

Metodika měření a vyhodnocení umělého světla v nočním prostředí

Objednatel: Ministerstvo životního prostředí
se sídlem: Vršovická 1442/65, Praha 10, 100 10
IČ: 00164801, DIČ: 00164801

Řešitel a zpracovatel: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních
technologií, Ústav elektroenergetiky, laboratoř světelné techniky
se sídlem: Technická 3058/10, 616 00 Brno, IČ: 00216 305 DIČ: CZ00216305
zastoupený: prof. RNDr. Vladimír Aubrecht, CSc., děkan FEKT VUT
řešitelé projektu: Doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D., Ing. Martin Motyčka, Ph.D., Ing. Jan Škoda, Ph.D.,
Ing. Filip Novák

Název projektu: Výzkum a vývoj v oblasti měření a hodnocení umělého světla v nočním prostředí
a jeho vlivu na živé organismy a životní prostředí jako celku

Číslo projektu: SS05010159

Doba řešení: 1.11.2021 – 31.12.2024

Důvěrnost a dostupnost: veřejný, přístupný

Metodika měření a vyhodnocení umělého světla v nočním prostředí (ALAN)

Tato metodika byla vytvořena s finanční podporou TAČR. Je výsledkem projektu **SS05010159 „Výzkum a vývoj v oblasti měření a hodnocení umělého světla v nočním prostředí a jeho vlivu na živé organismy a životní prostředí jako celku“**, program aplikovaného výzkumu, experimentálního vývoje a inovací v oblasti životního prostředí – Prostedí pro život, Prostedí pro život 5 (STA02022SS050), <https://old.starfos.tacr.cz/cs/project/SS05010159>.

Poskytovatel: Technologická agentura České republiky (TAČR), Evropská 1692/37, 160 00 Praha 6, IČ 72050365

Příjemce projektu: Vysoké učení technické v Brně (VUT), Antonínská 548, 60200 Brno, IČ 00216305

Aplikační garant: Ministerstvo životního prostředí (MŽP), Vršovická 1442/65, Praha 10, 100 10 IČ: 00164801, DIČ: 00164801

Řešitel projektu: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D. (VUT)

Řešitelský tým: Ing. Jan Škoda, PhD. (VUT)
Ing. Martin Motyčka, PhD. (VUT)
Ing. Filip Novák (VUT)

Celkový počet stran vč. příloh: 114

Obsah

1	Předmět metodiky.....	5
2	Vybrané a související Právní předpisy, technické normy a doporučení	6
3	Názvosloví, definice	8
4	Současný stav technologie v oblasti měření a hodnocení umělého světla v nočním prostředí ...	22
4.1	Přístrojová technika pro měření jasu noční oblohy.....	22
4.2	Měření světelného znečištění z umělých družic.....	29
4.3	Webové aplikace pro monitorování světelného znečištění	33
4.4	Shrnutí kapitoly	43
5	Technické řešení vyvinuté v rámci výzkumu aplikované v rámci této metodiky	44
5.1	Zdůvodnění výběru měřených veličin	44
5.2	Omezení metodiky	46
6	Kvalifikace osob provádějící měření.....	48
7	Měřicí zařízení	49
7.1	Jasový analyzátor.....	49
7.2	Analyzátor melanopické záře - melanopický analyzátor	49
7.3	Meteostanice.....	49
7.4	Stativ.....	50
7.5	Rotační hlava	50
7.6	Hlavní měřicí zařízení.....	50
7.7	Pomocná měřicí zařízení a pomůcky	50
8	Obecné podmínky měření – veličiny ovlivňující výsledky měření.....	51
9	Metrologické meze využití metody měření.....	52
10	Měření melanopických veličin.....	53
11	Alfa-opické veličiny	54
12	Možnosti jasového analyzátoru LDA – LumiDISP měřit melanopické veličiny.....	55
13	Referenční hodnoty přirozeného nočního světla	56
13.1	Matematický model	56
13.2	Ověření vypočtených hodnot	58
13.3	Statistické zpracování dat.....	59
13.4	Shrnutí k referenčním hodnotám	62
14	Popis metodiky hodnocení ALAN Skóre	64
14.1	ALAN skóre pro celý prostor.....	65
14.2	Skóre pro jednotlivé objekty	66

14.3	Celkové hodnocení ALAN a celkové skóre.....	68
15	Příprava na měření	70
15.1	Instalace stativu a panoramatické hlavy	70
15.2	Instalace jasového/melanopického analyzátoru.....	70
15.3	Instalace meteostanice.....	70
	Příprava měřicích přístrojů	70
16	Postup měření	71
16.1	Hlavní měření	71
16.2	Doplňkové měření	71
17	Nejistoty měření.....	72
17.1	Měření pomocí jasové kamery	72
17.2	Měření pomocí luxmetru.....	78
17.3	Měření pomocí spektoradiometru.....	80
18	Vyhodnocení měření	81
18.1	Formát vstupních dat	81
18.2	Kontrola vstupních dat	81
18.3	Zpracování dat.....	81
19	PROTOKOL o měření.....	82
20	Závěr	84
21	Reference	85
	PŘÍLOHA 1 UKÁZKOVÝ PROTOKOL O MĚŘENÍ.....	89

1 PŘEDMĚT METODIKY

Hlavním cílem metodiky je hodnocení množství umělého světla ve venkovním nočním prostředí s ohledem na jeho vlivy na živé organismy. Metodika staví na existenci nově vytvořené měřicí technice s jejími aktuálními technologickými možnostmi, které se řešily v rámci výzkumného projektu. To umožňuje získávání dat o světelném prostředí ve venkovním prostoru. Metodika rozšiřuje oblast vlivu i na nevizuální projevy optického záření ve frekvenčním rozsahu viditelného světla.

Metodika definuje specifické indikátory popisující záření v oblasti frekvencí viditelného spektra a popisuje postup měření, jak tyto indikátory získat. Základním faktorem pro hodnocení jsou veličiny vycházející z podstaty světelného pole v zájmové oblasti s cílem získat objektivní představu o množství záření působící v oblasti viditelného světla. Jelikož však viditelné světlo je pouze jedním z projevů záření v daném frekvenčním rozsahu, který světlem nazýváme (je vidět, uvědomujeme si jeho přítomnost), jsou zde definovány další indikátory detekující množství záření v té samé oblasti frekvencí, ale které ovlivňuje živé organismy v rámci vybrané citlivostní funkce patřící do skupiny tzv. neobrazových (obraz netvořící) funkcí.

Dalším bodem metodiky je určení přirozené, referenční úrovně světla v nočním prostředí, a to pro libovolné místo na planetě Zemi. Referenční hodnoty jsou pak určeny pro podmínky České republiky. Metodika dále řeší způsob zpracování naměřených dat, jejich interpretaci a srovnání s definovanou referenční hodnotou přirozeného záření a světla v nočním prostředí.

Předmětem metodiky není stanovení mezních hodnot, limitů a hodnocení dopadu na konkrétní živé organismy. Posuzuje objektivní přítomnost záření v oblasti vlnových délek 380-780 nm, což je oblast definovaná primárně pro světlo s potencií fyziologických vlivů na živé organismy.

2 VYBRANÉ A SOUVISEJÍCÍ PRÁVNÍ PŘEDPISY, TECHNICKÉ NORMY A DOPORUČENÍ

S navrhovanou metodikou souvisejí následující právní předpisy, technické normy a mezinárodní doporučení:

Zákon č. 505/1990 Sb.	Zákon o metrologii
Zákon č. 13/1997 Sb.	Zákon o pozemních komunikacích, ve znění pozdějších předpisů;
Zákon č. 22/1997 Sb.	Zákon o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů;
Zákon č. 100/2001 Sb.	Zákon o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o posuzování vlivů na životní prostředí);
Zákon č. 114/1992 Sb.	Zákon České národní rady o ochraně přírody a krajiny, ve znění pozdějších předpisů;
Zákon č. 128/2000 Sb.	Zákon o obcích (obecní zřízení), ve znění pozdějších předpisů;
Zákon č. 129/2000 Sb.	Zákon o krajích (krajské zřízení), ve znění pozdějších předpisů;
Zákon č. 131/2000 Sb.	Zákon o hlavním městě Praze, ve znění pozdějších předpisů;
Zákon č. 183/2006 Sb.	Zákon o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon), ve znění pozdějších předpisů;
Zákon č. 258/2000 Sb.	Zákon o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů;
Zákon č. 262/2006 Sb.	Zákon zákoník práce, ve znění pozdějších předpisů;
Zákon č. 266/1994 Sb.	Zákon o drahách, ve znění pozdějších předpisů;
Zákon č. 283/2021 Sb.	Zákon stavební zákon, ve znění pozdějších předpisů;
Zákon č. 309/2006 Sb.	Zákon, kterým se upravují další požadavky bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v pracovněprávních vztazích a o zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při činnosti nebo poskytování služeb mimo pracovněprávní vztahy (zákon o zajištění dalších podmínek bezpečnosti a ochrany zdraví při práci), ve znění pozdějších předpisů;
Vyhl. č. 104/1997 Sb.	Vyhláška Ministerstva dopravy a spojů, kterou se provádí zákon o pozemních komunikacích, ve znění pozdějších změn a doplňků;
Vyhl. č. 177/1995 Sb.	Vyhláška Ministerstva dopravy, kterou se vydává stavební a technický řád drah, ve znění pozdějších změn a doplňků;
Vyhl. č. 410/2005 Sb.	Vyhláška o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých, ve znění pozdějších změn a doplňků;
Nařízení vlády č. 361/2007 Sb.	Nařízení vlády, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, ve znění pozdějších předpisů;
Nařízení č. 10/2016 Sb.,	Nařízení hl. m. Prahy, kterým se stanovují obecné požadavky na využívání území a technické požadavky na stavby v hlavním městě Praze (pražské stavební předpisy), ve znění pozdějších předpisů.
Vyhl. č. 345/2002 Sb.	Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu, kterou se stanoví měřidla k povinnému ověřování a měřidla podléhající schválení typu
ČSN EN 12665	Světlo a osvětlení - Základní termíny a kritéria pro stanovení požadavků na osvětlení
ČSN IEC 50(845)	Mezinárodní elektrotechnický slovník. Kapitola 845: Osvětlení
ČSN 36 0011-1	Měření osvětlení prostorů - Část 1: Základní ustanovení
ČSN 36 0011-4	Měření osvětlení prostorů - Část 4: Měření umělého osvětlení venkovních prostorů
ČSN EN 12464-2	Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 2: Venkovní pracovní prostory;
ČSN EN 12 193	Světlo a osvětlení - Osvětlení sportovišť

ČSN EN 62717	LED moduly pro všeobecné osvětlování – Výkonnostní požadavky
ČSN EN 62722-2-1	Vlastnosti svítidel - Část 2-1: Zvláštní požadavky pro LED svítidla, 9/2016
ČSN 36 0459	Omezování nežádoucích účinků venkovního osvětlení
ČSN EN 12193	Světlo a osvětlení – Osvětlení sportovišť;
ČSN EN13201-2	Osvětlení pozemních komunikací – Část 2: Požadavky;
ČSN EN13201-3	Osvětlení pozemních komunikací – Část 3: Výpočet;
ČSN EN13201-4	Osvětlení pozemních komunikací – Část 4: Metody měření;
ČSN P 36 0455	Osvětlení pozemních komunikací – Doplnující informace;
ČSN 73 6100-1	Názvosloví pozemních komunikací – Část 1: Základní názvosloví;
ČSN 73 6100-2	Názvosloví pozemních komunikací – Část 2: Projektování pozemních komunikací;
ČSN 73 6100-3	Názvosloví pozemních komunikací – Část 3: Vybavení pozemních komunikací;
ČSN 73 6101	Projektování silnic a dálnic;
ČSN 73 6110	Projektování místních komunikací;
ČSN 73 6102	Projektování křižovatek na pozemních komunikacích;
ČSN 73 6056	Odstavné a parkovací plochy silničních vozidel;
ČSN 73 6425-1	Autobusové, trolejbusové a tramvajové zastávky, přestupní uzly a stanoviště – Část1: Navrhování zastávek;
ČSN 73 6425-2	Autobusové, trolejbusové a tramvajové zastávky, přestupní uzly a stanoviště – Část1: Přestupní uzly a stanoviště;
ČSN 73 7507	Projektování tunelů pozemních komunikací. TNI 01 0115 Mezinárodní metrologický slovník – Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)
0111-OOP-C046-15	Opatření obecné povahy, kterým se stanovují metrologické a technické požadavky na stanovená měřidla, včetně zkoušek při schvalování typu a při ověřování stanovených měřidel, ČMI, 01/2016
CIE 150:2017	Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Installations, 2nd ed.
CIE 233:2019	Calibration, Characterization and Use of Array Spectroradiometers
CIE S 025	CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light
ISO/CIE 11664-2:2022	CIE standard illuminants
JCGM 100:2008	Guide to the expression of uncertainty in measurement

3 NÁZVOSLOVÍ, DEFINICE

Názvosloví a definice jsou obsaženy v příslušných normách (ČSN EN 12665, ČSN IEC 50 (845)) a v publikacích o metrologické terminologii (TNI 01 0115, IEC 60050-845, popř. CIE dokumentů). Některé názvosloví bylo odvozeno od základních definic fotometrických veličin tak, aby doplnilo sledované α -opické veličiny, zde konkrétně melanopické veličiny. Další α -opické veličiny detailněji definovány nejsou. Pro účely tohoto dokumentu platí následující termíny a definice:

Prostorový úhel <prostoru s vrcholem v bodu> (*solid angle, <of an area subtended at a point>*)

Ω

plocha vyřatá pláštěm kužele na jednotkové kouli, jehož podstavu tvoří vyřatá plocha a jehož vrchol leží ve středu této koule

POZNÁMKA 1 k heslu: Prostorový úhel se vyjadřuje ve steradiánech (sr)

[IEC 60050-845:2022; 845-21-109]

Svítivost (*luminous intensity*)

I_v, I

hustota světelného toku v prostorovém úhlu ve stanoveném směru:

$$I_v = \frac{d\phi_v}{d\Omega}$$

Kde ϕ_v je světelný tok ve stanoveném směru a Ω je prostorový úhel obsahující tento směr

POZNÁMKA 1 k heslu: Svítivost se vyjadřuje v kandelách ($\text{cd} = \text{lm} \cdot \text{sr}^{-1}$)

[IEC 60050-845:2022; 845-21-045]

Zářivost (*radiant intensity*)

I_e

hustota zářivého toku v prostorovém úhlu ve stanoveném směru:

$$I_e = \frac{d\phi_E}{d\Omega}$$

Kde ϕ_E je zářivý tok ve stanoveném směru a Ω je prostorový úhel obsahující tento směr

POZNÁMKA 1 k heslu: Zářivost se vyjadřuje ve wattech na steradián ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$)

Melanopická zářivost (*melanopic radiant intensity*)

I_{mel}

hustota zářivého toku v prostorovém úhlu ve stanoveném směru:

$$I_{mel} = \frac{d\phi_{mel}}{d\Omega}$$

Kde Φ_{mel} je melanopický zářivý tok ve stanoveném směru a Ω je prostorový úhel obsahující tento směr

POZNÁMKA 1 k heslu: Melanopická zářivost se vyjadřuje ve wattech na steradián ($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$)

Světelný tok (*luminous flux*)

Φ_V, Φ

změna světelné energie v čase:

$$\phi_V = \frac{dQ_V}{dt}$$

kde Q_V je vyzařovaná, přenášená nebo přijímaná světelná energie a t je čas

POZNÁMKA 1 k heslu: Světelný tok se vyjadřuje v lumenech (lm).

POZNÁMKA 2 k heslu: Světelný tok je veličina odvozená z hodnoty zářivého toku Φ_e vyhodnoceného podle jeho účinku na standardního fotometrického pozorovatele CIE. Světelný tok lze odvodit ze spektrálního složení zářivého toku:

$$\phi_V = K_m \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

kde K_m je maximální světelný účinek, $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ je spektrální zářivý tok, $V(\lambda)$ je poměrná spektrální světelná účinnost a λ je vlnová délka

[IEC 60050-845:2022; 845-21-039]

Zářivý tok (*radiant flux*)

Φ_e

změna zářivé energie v čase:

$$\phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

kde Q_e je vyzařovaná, přenášená nebo přijímaná energie a t je čas.

POZNÁMKA 1 k heslu: Zářivý tok se vyjadřuje ve wattech (W).

[IEC 60050-845:2022; 845-21-038]

Melanopický zářivý tok (*melanopic radiant flux*)

Zářivý tok váhovaný citlivostí melanopické křivky $s_{mel}(\lambda)$

$\Phi_{e,mel}, \Phi_{mel}$

Lze vypočítat také jako změna melanopická zářivé energie v čase:

$$\phi_{e,mel} = \frac{dQ_{e,mel}}{dt}$$

kde $Q_{e,mel}$ je vyzařovaná, přenášená nebo přijímaná melanopická energie a t je čas.

POZNÁMKA 1 k heslu: Melanopický zářivý tok se vyjadřuje ve wattech (W).

Osvětlenost; intenzita osvětlení (*illuminance*)

E_v, E

hustota světelného toku dopadajícího na plochu v bodě na skutečném nebo imaginárním povrchu:

$$E_v = \frac{d\phi_v}{dA}$$

kde Φ_v je světelný tok a A plocha, na kterou světelný tok dopadá

POZNÁMKA 1 k heslu: Jednotkou je lux ($\text{lx} = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$).

POZNÁMKA 2 k heslu: Osvětlenost lze odvodit ze spektrálního složení ozáření pomocí vztahu:

$$E_v = K_m \int_0^{\infty} E_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

kde K_m je maximální světelný účinek, $E_{e,\lambda}(\lambda)$ je spektrální ozáření pro vlnovou délku λ a $V(\lambda)$ je poměrná spektrální světelná účinnost.

[IEC 60050-845:2022; 845-21-060]

Ozáření (*irradiance*)

E_e

hustota zářivého toku dopadajícího na plochu v bodě na skutečném nebo imaginárním povrchu:

$$E_e = \frac{d\phi_e}{dA}$$

kde Φ_e je zářivý tok a A plocha, na kterou zářivý tok dopadá

POZNÁMKA 1 k heslu: Jednotkou je watt na metr čtverečný ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

POZNÁMKA 2 k heslu: Ozáření lze odvodit ze spektrálního složení ozáření pomocí vztahu:

$$E_e = \int_0^{\infty} E_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$$

Melanopická ozáření (*melanopic irradiance*)

E_{mel}

hustota melanopického zářivého toku dopadajícího na plochu v bodě na skutečném nebo imaginárním povrchu:

$$E_{mel} = \frac{d\phi_{mel}}{dA}$$

kde Φ_{mel} je melanopický zářivý tok a A plocha, na kterou melanopický zářivý tok dopadá

POZNÁMKA 1 k heslu: Jednotkou je watt na metr čtverečný ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

POZNÁMKA 2 k heslu: Melanopickou ozáření lze odvodit ze spektrálního složení ozáření pomocí vztahu:

$$E_{mel} = \int_0^{\infty} E_{e,\lambda}(\lambda) \cdot s_{mel}(\lambda) d\lambda$$

Udržovaná osvětlenost (*maintained illuminance*)

$\bar{E}_m$

Hodnota průměrné osvětlenosti, pod kterou nesmí osvětlenost na stanovené ploše poklesnout.

POZNÁMKA 1 k heslu: Jednotkou je lux (lx).

POZNÁMKA 2 k heslu: Je to průměrná osvětlenost v okamžiku, kdy má být provedena údržba.

[CIE S 017/E:2011; 17-750; 3.2.14]

Normálová osvětlenost (*normal illuminance*)

Osvětlenost měřená v normále plochy směřující přímo ve směru ke světelnému zdroji. Normála plochy dopadu je shodná se spojnicí místa měření a světelného středu světelného zdroje. V rámci této metodiky je označení normálová osvětlenost používáno ve vztahu vyjádření přímého vektoru osvětlenosti, který působí v daném místě od libovolného zdroje. Měřidlo je umístěno v rovině kolmé na tento vektor, popř. jsou hodnoty získávány ze sférické projekce bodů na plošném snímači analyzátorů pod příslušným úhlem.

POZNÁMKA 1 k heslu: Normálová osvětlenost se vyjadřuje v luxech (lx).

Normálová ozáření (*normal irradiance*)

Ozáření měřená v normále plochy směřující přímo ve směru ke světelnému zdroji. Normála plochy dopadu je shodná se spojnicí místa měření a světelného středu světelného zdroje. V rámci této metodiky je označení normálová melanopická ozáření používáno ve vztahu vyjádření přímého vektoru ozáření, který působí v daném místě od libovolného zdroje. Měřidlo je umístěno v rovině kolmé na tento vektor, popř. jsou hodnoty získávány ze sférické projekce bodů na plošném snímači analyzátorů pod příslušným úhlem.

POZNÁMKA 1 k heslu: Normálová ozáření se vyjadřuje watech na metr čtverečný ($W.m^{-2}$).

Normálová melanopická ozáření (*normal melanopic irradiance*)

Ozáření hodnocená melanopickou citlivostí $s_{mel}(\lambda)$ měřená v normále plochy směřující přímo ve směru ke světelnému zdroji. Normála plochy dopadu je shodná se spojnicí místa měření a světelného středu světelného zdroje. V rámci této metodiky je označení normálová melanopická ozáření používáno ve vztahu vyjádření přímého vektoru melanopické ozáření, který působí v daném místě od libovolného zdroje. Měřidlo je umístěno v rovině kolmé na tento vektor, popř. jsou hodnoty získávány ze sférické projekce bodů na plošném snímači analyzátorů pod příslušným úhlem.

POZNÁMKA 1 k heslu: Normálová melanopická ozáření se vyjadřuje watech na metr čtverečný ($W.m^{-2}$).

Horizontální osvětlenost (*horizontal illuminance*)

$$E_h$$

Osvětlenost měřená v normále horizontální plochy směřující do zenitu. V rámci této metodiky je označení horizontální osvětlenost použito pro vyjádření vektoru osvětlenosti horizontální, tedy vodorovné roviny. Měřidlo s příslušnou kosinusovou korekcí je umístěno v rovině horizontální, popř. jsou hodnoty získávány ze sférické projekce bodů na plošném snímači analyzátorů pod příslušným úhlem se započtením kosinu úhlu dopadu na horizontální rovinu.

POZNÁMKA 1 k heslu: Horizontální osvětlenost se vyjadřuje v luxech (lx).

Horizontální ozáření (*horizontal irradiance*)

$$E_{e,h}$$

Ozáření měřená v normále horizontální plochy směřující do zenitu. V rámci této metodiky je označení horizontální ozáření použito pro vyjádření vektoru ozáření horizontální, tedy vodorovné roviny. Měřidlo s příslušnou kosinusovou korekcí je umístěno v rovině horizontální, popř. jsou hodnoty získávány ze sférické projekce bodů na plošném snímači analyzátorů pod příslušným úhlem se započtením kosinu úhlu dopadu na horizontální rovinu.

POZNÁMKA 1 k heslu: Horizontální ozáření se vyjadřuje ve wattech na metr čtverečný ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

Horizontální melanopická ozáření (*horizontal melanopic irradiance*)

$$E_{mel,h}$$

Melanopická ozáření měřená v normále horizontální plochy směřující do zenitu. V rámci této metodiky je označení horizontální melanopická ozáření použito pro vyjádření vektoru melanopická ozáření horizontální, tedy vodorovné roviny. Měřidlo s příslušnou kosinusovou korekcí je umístěno v rovině horizontální, popř. jsou hodnoty získávány ze sférické projekce bodů na plošném snímači analyzátorů pod příslušným úhlem se započtením kosinu úhlu dopadu na horizontální rovinu.

POZNÁMKA 1 k heslu: Horizontální melanopická ozáření se vyjadřuje ve wattech na metr čtverečný ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

Kulová osvětlenost (*spherical illuminance*)

$$E_{V,O} , E_{4\pi}$$

Střední hodnota osvětlenosti na vnějším povrchu velmi malé koule (skutečné nebo imaginární) v bodě prostoru

$$E_{V,O} = \int_{4\pi} L_V d\Omega$$

kde Ω je prostorový úhel a L_V je jas.

POZNÁMKA 1 k heslu: Kulová osvětlenost se vyjadřuje v luxech ($\text{lx} = \text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$).

POZNÁMKA 2 k heslu: V technické literatuře se vyskytuje pojem střední kulová osvětlenost, která je definována jako $E_{4\pi} = \frac{1}{4} E_{V,O}$

POZNÁMKA 3: Zde je rozpor v definicích v mezinárodním slovníku a popisu dané veličiny. Pro účely této metodiky budeme používat níže uvedený pojem, a to prostorová osvětlenost. Kulová osvětlenost je zde uvedena pro doplnění, aby nevznikaly v budoucnu nejasnosti mezi veličinami. Adekvátní pojmy *kulová ozáření* a *kulová melanopická ozáření* zde neuvádíme, aby nedošlo k dalším zbytečným nejasnostem.

[IEC 60050-845:2022; 845-21-066]

Prostorová osvětlenost (*scalar illuminance*)

E_O

Střední hodnota osvětlenosti v bodě prostoru

$$E_O = \int_{4\pi} L_V d\Omega$$

kde Ω je prostorový úhel a L_V je jas.

POZNÁMKA 1 k heslu: Prostorová osvětlenost se vyjadřuje v luxech ($\text{lx} = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$).

Výpočet je číselně stejný jako v předchozím případě kulové osvětlenosti dle definice [IEC 60050-845:2022; 845-21-066]. Nicméně jak již bylo uvedeno v poznámce výše, vztah těchto osvětleností je v poměru $E_{4\pi} = 1/4 E_O$. Pro účely této metodiky je používán tento vztah.

[CIE S 017/E:2011; 17-1137]

Prostorová ozáření (*scalar irradiance*)

$E_{e,O}$

Střední hodnota ozáření v bodě prostoru

$$E_{e,O} = \int_{4\pi} L_e d\Omega$$

kde Ω je prostorový úhel a L_e je zář.

POZNÁMKA 1 k heslu: Prostorová ozáření se vyjadřuje ve wattech na metr čtverečný ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Pro účely této metodiky je používán tento vztah.

Prostorová melanopická ozáření (*scalar melanopic irradiance*)

$E_{mel,O}$

Střední hodnota melanopická ozáření v bodě prostoru

$$E_{mel,O} = \int_{4\pi} L_{mel} d\Omega$$

kde Ω je prostorový úhel a L_{mel} je melanopická zář.

POZNÁMKA 1 k heslu: Prostorová melanopická ozáření se vyjadřuje ve wattech na metr čtverečný ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Pro účely této metodiky je používán tento vztah.

Válcová osvětlenost (*cylindrical illuminance*)

$$E_{v,c}, E_c$$

Střední hodnota osvětlenosti vnějšího zakřiveného povrchu pláště velmi malého (skutečného nebo imaginárního) svisle orientovaného válce v bodě prostoru. Někdy je také definována jako aritmetický průměr svislé osvětlenosti $E_{v,v}$ v bodě prostoru:

$$E_{v,c} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_{v,v} d\varphi$$

kde $E_{v,v}$ je svislá osvětlenost elementární plošky, jejíž normála svírá s rovinou kolmou na osu válce úhel φ .

POZNÁMKA 1 k heslu: Válcová osvětlenost se vyjadřuje v luxech (lx).

[IEC 60050-845:2022; 845-21-063]

Válcová ozáření (*cylindrical irradiance*)

$$E_{e,c}, E_{ev}$$

Střední hodnota ozáření vnějšího zakřiveného povrchu pláště velmi malého (skutečného nebo imaginárního) svisle orientovaného válce v bodě prostoru. Někdy je také definována jako aritmetický průměr svislé ozáření $E_{e,v}$ v bodě prostoru:

$$E_{e,c} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_{e,v} d\varphi$$

kde $E_{e,v}$ je svislá ozáření elementární plošky, jejíž normála svírá s rovinou kolmou na osu válce úhel φ .

POZNÁMKA 1 k heslu: Válcová ozáření se vyjadřuje ve wattech na metr čtverečný (W.m^{-2}).

Válcová melanopická ozáření (*cylindrical melanopic irradiance*)

$$E_{mel,c}, E_{mel,v}$$

Střední hodnota ozáření vnějšího zakřiveného povrchu pláště velmi malého (skutečného nebo imaginárního) svisle orientovaného válce v bodě prostoru. Někdy je také definována jako aritmetický průměr svislé ozáření $E_{e,v}$ v bodě prostoru:

$$E_{mel,c} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_{mel,v} d\varphi$$

kde $E_{mel,v}$ je svislá melanopická ozáření elementární plošky, jejíž normála svírá s rovinou kolmou na osu válce úhel φ .

POZNÁMKA 1 k heslu: Válcová melanopická ozáření se vyjadřuje ve wattech na metr čtverečný (W.m^{-2}).

Jas (luminance)

$$L_v, L$$

hustota svítivosti na průmětu plochy v daném směru v daném bodě na reálném nebo imaginárním povrchu:

$$L_v = \frac{dI_v}{dA} \frac{1}{\cos \alpha}$$

kde I_v je svítivost, A plocha a α je úhel mezi normálou k povrchu v daném bodě a daným směrem

POZNÁMKA 1 k heslu: Jas se vyjadřuje v kandelách na metr čtverečný ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1}$).

[IEC 60050-845:2022; 845-21-050]

Jas svazku paprsků (beam luminance)

$$L_{OP}$$

Světelně technická veličina, na kterou bezprostředně reaguje zrakový orgán. Jde o veličinu určenou prostorovou a plošnou hustotou světelného toku přenášeného paprsky:

$$L_{OP} = \frac{d^2 \Phi}{d\Omega dA_n}$$

kde L_{OP} je jas svazku paprsků ve směru osy OP svazku, $d\Omega$ je prostorový úhel, ve kterém se paprsky šíří a dA_n je ploška kolmá k ose svazku paprsků, na níž se realizuje plošná hustota světelného toku.

Zář (radiance)

$$L_e$$

Veličina zář je prostorová hustota zářivého toku vyzářeného plošným zdrojem.

$$L_e = \int_{\lambda=380}^{780} L_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$$

kde $L_{e,\lambda}$ je spektrální zář.

POZNÁMKA 1 k heslu: Zář se udává v jednotkách watt na metr čtvereční na steradián ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$).

Malanopická zář (melanopic radiance)

$$L_{mel}$$

Veličina melanopická zář je prostorová hustota zářivého toku vyzářeného plošným zdrojem váhovaná citlivostí $s_{mel}(\lambda)$.

$$L_{mel} = \int_{\lambda=380}^{780} L_{e,\lambda}(\lambda) s_{mel}(\lambda) d\lambda$$

kde $L_{e,\lambda}$ je spektrální zář.

POZNÁMKA 1 k heslu: Melanopická zář se udává v jednotkách watt na metr čtvereční na steradián ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$).

Světelná energie (*luminous energy*)

Q_v, Q

NEVHODNÝ TERMÍN: Světelné množství

Energie elektromagnetických vln vyhodnocená poměrnou spektrální světelnou účinností vynásobená maximálním světelným účinkem při stanovených fotometrických podmínkách. Pro fotopické vidění je vyjádřena vztahem

$$Q_v = K_m \int_0^\infty Q_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

kde $Q_{e,\lambda}(\lambda)$ je spektrální zářivá energie o vlnové délce λ , $V(\lambda)$ je poměrná spektrální světelná účinnost a K_m je maximální světelný účinek.

POZNÁMKA 1 k heslu: Světelná energie se vyjadřuje v lumensekundách ($\text{lm} \cdot \text{s}$) nebo lumenhodinách ($\text{lm} \cdot \text{h}$).

[IEC 60050-845:2022; 845-21-037]

Zářivá energie (*radiant energy*)

Q_e, Q, W, U

Energie vyzařovaná, přenášená nebo přijímaná ve formě elektromagnetických vln. Množství zářivé energie se vyjadřuje jako funkce vlnové délky, kmitočtu, nebo vlnočtu a lze vyjádřit časovým integrálem zářivého toku Φ_e přes daný časový interval Δt :

$$Q_e = \int_{\Delta t} \Phi_e dt$$

POZNÁMKA 1 k heslu: Zářivá energie se vyjadřuje v joulech ($\text{J} = \text{W} \cdot \text{s}$).

[IEC 60050-845:2022; 845-21-041]

Melanopická zářivá energie (*melanopic radiant energy*)

$Q_{e,mel}, Q_{mel}, W_{mel}, U_{mel}$

Energie vyzařovaná, přenášená nebo přijímaná ve formě elektromagnetických vln. Množství zářivé energie se vyjadřuje jako funkce vlnové délky, kmitočtu, nebo vlnočtu a lze vyjádřit časovým integrálem zářivého toku Φ_e přes daný časový interval Δt :

Energie elektromagnetických vln vyhodnocená poměrnou spektrální melanopickou účinností.

$$Q_{mel} = \int_{\Delta t} \Phi_e \cdot s_{mel}(\lambda) dt$$

POZNÁMKA 1 k heslu: Melanopická zářivá energie se vyjadřuje v joulech ($\text{J} = \text{W} \cdot \text{s}$).

Objemová hustota světelné energie (*luminous energy density*) w

Objemová hustota světelné energie popisuje množství světelné energie v určitém objemu prostoru, tedy energie vnímatelné lidským zrakem.

$$E_{4\pi} = \frac{1}{4} E_0 = w \cdot c$$

$$w = \frac{E_0}{4 \cdot c} = \frac{E_{4\pi}}{c}$$

kde E_0 je prostorová osvětlenost, $E_{4\pi}$ je kulová osvětlenost a c je rychlost světla.

POZNÁMKA 1 k heslu: Světelná energie se vyjadřuje v lumensekundách na kubický metr ($\text{lm} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$) nebo lumenhodinách na kubický metr ($\text{lm} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$).

Objemová hustota zářivé energie (*radiant energy density*) w_e

Energie záření na jednotku objemu

$$w_e = \frac{Q_e}{V} = \frac{\int_{\Delta t} \Phi_e dt}{V}$$

POZNÁMKA 1 k heslu: Hustota zářivé energie se vyjadřuje v joulech na kubický metr ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$)

Objemová hustota melanopické zářivé energie (*melanopic radiant energy density*) w_{mel}

$$w_{mel} = \frac{Q_{mel}}{V} = \frac{\int_{\Delta t} \Phi_e \cdot s_{mel}(\lambda) dt}{V}$$

Energie melanopického záření na jednotku objemu

POZNÁMKA 1 k heslu: Objemová hustota melanopická zářivé energie se vyjadřuje v joulech na kubický metr ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$)

Spektrální složení (*spectral distribution*) X_λ

Hustota zářivé nebo světelné nebo fotonové veličiny $X(\lambda)$ v intervalu vlnových délek $d\lambda$ pro vlnovou délku λ :

$$X_\lambda = \frac{dX(\lambda)}{d\lambda}$$

POZNÁMKA 1 k heslu: Spektrální složení zářivého toku se vyjadřuje ve wattech na nanometr ($\text{W} \cdot \text{nm}^{-1}$), spektrální složení světelného toku se vyjadřuje v lumenech na nanometr ($\text{lm} \cdot \text{nm}^{-1}$), spektrální složení fotonového toku se vyjadřuje v nanometrech na mínus prvou (nm^{-1}).

[IEC 60050-845:2022; 845-21-029]

 α -opic zářivý tok (*α -opic radiant flux*)

Zářivý tok obecně vyjadřuje vyzářené množství energie za určitý čas. Veličina Φ_α má jednotku watt (W) a vypočte se podle vztahu:

$$\phi_{\alpha} = \int_{\lambda=38}^{780} \phi_{e,\lambda}(\lambda) s_{\alpha}(\lambda) d\lambda$$

kde $\phi_{e,\lambda}(\lambda)$ je spektrální zářivý tok.

α -opic intenzita ozáření (α -opic irradiance)

Intenzita ozáření je definována jako plošná hustota zářivého toku dopadajícího na určitou plochu. Jednotkou této veličiny je watt na metr čtvereční ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) a stanoví se vztahem.

$$E_{\alpha} = \int_{\lambda=380}^{780} E_{e,\lambda}(\lambda) s_{\alpha}(\lambda) d\lambda$$

kde $E_{e,\lambda}(\lambda)$ je spektrální intenzita ozáření.

α -opic zář (α -opic radiance)

Veličina zář je prostorová hustota zářivého toku vyzářeného plošným zdrojem. Tato veličina se udává v jednotkách watt na metr čtvereční na steradián ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-2}$) a je dána vztahem.

$$L_{\alpha} = \int_{\lambda=38}^{780} L_{e,\lambda}(\lambda) s_{\alpha}(\lambda) d\lambda$$

kde $L_{e,\lambda}$ je spektrální záře.

α -opic světelná účinnost záření (α -opic efficacy of luminous radiation, ELR)

Tato veličina vyjadřuje podíl α -opické odezvy k fotometrické odezvě na dané záření. Pro veličinu zářivého toku lze α -opic světelnou účinnost záření vypočítat vztahem

$$K_{\alpha,V} = \frac{\phi_{\alpha}}{\phi_V} = \frac{\int_{\lambda=38}^{780} \phi_{e,\lambda}(\lambda) s_{\alpha}(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{\lambda=380}^{780} \phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}$$

Kde ϕ_V je světelný tok, vážený podle spektrální citlivosti normalizovaného pozorovatele $V(\lambda)$. K_m je maximální světelná účinnost pro fotopické vidění ($K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$). Jednotkou $K_{\alpha,V}$ je watt na lumen ($\text{W} \cdot \text{lm}^{-1}$).

α -opic ekvivalentní jas denního světla D65 (α -opic equivalent daylight D65 luminance, EDL)

Tato veličina vyjadřuje jas vytvořený zářením odpovídajícím normovanému dennímu světlu (D65), který způsobuje stejnou α -opickou odezvu L_{α} jako zkušební zdroj světla. Jednotkou je kandela na metr čtvereční ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) a je dán vztahem

$$L_{V,\alpha}^{D65} = \frac{L_{\alpha}}{K_{\alpha,V}^{D65}}$$

kde L_{α} je α -opická zář a $K_{\alpha,V}^{D65}$ je α -opická světelná účinnost záření denního světla D65.

α -opic poměr účinnosti denního světla D65 (α -opic daylight D65 efficacy ratio)

Tato veličina je dána poměrem α -opic světelné účinnosti záření a α -opic světelné účinnosti záření denního světla D65. Jedná se o bezrozměrnou veličinu danou vztahem

$$\gamma_{\alpha,V}^{D65} = \frac{K_{\alpha,V}}{K_{\alpha,V}^{D65}}$$

Spektrální citlivost, spektrální odezva (*spectral sensitivity, spectral response*)

Spektrální odezva popisuje citlivost fotosenzoru na optické záření různých vlnových délek. Citlivost při dané vlnové délce se nazývá spektrální citlivost.

Rušivé světlo (*obtrusive light*)

Neužitečné světlo, které svými kvantitativními nebo směrovými vlastnostmi zvětšuje obtěžování, nepohodu, rozptýlení nebo omezuje schopnost vidět podstatné informace, jakou jsou dopravní signály.

[IEC 60050-845:2022; 845-29-181]

Světelné znečištění (*light pollution*)

Souhrn všech nepříznivých účinků umělého světla

[IEC 60050-845:2022; 845-29-177]

Neužitečné světlo (*stray light, spill light*)

Světlo vyzařované osvětlovací soustavou za hranice oblasti, pro kterou je osvětlovací soustava navržena

[IEC 60050-845:2022; 845-29-185]

Barevný podnět (*colour stimulus*)

viditelné záření, které vniká do oka a budí chromatický nebo achromatický barevný počitek

[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-03-02]

Chromaticita (*chromaticity*)

vlastnost barevného podnětu definovaná jeho trichromatickými souřadnicemi nebo náhradní nebo doplňkovou vlnovou délkou a čistotou

[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-03-34]

Trichromatické souřadnice (*chromaticity coordinates*)

podíl každé ze tří trichromatických složek k jejich součtu

POZNÁMKA 1 Jelikož součet tří trichromatických souřadnic je roven hodnotě 1, je plně postačující uvádět dvě z nich pro definici dané chromaticity.

POZNÁMKA 2 Ve standardních kolorimetrických soustavách CIE jsou trichromatické souřadnice označeny symboly x , y , z a x_{10} , y_{10} , z_{10} .

[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-03-33]

Trichromatické složky (*tristimulus values*)

množství tří měrných barevných podnětů v dané trichromatické soustavě potřebné k vyrovnání s barevným vjemem uvažovaného podnětu

POZNÁMKA Ve standardních kolorimetrických soustavách CIE se trichromatické složky barevného podnětu označují X , Y , Z a X_{10} , Y_{10} , Z_{10} .

