



**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Návrh metodiky vyhodnocení jasů v oblastech mezopického a  
skotopického vidění**

**Proposal of the methodology to evaluate the mesopic and  
scotopic luminance**

**Duben 2013**

**Ing. Petr Závada**

Ing. Petr Závada

Disertační práce: Návrh metodiky vyhodnocení jasů v oblastech mezopického a skotopického vidění

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Katedra elektroenergetiky**

**Doktorský studijní program:** Elektrotechnika, sdělovací a výpočetní technika (P2645)

**Studijní obor:** Elektroenergetika (3907V001)

**Autor:** Ing. Petr Závada

**Školitel:** prof. Ing. Karel Sokanský, CSc.

### **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 30.dubna 2013

.....  
Podpis

## **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval svému školiteli prof. Ing. Karlu Sokanskému, CSc. za jeho odborné vedení a mnoho cenných rad při zpracovávání disertační práce.

Také bych chtěl poděkovat svým kolegům a přátelům za hodnotné rady a názory, které mi byly příkladem nejen při řešení této práce, ale i v životě.

Hlavní dík patří mým rodičům a nejbližší rodině za dlouholetou podporu, trpělivost a povzbuzování během mého studia.

## **Anotace**

Disertační práce se zabývá zhodnocením stávajících a vývojem nových metodik měření a vyhodnocení nízkých úrovní jasů, sestavením speciálního měřicího řetězce pro kvantifikaci rušivého světla a použitím tohoto pro dlouhodobé měření a vyhodnocení jasů noční oblohy.

Z ekologických hledisek, zejména při posouzení environmentálních vlivů rušivého světla a snahou o co největší úsporu energie, se měření rušivého světla stává stále aktuálnějším tématem mezi odborníky z oblasti světelné techniky.

Jelikož se v práci jedná o vyhodnocování nízkých úrovní jasů ( $0,005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  až  $5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ), tedy v oblasti mezopického vidění, tak při měření přístroji kalibrovanými na fotopickou spektrální křivku světelné citlivosti vzniká spektrální chyba měření. Pro snížení této chyby je v práci rozebrán postup vyhodnocování jasů v mezopické oblasti a navržen měřicí řetězec přizpůsobený k přímému měření jasů v mezopické oblasti vidění.

## **Klíčová slova**

Mezopické vidění, nízká hodnota jasu, rušivé světlo, jasoměr, environmentální zóna.

## **Anotation**

The thesis is aimed at the assessment of current measurement methodology, analysis and evaluation of low-level luminance and the design of special measurement chain quantifying the obtrusive light and facilitating long-term night sky luminance measurement and assessment.

Taken from the environmental, economic and ecology perspective the measurement and analysis of obtrusive light is becoming more and more topical among the lighting technology specialists.

As there is going about the mesopic radiation measurement on the value scale from  $5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  up to  $0,005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  the measuring instrument calibrated to photopic spectral curve efficiency characteristics is producing the spectral measuring results deviation. Besides the procedure of radiance evaluation on the scale of mesopic zone the thesis also consists of the measurement chain design adjusted to direct radiation measurement in mesopic vision area to decrease the impact and the volume of spectral deviation.

## **Key words**

Mesopic photometry, low-level luminance, obtrusive light, luminance meter, environmental zone.

**OBSAH:**

<b>1</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>SPEKTRÁLNÍ CITLIVOST LIDSKÉHO OKA .....</b>	<b>11</b>
3.1	ZRAK A VIDĚNÍ.....	11
3.1.1	<i>Fotopické vidění.....</i>	14
3.1.2	<i>Skotopické vidění.....</i>	14
3.1.3	<i>Mezopické vidění.....</i>	15
3.2	ZMĚNY SPEKTRÁLNÍ CITLIVOSTI V OBLASTI MEZOPIKÉHO VIDĚNÍ.....	15
3.2.1	<i>Poměrový ukazatel skotopického a mezopického vidění.....</i>	15
3.2.2	<i>Matematický zápis spektrálního průběhu mezopického vidění.....</i>	16
<b>4</b>	<b>RUŠIVÉ SVĚTLO.....</b>	<b>18</b>
4.1	KATEGORIZACE RUŠIVÉHO SVĚTLA.....	18
4.1.1	<i>Závojevý jas oblohy .....</i>	19
4.1.2	<i>Oslnivé světlo.....</i>	19
4.1.3	<i>Světelný přesah .....</i>	20
4.1.4	<i>Podíl horního světla ULR.....</i>	20
4.2	NORMATIVNÍ POŽADAVKY NA RUŠIVÉ SVĚTLO .....	21
4.2.1	<i>Environmentální zóny.....</i>	22
4.3	ZDROJE RUŠIVÉHO SVĚTLA.....	23
4.3.1	<i>Osvětlení pozemních komunikací .....</i>	23
4.3.2	<i>Osvětlení letišť.....</i>	23
4.3.3	<i>Osvětlení venkovních sportovišť.....</i>	24
4.3.4	<i>Osvětlení venkovních pracovišť .....</i>	25
4.3.5	<i>Architektonické osvětlení .....</i>	25
4.3.6	<i>Reklamní osvětlení .....</i>	26
4.3.7	<i>Osvětlení z oken domácností.....</i>	26
<b>5</b>	<b>STÁVAJÍCÍ METODY CIE PRO VÝPOČET MEZOPIKÉHO JASU .....</b>	<b>28</b>
5.1	USP-SYSTÉM.....	28
5.2	MOVE-SYSTÉM .....	29
5.3	MES1-SYSTÉM .....	30
5.4	MES2-SYSTÉM .....	31
5.5	DOPORUČENÍ CIE .....	32
<b>6</b>	<b>PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ JASU .....</b>	<b>35</b>
6.1	LUXMETRY S NÁSTAVCEM .....	36
6.2	JASOVÉ KAMERY .....	37
6.3	SPEKTROFOTOMETRY .....	37
6.4	DIGITÁLNÍ JASOVÉ ANALYZÁTORY .....	38
6.4.1	<i>LMK Mobile Advanced.....</i>	38
6.4.2	<i>Systém LumiDISP .....</i>	40
6.5	PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ "KVALITY OBLOHY" .....	41
<b>7</b>	<b>VYHODNOCOVÁNÍ JASŮ POMOCÍ DIGITÁLNÍ FOTOGRAFIE .....</b>	<b>43</b>
7.1	HARDWAROVÉ KOMPONENTY - SVĚTLOCITLIVÉ SENZORY .....	43
7.2	UŽIVATELSKÉ FUNKCE A NASTAVENÍ .....	44
7.2.1	<i>Doba expozice a přeměna světla na elektrický signál .....</i>	44
7.2.2	<i>A/D převodník.....</i>	45
7.2.3	<i>Clona a ohnisková vzdálenost .....</i>	46
7.2.4	<i>ISO šum.....</i>	46
7.2.5	<i>Blooming .....</i>	47
7.3	POSTUP VYTVOŘENÍ JASOVÉ MAPY.....	47

