určeném úhly γ , ζ a v jehož mezích vyzařuje námi uvažované svítidlo (či zdroj) světelný tok $d\Phi$ (lm). Tento zdroj je umístěn ve vrcholu prostorového úhlu $d\Omega_{\gamma\zeta}$ - svítivost je tedy definována pro bodový zdroj, popř. svítidlo bodového typu (vyzařovací plocha je zanedbatelná vůči vzdálenosti kontrolního bodu od vrcholu prostorového úhlu). [1]

Jedna kandela (1 cd) je definována jako svítivost zdroje, který v určitém směru vyzařuje monochromatické záření o frekvenci $540 \cdot 10^{12}$ Hz, jehož zářivost v tomto směru je $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$.

Zjistí-li se hodnoty svítivosti svítidla ve všech směrech v prostoru a znázorní se od středu zdroje jako polohové vektory, vznikne spojením konců těchto vektorů fotometrická plocha svítivosti. Pro znázornění však stačí pouze řezy touto plochou ve fotometrických rovinách, kdy vzniknou křivky (čáry) svítivosti. Mezinárodní komise pro osvětlování CIE byly doporučeny fotometrické roviny C – γ , B – β a A – α (poslední jmenovaná se již nepoužívá), které jsou znázorněny na obr. 4. Aby křivky svítivosti udávané výrobci nebyly rozdílné vlivem různého světelného toku použitého zdroje, přepočítávají se diagramy na světelný tok 1000 lm. [1]

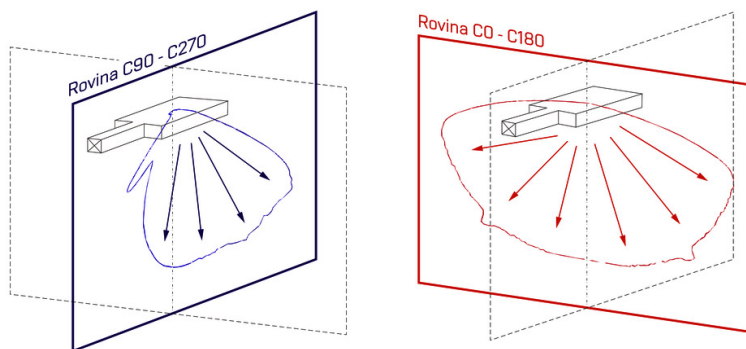
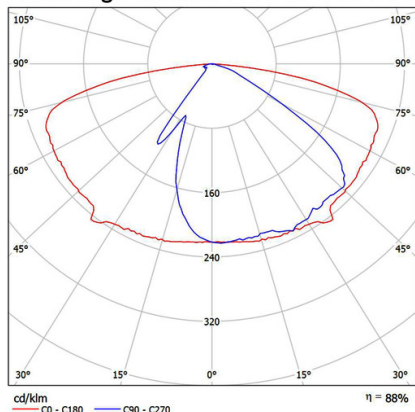


Obr. 4: Fotometrické roviny C – γ , B – β a A – α . [1]

Nejčastěji používanou fotometrickou rovinou je C – γ , která křivkami svítivosti nejlépe popisuje rozložení světelného toku pomocí dvou na sebe kolmých rovin, které popisujeme dle obr. 4 – C₀-C₁₈₀ a C₉₀-C₂₇₀. Jak takové křivky mohou vypadat můžeme konkrétně vidět na obr. 5, kde jsou znázorněny pro svítidlo Katrina 22 C40-1400-L1 z katalogového listu firmy Lamberga s.r.o. [22]



Lamberg Katrina 22 C40-1400-L1



Obr. 5: Křivky svítivosti z katalogového listu a znázornění v jednotlivých rovinách [22]

1.4 Osvětlenost

Osvětlenost nebo-li intenzita osvětlení je další důležitou světelně technickou veličinou při návrhu veřejného osvětlení. Značí se E a jednotkou je lux (lx). Určí se ze vztahu

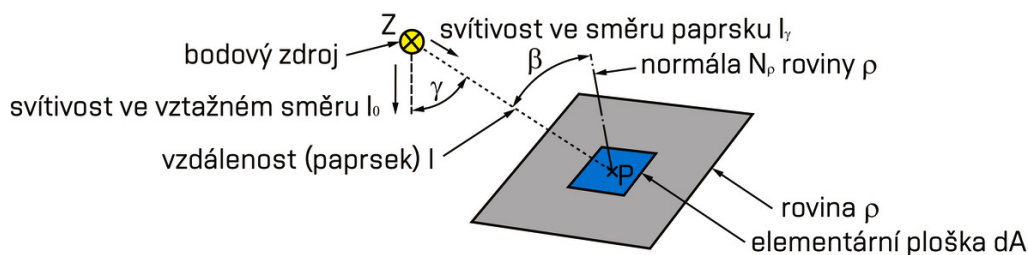
$$E = \frac{d\Phi_d}{dA}, \quad (1.7)$$

kde $d\Phi_d$ (lm) je plošná hustota světelného toku dopadlého na plošku dA (m^2). Osvětlenost plošky je často uvažována jako osvětlenost v bodě, jehož elementární okolí představuje právě ploška dA . [1]

Pomocí vztahů (1.7), (1.6) a (1.5) dokážeme odvodit vztah pro osvětlenost plošky bodovým zdrojem

$$E_{P_p} = \frac{I_\gamma}{l^2} \times \cos \beta, \quad (1.7)$$

kde E_{P_p} (lx) je osvětlenost v bodě P roviny ρ , l (m) je nejkratší vzdálenost mezi bodem P a bodovým zdrojem (nazýváme též paprskem l), I_γ (cd) je svítivost bodového zdroje Z (kde γ označuje úhel mezi paprskem l a směrem vztažné svítivosti I_0) a β je úhel mezi normálou roviny a paprskem l . Tato situace je znázorněna na obr. 6. [1]

Obr. 6: Osvětlenost bodovým zdrojem Z v bodě P [1]



1.5 Jas svazku paprsků

Veličina, na níž reaguje zrakový orgán. Značí se L a jednotkou je *kandela na čtvereční metr* ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$). Výpočet je popsán v kapitole 3.3, měření v 3.4. Je závislá na poloze pozorovatele a směru jeho pohledu. Při hodnocení VO nás zajímá hlavně jas povrchu komunikace, který je základním hodnotícím kritériem pro komunikace s povolenou rychlostí nad 30 km/h. Protože se jedná o paprsky odražené od povrchu vozovky směrem k pozorovateli, závisí tato veličina také na odrazných vlastnostech daného místa na komunikaci (obvykle je to součinitel jasu vozovky), které posuzujeme. [1,3]

1.6 Světlení

Světlení je plošná hustota světelného toku vyzařující z elementární plošky. Značí se M a jednotkou je *lumen na čtvereční metr* ($\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$). Důležitá je pro nás zejména kvůli souvislosti s osvětleností a jasnem povrchu. [1,9]

Pro ideálně rozptýlně vyzařující plošku je závislost mezi světlením M a konstantním jasnem L ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$) dána vztahem

$$M = \pi \times L . \quad (1.8)$$

Stejně tak je ploška charakterizována činitelem odrazu ρ (-) s osvětleností E (lx) a proto je také světlení definováno vztahem

$$M = \rho \times E . \quad (1.9)$$

Z této znalosti můžeme při známém činiteli odrazu a osvětlenosti stanovit jas ideálně rozptýlně vyzařující plošky a naopak. Ideálních rozptýlných vlastností ploch využíváme ke zjednodušení světelně technických výpočtů. [1,9]



2. Měření světelně technických veličin

V této kapitole se zaměříme na dva typy měření světelně technických veličin. Jedná se o měření osvětlenosti a měření jasu. Jak bude nastíněno dále, tyto dvě veličiny postačují pro hodnocení většiny typů pozemních komunikací.

2.1 Podmínky při měření

Pokud se měří soustava VO, jejímž zdrojem jsou výbojky, je třeba po jejím sepnutí nechat zdroje ustálit. Dále je dobré vyvarovat se vysokým či nízkým teplotám, jež mohou mít vliv na tepelně citlivých zdrojů či měřících přístrojů. Nepříjemně může měření ovlivnit i vysoká vlhkost, která kondenzuje na optických prvcích svítidel a tím ovlivňuje jejich světelný tok.

Měření by nemělo být ovlivněno okolním zářením (např. reklamní plochy, osvětlení vozidel apod.). Ideální je měření při zatažené obloze, která zamezuje ovlivnění měření zářením měsíce. Naopak na měřenou plochu by neměl být jinými prvky na komunikaci (stromy, dopravní značení apod.) vržen stín.

V případě porovnání naměřených hodnot se světelně technickým výpočtem se požaduje vysoká přesnost měření. Pokud kontrolujeme stav osvětlovací soustavy, postačí méně podrobné měření. [1,6]

2.2 Umístění kontrolních bodů a pozorovatele

Při posuzování VO je třeba si nejdříve stanovit dle parametrů soustavy myšlenou síť bodů, ve kterých bude probíhat výpočet a měření. Aby bylo mezi nimi dosaženo souladu, je třeba, aby byla zajištěna shodná vzájemná pozice kontrolních bodů. Tyto body se stanovují dle normy ČSN EN 13201-3. Osvětlení pozemních komunikací - Část 3: Výpočet. Podrobněji je tato problematika popsána v kapitole 3.1. Mezi dvěma svítidly bývá zpravidla 60 a více kontrolních bodů. [5]

2.3 Měření osvětlenosti

Osvětlenost měříme luxmetrem s vhodnými parametry odpovídajícími účelům měření. V našem případě se jedná o měření vodorovné osvětlenosti, tudíž musí být luxmetr opatřen vhodnou fotometrickou hlavou. Aby nedošlo klonění světla členy měřící skupiny, je vhodné použít fotometrickou hlavu propojenou s luxmetrem pomocí kabelu. Z tohoto důvodu byl pro měření vybrán luxmetr CEM DT-8809 s přesností 5 % (obr. 7).

Při měření vodorovné osvětlenosti je třeba, aby byla rovina povrchu fotočlánku fotometrické hlavy vodorovná a aby ležela na povrchu komunikace. Dále je nutné aby byla fotometrická hlava ponechána odkrytá ve světelném prostředí po dobu několika minut,

což vede k její stabilizaci. Stejně tak je vhodné ponechat přístroj přizpůsobit okolní teplotě.

Z měření je nutné vypracovat protokol a zprávu, která by měla mimo jiné obsahovat údaje o účelu měření a jeho přesnosti, náčrt osvětlovací soustavy s vyznačením svítidel, údaje o svítidlech a jejich provozním stavu, teplotě při měření, datum a čas měření a jména osob, jež se na měření podíleli apod.

Z naměřených hodnot se určí hodnoty osvětlenosti jako například průměrná a minimální osvětlenost, které se porovnají s požadavky normy (ČSN EN 13201-2. Osvětlení pozemních komunikací - Část 2: Požadavky) pro danou třídu osvětlení a vyvodí se závěr. [1,3,6]



Obr. 7: Luxmetr CEM DT-8809 s fotometrickou hlavou [13]

2.4 Měření jasu

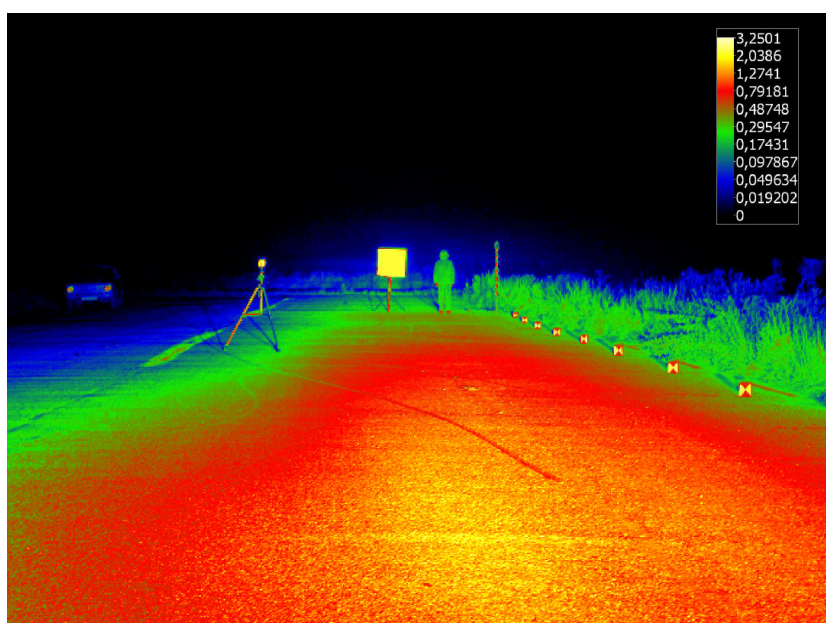
Jas povrchu pozemní komunikace je nutný měřit kalibrovaným jasoměrem vhodnými parametry odpovídajícími účelům měření. Jasoměr je podobně jako luxmetr opatřen fotočlánkem, který je zastíněn tubusem s clonou. Ta omezuje celkový úhel měřicího kužele na 2 obloukové minuty ve svislé rovině a 20 obloukových minut ve vodorovné rovině. Měření musí probíhat z polohy definovaného pozorovatele tj. ve vzdálenosti 60 m před měřeným úsekem a ve výšce 1,5 m na vozovku v ose každého jízdního pruhu.

Maximální a minimální hodnoty jasu se zjišťují ze stejné sítě kontrolních bodů jako osvětlenost (stejné kontrolní body jsou i pro výpočet). Z naměřených hodnot se poté vypočítají potřebné hodnoty.

Jak už bylo zmíněno v kapitole 1.5, jas povrchu komunikace závisí také na odrazných vlastnostech jejího povrchu. Výpočty ale pracují s doporučenou průměrnou hodnotou součinitele jasu vozovky. Tím pádem mohou vzniknout mezi výpočtem a měřením velké

rozdíly. Proto se považuje za důležitější porovnání naměřených a vypočtených hodnot osvětlenosti.