[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-03-22]

Teplota chromatičnosti (*colour temperature*)

T_c (K)

teplota černého tělesa, jehož záření má stejnou chromatičnost jako daný barevný podnět

[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-03-49]

Náhradní teplota chromatičnosti (*correlated colour temperature*)

T_{cp} (K)

teplota černého tělesa, jehož vnímaná barva se co nejvíce podobá vjemu barvy uvažovaného podnětu při stejné jasnosti a za stanovených podmínek pozorování

POZNÁMKA 1 Doporučená metoda výpočtu náhradní teploty chromatičnosti podnětu je, že se na diagramu chromatičnosti určí teplota, která odpovídá průsečíku čáry teplotních zářičů se smluvní izotemperou, na níž leží bod reprezentující uvažovaný podnět (viz publikace CIE č. 15).

POZNÁMKA 2 Převrácená náhradní teplota chromatičnosti se používá častěji než převrácená teplota chromatičnosti, kdykoliv jde o náhradní teplotu chromatičnosti.

[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-03-50]

Podání barev (*colour rendering*)

vliv druhu světla na vjem barvy předmětů vědomým nebo podvědomým srovnáváním s vjemem jejich barvy ve srovnávacím světle

POZNÁMKA Německý výraz „Farbwiedergabe“ se vztahuje také k reprodukci barev.

[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-02-59]

Všeobecný index podání barev CIE 1974 (*CIE 1974 general colour rendering index*)

R_a (-)

střední hodnota zvláštních indexů podání barev CIE 1974 pro stanovenou sadu osmi zkušebních barevných vzorků

Radiometr (*radiometer*)

přístroj k měření zářivých veličin

[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-05-06]

Spektroradiometr (*spectroradiometer*)

přístroj k měření zářivých veličin v užších intervalech vlnových délek v daném rozsahu spektra
[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-05-07]

Kolorimetr (*colorimeter*)

přístroj k měření kolorimetrických veličin
[IEC 60050-845:1987/CIE 17.4:1987; 845-05-18]

Stárnutí (*ageing*)

doba provozu světelného zdroje nezbytná pro dosažení počátečních hodnot fotometrických a elektrických veličin

Doba stabilizace (*stabilisation time*)

doba provozu světelného zdroje potřebná pro dosažení stabilních hodnot fotometrických veličin a elektrického příkonu při konstantních napájecích podmínkách

Nejistota měření (*measurement uncertainty*)

nezáporný parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny přiřazených k měřené veličině na základě použité informace.

Chyba měření (*measurement error*)

naměřená hodnota veličiny minus referenční hodnota veličiny

4 SOUČASNÝ STAV TECHNOLOGIE V OBLASTI MĚŘENÍ A HODNOCENÍ UMĚLÉHO SVĚTLA V NOČNÍM PROSTŘEDÍ

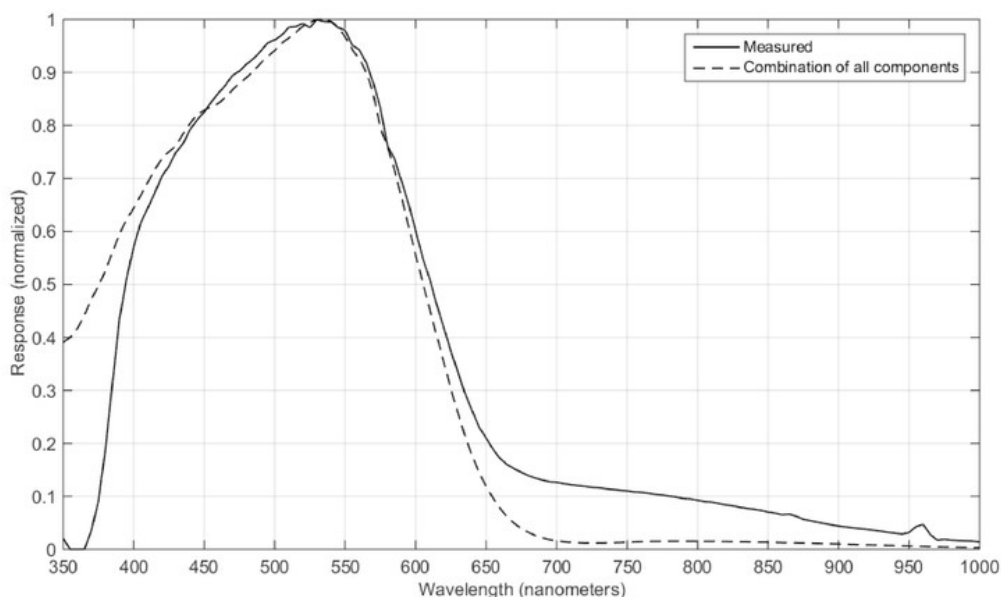
Tato kapitola v rámci metodiky dokumentuje informace, které souvisejí s návrhem postupů pro hodnocení ALAN dále uvedeným způsobem. Je vhodné se seznámit s obsahem této části práce zejména z důvodu pochopení výběru zvolených postupů a použití dané technologie. Z průzkumu současných technologií jednoznačně vyplývá, že žádná z dosud používaných technologií se nezaměřuje na konkrétní identifikaci zdrojů nočního umělého světla, ale pouze zprostředkovaně indikují obecný stav zvyšování jasu především nočního nebe. Je to pochopitelné, neboť převážná část technologií je spojena s astronomií a kosmickými projekty a nemá přímou vazbu na ochranu životního prostředí z hlediska životních forem. Navržená metodika zásadním způsobem mění způsob měření, ale i vyhodnocení umělého světla v nočním prostředí, a tedy přináší zcela jiný pohled na světlo v nočním prostředí. Není tedy pouze jakýmsi doplňkem nebo rozšířením stávajících metod, ale přináší objektivní systém, který je navázaný na fotometrické standardy ve světelné technice a je možné jej aplikovat již ve fázi návrhu osvětlovacích soustav a samozřejmě při výrobě osvětlovacích systémů. Dosavadní metody měření a hodnocení se soustřeďují zejména na jas oblohy anebo na záření vycházející z povrchu planety do prostoru směrem nahoru pozorováno letecky anebo družicově. Měřicí metody lze rozdělit do kategorií 1D (výsledek je jedno číslo) a 2D (výsledkem je „jasová“ mapa) – ty využívají pro měření principu digitální fotografie. Slovo „jasová“ je třeba brát skutečně jinak, než je běžně zvykem ve světelné technice, neboť žádný ze stávajících systémů skutečný fotometrický jas neměří a neměří ani jinou normovanou zářivou veličinu. Jedná se o individuální veličiny se specifickou metrikou, jejíž vazba na SI standardy je velmi komplikovaná ne-li nemožná.

4.1 Přístrojová technika pro měření jasu noční oblohy

Uvedené přístroje spadají do kategorie měření světelného znečištění „Ground-up“ – tedy měření jasu noční oblohy z povrchu Země.

4.1.1 SQM – Sky Quality Meter

Jedním z prvních přístrojů, který byl navržen pro měření jasu noční oblohy (a patrně také nejvíce široce rozšířený přístroj) je produkt Sky Quality Meter kanadské společnosti Unihedron. Jeho primární cílovou skupinou jsou amatérští astronomové, z jejichž řad také vzešel požadavek na přístroj, schopný měřit i velmi nízké hodnoty jasu. Vzhledem k faktu, že jde primárně o přístroj pro astronomii jsou výsledky měření uváděny v $\text{mag}_v \cdot \text{arcsec}^{-2}$ a minimální měřená hodnota jasu je přibližně $22 \text{ mag}_v \cdot \text{arcsec}^{-2}$, což odpovídá zhruba $171 \mu\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Naměřené hodnoty se zobrazují na vestavěném LED displeji. Tento přístroj (dále jen SQM) je vybaven senzorem Taos TSL237S, což je fotodioda s vestavěným převodníkem typu osvětlenost-frekvence. Tento snímač je dále vybaven filtrem HOYA CM-500, limitujícím zejména vlnové délky v oblasti červené a infračervené. Součástí přístroje je i termistor pro teplotní kompenzaci měření. Přístroj se vyrábí ve dvou variantách, lišící se zorným úhlem. Varianta SQM má široké zorné pole o velikosti 84° [1], varianta SQM-L má pak zorné pole užší, 20° [2] – obojí uvažováno při použití metody Full Width, Half Maximum, tedy bereme šířku celého zorného pole až do bodu, kde intenzita signálu padne na polovinu maxima. Zatímco varianta se širším zorným úhlem je schopna měření víceméně jediné hodnoty jasu nočního nebe, druhá varianta SQM-L nám díky užšímu zornému poli dovoluje určitou flexibilitu při měření a například měření jasu oblohy nad jednotlivými horizonty dle světových stran a také v zenitu. Tím tedy dokáže uživateli poskytnout větší míru informovanosti o stavu noční oblohy. Druhá zmíněná varianta se pak prodává v několika verzích, lišících se dostupnou komunikací (USB, ethernet, RS232...) a možnostmi automatického měření.

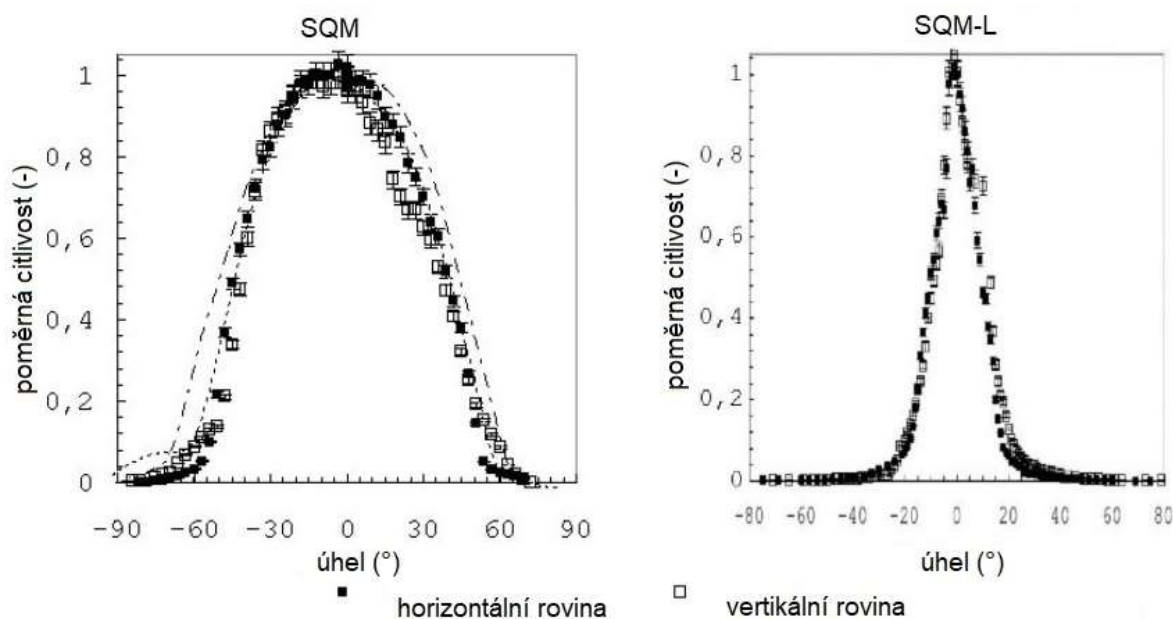


Obrázek 4.1 Spektrální odezva přístroje SQM (čárkovaně teoretická, plnou čarou změřená) [3]

Z obrázku 4.1 je patrné, že ani teoretická, ani reálná spektrální odezva tohoto přístroje neodpovídá ani spektrální citlivosti normálního pozorovatele $V(\lambda)$, ani váhovací křivce systému Johnson V (odpovídající viditelnému pásmu v astronomii). Tento fakt má za následek určitou nezanedbatelnou spektrální chybu měření daným přístrojem, která se následně negativně projevuje zejména v případě, že chceme měření porovnávat s jiným, provedeným jinou metodou.

Přístroje SQM jsou kalibrovány proti cejchovanému luxmetru, do roku 2011 se tato kalibrace prováděla proti kompaktní zářivce, od roku 2011 pak oproti zelené LED s maximem v 520 nm. Přístroje, kalibrované proti staršímu světelnému zdroji oproti těm novějším přibližně o $0,15 - 0,2 \text{ mag}_v \cdot \text{arcsec}^{-2}$ podměřují [4].

Jak je patrné z uvedeného, tento měřicí přístroj je levným (cca 150 USD) instrumentem pro měření i poměrně velmi nízkých hodnot jasu, což je ovšem vykoupeno nepříliš dokonalým spektrálním přizpůsobením a celkovou jednoduchostí měřicí aparatury, schopné poskytnout maximálně několik hodnot popisujících jas nočního nebe – a to v případě varianty s užším zorným úhlem. Navíc v provedených měřeních se logicky projeví i hustota případné oblačnosti, či jas Měsíce, s čímž měřicí metodika pro daný přístroj vůbec nepočítá. Pro amatérská měření astronomů či orientační měření jsou však jeho kvality dostačující, vzhledem k uváděným nejistotám měření okolo 10 % [4].



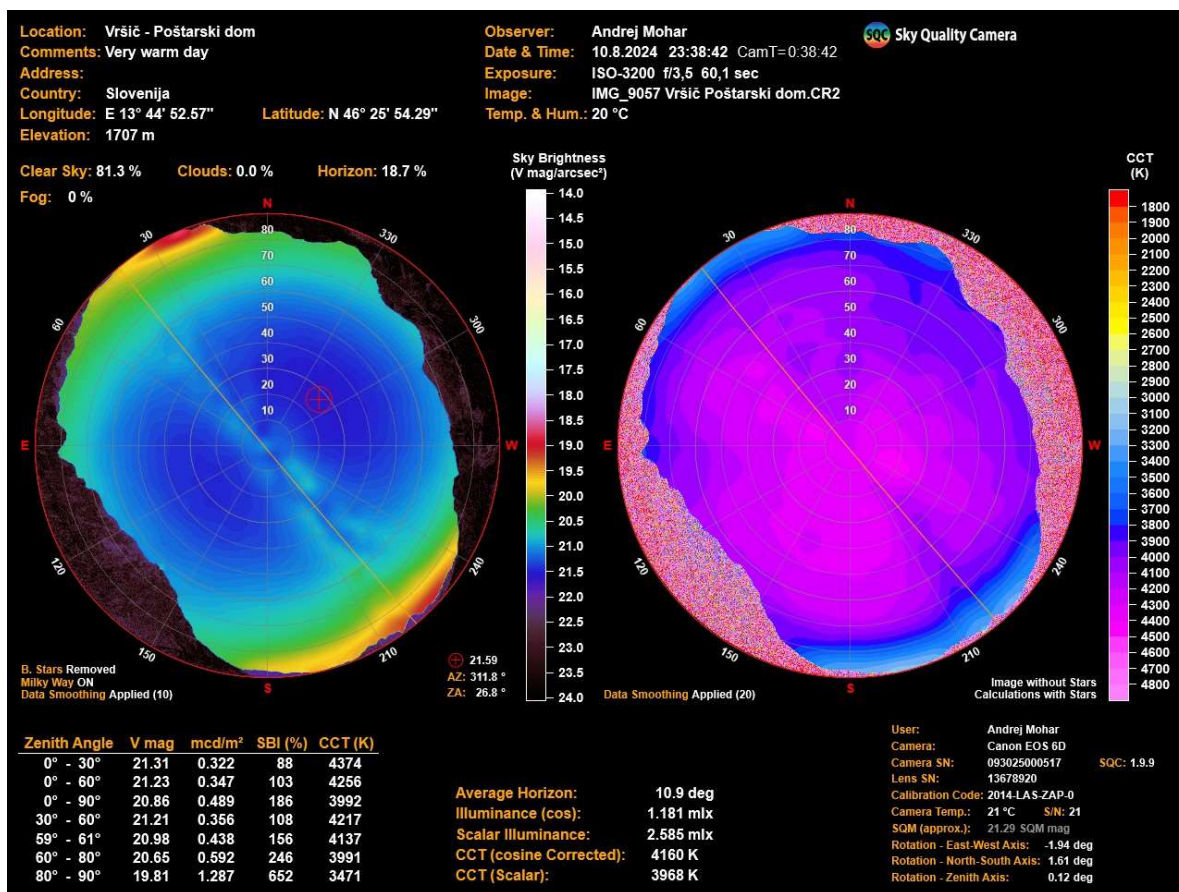
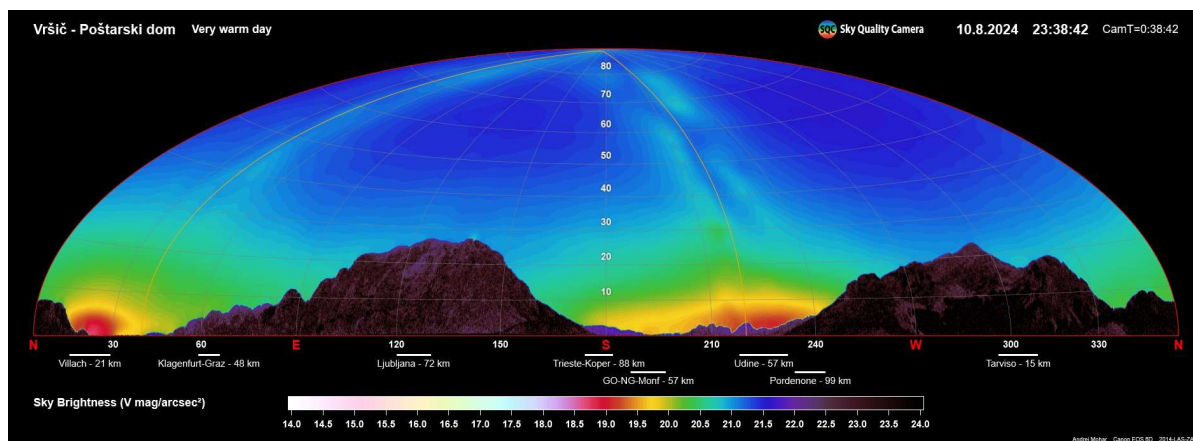
Obrázek

4.2 Úhlová charakteristika citlivosti přístrojů SQM a SQM-L [5, upraveno]

4.1.2 SQC – Sky Quality Camera

Prvním popsáním 2D fotometrickým systémem je Sky Quality Camera – SQC slovenské společnosti Euromix. Tento měřicí přístroj je založen na jednooké zrcadlovce (DSLR) od firmy Canon, vybavené objektivem typu rybí oko. Měřicí systém podporuje těla Canon EOS 700D, 750D, 760D, 80D, 7D, 6D, 5D, přičemž výrobce doporučuje model 6D z důvodu vestavěné GPS a velkého full frame CMOS snímače o rozlišení 20,2 Mpx. Modely s APS senzorem jsou následně vybaveny objektivem Sigma 4.5mm f2.8 ED DG HSM Circular Fisheye, full frame modely pak objektivem Sigma 8mm f3.5 EX DG Circular Fisheye. Zákazník firmě Euromix dodá zakoupený hardware (tedy tělo fotoaparátu a objektiv) a ta mu jej následně pod nočním nebem zkalibruje a dodá obslužný vyhodnocovací software. Jde tedy pouze o softwarovou kalibraci, spektrální citlivost CMOS čipu se neupravuje žádným filtrem [6].

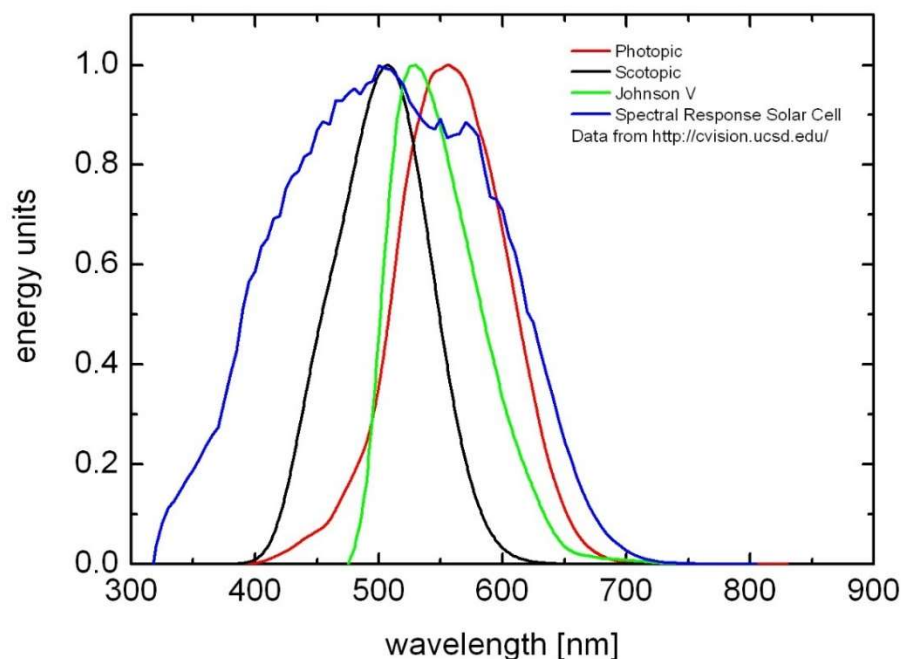
Software, dodávaný výrobcem, umožňuje automatické zarovnání měřicího systému na hvězdy a je schopen změřit jas nočního nebe ve V pásmu Johnson-Cousins (tedy v $\text{mag}_V \cdot \text{arcsec}^{-2}$), případně tuto hodnotu převést na jas s jednotkou $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Umožňuje též tvorbu CCT mapy noční oblohy a výpočet procentuálního pokrytí oblohy oblačností. Uživatel má též možnost hromadného zpracování naměřených údajů a automatický export do patrně nejznámější mapy světelného znečištění – www.lightpollutionmap.info.

Obrázek 4.3 Grafický výstup měřicího systému SQC. Vlevo jas v magnitudách, vpravo T_c [7]

Obrázek 4.4 Grafický výstup měřicího systému SQC [7]

4.1.3 Lightmeter

Dalším, poměrně jednoduchým přístrojem pro měření jasu noční oblohy je rakouský luxmetr Lightmeter. Tento měřicí přístroj je postaven na bázi amorfního křemíkového fotovoltaického článku, využívaje faktu, že do hodnoty osvětlenosti přibližně 0,1 lx je jeho odezva lineární a může být tedy kalibrován vůči jinému měřicímu přístroji [4]. Přístroj se připojuje USB kabelem k počítači, vybaveným obslužným software a je plně vodotěsný, což jej předurčuje k trvalé instalaci na vhodném místě – např. střecha a pro dlouhodobá měření. Přístroj je schopen měřit v rozsahu 500 μ lx – 200 klx s nejistotou měření okolo 10 % [4], [8].



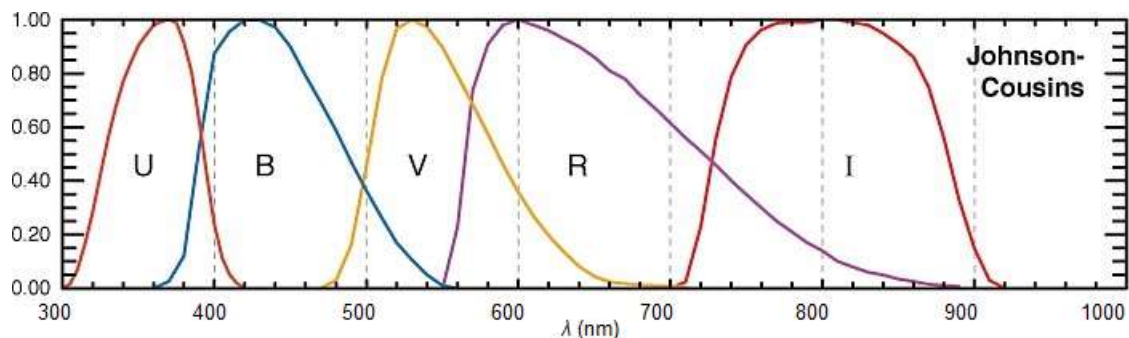
Obrázek 4.5 Spektrální odezva přístroje Lightmeter (modrá křivka) [9]

Zorný úhel tohoto měřicího přístroje je (opět uvažováno metodou Full Width, Half Response) cca 120°. Spektrální citlivost je uvedena na obrázku 4.5 – a je z ní patrné, že se opět nejedná o příliš dobře spektrálně přizpůsobený měřicí přístroj. Nevýhodou je krom zmiňované nedokonalé spektrální přizpůsobenosti a příliš širokému zornému poli, poskytující jedinou hodnotu charakterizující stav celé noční oblohy také fakt, že se jedná o přístroj, který je u výrobce dlouhodobě nedostupný.

4.1.4 ASTMON

Mezi 2D metody měření jasu noční oblohy patří např. měřicí systém ASTMON, což je zkratka celého názvu All-Sky Transmission Monitor. Tento měřicí systém byl vyvinut počátkem desátých let 21. století ve Španělsku primárně pro potřeby astronomů, čemuž odpovídá i jeho technické řešení. Jde o objektiv typu „rybí oko“ s ohniskovou vzdáleností $f = 4,5$ mm, kterým je osazena astronomická kamera s CCD snímačem Kodak KAF-8300 o rozlišení 8,3 Mpx [10].

Zorné pole zmíněného objektivu pokrývá celý horní poloprostor, tedy celé noční nebe. Mezi objektiv a snímač je navíc vložen otočný karusel, osazený optickými filtry, které upravují spektrální citlivost celého zařízení na jednotlivá pásma fotometrického systému Johnson – Cousins.

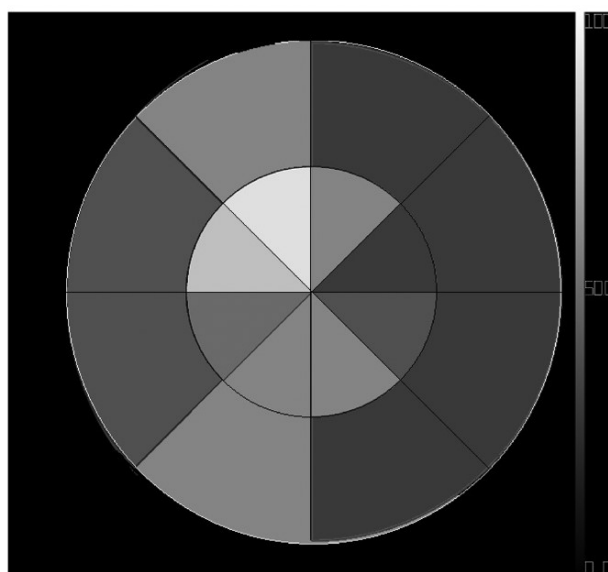


Obrázek 4.6 Spektrální členitelé fotometrického systému Johnson-Cousins [11, upraveno]

Z obrázku 4.6 je patrné, že křivce spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele $V(\lambda)$ se nejvíce přibližuje pásma V. Toto pásma ostatně využívají i jiné měřicí systémy jasu noční oblohy, například výše zmíněný SQM.

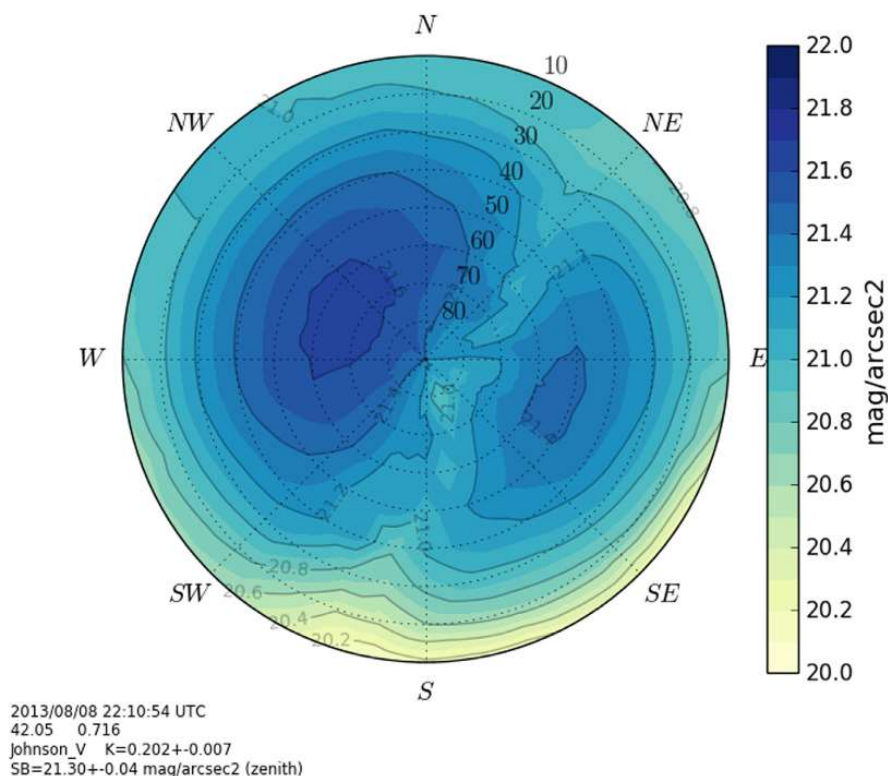
Typická přesnost měření tohoto systému je přibližně 15 % pro pásma U a I a 2 % pro pásma B, V, R [4]. Tento měřicí systém existuje ve třech mutacích – ASTMON Full, který je určen k trvalé instalaci na střeše či jiném podobném místě a je plně automatizovaný; ASTMON Lite, což je přenosná verze na trojnohém stativu a konečně ASTMON Micro, který neobsahuje karusel s filtry a je trvale osazen pouze filtrem pro Johnson-Cousins pásma V [4], [10].

Celooblohové kamery ASTMON dovedou také z měření odvodit pokrytí jednotlivých segmentů oblohy oblačností – viz obrázek 4.7, což je výhodné pro další zpracovávání naměřených výsledků



Obrázek 4.7 Diagram pokrytí oblohy oblačností ze systému ASTMON [10]

Výsledky měření z tohoto systému je pak následně možné zobrazit jako standardní jasové mapy ve falešných barvách:

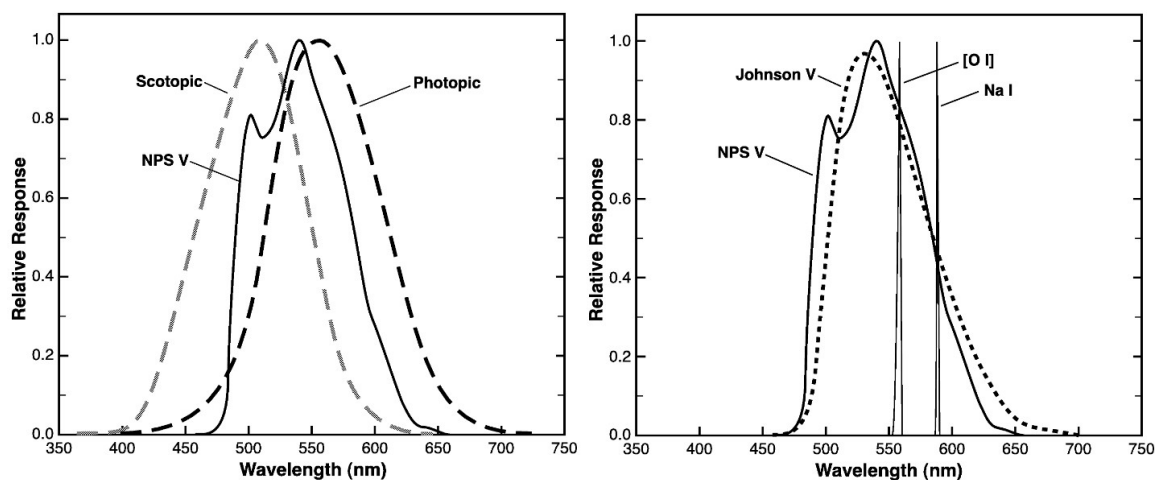


Obrázek 4.8 Naměřené hodnoty jasu noční oblohy na astronomické observatoři Montsec [4]

4.1.5 ASM NPS

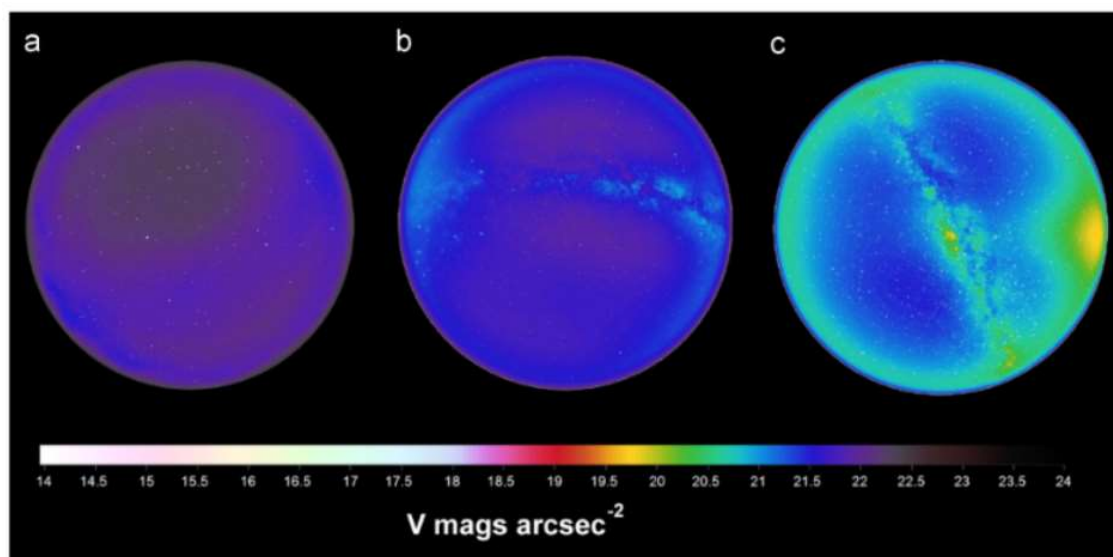
Dalším podobným měřicím systémem je All Sky Mosaic americké NPS – National Park Service, který byl vyvinut roku 2006. Od měřicího systému ASTMON se odlišuje především použitím objektivu s ohniskovou vzdáleností $f = 50$ mm a následným skládáním celooblohového pohledu z celkem 45 snímků – proto také název All Sky Mosaic. Měřicí systém používá CCD snímač Kodak KAF 1001E s rozlišením 1024 x 1024 pixelů, výsledný snímek má pak rozlišení 39,3 Mpx. Systém ASM NPS je vybaven také robotizovanou astronomickou montáží Celestron NexStar Si, která zabezpečuje pohyb aparatury při pořizování jednotlivých snímků [12].

Výhodou tohoto přístupu je velké rozlišení výsledného snímku při malém rozlišení senzoru – to s sebou přináší také výhodu velkých rozměrů jednotlivých pixelů CCD snímače, což zkracuje potřebný integrační čas, nevýhodou je pak potřeba velkého množství dílčích snímků, což čas měření naopak prodlužuje. Tento přístroj je vybaven filtrem pro korekci spektrální citlivosti snímače přibližně na úroveň pásma V fotometrického systému Johnson-Cousins, jak bývá u podobných měřicích přístrojů a systémů už standardem. Z obrázku 4.9 je patrné, že spektrální přizpůsobení není příliš dokonalé, nicméně pro účely uživatele patrně dostačující.



Obrázek 4.9 Spektrální citlivost systému ASM NPS [12, upraveno]

Podobně jako u systému ASTMON je pro správnou interpretaci výsledků nutno znát momentální hodnotu atmosférického útlumu – ta se určí z kontrolního snímku určené známé hvězdy a hodnot z hvězdného katalogu Hipparcos [12]. Uživatelem tohoto měřicího systému je výlučně americká správa národních parků – NPS.



Obrázek 4.10 Výstupy systému ASM NPS pro tři různé situace ve formě jasových map [13]

4.2 Měření světelného znečištění z umělých družic

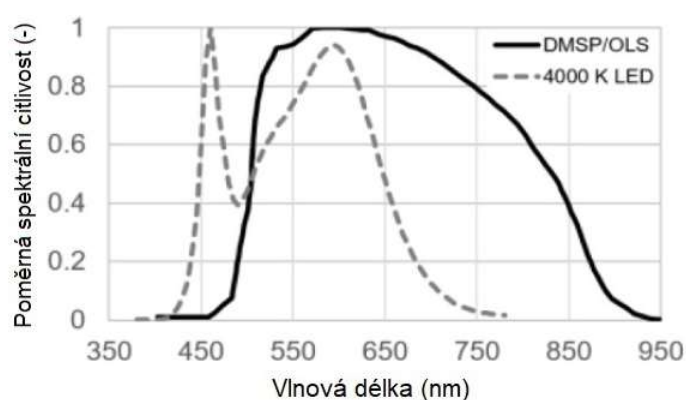
Předchozí metody hodnocení a měření světelného znečištění v podstatné většině případů spadaly do přístupu „Ground-up“ – tedy měříme a posuzujeme ALAN z povrchu Země, tedy vlastně hodnotíme míru jasu noční oblohy. Mimo tyto metody ještě existují možnosti měření s přístupem „Sky-down“, tedy měření prováděná buď z letadel a podobných létajících prostředků (ať už pilotovaných, či bezpilotních), nebo z umělých družic, umístěných obvykle na nízké oběžné dráze. Tento přístup přináší zásadní výhodu – při použití senzorů s dostatečnou rozlišovací schopností a vhodnou spektrální citlivostí nám přináší informace o emisích umělého světla z obrovské plochy. Takové měření nám také umožní při znalosti přesné polohy určit nejvýznamnější zdroje světelného znečištění – a to nejen pro velké zeměpisné celky (státy až kontinenty), ale při dostatečné rozlišovací schopnosti měřících přístrojů

i pro celky menší – jednotlivé ulice a čtvrtě až celá města. Nevýhody tohoto přístupu plynou z podstaty takového měření – i v dnešní době jsou možnosti umístění specializovaných satelitů na oběžnou dráhu (či alespoň umístění vhodné měřicí aparatury na družici, sloužící jinému účelu) velmi komplikované – a každopádně velmi finančně náročné. I přesto však existuje několik specializovaných projektů, které takové měření umožňují. Jelikož tato metodika přímo data z družicových služeb nevyužívá, bude jejich popis spíše stručný. Toto ovšem neplatí pro jiné obdobné webové služby – asi nejznámější server lightpollutionmap.info je z velké části postaven na prezentaci dat z jedné z níže představených družic.

4.2.1 DMSP/OLS

DMSP – Defense Meteorological Satellite Program je označení programu amerických armádních satelitů, které spravuje Národní úřad pro oceán a atmosféru (NOAA). Slouží primárně pro monitoring aktuálních meteorologických podmínek. Družice tohoto systému obíhají Zemi po heliosynchronní dráze v průměrné výšce 840 km. OLS (Operational Line-scan System) je pak jeden z přístrojů umístěných na palubě družic DMSO a lze jej použít pro monitorování emisí umělého světla do horního poloprostoru. Jde o postupně skenující radiometrický systém, schopný měřit ve třech pásmech ve viditelné a infračervené oblasti. Maximální rozlišovací schopnost tohoto přístroje je 560 m v detailním režimu a 2 700 m v plynulém režimu [15], [16].

První satelit konstelace DMSP byl na oběžnou dráhu vyneseno roku 1962, první satelit DMSP s instrumentem OLS byl pak vypuštěn v roce 1976. Šlo o první přístroj na oběžné dráze, který byl masověji využit právě pro hodnocení emisí umělého světla (toto využití nabylo na významu v devadesátých letech, kdy začal provozovatel satelitu umisťovat naměřená data k dispozici na internet). V současné době (2024) jsou na oběžné dráze umístěny 3 funkční satelity DMSP – F-16, F-17 a F-18. Pro radiometr OLS je charakteristické, že není možné jej na palubě satelitu kalibrovat, panují tedy obavy o jeho dlouhodobou stabilitu a srovnatelnost výsledků. Tento měřicí systém neposkytuje výsledky v podobě fotometrických hodnot jasu, ale jako číslo na škále 0 – 63, kde 0 značí naprostou tmou a 63 saturaci. Dalším problémem tohoto instrumentu je jeho spektrální citlivost – uvedena níže – jelikož přístroj „nevidí“ vlnové délky pod 500 nm, kam spadá v dnešní době nezanedbatelná část spektra LED svítidel [14], [16].