<b>8</b>	<b>METODIKA VYHODNOCOVÁNÍ RUŠIVÝCH ÚČINKŮ SVĚTLA .....</b>	<b>49</b>
8.1	PŘEHLED SOUČASNÝCH METOD VYHODNOCOVÁNÍ RUŠIVÉHO SVĚTLA .....	49
8.2	NOVĚ NAVRŽENÉ METODY VYHODNOCENÍ JASU NOČNÍ OBLOHY .....	50
8.2.1	<i>Jasová analýza s objektivem rybí oko</i> .....	50
8.2.2	<i>Vyhodnocování jasu noční oblohy pomocí izojas a izoploch</i> .....	54
8.2.3	<i>Vyhodnocování jasu noční oblohy z pohledu pozorovatele</i> .....	55
8.3	STANOVENÍ PALET PRO VYHODNOCOVÁNÍ MEZOPIKÝCH JASŮ .....	56
<b>9</b>	<b>DOPORUČENÍ STANOVENÍ ENVIRONMENTÁLNÍCH ZÓN V ČESKÉ REPUBLICE .....</b>	<b>59</b>
<b>10</b>	<b>NÁVRH MĚŘÍČÍHO ŘETĚZCE PRO PŘÍMÉ MĚŘENÍ JASU NOČNÍ OBLOHY V MEZOPIKÉ OBLASTI VIDĚNÍ</b>	<b>61</b>
10.1	FILOZOFIE MĚŘÍČÍHO ŘETĚZCE .....	61
10.1.1	<i>Světlocitlivý senzor CCD kamery</i> .....	62
10.1.2	<i>Přizpůsobení spektrální světelné citlivosti</i> .....	63
10.1.3	<i>Optické příslušenství CCD kamery</i> .....	64
10.1.4	<i>Chlazení CCD kamery</i> .....	65
10.2	CHYBA MĚŘÍČÍHO ŘETĚZCE .....	66
10.3	KALIBRACE CCD KAMERY .....	68
10.4	PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ MĚŘÍČÍHO ŘETĚZCE .....	69
<b>11</b>	<b>APLIKACE NOVĚ NAVRŽENÝCH METOD .....</b>	<b>71</b>
11.1	NÁVRH ZATŘÍDĚNÍ VENKOVNÍ ROZVODNÉ STANICE VVN 420 kV .....	71
11.2	MĚŘENÍ JASŮ NOČNÍ OBLOHY .....	73
11.2.1	<i>Měřicí stanoviště - astronomická observatoř Modrá</i> .....	73
11.2.2	<i>Měřicí stanoviště - město Frýdek Místek</i> .....	75
11.2.3	<i>Měřicí stanoviště - rozvodná stanice Přeštice</i> .....	76
11.3	SPEKTRÁLNÍ MĚŘENÍ .....	80
<b>12</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>83</b>
12.1	SHRNUTÍ VLASTNÍHO PŘÍNOSU .....	83
12.2	NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU .....	83
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>84</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>85</b>
	<b>SEZNAM PROJEKTŮ, NA KTERÝCH AUTOR SPOLUPRACOVAL .....</b>	<b>88</b>
	<b>SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA .....</b>	<b>89</b>

## 1 Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Význam
$\lambda$	(nm)	vlnová délka
$K(\lambda)$	( $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ )	světelná citlivost fotopického vidění
$K'(\lambda)$	( $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ )	světelná citlivost skotopického vidění
$K''(\lambda)$	( $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ )	světelná citlivost mezopického vidění
$L$	( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	jas
$L_a$	( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	adaptační jas
$L_p$	( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	fotopický jas
$L_s$	( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	skotopický jas
$L_{\text{mes}}$	( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	mezopický jas
$L_e(\lambda)$	( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ )	spektrální zář
$E$	(lx)	osvětlenost
$E_n$	(lx)	normálová osvětlenost
$I$	(cd)	svítivost
$\Omega$	(sr)	prostorový úhel
S/P	(-)	poměrový ukazatel skotopického a mezopického vidění
$V(\lambda)$	(-)	poměrná spektrální citlivost zraku pro fotopické vidění
$V'(\lambda)$	(-)	poměrná spektrální citlivost zraku pro skotopické vidění
$V''(\lambda)$	(-)	poměrná spektrální citlivost zraku pro mezopické vidění
$S_\lambda$	(-)	poměrná spektrální charakteristika světelného zdroje
$M(m)$	(-)	normalizovaná funkce upravující průběh maxima
$m$	(-)	koefficient závislý na adaptačních podmínkách ( $0 \leq m \leq 1$ )
$\Phi$	(lm)	celkový světelný tok
$\Phi_\rho$	(lm)	odražený světelný tok
$\Phi_\alpha$	(lm)	pohlčený světelný tok
$\Phi_\tau$	(lm)	propuštěný světelný tok
ULR	(-)	celkový světelný tok vyzařovaný do horního poloprostoru
ULOR	(lm)	světelný tok vyzařovaný přímo ze svítidla do horního poloprostoru
DLOR	(lm)	světelný tok odražený od povrchů okolních oblastí
$\rho$	(-)	činitel odrazu
$X$	(-)	parametr charakterizující podíl fotopické a skotopické světelné citlivosti ( $0 \leq X \leq 1$ )
$\beta$	(-)	konstanta
$a$	(-)	konstanta
$b$	(-)	konstanta
$n$	(-)	počet iteračních kroků
$x$	(-)	koefficient závislý na adaptačních podmínkách ( $0 \leq x \leq 1$ )
mags	( $\text{mag}\cdot\text{arcsec}^{-2}$ )	naměřená hodnota přístrojem SQM
$e_v$	(-)	systematická chyba
$S$	(s)	hodnota času expozice
$Y$	(-)	vybuzení pixelu ( $0 \leq Y \leq 1$ ) (-)



Zkratka	Význam
atd.	a tak dále
apod.	a podobně
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování (Commission Internationale de l'Éclairage)
ČSN	Česká státní norma
E	environmentální zóna
IAU	Mezinárodní astronomická unie (International astronomical union)
Obr.	obrázek
Tab.	tabulka
EV	expoziční čas (exposure value)
AEB	automatické nastavení závěrky (automatic exposure bracketing)
RAW	třída souborových formátů
R	označení barvy - červená
G	označení barvy - zelená
B	označení barvy - modrá
A/D	analogově digitální převodník
CMOS	technologie výroby senzorů (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor)
CCD	elektronická součástka používaná pro snímání obrazové informace (Charge-coupled device)
DSLR	digitální zrcadlový fotoaparát
ISO	parametr určující výslednou expozici snímku
ASA	citlivost fotografického filmu
LED	polovodičový světelný zdroj (Light-Emitting Diode)

## 2 Úvod

Neustálý vývoj nových technologií posunuje lidské možnosti stále kupředu. Tento vývoj se týká i umělého osvětlení, které je již nedílnou součástí společnosti a v řadě případů ulehčuje a umožňuje využít lidský potenciál v plné síle. Umělé osvětlení rovněž přispívá nejen k bezpečnosti provozu uživatelů komunikací, ale i dalších dopravních cest, jako jsou např. železniční, letecká a lodní doprava.

Umělé osvětlení vyžaduje pro svoji činnost elektrickou energii a tím tak přispívá ke spotřebě neobnovitelných i obnovitelných zdrojů energie. V současné době je kladen značný důraz na úsporu a co nejefektivnější využití těchto zdrojů.

V odborné společnosti zabývající se světelnou technikou je pojem rušivé světlo (někdy také označován jako světelné znečištění) dobře znám. Kvantifikací rušivého světla je možné vyhodnotit efektivnost nejen dané osvětlovací soustavy, ale i větších oblastí, které zahrnují různé zdroje rušivého světla (např. centra měst, kde se vyskytuje vedle veřejného osvětlení i architektonické osvětlení, osvětlení reklamních ploch, osvětlení privátních prostor, atd.) a tak snížit celkový elektrický příkon využívaný pro osvětlování.

