

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Inteligentní budovy



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zvyšování kvality veřejného osvětlení v rámci Smart City

Smart city public lighting quality improvement

Vypracoval: Bc. Tomáš Vencovský

Vedoucí práce: Ing. Marek Bálský, Ph.D.

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vencovský** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **457083**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Zvyšování kvality veřejného osvětlení v rámci Smart City

Název diplomové práce anglicky:

Smart city public lighting quality improvement

Pokyny pro vypracování:

Posudte možné negativní vlivy veřejného osvětlení na okolní prostředí v důsledku změn jeho světelně technických parametrů při náhradě konvenčních osvětlovacích soustav s výbojovými světelnými zdroji osvětlovacími soustavami s LED svítidly. Pomocí počítačové simulace nejrozšířenějších osvětlovacích soustav ve vybrané aglomeraci určete podíl neužitečného světelného toku unikajícího do horního poloпростору a dopadajícího na terén mimo osvětlované komunikace nebo na fasády okolních budov. Na základě počítačových simulací a dostupných informací o instalovaných osvětlovacích soustavách ve vybrané aglomeraci určete světelný tok unikající do horního poloпростору z celé aglomerace. Posudte možnosti vyhodnocování a snižování negativních vlivů veřejného osvětlení s využitím řízení a regulace světelného toku moderních svítidel.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN P 38 0455 Osvětlení pozemních komunikací - Doplnující informace
- [2] EUR 29831 EN Revision of the EU Green Public Procurement Criteria for Road Lighting and traffic signals
- [3] J. Habel a kol., Světlo a osvětlování, Praha: FCC Public, 2013.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Marek Bálský, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **12.02.2021** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

Ing. Marek Bálský, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 20.5.2021

Tomáš Vencovský

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Marku Bálskému, Ph.D. za odborné rady, věcné připomínky a možnosti konzultací během zpracování této práce. Za poskytnuté konzultace děkuji také Ing. Petru Žákovi, Ph.D. Poděkování patří také Technologickým hlavního města Prahy, zejména pak Ing. Theodoru Terrichovi, za poskytnutá data o osvětlovacích soustavách.

Zvláštní poděkování patří mé rodině za neutichající podporu během celého studia.

Anotace

Diplomová práce se zabývá kvantifikací neúžitečného světla vyzařovaného svítidly z aglomerace Prahy 6. Teoretická část popisuje přístup předpisů a doporučení k otázce rušivého světla. Následující kapitoly popisují projevy rušivého světla a jejich možné vyhodnocení. Pohled je zaměřen na spektrální vlastnosti vyzařovaného světla. Práce se dále zabývá řízením a regulací venkovních osvětlovacích soustav. V praktické části je popsán pracovní postup, který byl využit pro kvantifikaci neúžitečného světla z aglomerace. V závěru jsou pak diskutovány výsledné hodnoty.

Klíčová slova

veřejné osvětlení, neúžitečné světlo, rušivé světlo, nevizuální účinky umělého světelného záření, náhradní teplota chromatičnosti, Dialux simulace

Annotation

Diploma thesis describes quantification of spill light emitted by luminaires from the city of Prague 6. The theoretical part talks about the approach of regulations and recommendations to the issue of obtrusive light. The obtrusive light and its possible evaluation is being discussed next. Point of view is mainly focused on spectral properties of emitted light. Furthermore, the diploma thesis deals with the possibilities to control and regulate the outdoor lighting systems. Practical part describes the work procedure, that is used to quantify spill light in the agglomeration. Within the summary the results and outcoming values are being discussed.

Key words

Public lighting, spill light, obtrusive light, non-visual effects of artificial light radiation, correlated colour temperature, Dialux simulation

Obsah

1. Úvod	9
2. Současné předpisy a doporučení v oblasti rušivého světla VO	10
2.1 České normativní požadavky	11
2.1.1 ČSN EN 13201–2	11
2.1.2 ČSN EN 12464–2	11
2.1.3 ČSN P 36 0455	13
3. Světelné zdroje	14
3.1 Světlo emitující diody	14
3.1.1 Bílá LED	14
3.2 Vysokotlaké výbojové zdroje	16
3.2.1 Halogenidové výbojky	16
3.2.2 Vysokotlaké sodíkové výbojky	17
3.3 Analýza parametrů světelných zdrojů	17
3.3.1 Měrný výkon LED v závislosti na T_n a R_a	18
4. Rušivé světlo	19
4.1 Jas oblohy	19
4.1.1 Měření jasu jasoměrem	19
4.1.2 Stanovení umělého jasu oblohy fotoaparátem	20
4.1.3 Stanovení umělého jasu oblohy CCD fotometrií	20
4.1.4 Stanovení umělého jasu oblohy s pomocí satelitních snímků	20
4.1.5 Stanovení umělého jasu oblohy pomocí digitálních jasových analyzátorů	20
4.1.6 Podíl světelného toku směřujícího do horního poloprostoru	20
4.2 Oslivé světlo	21
4.2.1 Hodnocení oslnění	21
4.3 Světelný přesah	22
4.3.1 Hodnocení světelného přesahu	22
5. Nevizuální účinky umělého světelného záření	23
5.1 Nervová soustava oka	23
5.1.1 Spektrální citlivost fotoreceptorů	23
5.2 Cirkadiánní cyklus	23
5.3 Modré světlo v souvislosti s náhradní teplotou chromatičnosti	25
5.4 Negativní dopady na rostlinná a zvířecí společenstva	27

6. Hodnocení náhradní teploty chromatičnosti	28
6.1 Prostorové charakteristiky T_n vybraných svítidel.....	28
6.1.1 Svítidlo Marut M G1 ME 5k0/740 (Elektrolumen).....	29
6.1.2 Svítidlo Marut M G1 ME 4k5/422 (Elektrolumen).....	31
6.1.3 Svítidlo Archilede HP BX38 (iGuzzini)	33
6.2 Vyhodnocení dat z měření spektrometru	35
6.3 Měření náhradní teploty chromatičnosti svítidel VO v terénu	36
7. Regulace světelného toku svítidel VO	37
7.1 Třídy osvětlení pozemních komunikací.....	37
7.2 Možnosti stmívání svítidel VO	37
7.3 Řízení adaptivního osvětlení v souvislosti s intenzitou dopravy.....	39
7.3.1 Režimové řízení.....	39
7.3.2 Dynamické řízení	39
7.4 Technické vybavení svítidel v souvislosti s regulací světelného toku	40
7.4.1 Regulace světelného toku	40
7.4.2 Předřadníky světelných zdrojů	41
7.4.3 Aplikace hromadného řízení osvětlovacích soustav.....	42
7.4.4 Rozhraní pro externí komunikační a senzorové moduly	42
8. Vyhodnocení neúčinného světelného toku osvětlovacích soustav.....	45
8.1 Pracovní postup	45
8.1.1 Členění zástavby Prahy 6	46
8.1.2 Pracovní podklady	47
8.2 Specifikace světelných míst	48
8.2.1 Svítidla	48
8.2.2 Světelné zdroje	50
8.2.3 Rozteče a výšky stožárů	50
8.3 Modely komunikací.....	51
8.3.1 Činitel odrazu.....	51
8.3.2 Výpočtové modely.....	52
8.3.3 Model příměstské krajiny	53
8.3.4 Model zahradního města.....	54
8.3.5 Model modernistického města	55
8.3.6 Model kompaktního města	56

8.4 Vyhodnocení	58
8.4.1 Příměstská krajina.....	58
8.4.2 Zahradní město.....	60
8.4.3 Modernistické město.....	61
8.4.4 Kompaktní město.....	62
8.4.5 Souhrnné vyhodnocení.....	64
Závěr	66
Použitá literatura.....	67
Seznam obrázků	70
Seznam tabulek	71
Seznam grafů.....	72
Seznam elektronických příloh	72
Použité symboly	73

1. Úvod

Již po několik let, dnes už spíše desítek let, se odborná veřejnost zabývá negativními vlivy venkovních osvětlovacích soustav a je více než jisté, že toto téma je stále současné a diskuze odborné veřejnosti jen tak neopustí.

Zřejmě prvním a hlavním iniciátorem této diskuze byli astronomové, pro které začalo být obtížné pozorovat některé objekty na noční obloze kvůli uměle zvyšujícímu se jasů oblohy. Ten je způsoben světelným tokem vyzářeným svítidly přímo do horního poloprostoru a světelným tokem, který je odražen od terénu a okolních objektů. V dnešní době jsou negativní vlivy venkovních osvětlovacích soustav probírány a zkoumány v mnoha dalších oborech lidského vědění, zejména biologie a fyziologie. Co více, tématem nikdy netknutý člověk má najednou ve svém mobilním zařízení, či notebooku něco jako noční režim, nebo filtr modrého světla. Z modrého světla se tak možná stává nechtěný fenomén, který však může k tématu osvětlování přitáhnout i značnou část laické veřejnosti a zvýší tak povědomí o vlivech světla na lidský organismus.

Negativní účinky venkovních osvětlovacích soustav jsou širokou veřejností často popisovány jako světelné znečištění. V odborných kruzích je využíván pojem *rušivé světlo*, jenž představuje rozptýlené elektromagnetické záření generované umělými světelnými zdroji v oblasti viditelného spektra. Toto světlo způsobuje rušení (tj. nepohodlí, snížení viditelnosti, negativní ovlivnění přírodních procesů) v důsledku jeho množství, směru či spektrálního složení. Před příchodem světelných diod do oblasti venkovního osvětlování byla pozornost odborníků zaměřena především na nastavení vhodných omezení pro první dvě zmíněné formy rušivého světla, tj. kvantitativní a směrové. Ty jsou v technických normách pro veřejné osvětlení (dále jen VO) a ostatních doporučeních zaneseny. Spektrální formu rušivého světla technické normy zatím řeší vcelku okrajově.

Diplomová práce je rozdělena na dvě části, teoretickou a praktickou. V teoretické části práce je uveden přístup legislativy k otázce rušivého světla. Pozornost je zde věnována metodám pro vyhodnocení rušivého světla a zejména se zaměřuji na problematiku spojenou s příchodem světelných diod do veřejného osvětlení.

V praktické části této práce se zabírám vyhodnocením neužitečného světelného toku v rámci aglomerace městské části Prahy 6. Vyhodnocení je postaveno na počítačových simulacích v programu Dialux, ve kterém jsou vytvořeny zjednodušené modely komunikací. Výsledkem simulací bude kvantifikace světelného toku, jenž jde ze svítidel mimo osvětlované komunikace a celkového světelného toku, přímého i nepřímého, který je vyzářen do horního poloprostoru.

2. Současné předpisy a doporučení v oblasti rušivého světla VO

Základními dokumenty, které se zabývají účinky rušivého světla a stanovují metody pro jejich omezení jsou publikace Mezinárodní komise pro osvětlování (dále jen CIE), především [1] a [2]. Velká část technických norem, které se vydávají na evropské¹ (CEN) i mezinárodní úrovni (ISO) vychází právě dokumentů CIE.

Rušivému světlu se okrajově věnuje i Nařízení Komise (ES) č. 245/2009, které je primárně zaměřené na ekodesign výbojových světelných zdrojů, jejich předřadníků a svítidel s cílem snížit dopady na životní prostředí, snížit energetickou náročnost osvětlovacích soustav potažmo snížit produkci skleníkových plynů (zvýšení účinnosti předřadných systémů a světelných zdrojů, snížení množství rtuti ve světelných zdrojích apod.). Příloha VII tohoto dokumentu se věnuje veřejnému osvětlení, kde jsou uvedeny například i orientační hodnoty maximálního podílu světelného toku, který je vyzářován nad vodorovnou rovinu (*ULOR*) u jednotlivých silničních tříd pro svítidla určená k veřejnému osvětlování (převzato do ČSN P 36 0455).

V současné právní úpravě České republiky neexistuje ucelené komplexní pojednání o negativních vlivech rušivého světla, které by je významně redukovalo a snižovalo jeho dopady. Strohé zmínky o obtěžování světelným zářením existují pouze v dílčích zákonech. Jde například o zákon č. 183/2006, o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon). V § 137 tohoto zákona je umožněna pravomoc stavebního úřadu „*nařídít vlastníku stavby, stavebního pozemku nebo zastavěného stavebního pozemku nezbytné úpravy, jimiž se docílí, aby užívání stavby nebo jejího zařízení neohrožovalo životní prostředí, nepřiměřeně neobtěžovalo její uživatele a okolí ... světelným zářením*“². Dokument [3] nicméně uvádí, že obtěžující světelné záření není v legislativě nijak ošetřené. To znamená, že chybí právní předpis, který by určil, jaký správní orgán chrání tento veřejný zájem a jaké jsou limitní hodnoty pro rušivé světlo. Teprve až budou naplněny zmíněné právní úpravy, tak lze uplatnit možnosti stavebního zákona a jeho prováděcích předpisů [3].

Velkým zlomem posledních let se stalo přijetí problematiky rušivého světla do kompetencí Ministerstva životního prostředí. Byla stanovena mezirezortní pracovní skupina pro světelné znečištění, kde se jednotlivé rezorty (zejména zapojená ministerstva) zavázaly spolupracovat při vytvoření legislativních úprav s cílem omezit účinky rušivého světla. Dosavadním výsledkem je například i vytvořená příručka pro obce, která poskytuje provozovatelům osvětlovacích soustav (případně potencionálním investorům) aktuální informace a doporučení pro správný výběr veřejného osvětlení šetrného k nočnímu prostředí. Je velmi důležité, že se vědecké poznatky především z oblasti spektrálního složení emitovaného záření (avšak nejen z této) zapracovali do metodických pokynů dotačních programů.

¹ Česká republika je členským státem Evropského normalizačního výboru (CEN) a je povinna evropské normy přijímat.

² Zdroj: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-183?text=183%2F2006>

2.1 České normativní požadavky

V českých technických normách se tematikou rušivého světla zabývají dokumenty ČSN EN 13201–2 „Osvětlování pozemních komunikací – Část 2: Požadavky“, dále pak ČSN EN 12193 „Světlo a osvětlení – Osvětlení sportovišť“, ČSN EN 12464–2 „Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 2: Venkovní pracovní prostory“ a také ČSN P 36 0455 „Osvětlení pozemních komunikací – Doplňující informace“.

2.1.1 ČSN EN 13201–2

Norma stanovuje požadavky tříd osvětlení pozemních komunikací. Na světlo distribuované mimo relevantní oblasti reaguje kapitola 7 a příloha A. Norma uvádí, že je potřeba se věnovat a dodržovat omezení světla vyzařovaného do směrů, kde není potřeba nebo není žádoucí:

- venkovské nebo příměstské oblasti, kde osvětlovací soustava působí rušivě při dálkových pohledech přes otevřenou krajinu. Doporučuje použití plně cloněných svítidel tříd svítivosti G*4, G*5 nebo G*6 [4].
- světlo pronikající do nemovitostí. Vhodný výběr optického systému svítidla [4].
- světlo vyzařované nad vodorovnou hladinu, které při rozptylu v atmosféře narušuje přirozený pohled na hvězdy a ruší astronomická pozorování [4].
- zvýšení úrovně jasu v přírodním prostředí, což může ovlivnit ekologické funkce [4].

V příloze A.1 jsou stanoveny provozní třídy svítivosti pro snížení oslnění a regulaci rušivého světla.

Příloha A.3 předkládá základní informace o použití provozních tříd svítivosti pro dopravní trasy, osvětlení mostů, pozemní komunikace v obytných oblastech a v konfliktních oblastech.

V příloze A.4 norma sděluje, aby bylo zabráněno instalování svítidel do větší výšky, než je zástavba a vegetace podél pozemní komunikace. Pro snížení umělého jasu oblohy doporučuje použití svítidel s velmi malým nebo nulovým podílem světelného toku do horního poloprostoru. Dále poukazuje na snížení úrovně osvětlení v určitých časových úsecích.

2.1.2 ČSN EN 12464–2

Pro ochranu a omezení rušivého světla tato norma poskytuje konkrétní limitní hodnoty, a to pro následující zóny životního prostředí³ :

E1: obzvláště tmavé oblasti (národní parky, chráněná území)

E2: málo světlé oblasti (průmyslové a obytné venkovské oblasti)

E3: středně světlé oblasti (průmyslové a obytná předměstí)

E4: velmi světlé oblasti (městská centra a obchodní zóny)

³ Norma přebírá požadavky a doporučení z dokumentů CIE [1] a [2], jak bylo naznačeno v úvodu této práce.

Limitní hodnoty pro rušivé účinky venkovních osvětlovacích soustav jsou uvedeny v Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Limitní hodnoty rušivého světla pro venkovní osvětlovací soustavy [5]

Zóna životního prostředí	Světlo na objektech		Svitivost svítidla		Podíl světelného toku svítidel do horního poloprostoru	Jas	
	E_v (lx)		I (cd)		R_{UL} (%)	L_b (cd·m ⁻²)	L_s (cd·m ⁻²)
	mimo dobu nočního klidu	v době nočního klidu	mimo dobu nočního klidu	v době nočního klidu		fasády budov	znaky
E1	2	0	2 500	0	0	0	50
E2	5	1	7 500	500	5	5	400
E3	10	2	10 000	1 000	15	10	800
E4	25	5	25 000	2 500	25	25	1 000
kde							
E_v (lx)	nejvyšší hodnota svislé osvětlenosti na objektech						
I (cd)	svitivost každého zdroje světla v potencionálně rušivém směru						
R_{UL} (%)	poměrná část světelného toku svítidla (svítidel) vyzařovaného nad horizont v jeho (jejich) pracovní poloze						
L_b (cd·m ⁻²)	největší průměrný jas fasády budovy						
L_s (cd·m ⁻²)	největší průměrný jas znaků; jedná se o informační a reklamní znaky						

Dále technická norma přikládá informace a maximální hodnoty prahového přírůstku pro uživatele dopravních komunikací. V současné době v českých normách neexistuje žádná oficiální metodika pro zatřídění osvětlované oblasti do správné environmentální zóny⁴. To podle mého názoru ztěžuje uvedení těchto požadavků do praxe. V této normě chybí důležitá pasáž o vzdálenostech mezi jednotlivými environmentálními zónami, která je uvedena v dokumentu [1] a je důležitým podkladem pro zatřídění oblasti při projekci.

Je také na pováženu, zda nejsou omezení v Tab 2.1 příliš benevolentní. Například osvětlenost okna domu v obytné oblasti zóny E4 mimo dobu nočního klidu až 25 lx. V ČR je doba nočního klidu stanovena zákonem č. 258/2000, o ochraně veřejného zdraví, od 22:00 do 6:00. Doba, po kterou může být objekt rušen osvětleností 25 lx je především v zimním období značná.

Velmi podobné požadavky pro omezení rušivého světla předkládá i norma ČSN EN 12193. Navíc jsou zde oproti ČSN EN 12464–2 požadavky i na náhradní teplotu chromatičnosti⁵, která by se měla pohybovat v rozmezí od 5 000 K do 6 000 K. V případě sportovišť není zřejmě úplně vhodné hodnoty T_n snižovat (s ohledem na komfort sportovců), o to větší by měla být kladena pozornost na omezení rušivých účinků, a to i s ohledem na to, že se jedná většinou o vysoce výkonné světlometry na vysokých stožárech.

⁴ Klasifikací oblasti do environmentální zóny podle požadavků uvedené normy se věnuje například tato akademická práce: NOVÁK, Tomáš, ZÁVADA a SOKANSKÝ. Classification of environmental zones in the Czech Republic [online]. 18.11.2013 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1177/1477153513512500>

⁵ Pro popis barvy světla zdrojů, jejichž křivka spektrálního složení vykazuje prudké změny (výrazná pásma), využíváme pojem náhradní teplota chromatičnosti T_n (K).

2.1.3 ČSN P 36 0455

Pro osvětlování pozemních komunikací jsou v této normě zaneseny požadavky na maximální horní účinnost svítidla jeho v návrhové poloze, která nesmí překročit hodnoty uvedené v Tab. 2.2 [7].

Tab. 2.2: Omezení podílu světelného toku směřujícího do horního poloprostoru [7]

Třída osvětlení	Světelný tok zdroje Φ (klm)	ULOR(%)
M1 až M6	libovolný	3
C0 až C5	$12 \leq \Phi$	5
	$8,5 \leq \Phi < 12$	10
P1 až P6	$3,3 \leq \Phi < 8,5$	15
	$\Phi < 3,3$	20

Jedinou zmínku o chromatičnosti vyzařovaného světla svítidel pro osvětlení pozemních komunikací podává právě tato norma. Dokument uvádí, že se hodnota T_n volí podle charakteru pozemní komunikace, přičemž stanovuje tři mezní hodnoty:

- nejvýše 3 000 K pro pozemní komunikace s nízkou intenzitou dopravy, prostory s převažujícím pohybem pěších, obchodní a společenská centra, parky apod. [7].
- nevíše 4 000 K pro ostatní komunikace v zastavěných územích obcí [7].
- nejvýše 5 000 K mimo zastavěná území obcí s vysokou intenzitou motorové dopravy [7].

Podle mého názoru je správné, že se o chromatičnosti světla zmiňuje alespoň tento dokument a poskytuje základní kategorizaci. Nejsm si ale jist, zda je tato forma vhodná, a to i s ohledem na dostupnost dat intenzity dopravy (viz kapitola 7.3.1). Možná by bylo lepší, kdyby ke každé kategorii, resp. třídě, pozemní komunikace (které jsou stanoveny zákonem o pozemních komunikacích č. 13/1997 Sb.) byla přiřazena buď konkrétní hodnota T_n nebo nejvyšší dovolená, jak je stanoveno výše. Pro druhý jmenovaný případ by mohli být specifikovány možnosti řízení T_n . Pro další závěry je však nutné se více zabírat bezpečnostní stránkou tématu. Například skoková změna hodnoty T_n řízených svítidel se nejev jako zcela vhodná, vzhledem k bezpečnosti účastníků provozu na pozemních komunikacích. Nabízí se také otázka řešení na sebe navazujících komunikací, které by měli mít odlišné hodnoty T_n .

V metodických pokynech programu EFEKT pro čerpání dotací je tlak na co nejvyšší snížení hodnoty T_n ($T_n \leq 2\,700$) napříč všemi třídami osvětlení. Maximální hodnota T_n je stanovena na 4 000 K pro třídy osvětlení M1 a M2.

Technologie Hlavního města Prahy (dále jen THMP) mají v dokumentu „Technický standard pražského LED svítidla VO“ uvedenou jako standardní hodnotu $T_n = 3\,000$ K (vyjma přisvětlení přechodů pro chodce a dalších specifických případů). Pro osvětlení frekventovaných rychlostních komunikací s důrazem na bezpečnost dopravy je vyhrazena možnost využít $T_n = 4\,000$ K. V témže dokumentu je také požadavek na podíl světelného toku vyzařovaného svítidlem do horního poloprostoru v jeho návrhové poloze, a to $ULOR = 0\%$ [23].

3. Světelné zdroje

Ve třetí kapitole jsou uvedeny světelné zdroje využívané v oblasti VO. Pohled je více zaměřen na světelné diody, jejich technologii, přednosti a problémy na které narážejí. Je věnována pozornost dominantním vysokotlakým výbojovým zdrojům.

3.1 Světlo emitující diody

Světlo emitující dioda je polovodičová součástka obsahující PN přechod. Je založena na principu elektroluminiscence. Při buzení PN přechodu, orientovaném v propustném směru, elektrickým proudem dochází k emitování optického záření.

Z hlediska konstrukčního provedení LED součástky je nejstarším provedením tzv. Dual In-Line (DIP). Toto provedení se vzhledem k nízkým hodnotám světelného toku využívá především v indikačních a signalizačních prvcích. Dalším provedením je verze SMD (Surface Mounted Device), kdy je LED součástka určena pro povrchovou montáž na desku plošných spojů. LED součástka je v provedení SMD tvořena LED čipem, který je nakontaktován na podkladovou desku (substrát) z kovu či keramiky a následně zalit do plastového pouzdra. Každá LED součástka osazená na desce plošného spoje má své vlastní napájení, lze ji tedy separátně řídit. Substrát disponuje vysokou tepelnou vodivostí, a především větším povrchem (oproti LED čipu). Zlepšený odvod Jouleova tepla od čipu umožňuje dosahování vyšších hodnot světelného toku. Pro vytvoření světelné diody s nastavitelnými spektrálními vlastnostmi vyzařovaného světla může mít součástka v tomto provedení až tři čipy v jednom pouzdře. Každý čip má své samostatné napájení. Součástka tedy může mít více než dva kontakty (až šest). Z architektury konstrukčně vychází i provedení COB (Chip on Board). Rovněž se tedy jedná o povrchovou montáž LED čipů na desku plošných spojů. Oproti SMD jsou v jedné součástce desítky až stovky čipů. Rozdíl oproti SMD je i v zapojení napájení. U COB jsou všechny čipy zapojeny v jednom obvodu se dvěma připojovacími kontakty [31].

3.1.1 Bílá LED

Vyzařované spektrum LED čipu je charakteristické úzkým rozsahem vlnových délek, jde o téměř čisté spektrální barvy (modrá, červená, zelená apod.). Avšak většina svítidel, která se používá ve VO, vyzařuje bílé světlo. Toto tzv. plnospektrální optické záření lze získat třemi způsoby [15].

První z nich, tzv. pc-LED (phosphor converted LED), využívá modré LED a luminoforu, který doplňuje spektrum modré o oblast spektra zelené a červené barvy. Typem luminoforu ovlivňujeme barevný tón bílého světla. Další způsob, tzv. hy-LED (hybrid LED), opět využívá modré LED a luminoforu. V tomto případě se pomocí luminoforu doplní pouze zelená oblast spektra. Oblast červeného spektra se doplní červenou LED. Poslední způsob, tzv. cm-LED (color mixed LED), skládá spektrum pomocí barev jednotlivých LED čipů [15] [16].

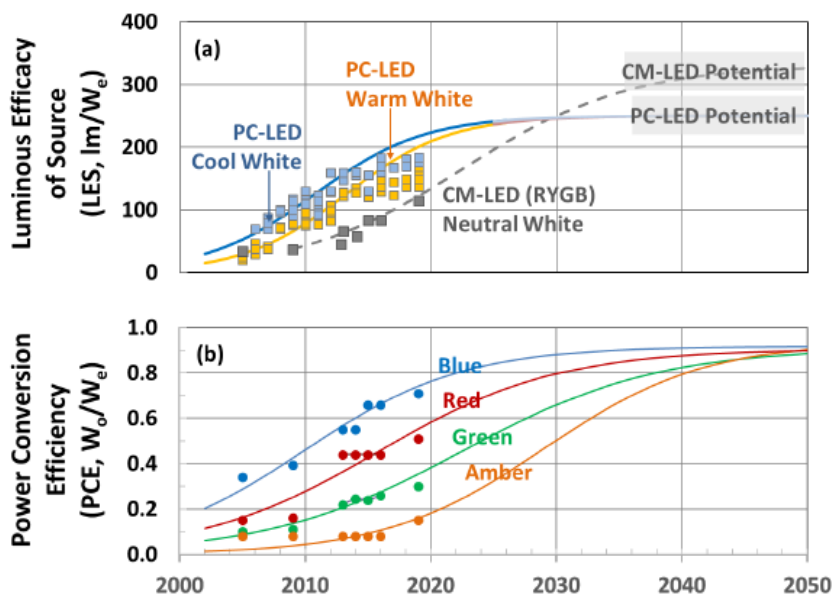
Pc-LED

Architektura pc-LED je od svého vzniku dominantním způsobem pro získávání bílého světla. Disponuje třemi hlavními výhodami. Je jednoduchá (pouze jeden LED čip „k řízení“), teplotně robustní (InGaN spolu s luminoforem mohou pracovat i při relativně vysokých teplotách) a vykazuje stabilitu barvy v průběhu života.

Na Obr. 3.1 a) je znázorněn téměř patnáctiletý vývoj měrného výkonu pc-LED od roku 2005 do roku 2019. Studený tón bílé barvy (5 700 K) je zobrazen modře, teplý tón (3 000 – 3 500 K) oranžově.