Obrázek 4.11 Spektrální citlivost radiometrického systému DMSP/OLS. Čárkovaně znázorněno spektrum LED o $T_c = 4000\text{ K}$ [14, upraveno]

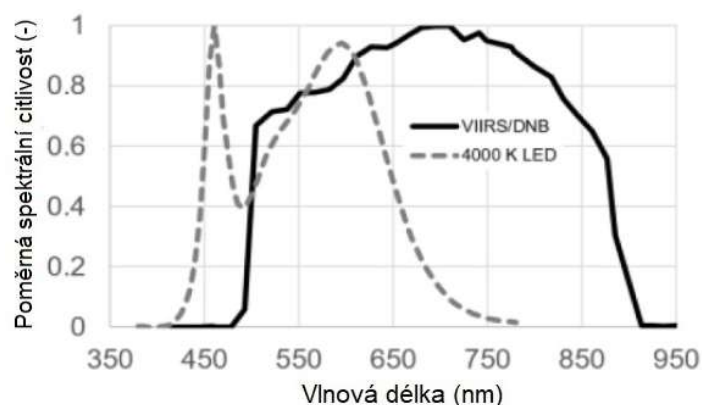
Z výše uvedeného vyplývá, že data ze systému DMSP/OLS měly význam především v době, kdy neexistovala jiná alternativa, v dnešní době jde prakticky již o překonanou technologii.

4.2.2 Suomi NPP/VIIRS/DNB

Suomi NPP – celým jménem Suomi National Polar-orbiting Partnership – je satelit, vypuštěný americkým Úřadem pro oceán a atmosféru v roce 2011. Stejně jako v případě výše zmíněného DMSP jde o meteorologický satelit, tentokrát ovšem civilní. Další podobností je jeho umístění na orbitě – Zemí obíhá ve výšce průměrně 830 km na heliosynchronní dráze. Satelit je vybaven celkem šesti vědeckými přístroji, z nichž pro měření světelných emisí je využíván přístroj VIIRS – Visible Infrared Imaging Radiometer Suite. Opět se jedná o postupně skenující radiometr, který měří v celkem dvaadvaceti pásmech vlnových délek. Z těchto pásem je pro měření umělého světla využíváno pouze jedno – DNB – Day/Night Band, jelikož ostatní pásma mají příliš úzké pásmo vlnových délek, které jsou citlivé, případně se vůbec nenacházejí v oblasti viditelného světla. Rozlišovací schopnost při měření v tomto pásmu je přibližně 750 m [17], [18].

V současnosti jde o nejvíce používaný satelitní systém pro analýzu světelného znečištění – v současné době existuje minimálně 21 vědeckých prací, které tato data využívají [14]. Data jsou dostupná zdarma online, ať už jde o denní měření či měsíční a roční souhrn. Informace z VIIRS využívá také služba lightpollutionmap.info – a to v první řadě přímo, druhořadě také v podobě *New World Atlas of artificial sky brightness*, který z dat z VIIRSu také vychází a jež je rovněž dostupný na LPM. Více o tomto tématu níže.

VIIRS je prakticky další generací instrumentu OLS, který je zmíněn výše. Určité problémy byly odstraněny (VIIRS např. již reportuje data v jednotkách $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$, nikoli jako bezrozměrná čísla a přibližně dvojnásobně se také zlepšila prostorová rozlišovací schopnost), ale zásadní nevýhoda – nevhodná spektrální citlivost – zůstala.



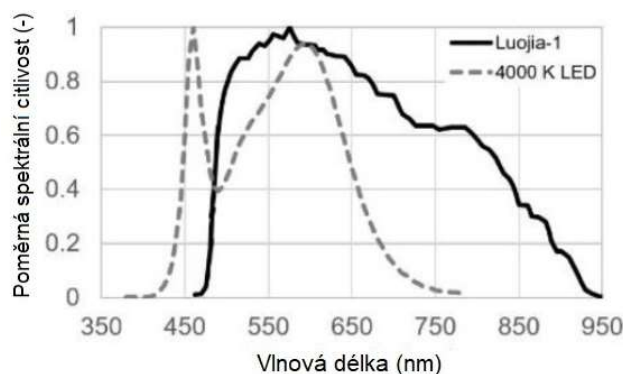
Obrázek 4.12 Spektrální citlivost radiometrického systému VIIRS/DNB. Čárkovaně znázorněno spektrum LED o $T_c = 4000 \text{ K}$ [14 , upraveno]

Z grafu je patrné, že ani tento měřicí systém není schopen měřit pod 500 nm, což je problematické zejména pro měření spektra LED svítidel. Čím vyšší je náhradní teplota chromatičnosti měřeného zdroje, tím je tento problém výraznější, a i když se jedná o velmi užitečný nástroj poskytující velké množství dat, vnáší vlivem své spektrální citlivosti do měřených údajů zásadní nejistotu. Problematické je také porovnání dat z různých let, jelikož celosvětově postupně dochází k nahrazování (sodíkových) výbojek svítidly na bázi LED, čímž se zásadně mění spektrum vyzařovaného světla – zvyšuje se podíl vlnových délek pod 500 nm, což mnohdy vede k tomu, že data z instrumentu VIIRS indikují pokles emisí umělého světla ze zkoumaného regionu, byť realita je přesně opačná [14].

Přístroj VIIRS se kromě satelitu NPP nachází i na meteorologických satelitech NOAA-20 a NOAA-21, vypuštěných v letech 2020 a 2024. Parametry samotného přístroje jsou na všech satelitech shodné.

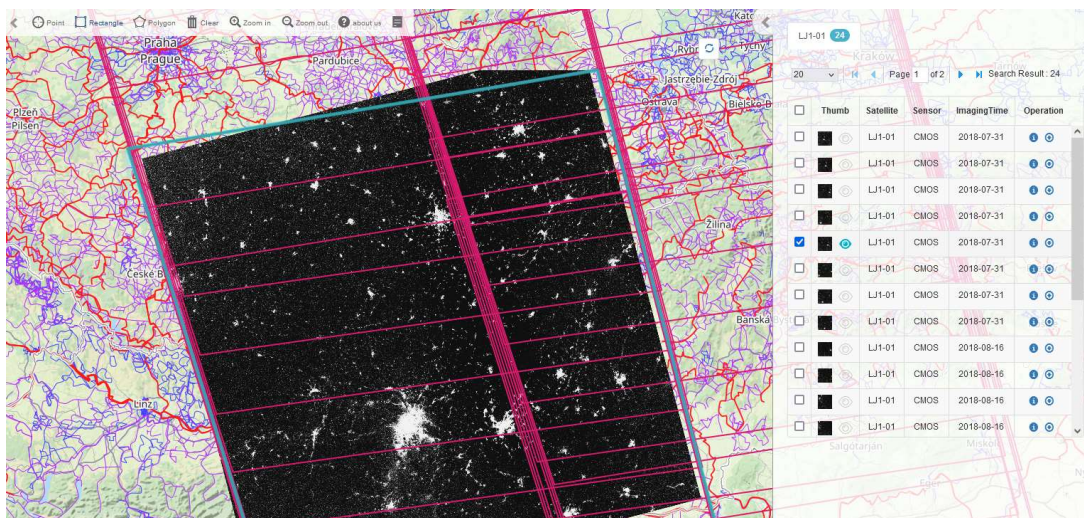
4.2.3 Luoja-1-01

Jde o výzkumný satelit Wuhanské univerzity [20] v Číně a také o první satelit v tomto výčtu, jehož primárním cílem je měření světla v nočním prostředí. Byl vypuštěn v roce 2018 a Zemi obíhá v průměrné výšce 640 km po heliosynchronní dráze. V porovnání s předchozími dvěma satelity jde také o podstatně menší zařízení – jde o CubeSat o velikosti 6U s hmotností 22 kg, zatímco DMSP a Suomi NPP mají hmotnost řádově 50x větší [19]. Pro tento satelit je charakteristické, že nesnímá celý povrch Země, ale pouze Čínu a dále vybrané oblasti jiných států. Pro globální měření emisí umělého světla tedy data z něj nelze použít, vyznačuje se ovšem lepší prostorovou rozlišovací schopností – přibližně 130 m, což je oproti výše uvedeným podstatně zlepšení. Do jisté míry se zlepšila také spektrální citlivost – dolní hranice citlivosti se posunula na přibližně 485 nm [14].



Obrázek 4.13 Spektrální citlivost radiometrického systému družice Luoja-1-01. Čárkovaně znázorněno spektrum LED o $T_c = 4000\text{ K}$ [14 , upraveno]

Z grafu je patrné, že problém se spektrální citlivostí stále nebyl uspokojivě vyřešen – velkou část viditelného spektra v oblasti modré barvy stále není možné spolehlivě změřit. Data ze satelitu jsou po registraci volně dostupná na webovém portálu [21]. Je nutné poznamenat, že u tohoto satelitu bylo počítáno s životností pouze 6 měsíců, což koresponduje s faktem, že nejnovější data na uvedeném portálu pocházejí z první poloviny roku 2019. Satelit v současné době tedy s největší pravděpodobností není funkční, nicméně v době vypuštění na oběžnou dráhu byl zmiňován pouze jako prototyp s tím, že větší počet obdobných družic bude vypuštěn v budoucnu, k čemuž ovšem do dnešní doby (2024) stále nedošlo.

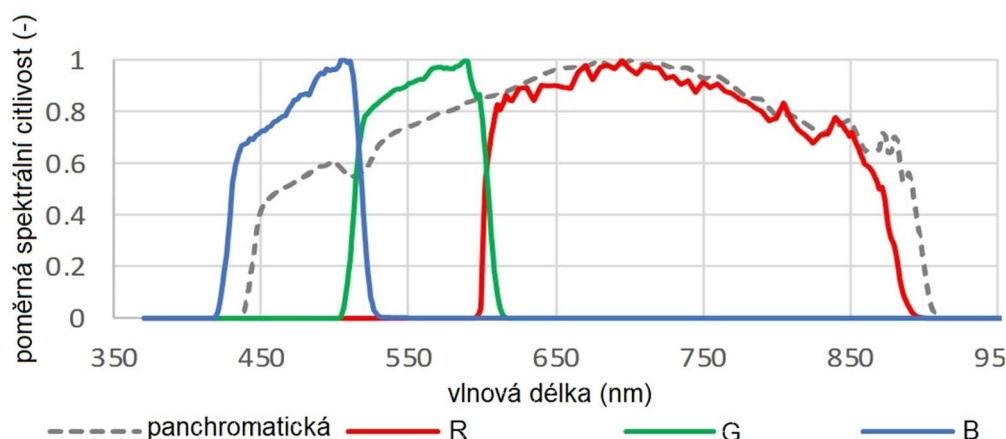


Obrázek 4.14 Webová aplikace pro získávání dat ze satelitu LuoJia-01. V dolní části viditelná Vídeň a Bratislava, ve střední části Brno [21]

4.2.4 SDGSAT-1

Zatím nejnovějším přírůstkem do skupiny satelitů, monitorujících emise umělého světla je čínský SDGSAT-1 – plným názvem Sustainable Development Science Satellite 1. Název odkazuje na cíle udržitelného rozvoje (sustainable development goals), které byly přijaty v září roku 2015 na valném shromáždění OSN v rámci Agendy 2030. Právě k dosažení těchto cílů má tento satelit dopomoci – jeho hlavním úkolem je monitorování parametrů souvisejících s kvalitou životního prostředí. Byl vyvinut Čínskou akademií věd a na oběžnou dráhu byl vynesena v listopadu roku 2021. Satelit obíhá Zemí v průměrné výšce 505 km, podobně jako předchozí uvedené po heliosynchronní dráze [22].

Je vybaven třemi typy senzorů – multispektrálním snímačem pro denní snímkování, teplotním infračerveným spektrometrem a snímačem Glimmer pro noční snímkování. Pro měření a analýzu umělého světla lze použít právě poslední jmenovaný – jako první ze satelitních senzorů pro měření ALANu je tento snímač nejen panchromatický, ale nabízí i trichromatická data v oblasti červené, zelené a modré [23].



Obrázek 4.15 Spektrální citlivosti snímače Glimmer satelitu SGDSAT-1 [24]

Rozlišení tohoto snímače je 10 m panchromaticky a 40 m trichromaticky, což je oproti předchozím satelitům zásadní zlepšení. Do jisté míry se také povedlo odstranit problém nedostatečné spektrální citlivosti. Data ze satelitu jsou pro určité oblasti veřejně dostupná [25].

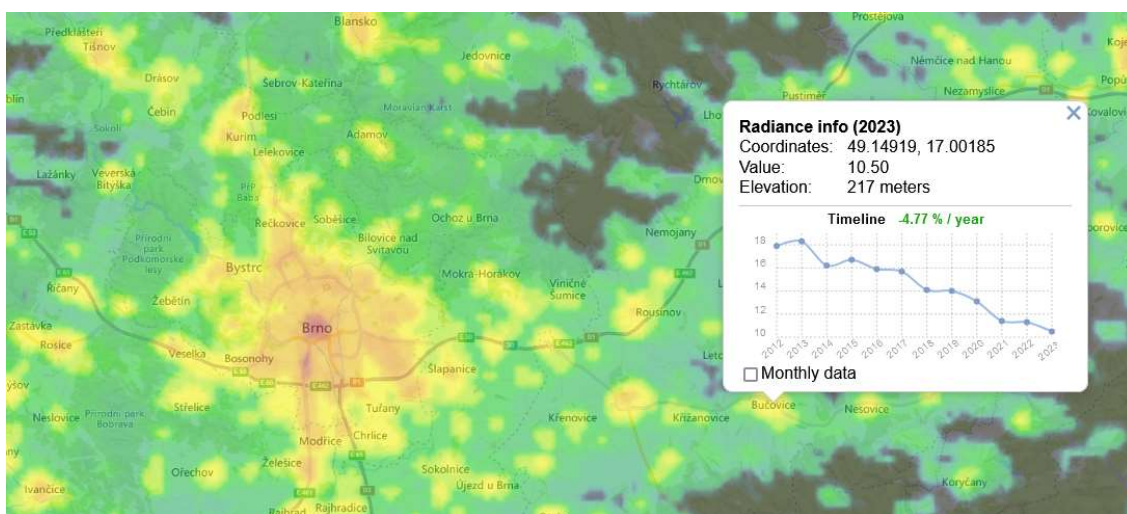
4.3 Webové aplikace pro monitorování světelného znečištění

Tato podkapitola obsahuje popis nejznámějších webových portálů, zaměřených na měření a analýzu světelného znečištění.

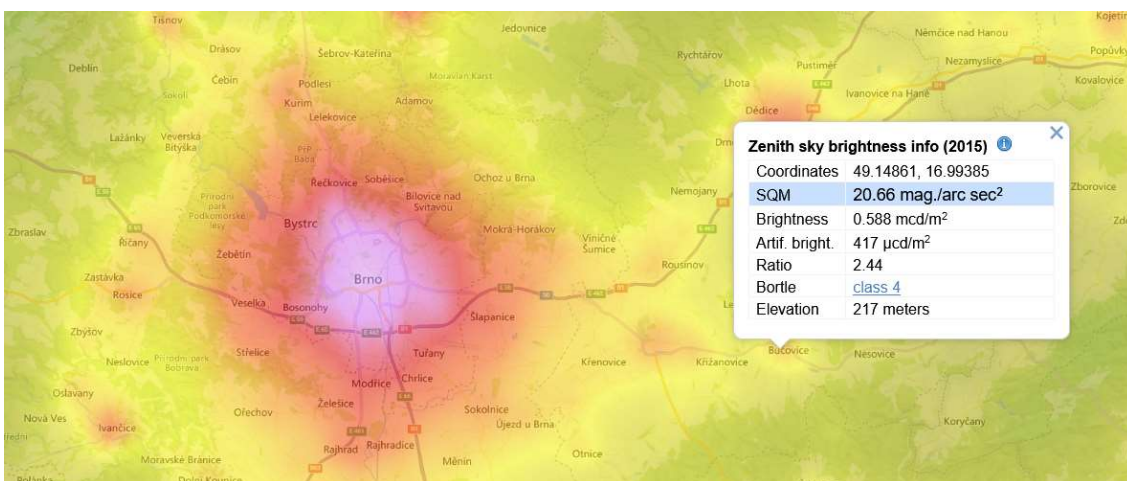
4.3.1 Light pollution map - www.lightpollutionmap.info

Patrně nejznámější aplikací pro měření a porovnávání údajů o umělém světle v nočním prostředí je právě Light pollution map – dále jen LPM. Tuto službu založil v roce 2014 slovinský programátor Jurij Stare a od první chvíle sloužila pro jednoduché prohlížení nočních snímků ze satelitů VIIRS a DMSP. Postupem času došlo k odstranění mapové vrstvy ze staršího satelitu DMSP – především z důvodu problematické porovnatelnosti dat mezi satelity – nicméně přibýly další funkce. Každým rokem došlo k aktualizaci vrstvy dat ze satelitu VIIRS (starší vrstvy jsou stále dostupné, lze tedy data porovnávat a určovat trendy pro danou lokalitu) a webová aplikace také umožňuje uživatelsky nahrát a prohlížet naměřená data z měřicích systémů SQM (pro účely webové aplikace rozdělena na kategorie SQM,

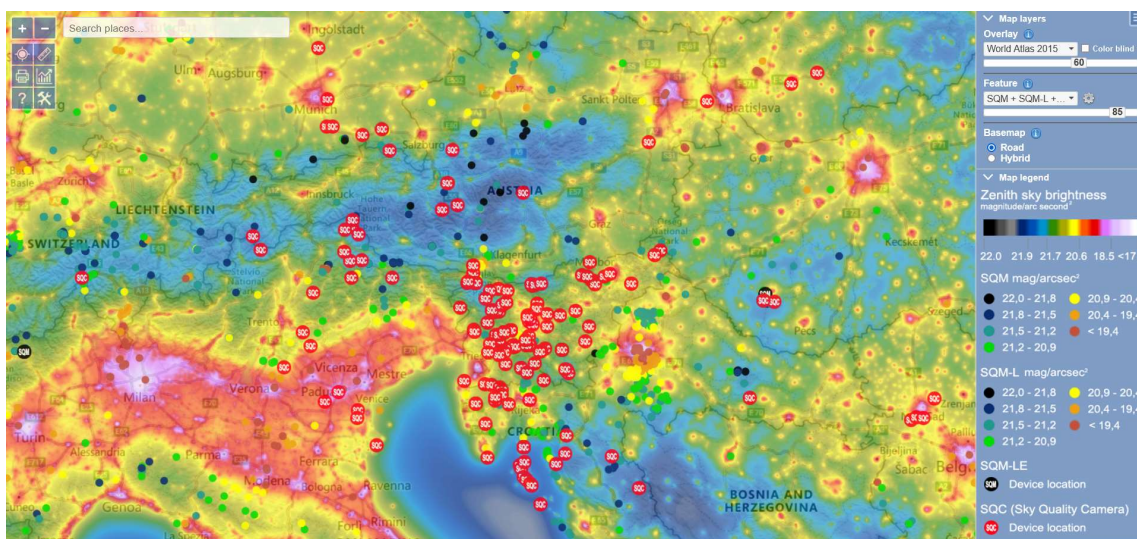
SQM-L a SQM-LE – liší se zejména zorným úhlem). Došlo také k integraci výstupů z měřicích systému SQC, do webové aplikace lze tedy nahrát i jasové snímky noční oblohy, které jsou nadále v aplikaci veřejně dostupné. Do aplikace byla přidána také vrstva World Atlas 2015 (podrobněji popsána níže) a vrstva s predikcí polární záře a aktuální oblačností – obojí má na jas noční oblohy klíčový vliv.



Obrázek 4.16 LightPollutionMap, vrstva VIIRS 2023 [26]

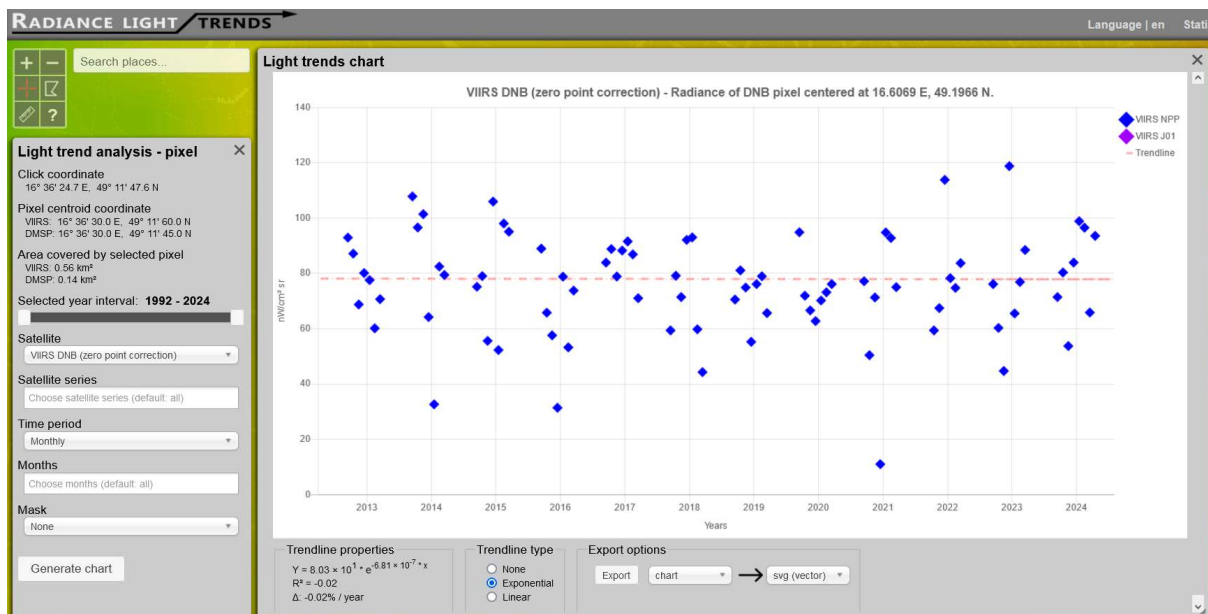


Obrázek 4.17 LightPollutionMap, vrstva World Atlas 2015 [26]



Obrázek 4.18 LightPollutionMap s měřením SQC a SQM [26]

Součástí LPM je také aplikace LightTrends - lighttrends.lightpollutionmap.info – která slouží pro podrobnější analýzu hodnot měřené záře dané oblasti v čase. Takto lze analyzovat buď vybraný pixel, nebo oblast definovanou uživatelem pomocí polygonu.



Obrázek 4.19 LightPollutionMap, LightTrends [27]

4.3.2 The world atlas of artificial night sky brightness

Výše uvedené mapové vrstvy ve webové aplikaci LPM (obr. 4.16) zobrazují ve falešných barvách přímo instrumentem VIIRS naměřené hodnoty záře daného pixelu – tedy co „vidí“ satelit při pohledu na zemský povrch. Tato data jsou sama o sobě hodnotná, nicméně pro astronomy – ať už amatérské nebo profesionální – mají větší hodnotu data, popisující jas noční oblohy při pohledu z povrchu vzhůru. Při znalosti šíření a útlumu viditelného světla v atmosféře je možné tato data z naměřených hodnot ze satelitu dopočítat – nebo alespoň poměrně přesně kvalifikovaně odhadnout. První, kdo s těmito výsledky přišli, byli v roce 2001 Fabio Falchi, Pierantonio Cinzano a Christopher D. Elvidge (Dále jen Falchi et al.) s publikací *The first World Atlas of the artificial night sky brightness*. Tato data vycházela ještě z měření ze satelitu DMSP, neboť v době tvorby se jiný vhodný instrument na oběžné dráze Země nenacházel. Použitím matematického modelování – konkrétně Garstangova modelu – odvodili hodnoty zenitového jasu pro celý povrch Země.

V roce 2015 se tento světový atlas umělého jasu nočního nebe dočkal aktualizace v podobě publikace *The new world atlas of artificial night sky brightness*. Kolektiv autorů v čele opět s Fabiem Falchim vyšel z dat, získaných instrumentem VIIRS v roce 2014 a přepočítal opět hodnoty záře při pohledu dolů na hodnoty jasu při pohledu vzhůru. Pod názvem *World Atlas 2015* se tato mapová vrstva nachází i ve webové aplikaci LPM (obr. 4.17).

Paralelně k výše zmíněným autorům na tomto problému pracoval také David J. Lorenz. Použitím upraveného Garstangova modelu obdobně zpracoval data z instrumentu VIIRS za roky 2006, 2016, 2020 a 2022 a pro uvedené ročníky publikoval obdobné atlasy jasu noční oblohy (dostupné zde <https://djlorenz.github.io/astronomy/lp2022/>). Ohledně nomenklatury neexistuje jednoznačná shoda, je tedy nezbytné při popisu práce s libovolným atlasem uvést také rok, pro který výsledky uvažujeme – Např. *World Atlas of Light Pollution (2016)*.

Vzhledem k různému zdroji původních dat (v případě atlasů z let 2001 a 2015) a mírně odlišnému algoritmu zpracování (v případě atlasů 2001, 2015 versus 2006, 2016, 2020, 2022) je poměrně obtížné porovnávat data mezi jednotlivými verzemi – asi nejlepší je porovnatelnost mezi ročníky 2016, 2020 a 2022. Další problém vychází ze spektrální citlivosti přístrojů, ze kterých pocházejí vstupní data – relativní necitlivost na krátké vlnové délky může vést k tomu, že při výměně výbojových světelných zdrojů (zejména jde o sodíkové výbojky) za LED světelné zdroje v soustavě VO mohou naměřená data ukazovat na pokles vyzářeného světla, byť realita je přesně opačná – více viz výše v kapitole o satelitech.

Všechny uvedené atlasy mají hodnoty jasu noční oblohy uvedeny v jednotkách MPSAS, neboli magnitudy na úhlovou sekundu – $\text{mag}_V.\text{arcsec}^{-2}$. Jak již bylo naznačeno výše, tato jednotka vychází z astronomického fotometrického systému Cousin-Johnson, konkrétně z jeho viditelného (V) pásma. Na rozdíl od hodnot fotometrického jasu se v tomto případě naměřené hodnoty spektrálně vážují přes odlišnou křivku než ve fotometrii běžná $V(\lambda)$ – citlivost normálního fotometrického pozorovatele. To činí přepočty mezi MPSAS a fotopickým jasnem v cd.m^{-2} problematickým, zatíženým určitou nejistotou, neboť pro přesný převod bychom potřebovali znát spektrum měřeného světla, což v drtivé většině případů při měření světelného znečištění není splněno. Pro alespoň přibližný přepočet se používá následující vztah

$$L = 10,8 \cdot \exp(4 - 0,4 \cdot \text{MPSAS}). \quad (4.1)$$

Pro přepočet opačným směrem pak můžeme psát

$$\text{MPSAS} = \frac{\log_{10} \frac{L}{10,8 \cdot 10^4}}{-0,4}. \quad (4.2)$$

Pomocí uvedeného vztahu si můžeme určit jas noční oblohy pro nebe, nezasažené umělým světlem. Pro obvykle uváděnou hodnotu $22 \text{ mag}_V.\text{arcsec}^{-2}$ tak zjistíme, že tato hodnota odpovídá $1,712 \cdot 10^{-4} \text{ cd.m}^{-2}$. Tato hodnota může svým způsobem sloužit také jako reference – je možné pomocí ní definovat, kolikrát je jas noční oblohy větší než přirozený.

4.3.3 Sky Quality – www.skyquality.cz

Ryze českým projektem je webová stránka Sky Quality, založená a provozovaná Bc. Miladou Moudrou. Jde o databázovou aplikaci, kam mohou uživatelé nahrávat výsledky měření pomocí přístrojů SQM (pro účely aplikace rozděleno do kategorií SQM-W a SQM-L – opět dle zorného úhlu). Do jednotlivého záznamu lze krom samotného výsledku měření umístit také odhad jasu oblohy na Bortleho škále, slovní popis měření či doplňující fotografie – některé záznamy jsou doplněny výstupy z jasových kamer. Databáze je veřejně přístupná pro prohlížení, po registraci lze také vkládat vlastní záznamy.

Záznamy lze třídit dle data pořízení, dle autora či abecedně dle místa pořízení. Druhou možností je výběr měření z mapy, kde jsou jednotlivé záznamy zobrazené v podobě barevných teček, kde barva reprezentuje hodnotu jasu (v tzv. SQM magnitudách na úhlovou vteřinu).

Na webových stránkách je popsána také základní metodika, kterou je nutno dodržovat – zejména pro porovnatelnost měření.

SkyQuality.cz je projekt zaměřený na **objektivní posuzování kvality noční oblohy** v nejrůznějších lokalitách (s důrazem na ty, které představují vhodná stanoviště pro amatérské astronomy). Pro maximální objektivitu je základní používanou metrikou jas oblohy v magnitudách na čtvereční úhlovou vteřinu, doplňkovou pak Bortle ohodnocení a MHV.

[Vložit pozorování](#)

Důležité – před zapojením se do projektu prosím věnujte pozornost [metodice měření](#).

Nejnovější měření

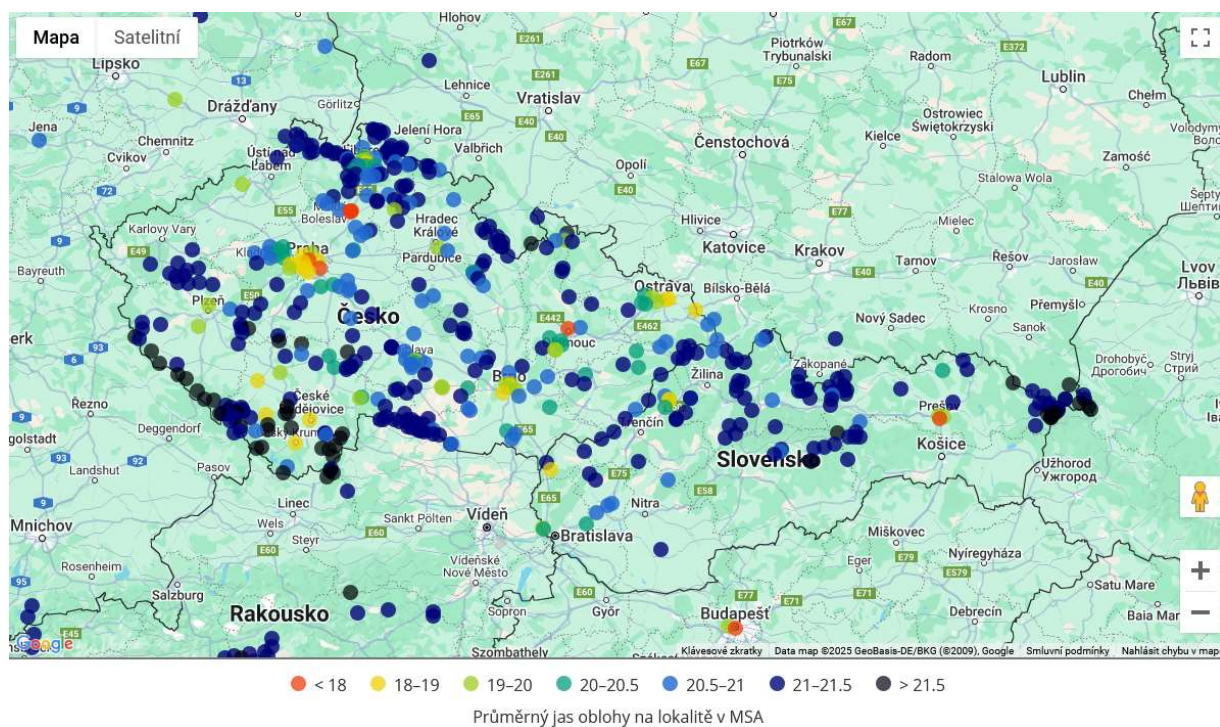
Datum (UTC)	Lokalita	Jas ¹	Pozorovatel
25. 12. 2024 — 20:20	DROP	19.27	Martin Tylšar
27. 11. 2024 — 20:00	AV ČR Lysolaje	18.48	Martin Tylšar
10. 11. 2024 — 01:00	Bezvěrov - Žernovník	20.95	Michal Bareš
10. 11. 2024 — 00:00	Iom Stanislaw, Polské Jizerky	20.98	Vladimír Dvořák
03. 11. 2024 — 21:10	Filmové ateliéry Barrandov	18.44	Martin Tylšar
02. 11. 2024 — 19:35	Hvězdárna Ždánice	20.27	Martin Tylšar
02. 11. 2024 — 19:00	Krkonoše - nad Horními Albeřicemi	20.88	Mirek Dočekal
21. 10. 2024 — 18:00	Podyjí - Čížov	20.90	Mirek Dočekal
28. 10. 2024 — 21:45	Filmové ateliéry Barrandov	18.51	Martin Tylšar
29. 09. 2024 — 01:00	Slavkovský les - U Tří Křížů	21.29	Mirek Dočekal

¹ je hodnota v mag/arcsec²

Pozorování obsahuje: ■ SQM-W měření ■ SQM-L měření ■ Bortle odhad ■ průzračnost ■ podrobný popis ■ fotografie

Databáze obsahuje: **666 lokalit** **1913 pozorování** **6523 měření** **386 fotografií**

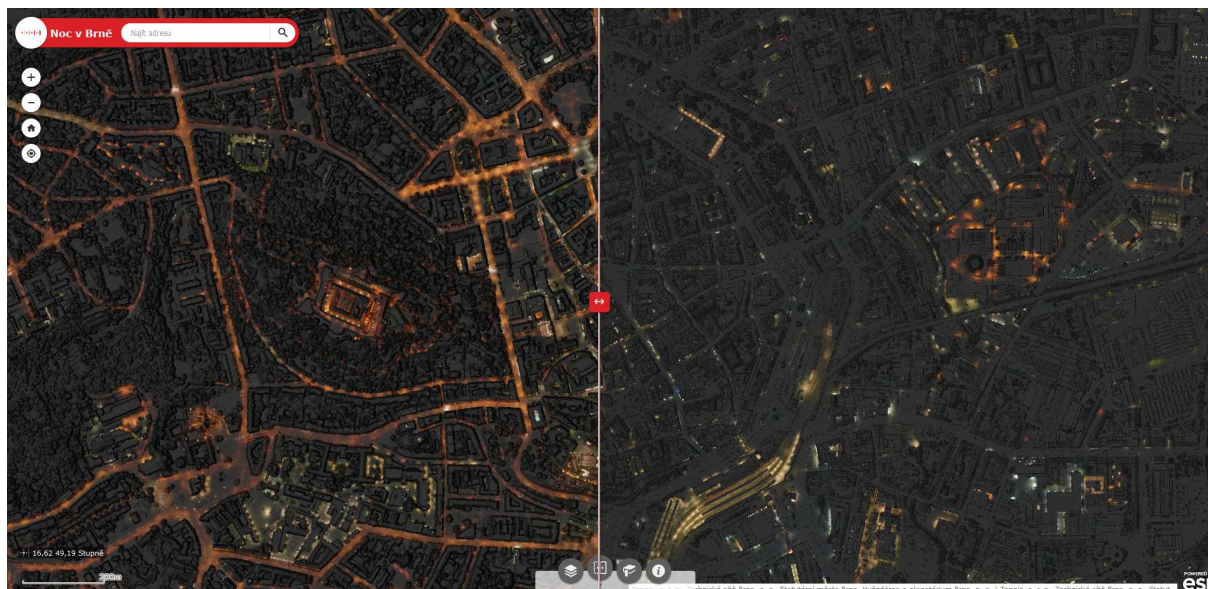
Obrázek 4.20 SkyQuality.cz – přehled [28]



Obrázek 4.21 SkyQuality.cz – mapová aplikace [28]

4.3.4 Noc v Brně - www.bрно.cz/nocni-brno

Aplikace „Noc v Brně“ není databázovou webovou službou v pravém slova smyslu, ale reprezentuje další z možných přístupů k hodnocení světelného znečištění. Jde o webovou GIS aplikaci, která obsahuje ortofotomapy získané nočním leteckým snímkováním Brna v roce 2021. Snímkování probíhalo dvakrát – poprvé s vypnutou osvětlovací soustavou veřejného osvětlení, podruhé byla osvětlovací soustava VO zapnutá. Výsledkem jsou dvě vrstvy, které lze vzájemně porovnávat z hlediska příspěvku soustavy VO k celkovým emisím umělého světla do horního poloprostoru.



Obrázek 4.22 Noc v Brně – Ortofotomapy nočního Brna [29]

Výhodou tohoto přístupu k měření světelného znečištění je jeho velká prostorová přesnost – z leteckých snímků lze identifikovat zdroje umělého světla až na úroveň jednotlivých svítidel. Nevýhodou je naopak nezanedbatelná finanční náročnost provozu letounu, který snímkování provádí – která pochopitelně narůstá úměrně snímkané ploše a počtu opakování měření pro analýzu časových změn a trendů.

V ideálním případě je ke snímkování použit kalibrovaný digitální fotoaparát, resp. jasový analyzátor, který umožní podrobnou analýzu rozložení jasu v měřené scéně – ze snímků, pořízených nekalibrovanou fotografickou sestavou je poměrně obtížné přesně kvantifikovat příspěvky jednotlivých svítidel k celkovému umělému jasu noční oblohy, resp. k emisím umělého světla do horního poloprostoru.

4.3.5 Loss of the Night – www.myskyatnight.com

Nejpřirozenějším detektorem světla, a tedy i rušivého světla v noci, je lidské oko. Toho využívá metoda mezní hvězdné velikosti, která pracuje s nejméně jasnou pouhým okem viditelnou hvězdou (a tedy s hodnotou prahového kontrastu jasů pozorované hvězdy a pozadí). Ze známé hvězdné velikosti této hvězdy je pak možné odvodit, či spíše odhadnout, jas nočního nebe. Problémem je ovšem naprostá závislost na kvalitě zraku a vnímání pozorovatele a také jeho schopnosti identifikovat hvězdy. Této metody využívá například aplikace pro monitorování ALANu jménem Loss of The Night [47]. Využívání této aplikace je poměrně výhodné, jelikož sama pozorovatele navádí s využitím kompasu a gyroskopu mobilního telefonu směrem ke zkoumaným hvězdám, a není tedy nutná bezpodmínečná znalost nebeských těles. Výhodou je také fakt, že odpadá nutnost vlastnit specializované přístrojové vybavení. Tato metoda je vzhledem k výše uvedenému vhodná pouze pro orientační určování stavu noční oblohy

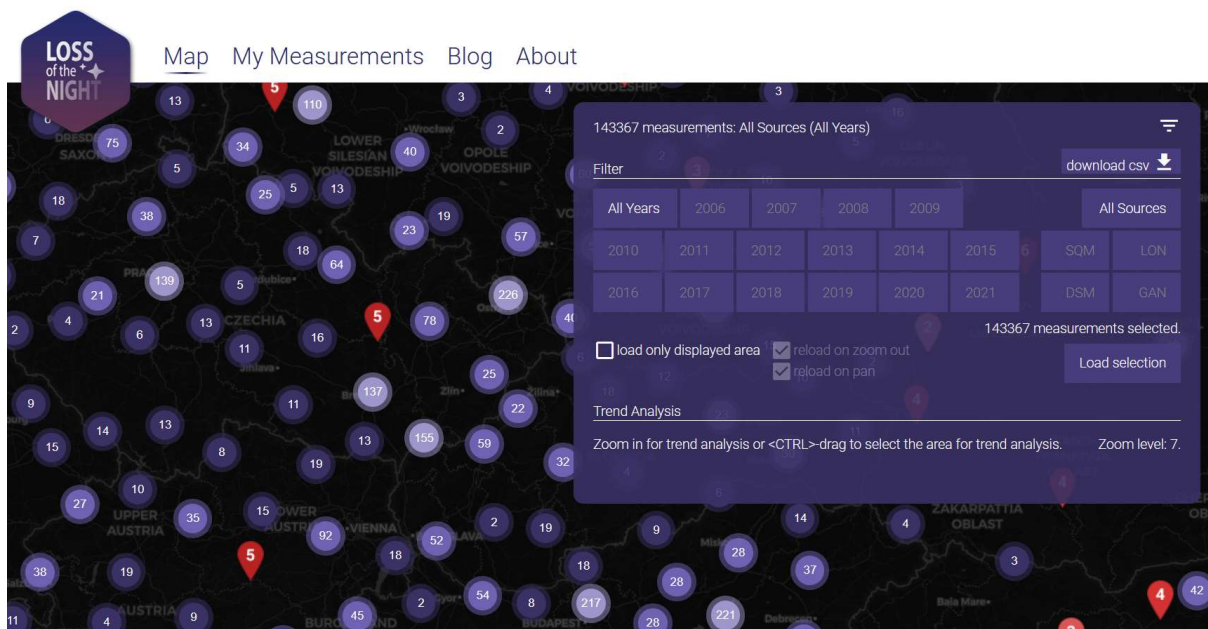
veřejností [4], nicméně vzhledem ke svojí jednoduchosti ji krom zmíněné aplikace používají také projekty „Globe at Night“ [31] a „How many stars can we see?“ [48].