Současná měření světelně-technických parametrů (jas, osvětlenost) probíhají v mezích fotopického vidění. Pro nízké úrovně (skotopické vidění) jasů a osvětleností má lidské oko odlišnou křivku citlivosti, než je tomu u denního vidění (fotopické vidění). Mezi denním viděním a nočním viděním je oblast mezopického vidění.

Měření nízkých úrovní jasů se využívá ke zjištění vlivu rušivého světla na noční oblohu. Rušivé světlo způsobují následující zdroje:

- světelný tok vycházející ze svítidel veřejného osvětlení,
- světelný tok oken i domácností,
- světelný tok reklamních tabulí,
- venkovní osvětlení průmyslových, nákupních a zábavních center a sportovišť.

Nemalý vliv na velikost rušivého světla mají atmosférické podmínky (zatažená obloha, mlha, sněžení, déšť) a obsah prachových částic ve vzduchu (smog). [43]

V první části této práce je rozebrán základní princip lidského zraku a rozdíly mezi jednotlivými systémy vidění. Kapitola se věnuje podrobněji mezopickému vidění, jež je přechodem mezi fotopickým (denním) a skotopickým (nočním) viděním.

Další část práce se zabývá rušivým světlem. Jsou zde popsány jednotlivé zdroje rušivého světla a normativní požadavky k jeho omezení.

V následujících kapitolách jsou popsány systémy mezopické fotometrie definované mezinárodní komisí pro osvětlování CIE a její doporučení způsobu výpočtu mezopického jasů, popis základního principů měření jasů a využití nekonvenčních metod měření jasů.

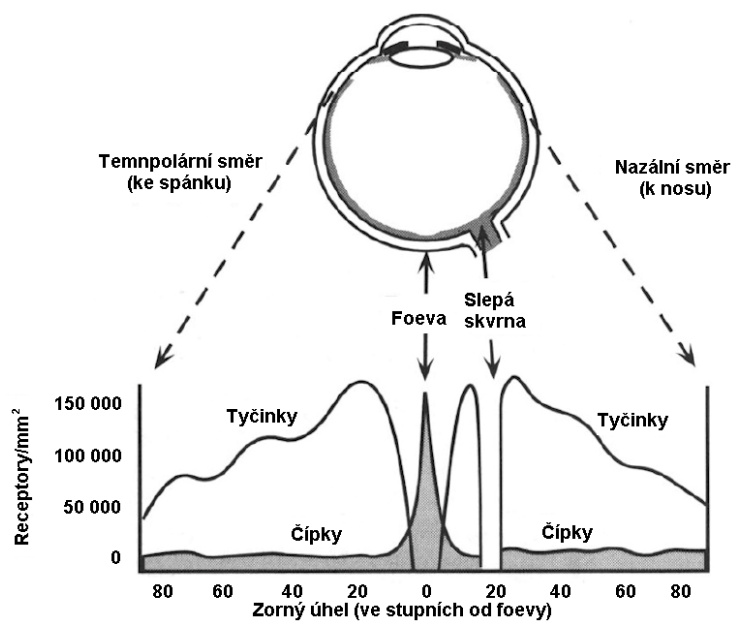
Stěžejní část disertační práce popisuje nově navržené metodiky vyhodnocení jasů noční oblohy a doporučuje způsob stanovení environmentálních zón v České Republice. Je zde rovněž uveden návrh měřicího řetězce pro přímé měření jasů v mezopické oblasti vidění.

### 3 Spektrální citlivost lidského oka

V této části práce je uveden teoretický rozbor týkající se fotopického, mezopického a skotopického vidění a základních vlastností lidského oka. Z dosavadních poznatků se vše kolem měření světelných veličin pohybuje v oblasti fotopického vidění, avšak stále se rozvíjející civilizace si žádá zkoumání těchto veličin nejen během denního světla, ale i v nočních hodinách.

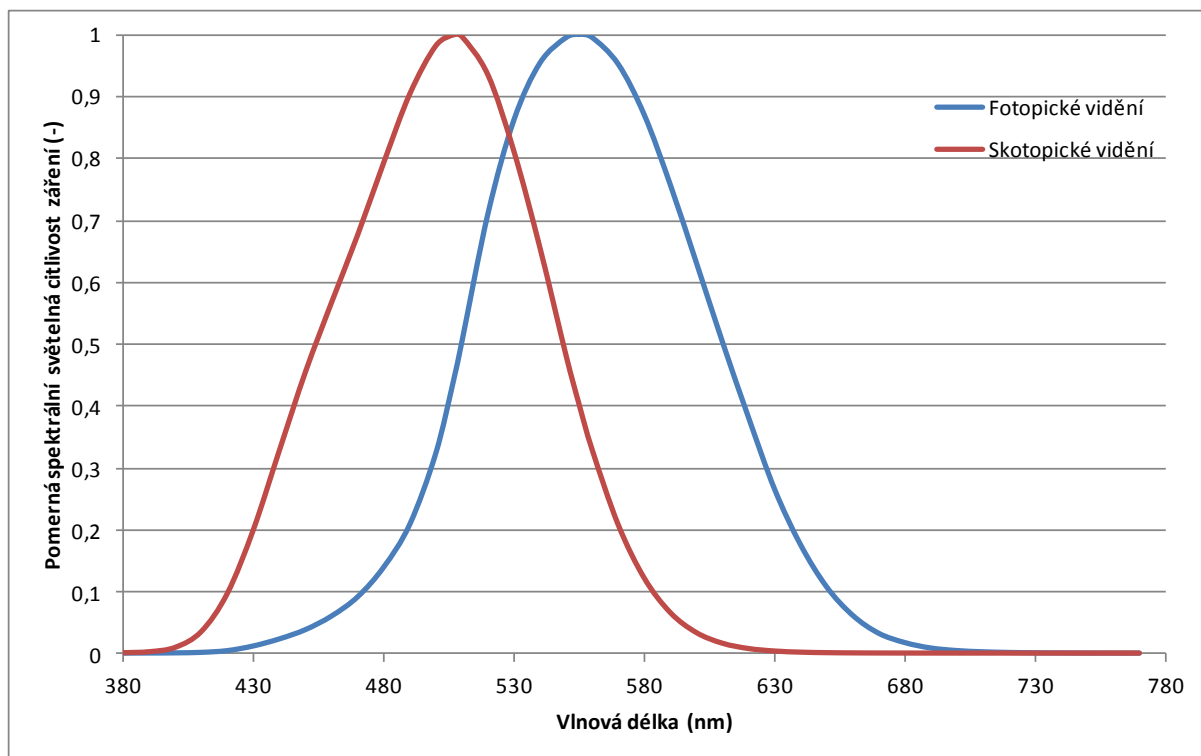
#### 3.1 Zrak a vidění

Lidské oko je jedinečný orgán, který reaguje na světelné záření v závislosti na jeho vlnové délce. Jako jedinečný orgán má oko každého člověka svou individuální charakteristiku. Při denním osvětlení je spektrální citlivost lidského oka určena citlivostí čípků koncentrovaných ve střední části oka (Obr. 1) a pro fotopické vidění je nejcitlivější na světlo o vlnové délce 555 nm. U skotopického vidění se uplatňují více tyčinky rozmístěné kolem střední části oka, které jsou až 1000 krát citlivější, než čípky. Tyčinek je v sítnici asi 20 krát více než čípků (uvádí se asi 120 miliónů tyčinek a 6 miliónů čípků) a jsou propojené ve větších skupinách. To zvyšuje citlivost zrakového vnímání při velmi nízkých hladinách světla, nicméně dochází k tomu na úkor prostorového rozlišení. [39]