Na obrázku je rovněž uveden další předpokládaný vývoj těchto provedení. Lze vidět, že se měrný výkon pc-LED po sledovanou dobu zhruba zčtyřnásobil. Mezi oběma variantami je také zřetelný rozdíl v měrném výkonu [16] [17].

Šedivé rámečky na Obr 3.1 a) představují potenciální maxima měrných výkonů, kterých architektury mohou dosáhnout. Provedení pc-LED má své predikované maximum okolo $250 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ [16].



Obr. 3.1: a) Měrné výkony komerčních LED součástek; b) Relativní účinnosti konverze elektrické energie na zářivou [17]

Hy-LED

Jak již bylo zmíněno, architektura hybrid LED sestává z modré LED, luminoforu a červené LED. Toto provedení má oproti předchozímu řešení významnou výhodu. Červená oblast spektra není zatížena ztrátou energie v podobě Stokesova posunu (ztráta části energie při změnách vlnové délky pomocí luminoforu) jako je tomu u pc-LED. Potenciální maximum hy-LED se pohybuje okolo $280 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$. Mezi nevýhody tohoto typu se řadí vliv rozdílné technologie modré a červené LED. U červené LED (AlInGaP) klesá účinnost přeměny elektrické energie na zářivou se zvyšující se teplotou mnohem více než u modré LED (InGaN). Jejich velmi odlišné teplotní chování vyžaduje řídicí systém, aby byl zachován konzistentní barevný tón vyzařovaného světla. To zvyšuje cenu a komplexitu prvku [16].

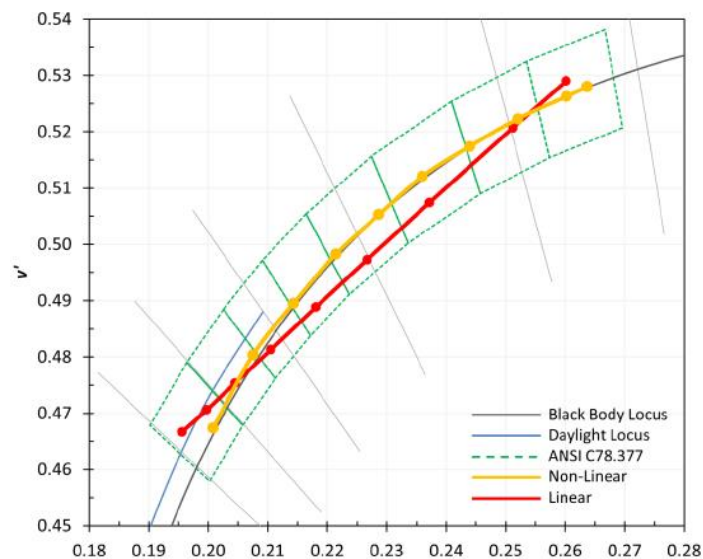
Cm-LED

Provedení, ve kterém LED součástka obsahuje více barevných LED čipů (RGB, RGBA nebo RGBYA). RGBA oproti řešení RGB má vyšší index podání barev a je flexibilnější při ladění teplot chromatičnosti. Rozdíl ve zmíněných parametrech má provedení RYGBA oproti RGBA zanedbatelný. RGBA LED nepotřebuje k doplnění chybějící části spektra luminofor, nejsou zde tedy ani ztráty energie s tím spojené. Potenciální měrný výkon RGBA cm-LED se pohybuje až okolo $325 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ (viz Obr. 3.1 a), což je zdaleka nejvíce ze všech provedení. Nicméně měrný výkon je zde limitován účinnostmi samotných LED čipů (konverze elektrické energie na zářivou energii, viz Obr. 3.1 b). Nízké účinnosti zelené a jantarové LED a teplotní stabilita červené a jantarové LED jsou pro toto provedení v současné době velmi limitující. Další nevýhodou je nutnost samostatného řízení jednotlivých čipů [16] [17].

Řízení T_n

K řízení náhradní teploty chromatičnosti se v současné době využívá převážně technologie pc-LED. Cm-LED nabízí sice přímočařejší využití, nicméně tato technologie naráží na již zmíněné problémy. V provedení RGBA by se pak navíc jednalo o separátní řízení čtyř čipů jedné součástky. To zvyšuje nároky na řídicí hardware, software, a tedy i na výslednou cenu.

Ladění bílé barvy emitovaného světla pomocí pc-LED využívají dva obecné přístupy: lineární a nelineární (viz Obr. 3.2). Lineární metoda využívá dvou samostatně řízených pc-LED, jednu teple bílou (např. $T_n = 2\,700\text{ K}$) a jednu studeně bílou (např. $T_n = 5\,000\text{ K}$). Bílá barva emitovaného světla se následně mixuje regulací světelných toků jednotlivých LED. V diagramu teplot chromatičnosti se výsledná barva světla pohybuje po přímce mezi dvěma hodnotami T_n , které jsou dány použitými pc-LED. Čím větší rozdíl teplot chromatičnosti základních LED, tím větší odchylka od hodnot Planckova černého tělesa. Při použití tří nebo více pc-LED se lze více přiblížit teplotě černého zářiče (nelineární přístup) [17].



Obr. 3.2: Ukázka lineárního a nelineárního ladění bílé barvy [17]

3.2 Vysokotlaké výbojové zdroje

3.2.1 Halogenidové výbojky

Jedná se o vysokotlakou výbojku, ve které světlo vzniká převážně zářením par kovů (např. rtuť), případně vzácných plynů (např. xenon) a produktů štěpení halogenidů (nejčastěji jodidy, či bromidy). Využití dalších chemických prvků nebo sloučenin, jejichž záření vhodně doplňuje čárové spektrum rtuti, se v dnešní době jeví jako velmi účinné a využívané. Správným výběrem prvků a jejich kombinací lze dostat zdroj bílého světla s širokým sortimentem náhradních teplot chromatičnosti [9].

Index podání barev se u halogenidových výbojek pohybuje nad hodnotou 80 (pro T_n 3 000 K až 4 200 K) a nad hodnotou 90 pro chladnější odstíny bílé. Příkony se pohybují od velmi nízkých 15 W až po 400 W. „Některé typy halogenidových výbojek jsou konstruovány pro předřadníky určené pro vysokotlaké sodíkové výbojky“ [9]. Tento fakt umožňuje jednoduchou záměnu světelného zdroje vyúsťující v lepší barevné podání bez nutnosti výměny celého svítidla [9].

Velmi široké spektrum možností provedení se přenáší do širokého pásma možností využití – dopravní tepny, náměstí, křižovatky, pěší zóny apod. Vývoj těchto zdrojů stále pokračuje, velmi perspektivní se jeví možnost regulace světelného toku i pod 50 % z maximální hodnoty (nyní cca 70 %) i při zachování spektrálních vlastností [9].

„Teoretické možnosti halogenidových výbojek z hlediska měrného výkonu při zachování velmi dobré barvy světla jsou totiž v porovnání se současným stavem více než dvojnásobně vyšší“ [9].

3.2.2 Vysokotlaké sodíkové výbojky

„Vysokotlaké sodíkové výbojky jsou světelné zdroje, v nichž je světlo vyzařováno hlavně sodíkovými parami s provozním parciálním tlakem v rozmezí 3 kPa až 60 kPa“ [9].

Standardní sortiment výbojek, využívaný v oblasti VO, sestává z řad příkonu od 50 W až po zhruba 250 W, náhradních teplot chromatičnosti v rozsahu 2 000 K až 2 500 K a indexu podání barev v rozmezí 20 až 25. Speciální typy dosahují hodnot R_a vyšších než 85 [9].

Zpřísňující se ekologické požadavky kladou za cíl vyvíjet výbojky s co nejnižším množstvím rtuti. U části výrobců se již objevily varianty bez rtuti, lze se očekávat, že další výrobci budou přibývat. Výhodou je zvládnutá technologie hromadné výroby a velký počet výrobců. Z toho plyne nízká cena základního sortimentu [9].

S rozvojem halogenidových výbojek s keramickým hořákem, které poskytují vyšší měrné výkony při stejném indexu R_a , jsou vysokotlaké sodíkové výbojky částečně nahrazovány. A to především z míst s vysokým požadavkem na jakost podání barev (např. historická centra měst, konfliktní oblasti) [9].

3.3 Analýza parametrů světelných zdrojů

Jedním z podstatných parametrů světelného zdroje je jeho měrný výkon. Ten hraje významnou roli v ekonomickém hledisku osvětlovací soustavy. Výsledky z následující analýzy dokládají, že světelné diody v hodnotě měrného výkonu překonaly konvenční světelné zdroje využívané v oblasti VO.

V této kapitole bude pohled také zaměřen na souvislost měrného výkonu světelných diod s hodnotou náhradní teploty chromatičnosti, jejíž hodnoty ve VO jsou nejen mezi odbornou veřejností velmi diskutované.

V Tab. 3.1 jsou uvedeny hodnoty měrného výkonu vysoce výkonných světelných diod (HP LED), vysokotlakých sodíkových a halogenidových výbojek. Hodnoty z roku 2010 jsou převzaty z publikace [9]. Hodnoty z roku 2020 pochází z mé analýzy. Je důležité podotknout, že jsem se zaměřil na vybrané spektrum zdrojů (typ, příkon, T_n , R_a). Získané hodnoty z technických zpráv od výrobců tak nutně nemusí reprezentovat konkrétní zdroj, jehož oblast využití je daleko širší.

Tab. 3.1: Porovnání měrných výkonů, rok 2010 a 2020 [9]

Typ zdroje	Měrný výkon (lm·W ⁻¹) k roku 2010	Měrný výkon (lm·W ⁻¹) k roku 2020
Vysokotlaká sodíková výbojka	70 - 150	70 - 150*
Halogenidová výbojka	50 - 130	50 - 130*
HP LED	60 - 160	105 - 200

*Jelikož mnou dohledané hodnoty měrného výkonu pro konvenční světelné zdroje ležely v intervalu měrného výkonu k roku 2010, jsou tyto hodnoty uvedeny i pro rok 2020.

Světelné diody svůj predikovaný růst potvrzují. Hodnoty se za deset let zvýšili zhruba o $40 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ na $200 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$. V Tab. 3.2 jsou uvedeny parametry světelných zdrojů, které byly zahrnuty do analýzy.

Tab. 3.2: Parametry světelných zdrojů zahrnutých do analýzy

Typ zdroje	Počet vzorků (ks)	Příkon		Světelný tok		Index podání barev		Teplota chromatičnosti	
		P_{min} (W)	P_{max} (W)	Φ_{min} (lm)	Φ_{max} (lm)	$R_{a,min}$ (-)	$R_{a,max}$ (-)	$T_{n,min}$ (K)	$T_{n,max}$ (K)
Vysokotlaká sodíková výbojka	65	70,0	250,0	5 600	28 500	20	25	1 900	2 100
Vysokotlaká halogenidová výbojka	39	60,0	380,0	4 900	36 000	57	95	2 800	6 000
HP LED	103	0,6	11,8	81	1 830	70	80	3 000	5 000

3.3.1 Měrný výkon LED v závislosti na T_n a R_a

Pro provedení SMD HP LED byla většina dat shromážděna tak, že pro jeden typ LED součástky jsou dvě hodnoty T_n (3 000 K a 4 000 K) a pro každou T_n pak dvě hodnoty R_a (70 a 80). Hodnoty měrného výkonu se při $T_n = 4 000 \text{ K}$ a $T_n = 5 000 \text{ K}$ nelišily, proto nebyla data pro $T_n = 5 000 \text{ K}$ dále uvažována.

Z celkové analýzy vyplynulo, že při jedné hodnotě T_n (např. 3 000 K) a odlišných hodnotách R_a (70 či 80) je měrný výkon vyšší s nižším indexem R_a (rozdíl až o $44 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$). Opačně, při stejném indexu R_a a odlišné T_n je měrný výkon vyšší s vyšší T_n (rozdíl až o $22 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$). Vzhledem k velmi rozsáhlému spektru nabízených LED světelných zdrojů je při výběru nutné zohlednit fakt, že je hodnota měrného výkonu ovlivněna zmíněnými kvalitativními parametry.

Technické normy se v současné době požadavkům na spektrální složení věnují spíše okrajově (viz kapitola 2.1.3). První LED svítidla ve veřejném osvětlení byla osazena světelnými diodami s neutrálně až chladně bílou barvou světla ($4 000 \text{ K} < T_n$). Ty měly, a stále mají, vyšší měrný výkon než teple bílé světelné diody a byly tak schopny konkurovat vysokotlaké sodíkové výbojce. V dnešní době i teple bílé LED dosahují vyšších měrných výkonů než vysokotlaké sodíkové výbojky (viz text výše a Obr. 3.1). Pro snížení vlivu modré složky světla, která je zmiňována v souvislosti s narušováním přirozených biorytmů člověka (dále v kapitole 5) je důležité nehlédět pouze na měrný výkon, a tedy potenciální úspory energie, ale především se zabývat požadavky na spektrální vlastnosti vyzařovaného světla [18].

4. Rušivé světlo

Jak již bylo řečeno v úvodu této práce, rušivé světlo způsobuje rušení v důsledku jeho množství, směru a spektrálního složení. Z hlediska vlivu rušivého světla na noční prostředí a na proces vidění jej můžeme kategorizovat do následujících skupin:

- zvýšený jas noční oblohy
- oslnivé světlo
- světelný přesah
- nevizuální účinky světelného záření způsobené jeho spektrálním složením (kapitola 5)
- sekundárně lze zmínit i nevhodné využití energie.

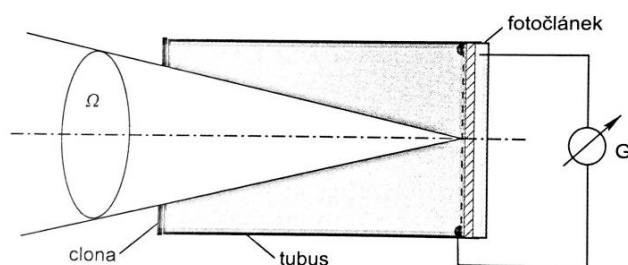
4.1 Jas oblohy

Příčinou zvýšeného jasu oblohy je světelný tok vyzařovaný z umělých světelných zdrojů venkovního osvětlení přímo do horního poloprostoru a sekundárně také světelný tok odražený od okolních povrchů. Takto vzniklý tok se šíří atmosférou. Podstatnou roli při šíření takto vzniklého světelného toku zde hraje chemické složení atmosféry – molekuly plynů, částice prachu nebo aerosoly. Od těchto částic se tok dále odráží, rovněž jimi částečně projde a pohltí se v nich. Hlavní roli zde hraje odražená složka, která je dále rozptylována. Vzájemným působením světla a okolního prostředí se zvyšuje jas oblohy a klesá tak kontrast mezi jasy objektů na obloze a jasnem oblohy, čímž dochází ke snížení pozorovatelnosti kosmických objektů na obloze a současně se tak snižuje počet velmi tmavých oblastí na Zemi [8].

Velikost uměle zvýšeného jasu oblohy tedy závisí na množství světla vyzářeného na oblohu, na atmosférických podmínkách (oblačnost, mlha, množství prachových částic apod.) a také na směru pozorování oblohy. Poslední dvě podmínky je nutné při měření zohlednit. Vyhodnotit vliv umělého osvětlení na noční oblohu lze následujícími způsoby (uvedeny jsou pouze základní principy).

4.1.1 Měření jasu jasoměrem

Princip objektivního jasoměru je založen na měření normálové osvětlenosti E_n fotočlánkem v prostorovém úhlu Ω , ve kterém dopadají světelné paprsky. Prostorový úhel je vymezen tubusem a clonou kruhového otvoru (viz Obr. 4.1.). Při měření jasu jasoměrem je důležité mít na paměti, že přístroj vyhodnocuje střední hodnotu jasu plochy, která je vymezena clonou přístroje. Jde o jedinou přímou metodu měření jasu oblohy [9] [20].



Obr. 4.1: Princip objektivního jasoměru [9]

4.1.2 Stanovení umělého jasu oblohy fotoaparátem

Metoda využívající fotoaparát s klasickým inverzním filmem, kdy je fotografována oblast nadhlavníku. V dokumentu [1] je dán standard k nastavení klasického fotoaparátu pro možnost porovnávání jednotlivých výsledků. Ze vztahu mezi optickou hustotou obrazu pozadí a drahami hvězd známých hvězdných velikostí lze posuzovat jas oblohy [21].

4.1.3 Stanovení umělého jasu oblohy CCD fotometrií

Jedná se o astronomickou metodu, při které jsou určovány jasy hvězd a dalších vesmírných objektů. Jas pozadí je vedlejší produkt těchto měření. Od známého jasu pozorovaných objektů je odečten jas jejich pozadí, tedy uměle zvýšený jas oblohy. Měřicí zařízení sestává ze CCD kamery a teleskopu. Tím disponují především astronomická pracoviště a většinou není mobilní. Měření je tak omezeno na oblast oblohy okolo observatoře [20].

4.1.4 Stanovení umělého jasu oblohy s pomocí satelitních snímků

První celosvětový pohled na mapování jasu oblohy skrz satelitní snímky přinesla práce kolektivu soustředěného okolo Pierantonio Cinzana z roku 2001, kteří zpracovali data ze satelitů amerického programu DMSP (Defense Meteorological Satellite Program). Tento kolektiv vypracoval několik mapových podkladů, jejichž interpretace se značně liší⁶. Druhý výzkum, zabývající se touto problematikou, je z roku 2016. Práce pod vedením Fabia Falchiho zpracovala data z družice Suomi – NPP. Vypracované mapové podklady a další statistická data jsou uvedeny zde⁷.

4.1.5 Stanovení umělého jasu oblohy pomocí digitálních jasových analyzátorů

Metoda založena na zpětném vyhodnocení digitálních fotografií pořízených jasovým analyzátozem, tedy v podstatě kalibrovaným digitálním fotoaparátem určeným pro měření jasu. Datové informace z pořízeného snímku jsou následně s využitím programu převedeny na jasovou mapu snímané oblasti.

4.1.6 Podíl světelného toku směřujícího do horního poloprostoru

Celkový světelný tok, který se šíří do horního poloprostoru, je tvořen přímou složkou světelného toku vyzařovaného ze svítidel a nepřímou složkou světelného toku odraženého od terénu a okolních objektů. Tento celkový světelný tok uměle zvyšuje jas oblohy. V dokumentech [1] a [2], potažmo v evropských normách (viz kapitola 2.1.2), jsou uvedeny limitní hodnoty pro světelný tok vyzařovaný přímo do horního poloprostoru. Zde je nutné zmínit rozdíl mezi často udávanými bezrozměrnými činiteli ULR (Upward Light Ratio) a $ULOR$ (Upward Light Output Ratio), které se vztahují k popisu světelného toku vyzařovaného přímo do horního poloprostoru. S pomocí bezrozměrného činitele LOR (Light Output Ratio) svítidla lze při znalosti světelného toku zdroje (zdrojů) Φ_b vypočítat světelný tok, který je vyzařován svítidlem Φ_a , viz rovnice (4.1).

$$\phi_a = LOR \cdot \phi_b \text{ (lm)} \quad (4.1)$$

⁶ Více například zde: *The night sky in the World: Satellite monitoring of the artificial night sky brightness and the stellar visibility* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <http://www.lightpollution.it/worldatlas/pages/fig1.htm>

⁷ FALCHI, Fabio. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances* [online]. 10.6.2016 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: doi:10.1126/sciadv.1600377

Světelný tok vyzařovaný přímo do horního poloprostoru Φ_u se následně vypočítá podle rovnice 4.2.

$$\phi_u = ULR \cdot \phi_a = ULR \cdot LOR \cdot \phi_b = ULOR \cdot \phi_b \text{ (lm)} \quad (4.2)$$

Z uvedených rovnic plyne, že činitel ULR je vztažen ke světelnému toku vyzařovaného svítidlem a činitel $ULOR$ je vztažen k celkovému světelnému toku zdrojů ve svítidle.

V případě osvětlování pozemních komunikací udává technická norma ČSN P 36 0455 (viz kapitola 2.1.3) maximální hodnoty $ULOR$ pro jednotlivé třídy osvětlení. Pro některé typy svítidel může být $ULOR = 0$. I tak je kvůli nenulovému činiteli odrazu osvětlovaných ploch značná část světelného toku nepřímo distribuována do horního poloprostoru. Možnost kvantifikace tohoto světelného toku je v terénu nemožná. Přiblížení reálné situaci umožňuje využití počítačových simulací (více v kapitole 8).

4.2 Oslnivé světlo

Pro rozlišení předmětů v zorném poli je důležité, aby měly tyto předměty různé jasy. Tím vynikne jejich prostorová kompozice a jejich struktura. Pokud se v zorném poli oka vyskytnou vyšší jasy, či jejich rozdíly, než na které je zrakový orgán adaptován, vzniká oslnění. To velmi znesnadňuje, až znemožňuje, příjem přinášených informací a může vést až k poškození zrakového orgánu [9].

Podle příčiny rozlišujeme oslnění přímé, odražené, přechodové, závoje a oslnění kontrastem. Poslední zmíněné je z pohledu světelné techniky nejdůležitější. Je způsobeno výskytem příliš vysokých jasů v zorném poli, než na které je zrak adaptován. Podle psychofyziologických následků oslnění kontrastem členíme na [9]:

- oslnění psychologické – pozorovatelné
– rušivé
- oslnění fyziologické – omezující
– oslepující

Příčinou oslnění může být nevhodný výběr svítidla, či jeho nevhodné umístění (svítidlo nesplňuje doporučovanou třídu svítivosti, je předimenzované či špatně směřované).

4.2.1 Hodnocení oslnění

U venkovních osvětlovacích soustav se kontroluje omezující oslnění, které má přímý vliv na zrakový výkon. Při tomto oslnění dochází k rozptylu světla uvnitř oka. Vlivem tohoto světla se vytvoří rovnoměrný jasový závoj, který se popisuje hodnotou ekvivalentního závoje jasů. Jeho velikost je závislá na hodnotě osvětlenosti v úrovni očí pozorovatele, vyvolané oslňujícími zdroji, a také na velikosti úhlů, pod kterými jsou svítidla vidět [9]. „*Stupeň omezujícího oslnění vzrůstá se závoje jasem, a naopak klesá s narůstajícím průměrným jasem pozadí (adaptačním jasem)*“ [9].

Omezující oslnění hodnotíme u osvětlovacích soustav pozemních komunikací, a to tzv. *prahovým přírůstkem TI (%)*, jenž charakterizuje relativní přírůstek prahu rozlišitelnosti jasů. U venkovních pracovních prostorů a venkovních sportovišť se pro hodnocení využívá *činitel oslnění GR (-)*.

4.3 Světelný přesah

Světelným přesahem charakterizujeme tu část světelného toku, která je osvětlovací soustavou emitována mimo osvětlovanou oblast. Toto neúčinné rušivé světlo se projevuje například zvýšením vertikální osvětlenosti přilehlých fasád, zvýšenou osvětleností zahrad v obytných oblastech, či zelených ploch okolo komunikací apod. Narušuje životní prostředí člověka, ale i noční život fauny a flóry. Jsou jím také zvyšovány energetické nároky na osvětlovací soustavu. Požadavky pro omezení tohoto vlivu rušivého světla na okolní prostředí jsou uvedeny v Tab. 2.1 [8].

Důležité zmínit, že neúčinný světelný tok, ať už přímý či odražený, bude v okolí osvětlovaných oblastí přítomen téměř vždy. Mělo by být přirozenou snahou ho co nejvíce snížit, ostatně tak jako všechny rušivé aspekty umělého světla.

4.3.1 Hodnocení světelného přesahu

Pro hodnocení světelného přesahu lze využít metodu měření jasu nebo osvětlenosti na fasádách budov. To koresponduje s Tab. 2.1, která udává limitní hodnoty pro zmíněné světelně technické veličiny. Při měření osvětlenosti a především při měření jasu je nutné brát ohled na zachování běžných podmínek (například u oken). Tedy pokud je okno běžně zavřené, i měření provádíme při zavřeném okně (s ohledem na změnu činitele odrazu v oblasti okna). Při měření účinků světelného přesahu na fasádách ve vyšších nadzemních podlažích je měření osvětlenosti těžko realizovatelné. Vhodnější je tedy měření jasů, které lze bez problému změřit ze země i pro vyšší podlaží. K tomu můžeme využít metodu měření jasu objektivním jasoměrem (viz kapitola 4.1.1) nebo stanovení jasu s pomocí digitálního jasového analyzátoru (viz kapitola 4.1.5) [20] [21].

5. Nevizuální účinky umělého světelného záření

Umělé světelné záření v nočních hodinách nám uměle prodlužuje denní dobu, po kterou může být člověk aktivní. Vědecké poznatky (uvedeny například v dokumentu [12] a [28]) však dokládají, že umělé světelné záření má kromě vizuálního účinku (tj. přenos a získání informace o okolním prostředí) i zásadní vliv na biologické a fyziologické nevizuální účinky, které se podílí na ovlivňování biorytmů nejen lidského organismu.

5.1 Nervová soustava oka

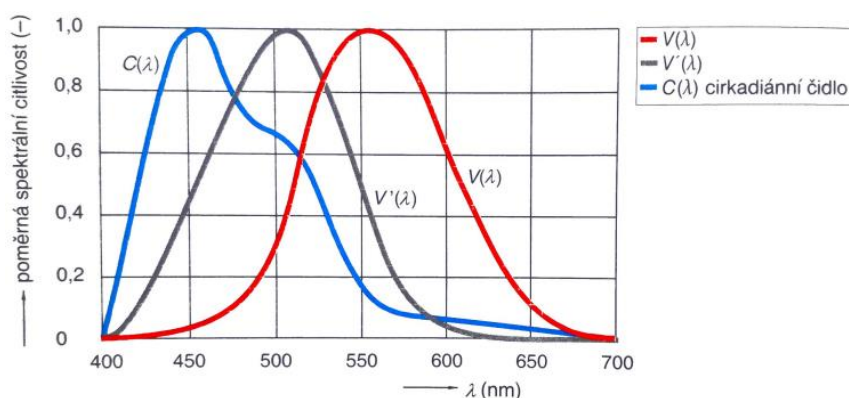
Nervová soustava oka sestává z nervových spojů a sítnice. Sítnice je průsvitná tenká membrána s velmi složitým, ale pravidelným uspořádáním buněk, ve které probíhá první zpracování přijaté informace. Skládá se z několika vzájemně komplikovaně propojených vrstev, ve kterých jsou uloženy fotoreceptory (čípky, tyčinky, cirkadiánní receptory) a další nervové buňky [9].

Čípky zajišťují fotonické vidění, uplatňují se ve dne a umožňují nám barevné vidění. Tyčinky zajišťují skotopické vidění, uplatňují se zejména v noci (či za soumraku). Posledním typem fotoreceptorů jsou cirkadiánní receptory, které jsou součástí světlocitlivých gangliových buněk (ipRGC) a výrazně se podílejí na řízení biologických procesů v lidském těle [11].

5.1.1 Spektrální citlivost fotoreceptorů

Oční orgán nemá stejnou citlivost na záření různých vlnových délek. Nejvyšší citlivost oka je při optimálním osvětlení dána citlivostí čípků. Ta se při fotonickém vidění pohybuje na 555 nm (červená křivka $V(\lambda)$ na Obr. 5.1) [9].

Spektrální citlivost cirkadiánního receptoru je koncentrována do modré oblasti viditelného záření. Maximální citlivost se pohybuje od 460 do 465 nm. Jejich spektrální citlivost je oproti spektrální citlivost čípků a tyčinek (maximální citlivost při 507 nm, modrá křivka $V'(\lambda)$) soustředěna do kratších vlnových délek (viz Obr. 5.1) [9].