Pro určení jasu noční oblohy se pak vyjde ze vztahu

$$m_{lim} = 0,426\mu - 2,365 - 2,5\log F, \quad (4.3)$$

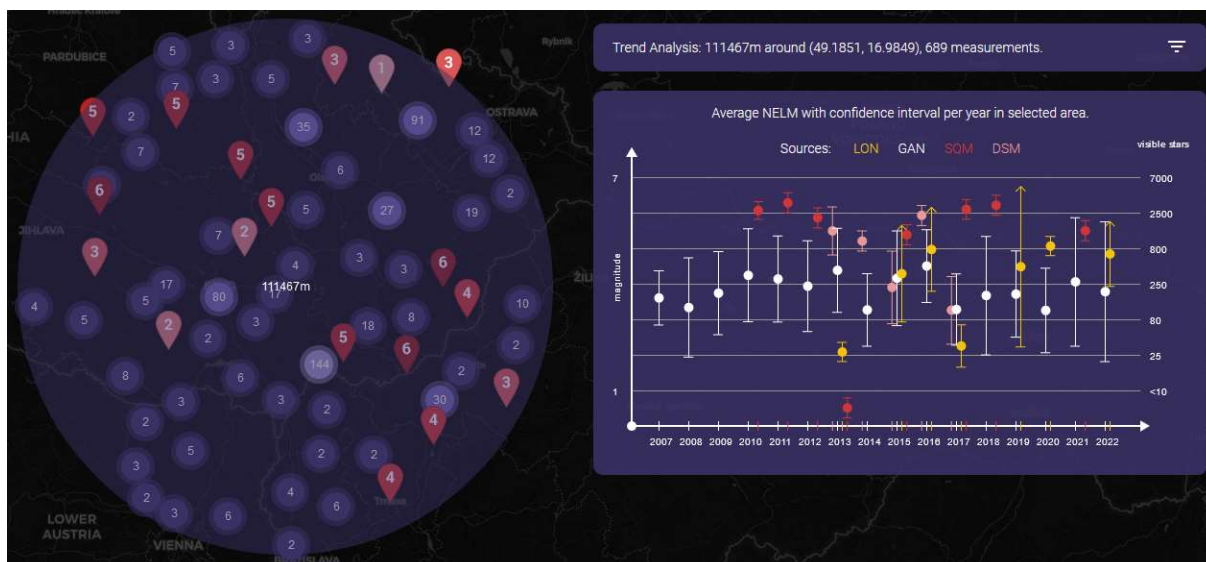
kde m_{lim} je mezní hvězdná velikost, tedy velikost nejméně jasné pozorovatelné hvězdy v magnitudách, μ je jas nočního nebe v $\text{mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$ (odpovídá astronomickému V pásmu) a F je faktor pozorovatele, obvykle spadající do rozsahu 1,4-2,4, který zohledňuje kvalitu jeho zraku a schopnost rozlišovat málo jasné objekty na nočním nebi [49].

Loss of the Night zahrnuje mimo aplikace na chytré telefony také webové rozhraní, které umožňuje přístup k datům o jasu nočního nebe z několika zdrojů – ze samotné aplikace Loss of the Night (LON), z níže uvedeného projektu Globe at Night (GAN), měření provedená pomocí přístrojů SQM (SQM) a měření provedená aplikací pro iOS jménem Dark Sky Meter app (DSM). Nutné je však podotknout, že data nejsou od roku 2021 aktualizována, a ačkoliv autoři přislubují nápravu, do dnešního dne (listopad 2024) se tak bohužel nestalo.



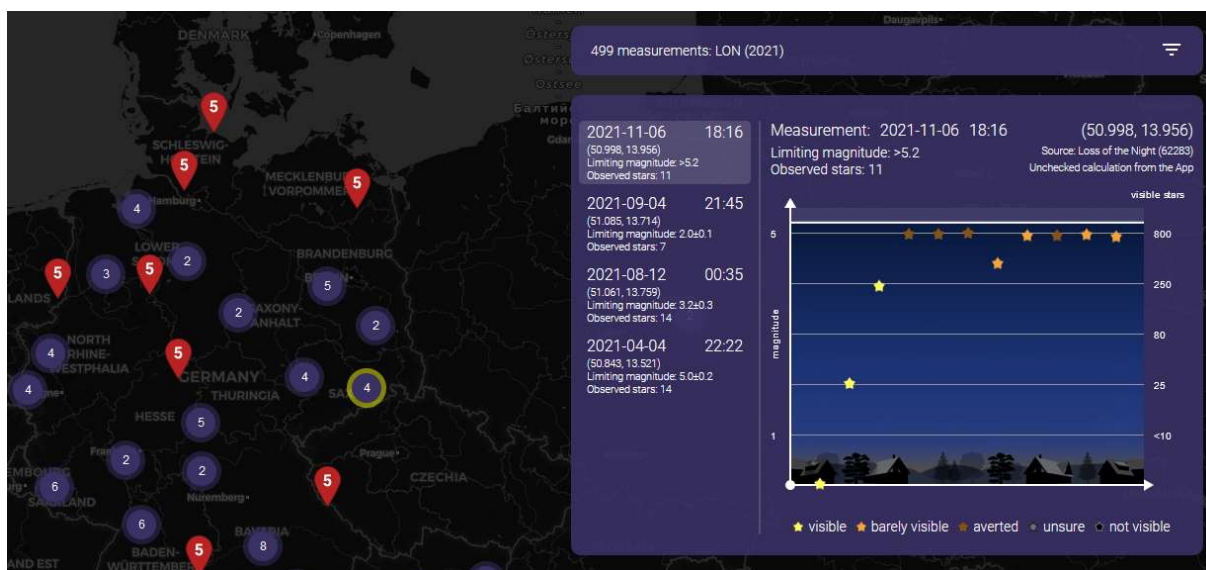
Obrázek 4.23 Loss of the Night – titulní strana aplikace [30]

Služba shromažďuje data od roku 2006 a k roku 2024 obsahuje přes 143 tisíc měření nebo pozorování.



Obrázek 4.24 Loss of the Night – analýza vybrané oblasti [30]

Ve webovém rozhraní je možné vyznačit určitou oblast, pro kterou je následně vygenerováno grafické zobrazení relevantních záznamů. Uvedené hodnoty na svislé ose jsou v tomto případě hraniční magnitudy – nejde tedy o přímý údaj popisující jas noční oblohy, ale naopak popisující jak slabou hvězdu (či jiné nebeské těleso) je ještě možné pouhým okem spatřit.

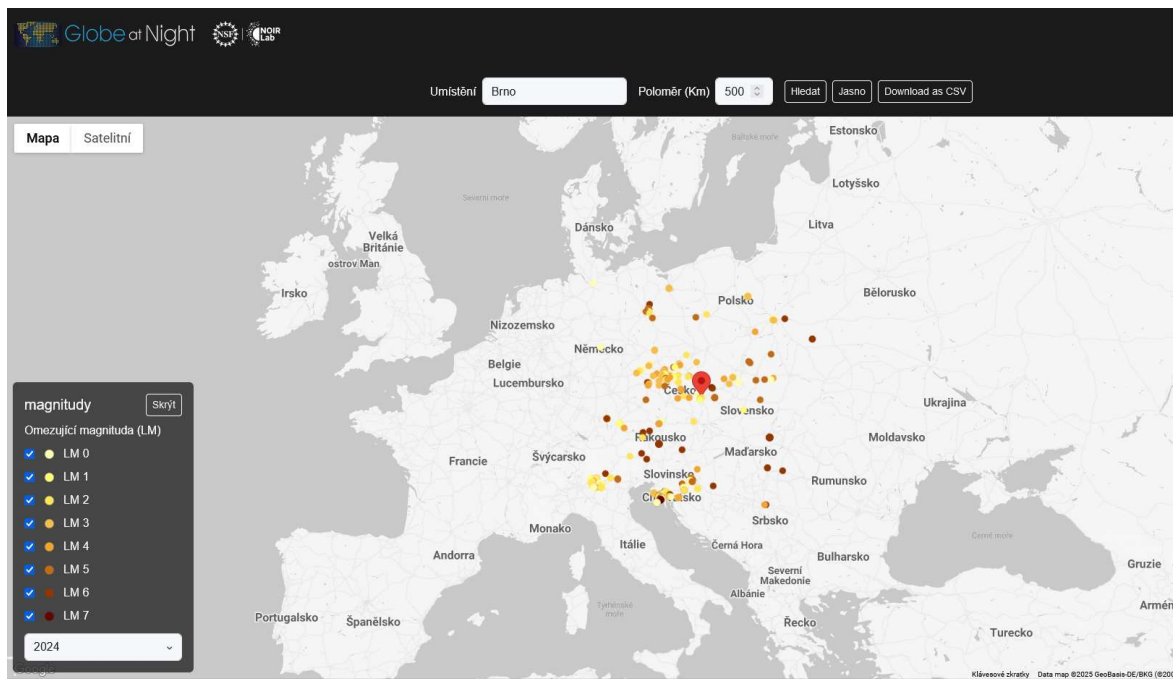


Obrázek 4.25 Loss of the Night – analýza vybraného měření [30]

Vedle analýzy oblasti je také možné zobrazit hodnoty pouze pro vybraná měření. Vedle hraniční magnitudy jsou také pro některá měření dostupné údaje o počtu viditelných hvězd.

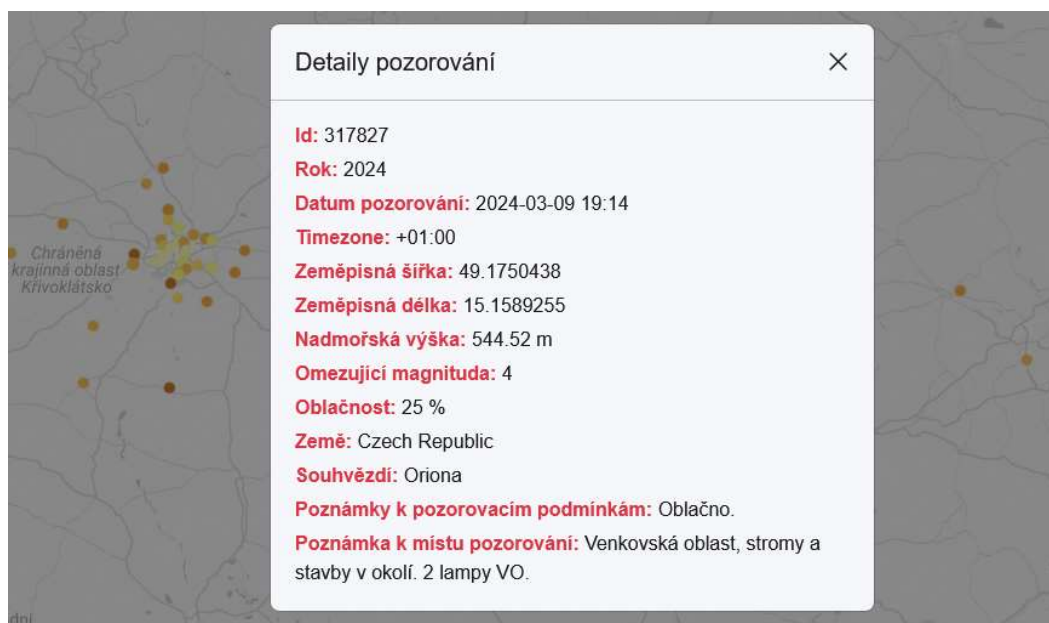
4.3.6 Globe at Night – www.globeatnight.org

Aplikace Globe at Night je provozována americkou organizací NOIRLab a svou podstatou je podobná výše uvedenému webu SkyQuality. Agreguje výsledky uživatelského hodnocení jasu noční oblohy, resp. viditelnosti hvězd a hodnot, naměřených přístrojem SQM. Aplikace sbírá data od roku 2006, do roku 2023 se povedlo sesbírat více jak 290 tisíc pozorování ze všech kontinentů. Nashromážděná data jsou volně dostupná ke stažení v různých formátech, nebo je možnost je zobrazit ve vestavěné mapové aplikaci.



Obrázek 4.26 Globe at Night – mapová aplikace [31]

Podobně jako v případě výše uvedené aplikace Loss of the Night jsou zde údaje o stavu světelného znečištění uvedeny v podobě hraniční magnitudy.



Obrázek 4.27 Globe at Night – jednotlivý záznam [31]

Zpráva- **Oriona**

1 Kdy jste pozorování prováděli?

Datum pozorování
08. 01. 2025 10:43

2 Odkud jste pozorování prováděli?

Mapa Satelitní

Česko
Rakousko
Slovinsko

Umístění MAP IT

Zeměpisná šířka: 0
Zeměpisná délka: 0
Nadmořská výška: 0 m

Czech Republic

RESETOVAT GPS

Poznámka k místu pozorování

(např. venkovská, příměstská nebo městská lokalita; sněhová pokrývka; stromy nebo stavby v okolí; počet lamp pouličního osvětlení či jiných zdrojů světla v okolí, např. světelných reklam, billboardů atd.)

3 Použili jste zařízení na měření jasu oblohy, tzv. Sky Quality Meter (SQM)?

Naměřená hodnota (mag/arcsec²)

4 Jak tmavá byla obloha?

< 0.50 mag

Mag 0

Souhvězdí: Oriona

5 Jaké byly pozorovací podmínky?

Jasno

¼ oblohy

½ oblohy

Více jak ½ oblohy

Poznámky k pozorovacím podmínkám

(např. opar, oblačnost, atd., pokuste se uvést i světovou stranu, v níž jste opar či oblačnost pozorovali)

6 Vyplnili jste vše nezbytné k odeslání pozorování?

Pokud máte účet SciStarter a chtěli byste získat kredit za svůj příspěvek do Globe at Night, zadejte e-mail, který jste použili k vytvoření účtu SciStarter:

ODESLAT ÚDAJE

Obrázek 4.28 Globe at Night – formulář pro záznam měření/pozorování [31]

4.4 Shrnutí kapitoly

Uvedené metody měření sice dokumentují určitou úroveň světla v nočním prostředí, ale zprostředkovaně přes jas oblohy. Obloha je tak transformačním profilem pro zobrazení vyzářeného toku zdrojů a sledovanou hodnotou je jas. Ani jeden z přístrojů VIIRS, SQM a SQC však není navázaný na SI standard svítivosti dle fotometrie CIE dané normou pro fotometrického pozorovatele, tedy spektrální citlivostí $V(\lambda)$. Vliv oblohy je přitom nezdokumentovaný a nelze tedy přesně určit převodní koeficienty. Prováděná srovnání se váží na temnou oblohu bez Měsíce, tedy pouze oblohu s hvězdami. Jas této oblohy se uvádí 0, 171168465 mcd.m⁻². Není však jasné, jak byla tato hodnota stanovena – jaká je vazba na fotometrický standard a pro jakou hvězdnou oblohu toto platí? Lze se domnívat že se jedná o průměr na celé planetě. Tato hodnota je velmi nízká a netvoří jediný přírodní zdroj světla. Jak dále uvádíme, při započtení světla Měsíce se dostáváme na řádově vyšší hodnoty.

Data ze systému SQC jsou opět bez vazby na fotometrický standard CIE a nelze je tedy brát jako směrodatná. Zachycené snímky jsou prováděny do zenitu a horizontální údaje jsou značně zkreslené. Použití je cíleno do míst bez umělých zdrojů světla jen jako doplněk k monitorování stavu oblohy – tedy doplnění hodnot z SQM a satelitních dat. Satelitní data systému VIIRS poskytují výsledky měření záře ve specifickém spektru a citlivosti. Uvedené jednotky W.cm⁻².sr⁻¹ opět nelze přímo propojit s fotometrickým standardem. Pozorování probíhá z opačné strany než u SQM a SQC – tedy shora. Zde se projeví rozptyl atmosféry a pohltivost mraků.

Souhrnně lze konstatovat, že dosavadní metody nejsou zaměřeny na přesné stanovení míry umělého světla v nočním prostředí a nejsou schopny identifikovat konkrétní zdroje světla a jejich podíl na tomto světle. Vliv oblohy je nezanedbatelný a kolísání hodnot z měření ukazuje, že data jsou zatížena značnou nejistotou, která není vyčíslena. Pro účinné omezování množství umělého světla byl navržen postup popsáný v následujících kapitolách.

5 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ VYVINUTÉ V RÁMCI VÝZKUMU APLIKOVANÉ V RÁMCI TÉTO METODIKY

Metodika je postavena na měření integrálních charakteristik světleného pole, obecně zářivého pole v libovolném bodě, kde se hodnocení provádí a zohledňuje faktory, které měření ovlivňují. Dále definuje referenční hodnoty, vůči kterým se naměřené hodnoty srovnávají. Zároveň ukazuje postup, jak identifikovat jednotlivé zdroje umělého světla (objekty) a vyčíslit jejich podíl příspěvku do sledované integrální veličiny. Ze všech integrálních veličin světleného pole byla pro potřeby této metodiky vybrána prostorová osvětlenost, resp. prostorová melanopická záře. Pro budoucí použití na libovolnou životní formu je možné aplikovat libovolný jiný citlivostní α -opický systém a zohlednit tak vlivy optického záření na jakoukoliv živou formu hmoty, pokud budou známy odezvy na dané záření. Pro demonstraci a použitelnost metody byly zvoleny dvě citlivostní charakteristiky, a to vizuální citlivost vycházející ze standardu fotometrického pozorovatele CIE 1931 a melanopickou citlivost, která je již dostatečně prověřenou citlivostí pro lidský cirkadiánní systém.

Principiálně jde o měření komplexního působení všech světelných zdrojů – umělých i přirozených a jejich vzájemné oddělení, srovnání a vyhodnocení, a to jak ve spektru, tak prostoru, ale následně i čase. Jako srovnávací referenci je možné využít libovolnou hodnotu, která reprezentuje přirozenou míru světla v nočním prostředí vyvolanou pouze přírodními zdroji světla, kterými jsou hvězdy, planety a nejsilnější zdroj Měsíc. Pro potřeby této metodiky byla reference určena čistě pro dominantní zdroj přírodního světla v noci a to Měsíc, jehož vliv na cirkadiánní, lunární a anuální cykly je pozorovatelný. Zahrnutí dalších zdrojů světla (hvězdy, planety) je možné, ale přesahuje rámec řešení projektu. Příspěvek od dalších zdrojů světla je velmi malý a ve srovnání se svitem Měsíce zanedbatelný. Řádově větší nejistotu do metody vnáší vliv počasí, který velmi výrazně přispívá k rozptylu záření v atmosféře a tím pádem k detekovanému světelnému poli. I proto byla ze svitu Měsíce použita jen jeho přímá složka, a to i z důvodu výrazného zjednodušení celkových výpočtů. Nejsou známy modely noční oblohy a jejich odvození by vyžadovalo samostatnou vědeckou práci. Výpočty svitu Měsíce jsou dále popsány v této metodice a je ukázán postup, jak získat referenční hodnotu pro celoroční hodnocení. Bylo by samozřejmě možné používat dynamickou hodnotu reference, ale to by znamenalo také dynamické ukazatele hodnocení ALAN a velmi komplikované vyjádření limitů pro pozdější použití např. v normách. Metodika však toto nevyklučuje a technické vybavení není v tomto směru omezeno.

Hlavní sledovanou veličinou měření a analýzy je prostorová osvětlenost a prostorová melanopická zář, a to jak celková, způsobená celým měřeným polem, tak dílčí, zahrnující pouze konkrétní vybrané světelné zdroje. Doplňkově je navržena zjednodušená indikace pomocí horizontální osvětlenosti a melanopické ozáření.

5.1 Zdůvodnění výběru měřených veličin

Prostorová osvětlenost popisuje průměrnou hodnotu osvětlenosti bodu prostoru ze všech možných směrů. Příspěvek světelných zdrojů do tohoto bodu je stejný, ať už je zdroj umístěn kdekoli na sféře. Prostorová osvětlenost nepreferuje žádný směr, příspěvky ze všech směrů jsou si rovny. Stejný efekt poskytuje sice i kulová osvětlenost, ale tato veličina rozpočítává příspěvek toku na povrch nekonečně malé koule. To v praxi znamená, že hodnoty této osvětlenosti jsou 4krát menší, než je přímá (normálová složka) – poměr plochy koule a kruhu jako průmětu. Číselně se tedy hodnoty prostorové a kulové osvětlenosti liší čtyřikrát, přičemž při měření normálové osvětlenosti je číselná shoda s prostorovou osvětleností – snadná ověřitelnost luxmetrem. Přestože se dají koupit detektory pro kulovou osvětlenost, měření pomocí luxmetrů s těmito detektory lze brát spíše jako orientační, neboť nebude možné dále pracovat s detekcí zdrojů záření anebo vyloučením neaktivních ploch – např. nebe.

Prostorová osvětlenost nejlépe odráží požadavek na směrovou nezávislost. V praxi to znamená, že nepreferujeme žádný směr, žádnou orientaci světla v prostoru. Stejný efekt bude mít svítidlo v zenitu

i v horizontu. Z hlediska živých organismů je to velmi důležité, neboť to pokrývá prakticky libovolné živé formy – od bakterií, řas až po stromy. Všechny tyto živé organismy mohou být narušeny zářením ze všech stran.

Podobné působení záření popisuje melanopická prostorová ozáření. Rozdíl je v tom, že se spektrum záření váhuje α -opickou citlivostí s_{mel} . Výběr této citlivosti souvisí s vlivem na člověka a jeho cirkadiánní rytmy. Bez ohledu na absolutní hodnotu této veličiny lze jednoznačně tvrdit, že prostorová melanopická ozáření bude velmi dobře korelovat s fyziologickými jevy v těle člověka bez ohledu na to, jak bude orientován jeho zrak. V praxi se často hodnotí tato intenzita z vertikální melanopické ozáření v rovině oka pozorovatele. Nicméně v takovém případě již musíme znát obvyklý směr pohledu. Pokud se nechceme na směr pohledu vázat (může být libovolný), pak se nabízí použít právě prostorovou veličinu.

Horizontální osvětlenost byla vybrána jako doplňkový indikátor, který prioritizuje záření dopadající shora dolů. Ve směru 60 stupňů od normály k horizontální rovině je tato hodnota zeslabena na 50 % a obecně příspěvek klesá s kosinem úhlu dopadu. V horizontu je pak příspěvek roven 0. To znamená, že zdroje umístěné v horizontu již tato veličina nijak nedetekuje. Pokud tedy zdroj svítí v nízkých elevačních úhlech, tak bude příspěvek takového zdroje malý. V praxi to znamená, že by se zanedbala většina zdrojů, které naopak přispívají do vertikální roviny. Použití vertikální roviny však není příliš vhodné, neboť ta může být orientována prakticky libovolně v prostoru – azimutálně. Toto bychom mohli řešit použitím válcové osvětlenosti, která vyjadřuje průměrnou osvětlenost pláště nekonečně malého válce (bez zahrnutí podstav). Narazíme zde ale na podobný problém jako u kulové osvětlenosti – záření z jednoho směru bude rozloženo do všech ostatních směrů rovnoměrně a hodnota bude ve výsledku velmi malá. Takto by bylo velmi potlačeno záření od zdrojů působících jen z jedné strany – typicky při pohledu z neosvětlené zóny do zóny osvětlené. V praxi bychom měli uvažovat ne průměrný, ale maximální účinek záření. Použití vertikální roviny anebo válcové osvětlenosti tedy není příliš vhodné právě pro složitější popis orientace. Výpočet z jasových dat by problematický sice nebyl, nicméně interpretace dat by již mohla působit komplikace a také ověřování vlivu na biologické organismy by vyžadovalo další techniku a výpočty. Horizontální složka osvětlenosti se také často měří, např. na pěších zónách, pracovních prostorech apod. Jedná se o návrhovou veličinu. Pro získání této veličiny postačí luxmetr s dostatečnou citlivostí a přesností, ideálně třídy L.

Podobně jako horizontální osvětlenost lze posuzovat záření i z horizontální melanopické ozáření. Tato veličina bude opět velmi dobře korelovat s vlivem záření na cirkadiánní rytmy u člověka. I tato veličina bude zvýrazňovat záření směrem shora dolů a potlačuje záření ve směru horizontálním.

Pro všechny složky osvětlenosti i melanopické ozáření byly určeny příslušné složky přirozeného svitu Měsíce, a to statistickou metodou mediánu z hodnot pouze aktivního svitu, kdy je Měsíc nad horizontem.

Z takto získaných veličin je počítáno tzv. ALAN skóre, které dává do poměru tento umělý zdroj záření a přirozený zdroj světla Měsíc jako referenci. Získané veličiny indikují souhrnné množství světla a záření obecně v konkrétním bodě bez ohledu na orientaci v prostoru – jsou směrově nezávislé, skalární. Metodika nestanovuje limity, bezpečné meze, nebo vlivy na konkrétní životní formy. Řeší technické a fyzikální vyjádření v absolutní a relativní škále porovnatelné se standardními jednotkami používanými v soustavě SI, přičemž respektuje hlavní cíl metodiky, a to stanovení vlivu světla na živé organismy a životní prostředí jako celku. Klíčovým prvkem tohoto hodnocení je fakt, že na světlo je nutné se dívat jako na prostorovou veličinu se spektrálním a časovým rozložením. V rámci metodiky se provádění měření v daném bodě pozorování a hodnocení a tento bod je zaznamenán v geografickém

systému – mapový podklad se všemi doprovodnými daty a vazbami na vybrané používané informační systémy. Pro libovolný žijící organizmus lze aplikovat stejnou metodiku při znalosti spektrální citlivostní funkce a vytvořit další kanál pro naměřená data. V současné podobě je jako vzorový příklad použita metrika melanopických veličin – melanopická zář, melanopická ozářenost. Motivací pro použití této metricky je její obecné přijetí vědeckou komunitou a již zaužívané výpočtové vztahy. Pro jiné spektrální citlivosti lze postupovat stejným způsobem a měření v tomto směru zaznamenat.

Další možností aplikace metodiky je dělení scény na menší části – svítící plochy a objekty. Je tak možné vyčíslit podíl jednotlivých světelných systémů na celkovém skóre. Nicméně pro celkové stanovení působení záření v daném bodě je vždy důležitá suma všech příspěvků ze všech možných směrů. Zde je nutné vždy uvažovat s vlivem okolí a zejména stavem a propustností atmosféry. Proto je nutné vždy zaznamenat podrobná meteorologická data. I když metodika přímo neřeší kompenzace rozptýlů a propustnosti atmosféry, je záznam podmínek nutný pro pozdější porovnávání a hodnocení. Stanovení příspěvku atmosféry by vyžadovalo další speciální vybavení a celý proces by se výrazně zkomplikoval.

Vlastní technické řešení vychází z pořízení plně panoramatických dat rozložení jasu a melanopická záře pomocí kalibrovaného analyzátoru s širokoúhlým objektivem typu rybí oko a příslušnou spektrální citlivostí a všemi potřebnými korekcemi. Analyzátor se natáčí pomocí přesného polohovacího zařízení v nastaveném kroku a pořizuje dostatečné množství snímků pro každou polohu, aby bylo možné spočítat HDR snímky. Tyto se následně pomocí algoritmů spojí do výsledného plně panoramatického – sférického snímku s příslušnou transformací a z takto získaných dat lze již integrací získávat příslušné integrální veličiny. Z těchto veličin se pak počítá příslušné skóre srovnáním s referenční hodnotou. Pro kontrolu je možné použít přesný luxmetr na ověření normálové osvětlenosti.

5.2 Omezení metodiky

Z technický důvodů je nutné vyloučit prostor přímo v místě měření, kde se nachází aparatura, tedy prostor pod vlastním měřidlem. Bod měření se nesmí nacházet v poloze kde je výrazný jas směrem zespodu, tedy pokud by např. nějaké svítidlo bylo umístěno v zemi a svítilo směrem nahoru a měřicí aparatura by jej zakrývala, popř. kdyby do místa měření směřoval přímo kužel světla z jiného zařízení a toto světlo se v místě měření od povrchu odráželo. V rámci prototypového řešení byl tento prostor vymezen rozsahem $\langle -55^\circ; -90^\circ \rangle$. Pokud by bylo potřeba vyhodnocovat i pole v těchto kritických úhlech, je nutné použít jiné polohovací zařízení, které nebude stínit v dané oblasti. Tato možnost nebyla experimentálně ověřena.

Další omezení metodiky vychází z parazitních jevů, které nelze zcela vyloučit. Jedná se o různé odlesky v optice přístrojů způsobené příliš intenzivními zdroji světla a nepříznivými úhly dopadu – velké úhly od osy objektivu. V praxi je možné tyto jevy sledovat v obraze a popř. je vyloučit z výpočtu zahrnutím do zájmové oblasti. To vyžaduje manuální kontrolu dat a ruční zpracování snímků.

Za další omezení metodiky je třeba uvažovat dynamické změny ve scéně. Principiálně není možné měření provést za velmi krátký okamžik, kdy by se scéna neměnila. Změny scény se dějí např. vlivem větru nebo pohybem osob, popř. vozidel nebo změnami světelného toku přímo v osvětlovacích systémech (regulace, kolísání napájení, efekty).

Další omezení představuje vliv atmosféry, jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole. Jelikož otevřené nebe tvoří často nezanedbatelnou část obrazu, je třeba počítat s tím, že různé rozptylové podmínky mohou výrazně ovlivnit hodnotu záření v daném bodě. Z hlediska posuzování vlivu na živé organizmy však toto není podstatné, neboť ovlivnění je přímé i nepřímé, a i rozptýl záření se na vlivu

projevuje. Sledovaný indikátor se však může výrazně měnit. Proto je třeba vždy zaznamenat podmínky měření, a to zejména meteorologická data.

6 KVALIFIKACE OSOB PROVÁDĚJÍCÍ MĚŘENÍ

Osoba provádějící provozní měření umělého světla v nočním prostředí pomocí prototypu přístroje k tomu určenému musí vhodným způsobem prokázat svoji odbornou způsobilost, například osvědčením o interním zaškolení, o absolvování odborného kurzu nebo certifikátem odborné způsobilosti vydané organizací s příslušnou akreditací. Za prokazatelnou kvalifikaci se považuje i univerzitní pracoviště s akreditací studijních programů v příslušném oboru, např. světelná technika, osvětlovací technika apod., popřípadě jiný znalecký ústav s dostatečnou kvalifikací pracovníků.

V rámci této metodiky se předpokládá znalost použití jasových analyzátorů, práce se spektrometrem, práce s luxmetrem. K vyhodnocení je nutné využití výpočetní techniky, neboť postupy zde uvedené není možné realizovat bez počítačových programů a pokročilého zpracování obrazu v příslušném software. Pro získání relevantních dat je možné v této chvíli použít vyvinutý prototyp měřicího zařízení, který vznikl jako součást řešení grantového úkolu. K tomuto prototypu je dodávána potřebná dokumentace popisující podrobněji práci s daným přístrojem.

7 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

Pro měření míry světelného znečištění, resp. obecně umělého světla v nočním prostředí se v rámci této metodiky používá specifické přístrojové vybavení prototypového formátu, které bude zaváděno do praxe a případně upravováno dle zjištěných požadavků a limitů. V této chvíli se jedná o zařízení sloužící na ověření teoretických předpokladů a ukázkou praktických postupů, jenž souvisí jednak s použitím dané měřicí aparatury, dále s aplikovanými algoritmy a dále pak s webovým portálem, službou, resp. aplikací, která pořízená data uchovává a dále prezentuje a doplňuje další potřebnou konektivitou na vybrané služby. Měřicí zařízení sestává z několika základních komponent.

7.1 Jasový analyzátor

Jasový analyzátor tvoří základní přístroj pro snímání prostorového rozložení jasu, který obklopuje daný hodnotící bod. Pro potřeby této metodiky je použit analyzátor se zorným polem 180 stupňů, tedy objektivem tzv. rybí oko – fish eye. Bližší popis je uveden v dokumentaci k prototypu přístroje ALANISATOR.

7.2 Analyzátor melanopické záře - melanopický analyzátor

Obdobné zařízení jako jasový analyzátor upravené na spektrální citlivost melanopických veličin. Je výhodné použít jeden přístroj s výměnnými filtry, aby byla zajištěna synchronizace orientace přístrojů, resp. změřených dat. Tento přístroj umožňuje snímat melanopickou zář a počítat integrální charakteristiky melanopického zářivého pole. Bližší popis je uveden v dokumentaci k prototypu přístroje ALANISATOR.

7.3 Meteostanice

Pro záznam dat o aktuálním stavu počasí je doporučeno použít mobilní meteostanice. V případě, že je v dosahu měřicího bodu nějaká veřejně dostupná meteostanice, je možné data o počasí převzít z této stanice. Meteostanice by měla umět zaznamenat tyto veličiny

- teplota
- tlak
- vlhkost
- rosný bod
- rychlost větru
- směr větru

Záznam veličin je doporučen zejména z důvodu srovnání jednotlivých měření mezi sebou, neboť tyto parametry ovlivňují např. výšku oblačnosti, propustnost atmosféry apod. tyto parametry ovlivňují přímo proces šíření světla, obecně záření.

Zaznamenané hodnoty je vhodné průměrovat za dobu provádění měření. Zejména u rychlosti a směru větru bude variabilita poměrně velká. Je také možné využít meteostanice v okolí, které poskytují veřejně dostupná data v sítích jako Weatherlink popř. Weather Underground.

Z naměřených hodnot teploty a rosného bodu lze určit teoretickou výšku základny oblačnosti přibližně jako

$$h \cong 122 \cdot (T - T_{DP}), \quad (7.1)$$

kde h je výška základny oblačnosti nad povrchem v metrech, T je povrchová teplota, a T_{DP} je teplota rosného bodu [32]. Tato hodnota má podstatný vliv na šíření světla v atmosféře, neboť nižší (a intenzivnější) oblačnost tlumí vzdálenější zdroje umělého světla, zatímco bližší zesiluje – alespoň tedy co se týká umělého jasu noční oblohy.

7.4 Stativ

Stativ slouží k umístění rotační hlavy do stanovené výšky. Tato výška se odvíjí od toho, jaký organizmus bude světlem ovlivňován. V případě člověka se počítá s umístěním měřicí hlavy ve výšce očí dospělého člověka a pro účely této metodiky je použita výška 170 cm.

7.5 Rotační hlava

Rotační hlava sestává z dvouosého rotačního zařízení pro přesné nastavení úhlu azimutu a elevace. Je možné použít i zjednodušené snímání pouze jednoosým systémem s mírně skloněným přístrojem v úhlu 15-20 stupňů, aby došlo k dostatečnému překryvu zorného pole objektivu v oblasti zenitu. V rámci prototypu je popsáno použití obou zařízení. Pro tuto metodiku je doporučeno použít v tuto chvíli zjednodušený princip jednoosé rotační hlavy, pro kterou byly dokončeny algoritmy spojování panoramatických snímků.

7.6 Hlavní měřicí zařízení

- Pro měření vstupních dat rozložení světelného pole se používají jasové (melanopické) analyzátory s příslušnými spektrálními filtry a předepsaným objektivem.
- Pro měření záření působící na neobrazové funkce (NIF) se používá analyzátor vybavený spektrálním filtrem $s_{mel}(\lambda)$ v souladu s křivkou dle CIE S 026:2018
- Horní úroveň rozsahu vlnových délek měření je stanovena na hodnotě 780 nm.
- Dolní úroveň rozsahu vlnových délek měření je stanovena na hodnotě 380 nm.
- Maximální doba platnosti kalibrace nebo ověření v případech, kdy se nevyžaduje použití stanovených měřidel, je stanovena na dva roky.
- Stanovená měřidla musí mít zkoušku typu v souladu s opatřením obecné povahy 0111-OOP-C046-15 (ČMI).

7.7 Pomocná měřicí zařízení a pomůcky

- Spektroradiometr se používá pro podrobnější analýzu spektra konkrétních zdrojů světla
- Voltmetry se používají pro měření napájecího napětí světelného obvodu.
- Teploměry se používají pro měření teploty okolí.
- Vlhkoměry se použijí pro stanovení aktuální vlhkosti vzduchu
- Anemometry se použijí pro stanovení rychlosti a směru větru
- Barometry se použijí pro stanovení aktuálního atmosférického tlaku
- Měřidlo času (stopky, hodinky) se používají pro měření doby stabilizace osvětlení.
- GPS se používají pro určení souřadnic místa pozorování, měření

8 OBECNÉ PODMÍNKY MĚŘENÍ – VELIČINY OVLIVŇUJÍCÍ VÝSLEDKY MĚŘENÍ

▪ Počasí, stav atmosféry

Vliv počasí se projevuje v několika rovinách. Tou hlavní jsou vlastnosti optického prostředí, které mění svou propustnost, pohltivost a odraznost, a to jak v absolutních hodnotách, tak spektrálních, a nakonec i směrových. Příčin je více a za hlavní lze označit obsah volných částic a složení prostředí jako takového. Je nutno si uvědomit, že v reálných podmínkách není možné prostředí jakkoliv eliminovat a na druhou stranu není možné ho tedy ani zanedbat. Jelikož se však jedná o mnoha parametrický systém, kde analýza jednotlivých parametrů přesahuje možnosti řešení vlastního projektu. V rámci metodiky je doporučeno pouze zaznamenat dostupné meteorologické údaje: teplota, vlhkost, rychlost a směr větru, barometrický tlak. Pokud je během měření k dispozici Měsíc, je třeba zaznamenat co nejpečlivěji také svit tohoto tělesa jakožto přirozeného přírodního světelného normálu.

▪ Teplota

Vliv teploty není pouze na optické vlastnosti prostředí, ale také na měřicí techniku. Jelikož měření může probíhat delší čas, je třeba teplotu zaznamenávat v průběhu měření a ideálně pro každý záznam. Pokud je součástí měření přenosná meteostanice, je doporučeno data o teplotě logovat s příslušnou časovou značkou.

▪ Jasové poměry

Výsledky měření mohou ovlivňovat i specifické jasové poměry snímané scény. Je třeba si uvědomit, že pokud se ve snímku vyskytují příliš světlé a zároveň příliš tmavé části, vzrůstá nejistota měření, a to i přes využití HDR technologie. Velmi intenzivní světelné zdroje lze snímat pouze s nízkou citlivostí nastavení přístroje a ideálně pomocí neutrálních spektrálních filtrů, aby se neprojevaly jevy spojené s kolísáním napájecího napětí umělých zdrojů. Obecně lze doporučit nesnižovat expoziční čas pod 10–20 ms.

▪ Spektrální složení světla zdrojů

Tento vliv je sice kompenzován optimalizací spektrálních filtrů na měřicím zařízení, ale nelze tak eliminovat všechny jevy spojené s různým spektrálním složením. Světlo různých vlnových délek vytváří různý rozptyl, ohyb i lom světla, různě se projevuje i v oblasti odrazných vlastností od povrchů apod. Navržená metodika nezkoumá detailně spektrální složení světla a omezuje se pouze na fakt, že tento vliv je znám, ale pro daný rámec zkoumání nebude považován za významný.

▪ Umístění aparatury

Umístění aparatury ovlivňuje zejména orientaci pořízených snímků jak na dané souřadnici – pozice, výška, tak na úrovni orientace pohledu. Je vhodné co nejpřesněji polohu identifikovat, a to včetně výšky aparatury nad terénem. Je doporučeno zaznamenat polohu měřicí aparatury také na fotografii pro případné další dohledávání přesné pozice. Pokud je to možné, zahrnout do dokumentační fotografie také významný referenční bod – budova, roh ulice, jiná geodetická značka.

9 METROLOGICKÉ MEZE VYUŽITÍ METODY MĚŘENÍ

Metodika měření slouží jako zaváděcí řešení pro posuzování množství umělého světla v nočním prostředí, a to s ohledem na různé živočišné a rostlinné formy života. V této chvíli jsou aplikovány dvě základní spektrální charakteristiky citlivosti přístrojů – fotopická citlivost pro viditelné záření, obecně popisované pojmem světlo (odtud světelné znečištění) a záření cirkadiánní, charakterizované spektrální citlivostí $s_{mel}(\lambda)$ nebo s_{mel} melanopickou citlivostí. Jedná se o ekvivalentní citlivosti.