Obr. 1: Rozložení čípků a tyčinek na sítnici oka. [30]

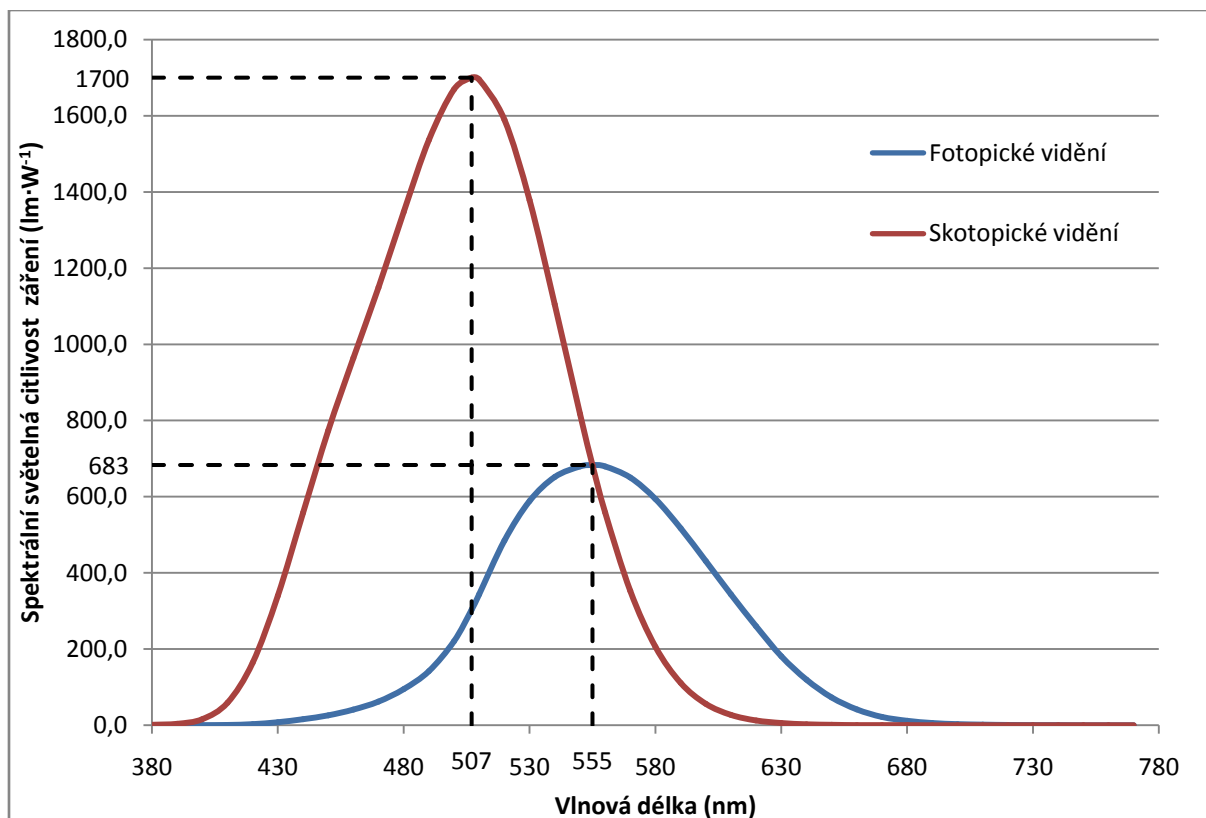
Spektrální křivka citlivosti lidského oka se udává v poměrných hodnotách vztažených k maximální absolutní hodnotě citlivosti (Obr. 2). Pro zajištění jednotnosti světelně-technických výpočtů s ohledem na různou spektrální citlivost lidského oka jednotlivých pozorovatelů přijala mezinárodní komise pro osvětlování dohodu o hodnotách poměrné spektrální citlivosti tzv. normálního fotometrického pozorovatele.



Obr. 2: Poměrná spektrální citlivost zraku pro fotopické a skotopické vidění. [4]

Jak již bylo zmíněno, při fotopickém vidění je maximum spektrální citlivosti lidského oka při vlnové délce  $\lambda = 555$  nm a pro skotopické vidění maximum spektrální citlivosti lidského oka při vlnové délce  $\lambda = 507$  nm. Mezi křivkami spektrální citlivosti fotopického a skotopického vidění jsou křivky mezopického vidění, které závisí na velikosti adaptačního jasu.

Průběhy absolutních hodnot světelné citlivosti zraku pro různé adaptační jasy uvedené na Obr. 3 umožňují převod energetických veličin záření na světelně-technické veličiny. Je zřejmé, že pro různé úrovně adaptačních jasů (jas, na který je zrak lidského oka přizpůsoben) pozorovatele se světelný tok odpovídající zářivému toku určitého světelného zdroje může významně lišit. [1]



Obr. 3: Průběhy absolutních hodnot světelné citlivosti záření pro fotopické a skotopické vidění.[3]

Důležité však je, že při vlnové délce  $\lambda = 555$  nm (maximum spektrální citlivosti lidského oka pro fotopické vidění) je spektrální citlivost lidského oka shodná pro fotopické i skotopické vidění (Obr. 3) a platí následující vztah:

$$K(555) = \zeta'(555) = 583 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \quad (1)$$

kde:

$K(555)$  spektrální citlivost fotopického zraku pro  $\lambda = 555$  nm ( $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ );

$K'(555)$  spektrální citlivost skotopického zraku pro  $\lambda = 555$  nm ( $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ ).

Ze vzorce (1) vyplývá, že v případech fotopického a skotopického vidění lze pracovat se světelnými toky udávanými v lumenech.

Z grafů na Obr. 3 můžeme odečíst maximum absolutních hodnot křivek spektrální citlivosti lidského oka pro fotopické vidění  $K_m = K(555) = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$  a pro skotopické vidění  $K'_m = K'(507) = 1700 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ .

Uvědomíme-li si, že mezopické vidění představuje kombinaci denního a nočního vidění, je logické vycházet z podmínky vyjádřené vztahem (1). Následně lze konstatovat, že všechny spektrální průběhy citlivostí zraku zjištěné pro různé adaptační jasy v oblasti fotopického, mezopického a skotopického vidění vykazují při záření základní vlnové délky  $\lambda_m = 555$  nm stejné hodnoty citlivosti. [4]

$$K(555) = K'(555) = K''(555) = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \quad (2)$$

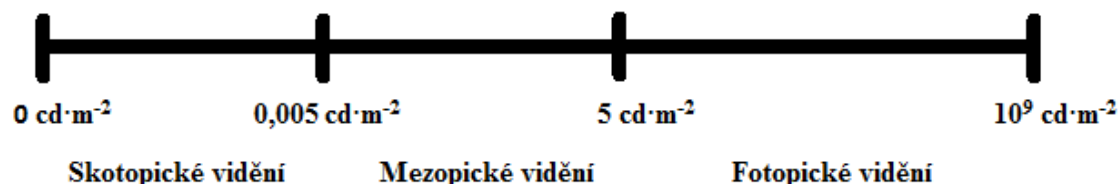
kde:

$K(555)$  spektrální citlivost fotopického vidění pro  $\lambda = 555 \text{ nm}$  ( $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ );

$K'(555)$  spektrální citlivost skotopického vidění pro  $\lambda = 555 \text{ nm}$  ( $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ );

$K''(555)$  spektrální citlivost mezopického vidění pro  $\lambda = 555 \text{ nm}$  ( $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ ).