Obr. 5.1: Poměrné spektrální citlivosti fotoreceptorů [9]

5.2 Cirkadiánní cyklus

Velká část biologických dějů v lidském těle periodicky probíhá v přibližně čtyřadvaceti hodinovém cyklu (tzv. cirkadiánní cyklus), ve kterém se střídá aktivní fáze během dne a klidová fáze v noci. Tento mechanismus se vyvinul právě na základě pravidelného střídání dne a noci, se kterým je aktivita člověka silně spojena. Světlo je podstatným synchronizátorem našich vnitřních hodin, podle kterých se řídí funkce jednotlivých orgánů (mezi další stimuly se řadí příjem potravy). Světlo

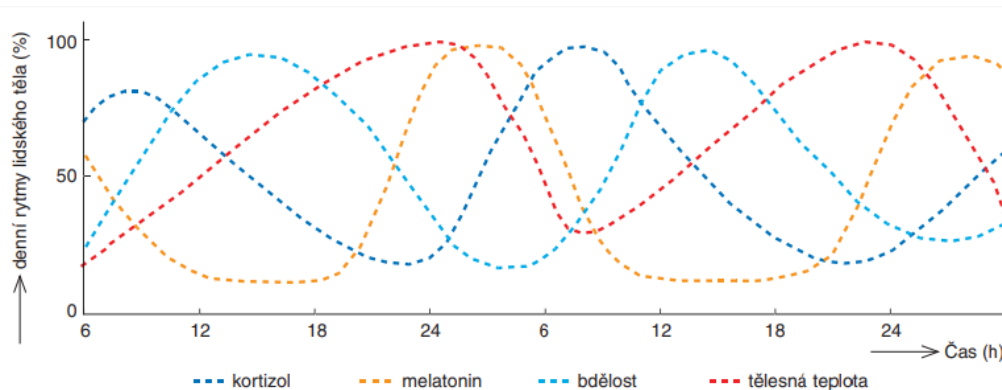
ovlivňuje sekreci hormonů řídicích funkcí organismu, tělesnou teplotu, krevní tlak, metabolismus a další biologické funkce [9] [10].

Zřejmě nejvíce vnímaným cyklickým pochodem v denním režimu člověka je přechod do aktivního stavu ráno a do klidového stavu při usínání. Tento rytmus je způsoben rozdílnou sekrecí hormonu kortizolu a melatoninu. Kortizol je též znám jako stresový hormon, vyvolává bdělost a aktivitu organismu. Nejvyšší produkce kortizolu nastává v ranních hodinách, kdy je jeho hladina 10 až 20krát vyšší oproti hodinám nočním. Melatonin naopak ovlivňuje procesy spánku, tělesné regenerace a imunity, způsobuje únavu, ospalost a ničí rakovinné buňky [10] [11].

Produkce zmíněných hormonů je regulována mozkem, který přijímá impulzy o působení světla od cirkadiánních receptorů. Ty jsou tvořeny světlocitlivými gangliovými buňkami umístěnými na sítnici oka, které obsahují pigment melanopsin, jehož spektrální citlivost dosahuje maxima v modré oblasti viditelného záření (viz kapitola 5.1.1). Přijaté informace o světelném záření jsou přeneseny k centrálním cirkadiánním hodinám, které se nacházejí v suprachiasmatických jádrech. Tyto hodiny regulují například právě produkci melatoninu v epifyze [10] [11].

Zastoupení modré složky ve spektru umělých světelných zdrojů tedy přímo ovlivňuje produkci hormonu melatoninu, který je **v nočních hodinách** nutný pro správnou regeneraci organismu. V **denních hodinách** je naopak žádoucí docílit poklesu tvorby melatoninu a zvýšit produkci hormonu kortizolu, který organismus „připraví“ na aktivní část dne, a tedy zvýšenou zátěž.

Na Obr. 5.2 jsou zobrazeny orientační průběhy denních biorytmů člověka v souvislosti s produkcí hormonu kortizolu a melatoninu.



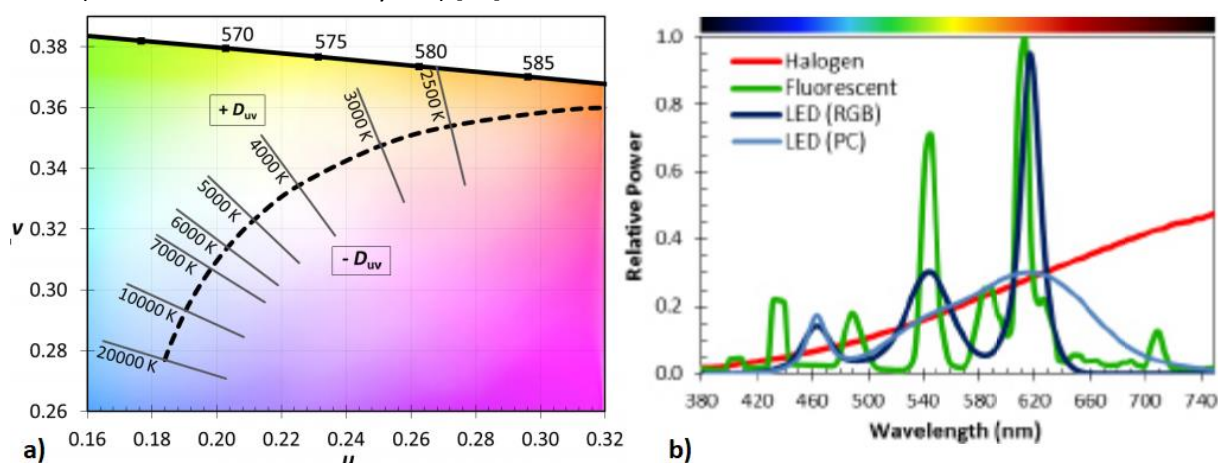
Obr. 5.2: Cirkadiánní rytmy produkce hormonů a fyziologických procesů [10]

Typický průběh cirkadiánního rytmu fyziologických procesů zdravého člověka může vypadat následovně [11]:

- 2:00 hluboký spánek
- 6:00 nejnižší tělesná teplota
- 8:00 konec produkce melatoninu, nejvyšší míra produkce kortizolu
- 13:00 nejvyšší bdělost
- 17:00 nejvyšší svalová síla a efektivita kardiovaskulárního svalu
- 20:00 počátek produkce melatoninu
- 22:00 nejvyšší tělesná teplota

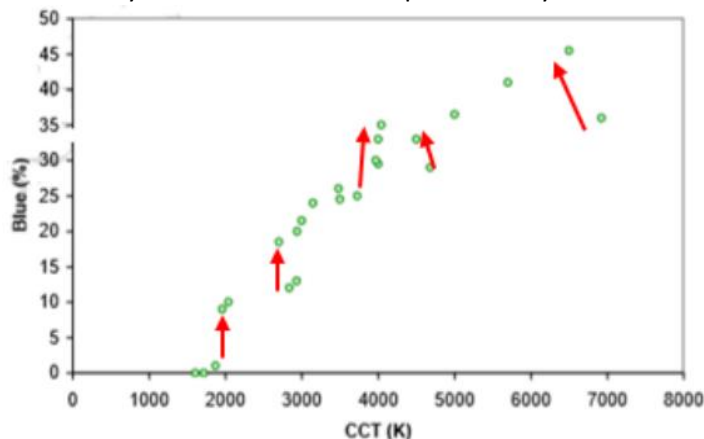
5.3 Modré světlo v souvislosti s náhradní teplotou chromatičnosti

S nasazováním technologie světelných diod do VO jsou způsoby negativního ovlivnění cirkadiánních rytmů vlivem umělého světelného záření velmi diskutované. Začaly být totiž ve vysoké míře využívány světelné zdroje s vyššími hodnotami T_n (zmněné LED, v souvislosti s jejich měrným výkonem, viz 3.3.1). Náhradní teplota chromatičnosti ale právě souvisí se zastoupením modré oblasti ve spektru světelných zdrojů. Tento vztah přibližuje Obr. 5.3 a), na kterém je uveden diagram chromatičnosti CIE. Se zvyšující se hodnotou T_n se zároveň zvyšuje podíl modré složky. Vyšší podíl modré složky ve vyzařovaném světle nejen venkovního osvětlení je v rozporu se zažitými biorytmy člověka **v nočních hodinách** (viz kapitola 5.2 a 5.3) a přímo ovlivňuje fyziologické procesy v lidském těle (narušení cirkadiánního rytmu) [11].



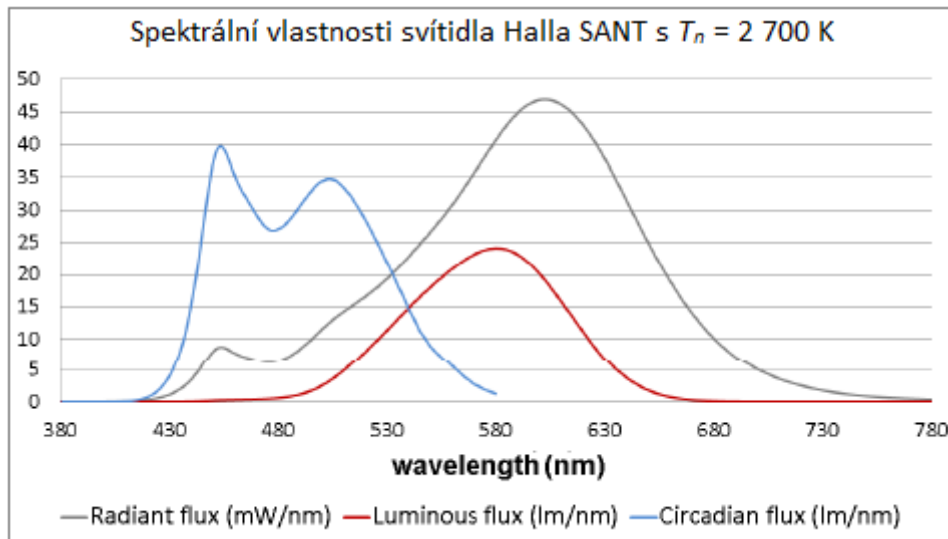
Obr. 5.3: a) demonstrace odlišného barevného počítku pro stejnou hodnotu T_n ; b) distribuce zářivé energie v průběhu viditelného spektra pro čtyři světelné zdroje s jednotnou hodnotou T_n [32]

Náhradní teplota chromatičnosti charakterizuje pomocí jednoho čísla barevné vlastnosti emitovaného bílého světla ze světelného zdroje, které vzniká komplexním mísením vlnových délek z celého viditelného spektra (viz Obr. 5.3 b). To v některých případech může vytvořit rozdíl mezi numerickým výpočtem hodnoty T_n a lidským vnímáním bílé barvy, protože dva světelné zdroje se stejnou hodnotou T_n mohou vyvolat odlišný barevný počítke (viz Obr. 5.3 a), $T_n = 4\ 000\ K$), kdy jeden zdroj může působit nazelenale a druhý narůžověle. To je způsobeno tím, že hodnoty T_n neleží přímo na čáře teplotních zářičů (čárkovaná čára v Obr. 5.3 a), ale v její blízké vzdálenosti na čarách konstantních teplot chromatičnosti (dále viz [9] str. 125). Mezi jednotlivými světelnými zdroji s totožnou hodnotou T_n může být stejně tak odlišný i obsah modré části spektra ve vyzařovaném bílém světle (viz Obr. 5.3 b) nebo Obr. 5.4), neexistuje totiž žádná korelace mezi hodnotou T_n a obsahem modré části spektra. To vyvolává značnou nepřesnost v případech, kdy je cíleno na snížení vyzařované energie v modré části spektra, avšak je to aplikováno skrze hodnoty T_n .

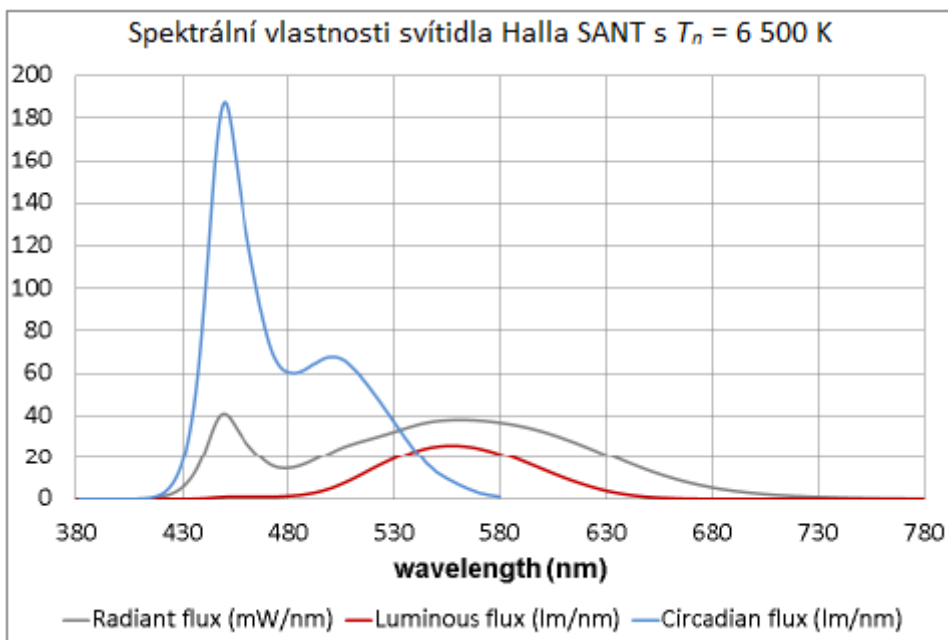


Obr. 5.4: Hodnoty T_n versus zastoupení modré složky v emitovaném světle [28]

Vzájemné souvislosti mezi hodnotou T_n a ovlivněním cirkadiánních receptorů jsou uvedeny v grafech 5.1 a 5.2. Grafy zobrazují spektrální vlastnosti (zářivý, světelný a cirkadiánní tok) interiérového svítidla Halla SANT pro $T_n = 2\,000\text{ K}$ a pro $T_n = 6\,500\text{ K}$. Vliv zářivé energie na cirkadiánní rytmus je zde kvantifikován výpočtem cirkadiánního světelného toku Φ_c , který popisuje množství té části zářivého toku, jenž ovlivňuje cirkadiánní receptory s jejich spektrální citlivostí $C(\lambda)$ (viz Obr. 5.1). Graf zobrazuje také křivku světelného toku. Rozdílem při výpočtu jsou odlišné spektrální citlivosti čípků a cirkadiánních receptorů, a jejich maximální hodnoty spektrálních průběhů světelných účinků záření (pro čípkky je tato hodnota $K_m = 683\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$, pro cirkadiánní receptory $K_{mc} = 4\,557\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$) [11].



Graf 5.1: Spektrální vlastnosti svítidla Halla SANT s $T_n = 2\,000\text{ K}$ [11]



Graf 5.2: Spektrální vlastnosti svítidla Halla SANT s $T_n = 6\,500\text{ K}$ [11]

Při porovnání uvedených grafů je zřejmé, že při $T_n = 6\,500\text{ K}$ je cirkadiánní světelný tok vyšší více než čtyřnásobně.

5.4 Negativní dopady na rostlinná a zvířecí společenstva

Stejně jako u lidí, tak i u rostlin, zvířat a dalších mikroorganismů hraje přirozené střídání dne a noci důležitou roli pro správné fungování jejich organismu. Na rozdíl od člověka, který většinu noční doby tráví v obytných prostorech, jsou zmíněná společenstva umělým osvětlením venkovních osvětlovacích soustav zasažena mnohem významněji. Jedná je o přímý zásah do jejich přirozeného životního prostředí. Příklad osvětlení diod s vyššími hodnotami T_n do venkovního osvětlení je, dá se říct, „jen“ dalším negativním vlivem v už takto nepřirozeném prostředí.

Schopnost vnímat modrou složku viditelného světelného spektra je rozsáhlá jak v rostlinné, tak i ve zvířecí říši. Tato schopnost funguje prostřednictvím citlivých struktur, včetně kryptochromů, fotoreceptorů senzitivních na UV-A záření a na modrou oblast viditelného spektra [13].

Světelné záření patří mezi hlavní činitele ovlivňující růst a vývoj **rostlin** (zabývá se jím vědní obor fotomorfogeneze). Světlo má vliv např. na klíčení semen, růst stonku, rašení, cirkadiánní rytmy, rozvoj kvetení a plodů, či opad listů. I fotosyntéza má důležité denní a noční fáze. Umělé světlo v nočních hodinách tyto pochody narušuje. Modrá (cca 400 – 500 nm) a červená (cca 650 – 700 nm) složka světelného záření jsou primárními vlnovými délkami, které aktivují chlorofyl, tedy jeden z hlavních světlo absorbujících pigmentů rostlin (ovlivnění zásadního kroku fotosyntézy) [12] [13].

Nadměrné množství světla, či jeho nevhodné spektrální složení může způsobit předčasné olistění, pozdní opad listů, prodloužení růstové periody a také například snížení množství nočních opylovačů [12].

Živočichové jsou přizpůsobeni k vnímání vlnových délek světelného záření v různých oblastech elektromagnetického spektra, někteří vidí i při mnohem nižších osvětlenostech než lidé. Umělé světlo jim někdy dokáže vylepšit či naopak omezit vidění. To může vyústit ke změnám v chování, např. změny v reprodukci, hledání potravy, odpočinku nebo v orientaci. Podobně jako u člověka dochází k narušení cirkadiánních rytmů⁸. Někteří jsou světlem přitahováni, někteří se mu vyhýbají. Důsledkem mohou být pozorovatelné změny na celých společenstvech, které ovlivňují chování navázaného ekosystému. Velká část živočichů jsou noční tvorové, venkovní osvětlovací soustavy jsou pro ně od principu negativním prvkem [13].

Vědecké studie se stále zabývají účinky umělého osvětlení na jednotlivé druhy živočichů (viz dokument [12] a [28]). Často zmiňovaný je vliv umělého osvětlení na hmyz, jenž v posledních desetiletích zažívá nejvyšší úbytek. Většina druhů hmyzu aktivních v noci je silně přitahována ke svítidlům venkovního osvětlení. Studie [14] dokládá, že poléťavý hmyz je přitahován až o 48 % více svítidly se světelnými diodami než s vysokotlakými sodíkovými výbojkami. Dále uvádí, že nebyl shledán významný rozdíl v počtu hmyzu chyceného v pastech mezi jednotlivými hodnotami T_n (studie pracovala s rozpětím T_n od 2 700 K po 6 500 K) [12] [14].

Negativním vlivem stále se rozšiřujícího veřejného (venkovního) osvětlení, se kterým souvisí i zvýšení jasů oblohy, je nemožnost některých živočichů (pozorováno u obojživelníků, plazů, brouků či ptáků) orientovat se pomocí Měsíce, hvězd či Mléčné dráhy [12].

⁸ U myší byly fotoreceptory ipRGC objeveny již před 30 lety [10]

6. Hodnocení náhradní teploty chromatičnosti

Stanovení doporučených, nebo limitních, hodnot teploty chromatičnosti v technických normách a metodických pokynech pro získání dotací (dotační programy EFEKT a NPŽP) je nyní aktuálním tématem. Tím je také stanovení metodiky měření teploty chromatičnosti svítidel VO v terénu. Z pohledu barvy vyzařovaného světla je na trhu k dostání mnoho různých konfigurací zejména LED svítidel. V kapitole 3.3 je uvedeno, že se hodnoty měrného výkonu pro konkrétní LED zdroj při odlišných hodnotách T_n liší až o $22 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$. V případě LED technologie se dá stále konstatovat, že čím vyšší T_n , tím efektivnější osvětlovací soustava. Nelze však zapomínat na účinky světelného záření na člověka v nočních hodinách, které jsou uvedeny v páté kapitole.

Absence metodiky měření teploty chromatičnosti svítidel VO v terénu znemožňuje případné ověření tohoto parametru u osvětlovacích soustav, které jsou podpořeny dotačním programem a vyžadují kontrolní měření v ověřovacím světelně-technickém protokolu. Absence metodiky může dále komplikovat řešení ostatních smluvních vztahů nebo stížností obyvatel na nevhodně zvolenou barvu světla v obytných oblastech.

V dalším textu budou vyhodnocena data z měření prostorových charakteristik T_n tří typů uličních LED svítidel a šesti typů spektrometrů. Na základě těchto dat bude problematika měření T_n přiblížena a budou stanoveny základní podmínky k jejímu měření v terénu.

Svítidla i spektrometry byly proměřeny v Českém metrologickém institutu (dále jen ČMI).

6.1 Prostorové charakteristiky T_n vybraných svítidel

Odborné texty⁹, které se zabývají vyzařovaným spektrem LED svítidel uvádí, že toto spektrum není v okolí svítidla jednotné, ale mění v závislosti na jeho vyzařovacím úhlu. Prostorová změna vyzařovaného spektra je komplexní jev, který závisí na více faktorech. Hlavní roli zde hraje vrstva luminoforu, jeho tloušťka a především koncentrace. Druhý parametr, který změnu ovlivňuje je optická struktura LED součástek. Třetím pak teoreticky může být i optický systém svítidla.

Pro zobrazení hodnot T_n jsem využil vynesení naměřených dat do 3D grafu, ve kterém je jejich prostorové rozložení nejlépe vidět. Možnost přesného odečtu hodnot v tomto případě nevidím jako podstatnou, jde zejména o prezentování problému.

Pro popis prostorových charakteristik využiji soustavu fotometrických polorovin $C-\gamma$, předně využívanou pro zobrazení křivek svítivosti, jejíž osa je kolmá k hlavní vyzařovací ploše svítidla. Každá polorovina C tak reprezentuje hodnoty T_n do určitého směru stanoveného úhlem od 0° do 360° . Úhel γ definuje hodnoty T_n v dílčích polorovinách C . Měření proběhlo s krokem polorovin $C_{\text{krok}} = 5^\circ$ a s krokem úhlu $\gamma_{\text{krok}} = 2,5^\circ$.

V csv (comma separated values) souborech s naměřenými daty nebyly často pro vyšší vyzařovací úhly ($\gamma > 80^\circ$) uvedeny hodnoty T_n a místo nich zde byla chybná hláška. Z tohoto důvodu jsou grafy pro T_n v horních částech grafu nespojité.

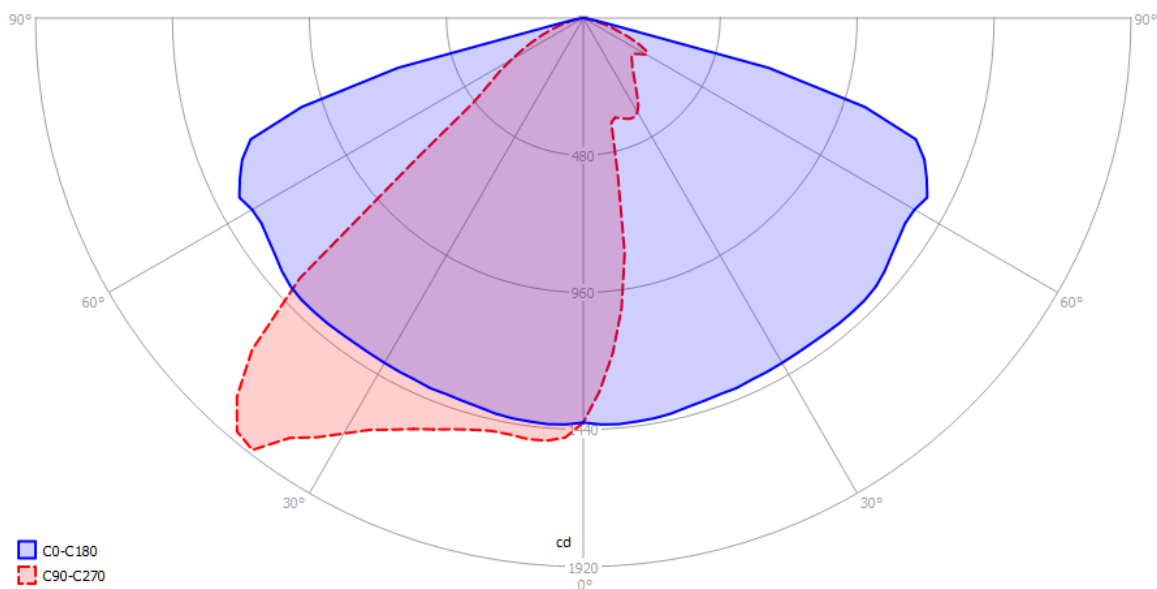
⁹ LIU, Zongyuan, Sheng LIU, Kai WANG a Xiaobing LUO. *Analysis of Factors Affecting Color Distribution of White LEDs* [online]. August 2008 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: doi:10.1109/ICEPT.2008.4607013

6.1.1 Svítidlo Marut M G1 ME 5k0/740 (Elektrolumen)

LED svítidlo Marut (Obr. 6.1) se světelným tokem 5 000 lm a náhradní teplotou chromatičnosti 4 000 K. Níže jsou uvedeny křivky svítivosti svítidla v polárních souřadnicích (Obr. 6.2).

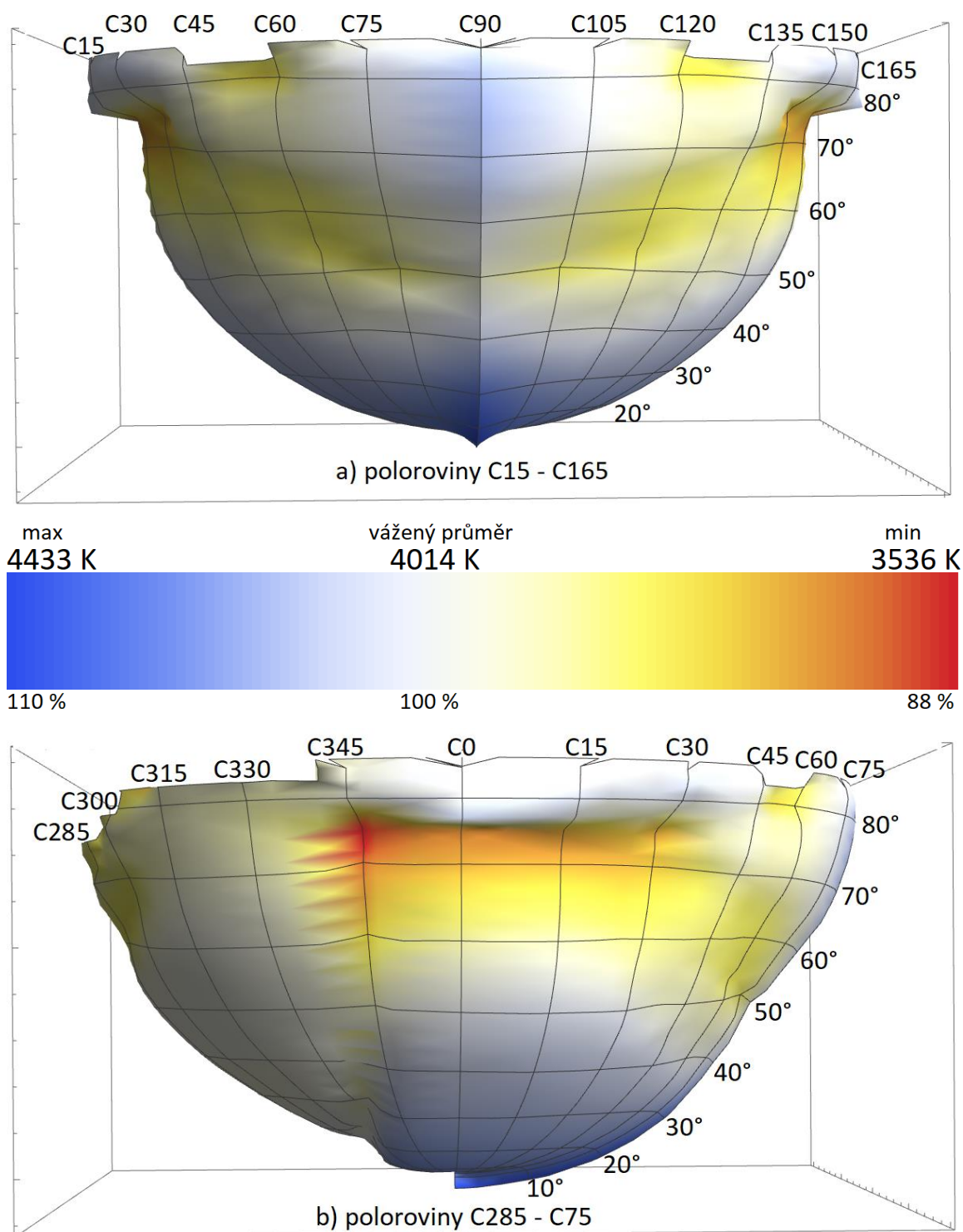


Obr. 6.1: Svítidla Marut M G1 ME, zdroj: [https://www.el-lumen.cz/marut-m-g1]



Obr. 6.2: Křivky svítivosti svítidla Marut M G1 ME 5k0/740, data naměřena ČMI

Prostorové rozložení T_n , viz Obr. 6.3 a), b). Barevná škála uvádí spolu s váženým průměrem naměřených hodnot i maximální, minimální hodnotu T_n . Hodnota T_n uváděná výrobcem se až na zanedbatelný rozdíl shoduje s hodnotou váženého průměru. Rozptyl hodnot od průměru je ale poměrně vysoký, až o 12 % (téměř 500 K). Je zřetelné, že maximum T_n je přímo pod svítidlem, tj. zhruba při $\gamma < 20^\circ$. Minimální hodnoty T_n jsou poté mezi polorovinami C345 – C15 pro $\gamma \approx 75^\circ$.