Existují také další metody měření jasu. Například měření za jízdy pomocí jasoměrů s kmitajícím zrcátkem, které každou setinu sekundy zaznamenává jednu hodnotu jasu, což při rychlosti měření 55 km/h umožňuje plynulou návaznost měření. Další metoda je ještě více progresivní a to vyhodnocování jasu pomocí digitální fotografie. Využívá se kalibrovaný fotoaparát s korekcí na citlivost lidského oka. Fotografie je poté pomocí software zpracována na jasovou mapu vykreslenou pro větší názornost v nepravých barvách. Snímek z jasové analýzy pomocí digitálního fotoaparátu lze pozorovat na obr. 8. Tato analýza byla provedena pomocí software LumiDISP, který vyvíjí tým z Ústavu elektroenergetiky Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně pod vedením Doc. Ing. Petra Baxanta, Ph.D. [1,6,14]



Obr. 8: Jasová analýza pomocí digitální fotografie [14]

Nepřímou metodou pro určení jasu povrchu komunikace je stanovení jasového součinitele osvětlení z vypočtených hodnot osvětlenosti a jasu v kontrolních bodech ze vztahu

$$e_{Lp} = \frac{E_p}{L_p}, \quad (2.1)$$

kde e_{Lp} ($\text{lx} \cdot \text{cd}^{-1} \cdot \text{m}^2$) je jasový součinitel osvětlení, E_p (lx) je průměrná hodnota osvětlenosti a L_p ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) je průměrná hodnota jasu. Předpokládáme stejné geometrické uspořádání soustavy VO, typy svítidel a zdrojů jako při výpočtu. Při ověření provozního stavu soustavy VO pak postačí z naměřených hodnot stanovit průměrnou osvětlenost E_{pt} a požadovaná průměrná hodnota jasu L_{pt} se stanoví ze vztahu [1]

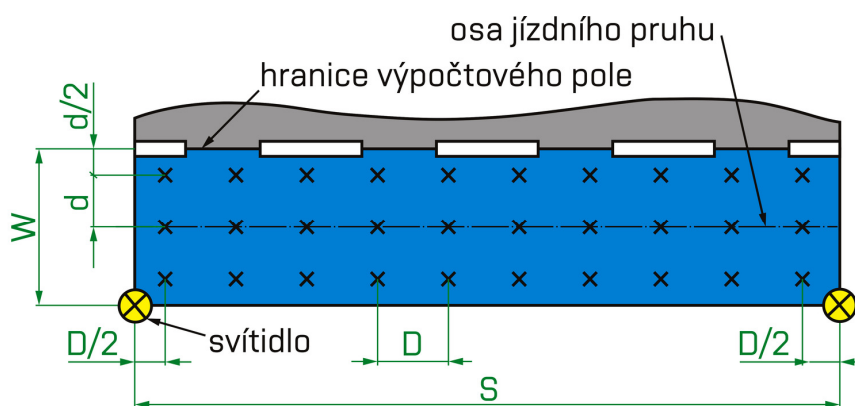
$$L_{pt} = \frac{E_{pt}}{e_{Lp}}. \quad (2.2)$$

3. Světelně technické výpočty

Aby se předešlo nekvalitnímu návrhu VO, je třeba nejdříve ověřit vhodnost konkrétních svítidel pro danou oblast. To se provádí pomocí světelně technických výpočtů. Podle požadavků normy pro konkrétní oblast se vypočítají příslušné parametry, které se poté s touto normou porovnají. Všechny důležité matematické vztahy jsou uvedeny v normě ČSN EN 13201-3. Osvětlení pozemních komunikací - Část 3: Výpočet. Jak bude uvedeno dále, u většiny pozemních komunikací požadujeme pro porovnání zejména hodnoty vodorovné osvětlenosti v bodě a celkový jas v bodě. [3,5]

3.1 Síť kontrolních bodů

Výpočtové body musí být rovnoměrně rozloženy ve výpočtovém poli. Jejich geometrické uspořádání stanovuje norma ČSN EN 13201-3. Tyto body jsou totožné jak pro měření, tak i pro všechny typy výpočtů – osvětlenosti, jasů apod. [5]



Obr. 9: Geometrické uspořádání kontrolních bodů [4]

Na obr. 9 můžeme vidět uspořádání bodů v jednom jízdním pruhu komunikace. Obdobně to platí i pro druhý a další jízdní pruh. Rozteč bodů v podélném směru D (m) je dána vztahem

$$D = \frac{S}{N}, \quad (3.1)$$

kde S (m) je rozteč mezi svítidly a N (-) je počet výpočtových bodů v podélném směru. Ten nabývá hodnot $N = 10$ pro $S \leq 30$ m. Pro rozteče svítidel větší než 30 m se N stanovuje jako nejmenší celé číslo splňující podmínku $D \leq 3$. První příčná řada kontrolních bodů je umístěna ve vzdálenosti poloviny rozteče v podélném směru D za prvním svítidlem. [5]

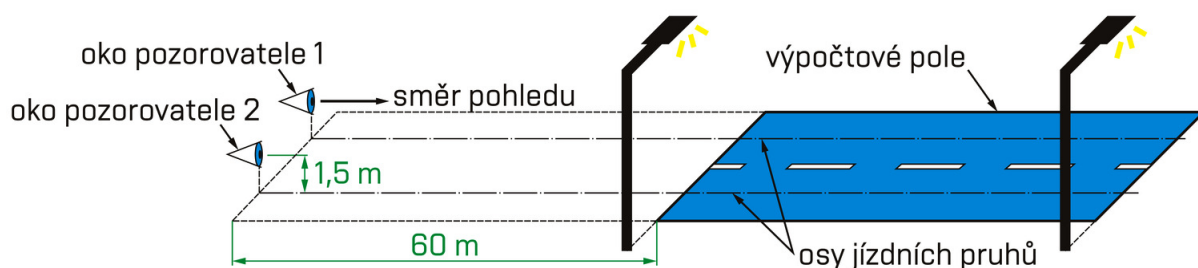
Rozteč bodů v příčném směru d (m) je dána vztahem

$$d = \frac{W}{3}, \quad (3.2)$$



kde W (m) je šířka jízdního pásu. První a poslední podélná řada výpočtových bodů je umístěna od okrajů jízdního pásu ve vzdálenosti poloviny rozteče v příčném směru d . [5]

U výpočtu jasů povrchu komunikace je ještě potřeba stanovit polohu pozorovatele. Jeho oko je ve výšce 1,5 m nad povrchem komunikace a je umístěno do osy každého jízdního pruhu. U komunikace se dvěma jízdními pruhy se tedy posuzují obě polohy. Pozorovatel je v podélném směru od prvního svítidla z výpočtového pole ve vzdálenosti 60 m viz obr. 10. [5]



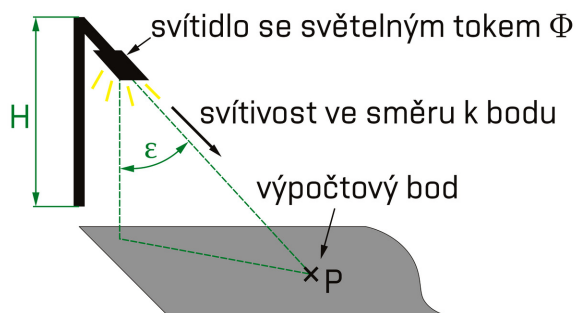
Obr. 10: Umístění pozorovatele při výpočtu jasů povrchu komunikace [5]

3.2 Vodorovná osvětlenost v bodě

Vodorovnou osvětlenost v bodě je nutné počítat pro posuzování komunikací třídy S (popř. CE), přičemž průměrná a minimální hodnota osvětlenosti slouží pro tuto třídu osvětlení jako hodnotící kritérium. O třídách osvětlení je podrobně pojednáno v kapitole 4. Vodorovná osvětlenost v bodě E (lx) se vypočítá pomocí následujícího vztahu

$$E = \frac{I \times \cos^3 \varepsilon \times \Phi \times MF}{H^2}, \quad (3.3)$$

kde I ($\text{cd} \cdot \text{klm}^{-1}$) je svítivost ve směru k bodu, ε ($^\circ$) je úhel dopadu světelného paprsku do bodu, Φ (klm) je počáteční světelný tok všech zdrojů ve svítidle, MF (-) je činitel údržby (maintenance factor) a H (m) je montážní výška svítidla. Geometrické uspořádání pro obecný bod je možné pozorovat na obr. 11. [5]



Obr. 11: Vodorovná osvětlenost v bodě [5]

Svítivost ve směru k bodu bývá většinou u větších výrobců svítidel uvedena v datasheetu daného svítidla. Pro výpočet pomocí software jsou tyto data zanesena ve speciálním



souboru (eulumat). Na obr. 12 můžeme vidět, že je hodnota svítivosti stanovena po malých úhlových natočeních a pokrývá celý prostor, aby byla postihnuta osvětlovaná oblast co nejpodrobněji.

	C90°	C95°	C100°	C105°	C110°	C115°	C120°	C125°	C130°	C135°	C140°	C145°	C150°	C155°	C160°	C165°	C170°	C175°	C180°	C
0°	251,81	251,81	251,81	251,81	251,81	251,81	251,81	251,81	251,81	251,81	251,81	251,81	251,81	251,81	251,81	251,81	251,81	251,81	251,81	25
1°	250,48	250,48	250,5	250,53	250,53	250,63	250,7	250,77	250,84	250,91	250,98	251,06	251,13	251,22	251,33	251,43	251,56	251,69	251,81	25
2°	248,71	248,69	248,64	248,61	248,61	248,72	248,96	249,29	249,68	250,06	250,38	250,63	250,82	250,96	251,09	251,18	251,22	251,23	251,24	25
3°	246,96	247,03	247,17	247,29	247,4	247,58	247,86	248,16	248,42	248,71	249,15	249,68	250,16	250,65	251,18	251,7	252,12	252,35	252,4	25
4°	245,43	245,46	245,56	245,65	245,73	246,03	246,52	246,92	247,3	247,76	248,28	248,7	249,18	249,96	250,68	251,18	251,55	251,88	252,21	25
5°	242,54	242,45	242,52	243,07	243,6	244,04	244,83	245,75	246,29	246,77	247,45	248,13	248,89	249,46	250,45	251,58	252,23	252,76	253,13	25
6°	239,5	239,23	238,8	239,55	240,44	240,74	241,74	243,17	244,13	245,5	246,39	247,72	248,74	249,71	250,21	251,19	251,98	252,47	252,99	25
7°	235,43	235,93	235,76	236,17	237,06	238,1	239,57	240,44	241,74	243,4	244,34	246,23	247,92	249,44	250,42	251,14	252,35	253,35	253,45	25
8°	231,15	231,51	232,1	232,4	233,36	234,49	236,58	238,19	239,92	241,98	244,11	245,42	246,63	248,4	250,11	251,22	253,06	253,26	253,87	25

Obr. 12: Hodnoty svítivosti ($\text{cd}\cdot\text{klm}^{-1}$) v různých směrech svítidla Lamberga Katrina 06 C40-1400-L1 [22]

Celková osvětlenost v bodě je dána součtem dílčích příspěvků všech svítidel. [5]

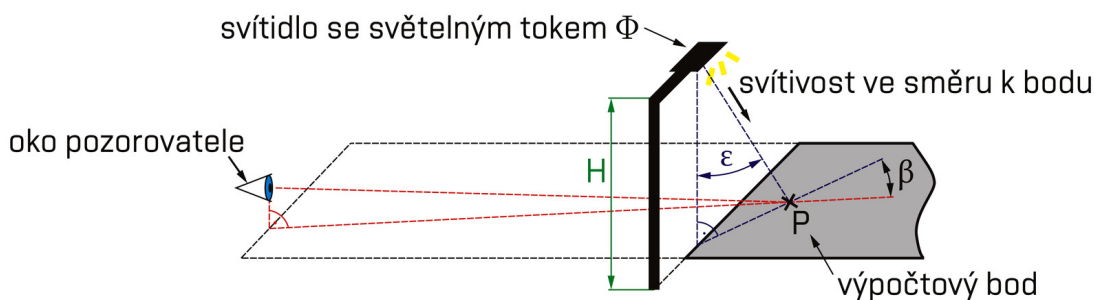
$$E_p = E_1 + E_2 + \dots + E_k + \dots + E_n. \quad (3.4)$$

3.3 Jas v bodě

Při posuzování komunikací třídy ME (komunikace s povolenou rychlostí nad 30 km/h) je hodnotícím kritériem jas v bodě resp. jeho průměrná hodnota a celková rovnoměrnost. Jas v bodě L ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$) se vypočte z následujícího vztahu

$$L = \frac{I \times r \times \Phi \times MF}{H^2 \times 10^4}, \quad (3.5)$$

kde I ($\text{cd}\cdot\text{klm}^{-1}$) je svítivost ve směru k bodu, r (sr^{-1}) je redukovaný součinitel jasu dopadajícího světelného paprsku (závisí na úhlových souřadnicích ε a β). Součinitel r se stanovuje z tzv. r -tabulek zpracovaných pro typy povrchů CI a CII, přičemž povrch CII odpovídá tmavému asfaltovému povrchu. Ostatní veličiny viz kapitola 3.2. [5]



Obr. 13: Jas v bodě [5]

Příklad hodnot součinitele r pro povrchy komunikací třídy CII můžeme vidět v tab. 1.

Tab. 1: Příklady hodnot funkce r pro povrchy komunikací CII [1]

tg ϵ	β (°)															
	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	...
0	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	...
0,25	362	358	371	364	371	369	362	357	351	349	348	340	328	312	299	...
0,5	379	368	375	373	367	359	350	340	328	317	306	280	266	249	237	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Celkový jas v bodě je dán součtem dílčích příspěvků všech svítidel. [5]

$$L_p = L_1 + L_2 + \dots + L_k + \dots + L_n. \quad (3.4)$$

3.4 Doplnující výpočty

Nejdůležitějšími výpočty jsou samozřejmě jas a osvětlenost v každém bodě sítě kontrolních bodů. Norma ale požaduje také kromě průměrných hodnot, aby byla distribuce světla na komunikaci rovnoměrná a nevznikali například tmavá místa, která se negativně projevují na zrakovém výkonu řidiče, jehož oko se neustále přizpůsobuje různým jasům. [1]

3.4.1 Průměrný jas povrchu pozemní komunikace

Aritmetická hodnota ze všech vypočtených hodnot jasu v kontrolních bodech. Značí se $\bar{L}$ ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$).

3.4.2 Podélná rovnoměrnost jasu

Poměr nejnižší a nejvyšší hodnoty jasu povrchu komunikace v podélné ose jízdního pásu. Pro komunikace se dvěma a více jízdními pruhy se bere nejnižší hodnota těchto poměrů. Značí se U_l (-).

3.4.3 Průměrná osvětlenost

Aritmetická hodnota ze všech vypočtených hodnot vodorovné osvětlenosti v kontrolních bodech. Značí se $\bar{E}$ (lx).

3.4.4 Minimální osvětlenost

Nejmenší hodnota osvětlenosti v kontrolované oblasti. Značí se $E_{\min}$ (lx).

3.4.5 Celková rovnoměrnost (jasu či osvětlenosti)

Poměr minimální a průměrné hodnoty (jasu či osvětlenosti). Značí se U_o (-).

3.4.6 Prahový přírůstek

Míra zhoršení viditelnosti způsobeného omezujícím oslněním svítidly osvětlovací soustavy pozemní komunikace. Značí se TI (%). Vypočítá se z následujícího vztahu.

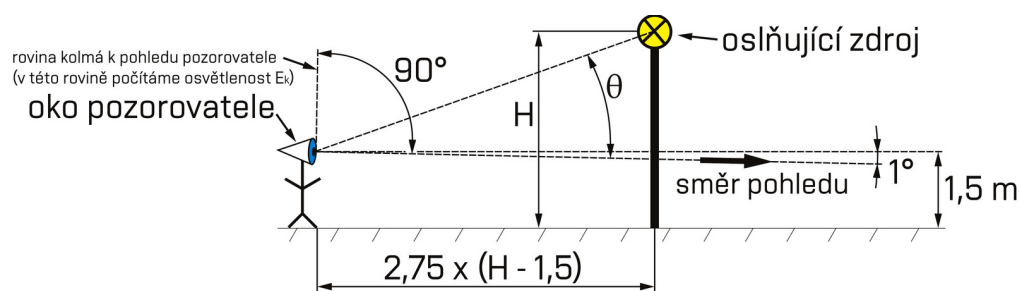
$$TI = \frac{65}{(\bar{L})^{0,8}} \times L_v, \quad (3.5)$$

kde $\bar{L}$ ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$) je průměrný jas povrchu komunikace a L_v ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$) je ekvivalentní závojevý jas, který se vypočítá ze vztahu

$$L_v = k_v \times \left(\frac{E_1}{\theta_1^2} + \frac{E_2}{\theta_2^2} + \dots + \frac{E_k}{\theta_k^2} + \dots + \frac{E_n}{\theta_n^2} \right), \quad (3.6)$$

kde E_k (lx) je osvětlenost způsobená k -tým svítidlem v místě oka pozorovatele v rovině kolmé na směr pohledu, θ_k ($^\circ$) je úhel mezi směrem pohledu a přímkou vedenou od pozorovatele ke středu k -tého svítidla a k_v (-) je konstanta závislá na věku pozorovatele. Pro věk pozorovatele 23 let je $k_v = 10$, pro jiný věk se určí ze vztahu viz [1]. [5]

Oko pozorovatele je sice v tomto případě také ve výšce 1,5 m nad úrovní komunikace, ale jeho vzdálenost je od prvního svítidla vy výpočtovém poli určená vztahem $2,75 \times (H - 1,5)$, kde H (m) je montážní výška svítidla. Linie pohledu pozorovatele směřuje 1° pod vodorovnou rovinu a leží v podélné svislé rovině procházející okem pozorovatele viz obr. 14. [5]



Obr. 14: Prahový přírůstek [5]

Příspěvky závojevých jasů se postupně sčítají, dokud je příspěvek od jakéhokoliv svítidla v řadě větší než 2 % celkového závojevého jasů. Svítidla, která jsou vůči směru pohledu pozorovatele pod úhlem $\theta_k > 21^\circ$ se z výpočtu vyloučí. Můžeme vidět, že prahový přírůstek klesá s druhou mocninou θ_k a tudíž i s rostoucí montážní výškou svítidla H . Pro svítidla v malé výšce můžeme čekat problémy. [5]

3.4.7 Činitel osvětlení okolí

Tento součinitel porovnává průměrnou vodorovnou osvětlenost dvou pásů dané šířky přilehajícím vně komunikace vůči osvětlenosti stejně širokých pásů