V důsledku toho je možné pracovat se světelnými toky udávanými v lumenech nejen v oblasti denního a nočního vidění, ale také v oblasti mezopického vidění. Obdobným postupem jako v případě fotopického a skotopického vidění lze stanovit poměrné spektrální světelné citlivosti, jejich absolutní hodnoty a jim odpovídající maxima pro různé adaptační jasy také v oblasti mezopického vidění.



Obr. 4: Hranice adaptačních jasů spektrálních citlivostí vidění lidského zraku.[21], [35]

Na Obr. 4 jsou znázorněny hranice adaptačních jasů pro jednotlivé oblasti vidění.

### 3.1.1 Fotopické vidění

Citlivost zraku člověka k záření různých vlnových délek závisí na parametrech světelného mikroklimatu vytvořeného v osvětlovacím prostoru, a je tedy určována jasnem, kterému se zrak pozorovatele přizpůsobuje. Křivka spektrální citlivosti pro fotopické vidění byla odvozena od zraků normálního pozorovatele, který porovnával jasy monochromatického zdroje světla o vlnové délce 555 nm (na tuto vlnovou délku je lidské oko nejcitlivější) se zdrojem jiného monochromatického světla. Následně se snižoval výkon zdroje s vlnovou délkou 555 nm, až dokud neměl pozorovatel pocit, že oba zdroje mají stejný jas. Pokus se opakoval pro mnoho vlnových délek a pro hodně normálních pozorovatelů. Výsledná průměrná křivka byla přijata CIE jako standardní křivka spektrální citlivosti lidského oka. [6]

Fotopické (denní) vidění se uplatňuje zejména v denním životě člověka, což je pro většinu populace hlavní aktivní část dne, kdy je oko namáháno. Denní světlo je spojeno zejména s činností čípků, fotoreceptorů, umožňujících barevné vidění, které jsou umístěny převážně v centrální části sítnice v žluté skvrně. Pro fotopické vidění se nejčastěji uvažuje hladina jasu vyšší než 5  $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Pro fotopické vidění jsou přizpůsobeny i světelně-technické výpočty a fotometrická měření se provádějí téměř výhradně v podmínkách denního vidění. [4]

### 3.1.2 Skotopické vidění

Oproti fotopickému vidění je druhým krajním případem činnosti zraku člověka skotopické (noční) vidění. Tato křivka byla získána obdobným způsobem, jako u fotopického vidění.

Avšak maximální citlivosti lidského oka u skotopického vidění je při vlnové délce  $\lambda = 507 \text{ nm}$ .

Skotopické vidění je spojeno převážně s činností výrazně citlivějších fotoreceptorů oka, tyčinek, které jsou rozmístěny v okolí žluté skvrny a v dalších krajních oblastech sítnice. Noční vidění je většinou spojováno s velmi nízkými adaptačními jasy pohybujícími se v řádech  $10^{-3} \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , maximem do  $0,005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ . Při takto nízkých jasech nemá hodnocení osvětlovacích soustav v praxi význam a proto nejsou měřicí přístroje kalibrovány na křivku skotopického vidění tzv. normálního fotometrického pozorovatele.

### 3.1.3 Mezopické vidění

Třetí případ citlivosti zraku člověka, mezopické vidění, je v oblasti mezi denním a nočním viděním, kdy se zrakový orgán musí přizpůsobit jasům, které se nacházejí mezi oběma zmíněnými krajními případy. Adaptační jasy v této oblasti se pohybují od  $0,005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  do  $5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ .

S adaptačními jasy mezopické oblasti se můžeme setkat ve venkovních osvětlovacích soustavách (osvětlení komunikací), v nouzových osvětlovacích soustavách, nebo při měření a vyhodnocování rušivého světla.

Skutečnost, že všechny fotometrické přístroje jsou kalibrovány na fotopické vidění způsobuje jisté odchylky mezi subjektivním vjemem pozorovatele a objektivními hodnotami fotometrických veličin v mezopické fotometrii. Velikost odchylek souvisí nejen s adaptačními podmínkami, ale i se spektrálním složením záření.

## 3.2 Změny spektrální citlivosti v oblasti mezopického vidění

Jak již bylo naznačeno výše, mezopické vidění je oblast adaptace na jasy od  $0,005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  do  $5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ . S adaptačními jasy z této oblasti vidění se nejčastěji setkáváme u osvětlení venkovních prostor (vozovka, parkoviště, chodník), či v aplikacích nouzového osvětlení u vnitřních prostor.

Mezopické vidění je adaptační stav, při kterém dochází k účasti obou fotoreceptorů v lidském oku (čípky a tyčinky) na snímání obrazu. V těchto případech mají čípky ještě dostatečnou citlivost k tomu, aby zpracovávaly barevný obraz a tyčinky, které zajišťují monochromatické vidění, ještě nejsou na nejvyšší hladině své citlivosti. Výsledná křivka je pak ovlivněna vlastnostmi obou druhů fotoreceptorů.

Míra citlivosti na světelný podnět v podmínkách mezopického vidění vede k potřebě definovat průběh citlivosti zvlášť pro každý adaptační jas, neboť měnící se citlivosti fotoreceptorů v tak širokém rozsahu zásadně ovlivňuje spektrální průběh vnímání.

### 3.2.1 Poměrový ukazatel skotopického a mezopického vidění

U mezopického vidění při současné funkci obou druhů fotoreceptorů (čípky a tyčinky), definujeme jejich poměr, kterým se podílejí na procesu vidění. Tento poměr bývá označován jako S/P. Jde o poměr mezi příspěvkem skotopického vidění k fotopickému vidění.

$$S/P \text{ ratio} = \frac{K'_m \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\lambda) \cdot V'(\lambda) \cdot d\lambda}{K_m \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (3)$$

kde:

- $K_m$  maximální hodnota spektrálního průběhu veličiny  $K(\lambda)$ ,  $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ ;
- $K'_m$  maximální hodnota spektrálního průběhu veličiny  $K'(\lambda)$ ,  $K'_m = 1700 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ ;
- $S_{\lambda}$  poměrná spektrální charakteristika světelného zdroje (-);
- $V(\lambda)$  poměrná spektrální citlivost zraku pro fotopické vidění (-);
- $V'(\lambda)$  poměrná spektrální citlivost zraku pro skotopické vidění (-).

Tab. 1 ukazuje, jak se liší procentuálně vypočítaný mezopický jas oproti jasů, který bychom odečetli z klasického jasoměru s fotopickým spektrálním filtrem respektujícím křivku citlivosti lidského oka.