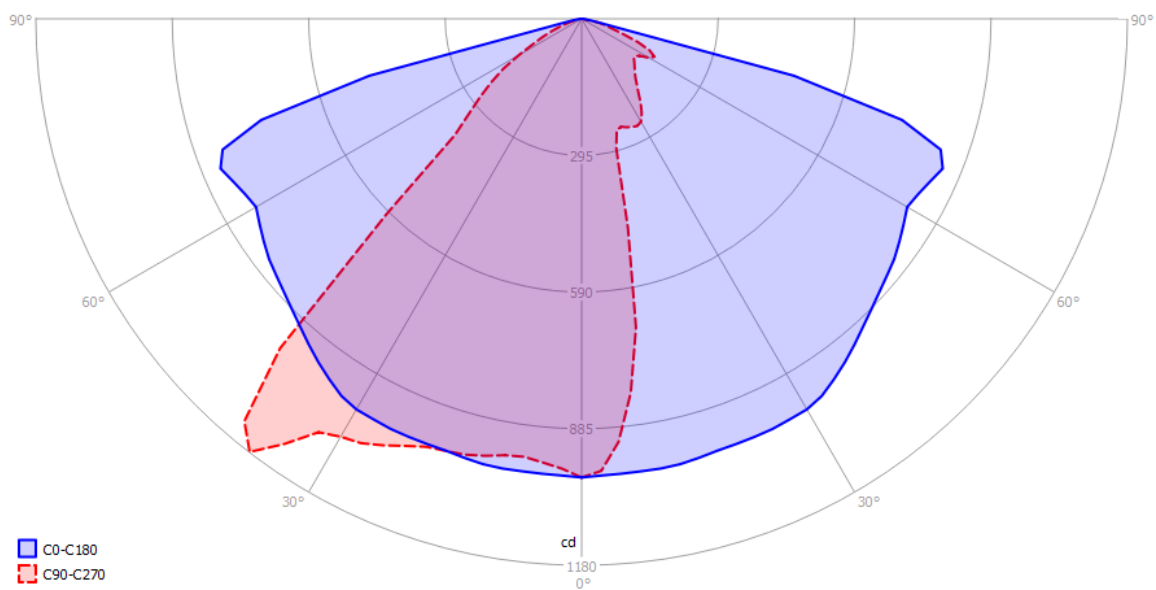
Obr. 6.3: Prostorové charakteristiky T_n svítidla Marut M G1 ME 5k0/740, data naměřena ČMI

6.1.2 Svítidlo Marut M G1 ME 4k5/422 (Elektrolumen)

LED svítidlo Marut (Obr. 6.4) se světelným tokem 4 500 lm a náhradní teplotou chromatičnosti 2 200 K. Níže jsou uvedeny křivky svítivosti svítidla v polárních souřadnicích (Obr. 6.5).

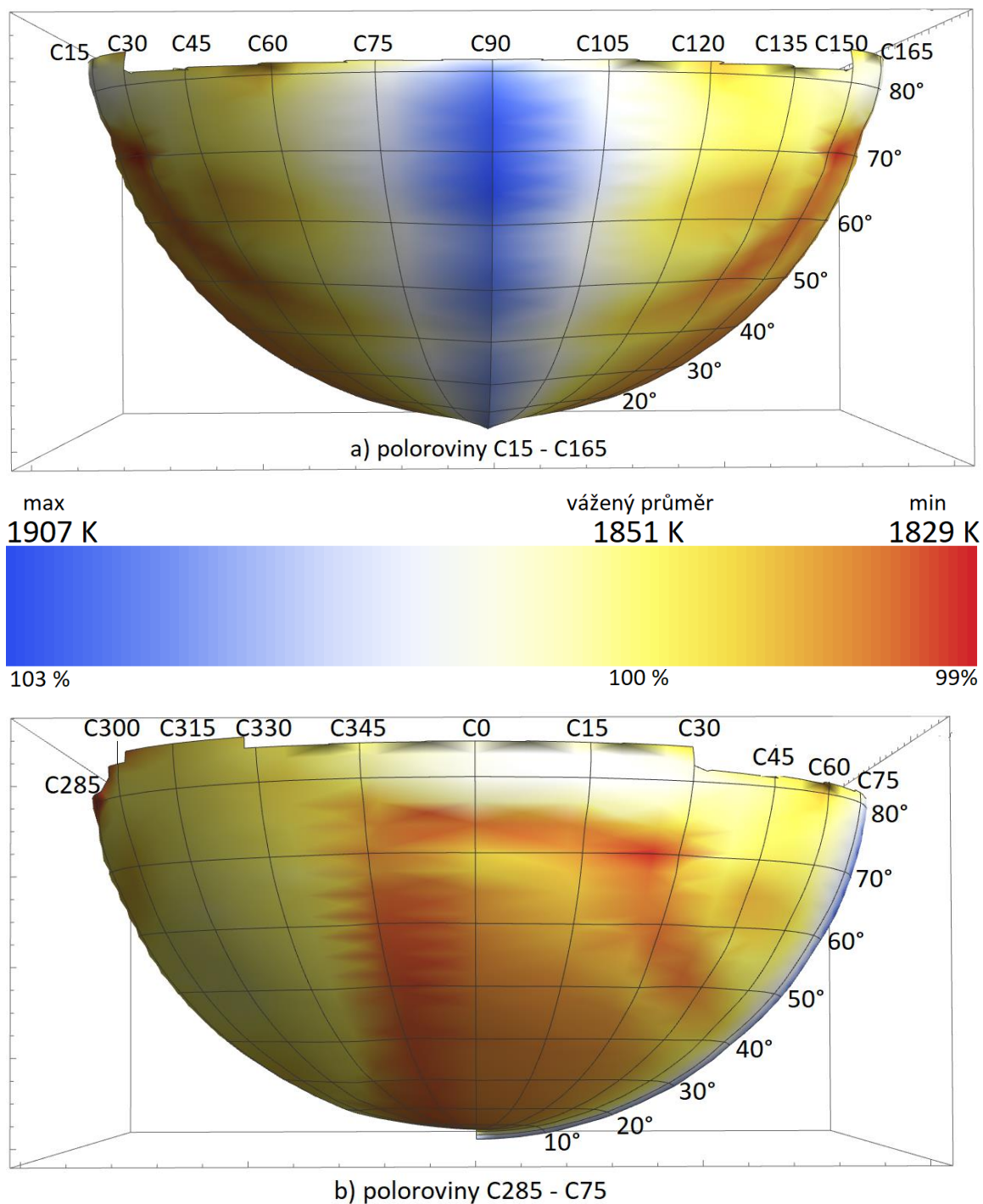


Obr. 6.4: Svítidla Marut M G1 ME, zdroj: [https://www.el-lumen.cz/marut-m-g1]



Obr. 6.5: Křivky svítivosti svítidla Marut M G1 ME 5k0/740, data naměřena ČMI

Prostorové rozložení T_n , viz Obr. 6.6 a), b). V tomto případě se hodnota T_n uváděná výrobcem liší zhruba o 150 K od hodnoty váženého průměru. Oproti předešlému svítidlu je v tomto případě rozptyl hodnot od hodnoty váženého průměru zanedbatelný, maximálně 3 %. Maximum hodnot T_n je pak znatelné v celém intervalu vyzařovacího úhlu pro polorovinu C90.



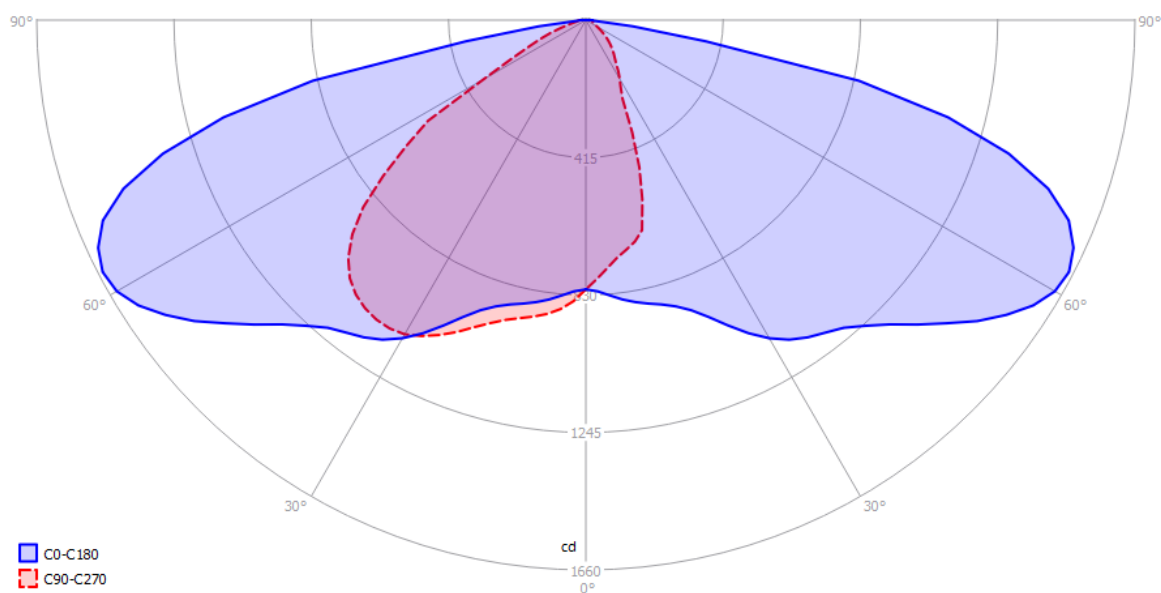
Obr. 6.6: Prostorové charakteristiky T_n svítidla Marut M G1 ME 4k5/422, data naměřena ČMI

6.1.3 Svítidlo Archilede HP BX38 (iGuzzini)

LED svítidlo Archilede (Obr. 6.7) s teplotou chromatičnosti 4 000 K. Níže jsou uvedeny křivky svítivosti svítidla v polárních souřadnicích (Obr. 6.8).

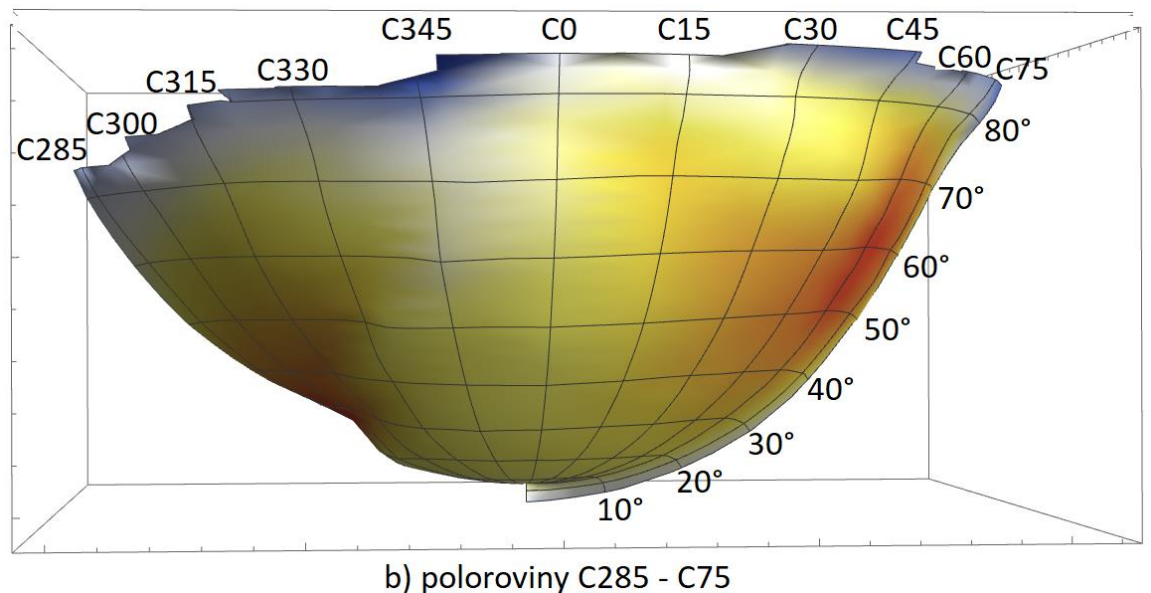
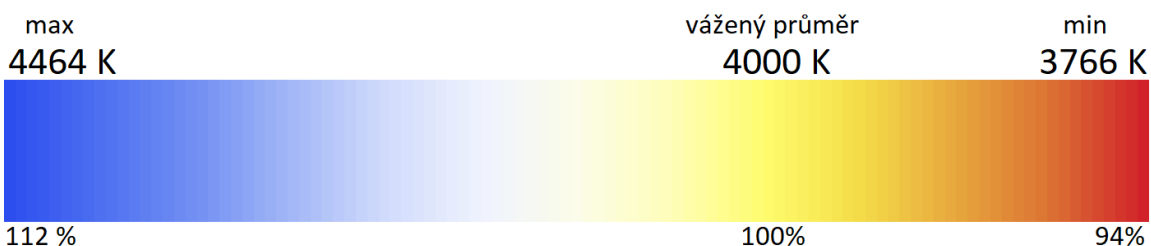
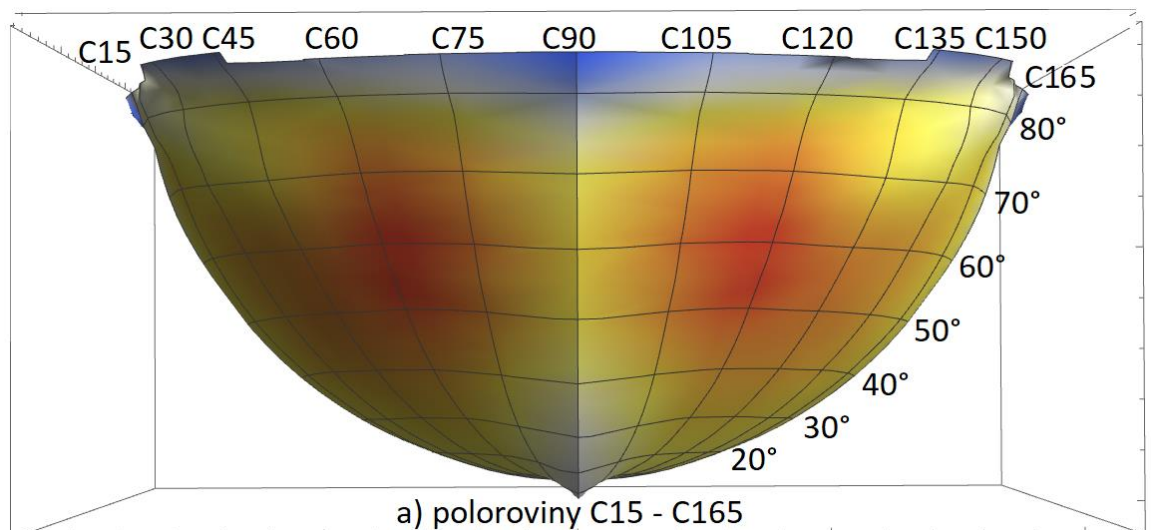


Obr. 6.7: Svítidlo Archilede HP, zdroj: [<https://www.iguzzini.com/archilede-hp/>]



Obr. 6.8: Křivky svítivosti svítidla Archilede HP, data naměřena ČMI

Prostorové rozložení T_n svítidla Archilede HP je na Obr. 6.9 a), b). V tomto případě se hodnota T_n uváděná výrobcem naprosto shoduje s hodnotou váženého průměru. Stejně jako u prvního z uvedených typů svítidel je i v tomto případě velký rozptyl hodnot T_n od hodnoty váženého průměru, až o 12 % (464 K). U tohoto svítidla se maximum T_n vzhledem k uvedeným obrázkům pohybuje napříč všemi polorovinami pro vysoké vyzařovací úhly ($\gamma > 80$). Bohužel na Obr. 6.9 b) je znát neúplnost dat vzhledem ke zmíněným chybám v csv souborech.



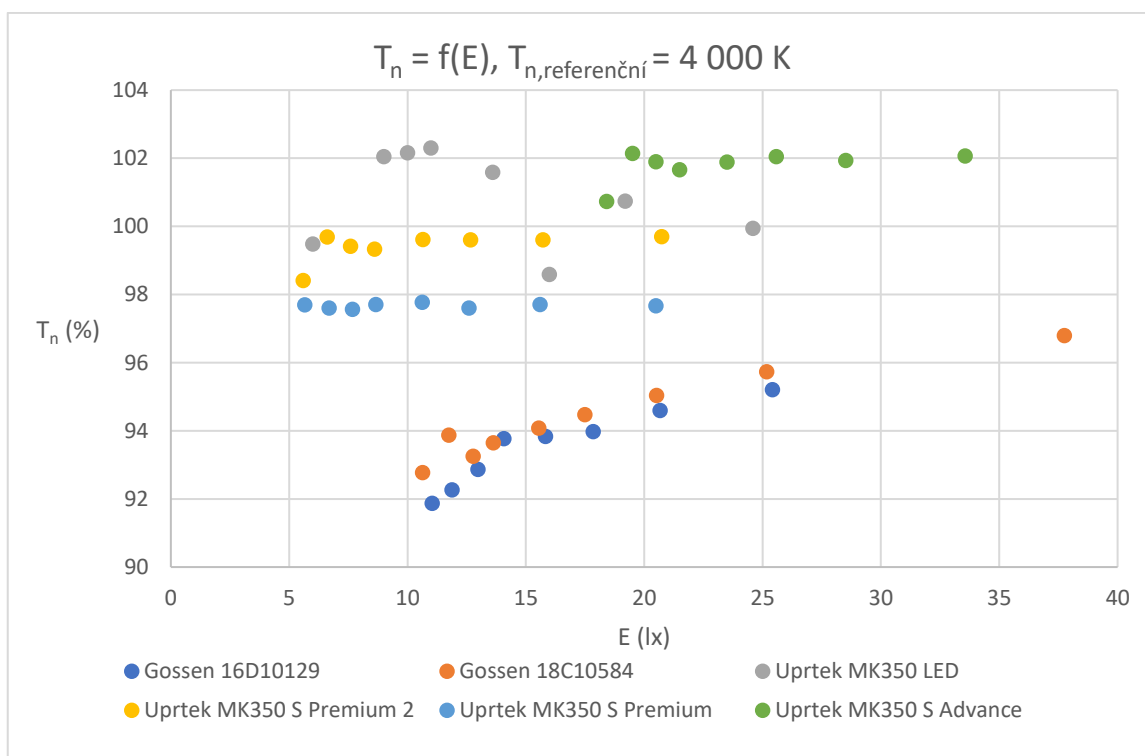
Obr. 6.9: Prostorové charakteristiky T_n svítidla Archilede HP, data naměřena ČMI

6.2 Vyhodnocení dat z měření spektroradiometrů

Spolu se svítidly bylo v ČMI proměřeno i šest spektroradiometrů od dvou výrobců v různých variantách. Konkrétně jde o přístroj Gossen 16D10129, Gossen 18C10584, UPRtek MK350 LED, UPRtek MK350 S Premium 2, UPRtek MK 350 S Premium a UPRtek 350 S Advance. Proměřena byla závislost vyhodnocované náhradní teploty chromatičnosti na osvětlenosti se záměrem sledování odchylek naměřených hodnot od referenčních (ΔT_n). Měření proběhlo pro dvě referenční náhradní teploty chromatičnosti, a to $T_n = 4\,000\text{ K}$ a $T_n = 1\,800\text{ K}$. V uvedených grafech jsou naměřené hodnoty T_n vztaženy k hodnotě referenční, při které byl daný spektroradiometr při dané osvětlenosti měřen.

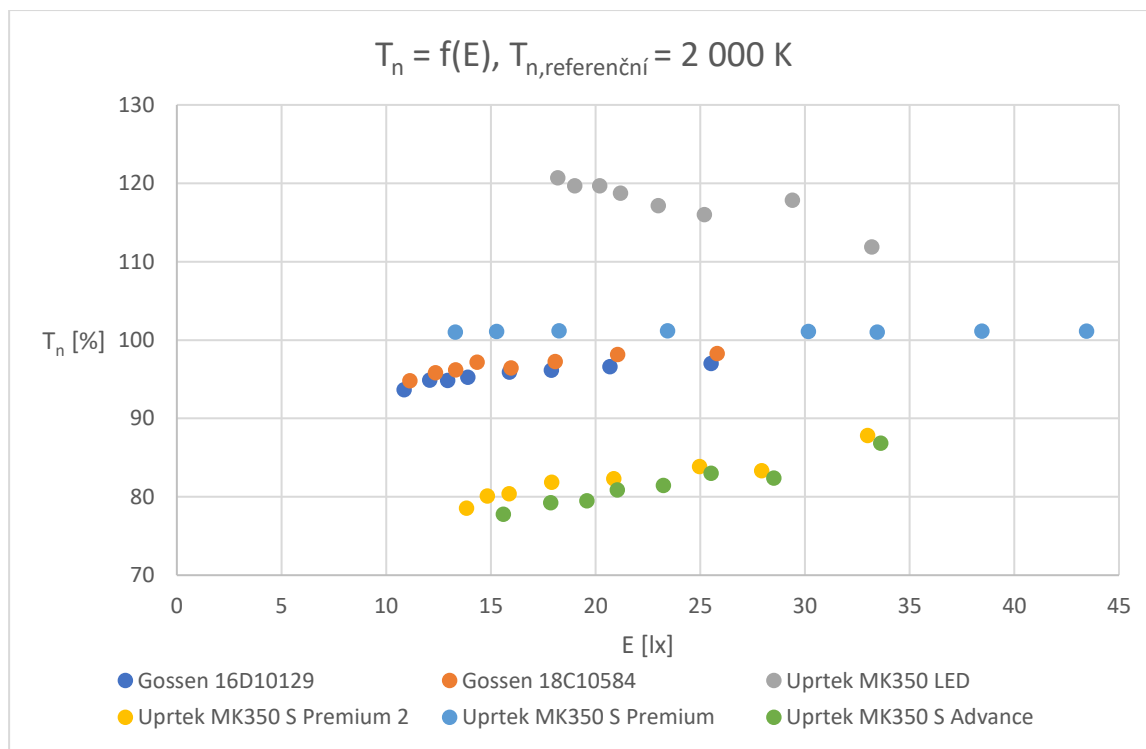
Měření proběhlo při teplotě 24 °C a relativní vlhkosti 47% . Je udaná rozšířená nejistota měření $U_{\text{nejistota}} = 2,2\%$. Není mi znám důvod, proč jsou spektroradiometry měřeny při rozdílných hladinách osvětlenosti. Především proč není jednotná první hodnota osvětlenosti, tedy pro $E \approx 5\text{ lx}$, a není zachován jednotný krok osvětlenosti. V naměřených datech jsou dostupné ještě hodnoty pro $E \approx 150\text{ lx}$ a $E \approx 300\text{ lx}$. Vzhledem k tomu, že se tyto osvětlenosti ve VO spíše nevyskytují, tak jsem je do grafu nevynášel. Je tak upřen detail zejména na $E < 40\text{ lx}$, se kterými se ve VO setkáváme běžně. Oblast měřených dat pro osvětlenost $45 < E < 150$ není k dispozici.

Při pohledu na níže uvedené grafy je jasné, že právě osvětlenost bude hrát při měření teploty chromatičnosti v terénu velkou roli. Z prvního uvedeného grafu (Graf 6.1) pro referenční náhradní teplotu chromatičnosti $4\,000\text{ K}$ lze vidět, že se spektroradiometry UPRtek pohybují okolo 100% , i s přihlédnutím k nejistotě měření. Řekl bych, že nejlépe z měření vyšel přístroj UPRtek MK350 S Premium. Naměřené hodnoty tohoto přístroje vykazují téměř konstantní odchylku ΔT_n , nezávislou na hladině osvětlenosti. Naopak u obou přístrojů Gossen se tato odchylka s klesající osvětleností zvyšuje.



Graf 6.1: Závislost relativních hodnot $T_n (\%)$ na osvětlenosti $E (\text{lx})$ přístroje; $T_{n,\text{referenční}} = 4\,000\text{ K}$, data naměřena ČMI

Ve druhém uvedeném grafu (Graf 6.2) pro $T_{n,reference} = 2\,000\text{ K}$ jsou znatelné podobnosti k měření při $T_{n,reference} = 4\,000\text{ K}$. Přístroj UPRtek MK350 S Premium opět vykazuje nezávislost měřené hodnoty na hladině osvětlenosti. Velmi podobný průběh jako v předešlém měření mají i spektrometry Gossen, u kterých se opět odchylka ΔT_n při klesajících hladinách osvětlenosti zvyšuje. Naopak velký rozdíl naměřených dat je u zbývajících třech přístrojů UPRtek. V těchto případech je odchylka ΔT_n větší jak 10 %, v měření pro $T_{n,reference} = 4\,000\text{ K}$ to bylo maximálně okolo 2 %. Je zde ale vidět trend zvyšování přesnosti měření při vyšších hladinách osvětlení.



Graf 6.2: Závislost relativních hodnot T_n (%) na osvětlenosti E (lx) přístroje; $T_{n,reference} = 2\,000\text{ K}$, data naměřena ČMI

6.3 Měření náhradní teploty chromatičnosti svítidel VO v terénu

Jak vyplývá z kapitoly 6.1, prostorové rozložení náhradní teploty chromatičnosti v okolí svítidel není jednotné. Bylo znázorněno, že rozdíl krajních hodnot T_n od hodnoty váženého průměru může být až ve stovkách Kelvinů. U jednotlivých svítidel je toto rozložení jiné (a vždy bude, vzhledem k odlišné konstrukci optického systému a použitým LED modulům) a nelze tak stanovit všeobecné závěry, které by tvrdily, že například maximum T_n nastává v konkrétních místech v okolí měřeného svítidla.

Z výše uvedených grafů pro spektrometry vyplývá, že při vyšších hladinách osvětlenosti se snižuje odchylka měření ΔT_n . Vyjma jednoho přístroje lze toto tvrdit pro všechny zbylé, zejména pak z měření při $T_{n,reference} = 2\,000\text{ K}$. Z tohoto důvodu bude důležité měření provádět v místech vozovky s dostatečnou hladinou osvětlenosti. Toto místo opět nelze paušalizovat pro všechna svítidla uličního osvětlování, ale pro velkou část z nich to bude přímo pod svítidlem.