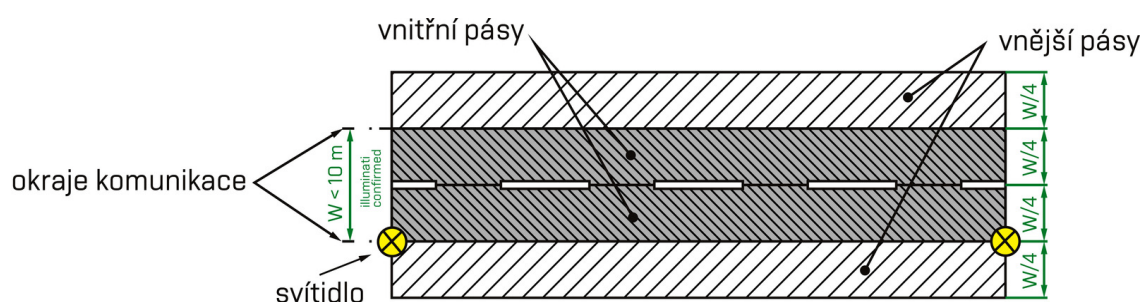


přiléhajícím vnitřní hraně komunikace. Všechny čtyři pásy vyplňují celou podélnou vzdálenost mezi dvěma svítidly. Značí se SR (-). [5]

Uspořádání je nakresleno na obr. 15. Pro komunikace šířky menší než 10 m platí, že šířka každého pásu je rovna čtvrtině šířky komunikace. Vypočte se ze vztahu

$$SR = \frac{\bar{E}_{vne_pasy}}{\bar{E}_{vni_pasy}}, \quad (3.7)$$

kde $\bar{E}_{vne_pasy}(lx)$ je průměrná osvětlenost vnějších pásů a $\bar{E}_{vni_pasy}(lx)$ je průměrná osvětlenost vnitřních pásů. [5]



Obr. 15: Činitel osvětlení okolí [5]

3.5 Vzorový výpočet vodorovné osvětlenosti

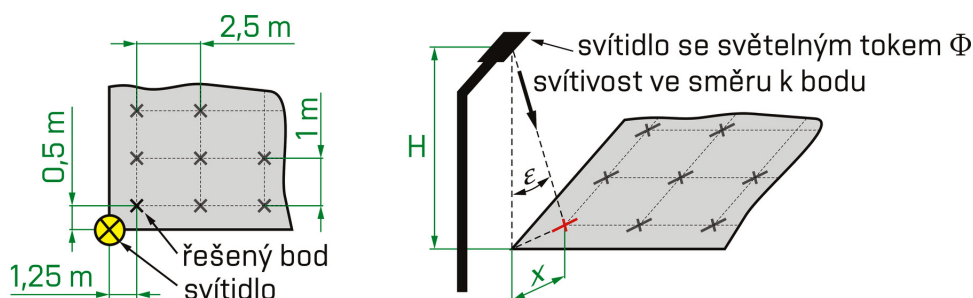
Pro názornost složitosti výpočtu bude v této kapitole proveden výpočet vodorovné osvětlenosti v jednom bodě výpočtové sítě. Pro kontrolu bude podle parametrů soustavy proveden výpočet softwarově.

Nejdříve si stanovme parametry osvětlovací soustavy.

- Rozteč svítidel $S = 25$ m
- Šířka komunikace $2 \times W = 6$ m (dva jízdní pruhy)
- Montážní výška svítidla 5,5 m
- Činitel údržby $MF = 0,8$
- Svítidlo Lamberga Katrina 06 C40-1400-L1
- Průmět světelného bodu v souřadnicích $[0,0]$ ve výpočtovém poli

Ze známých parametrů si vypočteme polohu kontrolních bodů ve výpočtové síti. Dle kapitoly 3.1 je podélná rozteč mezi body $D = S / N = 25 / 10 = 2,5$ m a příčná rozteč mezi body $d = W / 3 = 3 / 3 = 1$ m. Body nejbližší okraji výpočtové oblasti jsou vzdáleny od okraje o polovinu dané rozteče. Zaměříme se na nejbližší bod jednoho ze svítidel viz obr. 16.

V rámci zjednodušení bude výpočet omezen pouze na dvě svítidla (jež ohraničují kontrolní oblast), jelikož předpokládáme velmi malý příspěvek osvětlenosti od dalších svítidel v soustavě. Celková vodorovná osvětlenost či jas v bodě bude pro náš případ vypočtena jako součet příspěvků těchto dvou svítidel.



Obr. 16: Geometrické uspořádání pro výpočet vodorovné osvětlenosti [zdroj: autor]

Pro stanovení úhlu ε je nejdříve nutné znát vzdálenost x , která se pro první svítidlo vypočte ze vztahu

$$x_1 = \sqrt{1,25^2 + 0,5^2} = 1,346 \text{ m} \quad (3.8)$$

a pro druhé svítidlo ze vztahu

$$x_2 = \sqrt{(2,5 - 1,25)^2 + 0,5^2} = 23,755 \text{ m}. \quad (3.9)$$

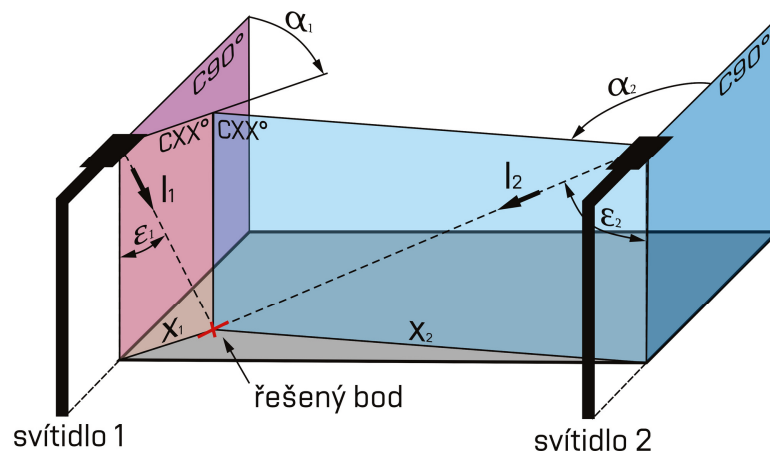
Úhly ε se poté stanoví pro první svítidlo

$$\varepsilon_1 = \arctan(1,346/5,5) = 13,75^\circ \quad (3.10)$$

a pro druhé svítidlo

$$\varepsilon_2 = \arctan(23,755/5,5) = 76,96^\circ. \quad (3.11)$$

Světelný tok všech zdrojů ve svítidle zjistíme z souboru eulundat svítidla Katrina 06 C40-1400-L1. Jeho hodnota je 3 197 lm. Ze stejných dat zjistíme i svítivost I ve směru k bodu od obou svítidel. Ta je ale stanovena pro různé natočení roviny C90°, proto je nutné nejdříve zjistit v jaké rovině svítivost počítáme a tudíž spočítat natočení α . Geometrické uspořádání rovin je znázorněno na obr. 17. [22]



Obr. 17: Natočení rovin pro zjištění hodnoty svítivosti I [zdroj: autor]



Úhly α se ze znalosti geometrického uspořádání dle obr. 16 a obr. 17 stanoví ze vztahů

$$\alpha_1 = \arctan(1,25/0,5) = 68,2^\circ, \quad (3.12)$$

$$\alpha_2 = \arctan((25 - 1,25)/0,5) = 88,8^\circ. \quad (3.13)$$

Hledané roviny jsou tedy C(90° + příspěvek úhlů α). Nerozlišujeme směr, protože svítidla pro osvětlení pozemních komunikací bývají symetrická dle roviny C90°.

Protože je svítivost v eulumat souboru definována v rovině C90° a poté postupně při natočení roviny o 5°, měli bychom pro získání přesné svítivosti v našich konkrétních směrech C158,2° a C178,8° použít interpolaci. V rámci zjednodušení výpočtu ale vybereme svítivost pro nejbližší rovinu, pro kterou je hodnota svítivosti definována. V našem případě v rovinách C160° a C180°. Příslušné úhly dopadu ε jsou stanoveny ve vztazích 3.10 a 3.11. Podobně jako u rovin jsou úhly v datech stanoveny po 1°. Pro zjednodušení opět vybereme hodnoty pro nejbližší definované úhly. Tedy 14° a 77°.

	C150°	C155°	C160°	C165°
12°	242,92	246,65	249,79	252,73
13°	242,26	245,61	249,03	252,1
14°	240,48	244,46	248,75	251,71
15°	238,31	242,64	249,56	251,38

	C170°	C175°	C180°	C185°
75°	122,31	134,73	225,93	338,04
76°	138,1	130,77	215,45	325,39
77°	158,07	130,28	200,04	304,79
78°	181,29	137,23	183,61	271,23

Obr. 18: Hodnoty svítivosti v příslušných rovinách a natočeních [22]

Nyní známe všechny potřebné hodnoty pro výpočet vodorovné osvětlenosti. Příspěvek od jednotlivých svítidel se vypočte ze vztahů [5]

$$E_1 = \frac{I_1 \times \cos^3 \varepsilon_1 \times \Phi \times MF}{H^2} = \frac{249,79 \times \cos^3(13,75^\circ) \times 3,197 \times 0,8}{5,5^2} = 19,4 \text{ lx}, \quad (3.14)$$

$$E_2 = \frac{I_2 \times \cos^3 \varepsilon_2 \times \Phi \times MF}{H^2} = \frac{200,04 \times \cos^3(76,96^\circ) \times 3,197 \times 0,8}{5,5^2} = 0,2 \text{ lx}. \quad (3.15)$$

Vidíme, že příspěvek osvětlenosti druhého svítidla je již minimální, proto můžeme v rámci zjednodušení výpočtu ostatní svítidla zanedbat. Celková vodorovná osvětlenost v bodě se potom vypočte ze vztahu

$$E_p = E_1 + E_2 = 19,4 + 0,2 = 19,6 \text{ lx}. \quad (3.16)$$

Pro porovnání byl výpočet se stejnými parametry proveden v softwaru DIALux. Na obr. 19 můžeme vidět, že softwarová hodnota osvětlenosti v témž bodě má hodnotu 20 lx. [23]

	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500
1.500	19	14	7.74	5.00	3.8
0.500	20	14	7.29	4.42	3.3
m	1.250	3.750	6.250	8.750	11.25

Pozor: Souradnice se vztahují na výše uvedený graf. Hodnoty v Lux.

Obr. 19: Softwarová hodnota [23]



I přes zjednodušení výpočtu můžeme pozorovat relativně dobrý výsledek. Velký rozdíl je ale v časové náročnosti. Zatímco ručním výpočtem bychom jedinou hodnotu počítali i několik minut, software dokáže v řádu sekund vypočítat tuto hodnotu pro všechny body v kontrolní síti (v tomto případě 60 bodů) a to s vyšší přesností.

3.6 Výpočty pomocí software DIALux

V kapitole 3.5 je vidět, že počítat jednotlivé body postupně je časově náročné. Proto je vhodné pro světelné výpočty využívat software, který tyto postupy převede na algoritmus a výpočet se tím výrazně urychlí. Jeden z vhodných nástrojů pro projektování osvětlení je software DIALux. Ve verzi 4.12 obsahuje také modul pro projektování pozemních komunikací.

DIALux (popřípadě další software pro projektování osvětlení) počítá kýžené hodnoty stejnými matematickými vztahy jako byly popsány v kapitolách 3.2 a 3.3. Navíc má implementovány další nástroje jako např. průvodce pro výběr třídy osvětlení nebo nástroj pro optimalizaci návrhu VO, kdy pro několik potenciálních svítidel a rozsahů parametrů soustavy dokáže v krátkém čase spočítat vyhovující kombinace svítidel a jejich geometrického uspořádání. Dále je v něm možné například renderovat světelné scény s použitými svítidly nebo vykreslovat osvětlenosti v nepravých barvách.

Svítidla se do výpočtu vkládají v podobě souborů eulumdat. Tyto soubory obsahují všechny potřebné fotometrické veličiny pro výpočet. DIALux dále umožňuje výsledky světelně technických výpočtů ukládat do podoby protokolu o výpočtu, jež obsahuje údaje o svítidle, parametrech VO a o výsledcích výpočtu včetně porovnání s příslušnými parametry normy. Takový dokument slouží poté jako ověření při rekonstrukci VO, kdy dokládá, že zvolená svítidla jsou pro danou oblast vhodné (splňují požadavky normy pro osvětlení pozemních komunikací).



4. Třídy osvětlení

Této tématice je vzhledem k její důležitosti přiřazena samostatná kapitola. Třídami osvětlení rozumíme rozdělení pozemních komunikací do vhodných kategorií, které s sebou nesou požadavky na osvětlení dané komunikace. Je zřejmé, že jiné požadavky na osvětlení bude mít příjezdová komunikace k obydli a jiné komunikace v centru města, po které denně projedou tisíce vozidel.

Volbu třídy osvětlení dané komunikace provádí světelný technik podle normy ČSN CEN/TR 13201-1. Musí jí být přikládána velká důležitost. Chybná volba třídy osvětlení může mít za následek nedostatečné osvětlení a tím být potenciálně nebezpečná pro účastníky silničního provozu. Na druhou stranu musíme myslet i na ekonomické parametry soustav a nevolit třídu osvětlení zbytečně striktní. Vezměme si například soustavu o 1000 svítidel. Světelný technik špatně zvolí o řadu přísnější třídu osvětlení. Svítidla jež by vyhovovala pro správně zvolenou třídu zde již nebudou plnit požadavky normy a technik je nucen použít svítidla s vyšším světelným tokem (například vyšší počet LED). Tím nejenže navyšuje cenu každého svítidla (až o tisíce korun), ale také zvyšuje celkový příkon soustavy. [2]

Správná třída osvětlení by měla být pro danou komunikaci (oblast) jen jedna. Norma ČSN CEN/TR 13201-1 stanovuje přesný postup, jak jí zvolit. Ten je popsán v kapitole 4.1.

4.1 Volba třídy osvětlení

Před samotnou volbou konkrétní třídy osvětlení pro danou komunikaci je nutné zatřídit oblast do skupiny světelných situací. Ta popisuje typickou rychlost hlavního uživatele a druh uživatele, tedy pro koho je komunikace určena. Rozlišujeme 12 skupin světelných situací viz tab. 2. [2]

Tab. 2: Skupiny světelných situací [2]

Typická rychlost hlavního uživatele (km/h)	Druh uživatelů v dané oblasti			Skupina světelných situací
	Hlavní uživatel	Další uživatel	Nepovolený uživatel	
> 60	Motorová doprava		Velmi pomalá vozidla Cyklisté Chodci	A1
		Velmi pomalá vozidla	Cyklisté Chodci	A2
		Velmi pomalá vozidla Cyklisté Chodci		A3



> 30 a ≤ 60	Motorová doprava Velmi pomalá vozidla	Cyklisté Chodci		B1
	Motorová doprava Velmi pomalá vozidla Cyklisté	Chodci		B2
> 5 a ≤ 30	Cyklisté	Chodci	Motorová doprava Velmi pomalá vozidla	C1
	Motorová doprava Chodci		Velmi pomalá vozidla Cyklisté	D1
		Velmi pomalá vozidla Cyklisté		D2
	Motorová doprava Cyklisté	Velmi pomalá vozidla Chodci		D3
	Motorová doprava Velmi pomalá vozidla Cyklisté Chodci			D4
Rychlost chůze	Chodci		Motorová doprava Velmi pomalá vozidla Cyklisté	E1
		Motorová doprava Velmi pomalá vozidla Cyklisté		E2

Samotnou třídu osvětlení potom ovlivňují tyto činitele:

- **Převládající počasí** – suché, mokré
- **Četnost křižovatek** - > 3 křižovatky/km, < 3 křižovatky/km
- **Druh křižovatek** – úrovně, mimoúrovňové
- **Dopravní tok** - < 7 000, 7 000 – 15 000, 15 000 – 25 000, > 25 000 vozidel
- **Intenzita cyklistického provozu** – běžná, velká
- **Intenzita pěšího provozu** – běžná, velká
- **Přítomnost konfliktních zón** (např. komunikace s pásem pro cyklisty) – ano, ne
- **Komplexnost zorného pole** (např. rušení osvětlením sportovišť) – běžná, velká
- **Obtížnost navigace** (podle úsilí jaké musí účastník provozu vynaložit např. pro změnu směru jízdy) – běžná, velká
- **Úroveň okolního jasu** – malý (venkov), střední (okolí města), vysoká (vnitřní město)
- **Opatření pro zklidnění dopravy** (středící pás, zpomalovací práh apod.) – ano, ne
- **Parkující vozidla na okraji vozovky** – vyskytují se, nevyskytují se
- **Riziko kriminality** – běžné, větší než běžné
- **Nutnost rozpoznání obličejů** – potřebné, není potřebné [2]



Ve zmíněné normě najdeme speciální tabulky s postupem stanovení třídy osvětlení. Ten je ovšem zdlouhavý a proto můžeme využít asistenta pro volbu třídy osvětlení v softwaru DIALux, kterého můžeme vidět na obr. 20.