V průběhu řešení projektu bylo rozhodnuto, že bude výhodné používat pro hodnocení světelného znečištění, resp. příspěvku umělého světla obecně v daném bodu zájmu tzv. Hammer-Aitoffovu projekci. Hlavní výhoda této projekce je, že je tzv. rovnoplošná, tzn., že všechny body v obraze mají stejnou plochu, resp. stejný prostorový úhel. Tato skutečnost velmi usnadňuje následný post-processing, který spočívá v kombinování několika snímků do jednoho pohledu. Takto zkombinované snímky jednak pokrývají celý pohled na celou oblohu, ale je též možné zdrojové snímky zkombinovat do podoby, kdy je na obrázku možno vidět jak horní polovinu prostoru, tak i tu spodní.

Byl vyvinut algoritmus, s jehož pomocí je možné zkombinovat vícero snímků do jednoho, tak aby bylo možné sestavit celoprostorovou Hammer-Aitoffovu projekci. Ke konstrukci tohoto výsledného snímku se osvědčilo použít 4-5 snímků z objektivu typu rybí oko. Orientace těchto snímků je pak ideálně směřována ke všem čtyřem světovým stranám a k zenitu. Použití tohoto počtu snímků bylo stanoveno na základě proběhnutých testů, kdy se odhalilo, že objektiv typu rybí oko má ve svých okrajích značnou zobrazovací chybu, která vnáší do celého procesu zbytečně velkou nejistotu měření. Vzájemným překrytím obrazu, lze tak tuto nejistotu podstatně snížit, a tím získat poměrně věrohodná data.

Zjednodušeným a doporučeným postupem se nakonec ukázalo, že pro praktické měření postačí jednoosá rotační hlava a konstantní elevační náklon analyzátoru 15 stupňů. Pro dostatečně přesné složení plno panoramatického snímku stačí 3 snímky. Nicméně pro větší přesnost se doporučuje pořídit snímky 4 pro každou světovou stranu. Spodní část obrazu zaujímající stativ a rotační hlavu se do analýzy nezapočítává.

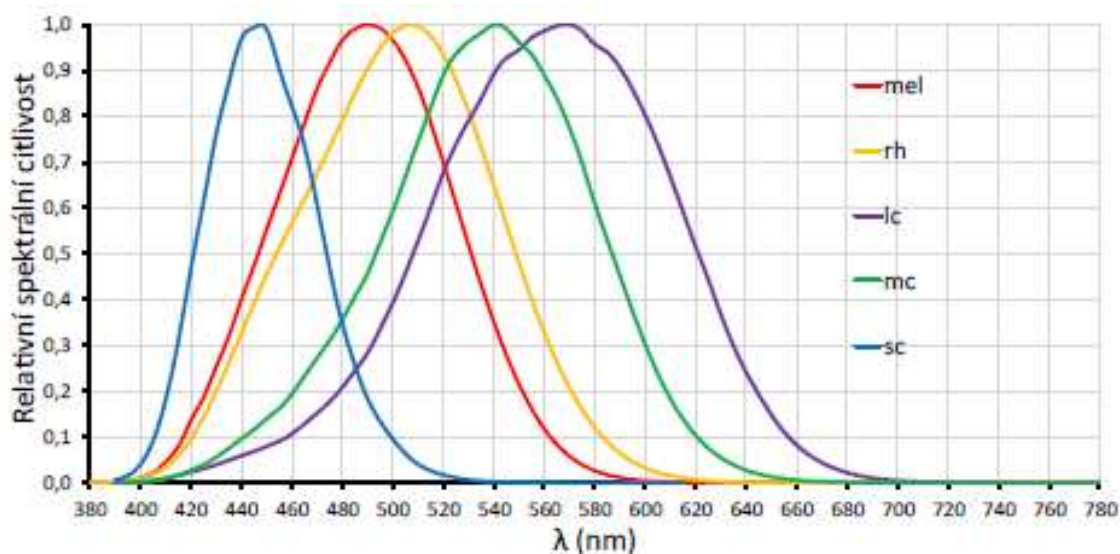
10 MĚŘENÍ MELANOPICKÝCH VELIČIN

Hlavním synchronizátorem lidských biologických hodin je světlo. Může regulovat načasování a kvalitu našeho spánku a dokáže posunout fáze cirkadiánního rytmu. Ve večerních a nočních hodinách světlo ruší spánek a způsobuje akutní potlačování uvolňování hormonu melatoninu. Podle některých studií světlo také zvyšuje srdeční frekvenci, zlepšuje bdělost, ovlivňuje termoregulaci, zmírňuje deprese a ovlivňuje spektrum elektroencefalogramu (EEG). Vystavení organismu světlu vyvolává rychlé reakce v pupilárním reflexu a v mozkové činnosti. Světelné normy, předpisy i praxe se často zaměřují na vizuální aspekty a energetické aspekty účinnosti světla a neřeší reakce na světlo, které nevytváří obraz (NIF). Tento fakt má za následek vytváření světelných podmínek, které ohrožují fungování lidského organismu, jeho pohodu a dokonce zdraví.

Fotoreceptory známé jako vnitřní fotosenzitivní gangliové buňky sítnice (ipRGC-intrinsically photosensitive retinal ganglion cells) a jejich vlastní spektrální citlivost je založena na fotopigmentu melanopsinu, který je v nich obsažen. V mezinárodní normě CIE (Mezinárodní komise pro osvětlení – The International Commission of Illumination) CIE S 026/E:2018 jsou definovány funkce, veličiny a metriky spektrální citlivosti k objasnění schopnosti optického záření stimulovat všech pět typů fotoreceptorů, které prostřednictvím gangliových buněk sítnice obsahujících melanopsin (ipRGC), působí na sítnici zprostředkováním nevizuálních účinků světla. Zabývá se viditelným optickým zářením v rozsahu vlnových délek od 380 nm do 780 nm.

Rozdělení akčních spekter

1. *scs* (λ): S-cone opic (S-cones) cyanolabe, krátkovlnné čípky – nejcitlivější na záření s $\lambda = 450$ nm (modrý barevný dojem)
2. *smc* (λ): M-cone opic (M-cones) chlorolabe, středněvlnné čípky – nejcitlivější na záření s $\lambda = 540$ nm (zelený dojem)
3. *slc* (λ): L-cone opic (L-cones) erythrolabe, dlouhovlnné čípky – reagující s nejvyšší citlivostí na záření s $\lambda = 590$ nm (červený barevný dojem)
4. *srh* (λ): rhodopic (tyčinky)
5. *smel* (λ): melanopic (melanopsin)



Obrázek 10.1 Akční spektra podle CIE S026/E:2018

11 ALFA-OPICKÉ VELIČINY

Tyto veličiny jsou přehledně uvedené v kapitole 3 - Názvosloví, definice. Pro potřeby této metodiky byla aplikována metrika pro tyto melanopické veličiny:

- melanopický zářivý tok (*melanopic radiant flux*) (W)
- melanopická zářivá energie (*melanopic radiant energy*) (J)
- objemová hustota melanopické zářivé energie (*melanopic radiant energy density*) ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$)
- melanopická zářivost (*melanopic radiant intensity*) ($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$)
- melanopická zář (*melanopic radiance*) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)
- melanopická ozářenost (*melanopic irradiance*) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
- normálová melanopická ozářenost (*normal melanopic irradiance*) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
- horizontální melanopická ozářenost (*horizontal melanopic irradiance*) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
- kulová melanopická ozářenost (*spherical melanopic irradiance*) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
- prostorová melanopická ozářenost (*scalar melanopic irradiance*) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
- válcová melanopická ozářenost (*cylindrical melanopic irradiance*) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

Klíčové sledované veličiny budou

- melanopická zář (*melanopic radiance*) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)
- melanopická ozářenost (*melanopic irradiance*) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
- prostorová melanopická ozářenost (*scalar melanopic irradiance*) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
- melanopická zářivá energie (*melanopic radiant energy*) (J)

12 MOŽNOSTI JASOVÉHO ANALYZÁTORU LDA – LUMIDISP MĚŘIT MELANOPICKÉ VELIČINY.

Jasový analyzátor LDA LumiDISP patří do skupiny přístrojů nazývaných snímací jasoměry, které jsou schopny měření jasu v milionech bodů. Tento přístroj dokáže měřit jas ve více jak 20 milionech bodů současně a umožňuje naměřená data ukládat do databáze, kde je lze následně zpracovávat v softwaru LumiDISP. Citlivost měřicího systému odpovídá spektrální citlivosti normální pozorovatele $V(\lambda)$, která je definovaná mezinárodní společností pro osvětlování CIE. Pro měření melanopických veličin je nezbytné hardwarově a softwarově upravit pro dosažení citlivosti s_{mel} , jejíž průběh je také definovaný společností CIE (dokument CIE S 026/E:2018). Detailní popis přizpůsobení přístroje a možnosti měření jsou součástí popisu prototypu přístroje.

13 REFERENČNÍ HODNOTY PŘÍROZENÉHO NOČNÍHO SVĚTLA

Pro potřeby této metodiky pro hodnocení světelného znečištění [33] bylo třeba určit vztažnou hodnotu osvětlenosti od přírodních zdrojů v nočním prostředí. V oblastech, nezasažených světelným znečištěním je měsíční světlo zcela majoritním zdrojem světla v nočním prostředí [34], [35] - platí tedy pochopitelně s výjimkou bezměsíčných nocí. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k tvorbě simulačního výpočtu pro určení horizontální a prostorové osvětlenosti od Měsíce pro určené místo a čas. Následně byly tímto algoritmem vygenerovány hodnoty těchto osvětleností pro celkem 4 místa – Prahu, Brno, Helsinky a Athény, a to s šestiminutovým krokem pro celý rok 2024. Tyto hodnoty byly následně základně statisticky analyzovány a byl určen medián obou hodnot osvětlenosti pro všechna tato místa. Výpočet uvažuje celoročně bezoblačnou oblohu, a to z důvodu jeho zjednodušení, ale také pro stanovení nejvyšší teoreticky možné úrovně osvětlenosti, což může být pro určení referenční hodnoty výhodné.

13.1 Matematický model

Výpočty referenční osvětlenosti vycházejí především z [36]. Vyjdeme z hodnoty fázového úhlu Měsíce i , který si určíme jako:

$$i = 180 - d - 0,1468 \cdot \sin(d) \cdot \frac{1 - 0,0549 \cdot \sin(M')}{1 - 0,0167 \cdot \sin(M)}, \quad (13.1)$$

kde parametr d určíme jako

$$d = \arccos(\cos(\lambda - \theta) \cdot \cos(\beta)) . \quad (13.2)$$

M' je střední anomálie Měsíce, M je střední anomálie Slunce, λ je ekliptikální délka Měsíce, θ je ekliptikální délka Slunce a β je ekliptikální šířka Měsíce. Určení těchto parametrů viz [36].

Z hodnoty fázového úhlu je následně určena hvězdná velikost (resp. zdánlivá magnituda) Měsíce [37], a to jako

$$m = -12,73 + 1,49 \cdot |i| + 0,043 \cdot i^4 , \quad (13.3)$$

kde i je fázový úhel Měsíce v radiánech.

Dalším krokem je určení hodnoty tzv. koeficientu opozice. Ten ve výpočtu zohledňuje poměrně prudký vzrůst jasu měsíční plochy v době, kdy se Měsíc blíží úplňku (definováno jako $i < 7^\circ$) a určíme jej jako

$$k_o = \max(1; 1,35 - 2,865 \cdot |i|) , \quad (13.4)$$

opět z hodnoty fázového úhlu v radiánech [38].

Zenitový úhel určíme jako

$$z = 90^\circ - a , \quad (13.5)$$

kde a je výška Měsíce nad horizontem korigovaná o lom světla v atmosféře. Tuto hodnotu určíme jako

$$a = a' + \frac{1,02}{60 \cdot \tan\left(a' + \frac{10,3}{a' + 5,11}\right)} , \quad (13.6)$$

kde a' je skutečná výška Měsíce nad horizontem v radiánech [39].

Do výpočtu je třeba zahrnout také útlum atmosféry. Ve výpočtu je zohledněn útlum vlivem Rayleighova rozptylu, aerosolů, a ozónu. Hodnotu měrného útlumu obdržíme jako

$$A_{tot} = A_{Ray} + A_{aer} + A_{O_3} = 0,1454 \cdot \exp\left(\frac{-h}{7,996}\right) + 0,12 \cdot \exp\left(\frac{-h}{1,5}\right) + 0,016, \quad (13.7)$$

kde h je nadmořská výška místa pozorování v km [40], [41].

Pro výpočet skutečného útlumu potřebujeme ještě znát hodnotu aktuální airmass – masy vzduchu, kterou světlo Měsíce prochází. Tuto hodnotu určíme jako

$$X = \frac{1}{\cos(z) + 0,025 \cdot e^{-11 \cdot \cos(z)}}, \quad (13.8)$$

kde z je výše uvedený zenitový úhel se zahrnutím korekce lomu světla v atmosféře [42].

Nyní je již možné vyčíslit celkovou hodnotu útlumu v magnitudách, a to jako

$$M_Z = A_{tot} \cdot X \quad (13.9)$$

a také hodnotu hvězdné velikosti Měsíce se zahrnutím útlumu [40] jako

$$m_m = m + M_Z. \quad (13.10)$$

Dalším krokem je pak již výpočet nekorigované hodnoty osvětlenosti od Měsíce na povrchu Země. Vyjdeme z výše určené hodnoty m_m a můžeme psát

$$E_{nc} = 10^{(-0,40195 \cdot m_m - 5,5917)}, \quad (13.11)$$

kde E_{nc} je nekorigovaná prostorová osvětlenost v luxech [43], [44].

Hodnotu skutečné prostorové osvětlenosti od Měsíce pak určíme s využitím koeficientu opozice a aktuální topocentrické vzdálenosti povrchu Měsíce od místa pozorování jako:

$$E_0 = k_o \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \cdot E_{nc}, \quad (13.12)$$

kde d_0 je průměrná topocentrická vzdálenost Měsíc – Země (384 399 km) a d je aktuální topocentrická vzdálenost. Pro její určení využíváme Meeusovu metodu lineárních kombinací, která je detailně popsána v [45].

Pro úplnost připomeňme, že prostorová osvětlenost je skalární veličinou světelného pole definovanou jako algebraický součet všech normálových osvětleností v uvažovaném bodě pole [14].

Posledním krokem je pak určení horizontální osvětlenosti, kterou určíme pomocí vztahu

$$E_n = E_0 \cdot \cos(z). \quad (13.13)$$

13.2 Ověření vypočtených hodnot

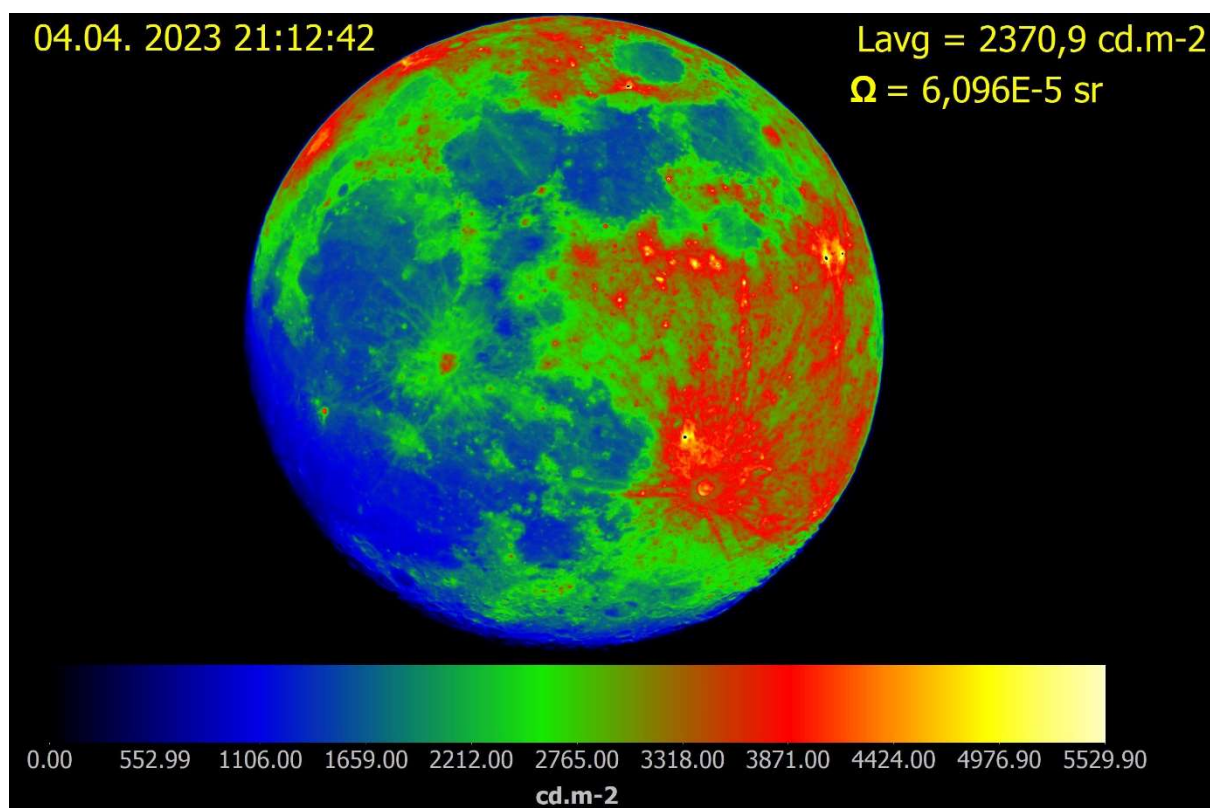
Vypočítané hodnoty byly porovnány s naměřenými hodnotami osvětleností od Měsíce, jež byly naměřeny jasovým analyzátozem v průměru let 2023–2024.

Tabulka 1 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot osvětlenosti od Měsíce

Datum	Čas	α (°)	L_θ (cd.m ⁻²)	Ω (sr)	E_m (mlx)	E_c (mlx)	δ (%)
04.04.2023	21:12:42	30,9	2370,9	6,096E-05	144,5	136,4	-5,63
04.07.2023	0:26:58	11,5	1008,8	7,301E-05	73,7	97,8	32,8
31.08.2023	21:35:05	11,9	1174,1	7,353E-05	86,3	95,9	11,1
28.09.2023	23:52:19	35,9	3081,7	7,479E-05	230,5	219,4	-4,81
29.09.2023	0:31:10	36,7	3131,4	7,493E-05	234,6	222,8	-5,04
29.11.2023	18:10:12	8,2	458,7	5,809E-05	26,6	32,2	20,8
25.03.2024	19:30:56	7,66	1157,4	5,759E-05	66,7	53,2	-20,2
25.04.2024	23:28:34	8,1	757,9	5,810E-05	44,0	37,3	-15,3

V Tabulka 1 značí α vypočtenou výšku Měsíce nad horizontem (včetně korekce), L_θ je průměrný jas povrchu Měsíce naměřený jasovým analyzátozem, Ω je naměřený prostorový úhel, pod kterým je Měsíc viditelný, E_m je naměřená hodnota prostorové osvětlenosti, určená jako $E_m = L_\theta \cdot \Omega \cdot 1000$, E_c je vypočítaná hodnota prostorové osvětlenosti od Měsíce pro dané místo a čas a δ je relativní chyba naměřené a vypočtené hodnoty.

Průměr relativních chyb je pro zkoumaných 8 měření 1,72 %, byť jednotlivé chyby dosahují hodnot i o řád větších. Z tabulky je patrné, že větších chyb hodnota vypočtené osvětlenosti dosahuje pro nižší polohy Měsíce na obloze. Toto může být způsobeno nedokonalou aproximací útluhu atmosféry a jeho komponentů. Velký vliv na výsledek má také aktuální povětrnostní situace –např. v případě druhého měření byl Měsíc viditelný za mírným oparem, což se výrazně projevilo na nižší hodnotě naměřené osvětlenosti, potažmo jasu.

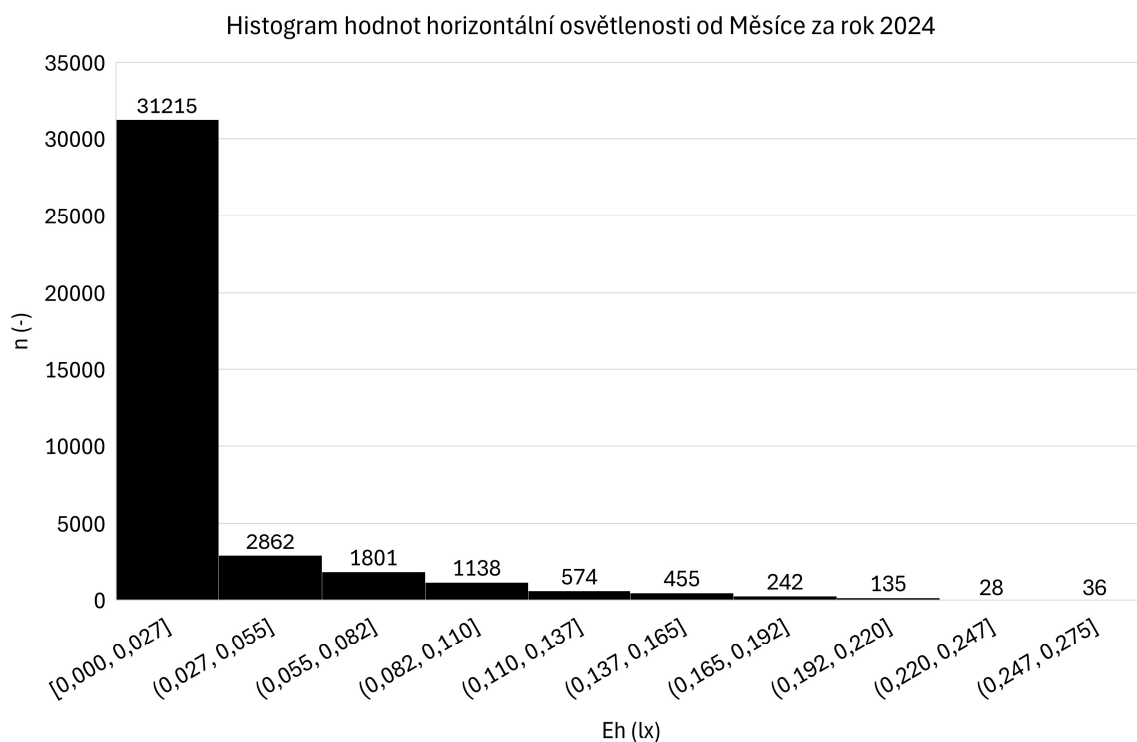


Obrázek 13.1 Jeden z pořízených jasových snímků Měsíce

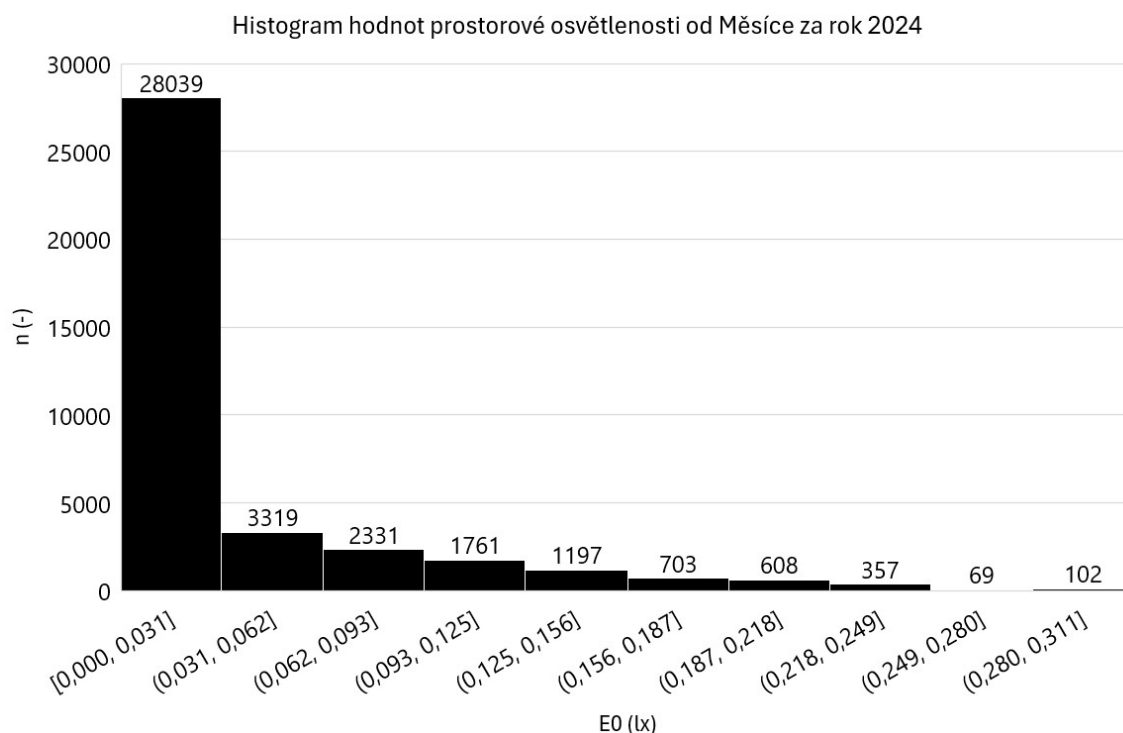
13.3 Statistické zpracování dat

Při zpracování dat bylo postupováno následovně: Data roku 2024 byla rozdělena do šestiminutových intervalů a do algoritmu výpočtu byly zadány zeměpisné souřadnice centra Prahy. Rok 2024 je přestupný, celkem bylo tedy vypočteno 87 840 hodnot prostorové a horizontální osvětlenosti. Poté byly vyřazeny hodnoty, které odpovídaly času, kdy je Slunce nad horizontem nebo jen velmi nízko pod ním (denní doba) – jako hraniční hodnota byla stanovena pozice Slunce 6° pod horizontem, což se shoduje s definicí občanského soumraku. Takto bylo odstraněno 49 354 hodnot, tedy 56,19 % z celku. Zbývající data byla následně analyzována. Průměrná hodnota osvětlenosti byla určena jako 16,87 mlx pro horizontální a 29,83 mlx pro prostorovou osvětlenost. Medián hodnot je v obou případech roven 0, maximální hodnota je pak 274,84 mlx pro horizontální osvětlenost a 311,34 mlx pro prostorovou osvětlenost – tyto hodnoty odpovídají úplňku dne 15.11. 2024.

Pokud hodnoty zobrazíme v podobě histogramu a rozdělíme je do decilů, budou vypadat následovně:



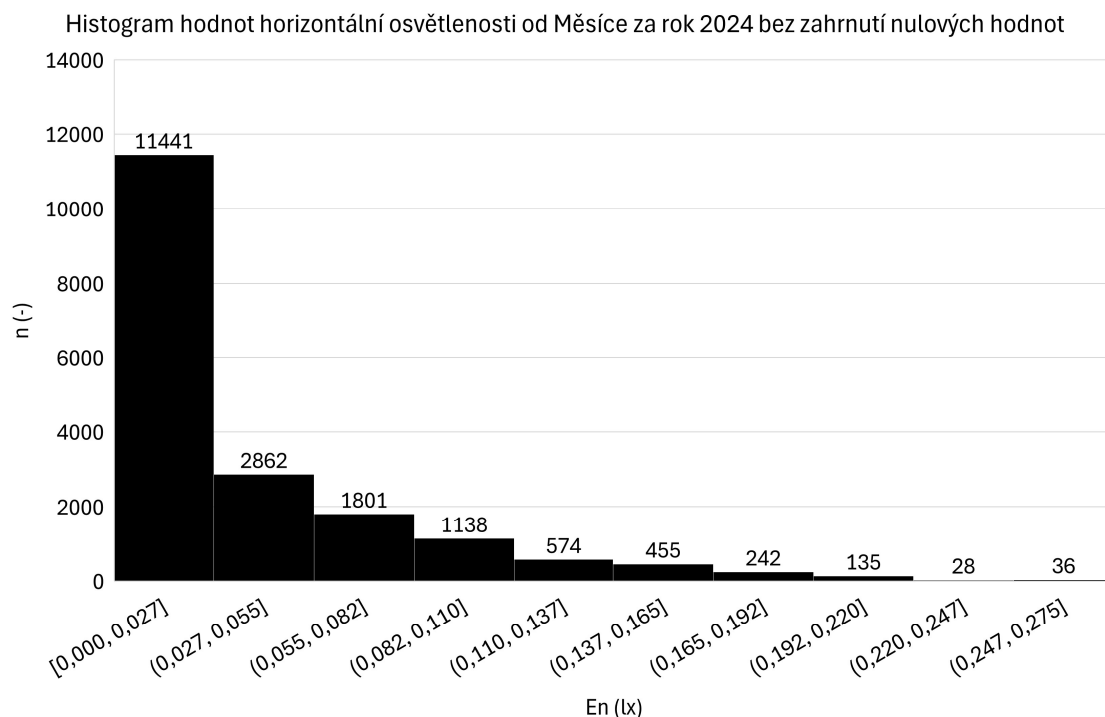
Obrázek 13.2 Histogram hodnot horizontální osvětlenosti od Měsíce za rok 2024



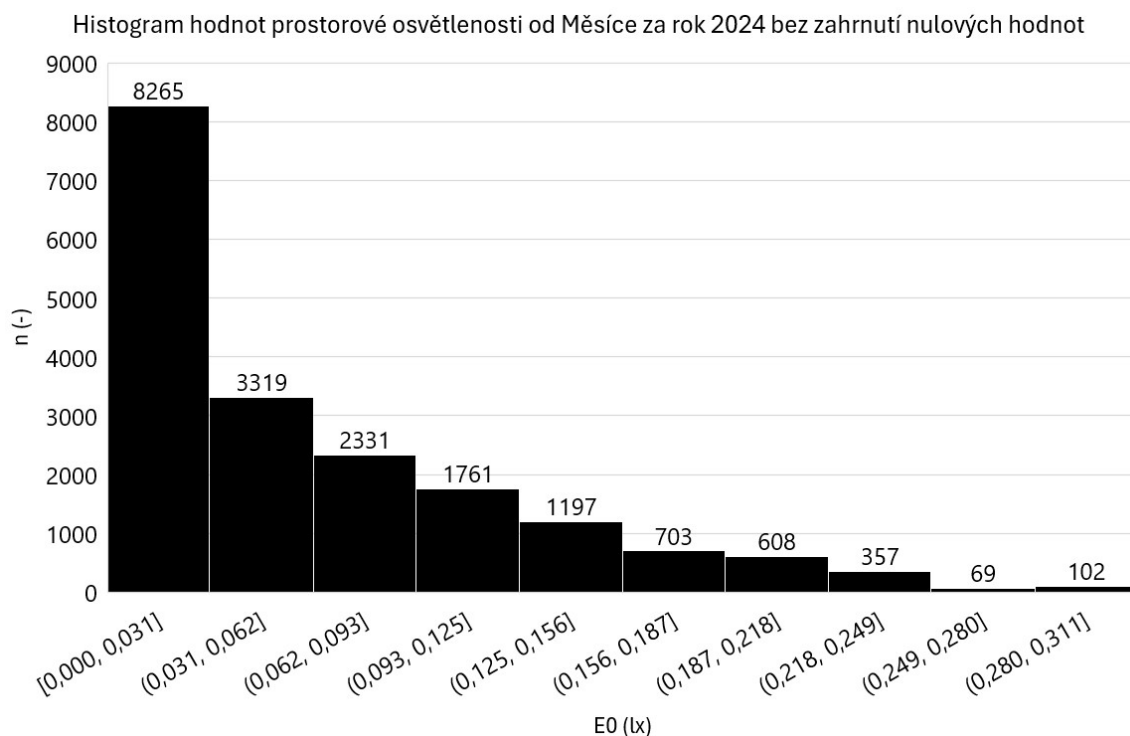
Obrázek 13.3 Histogram hodnot prostorové osvětlenosti od Měsíce za rok 2024

Jak je patrné z Obr 13.2. a 13.3., většina hodnot spadá do prvního decilu - 28 039 hodnot z 38 486, tedy přes 70 %. Analýzu proto provedeme ještě jednou, teď ale vyloučíme i datové body, které odpovídají času, kdy Měsíc není na obloze. Stav, kdy je Měsíc na obloze a zároveň je Slunce alespoň 6° pod horizontem odpovídá 18 712 šestiminutových intervalů, tedy 21,3 % roku a zároveň 48,6 % občanského

soumraku – lze tedy konstatovat, že Měsíc je na obloze v průměru polovinu nočního času. Aritmetický průměr hodnot je v tomto případě 34,71 mlx u horizontální a 61,35 mlx u prostorové osvětlenosti. Medián má pak hodnotu 15,38 mlx pro horizontální osvětlenost a 39,68 mlx pro osvětlenost prostorovou. Histogramy pak vypadají následovně:



Obrázek 13.4 Histogram hodnot horizontální osvětlenosti od Měsíce za rok 2024 s vyloučením nulových hodnot



Obrázek 13.5 Histogram hodnot prostorové osvětlenosti od Měsíce za rok 2024 s vyloučením nulových hodnot

Jako referenční hodnota prostorové osvětlenosti pro hodnocení světelného znečištění byl pak zvolen medián prostorové osvětlenosti ve druhém případě, tedy $E_{0,ref} = 39,68 \text{ mlx}$. Tato hodnota je určena jako referenční pro potřeby navržené metodiky jako úroveň přirozeného světla v nočním prostředí. Jedná se tedy o prostorovou osvětlenost.

Pro zjednodušený model měření je možné použít referenci horizontální osvětlenosti, která byla pro tuto metodiku stanovena na $E_{h,ref} = 15,38 \text{ mlx}$.

Z vypočtených hodnot osvětlenosti vyjdeme pro určení hodnot melanopické ozáření. Obecně pro melanopickou ozáření platí

$$E_{mel} = K_{mel,V} \cdot E, \quad (13.14)$$

kde $K_{mel,V}$ je melanopická světelná účinnost záření (=ELR, více viz kapitola Názvosloví, definice) a E hodnota osvětlenosti. Parametr $K_{mel,V}$ je závislý na spektru zkoumaného světla. Jelikož spektrum světla Měsíce se poměrně výrazně liší s jeho výškou na obloze, melanopická světelná účinnost záření se s ní bude měnit také – a to přibližně v rozsahu od 1 do $1,36 \text{ mW} \cdot \text{lm}^{-1}$. Analýzou simulovaných a naměřených spekter bylo následně zjištěno, že nejlépe tuto hodnotu reprezentuje polynom

$$\begin{aligned} K_{mel,V} = & -7,0115615465 \cdot 10^{-13} \cdot a^6 + 6,6043882732 \cdot 10^{-10} \cdot a^5 - 13,99635069 \cdot 10^{-8} \cdot a^4 \\ & + 13,121315353 \cdot 10^{-6} \cdot a^3 - 66,98354414 \cdot 10^{-5} \cdot a^2 + 20,518953185 \cdot 10^{-3} \\ & \cdot a + 1,0288877054, \end{aligned} \quad (13.15)$$

kde a je opět výška Měsíce nad horizontem, korigovaná o atmosférický lom. Takto byly určeny hodnoty melanopické světelné účinnosti záření pro všechny datové body a hodnoty osvětleností byly následně přepočítány na melanopické ozáření. Tyto hodnoty byly poté analyzovány shodně s postupem, uvedeným výše pro osvětlenosti.

Pro melanopická ozáření byly vypočteny tyto statistické hodnoty mediánů:

$$E_{mel,O,ref} = 50,49 \text{ } \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$E_{mel,h,ref} = 19,36 \text{ } \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Tyto hodnoty budeme v rámci metodiky považovat za prvotní reference.

Pro přehlednost uvedme data referencí do tabulky

Tabulka 2 Referenční hodnoty svitu Měsíce v podmínkách ČR za rok 2024

Reference	Fotopická	Melanopická
Horizontální	15,38 mlx	19,36 $\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Prostorová	39,68 mlx	50,49 $\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

13.4 Shrnutí k referenčním hodnotám

Uvedené návrhy referenčních hodnot jsou klíčovým faktorem pro stanovení standardu přirozeného světla v nočním prostředí. Je zřejmé, že jako referenci nemůžeme brát v žádném případě nulovou hodnotu, tedy absolutní tmu. Jako druhý mezní případ, který je limitující, je svit Měsíce, tedy osvětlenost, jakou toto nebeské těleso vytvoří na daném místě planety. Zde se však dostáváme do problému, jaká hodnota je relevantní? V prvním kroku se nabízí vzít maximální možnou, tedy přímou složku při úplňku, nebo normálovou složku, a to u vodorovné nebo svislé roviny. U svislé roviny bychom dále museli uvažovat její azimutální orientaci. Horizontální osvětlenost naopak potlačuje příspěvky od horizontálně uložených světelných zdrojů. Zatímco u přírodních zdrojů jako je Slunce a Měsíc je

horizontální složka výrazně tlumena atmosférou, tak u umělých zdrojů tomu tak není. Proto není vhodné jako referenci přímo stanovit horizontální osvětlenost, přestože se pro vidění a hodnocení osvětlení ploch velmi často používá.

Jako nejobjektivnější se zde jeví hodnota prostorové osvětlenosti, která eliminuje vliv orientace čidla přijímače světla, což znamená, že v daném bodě nemusíme řešit natočení detektoru, ale uvažujeme souhrnné působení světla ze všech stran. To je výhodné i pro hodnocení umělého světla, které může objektivně působit také ze všech možných směrů a zejména např. pro ptáky hnízdící v korunách stromů anebo pro samotné stromy je irelevantní řešit směr, odkud světlo přichází, ale klíčová bude integrální hodnota - tj. kolik světla do daného místa dopadá – obecně záření, tedy nejen světla. Z toho důvodu je prostorová osvětlenost v prvním kroku optimálním parametrem. Provedené statistické výpočty této hodnoty způsobené dominantním zdrojem, tedy Měsícem, vykazují specifické statistické rozložení. Pro potřeby navrhované metodiky budeme uvažovat s hodnotou mediánu pro danou statistiku, který definuje polovinu hodnot nad a polovinu pod touto hodnotou, tedy 50% pravděpodobnost výskytu dané hodnoty. Podobná úvaha se použila i pro hodnocení rušivého oslnění a lze ji tedy v této fázi navrhnout i zde.

V kapitole 13.2 (Ověření vypočtených hodnot) bylo ukázáno, že výpočty víceméně korespondují s provedeným měřením a zjištěné odchylky lze snadno identifikovat jako vliv okolních podmínek prostředí. Můžeme tedy s vysokou mírou pravděpodobnosti uvažovat, že navržená metoda výpočtu referenční hodnoty je správná a použitelná pro plánovaný účel. Vůči takto stanovené hodnotě reference se pak bude srovnávat konkrétní příspěvek umělého světla v nočním prostředí (ALAN, ALAN skóre). Zde budeme opět vycházet ze zaužívaných poměrových vztahů jako např. pro kontrast a dále využití logaritmické stupnice, která se v mnoha metodách hodnocení vlivu světla na fyziologické i psychologické odezvy u člověka používá. Lze očekávat, že v rostlinné a živočišné říši bude logaritmická odezva velmi podobná. Klíčovým faktorem tak bude pouze nastavení vhodných konstant, která stanoví měřítko finální veličiny. To bude provedeno na základě analýz z měření, která budou takto provedena a podrobena souhrnné statistice. Lze očekávat vícere korekce koeficientů a referencí v budoucnu, které budou vycházet např. ze subjektivního hodnocení respondentů anebo objektivních metod pozorování např. od přírodovědců – určení vlivu záření na konkrétní živočišný nebo rostlinný druh.

14 POPIS METODIKY HODNOCENÍ ALAN SKÓRE

Podstata hodnocení umělého světla v nočním prostředí je založena na změření absolutní hodnoty vybraného indikátoru optického záření v daném místě prostoru a následné srovnání s referenční hodnotou daného indikátoru. Indikátorů může být celá řada. Pro potřeby metodiky byly vybrány tyto klíčové indikátory

- Horizontální osvětlenost (lx)
- Prostorová osvětlenost (lx)
- Horizontální melanopická ozáření ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
- Prostorová melanopická ozáření ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

Smyslem horizontální osvětlenosti je poskytnout nejjednodušší a snadno ověřitelný parametr, který vyžaduje základní přístrojové vybavení – luxmetr s dostatečnou citlivostí v řádech mililuxů (mlx). Tento přístroj zachytí záření v daném bodě, váhuje jej přes spektrální citlivost normálního fotometrického pozorovatele a dále přes funkci kosinus, kde výsledkem je suma příspěvků normálových osvětleností horizontální roviny.