Měřit náhradní teplotu chromatičnosti je z mého pohledu a z dat uvedených v této práci nejvhodnější v horizontální rovině v úrovni vozovky a v místě, kterým prochází osa vedená světelným středem svítidla (tato osa je kolmá na vyzařovací plochu svítidla). Pokud je osvětlenost v tomto bodě $E < 40\text{ lx}$, je pro zvýšení přesnosti měření vhodné umístit měřicí přístroj nad úroveň

vozovky do takové výšky (a také do místa kterým prochází osa vedená světelným středem svítidla), kde bude splněna podmínka $E \geq 40$ lx. Tento postup je podle mého názoru aplikovatelný na širokou škálu svítidel VO, bez ohledu na tvar jejich prostorového rozložení svítivosti, tedy na výsledné rozložení osvětlenosti v úrovni vozovky pod daným svítidlem.

7. Regulace světelného toku svítidel VO

Příchod světelných diod, nových technologií řídicích, sensorových a komunikačních systémů do VO umožňuje v současné době smýšlet nad konceptem ovládní VO ve zcela jiných rovinách, než na jaké byli projektanti, provozovatelé a investoři osvětlovacích soustav donedávna zvyklí. Vstupem zmíněných technologií do praxe se stávají možnosti ovládní a jeho technického řešení nad rámec tradičního přístupu hůře uchopitelné a nejasné. Kapitola je zaměřena na přístup technických norem k otázce regulace světelného toku svítidel VO, předkládá možnosti regulace světelného toku světelných zdrojů a uvádí příklady technických prostředků k aplikaci hromadného ovládní osvětlovacích soustav.

7.1 Třídy osvětlení pozemních komunikací

Pro správný návrh osvětlovací soustavy pozemní komunikace je zásadní její zařazení. Touto problematikou se zabývá norma ČSN CEN/TR 13201-1 ([24]), která třídy osvětlení specifikuje a současně obsahuje dvě vzájemně zaměnitelné metody pro výběr té nejvhodnější třídy pro danou situaci. Dále se pro přehlednost budu držet metody, která vychází z dokumentu CIE 115:2010 a využívá přiřazení váhových hodnot k jednotlivým vyhodnocovacím parametrům.

Základní rozdělení tříd osvětlení závisí především na účelu komunikace a na typu uživatele. Podle těchto hledisek norma [24] stanovuje tyto tři základní světelné situace: pozemní komunikace pro motorovou dopravu M, konfliktní oblasti C (např. křižovatky, zvýšený výskyt chodců, změna geometrie vozovky apod.) a pozemní komunikace pro chodce a pomalou dopravu P (např. chodníky, cyklostezky, osvětlení krajnic apod.). Konkrétní třída osvětlení se pro danou světelnou situaci určí pomocí příslušných vyhodnocovacích parametrů, mezi které patří návrhová rychlost, intenzita dopravy, skladba dopravního proudu, a dále parametry týkající se uspořádání pozemní komunikace s vlastnostmi okolního prostředí.

V dalším textu se zaměřím zejména na třídy osvětlení pro motorovou dopravu. Rozlišujeme je na třídy M1 až M6, kde M1 se příkládá úsekům s nevyššími požadavky.

V následující kapitole je uvedeno stanovení takovéto třídy. Ta se pro konkrétní situaci určí s pomocí Tab. 6.1, která obsahuje výše zmíněné parametry. Těmto parametrům se přiřadí váhové hodnoty V_w , jejichž součet (V_{ws}) určí třídu osvětlení podle vztahu (7.1). Dané třídě osvětlení poté odpovídají světelně-technické požadavky, které pro jednotlivé světelné situace stanovuje norma ČSN EN 13201-2.

$$M = 6 - V_{ws} \quad (7.1)$$

7.2 Možnosti stmívání svítidel VO

Třída osvětlení se stanovuje pro nejnepříznivější situaci daného úseku pozemní komunikace. Z pohledu intenzity dopravy se jedná o špičkovou hodinovou hodnotu. Norma [24] pracuje i s tím,

že se hodnoty vyhodnocovacích parametrů mohou během nočních hodin měnit a lze tak stanovit tzv. adaptivní osvětlení. Mezi proměnlivé parametry se řadí především již zmíněná intenzita dopravy a jasnost okolí. Adaptivní osvětlení tak umožňuje v určitých časových úsecích noci dosáhnout jiné třídy osvětlení, převážně tedy třídy vyšší [24].

Vlivem měnící se intenzity dopravy lze změnit parametry osvětlení komunikace až o dvě třídy (například z M2 na M4, viz Tab. 6.1), to odpovídá 50 % změně průměrného jasu vozovky. Důležité podotknout to, že při stanovení adaptivního osvětlení, tedy při změně průměrné hladiny osvětlení (průměrný jas vozovky), nesmí být ovlivněna zbývající kvalitativní kritéria, která musí i během změny světelného toku osvětlovací soustavy zůstat ve svých mezích. Nesmí být tedy ovlivněna rovnoměrnost jasu vozovky (nebo osvětlenosti pro třídy C a P), ani kontrast předmětů [24].

Parametr *intenzita dopravy* má podle technické normy [24] tři stupně: vysoká, střední a nízká. Konkrétní stupeň se určí podle podílu sledované intenzity dopravy a maximální kapacity pro daný úsek komunikace. Maximální kapacitu pozemních komunikací doplňuje Tabulka 1 v technické normě ČSN P 36 0455.

Tab. 6.1: Výběr třídy osvětlení pro motorovou dopravu [24]

Parametr	Možnosti	Popis		Váhová hodnota V_w	V _w zvolené		
					Δt_1	Δt_2	Δt_3
Návrhová rychlost nebo dovolená rychlost	Velmi vysoká	$v \geq 100$ km/h		2			
	Vysoká	$70 < v < 100$ km/h		1	1	1	1
	Střední	$40 < v < 70$ km/h		-1			
	Nízká	$v \leq 40$ km/h		-2			
Intenzita dopravy		Dálnice, vícepruhové pozemní komunikace	Dvoupruhové pozemní komunikace				
	Vysoká	> 65 % max. kapacity	> 45 % max. kapacity	1	1		1
	Střední	35 % - 65 % max. kapacity	15 % - 45 % max. kapacity	0			
	Nízká	< 35 % max. kapacity	< 15 % max. kapacity	-1	-1		
Skladba dopravního proudu	Smišená s vysokým podílem nemotorové dopr.			2			
	Smišená			1			
	Pouze motorová			0	0	0	0
Směrově rozdělená komunikace	Ne			1			
	Ano			0	0	0	0
Hustota křižovatek		Úrovňové křižovatky (počet/km)	Mimoúrovňové křižovatky, vzdálenost mezi mosty (km)				
	Vysoká	> 3	< 3	1	1	1	1
	Střední	≤ 3	≥ 3	0			
Parkující vozidla	Vyskytují se			1			
	Nevyskytují se			0	0	0	0
Jasnost okolí	Vysoká	Výlohy, reklamní plochy, sportoviště, nádražní a skladové areály		1			
	Střední	Běžná situace		0	0	0	0
	Nízká			-1			
Náročnost navigace	Vysoká			2			
	Střední			1	1	1	1
	Nízká			0			
Součet váhových hodnot					4	2	4
Třída osvětlení $M = 6 - V_{w_{\max}}$					M2	M4	M2

7.3 Řízení adaptivního osvětlení v souvislosti s intenzitou dopravy

Jak vyplývá z předešlého textu, pro možnost stanovení třídy osvětlení, potažmo adaptivního osvětlení, je podstatná znalost intenzity dopravy daného úseku pozemní komunikace. Podle způsobu určení tohoto parametru lze následné řízení adaptivního osvětlení rozdělit na režimové, dynamické a jejich kombinaci [25].

7.3.1 Režimové řízení

V případě režimového řízení je osvětlovací soustava řízena na základě předem stanovených časových úseků. Pro režimové řízení se používají statistická data sčítání dopravy. Pro celostátní situaci je sčítání dopravy vedeno pod záštitou Ředitelství silnic a dálnic ČR. Dosud poslední sčítání proběhlo v roce 2016. Na území Prahy dopravní situaci sleduje Technická správa komunikací (dále jen TSK), která poslední dopravní sčítání datuje k 1.1.2019. Celostátní síť úseků, na kterých probíhalo sčítání dopravy je vcelku hustá. Pohled je celkem logicky zaměřen na dálnice, rychlostní silnice a silnice I. a II. třídy a vybrané úseky silnic III. třídy. Sčítání neprobíhá v městských částech, ani v obcích mimo uvedené silniční tahy.

Stěžejním výstupem tohoto sčítání dopravy pro daný úsek komunikace je hodnota Ročního průměru denních intenzit dopravy – RPDI, která je udávána ve vozidlech za den. Z této hodnoty jsou pomocí přepočtu (technický předpis – TP 219) určeny hodnoty pro hlukové a emisní výpočty. Důležité pro určení třídy osvětlení je především to, že jsou zde tyto přepočtené hodnoty intenzity dopravy uvedeny pro tři časové úseky během dne, pro denní období 6 – 18 hodin, pro večerní období 18 – 22 hodin a pro noční období 22 – 6 hodin. Hodnoty z posledních dvou časových úseků již lze použít pro stanovení režimového adaptivního osvětlení.

Pro Prahu sčítání dopravy zajišťuje TSK, jak již bylo výše uvedeno. Data jsou udávány pro každý směr úseku zvlášť a hodnota intenzity dopravy je ve vozidlech za den. Pro použití k návrhu veřejného osvětlení je možné data s pomocí (TP 219) přepočítat na již uvedené časové úseky během dne.

Stanovení stupně intenzity dopravy v místech, kde nejsou k dispozici statistická data ze sčítání dopravy, tedy zejména silnice III. třídy a místní komunikace, je tedy problematické. Lze samozřejmě provést vlastní dopravní průzkum, ale je nutné počítat s časovou náročností a zvýšením ceny celého projektu.

7.3.2 Dynamické řízení

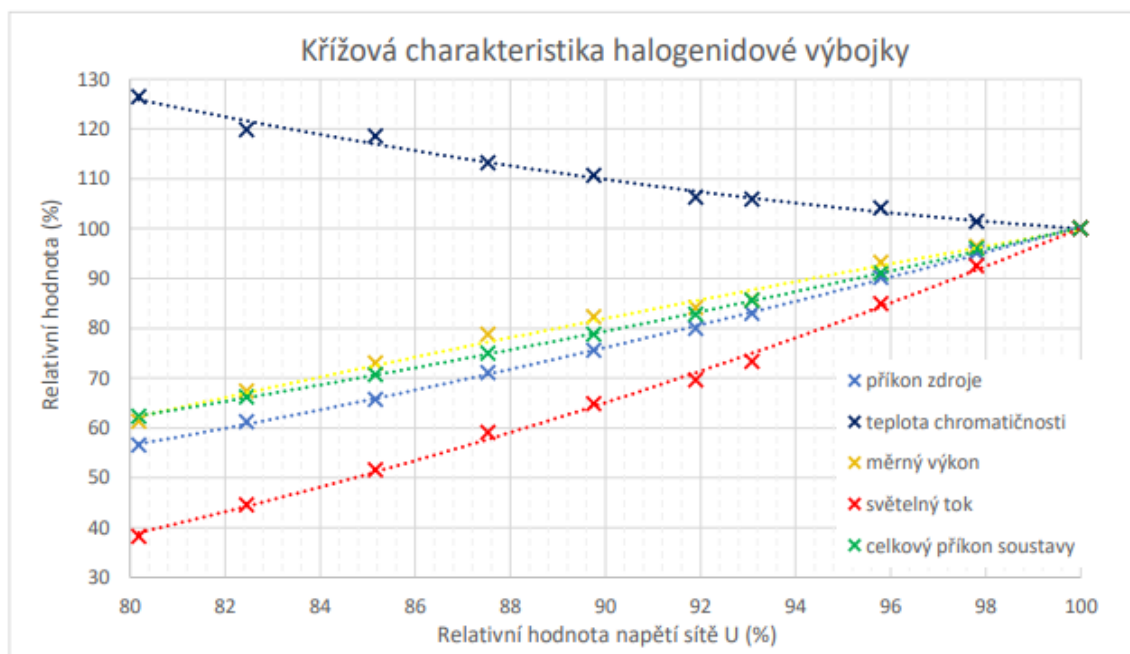
Dynamické řízení VO závislosti na intenzitě provozu využívá monitorování změn pomocí dopravních detektorů, které poskytují aktuální informace o provozu na pozemní komunikaci. Dopravní detektory jsou založeny na různých fyzikálních principech, od indukčních smyček uložených ve vozovce, přes snímače pohybu a přítomnosti (ultrazvukové, mikrovlnné, infračervené), po kamerové systémy. Důležité je, aby byl detektor schopen reagovat na tvorbu dopravních kolon [25].

7.4 Technické vybavení svítidel v souvislosti s regulací světelného toku

Kapitola se zaměřuje na možnosti regulace světelného toku výbojových a LED světelných zdrojů.

7.4.1 Regulace světelného toku

Výrobci světelných zdrojů v technických listech často uvádějí pouze informaci, zda daný zdroj lze regulovat či nikoliv (někdy i tato informace chybí). Stmívání vysokotlakých sodíkových výbojek je podle [26] omezena technickými vlastnostmi zdroje na 60 % jmenovité hodnoty příkonu. U halogenidových je to na 50 % jmenovité hodnoty příkonu. Pro regulaci se využívá především elektronických předřadných systémů. Je však zapotřebí zabývat se přímo způsoby regulace (změna napětí, změna frekvence nebo pulzně šířková modulace) u konkrétního typu zdroje, aby při snižování světelného toku nedocházelo například k změnám barvy emitovaného světla. Tato situace je znázorněna v Grafu 7.1, kde je regulován světelný tok halogenidové výbojky pomocí stmívače INTELUX – NG. Příkon zdroje byl regulován až na 56,5 % ze jmenovité hodnoty, což odpovídá snížení světelného toku na 38,2 % ze jmenovité hodnoty. Změna náhradní teploty chromatičnosti je v tomto případě více než 25 % z původní hodnoty (změna z 4 528 K na 5 726 K). Měrný výkon klesl o více než 30 % [26] [27].



Graf 7.1: Křížová charakteristika halogenidové výbojky, Osram 100 W Powerstar [27]

U vysokotlaké sodíkové výbojky (Osram 70 W) byl příkon řízen až na 50,5 % ze jmenovité hodnoty, což odpovídá světelnému toku 25,5 % ze jmenovité hodnoty. Měrný výkon v tomto případě klesl o více než 50 %. Hodnota náhradní teploty chromatičnosti se v tomto případě významně nezměnila. Zmíněné hodnoty regulace jsou však platné pouze pro zkoušené zdroje a pravděpodobně by se u jiných typů výbojek (např. pro vyšší hodnoty příkonů) lišily [27].

Světelný tok LED lze stabilně regulovat v plném rozsahu (tj. 1 – 100 %) beze změny barvy emitovaného světla. Zdroj [28] uvádí, že s rostoucí úrovní stmívání (pod 20 % ze jmenovitého světelného toku) se výrazně snižuje měrný výkon svítidla.

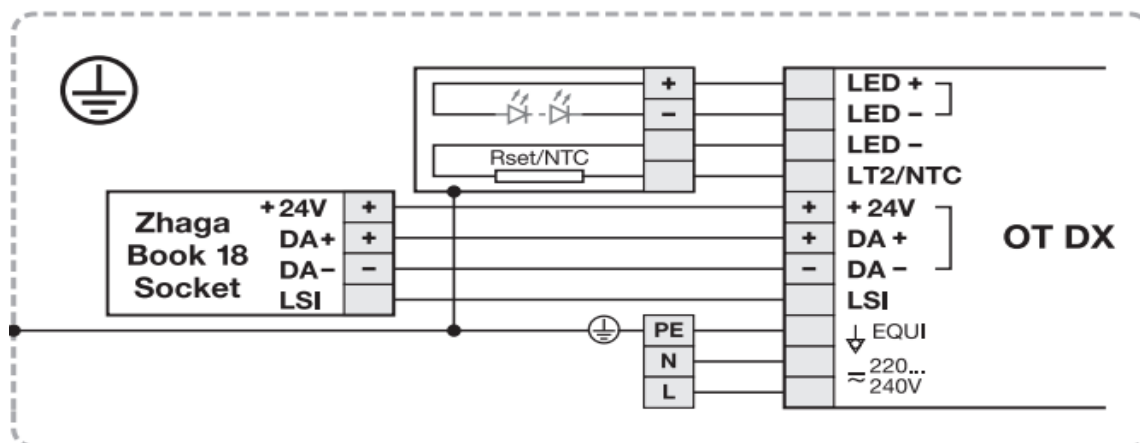
7.4.2 Předřadníky světelných zdrojů

Elektromagnetické předřadníky vysokotlakých sodíkových a halogenidových výbojek na trhu doplňují předřadníky elektronické. Základní funkce obou předřadníků je stejná, zapálit výboj a omezit proud procházející výbojem. Elektronické předřadníky jsou oproti těm elektromagnetickým stavěny na bázi polovodičových prvků a mohou obsahovat obvody, které umožňují změnu výstupního napětí a frekvence. Řídicí obvod elektronického předřadníku daného výbojového zdroje tak může být konstruován s externími vstupními svorkami pro řídicí signál (analogový či digitální), sloužící pro regulaci světelného toku zdroje.

Pro napájení světelných diod se používá jak zdrojů proudu, tak i zdrojů napětí. Vhodnější je napájení pomocí zdroje proudu, kde dodávaný proud není závislý na úbytcích napětí jednotlivých diod, ani na velikosti napájecího napětí. Dodávaný proud tak zůstává na konstantní hodnotě. Stmívání světelných diod zajišťují elektronické obvody pomocí pulzně šířkové modulace, nebo plynulým omezováním výstupního proudu (CCR – Constant Current Regulation). Při použití více pc-LED modulů (nejméně dvou, viz kapitola 3.1.1) o různých náhradních teplotách chromatičnosti můžeme docílit tzv. bio-dynamického osvětlení. Pro tuto aplikaci je nutné, aby měl elektronický předřadník dva nezávislé výstupní kanály, pro ovládání každého LED modulu. Řídicí signál pro předřadníky může opět analogový i digitální [9].

Elektronické předřadníky dovolují provést stmívání několika způsoby, přičemž zřejmě ty nejčastější jsou následující čtyři. Programovatelná autonomní funkce v předřadníku, která stmívá zdroj na základě integrovaných hodin vztažených k době zapnutí a vypnutí svítidla. Stmívání s využitím externí fáze, která „přepíná“ přednastavené režimy v předřadníku. Stmívání podle amplitudy napájecího napětí (režimy stmívání je opět možné softwarově upravit). Tento princip lze vhodně využít v kombinaci se svítidly, která jsou osazena elektromagnetickými předřadníky a na tomto principu je u nich dosahováno snížení světelného toku. A v poslední řadě řízení světelného toku s pomocí analogového rozhraní 0 - 10 V nebo digitálního rozhraní DALI (viz kapitola 7.4.3).

Poměrně nový způsob přístupu k ovládání svítidel je využití rozhraní pro osazení externích komunikačních a sensorových modulů na svítidla. Na Obr. 7.1 je uvedeno zapojení předřadníku s certifikací D4i (viz kapitola 7.4.3), které se zaměřuje na využití technologie DALI ve svítidlech s cílem zjednodušit integraci zmíněných externích modulů (mluvíme o tzv. intra-luminaire DALI technology). Svítidlo tak může být ovládáno (řízení a monitoring) bezdrátově. Ve znázorněném



Obr. 7.1: Zapojení inteligentního D4i předřadníku pro LED, zdroj: [34]

příkladu bude využit externí komunikační modul, kde rozhraním pro jeho osazení je standard Zhaga (viz kapitola 7.4.4). Tyto prvky mohou doplňovat dosud převládající ovládací systém svítidel řešený po silových kabelech ze zapínacích míst a zvyšovat flexibilitu systému.

7.4.3 Aplikace hromadného řízení osvětlovacích soustav

Jak jsem uvedl, předřadníky světelných zdrojů disponují různými možnostmi řízení. Režimové řízení se vcelku jednoduše aplikuje pomocí předem naprogramovaného předřadníku. Pro dynamické řízení světelných soustav lze použít například zmíněné funkce s využitím externí fáze nebo řízení podle amplitudy napájecího napětí. Případně lze využít jejich různých modifikací, kdy řízení probíhá pomocí silových kabelů mezi svítidly a rozvaděčem, který dále může komunikovat s nadřazeným řídicím systémem. V tomto případě se jedná o jednosměrnou komunikaci rozvaděč-svítidlo. Pokud se jedná o obousměrnou komunikaci, lze využít přímo standard DALI, kde komunikace mezi předřadníkem a řídicím prvkem probíhá po DALI sběrnici se dvěma vodiči. Taktéž je možné využít již zmíněnou intra-luminaire DALI technologii. DALI sběrnice je pouze uvnitř svítidla a slouží pro přenos dat mezi předřadníkem a komunikačním prvkem, který může být postaven na sítích GSM/GPRS, 4G/LTE nebo na sítích LPWAN, jako jsou například LoRa, ZigBee či IB-IoT. Svítidlo je v tomto případě vybaveno komunikačním modulem.

Rozhraní DALI

Jedním z nejrozšířenějších systémů pro řízení vnitřních i venkovních osvětlovacích soustav je systém DALI (Digital Addressable Lighting Interface). DALI je nástupcem analogových řídicích systémů osvětlení napěťovým signálem 0 – 10 V / 1 – 10 V (tyto systémy se stále využívají). Komunikace probíhá po dvou vodičové sběrnici (obvyklé označení DA/DA nebo DA+/DA-), která může být vedena v souběhu se silovým vedením. Délka sběrnice je maximálně 300 m a počet připojitelných zařízení na jednu DALI sběrnici je 64. Řídicí prvek sběrnice umožňuje v rámci obousměrné komunikace ovládání, konfiguraci a dotazování připojených zařízení [9].

Standard D4i

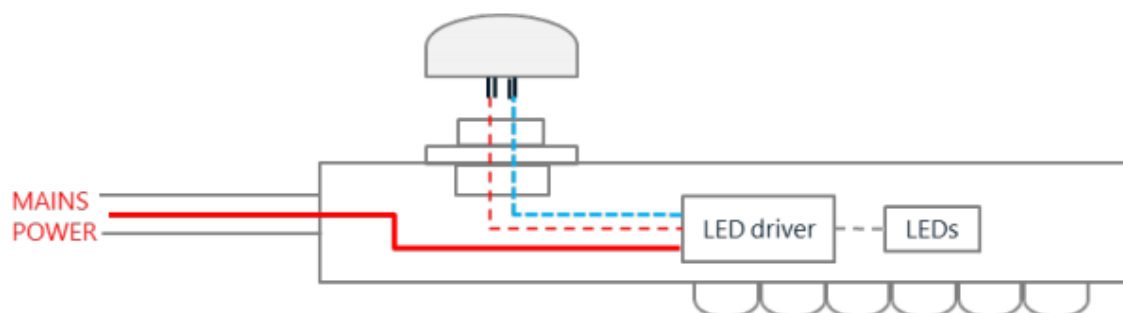
D4i je standardizované rozhraní mezi LED předřadníkem a komunikačními, případně sensorovými prvky. Předřadníky s D4i certifikací mohou napájet zařízení přímo po DALI sběrnici, to se týká zejména sensorů. Pro zařízení s vyššími nároky na napájení, například komunikační moduly, je možné přidat pomocný zdroj 24 V, který může být integrován přímo v předřadníku [29].

7.4.4 Rozhraní pro externí komunikační a sensorové moduly

Pro připojení externích komunikačních a sensorových modulů k svítidlům je využíváno rozhraní Zhaga (standard Zhaga Book 18) a NEMA (standard NEMA ANSI C136.41). Ty specifikují mechanické, elektrické a komunikační rozhraní mezi externím prvkem, svítidlem a předřadníkem. Specifikace vyráběných modulů, které jsou postavené na těchto dvou rozhraních, jsou velmi různorodé. Liší se použitou komunikační sítí i technickým vybavením. Moduly mohou obsahovat například GPS lokátor, fotodetektor či senzor teploty.

Zhaga socket

Mezinárodní konsorcium Zhaga publikovalo tzv. Zhaga Book 18¹⁰, která inteligentní rozhraní specifikuje. Na Obr. 7.2 je zřetelná struktura osazení modulu a jeho elektrické napájení. Komunikace mezi modulem a předřadníkem je pouze digitální, a to pomocí sběrnice DALI (vyznačena modře).

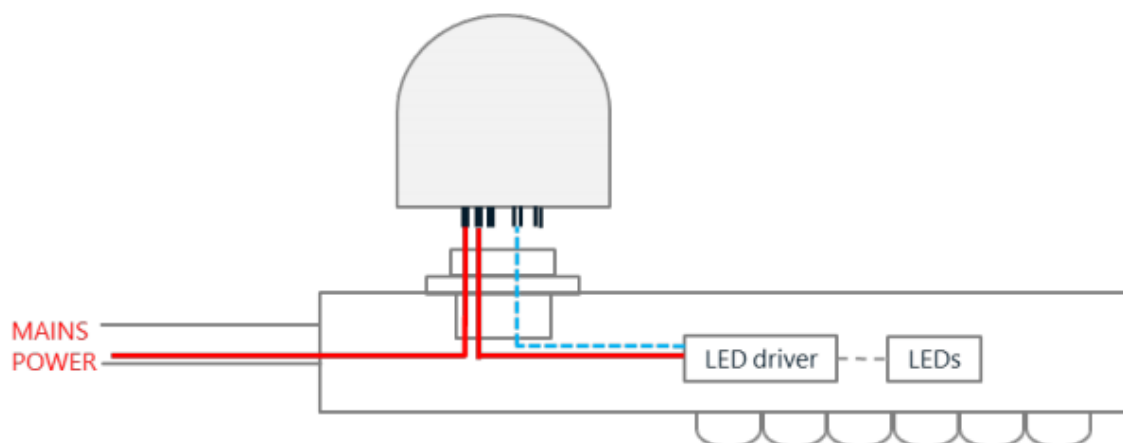


Obr. 7.2: Architektura Zhaga [30]

Rozhraní Zhaga je čtyř pinové, dva piny jsou pro napájení modulu a zbylé dva pro DALI sběrnici. Konsorcium Zhaga společně s DALI vytvořilo jednotnou certifikaci Zhaga-D4i. Certifikace pokrývá důležité oblasti v rámci svítidla, jako jsou mechanické uložení jednotlivých prvků (předřadníků a periferních zařízení), komunikace mezi nimi a požadavky na jejich napájení v rámci svítidla (technologie plug-and-play). Zhaga-D4i zaručuje interoperabilitu světelných zdrojů, předřadníků, senzorů a komunikačních modulů, což umožňuje jednodušší integraci do praktického využití. Architektura Zhaga-D4i dále předpokládá možnost umístit na svítidlo dvě externí zařízení, jedno shora (například komunikační modul) a jedno zdola (například senzor pohybu) [30].

NEMA socket

Architektura NEMA je definována standardem ANSI C136.41 a stejně jako Zhaga definuje mechanické, elektrické a komunikační rozhraní mezi externím prvkem a svítidlem. Architektura je znázorněna na Obr. 7.3.



Obr. 7.3: Architektura NEMA [30]

¹⁰ Book 18: Smart interface between outdoor luminaires and sensing / communication modules. *Zhaga standard* [online]. [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: <https://www.zhagastandard.org/books/overview/smart-interface-between-outdoor-luminaires-and-sensing-communication-modules-18.html>

V tomto případě je napájení vedeno přes externí modul a z něj je následně napájen předřadník. Typický NEMA externí prvek tedy zajišťuje napájení předřadníku, jeho napěťové řízení, přepětovou ochranu, měření spotřeby energie a obsahuje komunikační moduly. Z tohoto důvodu je oproti Zhaga modulu rozměrově větší, což může být indispozice pro vzhledově laděná svítidla. Rozhraní NEMA je vyráběno ve verzích se třemi, pěti nebo sedmi piny, z toho jsou vždy tři napájecí a zbylé dva nebo čtyři komunikační. Řídicí technologie je možná jak digitální (DALI protokol) tak i analogová (0 – 10 V). V případě tří pinového rozhraní je možné připojení pouze fotosenzoru [30].