Obr. 20: Asistent volby třídy osvětlení (DIALux) [23]

Jak bude nastíněno dále, každá třída osvětlení s sebou nese požadavky, jež musí být splněny při osvětlení dané oblasti. Rozlišujeme 7 druhů tříd osvětlení – ME, MEW, CE, S, A, ES, EV. Pro potřebu této práce uvedme 3 nejdůležitější. [2]

4.2 Třídy osvětlení ME

Charakteristickým případem jsou komunikace pro motorová vozidla s povolenou rychlostí nad 30 km/h. Požadavky těchto tříd jsou průměrný jas povrchu komunikace, podélná a celková rovnoměrnost jasu, prahový přírůstek a osvětlení okolí. Podle konkrétního zatřídění mají třídy ME dalších devět podskupin, které se liší hodnotami u daných požadavků viz tab. 3. [2]

Tab. 3: Řada tříd osvětlení ME [2]

Třída	Jas povrchu komunikace			Prahový přírůstek	Osvětlení okolí
	$\bar{L}$ (cd·m ⁻²)	U_0	U_l	Tl (%)	SR
ME1	≥ 2,0	≥ 0,4	≥ 0,7	≤ 10	≥ 0,5
ME2	≥ 1,5	≥ 0,4	≥ 0,7	≤ 10	≥ 0,5
ME3a	≥ 1,0	≥ 0,4	≥ 0,7	≤ 15	≥ 0,5
ME3b	≥ 1,0	≥ 0,4	≥ 0,6	≤ 15	≥ 0,5
ME3c	≥ 1,0	≥ 0,4	≥ 0,5	≤ 15	≥ 0,5
ME4a	≥ 0,75	≥ 0,4	≥ 0,6	≤ 15	≥ 0,5
ME4b	≥ 0,75	≥ 0,4	≥ 0,5	≤ 15	≥ 0,5
ME5	≥ 0,5	≥ 0,35	≥ 0,4	≤ 15	≥ 0,5
ME6	≥ 0,3	≥ 0,35	≥ 0,4	≤ 15	neurčeno



Předpokládá se převládající suché počasí a požadované hodnoty jasu jsou proto uvažovány pro suchou komunikaci. V oblastech, kde je převládající část roku vozovka vlhká nebo mokrá se uvažuje třída MEW. [2]

4.3 Třídy osvětlení S

Charakteristickým případem jsou komunikace pro pěší a cyklisty, nicméně se může na takových komunikacích objevit i motorové vozidlo, pokud je rychlost omezena na 30 km/h a vozidlo oblastí neprojíždí (sídliště, parkoviště, vjezdy k domům apod.). Požadavkem této třídy je pouze vodorovná osvětlenost a sice její průměrná a minimální hodnota viz tab. 4. [2]

Tab. 4: Řada tříd osvětlení S [2]

Třída	Vodorovná osvětlenost	
	$\bar{E}$ (lx)	E_{min} (lx)
S1	≥ 15	≥ 5
S2	≥ 10	≥ 3
S3	$\geq 7,5$	$\geq 1,5$
S4	≥ 5	≥ 1
S5	≥ 3	$\geq 0,6$
S6	≥ 2	$\geq 0,6$
S7	neurčeno	neurčeno

4.4 Třídy osvětlení CE

Charakteristickým případem jsou komunikace v konfliktních oblastech jako například obchodní třídy, složitější křižovatky, kruhové objezdy apod. Kromě průměrné osvětlenosti je požadavkem také celková rovnoměrnost viz tab. 5. [2]

Tab. 5: Řada tříd osvětlení CE [2]

Třída	Vodorovná osvětlenost	
	$\bar{E}$ (lx)	U_0
CE0	≥ 50	$\geq 0,4$
CE1	≥ 30	$\geq 0,4$
CE2	≥ 20	$\geq 0,4$
CE3	≥ 15	$\geq 0,4$
CE4	≥ 10	$\geq 0,4$
CE5	$\geq 7,5$	$\geq 0,4$



5. Popis hodnocených míst

Pro hodnocení stavu veřejného osvětlení byly autorem vybrány 4 místa. Autor pro nové návrhy využívá svítidel Katrina firmy Lamberga, protože se jedná o českého výrobce, který byl ochotný poskytnout (eulum)data svítidel pro výpočty.

5.1 Osvětlení v obci XY

Jedná se o obec v kraji Vysočina, kde byla v roce 2014 vyměněna svítidla veřejného osvětlení (nizkotlaké rtuťové výbojky byly nahrazeny LED technologií). Jméno obce není zveřejněno záměrně, jelikož se autor domnívá, že osvětlení neplní zákonné požadavky a nechce tím poškodit firmu, která výměnu prováděla. Cílem této práce je pouze hodnocení VO na konkrétním případě.

Po konzultaci se starostkou obce bylo zjištěno, že požadavek byl pouze na výměnu svítidel, nikoliv na nový návrh VO. Firma tak nemusela dodat žádnou dokumentaci potvrzující vhodnost jejich svítidel pro danou oblast, podloženou světelně technickým výpočtem. To však nemění nic na faktu, že se v obci vyskytující místa, která jsou svým nešťastným osvětlením potenciálně nebezpečná. Jedním takovým místem se zabývá tato práce, přičemž bylo na místě provedeno měření osvětlenosti a fotodokumentace. Spolu s pomocí softwaru DIALux pro projektování osvětlení bude původní řešení porovnáno s normou a dále bude vytvořen návrh osvětlení takového, aby odpovídalo požadavkům normy. Konkrétní řešení je znázorněno v kapitole 6.

5.2 Výměna svítidel před budovou A1 FSI VUT v Brně

Při rekonstrukci vchodu budovy A1 Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně v dubnu 2016 bylo na přílehlé komunikaci vyměněno několik svítidel (vysokotlaké sodíkové výbojky nahrazeny LED technologií). Toto místo nebylo vybráno z důvodu nebezpečného osvětlení, nýbrž z důvodu možnosti měření osvětlenosti před a po výměně svítidel. Bude tedy možné porovnávat reálně naměřené hodnoty z terénu a nespoléhat se pouze na světelně technické výpočty. Dále bude také diskutováno barevné vnímání (podání barev výbojky vs. LED) s porovnáním na fotografiích a ekonomické parametry. Konkrétní řešení je znázorněno v kapitole 7.

5.3 Osvětlení přechodu pro chodce

Na konkrétním případě osvětlení přechodu pro chodce (resp. místa pro přecházení) bude diskutována nevhodnost daného řešení. Přechod, který leží mezi dvěma obcemi v kraji Vysočina je osvětlen, ale není již osvětlena okolní komunikace. Vlivem vysokého kontrastu jasů (osvětleného přechodu uprostřed neosvětlené komunikace) dané místo nejen nerespektuje požadavky dané normy, ale stává se tak nebezpečným. S pomocí

světelných simulací bude znázorněn rozdíl mezi původním řešením a stavem, kdy by bylo osvětleno i okolí daného přechodu. Konkrétní řešení je znázorněno v kapitole 8.

5.4 Kompletní výměna osvětlení v obci XZ

Pro porovnání výměny z hlediska ekonomického bylo proveden návrh VO pro celou obec XZ, která se nachází v Jihomoravském kraji. Celkem se jedná o 264 svítidel, pro které bylo nutno vytvořit 41 světelně technických výpočtů. Autor měl k dispozici pasport VO v obci se zaměřením všech původních svítidel a jejich popisem včetně příkonu. Původní svítidla byly vesměs rtuťové a sodíkové výbojky o příkonu 70 W, která byla nahrazena svítidly Katrina (LED) firmy Lamberga. Nejen že by výměnou došlo ke snížení příkonu všech svítidel na více než polovinu, ale byla by také zvýšena bezpečnost tím, že byl návrh proveden tak, aby splňoval požadavky normy ČSN EN 13 201-2. Konkrétní řešení je znázorněno v kapitole 9.



Obr. 21: Výměna svítidel před budovou A1 FSI VUT v Brně [zdroj: autor]



6. Osvětlení v obci XY

Jak již bylo řečeno v kapitole 5.1, jedná se o nahrazení původních svítidel za LED. Výměna byla provedena na začátku roku 2014, což znamená, že mají svítidla za sebou přibližně 10 000 hodin provozu ($2,5 \text{ roku} \times 365 \text{ dní} \times 10,8 \text{ h denně}$). Výrobce uvádí životnost 70 000 hodin, proto nebude uvažována degradace světelného toku. [10]

6.1 Stanovení kontrolní sítě

Vybrána byla oblast mezi dvěma svítidly s roztečí $S = 75 \text{ m}$. Svítidlo je umístěno na betonovém sloupu (EON), který nese vedení elektrického napětí, ve výšce 6,9 m. Šířka komunikace je v dané oblasti $2 \times W = 5,4 \text{ m}$. Všechny délky byly měřeny laserovým dálkoměrem. Svislý průmět svítidla je vzdálen 1,2 m od hranice vozovky.



Obr. 22: Sít kontrolních bodů vy vybrané oblasti [zdroj: autor]

Ze známých vztahů si vypočteme polohu kontrolních bodů ve výpočtové síti. Dle kapitoly 3.1 je podélná rozteč mezi body $D = S / N$. Pro rozteč mezi svítidly $S > 30 \text{ m}$ je N nejmenší celé číslo splňující podmínku $D \leq 3 \text{ m}$. V našem případě je počet výpočtovým bodů v podélném směru $N = 25$. Podélná rozteč je tedy $D = 75 / 25 = 3 \text{ m}$. Příčná rozteč mezi body je dána vztahem $d = W / 3 = 2,7 / 3 = 0,9 \text{ m}$.

Body nejbližší okraji výpočtové oblasti jsou vzdáleny od okraje o polovinu dané rozteče. V podélném směru je první příčná řada bodů vzdálena od kraje sítě 1,5 m, v příčném směru je tato vzdálenosti 0,45 m.



6.2 Měření vodorovné osvětlenosti

Měření bylo provedeno dne 29. 4. 2016 ve 22:15 při teplotě vzduchu 10 °C. Obloha byla jasná, ale měsíc v tu dobu nesvítíl a nemohl tak ovlivnit měření. Účastnili se ho Miroslav Krejčí (měření) a Jiří Petr (zapisování dat). Použitým měřicím přístrojem byl luxmetr CEM DT-8809 s fotometrickou hlavou pro měření vodorovné osvětlenosti viz obr. 7. Před započatím měření byl přístroj ponechán, aby se přizpůsobil okolní teplotě a byl na několik minut vystaven osvětlení jednoho ze svítidel, aby byla zaručena vyšší přesnost. Účelem měření byla kontrola stavu VO, tudíž není požadována tak vysoká přesnost (přístroj sám o sobě pracuje s 5% přesností, tudíž je třeba brát naměřené hodnoty s rezervou). Naměřené hodnoty vodorovné osvětlenosti můžeme vidět v tab. 6. [6]

Tab. 6: Naměřené hodnoty $E (lx)$ v obci XY (vodorovně – podélná souřadnice, příčně – svislá souřadnice)

4,95	11,3	8,6	8,1	6,6	2,1	0,9	0,1	0,0	...	0,0	0,0	0,5	1,9	4,9	8,8	9,6	12,8
4,05	11,9	8,9	8,5	5,8	2,4	1,0	0,2	0,0	...	0,0	0,0	0,7	2,4	5,9	9,8	10,1	12,7
3,15	8,9	7,5	6,9	4,4	2,2	0,8	0,1	0,0	...	0,0	0,0	0,8	2,5	4,8	7,9	7,3	7,2
2,25	4,4	4,2	4,2	3,3	1,8	0,6	0,0	0,0	...	0,0	0,0	0,7	2,1	3,9	5,2	4,2	2,9
1,35	2,3	2,1	2,5	2,4	1,1	0,3	0,0	0,0	...	0,0	0,0	0,2	1,4	2,6	3,3	2,3	1,6
0,45	1,5	1,1	1,4	1,6	0,7	0,1	0,0	0,0	...	0,0	0,0	0,0	1,1	1,7	2,4	1,4	1,2
m	1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	...	52,5	55,5	58,5	61,5	64,5	67,5	70,5	73,5

Vidíme, že ve vzdálenosti 19,5 m od prvního svítidla je již nulová hodnota osvětlenosti až do vzdálenosti 58,5 m. Znamená to, že je mezi svítidly oblast 39 m neosvětlené části. To lze také pozorovat na obr. 23.

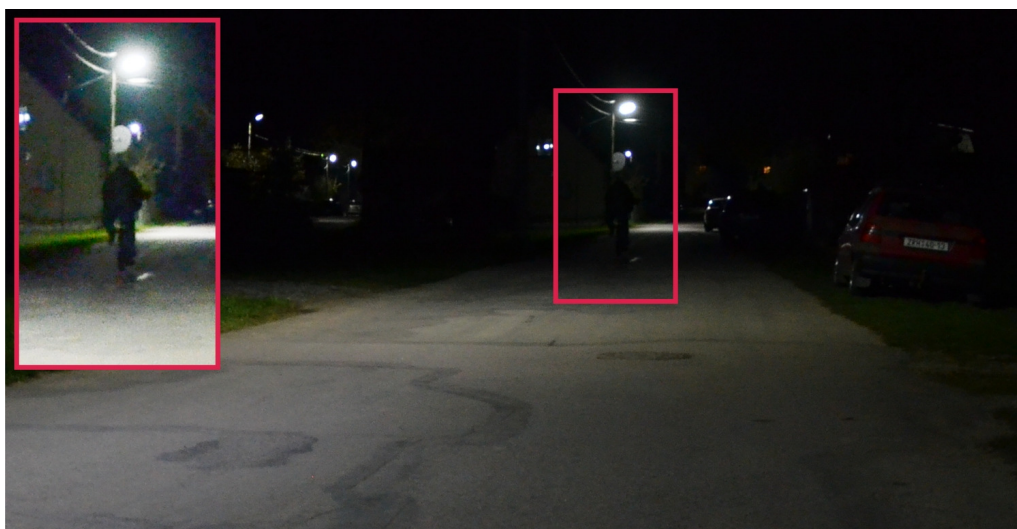


Obr. 23: Pohled na měřenou oblast [zdroj: autor]

Fotografie byla pořízena digitálním fotoaparátem Nikon D7000 při času závěrky 1/8 s, cloně f3.5 a ISO 1600. Snahou bylo se fotografií nejvíce přiblížit skutečnému stavu.

6.3 Nebezpečí od nevhodného osvětlení

Problém s neosvětlenou částí je o to závažnější z důvodu absence chodníku. Pěší a cyklisté se tedy pohybují po vozovce. Kromě toho je vybrané místo jedinou cestou do místního hostince, takže je zde v nočních hodinách vyšší koncentrace podnapilých osob (mnohdy jedoucích na kole). Na obr. 24 je vyfocen cyklista jedoucí středem komunikace, kterak se nachází v neosvětlené části komunikace a není téměř vidět. Na obr. 25 vidíme pohled z jedoucího vozidla se zapnutými potkávacími světly (halogenové), přičemž figurant stojící na druhé straně vozovky je opět velmi těžce postřehnutelný zrakem řidiče. Pokud zvážíme pohyb podnapilých osob (pěších i cyklistů), které se mnohdy nepohybují jen po kraji vozovky, hrozí střet vozidla s dalším účastníkem provozu. Problém bohužel neřeší omezení rychlosti v daném místě na 30 km/h.