Pokud není k dispozici dostatečně citlivý luxmetr, je možné tento parametr změřit pomocí digitálního jasového analyzátoru a vypočítat podle vztahu

$$E_h = \int_{2\pi} L_v \cdot \cos(\alpha) d\Omega, \quad (14.1)$$

kde Ω je prostorový úhel, L_v je jas a α je úhel od zenitu do daného bodu prostoru.

Počítá se integrál pouze přes horní hemisféru.

Výsledkem je parametr E_h měřený v lx. Tento je výstupem první základní varianty hodnocení, nicméně pouze pro případ, že není možné použít pokročilejší techniku. Parametr výrazně zkresluje data získaná při měření zdrojů světla blízko u horizontu. Dominantní složka tedy bude od svítidel a zdrojů v elevačních úhlech výrazně nad horizontem. Z toho důvodu se doporučuje použít měření druhého typu, a to měření pomocí prostorové osvětlenosti.

U prostorové osvětlenosti je situace podstatně složitější. Změřit celkové působení světla v daném bodě ze všech směrů vyžaduje zachycení záření pomocí speciálního transformačního detektoru, který integruje záření v celém prostoru a převádí jej na výstupní signál pro fotocitlivý element. V rámci metodiky se používá a doporučuje používat druhý přístup, a to využití digitální jasové analýzy pro získání prostorové osvětlenosti podle vztahu

$$E_o = \int_{4\pi} L_v d\Omega, \quad (14.2)$$

kde Ω je prostorový úhel a L_v je jas.

V rámci měření je třeba pořídit dostatečný počet snímků, které se vzájemně překrývají a spojit je do jediného panoramatického snímku, kde získáme prostorové rozložení jasu pro celý prostor obklopující místo měření. Z technických důvodů a omezení současné měřicí techniky je vhodné vyloučit prostor přímo pod měřicím zařízením, protože toto zařízení vytváří parazitní obraz. Na tuto část je vyhrazena v metodice úhlová oblast 150 až 180 stupňů, měřeno od zenitu, popř. -60 až -90 stupňů měřeno od horizontu.

V této oblasti se považuje záření za nulové a nezapočítává se do celkového výsledku. To je třeba zohlednit při výběru měřicích bodů a zařízení postavit do místa, kde je tato zóna co nejtmavší – nepřispívají do ní žádné podstatné zdroje světla.

Parametr E_o lze vypočítat pomocí aplikace LumiDISP, viz. návod k analyzátoru ALANISATOR, popř. v jiném programu, který umožňuje výpočty tohoto typu.

Obdobně se postupuje pro parametry s horizontální melanopickou ozářeností a prostorovou melanopickou ozářeností. I v tomto případě lze použít prototyp přístroje ALANISATOR s melanopickým spektrálním filtrem a příslušnou kalibrací. Přístrojem opět pořídíme několik snímků (doporučují se 4 pomocí objektivu rybí oko) a tyto se spojí pomocí algoritmů v programu do jedné panoramatické scény popisující celý naměřený prostor.

Celková horizontální melanopická ozářenost se vypočítá podle vztahu

$$E_{mel,h} = \int_{2\pi} L_{mel} \cdot \cos(\alpha) d\Omega, \quad (14.3)$$

kde Ω je prostorový úhel, L_{mel} je melanopická zář a α je úhel od zenitu do daného bodu prostoru.

Počítá se integrál přes horní hemisféru.

Celková prostorová melanopická ozářenost se vypočte ze vztahu:

$$E_{mel,O} = \int_{4\pi} L_{mel} d\Omega, \quad (14.4)$$

kde Ω je prostorový úhel a L_{mel} je rozložení melanopická záře.

Jakmile máte tyto indikátory vyjádřené, je možné přistoupit k relativnímu srovnání a hodnocení, tedy posouzení míry umělého světla v nočním prostředí ve srovnání s přirozenou mírou světla v nočním prostředí. Hodnocení je založena na jednoduchém kontrastním vztahu, který dává do poměru umělé a přirozené světlo a logaritmem vyjadřuje řádové srovnání.

14.1 ALAN skóre pro celý prostor

Pro hodnocení míry umělého světla v celém prostoru v daném posuzovaném (měřeném) bodě použijeme vztah

$$AS = 10 \log \frac{E_o}{E_{o,ref}}, \quad (14.5)$$

kde $E_{o,ref}$ je referenční hodnota odvozená od přirozené osvětlenosti Měsíce. Pro potřeby metodiky je reference zvolena jako medián prostorové osvětlenosti přímého měsíčního světla v ročním souhrnu, viz. předchozí kapitola tedy $E_{o,ref} = 39,68 \text{ mlx}$ (0,03968 lx).

Pro hodnocení míry záření s vlivem na cirkadiánní rytmy u člověka je pro tuto metodiku doporučeno použít indikátor AS_{mel}

$$AS_{mel} = 10 \log \frac{E_{mel}}{E_{mel,O,ref}}, \quad (14.6)$$

kde $E_{mel,O,ref}$ je referenční hodnota odvozená od přirozené melanopická ozářenosti od Měsíce. Pro potřeby metodiky je reference zvolena jako medián prostorové melanopická ozářenosti přímého

měsíčního světla v ročním souhrnu, viz. předchozí kapitola tedy $E_{mel,o,ref} = 50,49 \mu W \cdot m^{-2}$ ($50,49 \cdot 10^{-6} W \cdot m^{-2}$).

Podobně lze skóre určit pro poměr horizontálních osvětleností, což bude doplňková hodnota pro zjednodušené hodnocení, které bude dále korelovatelné s měřeními satelitními – odražená složka

$$ASH = 10 \log \frac{E_h}{E_{h,ref}} \quad (14.7)$$

a

$$ASH_{mel} = 10 \log \frac{E_{mel,h}}{E_{mel,h,ref}} . \quad (14.8)$$

Referenční hodnoty pro tyto vztahy jsou (viz. Tabulka 2):

$E_{h,ref} = 15,38 \text{ mlx}$ ($0,01538 \text{ lx}$) a $E_{mel,h,ref} = 19,36 \mu W \cdot m^{-2}$ ($19,36 \cdot 10^{-6} W \cdot m^{-2}$).

14.2 Skóre pro jednotlivé objekty

V rámci identifikace příspěvku jednotlivých svítících objektů je možné vypočítat skóre pro jednotlivé ohraničené objekty, jejichž jas nebo zář je výrazná oproti pozadí, popř. svou plochou vytvářejí významný objekt. Takto je možné identifikovat jednotlivé příspěvky a zhodnotit jejich význam v rámci celku. Pro jednotlivé objekty se určí příslušný příspěvek k horizontální a prostorové osvětlenosti, resp. melanopická ozáření. Např. pro příspěvek prostorové osvětlenosti od i-tého objektu se určí hodnota ze

$$E_{O,i} = \int_{\omega_i} L_V d\Omega , \quad (14.9)$$

kde Ω je prostorový úhel a L_V je jas a integrál se počítá pouze v rozsahu prostorového úhlu ω .

ALAN skóre i-tého objektu se určí ze vztahu

$$ASO_i = 10 \log \frac{E_{O,i}}{E_{O,ref}} . \quad (14.10)$$

Souhrnné působení více objektů lze vyjádřit kombinovaným ukazatelem objektů ASO pro celek svítících objektů jako

$$ASO = 10 \log \frac{1}{E_{O,ref}} \sum_{i=1}^n E_{O,i} \quad (14.11)$$

pro všechny identifikované zdroje světelného znečištění.

Obdobně postupujeme pro melanopickou část hodnocení

$$E_{mel,O,i} = \int_{\omega_i} L_{mel} d\Omega , \quad (14.12)$$

$$ASO_{mel,i} = 10 \log \frac{E_{mel,O,i}}{E_{mel,O,ref}} , \quad (14.13)$$

a nakonec

$$ASO_{mel} = 10 \log \frac{1}{E_{mel,O,ref}} \sum_{i=1}^n E_{mel,O,i} . \quad (14.14)$$

Výběr jednotlivých oblastí – svítících ploch, lze provádět ručně přímo v programu LumiDISP a použít základní objektové tvary jako kružnice, obdélník, čtverec anebo polygon. Nebo je možné použít funkci prahování a maskování, tj. vybírat plochy s jasnem (melanopickou zář) větším než nastavená hodnota, např. 1000 cd.m⁻². Citlivost dělení a počty objektů nejsou metodikou stanoveny a tento parametr si určí zadavatel měření podle toho, jak moc detailně chce scénu analyzovat a jaké objekty chce z měření vyloučit a které chce do měření naopak zahrnout. Pomocí této metody lze vyloučit např. vliv jasu oblohy, která má sice obvykle malou hodnotu jasu, ale prostorový úhel je dominantní. Do jasu oblohy přispívají všechny zdroje v dané lokalitě, a to ve značně velkém perimetru i několik kilometrů.

Podobnou metriku lze aplikovat i pro hodnocení příspěvků k horizontální osvětlenosti, resp. horizontální melanopické ozáření.

$$E_{h,i} = \int_{\omega_i} L_V \cdot \cos(\alpha) d\Omega , \quad (14.15)$$

kde Ω je prostorový úhel a L_V je jas, a α je úhel od zenitu do daného bodu prostoru a integrál se počítá pouze v rozsahu prostorového úhlu ω .

ALAN skóre i-tého objektu se určí ze vztahu

$$ASOH_i = 10 \log \frac{E_{h,i}}{E_{h,ref}} . \quad (14.16)$$

Souhrnné působení více objektů lze vyjádřit kombinovaným ukazatelem ASOH pro celek svítících objektů jako

$$ASOH = 10 \log \frac{1}{E_{h,ref}} \sum_{i=1}^n E_{h,i} \quad (14.17)$$

pro všechny identifikované zdroje světelného znečištění.

Obdobně postupujeme pro melanopickou část hodnocení

$$E_{mel,h,i} = \int_{\omega_i} L_{mel} \cdot \cos(\alpha) d\Omega , \quad (14.18)$$

$$ASOH_{mel,i} = 10 \log \frac{E_{mel,h,i}}{E_{mel,h,ref}} , \quad (14.19)$$

a nakonec

$$ASOH_{mel} = 10 \log \frac{1}{E_{mel,h,ref}} \sum_{i=1}^n E_{mel,h,i} . \quad (14.20)$$

14.3 Celkové hodnocení ALAN a celkové skóre

Výsledkem jednotlivých analýz jsou následující indikátory:

Tabulka 3 Přehled jednotlivých indikátorů ALAN skóre

Indikátor	Viditelná část	Melanopická část
Globální ALAN skóre	AS	AS_{mel}
Globální ALAN skóre horizontální	ASH	ASH_{mel}
Kombinované ALAN skóre	CAS	
Objektové ALAN skóre	ASO	ASO_{mel}
Objektové ALAN skóre horizontální	$ASOH$	$ASOH_{mel}$
Objektové kombinované ALAN skóre	$CASO$	

Globální ALAN skóre se použije pro celkové hodnocení situace v daném bodě a objektové ALAN skóre se použije pro klasifikaci jednotlivých zdrojů světla (záření). Z podstaty indikátorů vyplývá, že globální ALAN skóre bude vždy větší než objektové ALAN skóre.

Dále lze aplikovat algoritmus na souhrnné posouzení záření v daném bodě na základě příspěvků jednotlivých indikátorů. K tomu použijeme váhovací koeficienty, kterými zhodnotíme význam jednotlivých parametrů v celku.

Zavádíme kombinovaný indikátor CAS (*Combined ALAN Score*), který popisuje průměrnou váhovanou hodnotu argumentů jednotlivých indikátorů. Nastavíme zároveň váhy k jednotlivým indikátorům, aby bylo v budoucnu možné určit jejich příslušný dopad na živé organizmy.

Pro celý prostor určíme kombinované ALAN skóre vztahem

$$CAS = 10 \log \left(k_{AS} \frac{E_O}{E_{O,ref}} + k_{ASH} \frac{E_h}{E_{h,ref}} + k_{AS_{mel}} \frac{E_{mel,O}}{E_{mel,O,ref}} + k_{ASH_{mel}} \frac{E_{mel,h}}{E_{mel,h,ref}} \right). \quad (14.21)$$

Pro i -tý objekt lze podobně určit kombinované ALAN skóre $CASO_i$

$$CASO_i = 10 \log \left(k_{AS} \frac{E_{O,i}}{E_{O,ref}} + k_{ASH} \frac{E_{h,i}}{E_{h,ref}} + k_{AS_{mel}} \frac{E_{mel,O,i}}{E_{mel,O,ref}} + k_{ASH_{mel}} \frac{E_{mel,h,i}}{E_{mel,h,ref}} \right). \quad (14.22)$$

Pro n objektů lze určit kombinované ALAN skóre $CASO_n$

$$CASO_n = 10 \log \left(\frac{k_{AS}}{E_{O,ref}} \sum_{i=1}^n E_{O,i} + \frac{k_{ASH}}{E_{h,ref}} \sum_{i=1}^n E_{h,i} + \frac{k_{AS_{mel}}}{E_{mel,O,ref}} \sum_{i=1}^n E_{mel,O,i} + \frac{k_{ASH_{mel}}}{E_{mel,h,ref}} \sum_{i=1}^n E_{mel,h,i} \right). \quad (14.23)$$

V případě, že budeme chtít akcentovat vliv melanopické ozáření, budeme zvedat koeficienty $k_{AS_{mel}}$ a $k_{ASH_{mel}}$. Pokud budeme naopak akcentovat vizuální část světla, budeme zvedat koeficienty k_{AS} a k_{ASH} . Obdobně, pokud budeme akcentovat směřování světla shora dolů, budou koeficienty $k_{ASH_{mel}}$ a k_{ASH} větší než koeficienty $k_{AS_{mel}}$ a k_{AS} . Součet koeficientů musí být roven 1. Pro potřeby této metodiky zavádíme koeficienty rovnoměrné a rovné hodnotě 0,25, čímž budeme všechny příspěvky považovat za rovnocenné.

Pro tento případ definujeme souhrnný kombinovaný indikátor míry umělého světla v nočním prostředí CAS_{2024} s referencí mediánu svitu Měsíce za rok 2024 v podmínkách České republiky jako

$$CAS_{2024} = 10 \log(0,25 \cdot 10^{0,1AS} + 0,25 \cdot 10^{0,1ASH} + 0,25 \cdot 10^{0,1AS_{mel}} + 0,25 \cdot 10^{0,1ASH_{mel}}), \quad (14.24)$$

nebo výpočtem z jednotlivých osvětleností a ozářeností

$$CAS_{2024} = 10\log\left(0,25 \frac{E_o}{E_{o,ref}} + 0,25 \frac{E_h}{E_{h,ref}} + 0,25 \frac{E_{mel,o}}{E_{mel,o,ref}} + 0,25 \frac{E_{mel,h}}{E_{mel,h,ref}}\right). \quad (14.25)$$

Pro jednotlivé objekty pak

$$CASO_{2024,i} = 10\log\left(0,25 \frac{E_{o,i}}{E_{o,ref}} + 0,25 \frac{E_{h,i}}{E_{h,ref}} + 0,25 \frac{E_{mel,o,i}}{E_{mel,o,ref}} + 0,25 \frac{E_{mel,h,i}}{E_{mel,h,ref}}\right), \quad (14.26)$$

$$CASO_{2024,n} = 10\log\left(\frac{0,25}{E_{o,ref}} \sum_{i=1}^n E_{o,i} + \frac{0,25}{E_{h,ref}} \sum_{i=1}^n E_{h,i} + \frac{0,25}{E_{mel,o,ref}} \sum_{i=1}^n E_{mel,o,i} + \frac{0,25}{E_{mel,h,ref}} \sum_{i=1}^n E_{mel,h,i}\right). \quad (14.27)$$

15 PŘÍPRAVA NA MĚŘENÍ

Před zahájením vlastního měření je třeba provést přípravu měřicí aparatury a propojení všech funkčních celků do sestavy. Jakmile je prověřena funkčnost sestavy, je možné zahájit vlastní měření.

15.1 Instalace stativu a panoramatické hlavy

- S ohledem na omezení fyzikálních vlastností prototypu je třeba vybrat takové místo, kde bude pokud možno nízká hodnota jasu povrchu pod vlastním měřicím přístrojem – zem, chodník, cesta.
- Neumísťujeme analyzátor na svítící povrchy typu zemní svítidlo, svítící prosvětlená podlaha nebo reflexní plocha nasvícená jiným svítidlem shora.
- Identifikace GPS polohy se provádí dostupnými měřicími prostředky a koriguje se pomocí mapových podkladů s dostatečně přesným zaměřením, aby bylo dohledatelné přesné místo měření. V případě nejasností s polohou je vhodné změřit přímé vzdálenosti k překážkám, které jsou v mapových podkladech již zaneseny – hrany ulic, rohy domů apod.
- Založení stativu na co nejrovnější a pokud možnost tvrdý povrch; Stativ musí být ve vodorovné poloze.
- Ustanovení vodorovné polohy, je třeba zkontrolovat pomocí vodováhy, sklonoměru
- Montáž panoramatické hlavy, ověření vodorovné polohy je vhodné provést i na referenční ploše rotační hlavy
- Identifikace světových stran, orientace na sever – pomocí referenčních bodů v mapových podkladech anebo pomocí buzoly, kompasu. Pozor na kovové předměty v okolí magnetických indikátorů.

15.2 Instalace jasového/melanopického analyzátoru

- Analyzátor se umísťuje na stativ a rotační hlavu, viz. bod výše.
- Analyzátor má pevně nastavený úhel sklonu, zde 15° směrem nad horizont.
- Analyzátor je opatřen objektivem typu rybí oko – optika 180°.
- Analyzátor je opatřen filtrem pro fotopické a melanopická měření. V omezeném rozsahu lze využít pouze fotopický rozsah a skóre vyjádřit pouze pro viditelné světlo. Toto je třeba uvést jako omezující výsledek měření.

15.3 Instalace meteostanice

- Pro kontrolu a záznam podmínek měření je vhodné a doporučeno použití místní meteostanice. Meteostanice by však neměla clonit vlastního měření a je možné ji umístit i ve větší vzdálenosti od místa měření (do 50 metrů).
- Stanici je nutno umístit v souladu s předpisem výrobce, a to zejména s ohledem na principy měření směru a rychlosti větru – zajištění vodorovné polohy, orientace v terénu, lokace nadmořské výšky.

Příprava měřicích přístrojů

- Před měřením je nutné použité přístroje teplotně stabilizovat, a to z důvodu jejich teplotní závislosti. Pokud by měření probíhalo mimo teplotu definovanou výrobcem, je nutné u naměřených hodnot provést korekci na teplotu.
- Před měřením je doporučeno zkontrolovat stav baterií a použít, pokud možno, vždy plně nabitě baterie, aby nedošlo k přerušování měření během delších sekvencí snímání.

16 POSTUP MĚŘENÍ

Vlastní měření lze rozdělit na dvě části. Hlavní měření týkající se světelných veličin (zářivých veličin) a na doplňková měření okolních podmínek.

16.1 Hlavní měření

- Měření umělého světla v nočním prostředí probíhá v době astronomické noci, tj. s úplným vyloučením světla denního od Slunce. Jelikož by bylo velmi náročné vyloučit i vliv svitu Měsíce, nevyžaduje měření dle této metodiky pouze bezměsíčné noci a je možné měření provést i v době s Měsícem. Nedoporučuje se však provádět měření během úplňku a v rozsahu 3 dny před a 3 dny po úplňku. V případě, že toto není možné, bude nutné vliv svitu Měsíce eliminovat v algoritmech zpracování fotometrické plochy jas vyloučením oblastí s podstatným příspěvkem Měsíce – zejména měsíční kotouč.
- Je třeba zajistit, aby v dané lokalitě byly eliminovány změny výkonu umělých zdrojů světla během jedné kompletní měřicí sekvence, která může trvat i několik minut, či desítek minut.
- Pokud se toto nedá zajistit, je třeba během měření zaznamenávat viditelné změny v osvětlené scéně a popř. tuto skutečnost uvést jako skutečnost vyskytující se při měření.
- Pokud soustava pracuje v různých provozních režimech (např. normální a adaptivní osvětlení) provádí se měření vlastností v domluvených provozních režimech.
- Zaznamenají se podmínky měření, viz. doplňková měření
- Postup měření s přístrojem ALANISATOR je popsán v dokumentaci prototypu. Vzhledem k tomu, že metodika je vytvořena obecně, nebudeme zde tento postup recipročně uvádět.

16.2 Doplňkové měření

Měření teploty, tlaku, vlhkosti, směru a rychlosti větru

Měření parametrů okolního prostředí se doporučuje provést minimálně na začátku a konci měření. V lepším případě s možností průběžného záznamu, toto měření zaznamenávat průběžně do paměti použité meteostanice. Teplota okolí může ovlivňovat nejen velikost světelného toku vyzařovaného posuzovanými zdroji umělého záření, ale také přesnost měření přístrojů.

Měření spektrálního složení, teploty chromatičnosti

Za doplňkové měření lze považovat i měření spektrálního složení světla vyznaných objektů ve scéně. Získání relativních průběhů spektrálního průběhu výkonu je užitečné zejména pro podrobnější vyhodnocení jednotlivých objektů u hodnocení příspěvků do ALAN skóre objektů. Spektrum lze změřit v dostatečně blízké vzdálenosti, aby přístroj nebyl ovlivňován jinými zdroji světla. Pro měření se použije dostatečně citlivý spektrometr. Ze změřeného SPD lze vypočítat další parametry – teplotu chromatičnosti pro ověření dodržování normy ČSN 36 0459 anebo parametr U500, který je doporučován jako indikátor významně škodlivé části spektra (např. legislativa Chile - [50]).

17 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Každý měření je zatíženo nejistotou měření, které definuje interval, ve kterém leží skutečná hodnota, s určitou pravděpodobností. Nejistoty měření mohou být vyčísleny pro měřicí přístroje, tak pro jednotlivé výpočty, kde vstupní data mohou být zatíženy rozdílnou nejistotou měření.

17.1 Měření pomocí jasové kamery

Jasové kamery postavené na digitálních bezzrcadlových fotoaparátech jsou pro svou praktičnost nejvíce vhodné pro venkovní měření. Jsou schopny rychlého a spolehlivého měření a osvědčily se jako cenný přístroj pro měření indexu oslnění a rozložení jasu silnic, jasu svítidel a noční oblohy.

17.1.1 Nejistoty měření jasové kamery

Kalibrace těchto zařízení je však obtížnější než u běžného jasoměru, a proto je nutné vyhodnotit nejistoty měření pro porovnání s běžnými jasoměry a jasovými kamerami. Rozšířená nejistota měření závisí také na nastavení fotoaparátu, např. na f-čísle, rychlosti závěrky nebo parametru ISO. Nejistoty měření jsou podrobně popsány v návodu na vyčíslení nejistot měřením GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement), který vytvořil Mezinárodní úřad pro míry a váhy [51].

Příklad rozpočtu nejistot pro objektiv FishEye při nastavení ohniskové vzdálenosti 8 mm je v následující tabulce č.4. Rozšířené nejistoty jsou uvedeny pro rozpětí clonových čísel a pozici ve snímku. Popis jednotlivých chyb měření lze nalézt v CIE dokumentech CIE 198:2011, CIE 231:2019 a CIE 244:2021 [52], [53], [54].

Tabulka 4 Rozpočet nejistot měření jasu jasové kamery s FishEye objektivem

Typ nejistoty	f/3,5 - f/4,5		f/5,6 - f/16		f/18 - f/22	
	Střed	Okraj	Střed	Okraj	Střed	Okraj
Referenčního jasoměr ⁽¹⁾	2,3%		2,3%		2,3%	
Opakovatelnost clony	2,0%		2,3%		4,7%	
Opakovatelnost časové závěrky	0,3%		0,3%		0,3%	
Spektrální chyba ⁽²⁾	0,6%	1,2%	0,6%	1,2%	0,6%	1,2%
Korekce vinětače objektivu	0,1%	6,4%	0,1%	5,3%	0,1%	4,5%
Korekce clonového čísla	0,6%		0,7%		1,5%	
Korekce časové závěrky	0,3%		0,3%		0,3%	
Linearita snímače	0,2%		0,2%		0,2%	
Okolní podmínky ⁽³⁾	0,5%		0,5%		0,5%	
Korekce ISO ⁽⁴⁾	0,2%		0,2%		0,2%	
Kombinovaná nejistota	3,2%	7,2%	3,4%	6,4%	5,5%	7,2%
Rozšířená nejistota (k=2)	6,5%	14,5%	6,8%	12,8%	11,0%	14,4%

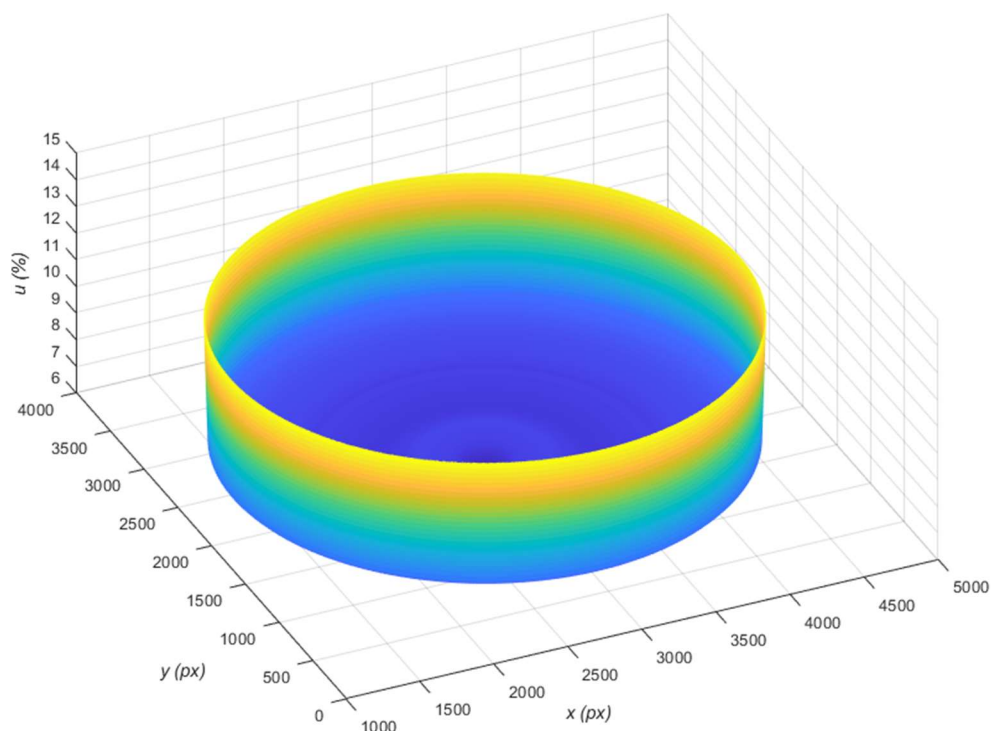
(1) Referenční jasoměr má platnou kalibraci s návazností na NIST do 5. 10. 2023.

(2) Nejistota spektrální chyby pro měření kompaktní zářivky s náhradní teplotou chromatičnosti 2700 K.

(3) Pro rozmezí okolní teploty 20-30 °C.

(4) Pro parametr ISO do hodnoty 10 000.

V následujícím obrázku č. 17.1 je znázorněno prostorové rozložení rozšířené nejistoty měření jasu pro jasovou kameru s objektivem typu FishEye s ohniskovou vzdáleností 8 mm.



Obrázek 17.1 Prostorové zobrazení rozšířené nejistoty s objektivem typu FishEye (8 mm)

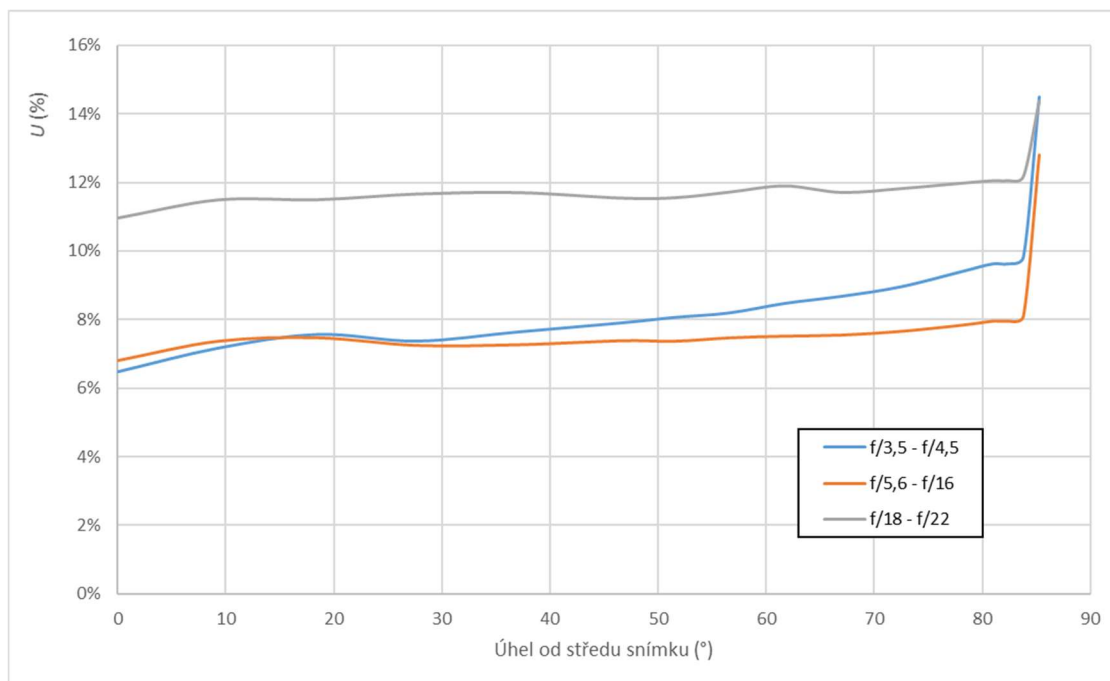
V případě měření melanopické záře je rozšířená nejistota rozdílná z důvodu vyšší nejistoty referenčního spektrometru pro měření melanopických veličin a vyšší nejistoty spektrální chyby způsobené nedokonalým spektrálním přizpůsobením na křivku s_{mel} . Ostatní nejistoty jsou stejné jako v rozpočtu nejistot pro měření jasu. Rozpočet nejistoty měření melanopické záře je v následující tabulce č.5.

Tabulka 5 Rozšířené nejistoty měření jasu melanopické záře pro jasovou kameru s objektivem typu FishEye (8 mm)

Typ nejistoty	f/3,5 - f/4,5		f/5,5 - f/16		f/18 - f/22	
	Střed	Okraj	Střed	Okraj	Střed	Okraj
Referenčního spektrometru ⁽¹⁾	2.8%		2.8%		2.8%	
Opakovatelnost clony	2.0%		2.3%		4.7%	
Opakovatelnost časové závěrky	0.3%		0.3%		0.3%	
Spektrální chyba ⁽²⁾	0.7%	1.4%	0.6%	1.2%	0.7%	1.4%
Korekce vinětace objektivu	0.1%	6.4%	0.1%	5.3%	0.1%	4.5%
Korekce clonového čísla	0.6%		0.7%		1.5%	
Korekce časové závěrky	0.3%		0.3%		0.3%	
Linearita snímače	0.2%		0.2%		0.2%	
Okolní podmínky ⁽³⁾	0.5%		0.5%		0.5%	
Korekce ISO ⁽⁴⁾	0.2%		0.2%		0.2%	
Kombinovaná nejistota	3.6%	7.5%	3.8%	6.6%	5.7%	7.4%
Rozšířená nejistota (k=2)	7.2%	14.9%	7.5%	13.2%	11.4%	14.8%

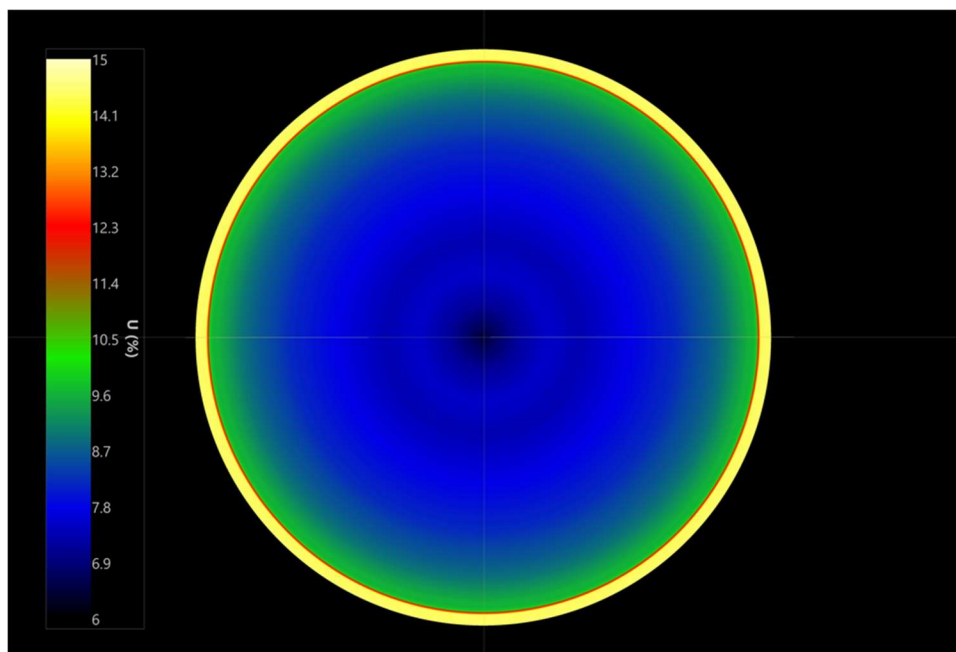
17.1.2 Nejistoty skládaného snímku

Za účelem pořízení dynamického a panoramatického snímku je nezbytné danou scénou nafotit s různými hodnotami expozice (různým časem nebo clonovým čísle) a ve více směrech pro pokrytí celého prostoru. Skládání snímků s různou expozicí je umožněno funkcí HDR (High Dynamic Range), kde algoritmus upřednostňuje hodnoty jasů ze snímku s nejlepším vybuzením. Rozšířená nejistota měření jasů je funkcí pozice ve snímku a nastavených parametrů. V obrázku 17.2 je zobrazeno rozložení nejistoty měření jasů v závislosti na úhlu od středu snímku (normály objektivu).



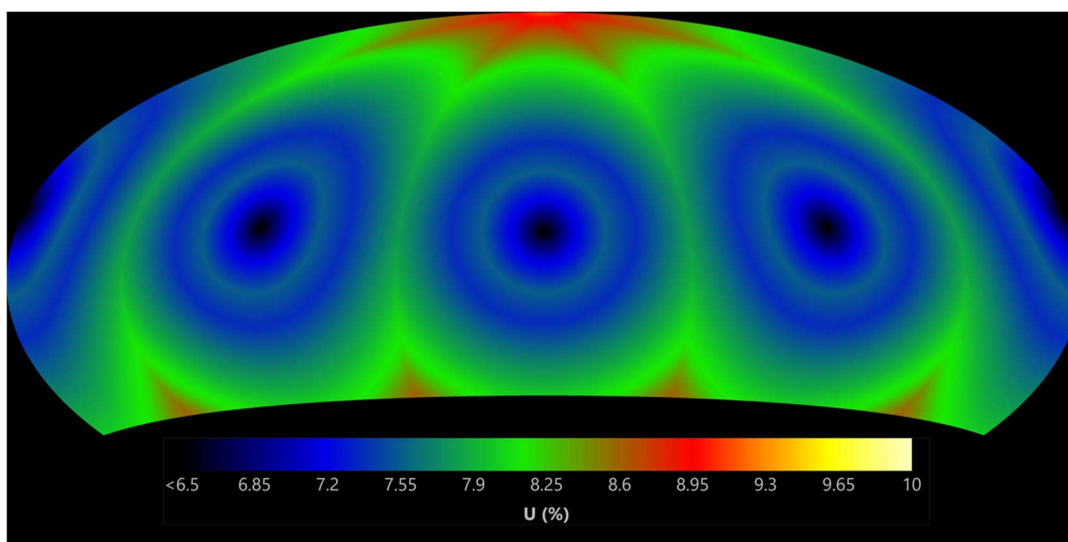
Obrázek 17.2 Rozložení rozšířené nejistoty měření jasů pro FishEye objektiv

Výsledný HDR snímek má tedy pro daný pixel nejistotu převzatou z nejistoty původního snímku. Pokud je HDR sekvence vytvořena tak, že je expozice řízená pouze časem, tak je nejistota dílčích snímků a výsledného HDR snímku stejná. Nejistotu HDR snímku mohou ovlivnit i chyby měření způsobené odrazy v objektivu. Tyto optické chyby se projevují zejména ve tmavých oblastech HDR snímku. Kvalitní objektivy mají ale tuto chybu zanedbatelnou s porovnáním s ostatními nejistotami celého měřicího systému. Objektiv typu FishEye zorné pole celého poloprostoru (180°). Rozšířená nejistota měření je pro jednotlivé nastavení fotoaparátu vyobrazena v obrázku 17.3. Zde je vidět rychle narůstající se nejistota měření na okrajích celého snímku.



Obrázek 17.3 Rozložení nejistoty měření jasu v 2D zobrazení

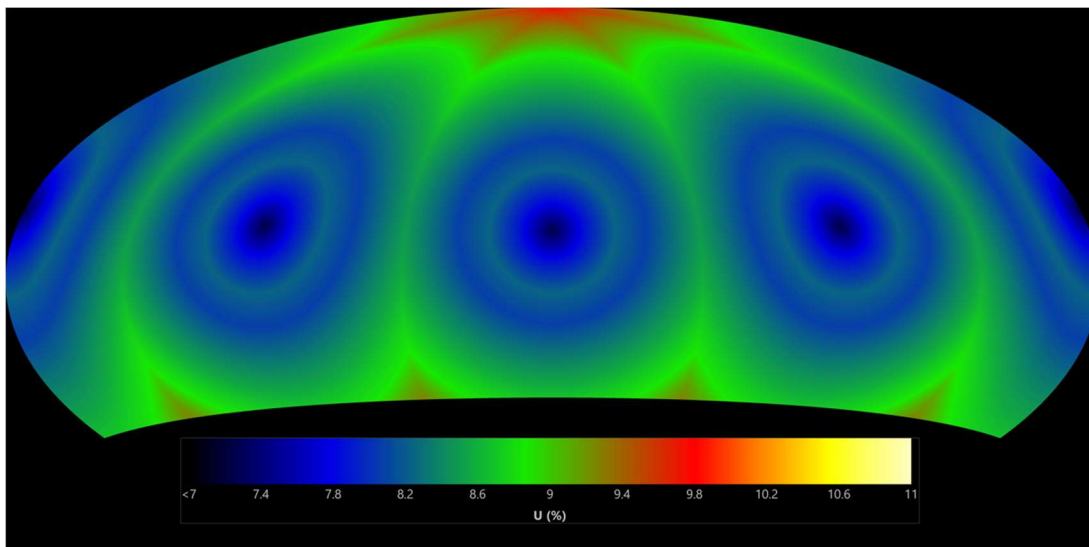
Pro měření celého prostoru je vhodné pořídít 4 snímky na každou světovou stranu a výsledný panoramatický snímek skládat ze zorného pole 90° (45° od středu snímku). Na této úrovni jsou nejistoty nižší než na okrajích snímků, kde nejistota prudce roste z důvodu velkého útlumu vinětače objektivu. Pro snížení nejistoty v zenitu je jasový analyzátor nakloněn o 15° a hodnotu nejistoty v zenitu lze odečíst pro úhel 75° pro různé rozpětí clonových čísel z průběhu v obrázku 17.2. Při rozpětí clonových čísel $f/5,6 - f/16$ je tato nejistota menší než 9 %. U složeného panoramatického snímku je nejistota převzata z původních snímků a jejího rozložení. Rozložení nejistoty měření složeného panoramatického snímku v zobrazení Hammer-Aitoff je zobrazeno v obrázku 17.4. Zde jsou patrné pozice středů původních snímků a zvyšující se nejistoty směrem k okrajům snímků.



Obrázek 17.4 Rozložení nejistoty měření jasu v panoramatickém snímku

Obdobným způsobem se vyčíslí i nejistota měření melanomické záře. Standardní nejistoty, které jsou rozdílné při výpočtu, jsou nejistota referenčního měřicího přístroje a nejistota spektrální chyby. Spektrální chyby dosahují často malých hodnot díky dobrému spektrálnímu

přizpůsobení na křivku S_{mel} . Výsledné rozložení nejistoty měření melanopické záře pro panoramatický snímek je vyobrazen v obrázku 17.5.