Tab. 1: Procentuální rozdíly mezi fotopickým jasem a vnímaným jasem při mezopickém vidění pro světelné zdroje s různým S/P poměrem. [5]

S/P (-)	Adaptační fotopický jas ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )		
	0,03	0,3	3
0,65	-24 %	-10 %	-3 %
1,00	0 %	0 %	0 %
1,35	20 %	9 %	3 %
2,15	61 %	28 %	9 %

### 3.2.2 Matematický zápis spektrálního průběhu mezopického vidění

Pro jednoduchý matematický popis spektrálního průběhu mezopické křivky můžeme použít jednoduchou lineární kombinaci fotopického a skotopického vidění, jak je doporučeno CIE:

$$M(m) \cdot V_{\text{mes}}(\lambda) = m \cdot V(\lambda) + (1 - m) \cdot V'(\lambda) \quad (4)$$

kde:

- $M(m)$  normalizovaná funkce upravující průběh maxima  $V_{\text{mes}}(\lambda)$ ;
- $V_{\text{mes}}(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost mezopického záření (-);
- $m$  koeficient závislý na adaptačních podmínkách ( $0 \leq m \leq 1$ ) (-)
- $V(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost fotopického záření (-);
- $V'(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost skotopického záření (-).



$$L_{mes} = \frac{683}{V_{mes}(\lambda)} \int V_{mes}(\lambda) \cdot L_e(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

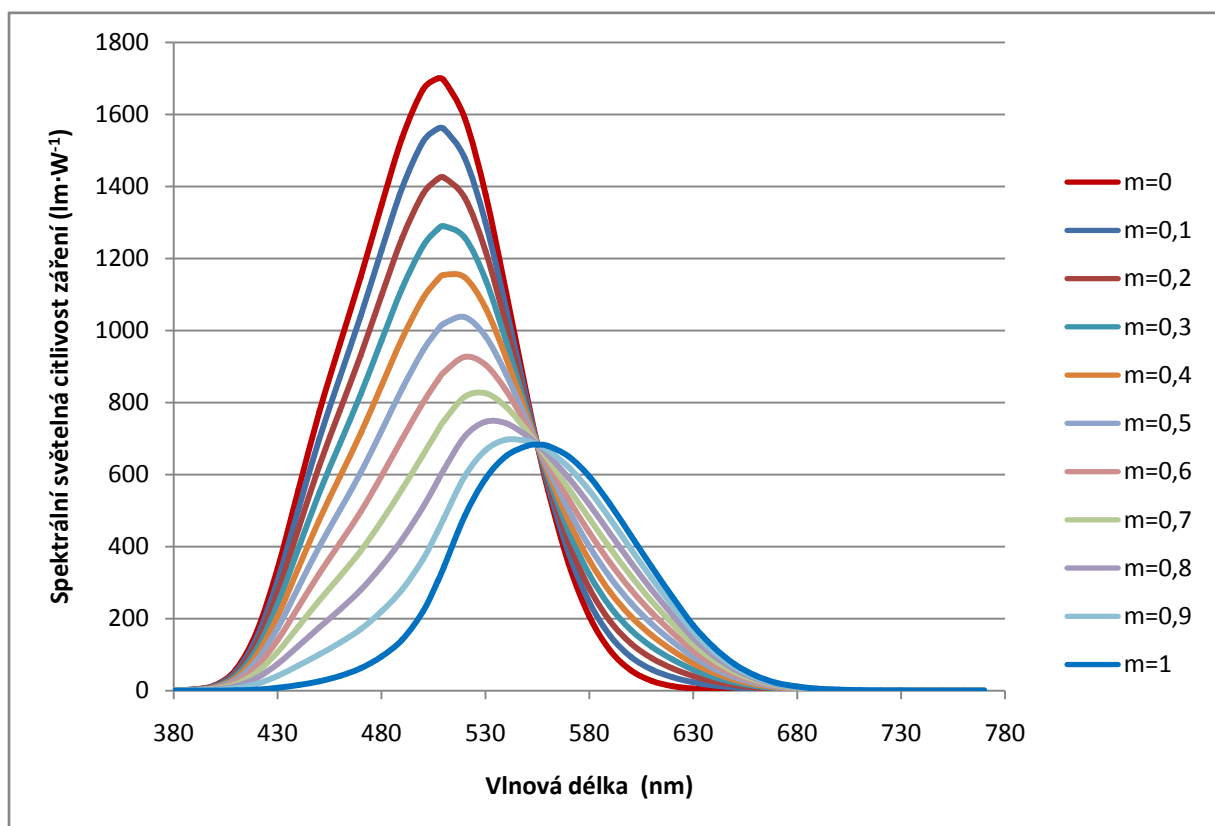
kde:

$L_{mes}$  mezopický jas (při  $L_{mes} \geq 5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2} \rightarrow m = 1$  a při  $L_{mes} \leq 0,005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2} \rightarrow m = 0$ );

$V(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost fotopického záření (-);

$V'(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost skotopického záření (-);

$L_e(\lambda)$  spektrální zář ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ).



Obr. 5: Křivky spektrálních citlivostí mezopického vidění pro různé koeficienty  $m$ . [3]

Uvedené rovnice poskytují základ k výsledkům při sestavování rovnic průběhů charakteristik mezopického vidění.

Hladiny jednotlivých adaptačních osvětleností nejsou jedinou proměnnou upravující průběh křivky citlivosti. Respektive, nejen rozdílné citlivosti čípků a tyčinek, ale i jejich polohy maxim ve smyslu osy vlnové délky hrají významnou roli.

## 4 Rušivé světlo

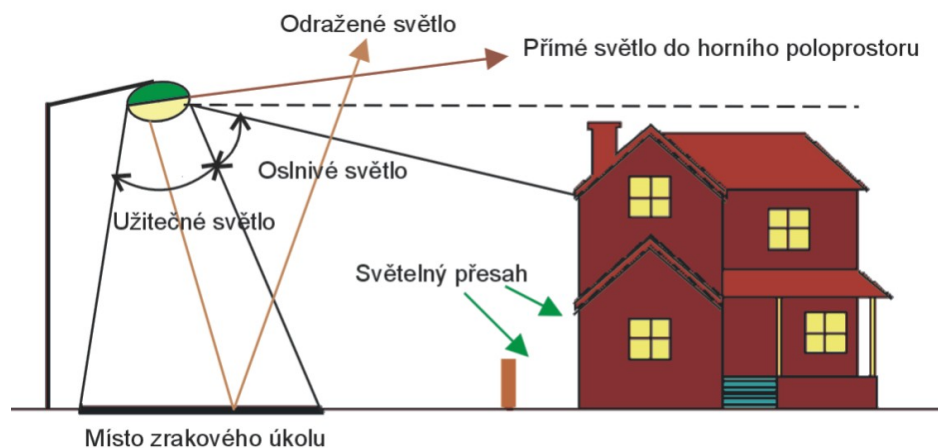
V současné době je rušivé světlo hodně diskutovanou kapitolou. V mnoha zdrojích se používá výraz světelné znečištění. Tento výraz je doslovný překlad z anglického výrazu "light pollution". Slovem znečištění se rozumí, že škodlivá látka způsobí znečištění okolního prostředí a i po odstranění znečišťujícího elementu je vliv znečišťující látky znatelný. U světla tomu tak není. Pokud přestane působit zdroj rušivého světla, přestane existovat i rušivé světlo.

Světlo není znečišťovatelem ovzduší, ale pouhým indikátorem existence atmosféry a jejího skutečného znečištění. Částice v ovzduší světlo rozptylují, a tak zvyšují závojevý jas oblohy. V místech výskytu flóry a fauny může umělé osvětlení (přímé nebo odražené) narušit přirozený noční stav a ohrozit jejich zdravý vývoj. Rušivé světlo, které proniká okny do příbytků, může narušovat spánek obyvatel.