Obr. 24: Cyklista v neosvětlené části vozovky [zdroj: autor]



Obr. 25: Figurant vlevo (pohled řidiče se zapnutými potkávacími světly) [zdroj: autor]



6.4 Volba třídy osvětlení

Pro porovnání s normou je nutné nejdříve stanovit třídu osvětlení. Využijeme asistenta softwaru DIALux viz obr. 20. [23]

Rychlost je v dané oblasti obce omezena na 30 km/h a hlavním uživatelem jsou všichni účastníci provozu (situace D4). Opatření pro zklidnění se v dané lokalitě nevyskytuje. Na krajnici je však třeba uvažovat zaparkovaná vozidla, což ostatně dokazují i předchozí obrázky. Jedná se o rovnou část komunikace, tudíž je problém navigace běžný. S přihlédnutím na absenci chodníku a se zvýšeným pohybem osob v noci (na cestě z hostince) je uvažován vysoký dopravní tok cyklistů a chodců. Komplexnost zorného pole je běžná (nevyskytují se objekty, jež vynucují dráždivé podněty). Riziko kriminality je běžné a rozpoznání obličejů zbytečné. Úroveň okolního jasu je malá (jedná se o venkovské okolí).

Asistent volby třídy osvětlení softwaru DIALux po zanesení předchozích předpokladů stanovuje třídu osvětlení S4. V kapitole 4.3 je však uvedeno, že třídy S by se neměly volit u průjezdných komunikací. Je tedy třeba vybrat jinou třídu, k čemuž slouží tabulka tříd osvětlení s porovnatelnými hladinami osvětlenosti.

Tab. 7: Třídy osvětlení s porovnatelnými hladinami osvětlenosti [3]

CE0	ME1 MEW1 CE1	ME2 MEW2 CE2	ME3 MEW3 CE3 S1	ME4 MEW4 CE4 S2	ME5 MEW5 CE5 S3	ME6 S4	S5	S6
-----	--------------------	--------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	-----------	----	----

Dle této tabulky víme, že můžeme třídu S4 nahradit třídou ME6. Zde je poukázáno na to, že zkušený světelný technik by měl zvážit všechny okolnosti a ne jen slepě používat třídu stanovenou softwarem.

6.5 Světelně technický výpočet

Pro porovnání dané oblasti dle normy využijeme naměřené hodnoty vodorovné osvětlenosti. Požadavky pro třídu osvětlení ME6 však používají jako kritérium hodnoty jasu povrchu komunikace. Využijeme proto nepřímou metodu, kdy si s pomocí eulumat daného svítidla a konkrétních parametrů soustavy necháme vypočítat v kontrolních bodech hodnoty vodorovné osvětlenosti a jasu povrchu. Podílem jejich aritmetických průměrů získáme jasový součinitel osvětlení (viz kapitola 2.4), který poté vynásobíme s aritmetickou hodnotou osvětlenosti z naměřených hodnot a získáme tak přibližnou hodnotu průměrného jasu povrchu komunikace. Přibližnou proto, jelikož nerespektujeme konkrétní odrazné vlastnosti.

Mohli bychom sice využít přímo hodnotu průměrného jasu povrchu komunikace z výpočtu a ten poté porovnat s normou, nicméně tato hodnota je stanovena za ideálních podmínek a nerespektuje například, že je světlo při montáži mírně natočeno nebo že není napájeno stanoveným proudem a světelný tok je nižší. Proto jsou pro nás stěžejními údaji



naměřené hodnoty osvětlenosti a světelně technickým výpočtem stanovíme v tomto případě pouze součinitele pro přepočet osvětlenosti na jas.

Protože má komunikace 2 pruhy, musí se zjišťovat jas povrchu dvěma pozorovateli, kteří jsou postupně umístěni v každém jízdním pruhu. Jasový součinitel osvětlení je tedy nutné stanovit pro oba pozorovatele a tudíž dostaneme i dvě hodnoty průměrného jasu komunikace, z nichž menší porovnáme s požadavky normy. V kontrolní síti jsme si stanovili 25 x 6 kontrolních bodů, což znamená 150 hodnot vodorovné osvětlenosti a 2 x 150 hodnot jasu povrchu komunikace. Z toho důvodu jsou všechny hodnoty zaneseny v tabulkách v příloze.

V PŘÍLOZE A nalezneme světelně technický výpočet vytvořený v softwaru DIALux, kde můžeme vidět kromě titulní strany s informacemi o svítidle (některá z nich jsou začerněná z důvodů uvedených v kapitole 5.1) také plánovací údaje, světelně technické výsledky (které nebereme v tomto výpočtu v potaz), tabulky vypočtených hodnot osvětlenosti a tabulky vypočtených hodnot jasu povrchu komunikace pro oba pozorovatele.

V PŘÍLOZE B můžeme vidět tabulkové hodnoty z přílohy 1 zanesené do softwaru Microsoft Excel, z kterých stanovujeme průměrné hodnoty a poté jasové součinitele osvětlení. V druhé části můžeme vidět tabulku naměřených hodnot osvětlenosti, z které opět stanovíme průměrnou hodnotu a vynásobením s oběma součiniteli dostaneme kýžené hodnoty průměrného jasu povrchu komunikace.

Průměrné hodnoty vypočtených osvětleností a jasů (stanovené v Microsoft Excel) z tabulek B1-B3 (PŘÍLOHA B) mají hodnoty:

$$E_p = 2,09 \text{ lx}$$

$$L_{p1} = 0,122 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2} \text{ (pozorovatel 1)}$$

$$L_{p2} = 0,1163 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2} \text{ (pozorovatel 2)}$$

Jasové součinitele osvětlení jsou potom dány vztahy (viz kapitola 2.4)

$$e_{Lp1} = \frac{E_p}{L_{p1}} = \frac{2,09}{0,122} = 17,1 \text{ lx} \cdot \text{cd}^{-1} \cdot \text{m}^2, \quad (6.1)$$

$$e_{Lp2} = \frac{E_p}{L_{p2}} = \frac{2,09}{0,1163} = 17,9 \text{ lx} \cdot \text{cd}^{-1} \cdot \text{m}^2. \quad (6.2)$$

Průměrná hodnota vodorovné osvětlenosti z naměřených hodnot (stanovená v Microsoft Excel) z tabulky B4 (PŘÍLOHA B) má hodnotu:

$$E_{pt} = 1,94 \text{ lx}^{(1)}$$

Poznámka 1: Můžeme si všimnout, že se průměrná hodnota vodorovné osvětlenosti z měření a výpočtu liší pouze o 7 %. Vzhledem k nepřesnosti luxmetr můžeme konstatovat, že se měření a výpočet téměř shodují.



Průměrné hodnoty jasů povrchu komunikace pro oba pozorovatele se poté spočítají jako součin průměrné hodnoty osvětlenosti z měření a příslušného jasového součinitele osvětlení

$$L_{pt1} = \frac{E_{pt}}{e_{Lp1}} = \frac{1,94}{17,1} = 0,114 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}, \quad (6.3)$$

$$L_{pt2} = \frac{E_{pt}}{e_{Lp2}} = \frac{1,94}{17,9} = 0,108 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}. \quad (6.4)$$

Z tabulky 3 v kapitole 4.2 je vidět, že minimální průměrná hodnota jasů povrchu komunikace musí být pro zvolenou třídu osvětlení ME6 minimálně $0,3 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$.

Bez nutnosti dopočítávání dalších parametrů, které jsou pro třídu ME6 určeny, můžeme prohlásit osvětlení za nevyhovující. V následující kapitole je tedy zpracován nový návrh osvětlení tak, aby splňovalo požadavky dané třídy.

6.6 Nový návrh VO

Snahou nového návrhu je udělat co nejméně nákladnou změnu, která však přinese razantní změnu v kvalitě osvětlení. Nejlepším řešením je proto osadit dalším svítidlem betonový sloup, jež se nachází uprostřed řešené oblasti (stejně sloupy, jež lemují řešenou oblast v podélném směru nesou původní svítidla). Vzdálenost mezi sloupy se tedy sníží na 36,5 m, přičemž ostatní parametry zůstanou zachovány.

Posouzení nového návrhu provedeme v softwaru DIALux, přičemž využijeme nástroj optimalizace, který dokáže porovnat několik různých parametrů soustavy (různé rozteče svítidel, více typů svítidel apod.) a jejich kombinaci, z nichž vybere varianty, které splňují požadavky pro danou třídu osvětlení.

Do optimalizace tedy vstupují tyto parametry soustavy:

- Rozteč svítidel: 36,5 m
- Výška světelného bodu: 6,9 m
- Přesah světelného bodu (přesah průmětu sv. bodu do vozovky): – 1,2 m
- Sklon svítidla: 0°

Původní představou bylo využití původního svítidla k novému návrhu. Po vložení do optimalizace ale vyšlo svítidlo jako nedostatečné viz obr. 26.

Vzdálenost [m]	Výška [m]	Přesah [m]	Sklon [°]	Typ	Lm [cd/m²]	U0	U1	TI [%]
✓ Nedostatečná varianta								
36.500	6.900	-1.200	0	{1}	0.35	0.39	0.50	18
36.500	6.900	-1.200	0	{3}	0.24	0.13	0.17	10
				Cílové h...	0.30	0.35	0.40	15

Obr. 26: Nevyhovující svítidla, z nichž svítidlo (3) je původní [zdroj: autor]



Původní svítidlo (ve výpočtu jako typ 3) při snížení rozteče na 36,5 m nesplňuje hned několik požadavků normy v čele s průměrným jasnem povrchu komunikace. Svítidlo stejného výrobce s vyšším světelným tokem (typ 1) a jinou optikou zase neplní požadavek na prahový přírůstek.

Další variantou v návrhu je tedy výměna svítidel za lampy jiného výrobce. Tato varianta již není tak hospodárná jako pouhé přidání dalšího svítidla, nicméně je pořád méně nákladná než vytváření nových světelných míst, kdy je nutné započítat výkopové práce apod. Vybrána byla svítidla firmy Lamberga a to sice řada Katrina pro osvětlování pozemních komunikací. Při stejných parametrech byly do optimalizace vloženy tři verze daného svítidla v různých výkonových řadách, z nichž svítidlo Katrina 6 splnilo požadavky normy viz obr. 27.

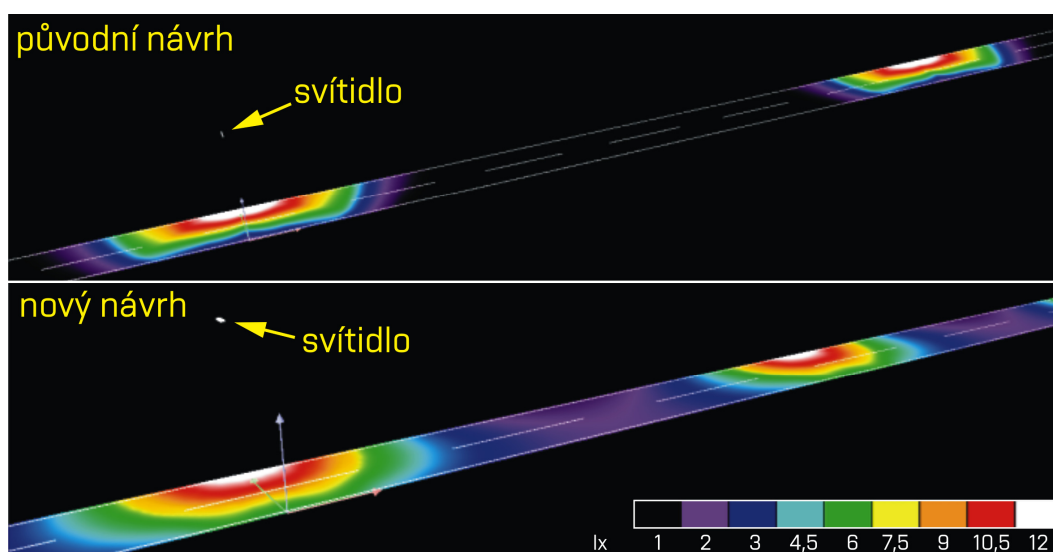
Vzdálenost [m]	Výška [m]	Přesah [m]	Sklon [°]	Typ	Lm [cd/m²]	U0	U1	TI [%]
Vhodné varianty (splněny všechny cílové veličiny)								
36,500	6,900	-1,200	0	(2)	0,30	0,51	0,55	15
				Cílové h...	0,30	0,35	0,40	15
Lamberg Katrina 06 C40-1400-L1 (CREE XPL)								

Obr. 26: Svítidlo Katrina 6 jako vyhovující pro dané parametry soustavy [zdroj: autor]

Kompletní světelně technický výpočet je součástí přílohy C. Není zde již nutné nechat vykreslovat všechny body v kontrolní síti, proto je výpočet zúžen na titulní stranu s údaji o svítidle, plánovacími údaji, světelně technickými výsledky a výsledky pro každého pozorovatele. Součástí této kapitoly je PŘÍLOHA C: Světelně technický výpočet s novými parametry.

6.7 Rozdíly mezi původním a novým návrhem

Pro porovnání rozdílu mezi původním a novým řešením byl vybrán obr. 27, který znázorňuje rozložení osvětlenosti vykreslené v nepravých barvách. Zlepšení je patrné na první pohled.



Obr. 27: Porovnání osvětleností původního a nového návrhu (znázorněno v nepravých barvách) [zdroj: autor]



6.8 Ekonomické parametry

V tomto případě nelze mluvit o žádné úspoře financí výměnou VO. Hlavní prioritou bylo zvýšení bezpečnosti. Z nulové osvětlenosti se podařilo v nejméně osvětlené části dosáhnout osvětlenosti 2 lx. Pokud by však někdo chtěl namítat tím, že výměna osvětlení je nákladná záležitost, je třeba si uvědomit, že Centrum dopravního výzkumu stanovilo v roce 2012 celospolečenskou ztrátu při usmrcení osoby vlivem dopravní nehody na přibližně 19 000 000 Kč. Tento argument by měl zaznít vždy, pokud se některá obec brání rekonstrukci nekvalitního osvětlení. [11]

6.9 Závěr

V kapitole 6 bylo provedeno hodnocení stavu VO v konkrétní části obce XY. Na místě bylo provedeno měření osvětlenosti luxmetrem. Třídou osvětlení dané oblasti byla stanovena třída ME6. S pomocí softwaru DIALux byl proveden světelně technický výpočet, jež sloužil pro stanovení průměrné hodnoty osvětlenosti a průměrných hodnot jasů povrchu komunikace pro oba pozorovatele (jelikož se jedná o komunikaci s dvěma pruhy). Podílem průměrné hodnoty osvětlenosti a jasů se stanovili jasové součinitelé osvětlení, které v součinu s průměrnou hodnotou osvětlenosti z měření sloužili pro stanovení odpovídajících průměrných hodnot jasů povrchu komunikace.

Vypočtené hodnoty byly porovnány s požadavky normy pro třídu osvětlení ME6 a bylo zjištěno, že současný stav je velmi poddimenzován. To potvrdili i fotografie z terénu, na kterých byli znázornění figuranti (cyklista a chodec) ve špatně osvětlené části komunikace.

V další části byl proto vypracován nový návrh VO. Úmyslem bylo přidat mezi původní dvě svítidla další stejného typu. Ukázalo se ovšem, že svítidla daného výrobce nevyhovují a proto bylo využito ve výpočtu svítidla firmy Lamberga, které již normu splnilo. Rozdíly mezi oběma návrhy byly znázorněny vykreslením osvětlenosti v nepravých barvách.

7. Výměna svítidel před budovou A1 FSI VUT v Brně

V této kapitole bude možné porovnat naměřené hodnoty před výměnou svítidel a po ní. Jedná se o část komunikace přiléhající vstupu do budovy A1 Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, konkrétně je naše síť kontrolních bodů stanovena mezi dvěma svítidly, jež se nacházejí v úrovni přednáškové auly P1 resp. P6.

Nejedná se však o nebezpečně osvětlenou část a předmětem této kapitoly není porovnání daného místa s požadavky normy. Cílem je porovnat osvětlenosti původního a nového řešení s přihlédnutím na ekonomické parametry a rozdíly mezi barvou světla původních vysokotlakých sodíkových výbojek a nahrazených LED svítidel.