Obrázek 17.5 Rozložení nejistoty měření melanopické záře v panoramatickém snímku

Pokud výrobce jasové kamery neuvádí rozložení rozšířené nejistoty měření ve snímku, tak se uvažuje uvedená nejistota pro všechny body snímku jako konstantní. Tento způsob ale navýší hodnoty nejistot zejména ve středech jednotlivých snímků. Většina výrobců bohužel často neuvádí podrobný výčet nejistot měření a jejich rozložení ve snímku.

17.1.3 Nejistoty vypočtených hodnot

Z panoramatického snímku se známými hodnotami jasů a prostorového úhlu pro každý pixel lze vypočítat prostorovou i horizontální osvětlenost. Prostorová osvětlenost je definována vztahem

$$E_O = \int_{4\pi} L_V d\Omega , \quad (17.1)$$

kde L_V je jas a $d\Omega$ je element prostorového úhlu. Rozložení nejistoty měření jasů je známé a hodnota elementu prostorového úhlu je konstantní pro Hammer-Aitoffovo zobrazení. Nejistota elementu prostorového úhlu je zanedbatelná s porovnáním s nejistotou měření jasů. Horizontální osvětlenost lze vypočítat následujícím vztahem

$$E_h = \int_{4\pi} L_V \cos(\alpha) d\Omega , \quad (17.2)$$

kde α je úhel odklonu od vektoru směřující od středu snímku do zenitu. Z toho vyplývá, že hodnoty jasů pod horizontem snímku nepřispívají do hodnoty horizontální osvětlenosti. U prostorové osvětlenosti přispívají i jasy pod úrovní horizontu, kde často bývá v zorném poli stativ a polohovací systém. Obecně se ale v dolní části panoramatického snímku nevyskytují svítidla, která svojí složkou tvoří dominantní část prostorové a horizontální osvětlenosti.

Výpočet nejistoty odvozených veličin se stanovuje jako vážený průměr nejistoty podle váhy – jasů. Nejistota měření prostorové osvětlenosti se vypočítá vztahem

$$U_{E_O} = \frac{\int_{4\pi} L_V u d\Omega}{\int_{4\pi} L_V d\Omega} . \quad (17.3)$$

Při výpočtech mají snímky dané rozlišení a průběhy L_V a u nejsou spojité. Samotný výpočet probíhá pomocí numerické integrace, kde proměnné mají diskrétní hodnoty, a integrály lze nahradit sumy podle následujícího vztahu

$$U_{Eo} = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n L_{Vxy} u_{xy} \Delta\Omega}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n L_{Vxy} \Delta\Omega}, \quad (17.4)$$

kde x a y značí pozici pixelu v daném snímku. Symboly m a n značí rozlišení snímku. Analogicky lze vypočítat hodnotu nejistoty měření horizontální osvětlenosti pomocí následujícího vztahu

$$U_{Eh} = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n L_{Vxy} \cos(\alpha_{xy}) u_{xy} \Delta\Omega}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n L_{Vxy} \Delta\Omega}. \quad (17.5)$$

Nejistotu lze vyjádřit pro celý snímek tak určitou oblast, kdy numerická integrace probíhá uvnitř vymezené oblasti či objektu.

17.1.4 Nejistoty AS a CAS

ALAN skóre AS se vypočítá jako funkce logaritmu poměru prostorové či horizontální osvětlenosti/melanopické ozáření vůči referenční hodnotě. Pro výpočet nejistoty je zapotřebí nejdříve určit citlivostní koeficient, který popisuje změnu jedné veličiny na základě změny druhé veličiny. Tento koeficient může být absolutní nebo relativní. Absolutní citlivostní koeficient vyjadřuje míru změny hodnoty AS na základě změny vstupní veličiny E . Výpočet lze provést následujícím vztahem

$$c_{AS} = \frac{\delta AS}{\delta E} = \frac{\delta 10 \log\left(\frac{E}{E_{ref}}\right)}{\delta E} = \frac{10}{\ln(10) E}. \quad (17.6)$$

Citlivostní koeficient pro relativní změnu osvětlenosti lze vypočítat analogicky následujícím vztahem

$$c_{ASrel} = \frac{\delta AS}{\frac{\delta E}{E}} = \frac{\delta 10 \log\left(\frac{E}{E_{ref}}\right)}{\frac{\delta E}{E}} = \frac{10}{\ln(10) E} = \frac{10}{\ln(10)} = 4,3429. \quad (17.7)$$

Tento citlivostní koeficient znamená, že změna v osvětlenosti o 10 % vyvolá změnu 0,43 v hodnotě vypočteného AS. Nejistota měření veličiny AS je následně vypočítána vztahem

$$U_{AS} = c_{AS} U_E. \quad (17.8)$$

Analogicky lze vztah upravit pro výpočet nejistoty parametru AS pomocí vztahu

$$U_{AS} = \frac{c_{ASrel} u_{E\%}}{100} \% . \quad (17.9)$$

Pro stanovení nejistoty parametru CAS lze postupovat více metodami. Analytická metoda stanovuje citlivostní koeficienty jako parciální derivace vztahu pro výpočet CAS z jednotlivých AS parametrů. Dále se nejistota vypočítá Gaussovým vztahem pro kombinovanou nejistotu podle GUM. V numerické metodě lze využít metody Monte Carlo, kde je provedena simulace s velkým množstvím opakování (řádově miliony), kdy se na začátku kola vygenerují hodnoty jednotlivých AS podle normálové rozložení a jejich dílčí vypočítané nejistoty jako směrodatné odchylky od střední hodnoty. Nevýhodou této metody je nutnost matematického softwaru a nutnost provést simulaci pro každé měření či vzorové situace. Nejistotu měření CAS lze také vypočítat jako vážený průměr z nejistot měření AS podle následujícího vztahu

$$U_{CAS} = \frac{U_{AS}k_1 \frac{E_O}{E_{O,ref}} + U_{ASH}k_2 \frac{E_h}{E_{h,ref}} + U_{ASmel}k_3 \frac{E_{mel,O}}{E_{mel,O,ref}} + U_{ASHmel}k_4 \frac{E_{mel,h}}{E_{mel,h,ref}}}{k_1 \frac{E_O}{E_{O,ref}} + k_2 \frac{E_h}{E_{h,ref}} + k_3 \frac{E_{mel,O}}{E_{mel,O,ref}} + k_4 \frac{E_{mel,h}}{E_{mel,h,ref}}}. \quad (17.10)$$

Tento vztah lze využít pro výpočet nejistoty měření $U_{CAS2024}$ dosazením hodnoty 0,25 do všech konstant k_1 až k_4 . Nejistoty měření lze vyčíslit i pro jednotlivé objekty ve snímku. Postup je totožný jako při určení nejistoty měření pro celý snímek. Pro výpočet lze využít následující vztah

$$U_{CASO_i} = \frac{U_{AS,i}k_{1,i} \frac{E_{O,i}}{E_{O,ref}} + U_{ASH,i}k_{2,i} \frac{E_{h,i}}{E_{h,ref}} + U_{ASmel,i}k_{3,i} \frac{E_{mel,O,i}}{E_{mel,O,ref}} + U_{ASHmel,i}k_{4,i} \frac{E_{mel,h,i}}{E_{mel,h,ref}}}{k_{1,i} \frac{E_{O,i}}{E_{O,ref}} + k_{2,i} \frac{E_{h,i}}{E_{h,ref}} + k_{3,i} \frac{E_{mel,O,i}}{E_{mel,O,ref}} + k_{4,i} \frac{E_{mel,h,i}}{E_{mel,h,ref}}}. \quad (17.11)$$

Nejistota měření příspěvků od několika n objektů lze vypočítat jako vážený průměr podle následujícího vztahu

$$U_{CASO_n} = \frac{\sum_{i=1}^n U_{CASO_i} 10^{0,1CASO_i}}{\sum_{i=1}^n 10^{0,1CASO_i}}. \quad (17.12)$$

17.1.5 Zhodnocení nejistot měření jasové kamery

Jasová kamera založená na digitálním fotoaparátu má pro svou praktičnost mnoho výhod pro venkovní měření. Proces kalibrace a výpočet nejistoty měření je však náročnější. Rozšířenou nejistotu měření jasu nelze prezentovat jednou hodnotou, ale mapou nejistoty nebo 3D grafem. Nejmenší nejistota je obecně uprostřed obrazu a směrem k rohům symetricky roste. 3D tvar rozšířeného tvaru nejistoty závisí především na clonovém čísle a použitém objektivu. Mnohé nejistoty jsou prostorově korelované a mají stejný dopad na nejistotu měření v každém pixelu. Pro názornější přehled lze nejistotu měření vyčíslit tabulkově pro doporučené nastavení fotoaparátu a pro několik pozic v obraze. Rozšířená nejistota pro měření melanopické záře nabývá nepatrně vyšších hodnot. Při skládání snímků je převedena nejistota z původních snímků a je nadále využita ve výpočtu prostorové osvětlenosti, horizontální osvětlenosti, melanopické prostorové ozáření a melanopické horizontální ozáření. Z těchto parametrů jsou vypočítány nejistoty měření ALAN skóre AS pomocí citlivostních koeficientů. Z nejistot měření jednotlivých hodnot AS se vypočítá nejistota kombinovaného parametru CAS pro celý snímek nebo pro vybrané objekty.

17.2 Měření pomocí luxmetru

Luxmetr je fotometrický přístroj pro měření horizontální osvětlenosti. Z naměřené hodnoty horizontální osvětlenosti je možné vypočítat pouze dílčí ALAN skóre ASH. U jasové kamery se nejistota měření horizontální osvětlenosti počítá z nejistoty měření jasu a elementu prostorového úhlu. U luxmetru lze převzít nejistotu měření z kalibračního protokolu. Pokud nejistota není uvedena v kalibračním listě či v dokumentaci přístroje, lze nejistotu měření převzít podle třídy přesnosti luxmetru. Luxmetr třídy L má nejistotu měření menší než 2 %. Luxmetr třídy A má nejistotu menší než 3 % a luxmetr třídy B menší než 5 %.

Pro přesnější stanovení nejistoty měření lze využít technického dokumentu CIE 231:2019 [53], kde jsou popsány jednotlivé chyby těchto fotometrů. Mezi nejčastější nejistoty luxmetrů patří nejistota kalibrace, nejistota spektrální, nejistota linearity, nejistota směrová a nejistota okolní teploty. Příklad rozpočtu nejistot luxmetr je v následující tabulce č.6.

Tabulka 6 Příklad rozpočtu nejistot luxmetru třídy L

Název nejistoty	Hodnota nejistoty (%)
Světelný normál	0.3
Opakovatelnost kalibrace	0.2
Kalibrace na světlo typu A	0.7
Spektrální chyba	0.1
Okolní teplota	0.3
Nelinearita luxmetru	0.1
Chyba kosinusového přizpůsobení	0.3
Opakovatelnost měření	0.2
Kombinovaná nejistota	0.9
Rozšířená nejistota ($k=2$)	1.8

Nejistotu spektrální chyby je závislá na spektru měřeného zdroje. Při známe spektrální citlivosti luxmetru a spektra světelného zdroje je možné provést korekci naměřených zdrojů. U plno-spektrálních světelných zdrojů a luxmetrů třídy L lze tyto nejistoty zanedbat. Nejistoty chyby kosinusového přizpůsobení jsou závislé na měřeném prostředí a rozmístění světelných zdrojů. Kosinusová charakteristika má nejčastěji nejvyšší odchylky od ideální charakteristiky na konci charakteristiky (90°). Pokud bude měřená scéna obsahovat hlavně dominantní světelné zdroje v úrovni horizontu, tak lze očekávat značnou chybu kosinusového přizpůsobení.

Při známe nejistotě měření horizontální osvětlení lze vyčíslit nejistotu měření ALAN skóre ASH tímto vztahem

$$U_{ASH} = c_{AS} U_{EH} , \quad (17.13)$$

$$u_{ASH\%} = c_{ASrel} U_{Erel} \cdot 100 \% , \quad (17.14)$$

kde citlivostní koeficient je roven $c_{ASrel} = 4,3429$.

Pro měření prostorové osvětlenosti je zapotřebí luxmetr s kulovou fotometrickou hlavicí. Naměřenou kulovou osvětlenost lze přepočítat na prostorovou osvětlenost následujícím vztahem

$$E_O = 4E_{4\pi} . \quad (17.15)$$

Citlivostní koeficient pro výpočet absolutní nejistoty nepřímého měření prostorové osvětlenosti lze vypočítat následujícím vztahem.

$$c_{E_{4\pi}} = \frac{\delta E_O}{\delta E_{4\pi}} = \frac{\delta}{\delta E_{4\pi}} 4E_{4\pi} = 4 . \quad (17.16)$$

Přesná hodnota nejistoty se stanoví následujícím vztahem

$$U_{E_O} = c_{E_{4\pi}} U_{4\pi} = 4U_{4\pi} . \quad (17.17)$$

V případě relativních nejistot je citlivostní koeficient v případě lineární závislosti vždy roven 1 a nejistotu lze vypočítat následujícím vztahem

$$u_{E_O} = c_{E_{4\pi}} u_{4\pi} = u_{4\pi} . \quad (17.18)$$

Z nejistoty měření prostorové osvětlenosti měření kulovou fotometrickou hlavicí lze vypočítat nejistotu dílčího ALAN skóre AS následujícím vztahem

$$U_{AS} = c_{ASrel} u_{E_0} = c_{ASrel} u_{4\pi} \quad (17.19)$$

V momentální době nejsou na trhu luxmetry – radiometry s melanomickou citlivostí, a tedy není možné stanovit dílčí ALAN skóre pro melanomickou prostorovou a horizontální ozáření.

17.3 Měření pomocí spektoradiometru

Melanopická horizontální ozáření a horizontální osvětlenost je možné měřit spektoradiometry s kosinusovým nástavcem a postup výpočtu nejistoty měření je totožný jako pro luxmetry. Je nezbytné ale stanovit nejistotu měření těchto veličin spektoradiometrem. Výrobci udávají nejistotu měření horizontální osvětlenosti, ale méně často poskytují rozšířené nejistoty měření ozáření v určitých pásmech spektra. Pokud výrobce tyto údaje neposkytuje, je nutné alespoň převzít nejistotu měření osvětlenosti pro hodnotu nejistoty měření melanopické ozáření. Spektoradiometr má dílčí nejistoty závislé na měřeném spektru. Linearita detektoru, vliv rozptýleného světla uvnitř spektoradiometru a nejistota kalibrace vlnové délky zvyšují náročnost na výpočet nejistoty měření. V následující tabulce č.7 je zobrazen příklad rozpočtu nejistot pro měření horizontální osvětlenosti pro spektoradiometr s kosinusovým difuzorem.

Tabulka 7 Rozpočet nejistot měření spektoradiometru

Světelný zdroj	FL 3000 K	LED 3000 K	Halogen. ž.	HPS
Nejistoty	$u_{Eh} (\%)$			
Kalibrace	1.20			
Vlnová délka	0.38	0.41	0.29	0.73
Spektrální rozlišení	0.01	0.01	0.01	0.01
Rozptýlené záření	0.06	0.04	0.07	0.04
Nelinearita	0.09	0.24	0.13	0.04
Opakovatelnost měření	0.35	0.35	0.35	0.35
Kombinovaná	1.31	1.34	1.29	1.45
Rozšířená ($k=2$)	2.62	2.67	2.58	2.90

V případě spektoradiometru, který by byl vybaven vyměnitelnou vstupní optikou, která by umožňovala výměnu difuzoru pro horizontální osvětlenost za hlavici pro měření kulové osvětlenosti, tak lze změřit všechny parametry nezbytné pro stanovení kombinovaného ALAN skóre CAS. Postup výpočtu nejistot je obdobný jako pro jasovou kameru a luxmetr.

18 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

18.1 Formát vstupních dat

Pro vyhodnocení měření se používá vyvinutý software LumiDISP anebo jemu obdobný, který je schopen provést příslušné operace se zaznamenanými daty. V rámci projektu byly používány formáty nekorigovaných (surových) dat poskytovaných přímo fotoaparáty z prototypu ALANISATOR a to *.NEF* (Nikon Electronic Format).

Data z meteostanice se doporučují zaznamenat a exportovat do textových souborů *txt* nebo *csv* pro pozdější použití.

Metadata k fotografiím jsou součástí *NEF* souborů a je možné je exportovat do *txt* souborů a přiložit do elektronické databáze ALANIS.

Získané výsledky z aplikace LumiDISP se vkládají do aplikace ALANIS. ALAN skóre je možné vypočítat i ručně bez použití aplikace ALANIS. V aplikaci ALANIS je však možné provádět porovnávání jednotlivých záznamů mezi sebou a získat komplexní přehled o výsledcích měření, zaznamenat je do jednotné databáze a sdílet s dalšími uživateli.

Formát dat ze spektrometrů může být v *txt*, *csv* nebo *xls* podobě.

18.2 Kontrola vstupních dat

Pokud jsou přístroje správně nakalibrované, lze považovat vstupní data za validní s přihlédnutím k nejistotám jednotlivým zařízením.

18.3 Zpracování dat

Změřená data zaznamenaná v podobě jasových, resp. melanopických map je nutné sloučit do panoramatických obrazů v Hammer – Aitoffově transformaci, která zajistí konstantní prostorový úhel pro každý bod obrazu. V případě, že tuto transformaci nepoužijeme, je třeba integrály počítat složitěji i s výpočtem prostorového úhlu pro každý jeden bod ve snímku. Při použití programu LumiDISP jsou připraveny algoritmy pro spojování do panoramatických obrazů a Hammer – Aitoffova transformace. Dále pak výpočty potřebných veličin E_h , E_O , $E_{mel,h}$ a $E_{mel,O}$. Stejně tak je možné vyčíslit parametry pro jednotlivé objekty dle vztahů uvedených v kapitole 14.2.

Výpočty jednotlivých skóre lze provádět v aplikaci ALANIS anebo ručně dle kapitoly 14.3.

Výsledkem hodnocení umělého světla v nočním prostředí jsou jednotlivé indikátory dle kapitoly 14.3 resp. 14

19 PROTOKOL O MĚŘENÍ

Protokol o měření umělého světla v nočním prostředí a jeho vlivu na živé organismy jako celku musí obsahovat následující informace potřebné pro kontrolu a ověření měření:

- označení venkovního prostoru, pozemní komunikace, místa měření;
- datum a čas měření;
- účel, druh a stupeň přesnosti měření;
- informace o použitých měřicích přístrojích (ověřovací list);
- informace o odborné způsobilosti osoby provádějící měření;
- charakteristika prostoru (rozměry, zařízení, účel, zrakové činnosti apod.);
- popis světelné scény, přítomné osvětlovací soustavy (typy, svítidla, světelné zdroje, řídicí systémy – pokud je to možné);
- stav údržby (znečištění, lhůty čištění apod.);
- podmínky a postup měření (stínění, funkční stav osvětlovací soustavy, stabilizace, stárnutí, regulace, napájecí napětí, teplota vzduchu a další meteorologické podmínky);
- výkresy se zakreslením kontrolních bodů;
- výsledky měření s tabelárním přehledem nebo zápisem do výkresu, použité korekce;
- vyhodnocení měření, porovnání výsledků s požadavky;
- seznam osob účastnících se měření;
- objednatel;
- podpis odpovědného pracovníka.

Protokol o měření umělého světla v nočním prostředí má mít jedinečné kódové označení pro jeho jednoznačnou identifikaci a jednotlivé strany protokolu mají být očíslovány. Obsahová struktura protokolu může mít následující podobu (doporučeno):

A. Identifikační údaje

- | | |
|----|-----------------------------|
| A1 | Název projektu |
| A2 | Odběratel |
| A3 | Zpracovatel |
| A4 | Druh měření, účel, přesnost |
| A5 | Osoby provádějící měření |
| A6 | Datum a čas měření |
| A7 | Evidenční číslo |

B. Podklady

- | | |
|----|--|
| B1 | Seznam vstupních podkladů |
| B2 | Seznam použitých technických norem a právních předpisů |

C. Místo měření, okolí, atmosférické podmínky

- | | |
|----|-----------------------|
| C1 | Místo měření |
| C2 | Okolní prostředí |
| C3 | Atmosférické podmínky |

D. Osvětlovací soustavy

- | | |
|----|---|
| D1 | Typ osvětlovací soustavy (soustav) |
| D2 | Svítidla a světelné zdroje |
| D3 | Ovládací a řídicí zařízení a jejich nastavení |
| D4 | Stav údržby |

E. Použité měřicí přístroje

- | | |
|----|--------------------------------------|
| E1 | Hlavní měřicí přístroje |
| E2 | Pomocné měřicí přístroje a přípravky |

F. Příprava měření

- | | |
|----|-------------------------------|
| F1 | Příprava osvětlovací soustavy |
| F2 | Příprava měřicích přístrojů |

G. Měření

- G1 Kontrolní pole a kontrolní body
- G2 Stav osvětlovací soustavy (nefunkční zdroje, stav regulace)
- G3 Popis okolí
- G4 Naměřené hodnoty
- G5 Určení indikačních hodnot a výpočet ALAN skóre
- G6 Zanesení dat do aplikace ALANIS

H. Vyhodnocení měření

- H1 Porovnání výsledků měření s požadavky, popř., s jinými místy a referencemi
- H2 Zhodnocení výsledků měření
- H3 Nejistota měření
- H4 Podpis odpovědných osob

Přílohy

- P1 Výkresy situace s rozmístěním svítidel a kontrolních bodů
- P2 Ukázkový snímek vizuální, jasový a popř. melanopický (tabulky vypočtených hodnot)
- P3 Kalibrační listy hlavních měřicích přístrojů
- P4 Potvrzení o odborné způsobilosti osoby zodpovědné za měření

20 ZÁVĚR

Metodika měření umělého světla v nočním prostředí je první svého druhu v České republice a pravděpodobně i ve světovém měřítku. Vychází z dostupných metod a výsledků měření světelného znečištění a jejím hlavním cílem je objektivizovat míru světla v nočním prostředí, obecně pak záření, které může ovlivňovat libovolný živý organismus. Objektivizace spočívá v nalezení optimálních indikátorů, které zohledňují procesy šíření optického záření a také přirozenou úroveň záření a světla v nočním prostředí bez přítomnosti umělého osvětlení. Absolutní hodnoty indikovaných veličin jsou vztaženy k referenčním hodnotám, které byly v rámci této metodiky stanoveny a dostatečně publikovány na národním fóru. V této chvíli se jedná o první přiblížení k objektivizaci stavu umělého světla v nočním prostředí a vyhodnocení konkrétních zdrojů, které k takovému stavu přispívají. V dalším kroku bude třeba provést výzkum v oblasti biologie a s objektivizovaných hodnot indikátorů nalézt mezní hodnoty, limity stanovující bezpečnou míru umělého světla a záření v nočním prostředí. Do této doby nebyl k dispozici nástroj, který by účinně změřil a vyjádřil celkové množství nejen světla, ale obecně libovolného optického záření s vlivem na konkrétní organizmy. Metodika ukazuje společně s vyvinutým prototypovým zařízením, že takové zařízení lze vyrobit a prakticky použít.

Bylo provedeno celá řada testů, která nakonec vedla k maximálnímu zjednodušení metodiky, aby byla v praxi aplikovatelná. Nelze ji však brát jako konečný stav řešení, ale spíše jako další nutný krok ke zlepšení zatím nedořešené situace v této oblasti. Dosavadní metody neumožňovaly identifikovat konkrétní příspěvky jednotlivých zdrojů světla nebo celých soustav. V metodice popsané měření a zařízení toto umožňuje. Jakmile bude pořízeno dostatečné množství dat a uloženy do centrálního systému, bude možné provádět další analýzy. K ukládání dat byla vyvinuta aplikace ALANIS, která nabízí základní funkcionalitu pro sdílení dat a výpočty ALAN skóre a srovnávání měření mezi sebou. Vyhodnocení kombinovaných skóre vychází z podobné úvahy jako u kombinování nejistot měření. Vychází se z úvahy, kdy jednotlivé indikátory považujeme za nezávislé parametry a hodnotíme nejnepříznivější případ, tedy souhrnné působení všech jednotlivých parametrů. Zavedení koeficientů u jednotlivých indikátorů umožňuje v budoucnu nastavit váhy, které zohlední příspěvek jednotlivých indikátorů k celku – zvýrazní důležité a potlačí méně důležité. Pro potřeby metodiky byly použity indikátory s rovnoměrným nastavením koeficientů. Pro konkrétní použití a biologické systémy lze koeficienty upravit a nastavit tak, aby dávaly podobné výsledky jako pro jiné systémy. To však bude vyžadovat další výzkum, a to především v oblasti biologie. Metodika řeší technickou stránku věci a nestanovuje konkrétní limity. Srovnání s měsíčním svitem je prvním svého druhu v celosvětovém měřítku a bude nutné tuto referenci ještě detailněji rozpracovat. V této chvíli však plně postačuje pro zamýšlené aplikování metodiky, neboť i bez reference lze sledovat absolutní hodnoty. I pro tyto hodnoty lze očekávat stanovení limitů ze strany biologů. V první fázi implementace metodiky je však nutné provést plošný sběr dat a jejich statistické vyhodnocení.

21 REFERENCE

- [1] Sky Quality Meter. Unihedron [online]. [cit. 2024-11-22]. Dostupné z: <http://www.unihedron.com/projects/darksky/>
- [2] Sky Quality Meter - L. Unihedron [online]. [cit. 2024-11-22]. Dostupné z: <http://www.unihedron.com/projects/darksky/>
- [3] SÁNCHEZ DE MIGUEL, A., M. AUBÉ, J. ZAMORANO, M. KOCIFAJ, J. ROBY a C. TAPIA. Sky Quality Meter measurements in a colour-changing world. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society [online]. 2017, 467(3), 2966-2979 [cit. 2024-11-28]. ISSN 0035-8711. Dostupné z: doi:10.1093/mnras/stx145
- [4] HÄNEL, Andreas, Thomas POSCH, Salvador J. RIBAS, et al. Measuring night sky brightness: methods and challenges. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer [online]. 2018, 205, 278-290 [cit. 2024-04-28]. ISSN 00224073. Dostupné z: doi:10.1016/j.jqsrt.2017.09.008
- [5] TEKATCH, Anthony. Sky Quality Meter - FAQ. Online. Unihedron. 2009. Dostupné z: <http://www.unihedron.com/projects/darksky/faqsqm.php>. [cit. 2024-01-08].
- [6] MOHAR, Andrej. Pr20 SQC specifications [online]. [cit. 2024-04-28].
- [7] MOHAR, Andrej. Light Pollution Map. Online. 2009. Dostupné z: <https://www.lightpollutionmap.info>. [cit. 2024-04-08].
- [8] Light-meter: technical data. Sternhell [online]. [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: http://hms.sternhell.at/lightwiki/images/3/30/Lightmeter_specifications.pdf
- [9] Spectral Response SC + other. In: Sternhell [online]. [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: <http://hms.sternhell.at/lightwiki/index.php?title=File:SpectralResponseSC%2Bother.jpg>
- [10] ACEITUNO, J., S. F SÁNCHEZ, F. J. ACEITUNO, D. GALADÍ-ENRÍQUEZ, J. J. NEGRO, R. C. SORIGUER a G. Sanchez GOMEZ. An All-Sky Transmission Monitor: ASTMON. Publications of the Astronomical Society of the Pacific [online]. 2011, 123(907), 1076-1086 [cit. 2024-04-28]. ISSN 00046280. Dostupné z: doi:10.1086/661918
- [11] BESSELL, Michael S. Standard Photometric Systems. Annual Review of Astronomy and Astrophysics [online]. 2005, 43(1), 293-336 [cit. 2024-04-28]. ISSN 0066-4146. Dostupné z: doi:10.1146/annurev.astro.41.082801.100251
- [12] DURISCOE, Dan M., Christian B. LUGINBUHL a Chadwick A. MOORE. Measuring Night-Sky Brightness with a Wide-Field CCD Camera. Publications of the Astronomical Society of the Pacific [online]. 2007, 119(852), 192-213 [cit. 2024-04-28]. ISSN 0004-6280. Dostupné z: doi:10.1086/512069
- [13] DURISCOE, Dan M. Photometric indicators of visual night sky quality derived from all-sky brightness maps. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer [online]. 2016, 181, 33-45 [cit. 2024-04-28]. ISSN 00224073. Dostupné z: doi:10.1016/j.jqsrt.2016.02.022
- [14] MANDER, Susan; ALAM, Fakhru; LOVREGLIO, Ruggiero a OOI, Melanie. How to measure light pollution—A systematic review of methods and applications. Online. Sustainable Cities and Society. 2023, roč. 92. ISSN 22106707. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104465>. [cit. 2024-12-19].

- [15] SPACE WEATHER DATA SURVEY. The DMSP satellite and its Operational Linescan System. Online. 2022. Dostupné z: https://dmsp.bc.edu/html2/dmsp_ols.html. [cit. 2024-08-12].
- [16] EUROPEAN SPACE AGENCY. DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) Block 5D. Online. EoWeb. 2014. Dostupné z: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/dmsp-block-5d>. [cit. 2024-11-08].
- [17] NASA. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS). Online. Dostupné z: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/viirs/>. [cit. 2024-11-29].
- [18] EUROPEAN SPACE AGENCY. Suomi NPP (National Polar-orbiting Partnership). Online. Dostupné z: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/suomi-npp>. [cit. 2024-11-29].
- [19] KREBS, Gunter. Luojia 1-01 (LJ 1-01). Online. Gunter's Space Page. Dostupné z: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/luojia-1.htm. [cit. 2024-11-29].
- [20] NANOSATS. Luojia 1-01 Spacecraft. Online. Dostupné z: <https://www.nanosats.eu/sat/luojia>. [cit. 2024-11-29].
- [21] WUHAN UNIVERSITY. LJ01. Online. Dostupné z: http://59.175.109.173:8888/index_en.html. [cit. 2024-11-29].
- [22] INTERNATIONAL RESEARCH CENTER OF BIG DATA FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS. SDGSAT-1 Open Science Program. Online. Dostupné z: <https://www.sdgsat.ac.cn/satellite/describe>. [cit. 2024-10-10].
- [23] INTERNATIONAL RESEARCH CENTER OF BIG DATA FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS. SDGSAT-1 Data Users Handbook. Online. Dostupné z: <http://60.245.209.56/preview/20221125/c84c0b5d89984cd384ffa05dbb163d14.pdf>. [cit. 2024-10-10].
- [24] QIU, Yubao. SDGSAT-1: The Satellite and Open Science Program. Online. 2023. Dostupné z: <https://earthobservations.org/storage/app/media/documents/Events/Open-Data-Open-Knowledge-workshop/Session-1/Presentation%204%20-%20Yubao%20Qiu%20-%20China.pdf>. [cit. 2024-10-10].
- [25] RALAN-MAP 0: Iberian peninsula + Canary Islands, Balearic islands and Madeira. Online. Dostupné z: <https://pmisson.users.earthengine.app/view/sdgsat-1-p-iberica>. [cit. 2024-10-10].
- [26] Light Pollution Map. Online. Dostupné z: <https://www.lightpollutionmap.info>. [cit. 2024-10-10].
- [27] Light Pollution Map - Radiance Light Trends. Online. Dostupné z: <https://lighttrends.lightpollutionmap.info/>. [cit. 2024-10-10].
- [28] SkyQuality. Online. Dostupné z: <http://www.skyquality.cz/>. [cit. 2024-10-10].
- [29] Noc v Brně. Online. Dostupné z: <https://mestobrna.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=bf534942900e41229e5ba5067f35cfa5>. [cit. 2024-10-10].
- [30] My Sky at Night. Online. Dostupné z: <http://www.myskyatnight.com/#map>. [cit. 2024-10-10].

- [31] Globe at Night - App. Online. Dostupné z: <https://app.globeatnight.org/map>. [cit. 2024-10-10].
- [32] MET OFFICE COLLEGE. Layer Cloud Forecasting. Online. Dostupné z: https://www.weather.gov/media/zhu/ZHU_Training_Page/clouds/forecast_layer_clouds/Layer_Cloud_Forecasting.pdf. [cit. 2024-10-10].
- [33] Novák, F.; Baxant, P.; Škoda, J.; Motyčka, M.: Nová metodika měření a vyhodnocování světelného znečištění na obzoru, Světlo 2/2024, ISSN 1212-0812
- [34] KRIEG, Jürgen. Influence of moon and clouds on night illumination in two different spectral ranges. Online. Scientific Reports. 2021, roč. 11, č. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98060-2>. [cit. 2024-10-07].
- [35] ILLINOIS COALITION FOR RESPONSIBLE OUTDOOR LIGHTING. Bright as The Full Moon: How Much to Light Up The Night? Online. Illinois Coalition for Responsible Outdoor Lighting. 2011. Dostupné z: <http://www.illinoislighting.org/moonlight.html>. [cit. 2024-10-07].
- [36] MEEUS, Jean. Astronomical formulae for calculators. Online. 3. Volkssterrenwacht Urania V.Z.W. en Verenigin voor sterrenkunde V.Z.W., 1980. Dostupné z: <https://literature.hpcalc.org/community/astronomical-formulae.pdf>. [cit. 2024-10-07].
- [37] ALLEN, C. W. Astrophysical quantities. 3rd. ed. London: The Athlone Press, c1973. ISBN 0-485-11150-0.
- [38] KRISCIUNAS, Kevin a SCHAEFER, Bradley E. A model of the brightness of moonlight. Online. Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 1991, roč. 103. ISSN 0004-6280. Dostupné z: <https://doi.org/10.1086/132921>. [cit. 2024-10-07].
- [39] Sæmundsson, Þorsteinn (1986). "Astronomical Refraction". Sky and Telescope. 72: 70. Bibcode:1986S&T....72...70S.
- [40] GREEN, Daniel W. E. Correcting for Atmospheric Extinction. Online. International Comet Quarterly. 1992, č. 14., s. 55-59. Dostupné z: <http://www.icq.eps.harvard.edu/ICQExtinct.html>. [cit. 2024-10-07].
- [41] HAYES, D. S. a LATHAM, D. W. A rediscussion of the atmospheric extinction and the absolute spectral-energy distribution of VEGA. Online. The Astrophysical Journal. 1975, roč. 197. ISSN 0004-637X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1086/153548>. [cit. 2024-10-07].
- [42] ROZENBERG, Grzegorz V. (1966). Twilight: A Study in Atmospheric Optics. New York: Plenum Press. ISBN 978-1-4899-6353-6.
- [43] WUCHTERL, Günther. Conversion of light measurements. Online. How Many Stars ...? 2016. Dostupné z: https://hms.sternhell.at/lightwiki/index.php/Conversion_of_light_measurements. [cit. 2024-10-07].
- [44] SCHLYTER, Paul. Radiometry and photometry in astronomy. Online. 1997, 2023. Dostupné z: <http://stjarnhimlen.se/comp/radfaq.html#10>. [cit. 2024-10-07].
- [45] MEEUS, Jean. Position of the Moon. In: Astronomical Algorithms. 2. Willmann-Bell, 1998, s. 337 - 345. ISBN 978-0943396613.
- [46] HABEL, Jiří. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.

- [47] LOSS OF THE NIGHT. ACTION project [online]. [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: <https://actionproject.eu/citizen-science-pilots/loss-of-the-night/>
- [48] How many stars...? [online]. [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: <http://hms.sternhell.at/hms.php?page=pages/main&lang=English&country=Worldwide>
- [49] CRUMEY, Andrew. Human contrast threshold and astronomical visibility. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society [online]. 2014, 442(3), 2600-2619 [cit. 2024-02-10]. ISSN 1365-2966. Dostupné z: doi:10.1093/mnras/stu992
- [50] PROTECCIÓN DE LA CALIDAD DEL CIELO DEL NORTE DE CHILE. Revisión de la Norma Lumínica D.S.043 del MMA. Online. Dostupné z: https://www.opcc.cl/revision_ds043.html. [cit. 2024-12-22].
- [51] BIPM 2008. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. Bureau International des Poids et Mesures
- [52] CIE 2011. CIE 198:2011. Determination of measurement uncertainties in photometry. Vienna: CIE
- [53] CIE 2019. CIE 231:2019. Characterization of Classification System of Illuminance and Luminance Meters. Vienna: CIE
- [54] CIE 2021. CIE 244:2021. Characterization of Imaging Luminance Measurement Devices. Vienna: CIE

PŘÍLOHA 1 UKÁZKOVÝ PROTOKOL O MĚŘENÍ

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Laboratoř světelné a osvětlovací techniky

MĚŘENÍ UMĚLÉHO SVĚTLA V NOČNÍM PROSTŘEDÍ

VZOR

**Protokol o měření
2024-9901**

Prosinec 2024

Brno

Obsah

A.	Identifikační údaje	4
A1	Název projektu	4
A2	Odběratel.....	4
A3	Zpracovatel.....	4
A4	Druh měření, účel, přesnost.....	4
A5	Osoby provádějící měření.....	4
A6	Datum a čas měření.....	4
A7	Evidenční číslo	4
B.	Podklady	4
B1	Seznam vstupních podkladů.....	4
B2	Seznam použitých technických norem a právních předpisů;	4
C.	Místo měření, okolí, atmosférické podmínky	5
C1	Místo měření	5
C2	Okolní prostředí.....	5
C3	Atmosférické podmínky	5
D.	Osvětlovací soustavy	5
D1	Typ osvětlovací soustavy (soustav)	5
D2	Svítidla a světelné zdroje.....	6
D3	Ovládací a řídicí zařízení a jejich nastavení	6
D4	Stav údržby	6
E.	Použité měřicí přístroje	6
E1	Hlavní měřicí přístroje	6
E2	Pomocné měřicí přístroje a přípravky	6
F.	Příprava měření.....	6
F1	Příprava osvětlovací soustavy	6
F2	Příprava měřicích přístrojů.....	6
G.	Měření	6
G1	Kontrolní pole a kontrolní body	6
G2	Stav osvětlovací soustavy (nefunkční zdroje, stav regulace)	7
G3	Popis okolí	7
G4	Naměřené hodnoty	7
G5	Určení indikačních hodnot a výpočet ALAN skóre	9
G6	Zanesení dat do aplikace ALANIS	10
H.	Vyhodnocení měření	10
H1	Porovnání výsledků měření s požadavky, popř., s jinými místy a referencemi.....	10
H2	Zhodnocení výsledků měření	10
H3	Nejistota měření.....	12

H4	Podpis odpovědných osob	14
Přílohy		15
P1	Výkresy situace s rozmístěním svítidel a kontrolních bodů	15
P2	Ukázkový snímek vizuální, jasový a popř. melanopický (tabulky vypočtených hodnot).....	16
P3	Kalibrační listy hlavních měřicích přístrojů.....	21
P4	Potvrzení o odborné způsobilosti osoby zodpovědné za měření.....	23



A. Identifikační údaje

A1 Název projektu

Ověření metodiky měření umělého světla v nočním prostředí

A2 Odběratel

Název: Ministerstvo životního prostředí,
IČ: 00164801, DIČ: 00164801
Adresa: Vršovická 1442/65,
Praha 10,
Praha 100 10

A3 Zpracovatel

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Laboratoř světelné a osvětlovací techniky
Technická 12,
616 00 Brno
IČ: DIČ:

A4 Druh měření, účel, přesnost

Měření horizontální a prostorové osvětlenosti, horizontální a prostorové melanopická ozářenosti, výpočet ALAN skóre dle metodiky hodnocení umělého světla v nočním prostředí
Ověření metodiky, prototypu
Provozní měření - B

A5 Osoby provádějící měření

Doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.
Ing. Jan Škoda, Ph.D.

A6 Datum a čas měření

Datum měření: 19.12.2024
Čas měření: 18:15 – 19:15 SEČ

A7 Evidenční číslo

Evidenční číslo protokolu: 2024-9901

B. Podklady

B1 Seznam vstupních podkladů

(projektová dokumentace, prohlídka, fotodokumentace)

B2 Seznam použitých technických norem a právních předpisů;

Při realizaci světelně technických měření a ostatních měření na svítidle bylo vycházeno z těchto norem:

- ČSN 36 0010

Měření světla. Kmenová norma

účinnost od 10/1965

Změna 1: účinnost od 9/1996

- **ČSN EN 12665**

Světlo a osvětlení – Základní termíny a kritéria pro stanovení požadavků na osvětlení
účinnost od 4/2012

- **ČSN EN 13032-1**

Světlo a osvětlení – Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel. Část
1: Měření a formát souboru údajů

- **ČSN EN 13032-2**

Světlo a osvětlení – Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel. Část
2: Způsob uvádění údajů pro vnitřní a venkovní pracovní prostory

- **ČSN EN 13032-4**

Světlo a osvětlení – Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel. Část
4: LED světelné zdroje a svítidla

C. Místo měření, okolí, atmosférické podmínky

C1 Místo měření

Nádvoří Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií,
Technická 12,
chodník, pěší zóna

GPS souřadnice, zeměpisná délka:
zeměpisná šířka:

49.22765281493116 s.š
16.574781462368577 v.d.