8. Vyhodnocení neúčinného světelného toku osvětlovacích soustav

Praktická část práce se zabývá stanovením světelného toku unikajícího do horního poloprostoru a dopadajícího do míst mimo osvětlovanou oblast s využitím počítačové simulace (dále jen simulace) v programu Dialux 4.

Neúčinný světelný tok je vyhodnocován z městské části Praha 6. Pohled je zaměřen výlučně na osvětlovací soustavy pozemních komunikací a městských parků, které jsou pod správou Technologií hlavního města Prahy (dále jen THMP). Informace o světelných místech jsou k dispozici na portálu *zjisti.si*. V práci vůbec neuvažují architekturní a slavnostní osvětlení a přísvětlení přechodů pro chodce.

Uváděná rozloha Prahy 6 je 41,5 km², přičemž značnou část zabírá Letiště Václava Havla, přírodní park Divoká Šárka, obora Hvězda apod. Rozloha obydleného území je tak zhruba poloviční, tedy 20 km².

8.1 Pracovní postup

Kvantifikace neúčinného světelného toku s využitím počítačového modelu z takto rozsáhlého území je možná pouze s velmi značným zjednodušením, které bude v následující části textu objasněno. Simulace je založena na řadě modelových pozemních komunikací, které se liší šířkou a charakterem zástavby, jenž má v simulaci vliv na rozložení okolních objektů podél komunikace. Celková délka daného **typu komunikace** (typem komunikace je myšlena komunikace jednotné šířky v jednom charakteru zástavby) je s pomocí zvolené rozteče mezi svítidly přepočtena na celkový počet svítidel v daném typu komunikace. V Dialuxu jsou následně vytvořeny modely jednotlivých **typů komunikace** v řádu stovek metrů, které obsahují referenční počet svítidel. Vyhodnocené nežádoucí účinky osvětlovací soustavy v tomto referenčním úseku komunikace jsou přepočteny na celkový počet svítidel daný celkovou délkou daného **typu komunikace**. V simulacích vycházím ze současného stavu osvětlovacích soustav, není brán žádný ohled na kvantitativní a kvalitativní účinky osvětlení vozovky ve vytvořeném modelu.

Výše zmíněné atributy, šířka komunikace a charakterech zástavby, vycházejí z Manuálu tvorby veřejných prostranství hl. města Prahy (dále jen Manuál, [22]), který byl vytvořen Institutem plánování a rozvoje hl. města Prahy (dále jen IPR). Manuál definuje členění města podle charakteru zástavby na:

- historické město: nepravidelné bloky, užší ulice, zákoutí, průchody (např. Staré město)
- kompaktní město: souvislá naplánovaná struktura, bloková zástavba (Vinohrady)
- zahradní město: rozvolněná zástavba menšího měřítka, zástavba rodinných domů (Hanspaulka)
- modernistické město: rozvolněná zástavba, kompozice hmot ve volném prostoru uspořádaná do monofunkčních, komerčních nebo obytných celků (Jižní město)
- původní sídla a obce: rostlá struktura venkovského typu (Stodůlky)
- příměstská krajina: přírodní prvky a krajinné celky (Divoká Šárka)

Manuál dále předkládá možné řešení uličních profilů a jejich provozního uspořádání v závislosti na šířce ulice. Profily ulic jsou vymezeny šířkami: 8, 12, 15, 18, 24, 30 a 40 m [22].

8.1.1 Členění zástavby Prahy 6

Na základě uvedených atributů je vyhodnocovaná oblast Prahy 6 rozčleněna. V simulaci využívám celkem čtyři charaktery města. Jedná se především o **kompaktní** blokovou městskou zástavbu zejména v okolí Vítězného náměstí, typickou oblastí jsou bloky mezi Vítězným náměstím, zastávkou metra Hradčanská a Puškinovým náměstím. Dále také část ulic v městské části Břevnov (Bělohorská, Šlikova, Liborova apod.). Převažujícím charakterem zástavby v Praze 6 je **zahradní** město, například oblast Bílé Hory, Hanspaulky a Ořechovky. Sídliště Petřiny, Sídliště Červený vrch nebo oblast Strahova jsou zase typy zástavby spadající do charakteru **modernistického** města. Posledním významnějším charakterem zástavby v Praze 6 je **příměstská** krajina, do které jsem zařadil osvětlené lesní cesty v Šáreckém údolí, ale také veškeré osvětlené parkové plochy (např. park Ladronka, oblast Kajetánky, park Marie Terezie), a dále parkové plochy okolo sídlišť a zelených náměstí. Do této kategorie jsou také zařazeny komunikace, které obklopuje nezastavěný volný prostor krajiny (např. ulice Horoměřická, část Bělohorské ulice).

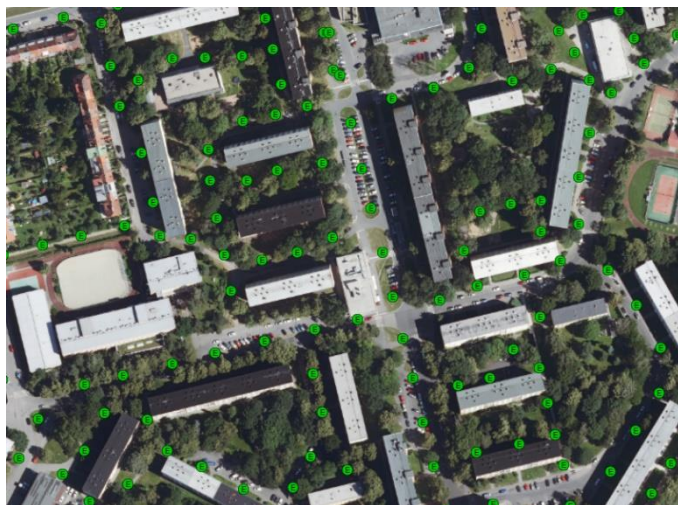
Na Obr. 8.1 je uveden příklad zatřídění části Břevnova a Strahova do jednotlivých charakterů zástavby.



Obr. 8.1: Zatřídění charakterů zástavby v oblasti Břevnova a Strahova, zdroj: [mapový prohlížeč <https://ctuprague.maps.arcgis.com/home/index.html>]

Zcela přirozeně se značná část ulic těžko zařazovala do uvedených charakterů zástavby. V těchto případech jsem se zaměřil na převládající vlastnosti dané komunikace a do některého z charakterů zástavby ji zařadil.

Obr. 8.2 zobrazuje část Sídliště Petřin z portálu zjistisi. Zelené body označují umístění světelných míst. Na základě těchto podkladů jsou v práci zohledněny i osvětlené cesty v okolí sídlišť a osvětlené parkové plochy.



Obr. 8.2: Osvětlené plochy mezi bytovými domy, zdroj: [zjistisi]

případě by došlo k velkému zpřesnění práce v tom směru, že bych věděl přesný počet svítidel (a k tomu související informace) pro daný **typ komunikace**. Bohužel k tomuto kroku nebyly mé záznamy uzpůsobeny a toto propojení se nepodařilo. Materiál od THMP jsem však využil pro závěrečné porovnání počtů jednotlivých typů svítidel, tedy kolik jsem jich využil napříč všemi mnou stanovenými **typy komunikací** (to vyplývá z celkové délky typu komunikace a zvolené rozteče mezi svítidly) a kolik jich reálně je v městské části Praha 6. Dále jsem tento materiál využil při stanovování modelových úseků pro jednotlivé typy komunikací v Dialuxu. Podle něj jsem definoval výšky zavěšení svítidel a typy světelných zdrojů pro jednotlivé příkony.

8.2 Specifikace světelných míst

Vytvářet obecné počítačové modely ulic pro rozsáhlé a různorodé oblasti je velmi obtížné. Nejen že se modelová komunikace vzhledem k rozmístění objektů v realitě nejspíše nevyskytuje, ale ani není možné v modelu zohlednit obrovské množství odlišných odrazných ploch, které jsou různě umístěné a směřované. Stejně tak nelze v modelech zohlednit a respektovat specifikace všech světelných míst. V této kapitole budou objasněny kroky vedoucí ke zjednodušení komplexity světelných míst, tak aby bylo možné vytvoření obecných modelů pro umožnění simulace. V kapitole 8.3 pak uvedu kroky vedoucí k vytvoření počítačových modelů, které odpovídají jednotlivým charakterům zástavby.

8.2.1 Svítidla

Podle materiálu od THMP je v městské části Praha 6¹¹ celkem 13 089 kusů svítidel elektrického osvětlení kromě svítidel pro přisvětlení přechodů. V práci neuvažuji svítidla se světelnými diodami, výbojová svítidla s příkonem 400 W a zářivková svítidla (celkem 189 kusů svítidel). Referenční počet svítidel pro tuto práci je tak 12 900 kusů. Následující tabulka, Tab. 8.1, blíže specifikuje nejčastěji využívané typy svítidel v závislosti na příkonových řadách světelných zdrojů (typy svítidel se zastoupením < 100 jsou zařazeny do buňky „ostatní“).

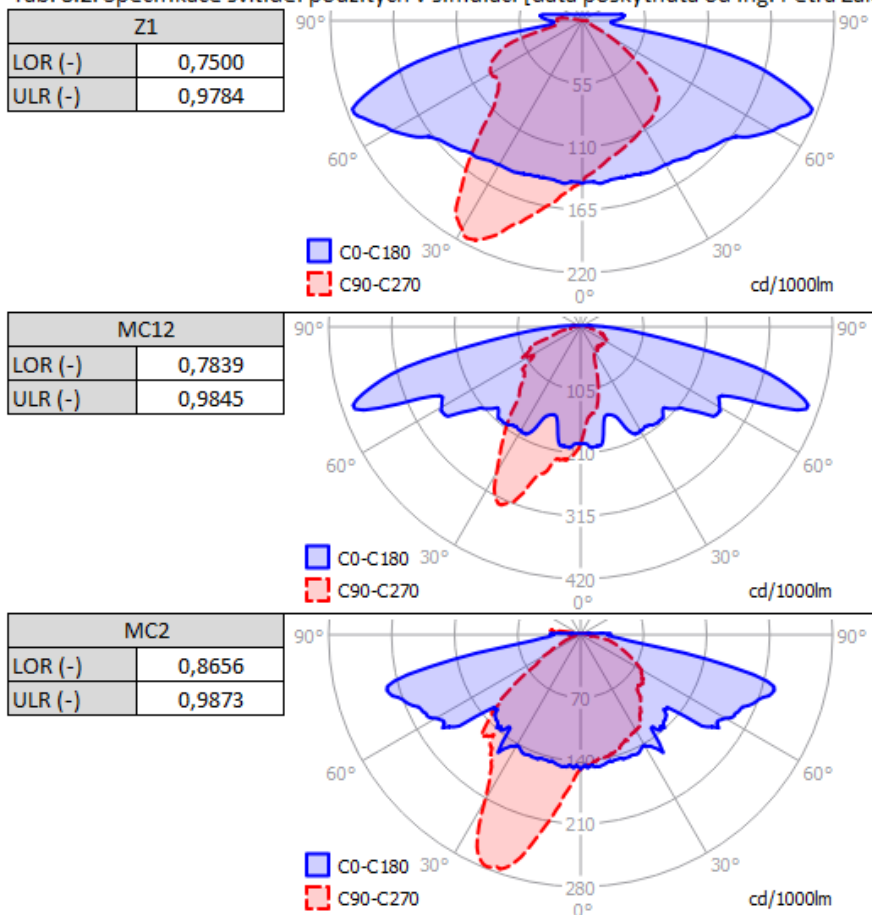
Tab. 8.1: Nejčastěji využívaná svítidla pro jednotlivé příkony světelných zdrojů [data poskytnuta THMP]

Příkon světelného zdroje (W)	50					
Svítidlo	Z1	MC12	MARS	ostatní	celkem	
Počet (ks)	4 425	344	1 407	335	6 511	
Příkon světelného zdroje (W)	70					
Svítidlo	Safír 12	MC2	MC12	MARS	ostatní	celkem
Počet (ks)	340	198	790	2 054	377	3 759
Příkon světelného zdroje (W)	100					
Svítidlo	Safír 12	Safír 2	MC2	Orion	ostatní	celkem
Počet (ks)	126	117	700	205	171	1 319
Příkon světelného zdroje (W)	150					
Svítidlo	MC2	Safír 2	ostatní	celkem		
Počet (ks)	772	123	79	974		
Příkon světelného zdroje (W)	250					
Svítidlo	MC2	ostatní	celkem			
Počet (ks)	243	94	337			

¹¹ Katastrální území Břevnov, Bubeneč, Dejvice, Hradčany, Liboc, Ruzyně, Sedlec, Střešovice, Veleslavín, Vokovice

Pro svítidla, která jsou podle Tab. 8.1 na Praze 6 nejvíce zastoupena mám k dispozici soubory s jejich fotometrickými daty (tzv. eulumdata). Tato svítidla byla zamýšlena použít do simulací. Z důvodu následujících problémů tak ale nebylo učiněno. První problém vyplynul z nemožnosti sloučit mnou shromážděná data o pozemních komunikacích (délka, šířka, charakter zástavby) s databázovým materiálem od THMP. Není tedy známo, jaký typ svítidel, a jeho počet, je osazen v dané šířce komunikace a daném charakteru zástavby. Druhý problém byl ve fotometrických datech početně zastoupeného svítidla MARS. Z fotometrických dat tohoto svítidla vyplývá, že není žádný světelný tok svítidlem vyzařován přímo do horního poloprostoru (tedy $ULR = 0$). To je u tohoto svítidla velmi nepravděpodobné. Jeho vyzařovací charakteristiky byly zřejmě změřeny pouze pro dolní poloprostor. Třetí problém je spojen s nepraktičností při simulacích v Dialuxu v závislosti na celkovém vyhodnocení vypočtených dat. Počet simulací se zvyšuje na úkor přehlednosti problematiky této práce. Z těchto důvodů jsou vybrány pouze svítidla nejvíce zastoupená v jednotlivých příkonových řadách, přičemž svítidlo MARS vzhledem ke zmíněným problémům neuvažuji. Pro světelné zdroje o příkonu 50 W je to svítidlo Z1, pro 70 W svítidlo MC12, pro 100 W svítidlo MC2, pro 150 W svítidlo MC2 a pro 250 W rovněž svítidlo MC2. Poměrné činitele svítidel (LOR a URL) jsou spolu s křivkami svítivosti uvedeny v Tab. 8.2.

Tab. 8.2: Specifikace svítidel použitých v simulaci [data poskytnuta od Ing. Petra Žáka, Ph.D.]



8.2.2 Světelné zdroje

Pro jednotlivé příkonové řady (50 W – 250 W, viz Tab. 8.1) vysokotlakých výbojových zdrojů jsem z materiálu od THMP zjistil ty nejvíce zastoupené typy výbojek. Pro ně byl u výrobce dohledán jejich světelný tok (viz Tab. 8.3). Nejvíce zastoupeny jsou vysokotlaké výbojky Tulox od společnosti Tungsram.

Tab. 8.3: Nejčastěji využívané světelné zdroje pro jednotlivé příkonové řady, zdroj: [data poskytnuta THMP, <https://catalog.tungsram.com/lamp/high-intensity-discharge/high-pressure-sodium-lamps/d=0/?r=emea>]

Příkon světelného zdroje (W)	Světelný tok (lm)	Označení výbojky
50	4 400	LU50W/85/XO/T/E27
70	6 600	LU70W/90/XO/T/E27
100	9 600	LU100W/100/MO/T/E40
150	17 500	LU150W/100/XO/T/E40
250	33 000	LU250W/100/XO/T/E40

Tyto hodnoty světelného toku jsou zaneseny do fotometrických dat svítidel použitých v simulaci (tj. svítidlo Z1, MC12 a MC2, viz kapitola 8.2.1).

8.2.3 Rozteče a výšky stožárů

Jak jsem zmínil v úvodu kapitoly 8.1, tato práce je založena na celkové délce daného **typu komunikace**, ze které je s pomocí definované rozteče mezi svítidly stanoven počet svítidel v daném typu komunikace. V tomto bodě nastává značná nepřesnost mého postupu simulace. V dalších kapitolách bude ukázáno, že celkový počet svítidel zahrnutých do simulace se vcelku dost liší od reálného počtu, který uveden v kapitole 8.2.1. V ručním měření a zatřídování komunikací v mapových podkladech jsem nebyl schopen jít do takové hloubky, abych zohlednil uspořádání svítidel na všech komunikacích v Praze 6. Tedy zda je osvětlovací soustava vystřídaná, oboustranná, nebo zda jsou stožáry uprostřed vozovky. Počet svítidel na těchto komunikacích je poté násobkem počtu svítidel, které jsem zjistil z délky a z roztečí mezi svítidly (tj. násobkem oproti počtu svítidel v jednostranné soustavě). Osvětlovací soustavy s jiným, než jednostranným uspořádáním, jsem zohlednil pouze u několika významných dopravních komunikací (např. ulice Evropská, Bělohorská, Patočkova apod.).

V charakterech zástavby modernistického města (viz Obr. 8.8) a kompaktního města s otevřenou zástavbou (viz Obr. 8.11) je při čtení výsledných hodnot důležité, vzhledem ke značné nesymetričnosti modelu, vzít na vědomí umístění jednostranné osvětlovací soustavy v počítačovém modelu.

Druhým stěžejním atributem, který má vliv na počet svítidel zahrnutých do simulace je již zmíněná rozteč mezi svítidly. I s ohledem na přehlednost pracovního postupu a snížení počtu simulací v Dialuxu byla nutná jednotná kategorizace. V tomto případě jsem opět vycházel z mapových podkladů a pro jednotlivé šířky vozovek naměřil zhruba patnáct vzdáleností mezi svítidly¹², v pokud

¹² Pro správnost tohoto měření by samozřejmě měl být brát v potaz typ svítidla, potažmo jeho křivky svítivosti. V této práci jsem se tímto nezaobíral.

možno rovném úseku nepřerušeném křižovatkou. Z tohoto průzkumu jsem stanovil rozteč mezi svítidly 25 m pro charakter zástavby příměstská krajina a pro šířku ulic 8 m v charakteru zástavby zahradní, modernistické a kompaktní město. Pro všechny zbylé šířky ulic je stanovena rozteč svítidel na 30 m bez ohledu na uspořádání svítidel na komunikaci (tyto rozteče jsou využity v modelech v Dialuxu).

Další aspekt, který jsem řešil při vytváření modelů komunikací v Dialuxu je výška uložení svítidla. Zde jsem opět využil databázový materiál od THMP, ve kterém jsem s pomocí filtrů hledal nejvíce zastoupenou výšku stožáru pro jednotlivé příkonové řady světelných zdrojů. Výsledek předkládá Tab. 8.4.

Tab. 8.4: Nejčastější výška stožáru pro jednotlivé příkonové řady světelných zdrojů, zdroj: [data poskytnuta THMP]

Příkon světelného zdroje (W)	Výška stožáru (m)
50	5
70	10
100	10
150	12
250	12

8.3 Modely komunikací

V této kapitole budou uvedeny kroky, které vedly k vytvoření počítačových modelů pro jednotlivé charaktery zástavby¹³. V modelech vůbec nepracuji s dřevinami (keře, stromy). Ty spíše napomáhají svítidla clonit a pro tuto práci je jejich použití nepodstatné.

8.3.1 Činitel odrazu

Primární roli v jakékoli světelné scéně mají vlastnosti použitého zdroje světla. Následné procesy probíhající ve světelné scéně jsou sekundárně ovlivněny zejména odrazem světelného toku od světelně činných objektů. Při odrazu dochází ke změně směru toku světla a mění se tak parametry celé světelné scény. V počítačových simulacích, které využíváme pro analýzu parametrů v osvětlované oblasti, hraje činitel odrazu velmi důležitou roli. Odraznost materiálů je však velmi komplexní jev (více v [9], [33]), který je při počítačovém modelování zjednodušován. Samotné vyhodnocení odraznosti materiálu je po technické stránce náročné na realizaci [33].

V průběhu vypracování této práce jsem řešil stanovení hodnot činitele odrazu pro fasády budov, které využívám v počítačových modelech. Například kniha [9] uvádí činitel odrazu omítek „asi 40 %“. Zajímalo mě, jak se pohybují tyto hodnoty v reálných podmínkách. Spolu s vedoucím práce Ing. Markem Bálským, Ph.D. jsme 9. dubna tohoto roku ve večerních hodinách provedli **orientační** měření činitele odrazu vybraných vzorků fasád v okolí budovy FEL v Dejvicích. K měření byl využit fakultní reflektometr pro měření integrálního činitele odrazu difuzních materiálů. Důležité je zdůraznit, že se jedná pouze o orientační měření, při kterém je předpokládáno, že je měřený materiál difuzní. To znamená, že odražený světelný tok od takového materiálu je rovnoměrně rozptýlen do okolního prostoru. Tedy jas elementu daného materiálu je ve všech směrech stejný

¹³ Počítačové modely jednotlivých charakterů zástavby jsou pro referenční šířku komunikace součástí příloh.

(dále viz [9]). Rovnoměrně rozptýlný odraz u materiálů fasád nelze očekávat. Jejich povrch není zajiště dokonale hladký. Je tvořen znatelnými nerovnostmi, které jsou pozorovatelné zrakem. Při dopadu světelného toku na element plochy fasády tak nedochází k rovnoměrně rozptýlnému odrazu. Bylo proměřeno zhruba dvacet typů povrchů fasád, různých nerovností a barevných provedení. Z toho jsem následně vybral šest hodnot, které byly měřeny na fasádách co nejvíce blížících se hladkému povrchu s jednotnou strukturou v oblasti měřeného místa (viz Tab. 8.5).

Tab. 8.5: Naměřené hodnoty činitele odrazu - orientační měření

Adresa	Činitel odrazu (-)
Jugoslávských Partyzánů 22	0,40
Jugoslávských Partyzánů 24	0,24
Jugoslávských Partyzánů 26	0,39
Roosveltova 9	0,53
Někrasova 7	0,58
Lotyšská 10	0,27

O činitelích odrazu pojednává i technická norma [7], která v kapitole 4.9.6 tyto hodnoty pro světelně-technické výpočty standardizuje. Ty pro vybrané situace nabývají následujících hodnot: pozemní komunikace 0,10, ostatní vodorovné plochy 0,15, svislé plochy 0,45, vzrostlá zeleň 0,10.

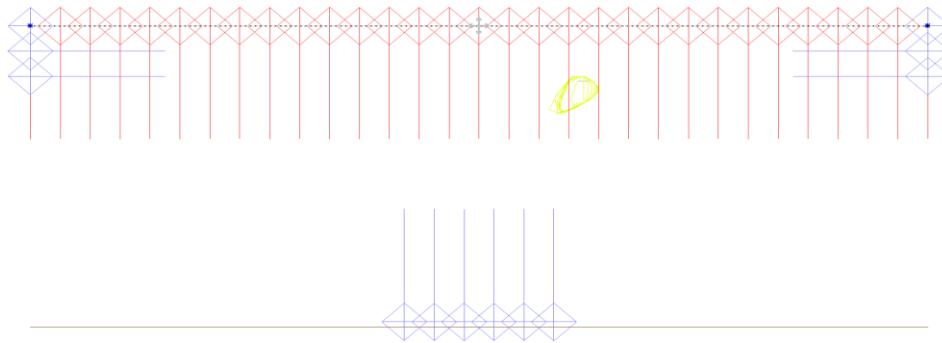
S ohledem na zmíněnou normu je v simulacích této práce činitel odrazu komunikací stanoven na 0,10, ostatních vodorovných ploch na 0,15 a střech na 0,45. Fasády budov využívají hodnoty z proběhlého orientačního měření. Činitele odrazu jsou jednotlivým fasádám přiřazeny zcela náhodně. Činitel odrazu okenních ploch je stanoven na 0,18, s ohledem na [20].

Udržovací činitel osvětlovacích soustav v simulacích $MF = 1$.

8.3.2 Výpočtové modely

Jak již bylo nastíněno, v Dialuxu jsou vytvořeny čtyři základní výpočtové modely (tj. pro každý charakter zástavby jeden model úseku komunikace), přičemž každý z nich je dále modifikován pro požadované šířky komunikací (podle mé rešerše). Všechny vytvořené modely obsahují pět referenčních světelných zdrojů. Délka modelového úseku komunikace pro rozteč mezi svítidly 25 m je 150 m a pro rozteč mezi svítidly 30 m je 180 m. Do vytvořených modelů je vloženo šest výpočtových rastrů, které kvantifikují neužitečné světlo směřující do horního poloprostoru a do nerelevantních oblastí okolo osvětlované vozovky (fasády budov, zahrady, okolní parkové plochy). Jejich umístění je principiálně uvedeno na Obr. 8.4 (model pro příměstské město). Jeden rastr je v rozměrech půdorysu modelu umístěn v horizontální rovině jeden metr nad svítidly (viz červeně označené výpočtové body v Obr. 8.4). Další čtyři jsou umístěny ve vertikální rovině podél okrajů modelu, přičemž jejich výška je stanovena vzdáleností mezi horním rastrem a výškou uložení svítidla (viz modře označené body v Obr. 8.4). Na obrázku nejsou pro přehlednost vykresleny zbylé dva vertikálně uložené rastry v čelech modelu. Výpočtové rastry vyhodnocují průměrnou osvětlenost $E_{průměr}$ která je ze znalosti plochy rastru S_{rastr} přepočtena na světelný tok Φ , viz rovnice 8.1.

$$\phi = E_{průměr} \cdot S_{rastr} \quad (Im) \quad (8.1)$$



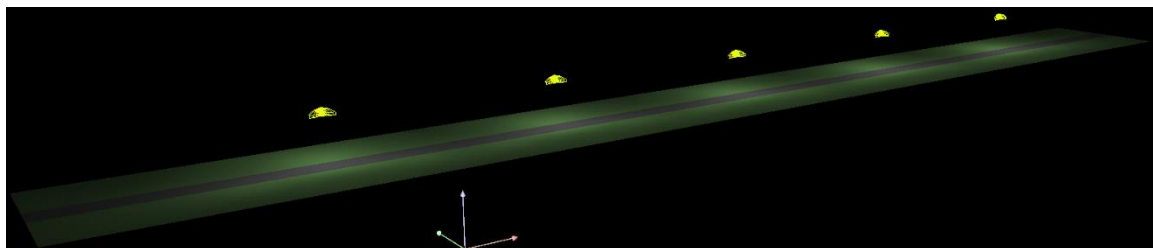
Obr. 8.4: Principiální rozmístění výpočtových rastrů

Zmíněné výpočtové rastry vyhodnocují světelný tok vyzářený svítidly přímo do horního poloprostoru a také světelný tok odražený od osvětlované scény. Poslední rastr přesně kopíruje půdorys vozovky. Pomocí tohoto rastru je zjištěno, kolik světelného toku dopadne na vozovku. Při znalosti celkového světelného toku vyzářeného svítidly ve světelné scéně modelu je následně dopočítán světelný tok, který je vyzářen mimo osvětlovanou oblast vozovky. Tento výpočet je velmi ovlivněn umístěním svítidel v modelu. Opět jsem se snažil pozici svítidel vůči vozovce standardizovat a brát v potaz reálné specifikace uličních profilů (bude uvedeno v dalším textu).

Dialux má vedle výpočtových rastrů i výpočtové plochy, u kterých na rozdíl od rastrů nelze definovat počet výpočtových bodů. Bylo provedeno několik pokusů s výpočtovými prvky, aby jejich výsledné hodnoty co nejvíce odpovídaly realitě. Výpočty byly odzkoušeny na modelu charakteru zástavby příměstské krajiny, ve kterém činitel odrazu všech světelně činných ploch byl roven nule (vyhodnocovací prvky počítají pouze přímou složku světelného toku vyzářenou svítidly do horního poloprostoru). Výsledné hodnoty byly porovnány se známým činitelem *ULR* svítidel umístěných ve světelné scéně. Nejlepší výsledky byly zaznamenány právě pro rastry se vzdáleností mezi výpočtovými body 0,5 m. Při tomto nastavení se hodnota *ULR* svítidel shodovala s hodnotou vyhodnocenou rastrem. Pro různé modely v průběhu vypracování práce pak vypočtená hodnota kolísala oproti hodnotě dané fotometrickými daty svítidel v řádu desetin procenta.