7.1 Stanovení kontrolní sítě

Vybrána byla oblast mezi dvěma svítidly s roztečí $S = 25$ m. Svítidla jsou umístěna na samostatných sloupech ve výšce 5,3 m (původní) a 5 m (nové) viz obr. 21. Šířka komunikace je v dané oblasti $2 \times W = 6$ m. Svislý průmět svítidla je vzdálen 0,3 m od hranice vozovky.



Obr. 28: Síť kontrolních bodů ve vybrané oblasti [zdroj: autor]

Ze známých vztahů si vypočteme polohu kontrolních bodů ve výpočtové síti. Dle kapitoly 3.1 je podélná rozteč mezi body $D = S / N$. Pro rozteč mezi svítidly $S < 30$ m je $N = 10$. Podélná rozteč je tedy $D = 25 / 10 = 2,5$ m. Příčná rozteč mezi body je dána vztahem $d = W / 3 = 3 / 3 = 0,9$ m.

Body nejbližší okraji výpočtové oblasti jsou vzdáleny od okraje o polovinu dané rozteče. V podélném směru je první příčná řada bodů vzdálena od kraje sítě 1,25 m, v příčném směru je tato vzdálenost 0,5 m.



7.2 Měření vodorovné osvětlenosti a hodnocení rovnoměrnosti

Měření původních svítidel bylo provedeno dne 27. 4. 2016 ve 22:00 při teplotě vzduchu 11 °C. Obloha byla zamračená a záření měsíce tak nemohlo ovlivnit měření. Účastnili se ho Miroslav Krejčí (měření) a Petr Ptáček (zapisování dat).

Měření svítidel po výměně bylo provedeno 2. 5. 2016 ve 22:30 při teplotě vzduchu 14 °C. Obloha byla jako v prvním případě zamračená. Měření se účastnili Miroslav Krejčí (měření) a Jiří Petr (zapisování dat).

Použitým měřicím přístrojem byl luxmetr CEM DT-8809 s fotometrickou hlavou pro měření vodorovné osvětlenosti viz obr. 7. Před započítáním měření byl přístroj ponechán, aby se přizpůsobil okolní teplotě a byl na několik minut vystaven osvětlení jednoho ze svítidel, aby byla zaručena vyšší přesnost. Stejně jako v kapitole 6.2 byla účelem měření kontrola stavu VO, tudíž není požadována tak vysoká přesnost. Naměřené hodnoty vodorovné osvětlenosti můžeme vidět v tab. 6.

Tab. 8: Naměřené hodnoty $E (lx)$ původního osvětlení se znázorněním v barevné škále

5,5	19,1	15,8	9,4	6,6	3,7	3,8	6,7	10,2	17,5	20,4
4,5	14,8	14,3	9,2	5,8	5	4,4	6,2	10,6	15,8	17,3
3,5	11,8	11,9	7,5	6,1	5,1	4,9	5,3	8,4	12,9	13,3
2,5	9,2	9,3	6,2	4,1	4,3	4,2	4,3	6,6	9,7	10,2
1,5	6,7	6,8	5,1	3,4	3,1	3,4	3,6	4,9	6,8	7
0,5	5,3	5,2	3,9	2,9	2,6	2,9	2,8	3,1	5,1	5,6
m	1,25	3,75	6,25	8,75	11,25	13,75	16,25	18,75	21,25	23,75

Tab. 9: Naměřené hodnoty $E (lx)$ nového osvětlení se znázorněním v barevné škále

5,5	7,8	9,2	5,3	4,1	2,6	2,4	3,8	4,7	9	7,4
4,5	9,3	9,6	6,1	5,4	3,7	3,5	3,7	5	8,4	8,9
3,5	7,6	8,1	6	5,6	5,4	5,1	5,2	5,8	7,6	8,1
2,5	6,4	6,9	6,7	6,6	6,3	6,7	6,5	6,6	6,7	6,6
1,5	4,7	5,9	5,9	6,9	6,6	6,4	6,8	6,6	5,6	4,8
0,5	4,3	4,9	5,6	6,4	6,2	6,4	6,3	5,5	4,8	4,2
m	1,25	3,75	6,25	8,75	11,25	13,75	16,25	18,75	21,25	23,75

Z rozdílů mezi naměřenými hodnotami, které jsou v tabulce znázorněny podle velikosti v barevné škále je patrné, že původní sodíkové výbojky nejvíce osvětlují oblast, která je od světelného bodu nejbližší a s rostoucí vzdáleností osvětlenost klesá. Vnikají tak velké rozdíly osvětlenosti na povrchu vozovky, což snižuje celkovou rovnoměrnost. Naproti tomu nová LED svítidla se zabudovanou optikou distribuují světelný tok spíše do vzdálenějších částí vozovky, přičemž je z barevného rozložení patrná vyšší rovnoměrnost.

Celkovou rovnoměrnost můžeme samozřejmě vyjádřit exaktně a to sice jako poměr nejnižší a průměrné hodnoty osvětlenosti. Ty si vyjádříme z tabulek pomocí softwaru Microsoft Excel.



Hodnoty pro původní osvětlení:

$$\bar{E}_{původní} = 7,7 \text{ lx}$$

$$E_{\min_původní} = 2,6 \text{ lx}$$

Hodnoty pro nové osvětlení:

$$\bar{E}_{nové} = 6,09 \text{ lx}$$

$$E_{\min_nové} = 2,4 \text{ lx}$$

Celkové rovnoměrnosti se tedy vypočítají ze vztahů

$$U_{0_původní} = \frac{E_{\min_původní}}{\bar{E}_{původní}} = \frac{2,6}{7,7} = 0,337, \quad (7.1)$$

$$U_{0_nové} = \frac{E_{\min_nové}}{\bar{E}_{nové}} = \frac{2,4}{6,09} = 0,394. \quad (7.2)$$

Ze vztahů (7.1) a (7.2) je patrný nárůst celkové rovnoměrnosti po výměně svítidel o téměř 17 %. Celková rovnoměrnost je důležitá z hlediska namáhání zraku řidiče. Zrakový výkon se snižuje, pokud jsou v oblasti velké rozdíly osvětleností. [1]

7.3 Ekonomické parametry

Kontaktováním příslušných správců VO a firem, jež se na rekonstrukci podílely byly zjištěny přesné typy svítidel. Původním svítidlem bylo Philips Malaga SGS101 SON-I 70W, přičemž označení SON znamená vysokotlaká sodíková výbojka. Nahrazeným svítidlem je Ares Maxi Franco Power LED 9724814 47 W. Jeho cena je přibližně 22 000 Kč s DPH. [15]

Při průměrném svícení 10,8 hodiny denně, ceně přibližně 2,50 Kč/kWh (tarif C62d) a rozdílu příkonů svítidel 23 W roční úspora činí 227 Kč na jedno svítidlo ($0,023 \text{ kW} \times 10,8 \text{ h} \times 365 \text{ dní} \times 2,5 \text{ Kč/kWh}$). Vzhledem k jeho pořizovací ceně vychází návratnost na 96 let (22 000 Kč / 199 Kč/rok). [10,16]

Problém s tak dlouhou návratností je zejména pořizovací cena svítidla a také jeho nízká světelná účinnost, která činí $83 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Takového měrného světelného výkonu dosahovala LED svítidla již v roce 2009. V roce 2016 však dosahují moderní LED svítidla pro osvětlování pozemních komunikací i $140 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ při třetinové pořizovací ceně. Hospodárnost zde však zřejmě není primárním účelem výměny viz závěr této kapitoly. [17]

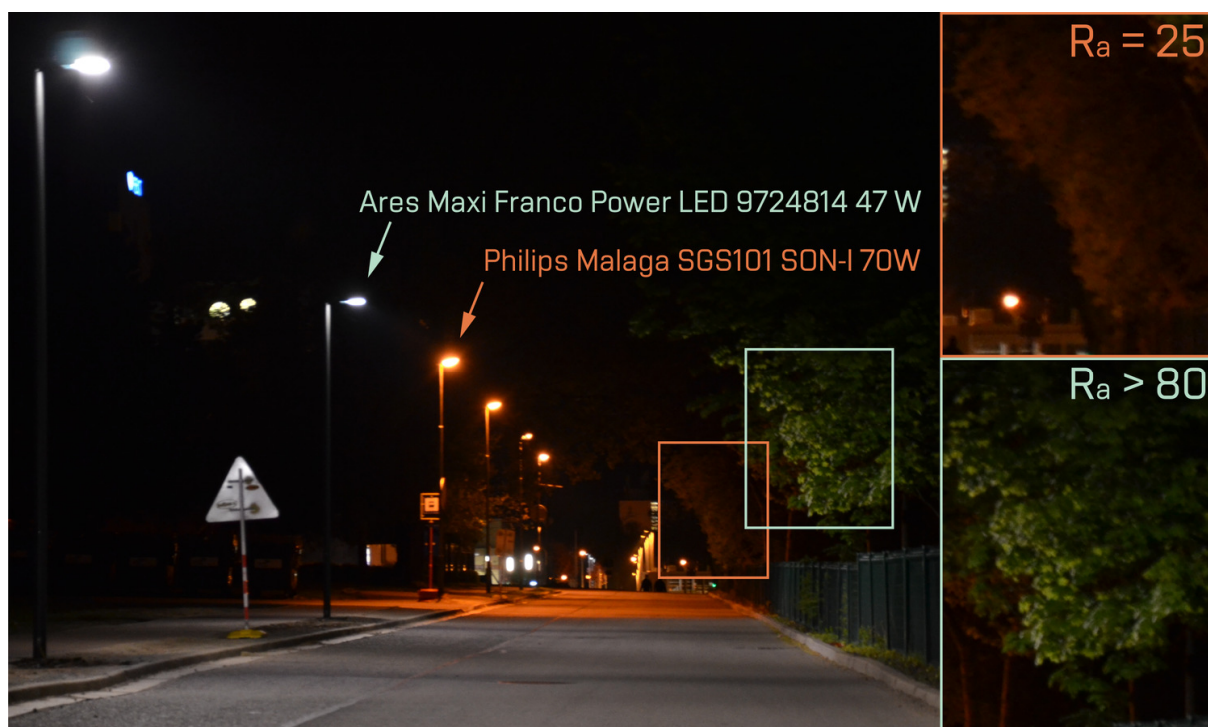
7.4 Vliv barvy světla

Na pořízených fotografiích bude diskutován vliv barvy světla ve veřejném osvětlení. Pro kvalitativní hodnocení soustav využíváme tzv. index podání barev R_a , který vyjadřuje

stupeň shodnosti vjemu barvy předmětů osvětlených uvažovaným zdrojem a barvy týchž předmětů osvětlených smluvním zdrojem světla za stanovených podmínek pozorování. Hodnota indexu podání barev se pohybuje v rozmezí 0 až 100. V přírodním denním světle je vjem barev nejvěrnější, čemuž odpovídá $R_a = 100$. U nízkotlakých sodíkových výbojek zase žluté světlo zamezuje možnosti barevného vjemu, přičemž $R_a = 0$. [1]

V osvětlení komunikací dnes není nastaven minimální limit hodnoty R_a , nicméně Společnost pro rozvoj veřejného osvětlení a rada ředitelství Služby dopravní policie policejního prezidia ČR ve své analýze zjišťovali, jaký má vliv barva světla na celkovou nehodovost při zachování stejné osvětlenosti. Po osazení zkoumané oblasti zdroji s bílým světlem (s vyšším indexem podání barev) se snížil počet dopravních nehod v nočních hodinách o 52 %. [11]

Pokud se zaměříme na zdroje použité v námi řešené oblasti, tak výrobce Philips uvádí u nahrazené vysokotlaké sodíkové výbojky $R_a = 25$, přičemž LED svítidlo Ares dosahuje $R_a > 80$. Pro porovnání můžeme na obr. 29 vidět osvětlení okolní zeleně a jeho barevné podání od obou typů zdrojů. [18,19]



Obr. 29: Detail osvětlení zeleně pro porovnání podání barev obou zdrojů [zdroj: autor]

Problém s nízkým indexem podání barev může být například ten, že chodec v šedém oblečení, který kráčí po šedé vozovce může vlivem osvětlení žlutým světlem splynout s vozovkou a být hůře postřehnutelným pro řidiče protijedoucího vozidla.

Na dalších dvou obrázcích (tedy obr. 30 a obr. 31) můžeme znovu vidět rozdíl barevného podání obou svítidel. Obě fotografie jsou pořízeny ze stejné polohy na vozovce (z hranice mezi bílou a žlutou osvětlenou oblastí viditelnou na obr. 29). Jedna z fotografií je však svisle převrácena, kvůli snadnějšímu porovnání.



Obr. 30: Pohled na bíle osvětlenou část [zdroj: autor]

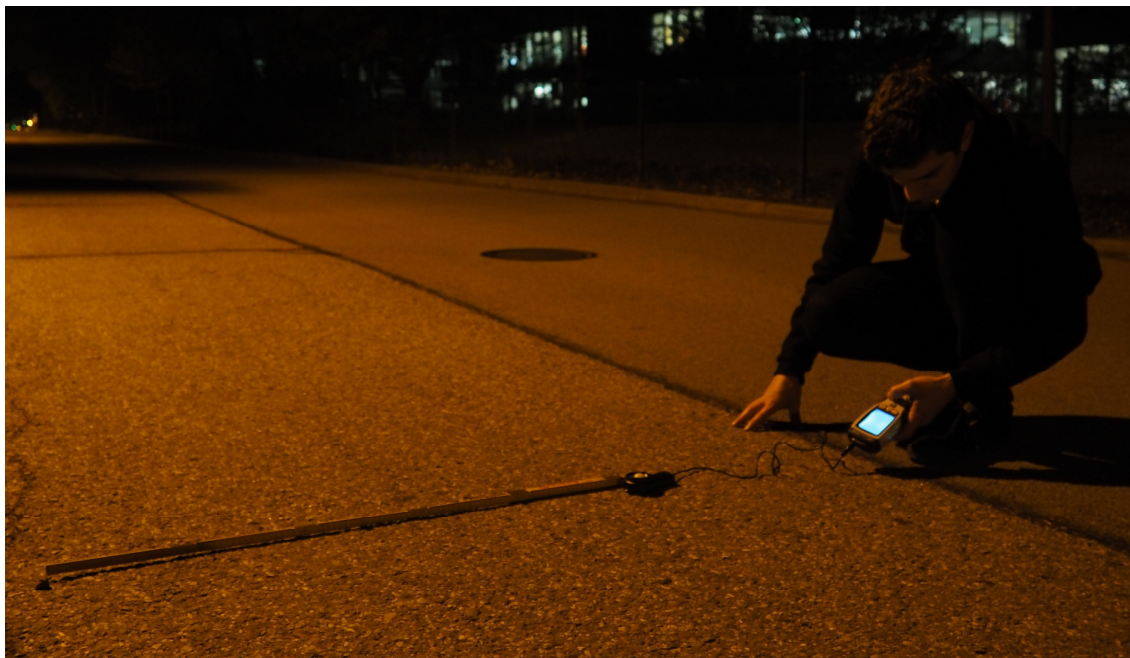


Obr. 31: Pohled na žlutě osvětlenou část (fotografie svisle převrácena) [zdroj: autor]

Fotografie byly pořízeny digitálním fotoaparátem Nikon D7000 při času závěrky 1/5 s, cloně f3.5, ISO 1000 a stejném nastavení barev. Snahou bylo se fotografií nejvíce přiblížit skutečnému stavu, proto byly foceny v různých expozicích a vybrány ty, které se nejvíce blížily skutečnosti.



Posledním obrázkem této kapitoly je fotografie z měření vodorovné osvětlenosti původních svítidel. Můžeme si všimnout, že měření probíhá v takové poloze, aby měřitel nestínil ani jednomu ze svítidel, proto je vhodné používat fotometrickou hlavu připojenou k luxmetru kabelem. Skládací metr sloužil k měření vzdáleností mezi jednotlivými body.



Obr. 32: Fotografie z měření vodorovné osvětlenosti [zdroj: autor]

7.5 Závěr

V kapitole 7 bylo provedeno zhodnocení VO před budovou A1 FSI VUT v Brně před výměnou svítidel a po ní. Během rekonstrukce bylo vyměněno u přiléhající komunikace několik vysokotlakých sodíkových výbojek za nová LED svítidla. Z hlediska kvality osvětlení se nejednalo o nebezpečně osvětlenou komunikaci. Účelem bylo porovnání osvětlenosti po výměně (zejména celková rovnoměrnost), ekonomické parametry nových svítidel a vliv barvy světla (také na bezpečnost).