C2 Okolní prostředí

Mírná zástavba, budovy s výškou 7 pater směr jih, budovy s výškou 2 patra směr severo-
západ, sportovní hřiště – stadion směr západ. Chodníky a přilehlé parkoviště, částečný
výhled do městské části a částečný do volné přírody bez výrazné zástavby

C3 Atmosférické podmínky

Teplota okolí:	5 °C
Atmosférický tlak:	1002,3 hPa
Relativní vlhkost:	85 %
Rosný bod:	2
Rychlost větru:	5-10 km/hod
Směr větru:	jihovýchod (135°)

Klimatické podmínky slovní popis (sucho, mlha, déšť, sněžení); Sucho, bez deště, sněžení, obloha
čistá, hvězdy viditelné.

D. Osvětlovací soustavy

D1 Typ osvětlovací soustavy (soustav)

D2 Svítidla a světelné zdroje

Použitá svítidla: různé druhy: sloupková svítidla, doutníková svítidla architektonická, stožárová svítidla na osvětlení přilehlého chodníku a parkoviště, svítidla osvětlující sportoviště, osvětlení od budovy, okna budov, přilehlé městské osvětlení, osvětlení komunikací

Výrobce: různí výrobci, nezjišťováno

Upevnění, montáž: sloupky, stožáry

Materiál difuzoru: sklo, plast

D3 Ovládací a řídicí zařízení a jejich nastavení

Dvoustavové řízení (zapnuto/vypnuto), bez regulace, bez pohybových čidel. Osvětlení se spíná pravděpodobně dle soumrakového spínače. Osvětlení sportovního stadionu má roční ovládání. Používá se různé osvětlení pro trénink a zápasy

D4 Stav údržby

Soustava je v provozu delší doba použití > 10 let

E. Použité měřicí přístroje

E1 Hlavní měřicí přístroje

ALANISATOR prototyp jasového analyzátoru na měření umělého světla v nočním prostředí.

E2 Pomocné měřicí přístroje a přípravky

Luxmetr: RadioLux 111, PRC Krochman, Class L, v.č. 150915, kalibrační protokol č. 150915-1

Stativ: Manfroto 055

Meteorostanice: Davis Vantage Pro 2 Plus, s.n. BG220223019

F. Příprava měření

F1 Příprava osvětlovací soustavy

Osvětlovací soustava je zapnuta na provozně maximální výkon, zajištěno měření v běžných podmínkách bez regulace. Soustava regulaci neobsahuje a nejsou přítomny ani pohybová čidla.

F2 Příprava měřicích přístrojů

Měřicí zařízení bylo umístěno na stativ a nastaveno do výšky 150 cm nad terénem. Souřadnice místa měření byly odečteny z mapových podkladů a přesné umístění bylo zaznamenáno fotograficky. Měřicí hlava byla vyrovnána pomocí digitální vodováhy.

Dále byl připojen přenosný počítač, komunikační kabely a zařízení pro ovládání hlavy Edelkrone Link.

G. Měření

G1 Kontrolní pole a kontrolní body

V rámci měření umělého světla v nočním prostředí se provádí kontrola v jednom vybraném bodě. Kontrolní bod byl vybrán s ohledem na snímání co největšího počtu umělých zdrojů

světla a optimální vzdálenosti od nich. Do kontrolního bodu zasahují svítidla od pozemních komunikací, pěší zóny, chodníku, architektonické osvětlení i osvětlení přilehlého sportoviště. Kontrolní bod byl přenesen do digitální mapy v systému ALANIS.

G2 Stav osvětlovací soustavy (nefunkční zdroje, stav regulace)

Vizuální kontrola světelných systémů nezjistila výrazné nedostatky a nefunkční zdroje. Soustava je plně funkční, regulace není přítomná a všechny zdroje v monitorovaném okolí svítí na 100 % svého maxima. Osoby provádějící měření nezaznamenali žádný prvek, který by narušoval stabilitu osvětlovací soustavy

G3 Popis okolí

Místo bylo vybráno s ohledem na různorodost soustav osvětlení, ale i architektury. Zároveň je prakticky v kampusu pracoviště, kde vzniká prototyp měřicího přístroje, což je výhodné pro místní dostupnost potřebné techniky a ověřování. Místo je umístěno více na periferii města, výhled na okolní nezastavěné části a okolní kopce a vzdálenější místa přírodního charakteru. Kolem místa se nachází části se zatravněnou plochou, keři a menšími stromy.

Problematickým prvkem byli procházející osoby, chodci. Místem prochází přilehlý chodník a bylo nemožné zajistit zcela statickou scénu. Na výsledky to však nebude mít zásadní vliv, neboť nedocházelo k přidání ani ubrání umělého světla anebo k viditelnému zastínění svítících zdrojů.

G4 Naměřené hodnoty

Měření proběhlo v třech sadách dat. Prostor rozdělený na 4 světové strany, směr 0 stupňů nastaven na sever. V každém směru bylo pořízeno 10 snímků s různou expozicí pro sestavení HDR obrazů. Dále byl použit filtr pro viditelné fotopické měření a filtr pro oblast melanopické citlivosti – neobrazové vidění. Poslední sada snímků obsahuje jpg fotografie pro sestavení panoramatické RGB fotografie.

V programu LumiDISP byly data převedeny na příslušné veličiny jasu a melanopické záře. Dále byly vytvořeny HDR (High Dynamic Range) snímky pro každou světovou stranu, a to pro fotopické i melanopické veličiny. Z těchto dat byly dále sestaven panoramatický snímek v Hammer - Aitoffově transformaci a vypočteny matice hodnot E_h a E_o , $Emel,h$ a $Emel,o$, tedy příspěvky jednotlivých bodů obrazu k horizontální osvětlenosti, prostorové osvětlenosti, horizontální melanopické ozáření a prostorové melanopické ozáření. Viz. také příloha.

Tabulka 1 Naměřené hodnoty osvětlenosti a melanopické ozáření

E_h	E_o	$Emel,h$	$Emel,o$
lx	lx	$mW \cdot m^{-2}$	$mW \cdot m^{-2}$
2.1627	14.2197	1.0907	7.1672

Kontrolní měření bylo provedeno laboratorním luxmetrem a naměřená hodnota horizontální osvětlenosti E_{hk} v kontrolním bodě činí: **2.202 lx**

Absolutní odchylka měření: **0.0393 lx**

Relativní odchylka měření: **1,8 %**.

Naměřené údaje z jasové analýzy lze považovat za validní.

Dále byly zaznamenány data z přilehlé meteostanice, která se nachází v dané lokalitě na střeše budovy Technická 12. Tato data byly zanesena přímo do aplikace ALANIS.

V dalším kroku bylo v obraze ohraničeno 24 zdrojů umělého světla, převážně svítidel, popř. jejich skupin. Těchto 24 svítidel tvoří cca 80 % záření přispívající do cílového sledovaného bodu.

Pro každý objekt byly vyčísleny dílčí hodnoty osvětleností a ozáření.

Tabulka 2 Dílčí hodnoty osvětlenosti a melanopické ozáření pro vybrané objekty

Objekt	E_h	E_o	$E_{mel,h}$	$E_{mel,o}$
	lx	lx	$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$	$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$
Polygon 2	0.0278	0.283	0.0140	0.1490
Polygon 3	0.0198	0.076	0.0386	0.1518
Polygon 4	0.0095	0.030	0.0044	0.0143
Polygon 5	0.0367	0.347	0.0197	0.1923
Circle 6	0.0019	0.055	0.0009	0.0281
Rectangle 7	0.0161	0.236	0.0081	0.1264
Polygon 8	0.0644	0.423	0.0528	0.3565
Polygon 9	0.0133	0.112	0.0066	0.0564
Square 11	0.0014	0.029	0.0006	0.0135
Rectangle 13	0.0011	0.023	0.0007	0.0149
Square 14	0.0015	0.029	0.0008	0.0173
Circle 15	0.0020	0.088	0.0010	0.0509
Ellipse 16	0.0006	0.005	0.0000	0.0004
Polygon 17	0.0000	1.708	0.0000	0.9854
Polygon 18	0.0000	0.006	0.0000	0.0043
Polygon 19	0.5334	3.110	0.2484	1.4856
Rectangle 20	0.0059	0.050	0.0013	0.0110
Circle 21	0.1159	0.570	0.0154	0.0776
Polygon 22	0.8800	4.046	0.4166	1.9558
Polygon 23	0.0100	0.161	0.0041	0.0688
Polygon 24	0.0037	0.077	0.0015	0.0329
Polygon 25	0.0004	0.049	0.0001	0.0231
Polygon 26	0.0009	0.009	0.0005	0.0049
Polygon 27	0.0009	0.028	0.0005	0.0175
Polygon 2	0.0278	0.283	0.0140	0.1490

G5 Určení indikačních hodnot a výpočet ALAN skóre

Z naměřených hodnot pro celý sledovaný prostor E_h a E_o , $Emel,h$ a $Emel,o$ byly vypočteny příslušné indikátory ALAN skóre AH , AS , AH_{mel} , AS_{mel} a $CAS2024$ dle metodiky kapitoly 14.

Tabulka 3 Hodnoty dílčích ALAN skóre pro celý snímek

ASH	AS	ASH_{mel}	AS_{mel}	$CAS2024$
21.48	25.54	17.51	21.52	22.41

Pro jednotlivé objekty vytyčené v obraze byly rovněž vypočteny indikátory pro každý jednotlivý objekt zvlášť.

Tabulka 4 Hodnoty dílčích ALAN skóre pro jednotlivé objekty

Objekt	ASH	AS	ASH_{mel}	AS_{mel}	$CAS2024$	Podíl na celku
Polygon 2	2.58	8.53	- 1.40	4.70	4.99	1.66%
Polygon 3	1.09	2.84	2.99	4.78	3.12	1.78%
Polygon 4	- 2.11	- 1.19	- 6.42	- 5.48	- 3.26	0.31%
Polygon 5	3.78	9.42	0.07	5.81	6.01	2.16%
Circle 6	- 9.00	1.44	- 13.40	- 2.55	- 2.75	0.24%
Rectangle 7	0.19	7.74	- 3.78	3.98	3.94	1.23%
Polygon 8	6.22	10.28	4.36	8.49	7.89	3.94%
Polygon 9	- 0.62	4.49	- 4.69	0.48	1.08	0.70%
Square 11	- 10.36	- 1.32	- 15.12	- 5.74	- 5.50	0.13%
Rectangle 13	- 11.33	- 2.43	- 14.50	- 5.30	- 6.13	0.12%
Square 14	- 10.21	- 1.43	- 13.70	- 4.64	- 5.23	0.15%
Circle 15	- 8.88	3.44	- 13.02	0.03	- 0.71	0.38%
Ellipse 16	- 14.38	- 8.91	- 26.12	- 20.61	- 13.56	0.02%
Polygon 17	-	16.34	-	12.90	11.94	6.44%
Polygon 18	- 30.11	- 7.92	- 40.63	- 10.71	- 12.09	0.03%
Polygon 19	15.40	18.94	11.08	14.69	15.89	22.51%
Rectangle 20	- 4.16	1.01	- 11.83	- 6.60	- 3.16	0.22%
Circle 21	8.77	11.58	- 0.98	1.87	7.83	2.97%
Polygon 22	17.58	20.08	13.33	15.88	17.39	33.66%
Polygon 23	- 1.87	6.07	- 6.74	1.34	1.95	0.73%
Polygon 24	- 6.19	2.87	- 11.13	- 1.86	- 1.39	0.33%
Polygon 25	- 16.02	0.96	- 23.69	- 3.40	- 3.63	0.11%
Polygon 26	- 12.21	- 6.64	- 15.87	- 10.17	- 10.01	0.12%
Polygon 27	- 12.40	- 1.51	- 16.31	- 4.61	- 5.48	0.07%
SOUČET	20.55	24.64	16.36	20.63	21.49	79.98%

G6 Zanesení dat do aplikace ALANIS

V aplikaci ALANIS byl vytvořen záznam v tabulce Measurement s názvem FEKT Technická 12 #FINAL a tento záznam byl naplněn příslušnými daty o poloze, datu a času měření, doplněny data o stavu meteorologických podmínek měření, vloženy příslušné snímky exportované z programu LumiDISP.

Naměřené hodnoty osvětleností a ozářeností byly zadány k vloženým snímkům příslušného typu – jasový fotometrický výstup a melanopická záře. Tyto hodnoty dále složí jako vstup pro výpočet ALAN skóre.

Dále bylo zaznamenané měření přidáno do testovacího seznamu srovnání ALAN skóre, kde je možné odečíst a zkontrolovat provedený výpočet indikátorů AH , AS , AH_{mel} , AS_{mel} a $CAS2024$.

H. Vyhodnocení měření

H1 Porovnání výsledků měření s požadavky, popř., s jinými místy a referencemi

Jelikož zatím neexistují normativní požadavky na hodnoty umělého světla v nočním prostředí, je možné pouze srovnání s jinými místy anebo pouze vyhodnocení ALAN skóre, které říká, jak je dané místo zasaženo umělým zářením ve viditelné oblasti oproti referenční hodnotě, kterou byl stanoven medián svitu Měsíce za rok 2024 s vyloučením nulových hodnot.

H2 Zhodnocení výsledků měření

Hlavní výsledky měření byly zaneseny do aplikace ALANIS do pole *Description – popis*, Jedná se o tyto údaje:

Tabulka 5 Zápis hodnoty do aplikace ALANIS

AH	AS	AH_{mel}	AS_{mel}	$CAS2024$
21.48	25.54	17.51	21.52	22.41

Celkové kombinované ALAN skóre říká, že celkové množství světla přesahuje referenční hodnotu o více než dva řády, Procentuální hodnota činí 17 432 %, neboli v daném místě je množství záření 174krát větší, než je stanovená reference dle metodiky, Největší navýšení vykazuje prostorová osvětlenost a to 35 836 % nebo 358krát více než je stanovená reference.

Vliv jednotlivých objektů na celkové skóre lze seřadit dle procentuálního příspěvku celkového průměrného poměru daného indikátoru. Získáme tak následující tabulku.

Tabulka 6 Hodnoty CASO jednotlivých objektů

Objekt	ASH	AS	ASH _{mel}	AS _{mel}	CASO2024	Podíl na celku
Polygon 22	17.58	20.08	13.33	15.88	17.39	33.66%
Polygon 19	15.40	18.94	11.08	14.69	15.89	22.51%
Polygon 17	-	16.34	-	12.90	11.94	6.44%
Polygon 8	6.22	10.28	4.36	8.49	7.89	3.94%
Circle 21	8.77	11.58	- 0.98	1.87	7.83	2.97%
Polygon 5	3.78	9.42	0.07	5.81	6.01	2.16%
Polygon 3	1.09	2.84	2.99	4.78	3.12	1.78%
Polygon 2	2.58	8.53	- 1.40	4.70	4.99	1.66%
Rectangle 7	0.19	7.74	- 3.78	3.98	3.94	1.23%
Polygon 23	- 1.87	6.07	- 6.74	1.34	1.95	0.73%
Polygon 9	- 0.62	4.49	- 4.69	0.48	1.08	0.70%
Circle 15	- 8.88	3.44	- 13.02	0.03	- 0.71	0.38%
Polygon 24	- 6.19	2.87	- 11.13	- 1.86	- 1.39	0.33%
Polygon 4	- 2.11	- 1.19	- 6.42	- 5.48	- 3.26	0.31%
Circle 6	- 9.00	1.44	- 13.40	- 2.55	- 2.75	0.24%
Rectangle 20	- 4.16	1.01	- 11.83	- 6.60	- 3.16	0.22%
Square 14	- 10.21	- 1.43	- 13.70	- 4.64	- 5.23	0.15%
Square 11	- 10.36	- 1.32	- 15.12	- 5.74	- 5.50	0.13%
Rectangle 13	- 11.33	- 2.43	- 14.50	- 5.30	- 6.13	0.12%
Polygon 26	- 12.21	- 6.64	- 15.87	- 10.17	- 10.01	0.12%
Polygon 25	- 16.02	0.96	- 23.69	- 3.40	- 3.63	0.11%
Polygon 27	- 12.40	- 1.51	- 16.31	- 4.61	- 5.48	0.07%
Polygon 18	- 30.11	- 7.92	- 40.63	- 10.71	- 12.09	0.03%
Ellipse 16	- 14.38	- 8.91	- 26.12	- 20.61	- 13.56	0.02%
SOUČET	20.55	24.64	16.36	20.63	21.49	79.98%

Z této tabulky pak vyplývá, že objekty s CASO2024 větší než 0 přispívají více než by způsoboval referenční zdroj přírodního světla. Jedná se o 11 prvních objektů. Další objekty mají příspěvek již menší. První dva objekty přitom tvoří více než polovinu celkového záření. Jedná se o svítidla doutníkovitého tvaru nejbližší měření. Další podstatný vliv má záření od poměrně vzdáleného stožáru osvětlení sportovního stadionu. Tento zdroj přispívá téměř 4 % k celku. Jeho příspěvek do celkového ALAN skóre CASO2024 činí 7,89, což znamená více než 6násobné překročení stanovené reference, 20 % záření způsobuje pozadí a nevybrané zdroje světla. Výběr zdrojů byl proveden demonstrativně a slouží pro orientační přehled vyčíslení jednotlivých objektových indikátorů a seřazení objektů dle významu.

H3 Nejistota měření

Nejistota měření byla stanovena podle návodu v popisu prototypu ALANISATOR. V následující tabulce jsou zobrazeny rozšířené nejistoty měření pro prostorovou a horizontální osvětlenost a pro prostorovou a horizontální melanopickou ozářenost z celého snímku.

Tabulka 7 Nejistoty měření osvětlenosti a melanopické záře

Objekt	U_{Eh} (%)	U_{Eo} (%)	U_{Emelh} (%)	U_{Emelo} (%)
Celý prostor	7.5	7.5	8.2	8.2

V následující tabulce jsou nejistoty měření dílčích příspěvků vybraných zájmových objektů.

Tabulka 8 Nejistoty měření osvětlenosti a melanopické záře

Objekt	U_{Eh} (%)	U_{Eo} (%)	U_{Emelh} (%)	U_{Emelo} (%)
Polygon 2	7.3	7.3	8.0	8.0
Polygon 3	7.4	7.4	8.1	8.1
Polygon 4	7.6	7.6	8.3	8.3
Polygon 5	7.6	7.6	8.3	8.3
Circle 6	7.5	7.5	8.1	8.1
Rectangle 7	7.5	7.5	8.2	8.2
Polygon 8	7.0	7.0	7.7	7.7
Polygon 9	7.1	7.1	7.8	7.8
Square 11	7.5	7.5	8.1	8.1
Rectangle 13	7.4	7.4	8.1	8.1
Square 14	7.5	7.5	8.2	8.2
Circle 15	7.4	7.4	8.1	8.1
Ellipse 16	7.4	7.4	8.1	8.1
Polygon 17	0.0	7.5	0.0	8.2
Polygon 18	7.4	7.4	8.1	8.1
Polygon 19	7.5	7.5	8.2	8.1
Rectangle 20	7.6	7.6	8.3	8.3
Circle 21	6.8	6.8	7.6	7.6
Polygon 22	7.5	7.5	8.2	8.2
Polygon 23	7.6	7.6	8.3	8.3
Polygon 24	7.7	7.7	8.4	8.4
Polygon 25	7.5	7.5	8.2	8.2
Polygon 26	7.5	7.5	8.2	8.2
Polygon 27	7.3	7.4	8.0	8.1

Nejistoty měření dílčích ALAN skóre a kombinovaného ALAN skóre CAS2024 jsou zobrazeny v tabulce č. 9.

Tabulka 9 Nejistoty měření dílčích ALAN skóre

Objekt	$U_{ASH} (-)$	$U_{AS} (-)$	$U_{ASHmel} (-)$	U_{ASmel}	$U_{CAS2024} (-)$
Celý prostor	0.32	0.32	0.36	0.35	0.33

Nejistoty měření parametrů AS a CAS2024 příspěvků vybraných objektů ze snímku jsou zobrazeny v tabulce č. x.

Tabulka 10 Nejistoty měření parametrů AS a CAS2024 příspěvků vybraných objektů

Objekt	$U_{ASHOi} (-)$	$U_{ASOi} (-)$	$U_{ASOHmel} (-)$	U_{ASOmel}	$U_{CASO} (-)$
Polygon 2	0.32	0.32	0.35	0.35	0.33
Polygon 3	0.32	0.32	0.35	0.35	0.34
Polygon 4	0.33	0.33	0.36	0.36	0.34
Polygon 5	0.33	0.33	0.36	0.36	0.34
Circle 6	0.32	0.32	0.35	0.35	0.33
Rectangle 7	0.33	0.33	0.36	0.36	0.34
Polygon 8	0.30	0.30	0.34	0.34	0.32
Polygon 9	0.31	0.31	0.34	0.34	0.32
Square 11	0.32	0.32	0.35	0.35	0.33
Rectangle 13	0.32	0.32	0.35	0.35	0.33
Square 14	0.33	0.33	0.36	0.36	0.34
Circle 15	0.32	0.32	0.35	0.35	0.33
Ellipse 16	0.32	0.32	0.35	0.35	0.32
Polygon 17	0.00	0.33	0.00	0.36	0.34
Polygon 18	0.32	0.32	0.35	0.35	0.33
Polygon 19	0.32	0.32	0.35	0.35	0.33
Rectangle 20	0.33	0.33	0.36	0.36	0.33
Circle 21	0.30	0.30	0.33	0.33	0.30
Polygon 22	0.32	0.32	0.35	0.35	0.33
Polygon 23	0.33	0.33	0.36	0.36	0.34
Polygon 24	0.33	0.33	0.36	0.36	0.34
Polygon 25	0.32	0.32	0.35	0.35	0.33
Polygon 26	0.33	0.33	0.36	0.36	0.34
Polygon 27	0.32	0.32	0.35	0.35	0.33

H4 Podpis odpovědných osob

Kontakt:

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
CVVOZE - Ústav elektroenergetiky
Laboratoř světelné techniky

Technická 3082/12
616 00 Brno
tel.: +420 54114 6220

V Brně, dne 31. 12. 2024

Seznam zúčastněných osob při měření:

doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.
Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Měření:

Ing. Jan Škoda, Ph.D.,
doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Zpracování dat a protokol:

doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.
Ing. Jan Škoda, Ph.D.
Ing. Martin Motyčka, Ph.D.

Ing. Jan Škoda, Ph.D.,
vedoucí laboratoře světelné techniky

Ústav elektroenergetiky
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně
Technická 3082/12, 616 00 Brno
tel: +420 (5) 4114 6238
<http://www.ueen.feec.vutbr.cz/>
<http://www.svetelnalaborator.cz/>
<http://www.lumidisp.eu/>

Přílohy

P1 Výkresy situace s rozmístěním svítidel a kontrolních bodů



Umístění bodu měření v mapovém podkladu Open Street Map

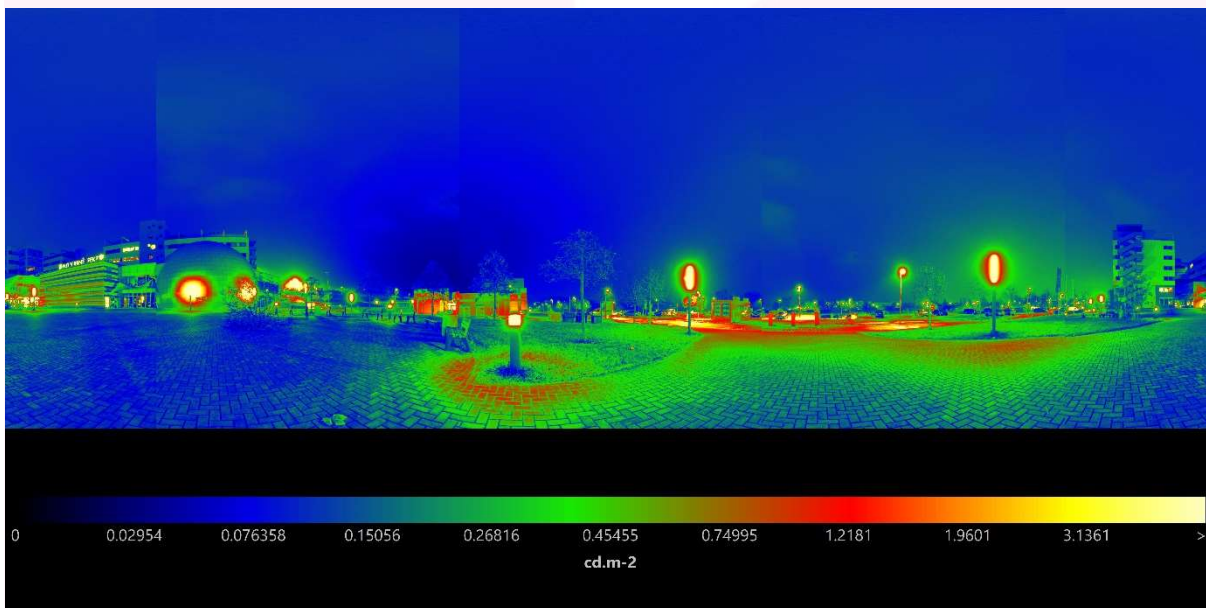


Pohled na instalaci měřicího zařízení a v pozadí jeden z hlavních zdrojů záření – světlomety na nasvětlení přilehlého sportoviště. Na zemi jsou patrné stíny vržené od hlavních zdrojů světla. Záznam z kontrolního laboratorního luxmetru

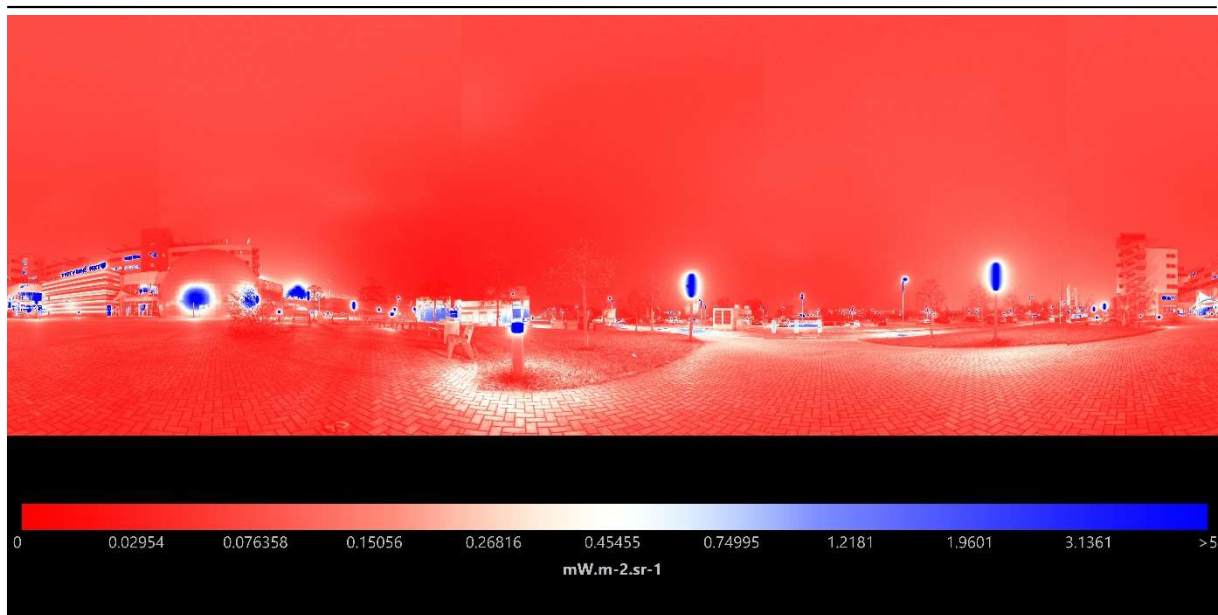
P2 Ukázkový snímek vizuální, jasový a popř. melanopický (tabulky vypočtených hodnot)



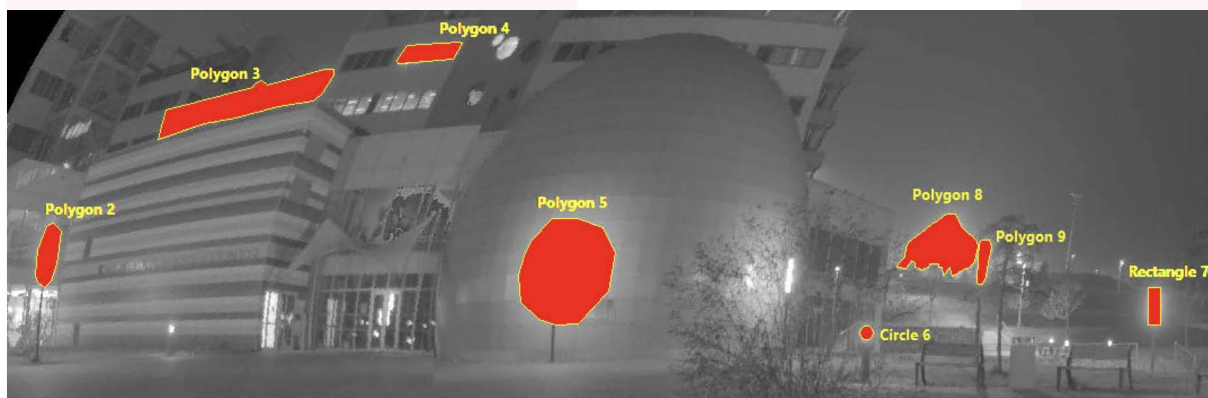
Vizuální pohled na snímanou scénu v panoramatickém rozložení



Jasová mapa snímané scény v panoramatickém rozložení



Mapa melanopická záře snímané scény v panoramatickém rozložení





Výběr testovacích objektů a jejich pojmenování

Tabulka souhrnných hodnot osvětlenosti a melanopické ozáření celé scény

E_h	E_o	$Emel,h$	$Emel,o$
lx	lx	$mW \cdot m^{-2}$	$mW \cdot m^{-2}$
2.162673	14.21973	1.090717	7.167214

Kontrolní osvětlenost v měřeném bodě: 2.202 lx

Tabulka hodnot osvětlenosti a melanopické ozáření jednotlivých objektů

Objekt	E_h	E_o	$E_{mel,h}$	$E_{mel,o}$
	lx	lx	mW·m ⁻²	mW·m ⁻²
Polygon 2	0.0278	0.283	0.0140	0.1490
Polygon 3	0.0198	0.076	0.0386	0.1518
Polygon 4	0.0095	0.030	0.0044	0.0143
Polygon 5	0.0367	0.347	0.0197	0.1923
Circle 6	0.0019	0.055	0.0009	0.0281
Rectangle 7	0.0161	0.236	0.0081	0.1264
Polygon 8	0.0644	0.423	0.0528	0.3565
Polygon 9	0.0133	0.112	0.0066	0.0564
Square 11	0.0014	0.029	0.0006	0.0135
Rectangle 13	0.0011	0.023	0.0007	0.0149
Square 14	0.0015	0.029	0.0008	0.0173
Circle 15	0.0020	0.088	0.0010	0.0509
Ellipse 16	0.0006	0.005	0.0000	0.0004
Polygon 17	0.0000	1.708	0.0000	0.9854
Polygon 18	0.0000	0.006	0.0000	0.0043
Polygon 19	0.5334	3.110	0.2484	1.4856
Rectangle 20	0.0059	0.050	0.0013	0.0110
Circle 21	0.1159	0.570	0.0154	0.0776
Polygon 22	0.8800	4.046	0.4166	1.9558
Polygon 23	0.0100	0.161	0.0041	0.0688
Polygon 24	0.0037	0.077	0.0015	0.0329
Polygon 25	0.0004	0.049	0.0001	0.0231
Polygon 26	0.0009	0.009	0.0005	0.0049
Polygon 27	0.0009	0.028	0.0005	0.0175
Polygon 2	0.0278	0.283	0.0140	0.1490

Poznámka: počet desetinných míst byl stanoven s ohledem na vyčíslení nejmenších hodnot nejméně na 3 platné číslice

Tabulka dílčích ALAN skóre a kombinovaného ALAN skóre a procentuální podíl z celku

<i>Objekt</i>	<i>ASHO_i</i>	<i>ASO_i</i>	<i>ASOHi_{mel}</i>	<i>ASOi_{mel}</i>	<i>CASO_i</i>	<i>Podíl na celku</i>
Polygon 2	2.58	8.53	- 1.40	4.70	4.99	1.66%
Polygon 3	1.09	2.84	2.99	4.78	3.12	1.78%
Polygon 4	- 2.11	- 1.19	- 6.42	- 5.48	- 3.26	0.31%
Polygon 5	3.78	9.42	0.07	5.81	6.01	2.16%
Circle 6	- 9.00	1.44	- 13.40	- 2.55	- 2.75	0.24%
Rectangle 7	0.19	7.74	- 3.78	3.98	3.94	1.23%
Polygon 8	6.22	10.28	4.36	8.49	7.89	3.94%
Polygon 9	- 0.62	4.49	- 4.69	0.48	1.08	0.70%
Square 11	- 10.36	- 1.32	- 15.12	- 5.74	- 5.50	0.13%
Rectangle 13	- 11.33	- 2.43	- 14.50	- 5.30	- 6.13	0.12%
Square 14	- 10.21	- 1.43	- 13.70	- 4.64	- 5.23	0.15%
Circle 15	- 8.88	3.44	- 13.02	0.03	- 0.71	0.38%
Ellipse 16	- 14.38	- 8.91	- 26.12	- 20.61	- 13.56	0.02%
Polygon 17	-	16.34	-	12.90	11.94	6.44%
Polygon 18	- 30.11	- 7.92	- 40.63	- 10.71	- 12.09	0.03%
Polygon 19	15.40	18.94	11.08	14.69	15.89	22.51%
Rectangle 20	- 4.16	1.01	- 11.83	- 6.60	- 3.16	0.22%
Circle 21	8.77	11.58	- 0.98	1.87	7.83	2.97%
Polygon 22	17.58	20.08	13.33	15.88	17.39	33.66%
Polygon 23	- 1.87	6.07	- 6.74	1.34	1.95	0.73%
Polygon 24	- 6.19	2.87	- 11.13	- 1.86	- 1.39	0.33%
Polygon 25	- 16.02	0.96	- 23.69	- 3.40	- 3.63	0.11%
Polygon 26	- 12.21	- 6.64	- 15.87	- 10.17	- 10.01	0.12%
Polygon 27	- 12.40	- 1.51	- 16.31	- 4.61	- 5.48	0.07%
SOUČET	20.55	24.64	16.36	20.63	21.49	79.98%

P3 Kalibrační listy hlavních měřicích přístrojů



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING
LIGHT LABORATORY
Technická 12, 616 00 Brno
tel.: 54114 6220
E-mail: info@lumidisp.eu, www.lumidisp.eu,

Luminance Distribution Analyser LDA – ML6

Calibration Certificate

Certificate number: **18320-LDA-ML6-2023-3/2024-1**

Date of calibration: **1. 2. 2024**

Validity of calibration: **1. 2. 2026**

Customer: **Brno University of Technology,
Technická 3082/12, 602 00 Brno**

Calibrated set:

Serial number of set: **18320-LDA-ML6-2023-3**

Digital camera: **NIKON Z6II no.: 6001066**

Lens 1: **SIGMA 135 mm f/1.8 DG no.: 54309178**

Lens 2: **SIGMA 40 mm f/1.4 DG no.: 53538998**

Lens 3: **Nikon 8-15 mm f/3.5-4,5E ED no.: 214147**

Correction filter: **V(λ), no.: SFG13a-Me020222-He-1303/1975020**

Results of calibration:

Configuration	k_L (counts/cd·m ⁻²)	Expanded uncertainty (%) $k=2$
Sigma 135 mm	7.217	5.5
Sigma 40 mm	7.062	5.4
Nikon 15 mm	7.110	6.2
Nikon 8 mm	6.732	6.2

The calibration has a traceability to NIST. Expanded uncertainties are for the center of image.

Number of pages of the certificate: 10

Ing. Jan Skoda, Ph.D.
Head of light laboratory

doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.
Person in charge

Ing. Martin Motyčka, Ph.D.
Metrologist



PRC KROCHMANN

Photometry Radiometry Colorimetry



Calibration Certificate No. 220914-2

Object: RadioLux 111, advanced version

Serial No.: 150915 with photometer head no. 150915-1

Applicant: **Vysoké učení technické v Brně, UEEN, FEKT**
Brno 616 00, Czech Republic

Manufacturer: **PRC Krochmann**, Am Sandwerder 47, 14109 Berlin

Calibration Task Calibration of an illuminance meter using standard illuminant A at a given level of illuminance.

Measurement Conditions

Geometric Setup The acceptance area of the photometer head was illuminated perpendicularly. The reference plane for the distance measurement is the diffusor surface.

Operating Conditions The instrument was operated with 1,5 v AA batteries. The warm-up period was 4 minutes. The ambient temperature was $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$. The photometer head was connected to the reading unit.

Zero setting Reading of „0” with the photometer head in total dark in all ranges.

Results

Illuminance [lx]	Reading Before Adjustment [lx]	Reading After Adjustment [lx]
69,1	68,8	69,1

Uncertainties:
Photometric uncertainty of referred PTB calibrated standard lamp: 0,6 %
Photometric transfer uncertainty better than: 0,3 %
relative expanded measurement uncertainty incl. the uncertainty of the standard employed 0,9 %

The traceability of the used standard lamp to the national standard is guaranteed by calibration certificate issued by Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, calibration mark WI 41/G 40046 PTB 18, dated 06.02.2018 (DIN EN ISO/IEC-17025).
The uncertainty stated is the expanded relative uncertainty of measurement $u(E)$ obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It corresponds, in the case of a normal distribution of the deviation from the measurement value, to a coverage probability of 95 %. The standard uncertainty has been determined in accordance with the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (ISO, 1995).

Berlin, 27.09.2022

Dipl.-Ing. Z. Özver-Krochmann

Page 1 of 1

Calibration certificates have no validity without signature. Without the written consent of the laboratory, extracts may not be published or duplicated. They may only be circulated unchanged and complete. Extracts and changes need to be approved in written by
PRC-Krochmann, Am Sandwerder 47, 14109 Berlin
Tel.: (030) 751 7007 Fax.: (030) 751 0127 e-mail: info@prc-krochmann.de <http://www.prc-krochmann.de>

P4 Potvrzení o odborné způsobilosti osoby zodpovědné za měření



Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě

Centrum hygienických laboratoří, Poskytovatel zkoušení způsobilosti
Poskytovatel zkoušení způsobilosti č. 7013 akreditovaný ČIA
podle ČSN EN ISO/IEC 17043



OSVĚDČENÍ

o účasti ve zkoušení způsobilosti

Označení PT: **PT1 UO-14**
Název PT: Měření umělého osvětlení
Předmět PT: umělá osvětlovací soustava
Termín: 21. - 23. 10. 2014

Účastník: **Vysoké učení technické v Brně**
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Technická 3082/12
616 00 Brno
IČO: 00216305

Kód účastníka: **21**

Uvedený účastník svými výsledky vyhodnocenými podle ČSN ISO 5725 a ISO 13528 dosáhl vyhovujících výsledků, tj. z-skóre v intervalu $<-2; +2>$ pro měření uvedená v tabulce. Další informace jsou uvedeny v konečné zprávě č. PT1/2014/1/UO.

ÚKOL	PARAMETR	Z-SKÓRE
1	osvětlenost pracovního stolu (E)	0,40
	rovnoměrnost osvětlení pracovního stolu (U_0)	-0,32
2	osvětlenost okolí pracovního stolu (E)	1,05
	rovnoměrnost okolí pracovního stolu (U_0)	-0,83
3	válcová osvětlenost (E)	0,26


.....
koordinátor programu PT

Datum vystavení osvědčení: 14.1.2015

P4 (pokračování) – Potvrzení o pracovním zařazení osob odpovědných za měření

Ve veřejné verzi dokumentu jsou tyto strany vynechány, protože obsahují osobní údaje.
Podpisy ve vzorovém protokolu jsou z téhož důvodu začerněny.

Úplná verze metodiky je k dispozici u aplikačního garanta (Ministerstvo životního prostředí) a na vyžádání u řešitele projektu SS05010159 (VUT v Brně, FEKT).