### 4.1 Kategorizace rušivého světla

Z hlediska důsledků rušivého světla na proces vidění a vlivů na životní podmínky můžeme rozdělit projevy rušivého světla na:

- závojevý jas oblohy;
- oslnivé světlo;
- světelný přesah;
- podíl horního světla ULR.



Obr. 6: Vznik různých forem rušivého světla ve venkovním prostředí. [4]

Obr. 6 popisuje různé formy světelného toku vyzařovaného ze světelného zdroje, v tomto případě svítidla veřejného osvětlení, které se podílejí na osvětlení místa zrakového úkolu a na vzniku rušivého světla.

Rušivé světlo reprezentuje celkový souhrn nepříznivých vlivů umělého venkovního osvětlení. Rušivé světlo obecně definujeme jako nadměrné elektromagnetické záření ve viditelné oblasti produkované umělými světelnými zdroji šířící se ve venkovním prostoru, které je nežádoucí.

### 4.1.1 Závojevý jas oblohy

Závojevý jas oblohy je způsoben světelným tokem vyzařovaným primárně z umělých světelných zdrojů, tzn. svítidel venkovního osvětlení a sekundárně odrazem od povrchů, na nichž dochází k odrazu světelného toku. Světelný tok se pak šíří atmosférou.

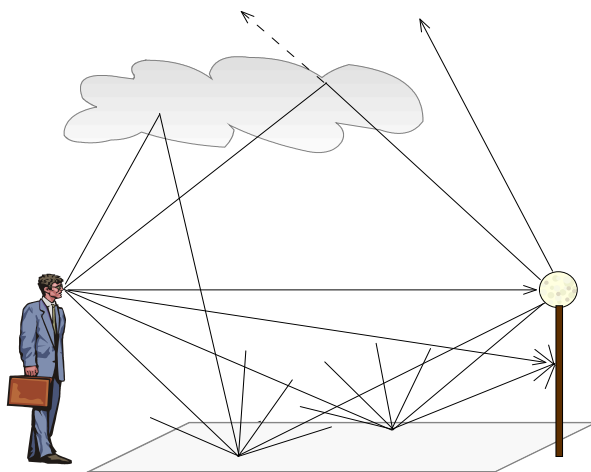
Vlastnosti ovlivňující prostupnost světelného záření atmosférou jsou dány chemickým složením atmosféry, jako jsou vodní páry, prachové částice a aerosoly tvořící bariéru prostupujícímu světlu. [33] Každá taková mikročástice světelný tok částečně odrazí, částečně pohltí a částečně projde jejím povrchem. Pro celkový světelný tok platí:

$$\Phi = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t \quad (6)$$

kde:

- $\Phi$  celkový světelný tok (lm);
- $\Phi_r$  odražený světelný tok (lm);
- $\Phi_a$  pohlcený světelný tok (lm);
- $\Phi_t$  propuštěný světelný tok (lm).

Důležitá je zejména odražená složka světelného toku, která se zpět vrací směrem k pozorovateli nebo opět naráží na zmíněné bariéry a je opět rozptylována, pohlcována a propouštěna. Výsledkem je interakce světla a prostředí, projevující se vznikem tzv. závojevého jasu (Obr. 7). Díky zvýšení jasu oblohy klesá kontrast mezi jasy objektů na obloze a jasem oblohy, který zvyšuje adaptační úroveň zrakového orgánu. To snižuje pozorovatelnost objektů za touto interakcí, které jsou zájmem např. astronomického pozorování. Závojevý jas oblohy se pak se svým významem v astronomické praxi stává hlavním tématem rušivého světla.



Obr. 7: Rozptyl světla na částicích a vznik závojevého jasu. [4]

### 4.1.2 Oslivé světlo

Dalším projevem rušivého světla je oslivé světlo (Obr. 6). Tento druh rušivého světla vniká do obytných prostor přímo okenními otvory zejména v nižších patrech panelových

domů a rodinných domů. Světelný tok způsobující toto rušivé světlo vychází nejen ze svítidel veřejného osvětlení (vesnice a odlehlé části měst), ale i z reklamních tabulí (centra měst).

### 4.1.3 Světelný přesah

Světelným přesahem se rozumí nežádoucí světlo distribuované za své funkční hranice, tzn. do prostor jemu neurčených. Příkladem je světlo ze svítidel veřejného osvětlení dopadající do příbytků nebo světlo osvětlující i sousední pozemky. Takové světlo může narušovat soukromí obyvatel. Světelný přesah se projevuje zvýšenou vertikální osvětleností ( $E_v$ ) svislých ploch mimo její hranice.

### 4.1.4 Podíl horního světla ULR

ULR je podíl světelného toku vyzářeného přímo do horního poloprostoru k celkovému světelnému toku vyzařujícím ze svítidla.

Celkový světelný tok, který se šíří do horního poloprostoru a zvyšuje tak závojevý jas oblohy, je tvořen přímou složkou a složkou odraženou od terénu a objektů v okolí.

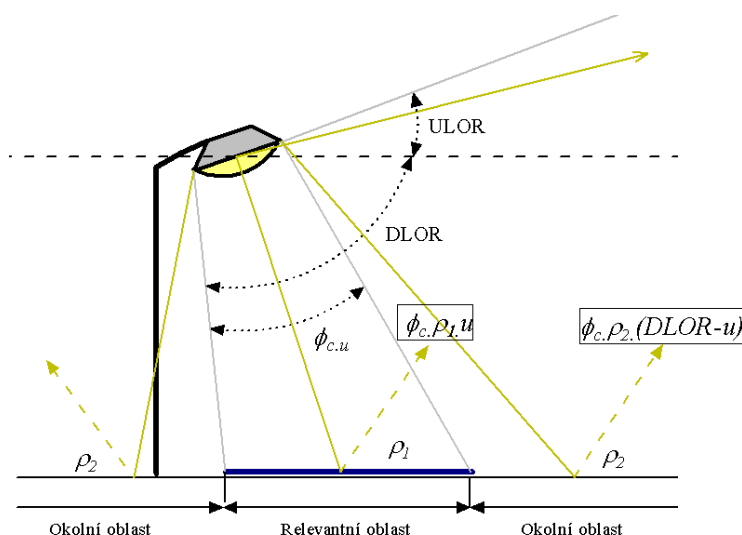
$$ULR = \frac{ULOR}{ULOR + DLOR} \quad (7)$$

kde:

ULR celkový světelný tok vyzařovaný do horního poloprostoru (-);

ULOR světelný tok vyzařovaný přímo ze svítidla do horního poloprostoru (lm);

DLOR světelný tok odražený od povrchů okolních oblastí (lm).



Obr. 8: Přímá a odražená složka světelného toku. [4]

Parametry svítidel jako je účinnost, ULOR a DLOR (Obr. 8) je možné získat u výrobce, výrazně se do přesnosti výpočtu promítá definování odraznosti povrchu v daném místě. Např. povrch vozovky je standardizován třídami R1, R2, R3 s činitelem odrazu  $\rho = 0,07$  až  $\rho = 0,10$ . [34]

## 4.2 Normativní požadavky na rušivé světlo

V normě ČSN EN 12464-2 jsou uvedeny mezní hodnoty rušivého světla pro ochranu a zlepšení nočního prostředí. Limity rušivého světla jsou rozděleny do dvou kategorií:

- limity rušivého světla ve venkovních osvětlovacích soustavách k minimalizaci problémů pro osoby, floru a faunu - Tab. 2;
- limity rušivého světla pro uživatele cest - Tab. 3.