Měření osvětlenosti bylo provedeno před výměnou a po ní. Po zpracování naměřených hodnot bylo zjištěno, že se výměnou zvýšila celková rovnoměrnost osvětlenosti o 17 %.

Při zhodnocení hospodárnosti bylo zjištěno, že kvůli vysoké pořizovací ceně svítidla a jeho nízké světlené účinnosti je návratnost soustavy 96 let. Autor práce se však domnívá, že primárním účelem výměny svítidel nebyla snaha snížení příkonu (a tím i nákladů na provoz), nýbrž vytvoření reprezentativního prostředí před vstupem do budovy A1, kdy díky LED technologii a jednotnému designu svítidel i sloupů bylo dosaženo moderního dojmu a jednotného vizuálního stylu vzhledem k opláštění budovy. Ekonomické parametry proto považujeme za irelevantní.

Na konci kapitoly je diskutován vliv barvy světla v osvětlení komunikace (s přihlédnutím na bezpečnost), přičemž součástí jsou fotografie rozdílů barvy světla původních sodíkových výbojek a nových LED svítidel.



8. Osvětlení přechodu pro chodce

Dle kapitoly 5.3 se tato část práce zabývá vybraným případem nebezpečného osvětlení přechodu pro chodce resp. místa pro přecházení (bez vodorovného značení – tzv. „zebrý“), který se nachází mezi dvěma obcemi v kraji Vysočina. Konkrétní poloha přechodu ani firma provádějící realizaci není zmíněna z důvodů uvedených v kapitole 5.1. Pro oba typy křížení komunikace a chodců platí stejné požadavky, které jsou zaneseny v TKP 15 (Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací - kapitola 15 - osvětlení pozemních komunikací - dodatek č. 1), které vydalo Ministerstvo dopravy v roce 2013. [7]

V současné době se osvětlení přechodů pohybuje na velmi dobré úrovni. Na přechodech pro chodce totiž dochází velmi často k dopravním nehodám (srážce vozidla s chodcem) a tak je při osvětlování komunikací brán ohled primárně na ně.

Námi hodnocený přechod by zřejmě splňoval požadavky na osvětlení, jež jsou uvedeny ve zmíněném předpisu. Jejich posouzení však není předmětem této kapitoly. Problém, který u vybraného přechodu nastal je ten, že není respektován požadavek z TKP 15, který jasně říká, že přisvětlení přechodů smí být zřizováno jen při osvětlení komunikace před a za přechodem v délce závislé na dovolené rychlosti. V našem případě se jedná o dovolenou rychlost 60 km/h, pro kterou se požaduje osvětlení před přechodem od jeho osy ve vzdálenosti 150 m na obě strany. Z obr. 33 je však patrné, že je ve vybrané lokalitě osvětlen pouze přechod. [7]



Obr. 33: Přechod pro chodce (resp. místo pro přecházení) ve vybrané lokalitě [zdroj: autor]

Řidič má sice velmi dobrou informaci o chodcích, kteří se v danou chvíli pohybují v místě pro přecházení nebo na něj chtějí vstoupit, ale nemá již vlivem zvýšeného kontrastu představu, co se děje za ním. Lidské oko se nedokáže tak rychle adaptovat na

nadcházející tmavou oblast a hrozí tak sražení chodce či cyklisty, jež se v tmavé oblasti za přechodem nachází.

8.1 Hodnocení pomocí světlených simulací

Pro porovnání rozdílu mezi původním stavem a řešením, jež by odpovídalo požadavkům TKP 15 (tedy osvětlení zbytku komunikace) využijeme světelnou simulaci v softwaru DIALux a následný rendering modulem POV-Ray, který využívá metodu sledování paprsků (raytracing). Pro ni použijeme stejný zdroj světla jako je instalován na řešeném přechodu – tedy 250 W metalhalogenidová výbojka. Protože výrobce svítidla k němu nebyl ochoten poskytnout eulumdata, využijeme data od výrobce Philips svítidla MVF617 C se stejným typem zdroje i příkonem. Na kraj vozovky vložíme modely figurantů – v ose přechodu a o 12 m dále. Osvětlení přechodu zajišťují dvě svítidla Philips umístěná před hranou přechodu z každého směru, ostatní svítidla jsou Lamberg Katrína 10 C40-1400-L1.

Na obr. 34 můžeme vidět rozdíly mezi oběma řešeními. Jedná se čistě o subjektivní porovnání, jelikož nerespektujeme reálné odrazné vlastnosti chodců. Nicméně lze pozorovat výrazné zlepšení viditelnosti chodce při osvětlení zbytku komunikace.



Obr. 34: Porovnání obou řešení [zdroj: autor]



8.2 Návrh možného řešení

Při návrhu nového řešení budeme vycházet z předpokladů, jež popisuje Ing. Tomáš Maixner ⁽²⁾ v článku *Osvětlení přechodů pro chodce* pro časopis Světlo č.4/2008. [20]

Ve veřejném osvětlení se pohybujeme v oblasti nízkých adaptačních jasů, při kterých je možné různé jasy rozlišit, pokud jsou v poměru alespoň 1:3. Jas chodce by tedy měl být trojnásobný než je jas vozovky za ním. Dle třídy osvětlení dané komunikace zjistíme požadovanou průměrnou hodnotu jasu povrchu komunikace L_{KOM} ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$), kterou pomocí rovnic 1.8 a 1.9 a požadavku na trojnásobný jas chodce přepočteme na osvětlenost chodce E_{CH} (lx) dle vztahu

$$E_{CH} = 3 \times L_{KOM} \times \frac{\pi}{\rho}, \quad (8.1)$$

kde ρ (-) je střední činitel odrazu světla chodce. Protože u každého chodce může být tento činitel různý podle barvy oblečení (a jeho odrazných vlastností), uvažuje se jeho průměrná hodnota pro chodce $\rho = 0,209$. [20]

Vypočtenou hodnotu osvětlenosti chodce porovnáme s osvětleností ze světelné simulace v softwaru DIALux.

8.3 Volba třídy osvětlení a výpočet osvětlenosti chodce

Pro stanovení požadovaného průměrného jasu povrchu komunikace musíme nejdříve stanovit třídu osvětlení dané komunikace. Využijeme opět asistenta pro volbu třídy osvětlení softwaru DIALux. Postup je stejný jako v kapitole 6.4, tudíž nemá smysl ho celý rozepisovat. Stanovenou třídou je ME4a, jejíž minimální průměrnou hodnotou jasu povrchu komunikace je $\bar{L} = L_{KOM} = 0,75 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. [3]

Osvětlenost chodce by tedy měla být minimálně

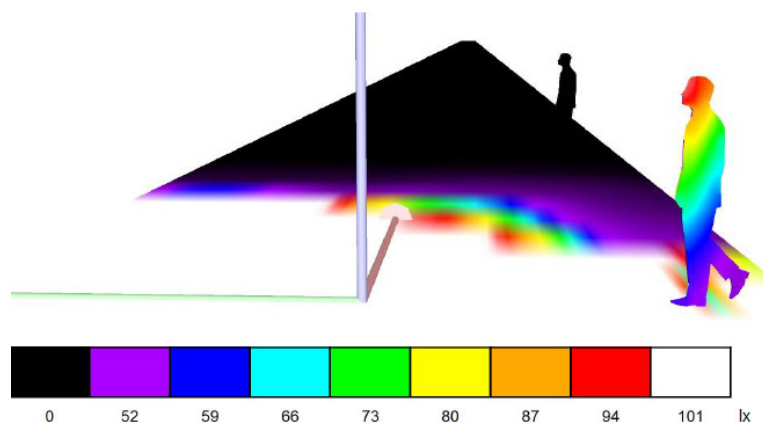
$$E_{CH} = 3 \times L_{KOM} \times \frac{\pi}{\rho} = 3 \times 0,75 \times \frac{\pi}{0,209} = 33,8 \text{ lx}. \quad (8.1)$$

8.4 Světelná simulace

Pro světelnou simulaci využijeme situaci z kapitoly 8.1 a tedy osvětlení chodce (jehož model má zjednodušený tvar) dvěma svítidly jejichž typ zdroje i příkon odpovídá zdroji instalovanému ve svítidlech na řešeném přechodu, přičemž mají i stejné geometrické uspořádání. Na přední plochu modelu chodce si zaneseme výpočtovou plochu, pomocí které zjistíme hodnoty osvětlenosti v jednotlivých bodech plochy.

Poznámka 2: Ing. Tomáš Maixner je i autorem dodatku č. 1 TKP 15 zmíněného na začátku kapitoly 8.

Z vypočtených hodnot osvětlenosti DIALux sám stanoví průměrnou hodnotu. Součástí této kapitoly je PŘÍLOHA D, jejímž obsahem je právě tabulka vypočtených hodnot spolu s průměrnou hodnotou osvětlenosti chodce, jež činí $E_{CH} = 67$ lx. Znárodnění osvětleností chodce můžeme vidět na obr. 35 vykresleny v nepravých barvách.



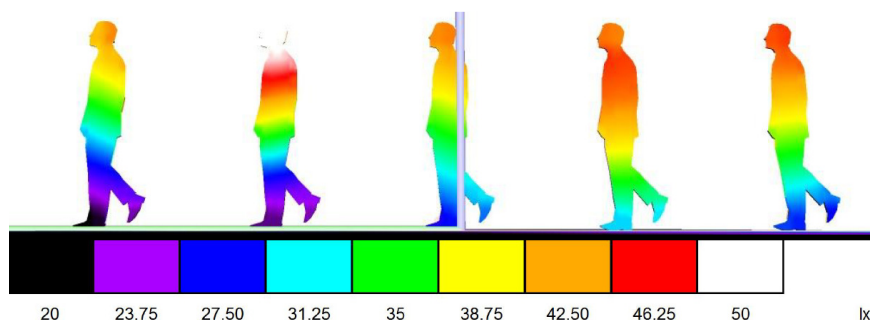
Obr. 35: Osvětlenost chodce [zdroj: autor]

Vidíme, že oproti minimální hodnotě se daným osvětlením dostáváme na dvojnásobek. Požadavek na minimální osvětlenost plníme, ale soustava je značně předimenzovaná. Vznikly by tím opět velké rozdíly mezi osvětleností přechodu a okolní komunikace, i když by samozřejmě nebyly tak markantní jako při osvětlení pouhého přechodu.

8.5 Výměna svítidel přechodu

Na základě předchozího zjištění o předimenzování soustavy budou v této kapitole nahrazeny obě 250 W metalhalogenidové výbojky LED svítidly tak, aby byl zajištěn průměrný jas chodce přibližně 40 lx, což je 1,18 násobek minimální hodnoty z výpočtu. Taková hodnota osvětlenosti znamená, že budeme plnit požadavek a zároveň nebude docházet k velkým rozdílům osvětleností na přechodu a mimo něj.

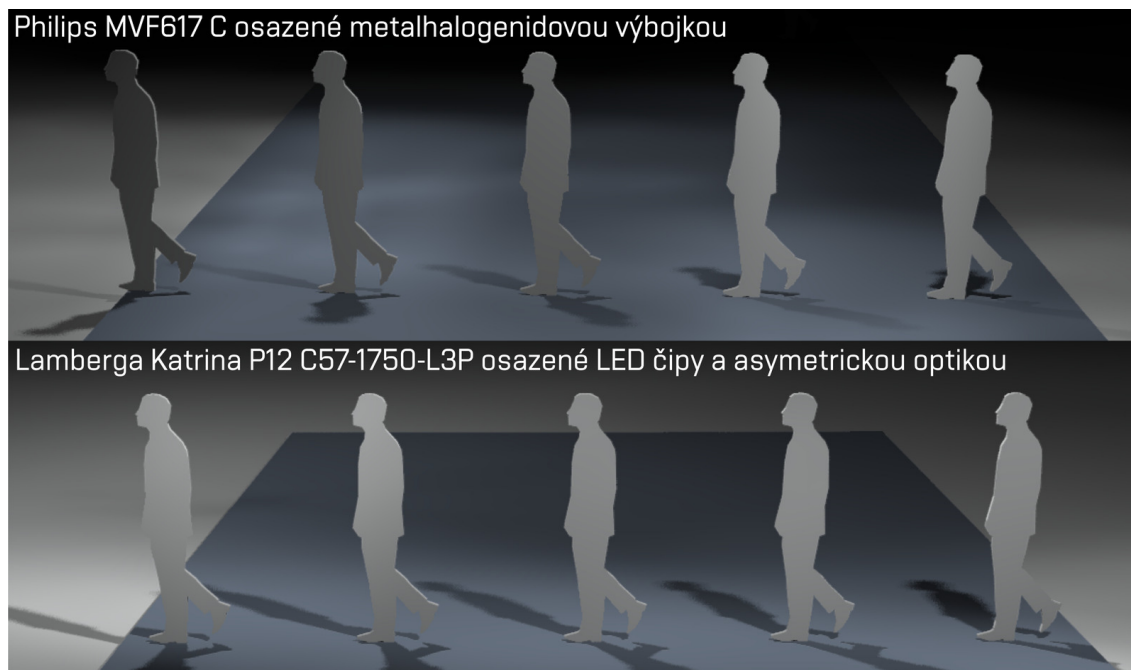
Pro výměnu je zvoleno svítidlo Lamberga Katrina P12 C57-1750-L3P s asymetrickou optikou, kdy je světlo distribuováno ve směru jízdy z obou stran přechodu a neoslňuje tak řidiče. Montážní výška zůstává stejná (aby nedošlo k srovnávací chybě), ale vzhledem k distribuci světla jsou upraveny rozměry ve vodorovné rovině. Na obr. 36 můžeme vidět vykreslení osvětlenosti v nepravých barvách, přičemž je pro každého chodce vypočtena průměrná osvětlenost jako v případě 8.4, která se pohybuje mezi 33 a 37 lx (uspokojivé).



Obr. 36: Osvětlenost chodců pomocí asymetrického svítidla [zdroj: autor]

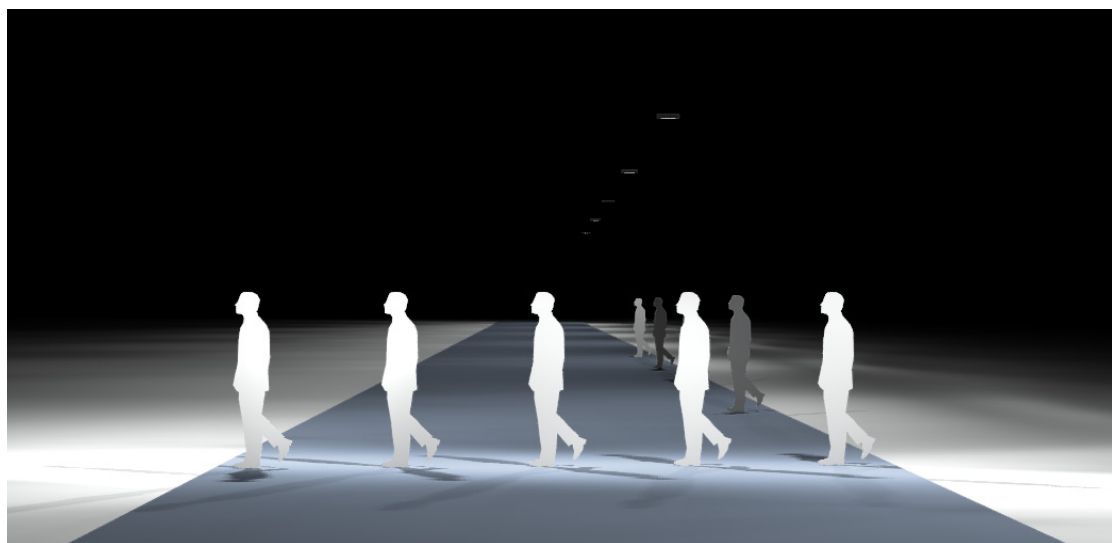


Rozdíly mezi svítidlem Philips, které svítí „pod sebe“ a asymetrickým svítidlem můžeme pozorovat na obr. 36, který je opět renderovaný pomocí POV-Ray. Můžeme vidět, jak se u prvního jmenovaného svítidla snižuje osvětlenost chodce, když přechází vozovku. Naproti tomu asymetrické svítidlo má propracovanou optiku, která zaručuje, že je chodec osvětlený při přecházení pořád stejně.