8.3.3 Model příměstské krajiny

Na Obr. 8.5 je uveden vytvořený model příměstské krajiny, který jako jediný nemá žádné další modifikace šířek vozovky. Šířka modelu je 15 m, šířka vozovky stanovena na 2,5 m. Svítidla jsou umístěna 0,5 m vně od hrany vozovky. Rozmístění výpočtových rastrů vychází z Obr. 8.4.

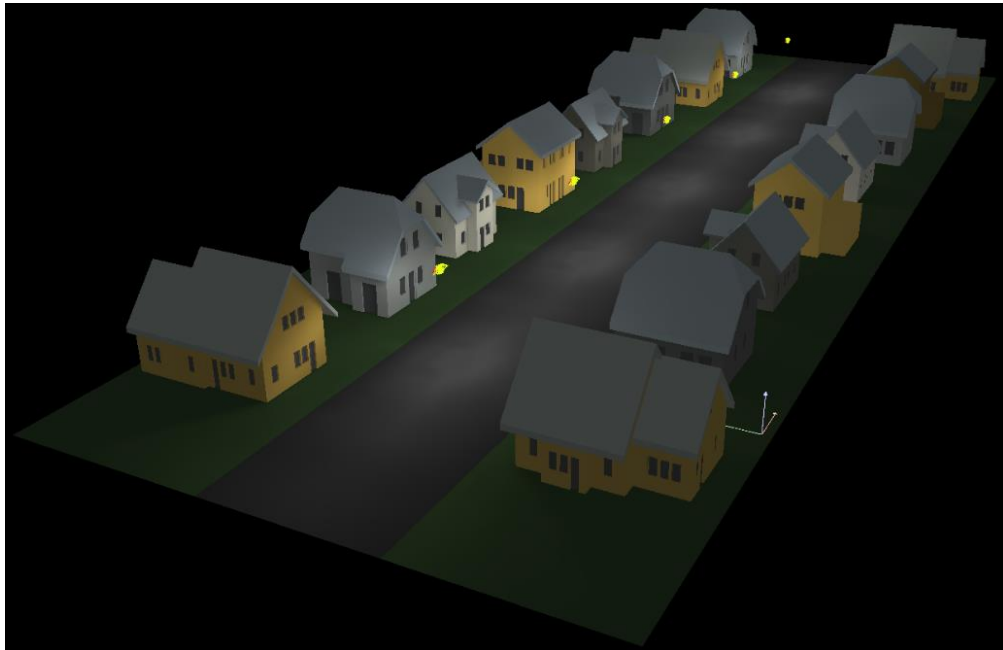


Obr. 8.5: Model příměstské krajiny

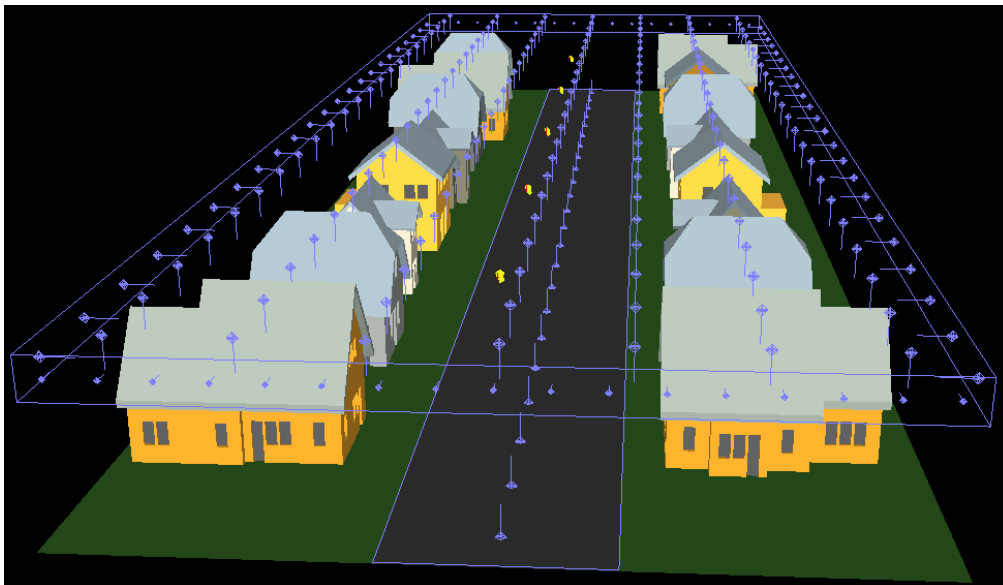
Jelikož byly v charakterech zahradního a modernistického města zaznamenány úseky bez okolní zástavby procházející volnou krajinou, jsou tyto výsledky přiřazeny do výsledků pro příměstskou krajinu (viz kapitola 8.4.1).

8.3.4 Model zahradního města

Vytvořený model pro tento charakter zástavby je znázorněn na Obr. 8.6. Šířka modelu se odvíjí od šířky vozovky. Pro šířky vozovky 8 – 12 m jsou svítidla umístěna 3 m od hrany vozovky (uvnitř). Pro šířky > 12 m jsou umístěna 5 m od hrany vozovky (uvnitř). Toto platí pro všechny dále zmíněné modely. Principiální umístění výpočtových rastrů je uvedeno na Obr. 8.7.



Obr. 8.6: Model zahradního města, šířka vozovky 15 m



Obr. 8.7: Principiální umístění výpočtových rastrů zahradního města, šířka vozovky 15 m

8.3.5 Model modernistického města

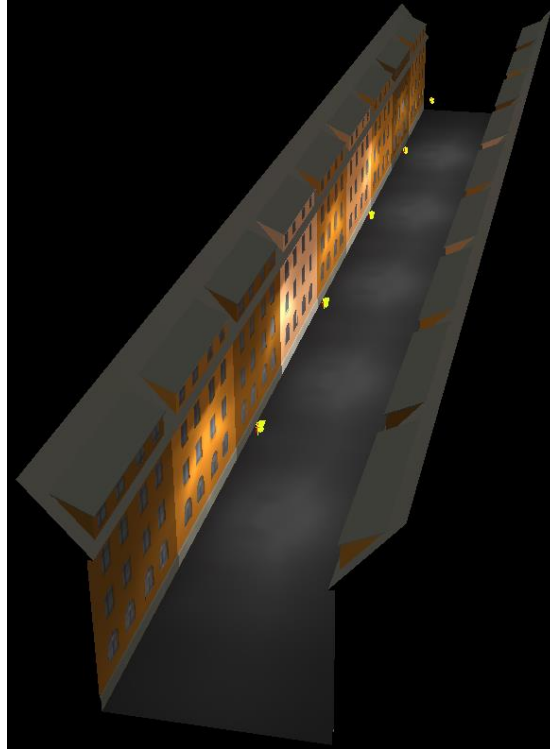
Model je zobrazený na Obr. 8.8. Princip umístění výpočtových rastrů je stejný jako je uvedeno na Obr. 8.7.



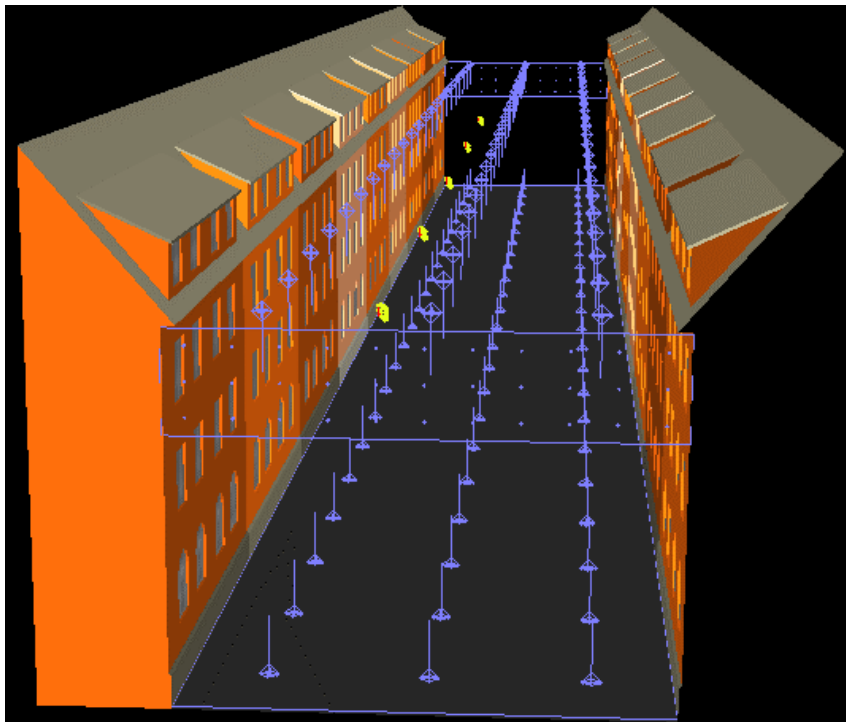
Obr. 8.8: Model modernistického města, šířka vozovky 12 m

8.3.6 Model kompaktního města

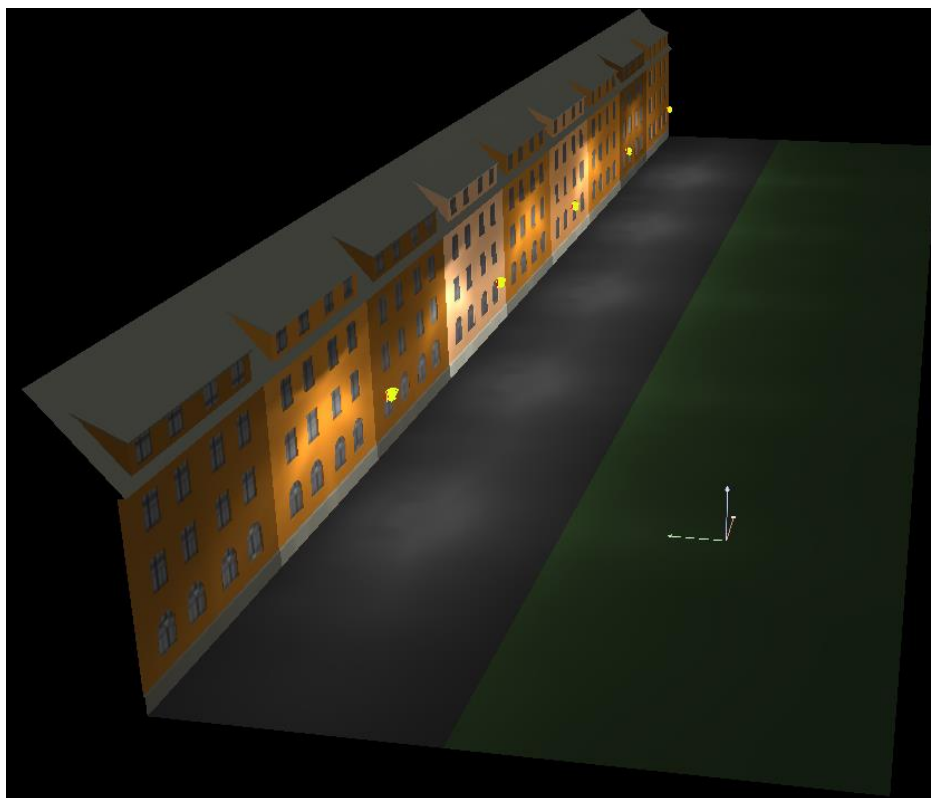
Pro tento charakter zástavby jsou využívány dva modely. Jeden je pro uzavřenou blokovou zástavbu, viz Obr. 8.9. V tomto případě jsou využity pouze čtyři výpočtové rastry, viz Obr. 8.10. Druhý model je pro otevřenou blokovou zástavbu, viz Obr. 8.11. Principiální umístění výpočtových rastrů je na Obr. 8.12.



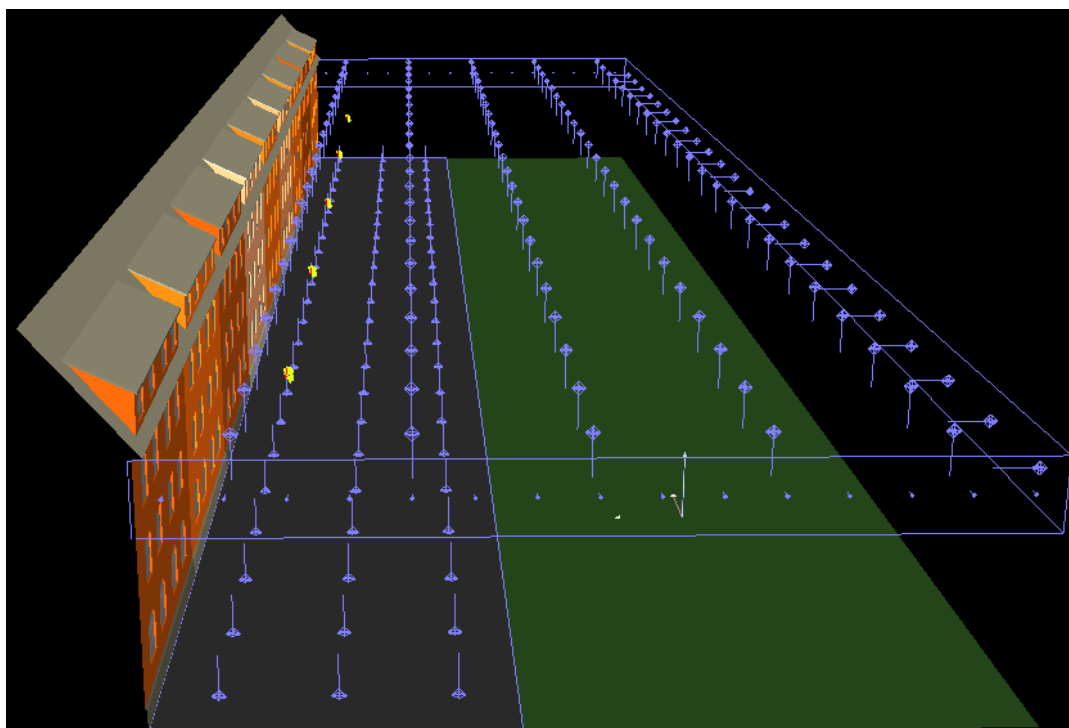
Obr. 8.9: Model kompaktního města – uzavřená bloková zástavba, šířka vozovky 18 m



Obr. 8.10: Principiální umístění výpočtových rastrů kompaktního města, šířka vozovky 18 m



Obr. 8.11: Model kompaktního města – otevřená bloková zástavba, šířka vozovky 18 m



Obr. 8.12: Principiální umístění výpočtových rastrů kompaktního města – otevřená bloková zástavba, šířka vozovky 18 m

8.4 Vyhodnocení

V této kapitole budou prezentovány výsledné hodnoty ze všech provedených simulací.

8.4.1 Příměstská krajina

Jak předkládá Tab. 8.6, pro simulaci tohoto charakteru zástavby bylo využito pouze svítidel Z1.

Tab. 8.6: Typy a počet svítidel využitých v simulaci příměstské krajiny a celkový příkon světelných zdrojů

Typ svítidla	Příkon světelného zdroje (W)	Počet (ks)	Celkový příkon světelných zdrojů (W)
Z1	50	1 756	87 800
MC12	70	0	0
MC2	100	0	0
MC2	150	0	0
MC2	250	0	0
Celkem		1 756	87 800

V Tab. 8.7 jsou uvedeny výsledné hodnoty sledovaných parametrů v proběhlých simulacích. Následující informace platí i pro vyhodnocení ostatních charakterů zástavby. Hodnoty uvedené v řádku 1. a 2. jsou vypočteny s pomocí dat uvedených v kapitole 8.2.1 a 8.2.2. Principy výpočtů jsou uvedeny v následujících rovnicích:

$$\phi_{\text{řádek 1.}} = \text{PočetSvítidel} \cdot \phi_{\text{Výboj.Zdroje}} \cdot LOR = 1756 \cdot 4400 \cdot 0,75 = 5794800 \text{ (lm)} \quad (8.2)$$

$$\phi_{\text{řádek 2.}} = \text{PočetSvítidel} \cdot \phi_{\text{Výboj.Zdroje}} \cdot LOR \cdot ULR = 1756 \cdot 4400 \cdot 0,75 \cdot 0,0256 = 148347 \text{ (lm)} \quad (8.3)$$

Hodnoty v řádcích 3. – 8. vycházejí z provedených simulací v Dialuxu. Všechny relativní hodnoty jsou vztaheny k hodnotě celkového světelného toku vyzářeného svítidly v řádku 1. Hodnoty v řádcích 3. – 6. jsou stanoveny při činiteli odrazu světelně činných ploch rovnému nule. Je tak vyhodnocena pouze přímá složka světelného toku vyzářeného svítidly ve světelné scéně modelu v Dialuxu. Hodnoty v řádcích 7. a 8. zahrnují i odraženou složku světelného toku (stanovení hodnot činitele odrazu je popsáno v kapitole 8.3.1).

Hodnoty uvedené v řádcích 2. a 3. by se v ideálním případě měly rovnat. Hodnoty ukazují, jak moc přesný je výpočet v Dialuxu, s využitím výpočtových rastrů specifikovaných v kapitole 8.3.2, oproti hodnotě vypočtené s pomocí fotometrických údajů daného typu svítidla a hodnot světelného toku daného světelného zdroje (viz rovnice 8.3).

Z hodnot uvedených v řádcích 3. a 4. lze vyhodnotit vliv okolní zástavby na podíl světelného toku vyzářeného svítidly přímo do horního poloprostoru. Toto porovnání je možné pouze v charakteru zástavby zahradního a modernistického města¹⁴. V modelu příměstské krajiny není uvažována žádná zástavba a v modelu kompaktního města není uvažována situace bez zástavby. Hodnoty v řádcích 5. a 6. dávají dohromady 100 %.

¹⁴ V těchto charakterech zástavby tak byl výpočet v Dialuxu pro daný **typ komunikace** proveden celkem třikrát (s ohledem na vyhodnocení sledovaných parametrů, např. viz Tab. 8.7). Pro činitel odrazu světelně činných ploch rovný nule byl výpočet proveden s okolní zástavbou a bez okolní zástavby. Pro činitel odrazu světelně činných ploch stanovených podle kapitoly 8.3.2 poté pro situaci s okolní zástavbou.

Tab. 8.7: Vyhodnocení sledovaných parametrů pro charakter zástavby příměstská krajina

Činitel odrazu světelně činných ploch	Řádek	Parametr	Hodnota (lm)	Hodnota (%)
	1	Celkový světelný tok vyzářený svítidly	5 794 800	100,00
	2	Světelný tok vyzářený přímo do HP - podle ULR svítidla	148 347	2,56
0	3	Světelný tok vyzářený přímo do HP - bez zástavby	148 558	2,56
	4	Světelný tok vyzářený přímo do HP - se zástavbou		
	5	Světelný tok vyzářen svítidly mimo vozovku	4 346 100	75,00
	6	Světelný tok vyzářen svítidly na vozovku	1 448 700	25,00
podle kapitoly 8.3.1	7	Světelný tok dopadlý na vozovku	1 448 700	25,00
	8	Světelný tok vyzářený do HP	611 931	10,56

HP - horní poloprostor

U Tab. 8.7 bych rád zdůraznil hodnotu v řádku 5. Tato hodnota světelného toku emitovaného svítidly mimo vozovku je násobně vyšší než hodnota světelného toku vyzářeného svítidly na vozovku. V tomto jediném charakteru zástavby jsem se nezabýval šířkou osvětlovaných cest (zejména cesty pro pěší, parkové cesty apod.) a stanovil ji podle několika posuzovaných úseků, a parkových ploch, jednotně na 2,5 m. Myslím si, že při hlubší rešerši tohoto problému by hodnota světelného toku směřujícího přímo mimo vozovku byla nižší. Při čtení výsledků je tedy nutné brát v potaz šířku vozovky a rozložení svítidel podél vozovky (viz kapitola 8.3.3).

V této kapitole také uvádím výsledné hodnoty ze simulací pro šířky komunikací 8 – 30 m, které se nacházejí ve volné nezastavěné krajině a jsou tak podobné modelům pro příměstskou krajinu. V Tab. 8.8 jsou uvedeny specifikace použitých typů svítidel. V Tab. 8.9 jsou prezentovány výsledné hodnoty sledovaných parametrů v proběhlých simulacích.

Tab. 8.8: Typy a počet svítidel využitých v simulaci pro šířky komunikací 8 – 30 m nacházející se ve volné krajině bez zástavby; celkový příkon světelných zdrojů

Typ svítidla	Příkon světelného zdroje (W)	Počet (ks)	Celkový příkon světelných zdrojů (W)
Z1	50	183	9 150
MC12	70	104	7 280
MC2	100	255	25 500
MC2	150	215	32 250
MC2	250	0	0
Celkem		757	74 180

Oproti výsledkům v Tab. 8.7 je v Tab. 8.9 znatelné snížení relativních hodnot světelného toku, který směřuje mimo vozovku (řádek 5.). To je způsobeno rozdílným zastoupením svítidel (rozdílná fotometrická data) a zejména rozdílným umístěním svítidel ve světelné scéně spolu s násobně vyšší šířkou vozovky oproti příměstské krajině.

Tab. 8.9: Vyhodnocení sledovaných parametrů pro šířky komunikací 8 – 30 m nacházející se ve volné krajině bez zástavby

Činitel odrazu světelně činných ploch	Řádek	Parametr	Hodnota (lm)	Hodnota (%)
	1	Celkový světelný tok vyzářený svítidly	6 517 778	100,00
	2	Světelný tok vyzářený přímo do HP - podle ULR svítidla	92 073	1,41
0	3	Světelný tok vyzářený přímo do HP - bez zástavby	95 942	1,47
	4	Světelný tok vyzářený přímo do HP - se zástavbou		
	5	Světelný tok vyzářen svítidly mimo vozovku	2 238 624	34,35
	6	Světelný tok vyzářen svítidly na vozovku	4 279 154	65,65
podle kapitoly 8.3.1	7	Světelný tok dopadlý na vozovku	4 279 154	65,65
	8	Světelný tok vyzářený do HP	674 969	10,36

HP - horní poloprostor

8.4.2 Zahradní město

V Tab. 8.10 jsou uvedeny informace o zastoupených svítidlech v charakteru zástavby zahradního města, ve kterém je využito nejvíce svítidel ze všech uvažovaných charakterů zástavby.

Tab. 8.10: Typy a počet svítidel využitých v simulaci zahradního města a celkový příkon světelných zdrojů

Typ svítidla	Příkon světelného zdroje (W)	Počet (ks)	Celkový příkon světelných zdrojů (W)
Z1	50	3 569	178 450
MC12	70	1 553	108 710
MC2	100	195	19 500
MC2	150	556	83 400
MC2	250	294	73 500
Celkem		6 167	463 560

V Tab. 8.11 jsou uvedeny výsledky ze simulací. V řádcích 2. a 3. této tabulky jsou již patrné odchylky v hodnotě vyhodnocené Dialuxem a hodnotě vypočtené z údajů o použitých svítidlech. V tomto případě byl také zohledněn vliv zástavby na světelný tok vyzářený svítidly přímo do horního poloprostoru. Se zástavbou je tento světelný tok o 39 % nižší. Z Tab. 8.11 řádku 6. a 7. je také patrný vliv odraženého světelného toku od okolní zástavby, který zvyšuje osvětlenost vozovky.

Tab. 8.11: Vyhodnocení sledovaných parametrů pro charakter zástavby zahradní město

Činitel odrazu světelně činných ploch	Řádek	Parametr	Hodnota (lm)	Hodnota (%)
0 podle kapitoly 8.3.1	1	Celkový světelný tok vyzářený svítidly	38 253 261	100,00
	2	Světelný tok vyzářený přímo do HP - podle ULR svítidla	660 246	1,73
	3	Světelný tok vyzářený přímo do HP - bez zástavby	706 049	1,85
	4	Světelný tok vyzářený přímo do HP - se zástavbou	430 607	1,13
	5	Světelný tok vyzářen svítidly mimo vozovku	12 247 742	32,02
	6	Světelný tok vyzářen svítidly na vozovku	26 005 518	67,98
	7	Světelný tok dopadlý na vozovku	26 105 347	68,24
	8	Světelný tok vyzářený do HP	3 907 052	10,21

HP - horní poloprostor

8.4.3 Modernistické město

V Tab. 8.12 jsou uvedeny informace o zastoupených svítidlech v charakteru zástavby modernistického města.

Tab. 8.12: Typy a počet svítidel využitých v simulaci modernistického města a celkový příkon světelných zdrojů

Typ svítidla	Příkon světelného zdroje (W)	Počet (ks)	Celkový příkon světelných zdrojů (W)
Z1	50	376	18 800
MC12	70	1 145	80 150
MC2	100	75	7 500
MC2	150	92	13 800
MC2	250	0	0
Celkem		1 688	120 250

V Tab. 8.13 jsou prezentovány výsledky ze simulací. Na řádce 2. a 3. lze vidět téměř shodná čísla. Z toho lze usoudit přesnější vyhodnocení výpočtovými rastry, než jako tomu je u zahradního města. Odlišnosti mezi těmito hodnotami pro zahradní a modernistické město jsou zřejmě dané odlišnou velikostí výpočtových rastrů (výška budov, a tedy i výška vertikálních rastrů je u modernistického města vyšší).

Tab. 8.13: Vyhodnocení sledovaných parametrů pro charakter zástavby modernistické město

Činitel odrazu světelně činných ploch	Řádek	Parametr	Hodnota (lm)	Hodnota (%)
0 podle kapitoly 8.3.1	1	Celkový světelný tok vyzářený svítidly	9 181 580	100,00
	2	Světelný tok vyzářený přímo do HP - podle ULR svítidla	149 199	1,62
	3	Světelný tok vyzářený přímo do HP - bez zástavby	147 235	1,60
	4	Světelný tok vyzářený přímo do HP - se zástavbou	53 211	0,58
	5	Světelný tok vyzářen svítidly mimo vozovku	3 358 293	36,58
	6	Světelný tok vyzářen svítidly na vozovku	5 823 288	63,42
	7	Světelný tok dopadlý na vozovku	5 880 904	64,05
	8	Světelný tok vyzářený do HP	786 630	8,57

HP - horní poloprostor

Velikost světelného toku vyzářeného svítidly přímo do horního poloprostoru je se zástavbou znatelně nižší, rozdíl je 64 % (řádek 3. a 4.). Na řádku 6. a 7. lze opět pozorovat vliv odraženého světelného toku na zvýšenou osvětlenost vozovky.

Při čtení výsledných hodnot v Tab. 8.13 je důležité vzít na vědomí vliv umístění jednostranné osvětlovací soustavy¹⁵ (viz Obr. 8.8). Při umístění svítidel jednostranné osvětlovací soustavy na druhé straně vozovky by se výpočty samozřejmě **značně** lišily.

8.4.4 Kompaktní město

Jak bylo uvedeno v kapitole 8.3.6, zástavbu kompaktního města ještě rozdělují na uzavřenou a otevřenou. V Tab. 8.14 jsou uvedeny informace o počtu použitých svítidlech pro uzavřenou blokovou zástavbu.

Tab. 8.14: Typy a počet svítidel využitých v simulaci uzavřené blokové zástavby kompaktního města a celkový příkon světelných zdrojů

Typ svítidla	Příkon světelného zdroje (W)	Počet (ks)	Celkový příkon světelných zdrojů (W)
Z1	50	30	1 500
MC12	70	237	16 590
MC2	100	362	36 200
MC2	150	0	0
MC2	250	36	9 000
Celkem		665	63 290

V Tab. 8.15 jsou zobrazeny výsledky sledovaných parametrů ze simulací pro uzavřenou zástavbu. V simulacích kompaktního města nebylo uvažováno vyhodnocení světelného toku vyzářeného přímo do horního poloprostoru bez okolní zástavby (řádek 3., místo něj lze uvažovat hodnotu na řádku 2.). Výslednou hodnotu se zástavbou (řádek 4.) je nutné chápat v souvislosti s vytvořeným modelem tohoto charakteru města. Vzhledem k výšce jednolitě zástavby okolo vozovky je světelný tok vyzařován přímo do horního poloprostoru především v oblasti křižovatek, jejichž vliv je

Tab. 8.15: Vyhodnocení sledovaných parametrů pro charakter zástavby uzavřeného kompaktního města

Činitel odrazu světelně činných ploch	Řádek	Parametr	Hodnota (lm)	Hodnota (%)
	1	Celkový světelný tok vyzářený svítidly	5 361 642	100,00
	2	Světelný tok vyzářený přímo do HP - podle ULR svítidla	72 803	1,36
0	3	Světelný tok vyzářený přímo do HP - bez zástavby		
	4	Světelný tok vyzářený přímo do HP - se zástavbou	27 401	0,51
	5	Světelný tok vyzářený svítidly mimo vozovku	1 543 176	28,78
	6	Světelný tok vyzářený svítidly na vozovku	3 818 466	71,22
podle kapitoly 8.3.1	7	Světelný tok dopadlý na vozovku	4 051 814	75,57
	8	Světelný tok vyzářený do HP	683 407	12,75

HP - horní poloprostor

¹⁵ Pro jednostranné osvětlovací soustavy bylo zohledněno 376 svítidel Z1 50 W a 1 145 svítidel MC12 70 W. Pro oboustranné osvětlovací soustavy bylo bráno v potaz 75 svítidel MC2 100 W a 92 svítidel MC2 150 W.

v modelech zohledněn vcelku omezeně. Výsledná hodnota je získána pouze z výpočtových rastrů, jenž jsou umístěné mezi bloky na koncích modelu (viz Obr. 8.10) a stejně jako ostatní hodnoty vynásobena koeficientem zohledňující celkový počet svítidel v daném typu komunikace.

Oproti všem předchozím výsledkům je v tomto typu charakteru města nejvíce znatelný vliv okolní zástavby na světelný tok, přímý i nepřímý, vyzářený do horního poloprostoru (řádek 8. v Tab 8.15). Stejně tak je v tomto případě největší podíl odraženého světelného toku od okolní zástavby, který zvyšuje osvětlenost vozovky (o zhruba 5,8 % více než v řádku 6.)

V Tab. 8.16 jsou uvedeny informace o počtu použitých svítidel pro otevřenou blokovou zástavbu.

Tab. 8.16: Typy a počet svítidel využitých v simulaci otevřené blokové zástavby kompaktního města a celkový příkon světelných zdrojů

Typ svítidla	Příkon světelného zdroje (W)	Počet (ks)	Celkový příkon světelných zdrojů (W)
Z1	50	0	0
MC12	70	245	17 150
MC2	100	289	28 900
MC2	150	0	0
MC2	250	0	0
Celkem		534	46 050

V Tab. 8.17 jsou prezentovány výsledky simulací pro otevřenou blokovou zástavbu. Stejně jako u výsledků pro uzavřenou blokovou zástavbu, tak i zde nebyl vyhodnocen světelný tok vyzářený svítidly přímo do horního poloprostoru bez okolní zástavby. Lze opět využít hodnotu uvedenou na druhém řádku Tab. 8.17. Hodnota světelného toku vyzářeného přímo do horního poloprostoru s okolní zástavbou je pro tento případ již relevantnější. Při čtení výsledných hodnot v Tab. 8.17 je opět důležité vzít na vědomí vliv umístění jednostranných osvětlovacích soustav¹⁶ v modelu pro otevřenou blokovou zástavbu (viz Obr. 8.11). Při umístění svítidel na druhé straně vozovky by se výpočty samozřejmě **značně** lišily.

Tab. 8.17: Vyhodnocení sledovaných parametrů pro charakter zástavby otevřeného kompaktního města

Činitel odrazu světelně činných ploch	Řádek	Parametr	Hodnota (lm)	Hodnota (%)
	1	Celkový světelný tok vyzářený svítidly	3 669 087	100,00
	2	Světelný tok vyzářený přímo do HP - podle ULR svítidla	50 147	1,37
0	3	Světelný tok vyzářený přímo do HP - bez zástavby		
	4	Světelný tok vyzářený přímo do HP - se zástavbou	34 682	0,95
	5	Světelný tok vyzářen svítidly mimo vozovku	1 134 696	30,93
	6	Světelný tok vyzářen svítidly na vozovku	2 534 393	69,07
podle kapitoly 8.3.1	7	Světelný tok dopadlý na vozovku	2 588 957	70,56
	8	Světelný tok vyzářený do HP	321 558	8,76

HP - horní poloprostor

¹⁶ Pro jednostranné osvětlovací soustavy bylo zohledněno 163 svítidel MC2 100 W a 245 svítidel MC12 70 W. Pro oboustranné osvětlovací soustavy bylo bráno v potaz 226 svítidel MC2 100 W.

8.4.5 Souhrnné vyhodnocení

Celkové zastoupení jednotlivých typů svítidel využitých v simulacích této práce je spolu s celkovým příkonem světelných zdrojů uveden v Tab. 8.18.

Tab. 8.18: Typy a počet svítidel využitých v počítačových simulacích této práce a celkový příkon světelných zdrojů

Typ svítidla	Příkon světelného zdroje (W)	Počet (ks)	Celkový příkon světelných zdrojů (W)
Z1	50	5 914	295 700
MC12	70	3 284	229 880
MC2	100	1 176	117 600
MC2	150	863	129 450
MC2	250	330	82 500
Celkem		11 567	855 130

Celkový počet svítidel využitých v simulacích je tedy 11 567 kusů, přičemž na Praze 6 je 12 900 kusů svítidel (referenční počet, viz kapitola 8.2.1). Porovnání počtu svítidel využitých v simulacích této práce s referenčním počtem svítidel na Praze 6 je uvedeno v Tab. 8.19. Referenčnímu počtu svítidel odpovídá celkový vyzářený tok 76 275 452 lm¹⁷. Celkový světelný tok vyzářený svítidly, které jsou zahrnuty do simulací této práce je 68 778 148 lm (tj. o necelých deset procent méně), viz Tab. 8.20.

Tab. 8.19: Porovnání počtu svítidel využitých v počítačových simulacích této práce s reálnými počty svítidel na Praze 6 [data poskytnuta THMP]

Příkon světelného zdroje (W)	Počet svítidel využitých v simulacích této práce (ks)	Reálný počet svítidel na Praze 6 (ks)	Rozdíl (ks)
50	5 914*	6 511	597
70	3 284*	3 759	475
100	1 176*	1 319	143
150	863*	974	111
250	330*	337	7
Celkem	11 567	12 900	1 333
* V simulacích využita pouze svítidla Z1, MC12, MC2, viz kapitola 8.2.1.			

¹⁷ Hodnota je pouze pro porovnání. Byla vypočtena s využitím fotometrických dat pro tři typy svítidel využitých v simulacích (Z1, MC12, MC2), viz kapitola 8.2.1.

V Tab. 8.20 je uvedeno souhrnné vyhodnocení vybraných parametrů napříč všemi provedenými simulacemi. Hodnoty na řádcích 1. a 2. jsou opět vypočteny na základě fotometrických údajů tří typů svítidel využitých v simulaci. Hodnoty na řádcích 3. až 6. vycházejí ze simulací v Dialuxu.

Tab. 8.20: Souhrnné vyhodnocení vybraných parametrů ze všech provedených počítačových simulací

Činitel odrazu světelně činných ploch	Řádek	Parametr	Hodnota (lm)	Hodnota (%)
	1	Celkový světelný tok vyzářený svítidly	68 778 148	100,00
	2	Světelný tok vyzářený přímo do HP - podle ULR svítidla	1 172 815	1,71
0	3	Světelný tok vyzářen svítidly mimo vozovku	24 868 631	36,16
	4	Světelný tok vyzářen svítidly na vozovku	43 909 520	63,84
podle kapitoly 8.3.1	5	Světelný tok dopadlý na vozovku	44 354 876	64,49
	6	Světelný tok vyzářený do HP	6 985 547	10,16

HP - horní poloprostor

Hodnota světelného toku vyzářeného svítidly přímo mimo vozovku (činitel odrazu světelně činných ploch je roven nule) je u všech prezentovaných výsledků zhruba třetinová oproti celkovému světelnému toku vyzářeného svítidly (vyjímaje příměstskou krajinu, kde tato hodnota nabývá 75 %). V celkovém vyhodnocení tato hodnota činí zhruba 36 % z celkové hodnoty světelného toku vyzářeného svítidly. Nemyslím si, že je tato hodnota nereálná, ale jeví se mi vcelku vysoká. Očekával bych ji zhruba o pět až deset procent nižší. Znovu však zdůrazňuji charakter zástavby příměstské krajiny, kdy je 1 756 kusů svítidel osvětlována vozovka o šířce 2,5 m. Jen zde jde mimo vozovku 4,3 milionů lumenů.

Z hodnot na řádku 4. a 5. lze pozorovat vliv odraženého světelného toku na zvýšení osvětlenosti vozovky. Tento vliv je nejvíce viditelný u uzavřené blokové zástavby. V celkovém vyhodnocení je tato hodnota zanedbatelná.

Z výsledků vyplývá, že zhruba 7 milionů lumenů je vyzářeno, přímo i nepřímo, do horního poloprostoru. Přičemž „pouze“ necelých 17 % z uvedené hodnoty je vyzářeno přímo.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo kvantifikovat, s využitím počítačové simulace, neužitečný světelný tok unikající do horního poloprostoru a světelný tok, který je svítidly vyzařován mimo osvětlované komunikace. Součástí zadání bylo posouzení možných negativních vlivů VO na okolní prostředí při náhradě svítidel s výbojovými světelnými zdroji svítidly se světelnými diodami. A dále také posouzení možností vyhodnocování a snižování negativních vlivů VO s využitím regulace a řízení světelného toku.

V teoretické části práce uvádím současný pohled právních předpisů a doporučení technických norem na omezení rušivých účinků světla a také základní principy umožňující jeho vyhodnocení. Dále je pozornost upřena na problematiku světelných diod, zejména na spojitost hodnot náhradní teploty chromatičnosti a měrného výkonu LED součástek. V práci popisují vliv spektrálního složení emitovaného světla svítidly VO na ovlivnění biorytmů lidského organismu. Rovněž popisují nejednoznačnost vztahu mezi hodnotou T_n a obsahem modré části viditelného spektra ve vyzařovaném světle. V práci jsou stanoveny základní principy pro měření náhradní teploty chromatičnosti svítidel v terénu. V závěru teoretické části se zaměřuji na možnosti regulace a řízení světelného toku soustav VO. Uvádím zde především přístup technických norem k možnosti regulace. Částečně se zabývám i technickými možnostmi řízení.

V praktické části práce se věnuji kvantifikaci neužitečného světelného toku z aglomerace Prahy 6. Popisují pracovní podklady, principy a zjednodušení které jsem využil při nastavování počítačových modelů a při vyhodnocování sledovaných parametrů.

Z celkových výsledků uvedených v kapitole 8.4.5 vyplývá, že zhruba 68,8 milionů lumenů, které jsou vyzářeny svítidly využitými v simulaci neužitečného světelného toku z aglomerace Prahy 6, je vyzářeno přímo do horního poloprostoru zhruba 1,2 milionů lumenů (tj. 1,71 % z celkového vyzářeného toku). I se započteným odraženým světelným tokem je to potom zhruba 7 milionů lumenů (tj. 10,16 %), přičemž přímá složka z této hodnoty je „pouze“ 16,8 %. To si myslím, že je velmi podstatný výstup této práce. Cílit na co nejnižší hodnotu *ULR* má své opodstatnění, ale výsledný efekt bude vždy minoritní oproti aplikování hromadného řízení osvětlovacích soustav.

Přímý světelný tok vyzářený mimo vozovku je zhruba 24,9 milionů lumenů (tj. 36,16 % z celkového vyzářeného toku). Na vozovku je vyzářeno přímo zhruba 43,9 milionů lumenů (tj. 63,84 %), při započtení odraženého světelného toku je to zhruba o 445 tisíc lumenů (tj. 64,49 %) více. Jak jsem již zmínil v předešlé kapitole, zdá se mi 36,16 % z celkového světelného toku vyzářeného svítidly přímo mimo vozovku poměrně dost. Hodnotu bych očekával zhruba o pět až deset procent nižší. Avšak při pohledu na všechny výsledné hodnoty a na postup, pomocí kterého jsem se k těmto hodnotám dostal, je obtížné říct, zda jsou tyto hodnoty relevantní, a pokud ano, tak do jaké míry.

Jestliže bych se podobnou prací opět někdy zabíral, tak bych se více soustředil na práci s databázovými daty nejen o osvětlovacích soustavách, ale i o pozemních komunikacích a jejich vlastnostech. Tyto data by mohli vnést do práce další zpřesnění výsledků. Nicméně pokud jde o vyhodnocení neužitečného světelného toku s pomocí počítačových simulací, tak z takto rozsáhlých oblastí se to bez zjednodušení, v podobě modelových úseků, jen tak neobejde.

Použitá literatura

- [1] CIE 126-1997 Guidelines for minimizing sky glow. Mezinárodní komise pro osvětlování, 1997. ISBN 978-3-900734-83-1
- [2] CIE 150-2017 Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive light from Outdoor Lighting Installations. Mezinárodní komise pro osvětlování, 2017. ISBN 978-3-902842-48-0
- [3] Informace pro Vládu ČR o problematice světelného znečištění [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/problematika_svetelneho_znecisten_i_nformace/\\$FILE/O150_InformaceproVladuCRoProblematiceSvetelnehoZnecisten_i_180725.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/problematika_svetelneho_znecisten_i_nformace/$FILE/O150_InformaceproVladuCRoProblematiceSvetelnehoZnecisten_i_180725.pdf)
- [4] ČSN EN 13201-2, Osvětlení pozemních komunikací – Část 2: Požadavky, 2019, Vydal úřad pro technickou normalizaci.
- [5] ČSN EN 12464-1, Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 2: Venkovní pracovní prostory, 2014, Vydal úřad pro technickou normalizaci.
- [6] ČSN EN 12193, Světlo a osvětlení – Osvětlení sportovišť, 2019, Vydal úřad pro technickou normalizaci.
- [7] ČSN P 36 0455, Osvětlení pozemních komunikací – Doplnující informace, 2017, Vydal úřad pro technickou normalizaci.
- [8] SOKANSKÝ, Karel a kolektiv. Světelná technika. Praha, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [9] HABEL, Jiří, Karel DVOŘÁČEK, Vladimír DVOŘÁČEK a Petr ŽÁK. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [10] FUKSA, Antonín. Světlo a biologické hodiny [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42567.pdf>
- [11] BÁLSKÝ, Marek, Rudolf BAYER, Jan ZÁLEŠÁK a Zuzana PANSKÁ. Use of tunable white luminaires for biodynamic lighting [online]. IEEE, 2017 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: doi:10.1109/EPE.2017.7967277
- [12] MOUDRÁ, Milada. Světelné znečištění a ochrana nočního životního prostředí v České republice [online]. Praha, 2015 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/83356/BPTX_2014_1_11310_0_3_49774_0_159073.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta.
- [13] Blue light: Impacts of artificial blue light on health and the environment [online]. November 2018 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.royalsociety.org.nz/assets/Uploads/Blue-light-Aotearoa-evidence-summary.pdf>
- [14] PAWSON, S. M. a M BADER. LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature [online]. 01 October 2014n. l. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1890/14-0468.1>

- [15] ŽÁK, Petr a Jiří HABEL. Terminologie LED světelných zdrojů. Světlo, časopis pro osvětlování [online]. 2017 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/terminologie-led-svetelných-zdroju--2435>
- [16] PATTISON, Morgan, Monica HANSEN, Norman BARDSLEY, Lisa PATTISON, Jeffrey TSAO, Kelsey STOBBER, Victor TAYLOR a Mary YAMADA. Solid-State Lighting R&D Plan [online]. June 2016 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/ssl/downloads/solid-state-lighting-2016-rd-plan>
- [17] PATTISON, Morgan, Monica HANSEN, Norman BARDSLEY, Clay ELLIOTT, Kyung LEE, Lisa PATTISON a Jeffrey TSAO. 2019 Lighting R&D Opportunities [online]. January 2020 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/ssl/articles/doe-publishes-2019-lighting-rd-opportunities-document>
- [18] ŽÁK, Petr. Barva světla ve veřejném osvětlení – Část 1 Současný stav a terénní výzkumy. Světlo, časopis pro osvětlování [online]. 8.10.2015 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/barva-svetla-ve-verejnem-osvetleni-cast-1-soucasny-stav-a-terenni-vyzkumy--1174>
- [19] Street Lighting and Blue Light: Frequently Asked Questions [online]. Solid-State Lighting Program, 2017 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/02/f34/Street%20Lighting%20and%20Blue%20Light%20FAQs_1.pdf
- [20] BÁLSKÝ, Marek. Hodnocení rušivých účinků umělého světla. Praha, 2007. Diplomová práce. ČVUT.
- [21] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK a Tomáš MAIXNER. Rušivé světlo Část 7.: Měření rušivého světla [online]. 2007 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/rusive-svetlo-cast-7-mereni-rusiveho-svetla--16120>
- [22] MELKOVÁ, Pavla a kolektiv. Manuál tvorby veřejných prostranství hlavního města Prahy. Praha, 2014. ISBN 978-80-87931-11-0.
- [23] TECHNICKÝ STANDARD PRAŽSKÉHO LED SVÍTIDLA VO [online]. THMP [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: https://thmp.cz/images/standardy/Technick_standard_praskho_LED_svitidla_VO_2020-10-19.pdf
- [24] ČSN CEN/TR 13201-1, Osvětlení pozemních komunikací - Část 1: Návod pro výběr tříd osvětlení, 2017, Vydal úřad pro technickou normalizaci.
- [25] ŽÁK, Petr a Teodor TERRICH. Ovládání veřejného osvětlení. Světlo, časopis pro osvětlování [online]. 21. 6. 2018 [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/ovladani-verejneho-osvetleni--3036>
- [26] GUO, Liping, Marjukka ELOHOLMA a Liisa HALONEN. Intelligent road lighting control systems [online]. Espoo, Finland, 2008 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <http://lib.tkk.fi/Diss/2008/isbn9789512296200/article2.pdf>

- [27] KOŘENEK, Jan. Regulace veřejného osvětlení [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=152060. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [28] DONATELLO, Shane, Rocío RODRÍGUEZ QUINTERO, Miguel GAMA CALDAS a Oliver WOLF. EUR 29631 EN Revision of the EU Green Public Procurement Criteria for Road Lighting and traffic signals: Technical report and criteria proposal [online]. 2019, , 133 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: doi:10.2760/372897
- [29] D4i – the DALI standard for intelligent, IoT-ready luminaires. Dali aliance [online]. [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: <https://www.dali-alliance.org/d4i/>
- [30] Zhaga-D4i White paper: Schréder position on Zhaga-D4i - Choose your architecture! Schréder.com [online]. [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: https://www.schreder.com/sites/default/files/2020-04/Zhaga-D4i%20Schreder%20Support_EN_0.pdf
- [31] ŽÁK, Petr a Jiří HABEL. Terminologie LED světelných zdrojů. Světlo, časopis pro osvětlování [online]. 2017 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/terminologie-led-svetelných-zdroju--2435>
- [32] Solid-State Lighting Technology Fact Sheet: LED Color Characteristics [online]. [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/08/f33/led-color-characteristics-factsheet.pdf>
- [33] BÁLSKÝ, Marek. Analýza procesu mnohonásobných odrazů [online]. Praha, 2014 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/60866/Disertace_Balsky_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Disertační práce. ČVUT.
- [34] *Osram předřadník: OT DEXAL NFC IP20 Outdoor* [online]. [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: https://www.osram.com/ecat/OT%20DEXAL%20NFC%20IP20%20Outdoor-Constant%20Current%20-%20Dimmable-Constant%20Current%20-%20Outdoor-LED%20Drivers-Digital%20Systems/com/en/GPS01_3146302/

Seznam obrázků

Obrázek	Strana
Obr. 3.1: a) Měrné výkony komerčních LED součástek; b) Relativní účinnosti konverze elektrické energie na zářivou	15
Obr. 3.2: Ukázka lineárního a nelineárního ladění bílé barvy	16
Obr. 4.1: Princip objektivního jasoměru	19
Obr. 5.1: Poměrné spektrální citlivosti fotoreceptorů	23
Obr. 5.2: Cirkadiánní rytmy produkce hormonů a fyziologických procesů	24
Obr. 5.3: a) demonstrace odlišného barevného počítka pro stejnou hodnotu T_n ; b) distribuce zářivé energie v průběhu viditelného spektra pro čtyři světelné zdroje s jednotnou hodnotou T_n	25
Obr. 5.4: Hodnoty T_n versus zastoupení modré složky v emitovaném světle	25
Obr. 6.1: Svítidla Marut M G1 ME	29
Obr. 6.2: Křivky svítivosti svítidla Marut M G1 ME 5k0/740	29
Obr. 6.3: Prostorové charakteristiky T_n svítidla Marut M G1 ME 5k0/740	30
Obr. 6.4: Svítidla Marut M G1 ME	31
Obr. 6.5: Křivky svítivosti svítidla Marut M G1 ME 5k0/740	31
Obr. 6.6: Prostorové charakteristiky T_n svítidla Marut M G1 ME 4k5/422	32
Obr. 6.7: Svítidlo Archilede HP	33
Obr. 6.8: Křivky svítivosti svítidla Archilede HP	33
Obr. 6.9: Prostorové charakteristiky T_n svítidla Archilede HP	34
Obr. 7.1: Zapojení inteligentního D4i předřadníku pro LED	41
Obr. 7.2: Architektura Zhaga	43
Obr. 7.3: Architektura NEMA	43
Obr. 8.1: Zatřídění charakterů zástavby v oblasti Břevnova a Strahova	46
Obr. 8.2: Osvětlené plochy mezi bytovými domy	46
Obr. 8.3: Měření délek uličních úseků	47
Obr. 8.4: Principiální rozmístění výpočtových rastrů	53
Obr. 8.5: Model příměstské krajiny	53
Obr. 8.6: Model zahradního města, šířka vozovky 15 m	54
Obr. 8.7: Principiální umístění výpočtových rastrů zahradního města, šířka vozovky 15 m	54
Obr. 8.8: Model modernistického města, šířka vozovky 12 m	55
Obr. 8.9: Model kompaktního města – uzavřená bloková zástavba, šířka vozovky 18 m	56
Obr. 8.10: Principiální umístění výpočtových rastrů kompaktního města, šířka vozovky 18 m	56
Obr. 8.11: Model kompaktního města – otevřená bloková zástavba, šířka vozovky 18 m	57
Obr. 8.12: Principiální umístění výpočtových rastrů kompaktního města – otevřená bloková zástavba, šířka vozovky 18 m	57

Seznam tabulek

Tabulka	Strana
Tab. 2.1: Limitní hodnoty rušivého světla pro venkovní osvětlovací soustavy	12
Tab. 2.2: Omezení podílu světelného toku směřujícího do horního poloprostoru	13
Tab. 3.1: Porovnání měrných výkonů, rok 2010 a 2020	17
Tab. 3.2: Parametry světelných zdrojů zahrnutých do analýzy	18
Tab. 6.1: Výběr třídy osvětlení pro motorovou dopravu	38
Tab. 8.1: Nejčastěji využívaná svítidla pro jednotlivé příkony světelných zdrojů	48
Tab. 8.2: Specifikace svítidel použitých v simulacích	49
Tab. 8.3: Nejčastěji využívané světelné zdroje pro jednotlivé příkonové řady	50
Tab. 8.4: Nejčastější výška stožáru pro jednotlivé příkonové řady světelných zdrojů	51
Tab. 8.5: Naměřené hodnoty činitele odrazu - orientační měření	52
Tab. 8.6: Typy a počet svítidel využitých v simulaci příměstské krajiny a celkový příkon světelných zdrojů	58
Tab. 8.7: Vyhodnocení sledovaných parametrů pro charakter zástavby příměstská krajina	59
Tab. 8.8: Typy a počet svítidel využitých v simulaci pro šířky komunikací 8 – 30 m nacházející se ve volné krajině bez zástavby; celkový příkon světelných zdrojů	59
Tab. 8.9: Vyhodnocení sledovaných parametrů pro šířky komunikací 8 – 30 m nacházející se ve volné krajině bez zástavby	60
Tab. 8.10: Typy a počet svítidel využitých v simulaci zahradního města a celkový příkon světelných zdrojů	60
Tab. 8.11: Vyhodnocení sledovaných parametrů pro charakter zástavby zahradní město	61
Tab. 8.12: Typy a počet svítidel využitých v simulaci modernistického města a celkový příkon světelných zdrojů	61
Tab. 8.13: Vyhodnocení sledovaných parametrů pro charakter zástavby modernistické město	61
Tab. 8.14: Typy a počet svítidel využitých v simulaci uzavřené blokové zástavby kompaktního města a celkový příkon světelných zdrojů	62
Tab. 8.15: Vyhodnocení sledovaných parametrů pro charakter zástavby uzavřeného kompaktního města	62
Tab. 8.16: Typy a počet svítidel využitých v simulaci otevřené blokové zástavby kompaktního města a celkový příkon světelných zdrojů	63
Tab. 8.17: Vyhodnocení sledovaných parametrů pro charakter zástavby otevřeného kompaktního města	63
Tab. 8.18: Typy a počet svítidel využitých v počítačových simulacích této práce a celkový příkon světelných zdrojů	64
Tab. 8.19: Porovnání počtu svítidel využitých v počítačových simulacích této práce s reálnými počty svítidel na Praze 6	64
Tab. 8.20: Souhrnné vyhodnocení vybraných parametrů ze všech provedených počítačových simulací	65

Seznam grafů

Graf	Strana
Graf 5.1: Spektrální vlastnosti svítidla Halla SANT s $T_n = 2\,000\text{ K}$	26
Graf 5.2: Spektrální vlastnosti svítidla Halla SANT s $T_n = 6\,500\text{ K}$	26
Graf 6.1: Závislost relativních hodnot T_n (%) na osvětlenosti E (lx) přístroje; $T_{n,\text{referenční}} = 4\,000\text{ K}$, data naměřena ČMI	35
Graf 6.2: Závislost relativních hodnot T_n (%) na osvětlenosti E (lx) přístroje; $T_{n,\text{referenční}} = 2\,000\text{ K}$, data naměřena ČMI	36
Graf 7.1: Křížová charakteristika halogenidové výbojky, Osram 100 W Powerstar	40

Seznam elektronických příloh

Pořadí	Soubor	Popis
1	Modely Dialux.zip	Počítačové modely jednotlivých charakterů zástavby

Použité symboly

Symbol	Popis
CIE	Commission internationale de l'éclairage
3D	Trojdímenzionální
CCD	Charge coupled device
CEN	Comité Européen de Normalisation
Cm LED	Color mixed LED
ČMI	Český metrologický institut
ČSN	Česká technická norma
E	Osvětlenost
EN	European standard
HP LED	High power LED
Hy led	Hybrid LED
InGaN	Indium gallium nitrid
ipRGC	Intrinsically photosensitive retinal ganglion cell
ISO	International organization for standardization
K	Kelvin (jednotka teploty chromatičnosti)
LED	Light emitting diode
lm	lumen (jednotka světelného toku)
LOR	Light output ratio
LPWAN	Low power wide area network
lx	Lux (jednotka osvětlenosti)
MF	Maintenance factor
Pc LED	Phosphor converted LED
Ra	Index podání barev
RGB	Red, green, blue
RGBA	Red, green, blue, amber
RYGBA	Red, yellow, green, blue, amber
SMD	Surface mounted device
Tn	Náhradní teplota chromatičnosti
ULOR	Upward light output ratio
ULR	Upward light ratio
W	Watt (jednotka výkonu)
Φ	Světelný tok