Obr. 37: Porovnání konvenčního svítidla a svítidla s asymetrickou optikou [zdroj: autor]

Na závěr je ještě třeba porovnat osvětlení přechodu při osvětlení okolní komunikace. Na tu použijeme svítidlo Katrina 10 C40-1400-L1, které jsme si spočítali s pomocí optimalizace v softwaru DIALux (světelný výpočet není součástí práce). Pro třídu osvětlení ME4a vyhovuje svítidlo při rozteči 24 m a výšce světelného bodu 7 m, přičemž průmět světelného bodu leží na okraji vozovky. Po zahrnutí svítidel do výpočtu opět použijeme metodu raytracing viz obr. 38.



Obr. 38: Konečný návrh i s osvětlením okolí [zdroj: autor]



Z obrázku je patrné, že i při použití svítidla s menším světelným tokem stále dosahujeme tzv. „divadelního efektu“, tedy zvýraznění chodců v oblasti přechodu, přičemž jsou dobře viditelní i chodci mimo přechod.

8.6 Ekonomické parametry

Hospodárnost nového řešení můžeme porovnávat pouze když se zaměříme na osvětlení samotného přechodu. Pokud by jsme chtěli porovnávat původní návrh s novým z celkového pohledu, tak musíme započíst i svítidla, jež osvětlují oblast 150 m před a za přechodem. Zaměříme-li se ale pouze za nahrazení svítidel osvětlujících přechod, můžeme porovnat nahrazení dvou 250 W výbojek za 72 W LED svítidla.

Při průměrném svícení 10,8 denně, rozdílu příkonů 0,178 kW a ceně energie 2,50 Kč/kWh jsme schopni za rok na jednom svítidle ušetřit 1754 Kč. Při pořizovací ceně svítidla Katrina P12 C57-1750-L3P přibližně 8000 Kč se nám investice vrátí za 4,5 roku.

Musíme si uvědomit, že stejně jako v předchozích dvou případech nejde o ekonomické hledisko, nýbrž v první řadě o bezpečnost účastníků silničního provozu.

8.7 Závěr

V kapitole 8 jsme se zabývali nevhodně osvětleným místem na komunikaci. Jednalo se o osvětlení přechodu pro chodce (resp. místa pro přecházení), jež se nachází v neosvětlené části komunikaci mezi dvěma obcemi v kraji Vysočina. Nevhodnost osvětlení spočívá ve vysokém rozdílu jasů (resp. osvětleností) v oblasti přechodu a mimo něj. Zrak řidiče projíždějícího touto oblastí nemá vlivem vysokého jasu čas na adaptaci na neosvětlenou část komunikace za přechodem a může tak snáze přehlédnout například chodce, který se pohybuje v komunikaci jen pár metrů za přechodem.

Rozdíl mezi osvětlením celého prostoru nebo jen samotného přechodu byl nejdříve subjektivně vyjádřen pomocí světelných simulací (rendering metodou raytracing). Následně byla zjištěna hodnota minimální osvětlenosti chodce, který se nachází na přechodu, jež byla porovnána s hodnotou osvětlenosti z výpočtu, při kterém byly data svítidla nahrazena daty s odpovídajícím typem zdroje a příkonem svítidla. Výpočtem bylo zjištěno, že osvětlenost chodce je dvojnásobkem minimální hodnoty, což poukazuje na předimenzování svítidel.

Pro nový návrh byla vybrána svítidla s nižším příkonem (resp. světelným tokem). Ta nejenže splnila podmínku minimální osvětlenosti chodce, ale hlavně díky jejich asymetrické optice byla zajištěna rovnoměrná osvětlenost chodce v celém rozsahu přecházení přechodu. Na závěr byla pomocí raytracingu porovnána celá soustava (osvětlení přechodu + okolí) a byly porovnány ekonomické parametry osvětlení přechodu.

V zájmu pravdy je třeba říci, že původní svítidla ve výpočtu nebyla totožná s instalovanými svítidly (viz 8.1) a distribuce světelného toku může být ve skutečnosti odlišná.



9. Kompletní výměna osvětlení v obci XZ

Tato kapitola slouží k porovnání ekonomických parametrů výměny svítidel v celé obci. Jedná se o nejmenovanou obec v Jihomoravském kraji, pro kterou byla v rámci veřejné soutěže vypracována nabídka. Jednalo se o potenciální výměnu celkem 264 svítidel.

Řešení bylo možné díky vypracovanému pasportu VO, který obec poskytla k vypracování výpočtu. Ten se skládá z položkového seznamu svítidel a jejich vlastností a z mapového podkladu ve formátu DWG (AutoCAD) se zaměřenými pozicemi těchto svítidel.

9.1 Řešení problematiky

Pomocí mapového podkladu byla obec rozdělena na 41 oblastí, jež sdružovaly komunikace stejné třídy osvětlení popř. oblasti s podobnou roztečí svítidel. Na základě rozdělení byl pro každou oblast vypracován světelně technický výpočet. Celkem se jedná asi o 190 stran výpočtů a velký tabulkový přehled vyměněných svítidel. Z důvodu velkého množství údajů je součástí této kapitoly PŘÍLOHA E, jež obsahuje pouze celkový přehled. Autor práce je zároveň autorem všech výpočtů i přehledu.

Výměnou svítidel by se podařilo snížit příkon VO z 20 388 W na 9 083 W (viz PŘÍLOHA E). V rámci zjednodušení neuvažujeme do původního příkonu předřadníky pro výbojkové zdroje, které jinak navyšují příkon svítidla cca o 10 %. Cena svítidel se pohybuje podle jeho druhu, proto je stanovena pouze celková suma za všechny svítidla, která činí přibližně 1 800 000 Kč.

Při ceně 2,50 Kč/kWh (C62d), průměrnému provozu denně 10,8 hodiny a rozdílu příkonů 11,305 kW by obec ročně ušetřila více než 111 tisíc korun. Při započtení pořizovací ceny svítidel vychází návratnost na 16 let. Ta by se ještě mohla snížit vzhledem k vysoké životnosti svítidel, kdy není zapotřebí častá výměna zdroje.

9.2 Závěr

Zde je velmi důležité si uvědomit, že jsme především navrhli celé osvětlení v obci podle požadavků norem a tím jsme výrazně přispěli k bezpečnosti v obci. Tento důvod by měl mít vždy zásadní postavení při diskuzi s vedením obce. Bohužel je v dnešní době pouze snahou snižovat náklady na úkor bezpečnosti. Takovým příkladem za všechny jsou výrobci, kteří slibují návratnost při výměně svítidel VO 3 roky, přičemž nahrazují 150 W výbojky za 25 W LED svítidla, která i přes vysokou světelnou účinnost nedokážou nahradit původní zdroj a často tak ještě osvětlenost po výměně poklesne. O tom jsme se přesvědčili i v kapitole 6, kdy výrobce pouze nahradil původní lampy, ale již se nezaobíral bezpečností, přičemž se na jeho stránkách můžeme dočíst, že tím obci ušetřil 73 % nákladů na energii. [20]



Závěr

Tato práce měla čtenáře seznámit s problematikou veřejného osvětlení a jeho návrhem pro bezpečnější provoz na pozemních komunikacích. První dvě kapitoly práce se zabývaly popisem světelně technických veličin a principem jejich měření. V kapitole třetí byly objasněny metodiky pro výpočet těchto parametrů, obohacené o ruční výpočet hodnoty osvětlenosti, přičemž byla porovnána časová náročnost a přesnost s výpočtem při užití softwaru DIALux. Stěžejní částí byla také další kapitola, jež objasnila proč je důležitá volba třídy osvětlení a jaké s sebou dané třídy nesou požadavky.

Protože byla práce koncipována především na hodnocení konkrétních míst na pozemních komunikacích, sloužila pátá kapitola jako úvod do hodnocení vybraných oblastí s krátkým popisem o každé z nich. Hodnocení bylo provedeno ve čtyřech místech, z nichž každé bylo koncipováno trochu jiným směrem a dohromady pokryly problémy jako nebezpečně osvětlená komunikace a její nový návrh, porovnání osvětlenosti po výměně svítidel, měření osvětlenosti luxmetrem, vliv barvy ve veřejném osvětlení, nebezpečně osvětlený přechod a opatření pro zvýšení bezpečnosti a v neposlední řadě také ekonomické parametry jako úspora a návratnost. Výsledky hodnocení jsou uvedeny v dílčích závěrech každé z kapitol (6. až 9.). V následujících řádcích je tedy pouze stručně shrňme.

V šesté kapitole bylo provedeno hodnocení stavu VO v konkrétní části obce. Pomocí měření osvětlenosti, fotodokumentace a světelně technických výpočtů v softwaru DIALux bylo zjištěno, že kontrolované osvětlení nejenže neplní požadavky normy, ale především je nebezpečné pro všechny účastníky provozu. Byl proto vypracován nový návrh dle požadavků normy, který byl porovnán s původním řešením.

V sedmé kapitole bylo provedeno zhodnocení výměny svítidel VO před budovou A1 FSI VUT v Brně, přičemž byla naměřena osvětlenost před i po výměně. Po zpracování dat bylo zjištěno, že se zvýšila rovnoměrnost osvětlení o 17 %. Z ekonomického hlediska se však jedná o nevhodnou výměnu s dlouhou návratností, která však byla autorem obhájena v dílčím závěru. Kapitulu zakončuje porovnání vlivu barvy světla původních vysokotlakých sodíkových výbojek a nahrazených LED.

V osmé kapitole byla s pomocí světelně technických výpočtů a světelných simulací s využitím raytracingu diskutována nevhodnost osvětlení konkrétního přechodu, který se nachází mezi dvěma obcemi, přičemž okolní komunikace osvětlena není (navzdory tomu, že norma takovou situaci zakazuje). Vzniká tak velký rozdíl mezi jasy na vozovce, jimž se oko řidiče nedokáže tak rychle přizpůsobit a hrozí srážka s chodcem, jež se pohybuje za přechodem. Nápravné opatření zahrnuje výměnu zdrojů (kvůli předimenzování) a osvětlení okolní komunikace.

V deváté kapitole bylo provedeno ekonomické zhodnocení výměny VO v celé obci, kdy se jednalo o nahrazení 264 svítidel (převážně výbojek) za LED svítidla. S pomocí pasportu VO a dat od původních svítidel byly vytvořeny světelně technické výpočty pro konkrétní oblast dané obce. Z rozdílu původního příkonu svítidel v obci, příkonu svítidel po nahrazení a pořizovací ceny byla stanovena návratnost investice, jež vyšla na 15 let.



Seznam symbolů a zkratk

Symboly

Φ	(lm)	světelný tok
K	(lm·W ⁻¹)	světelný účinek monochromatického záření
V	(-)	poměrná světelná účinnost monochromatického záření
λ	(nm)	vlnová délka
Ω	(sr)	prostorový úhel
A	(m ²)	plocha
N_{dA}	(-)	normála plošky dA
l	(m)	vzdálenost od zdroje světla
I	(cd)	svítivost
E	(lx)	osvětlenost
L	(cd·m ⁻²)	jas (povrchu komunikace)
M	(lm·m ⁻²)	světlení
ρ	(-)	střední činitel odrazu
ρ_{Lp}	(lx·cd ⁻¹ ·m ²)	jasový součinitel osvětlení
D	(m)	rozteč mezi kontrolními body v podélném směru
S	(m)	rozteč mezi dvěma svítidly
N	(-)	počet bodů ve výpočtovém poli
d	(m)	rozteč mezi kontrolními body v příčném směru
W	(m)	šířka jízdního pruhu
ε	(°)	úhel mezi paprskem a normálou
β	(°)	úhel dopadu světelného paprsku do bodu
H	(m)	montážní výška svítidla
r	(sr ⁻¹)	redukovaný součinitel jasu dopadajícího světelného paprsku
U	(-)	Rovnoměrnost (jasu či osvětlenosti)
TI	(%)	prahový přírůstek
L_v	(cd·m ⁻²)	závojevý jas
k_v	(-)	konstanta závislá na věku pozorovatele
SR	(-)	činitel osvětlení okolí
R_a	(-)	Index
θ	(°)	úhel mezi směrem pohledu a přímkou vedenou od pozorovatele ke středu k -tého svítidla

Zkratky

VO	veřejné osvětlení
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
MF	činitel údržby
LED	dioda emitující světlo
SON	vysokotlaká sodíková výbojka
POV-Ray	Persistence of Vision Ray-Tracer



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: Výběr tříd osvětlení*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [3] ČSN EN 13201-2. *Osvětlení pozemních komunikací - Část 2: Požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [4] ČSN EN 13201-2 ZMĚNA Z1. *Osvětlení pozemních komunikací - Část 2: Požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [5] ČSN EN 13201-3. *Osvětlení pozemních komunikací - Část 3: Výpočet*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [6] ČSN EN 13201-4. *Osvětlení pozemních komunikací - Část 4: Metody měření*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [7] *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací - kapitola 15: Osvětlení pozemních komunikací - dodatek č. 1*. In: Ministerstvo dopravy, 2013. Dostupné také z: <http://www.pjpk.cz/TKP-15.%20dodatek%20c.1.pdf>
- [8] HABEL, Jiří. Základy světelné techniky (3). *Světlo*. 2009, (1), 40-44.
- [9] HABEL, Jiří. Základy světelné techniky (3): Světelně technické veličiny (2. část). *Světlo*. 2009, (2), 52-57.
- [10] TESAŘ, Jiří. Veřejné osvětlení a jeho současný stav v České republice. *Deník veřejné správy* [online]. 2010 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.dvs.cz/clanek.asp?id=6437936>
- [11] SKÁLA, Jiří. Vliv kvality veřejného osvětlení na bezpečnost silničního provozu. *Deník veřejné správy* [online]. 2015 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://denik.obce.cz/clanek.asp?id=6685728>
- [12] Prostorový úhel 1 steradián [obrázek]. In: FotoRoman [online]. © 2012 Roman Pihan. [cit. 21.05.2016]. Dostupné z: http://www.fotoroman.cz/techniques3/light/rom_svetlo_1p_02.jpg
- [13] Digitální luxmetr CEM DT-8809 [obrázek]. In: ATP Instrumentation Ltd [online]. © 2016 ATP Instrumentation Ltd. [cit. 21.05.2016]. Dostupné z: <http://www.atp-instrumentation.co.uk/media/catalog/product/cache/1/thumbnail/5e06319eda06f020e43594a9c230972d/l/x/lx-8809a.jpg>



- [14] BAXANT, Petr. Vyhodnocování jasu pomocí digitální fotografie. *Společnost pro rozvoj veřejného osvětlení* [online]. 2009 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://files.srvo.webnode.cz/200000072-c3d3ec4cdc/Baxant_digit_foto_Brno.pdf
- [15] Ceník svítidel Ares. *Luci - světelné studio* [online]. 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <https://www.svitidla-luci.cz/inpage/ares-svitidla/>
- [16] *Veřejné osvětlení: Služba zákazníkům* [online]. E.ON, 2015 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/-a9825?field=data>
- [17] MAIXNER, Tomáš. Svítidla LED ve veřejném osvětlení – mýty a skutečnosti. *Světlo*. 2009, (5), 58-61.
- [18] Index podání barev svítidla Philips SON-T 70W. *Philips* [online]. 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://www.lighting.philips.com/main/prof/lamps/high-intensity-discharge-lamps/son-high-pressure-sodium/son-t/928152800035_EU/product
- [19] Index podání barev svítidla Ares MaxiFranco Power LED. *Ares* [online]. 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://www.aresill.net/code&cat=poletop&family=maxifranco&version=maxifranco_powerled-adj-slo&code=9724814/
- [20] MAIXNER, Tomáš. Osvětlení přechodu pro chodce. *Světlo*. 2008, (4), 14-15.
- [21] History of Street Lighting. *History of Lighting* [online]. 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.historyoflighting.net/electric-lighting-history/history-of-street-lighting/>
- [22] Data svítidel firmy Lamberga
- [23] Software DIALux 4.12



Seznam příloh

- [A] Světelně technický výpočet s původními parametry
- [B] Data pro výpočty v obci XY
- [C] Světelně technický výpočet s novými parametry
- [D] Tabulka vypočtených hodnot osvětlenosti chodce
- [E] Přehled vyměněných svítidel v obci XZ