S ohledem na velikost rušivého světla v závislosti na velikosti aglomerace a atmosférických podmínkách můžeme rušivé světlo zařadit do několika skupin podle normy ČSN EN 12464-2:

- E1 představuje skutečně tmavé prostory jako národní parky a chráněná území;
- E2 představuje oblasti s velmi malým jasnem jako průmyslové a obytné venkovské zóny;
- E3 představuje středně světlé oblasti jako průmyslová a obytná předměstí;
- E4 představuje velmi světlé oblasti jako městská centra a obchodní zóny.

Ve větších zkoumaných oblastech se mohou vyskytovat různé zóny vedle sebe. Pokud je tomu tak, neměly by přecházet environmentální zóny víc, jak o jeden stupeň. Rovněž hranice mezi zónami nejsou skokové, nýbrž postupné.

Tab. 2: Limitní hodnoty světelně technických veličin ve venkovním osvětlení. [1]

Zóna (charakteristika) prostředí	Světlo na objektech		Svítivost svítidla		Světlo nahoru	Jas	
	$E_v$ (lx)		I (cd)		ULR (%)	$L_b$ (cd·m <sup>-2</sup> )	$L_s$ (cd·m <sup>-2</sup> )
	mimo noční klid <sup>a)</sup>	v době nočního klidu	mimo noční klid	v době nočního klidu		fasády budov	značky
E1	2	0	2500	0	0	0	50
E2	5	1	7500	500	5	5	400
E3	10	2	10000	1000	15	10	800
E4	25	5	25000	2500	25	25	1 000

Kde:

$E_v$  největší hodnota svislé (vertikální) osvětlenosti na objektech (lx);

I svítivost každého světelného zdroje v potenciálně rušivém směru (cd);

ULR podíl (poměrná část) světelného toku svítidla (svítidel) vyzařovaného nad horizont v jeho (jejich) pracovní poloze a umístění (%);

$L_b$  největší průměrný jas fasády budov (cd·m<sup>-2</sup>);

$L_s$  největší průměrný jas značek (cd·m<sup>-2</sup>).

<sup>a)</sup> V případě kdy se neuplatňuje noční omezení, větší hodnoty nesmí být překročeny a menším hodnotám se má dát přednost.

Tab. 3: Největší hodnoty prahového přírůstku od jiných než uličních svítidel. [1]

Světelně-technické parametry	Třída osvětlení pozemní komunikace <sup>a)</sup>			
	osvětlení jiné než uliční	ME5	ME4 / ME3	ME2 / ME1
Prahový přírůstek (TI) <sup>b) c) d)</sup>	15 % za předpokladu, že adaptační jas je $0,1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$	15 % za předpokladu, že adaptační jas je $1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$	15 % za předpokladu, že adaptační jas je $2 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$	15 % za předpokladu, že adaptační jas je $5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$
a)	Třídy osvětlení podle EN 13201-2.			
b)	Výpočet TI podle EN 13201-3.			
c)	Tyto limity se použijí v případě, že uživatelé dopravního systému jsou vystaveni omezení viditelnosti základních informací. Hodnoty platí pro relevantní polohu a pro směr pohledu na trasu dopravy.			
d)	V tabulce 5.2 CIE 150:2003 jsou uvedeny příslušné hodnoty závoje jasů $L_v$ .			

#### 4.2.1 Environmentální zóny

Mezinárodní komise pro osvětlování vytvořila Směrnici pro minimalizaci záře oblohy CIE 126-1997 (Guidelines for minimizing sky glow), která vznikla ve spolupráci s Mezinárodní astronomickou unií (International astronomical union, IAU) a za spoluúčasti Mezinárodní společnosti pro temné nebe (International dark-sky association). Tato směrnice je technickou zprávou, která se zabývá teoretickými aspekty záře oblohy a v níž jsou zformovány všeobecné zásady pro omezení záře oblohy. Jsou zde uvedeny limitní hodnoty podílu světelného toku svítidel do horního poloprostoru pro jednotlivé kategorie zón prostředí z hlediska potřeb astronomických pozorování. Zóny E1 - E4 jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4: Největší povolený podíl světelného toku svítidel vyzařovaného do horního poloprostoru. [6]

Zóna	Podíl světelného toku svítidel do horního poloprostoru (%)
E1	0
E2	$\leq 5$
E3	$\leq 15$
E4	$\leq 25$

Rušivé světlo v určité zóně nezávisí pouze na množství „znečišťujícího“ světelného toku vznikajícího ve své vlastní zóně, závisí také na produkci světelného znečištění v sousedních zónách. Proto jsou navrženy vzdálenosti hranic sousedních zón od referenčního bodu. Jedním z referenčních bodů může být například astronomická observatoř v zóně E1 - Tab. 5.

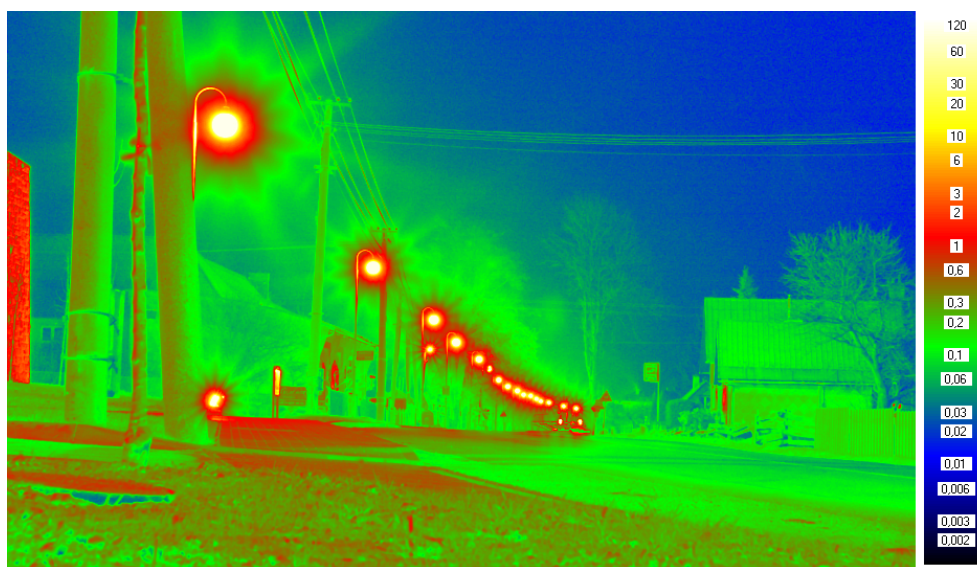
Tab. 5: Minimální délky mezi zónami vztahované k referenčnímu bodu v zóně E1. [6]

Třída zóny referenčního bodu	Minimální vzdálenost hranic sousedních zón podle tříd [km]		
	E1 - E2	E2 - E3	E3 - E4
E1	1	10	100
E2		1	10
E3			1
E4	žádné omezení		

## 4.3 Zdroje rušivého světla

### 4.3.1 Osvětlení pozemních komunikací

Osvětlení pozemních komunikací zahrnuje osvětlení v městských aglomeracích (ulice, chodníky, cyklistické stezky, přechody pro chodce), osvětlení důležitých dopravních uzlů a dálkových komunikací, osvětlení dopravních terminálů (autobusových i vlakových nádraží, přecladiště, přístavy apod.). Osvětlení je zjevně nejpočetnější formou venkovního osvětlení a má tudíž velký podíl na vzniku rušivého světla.

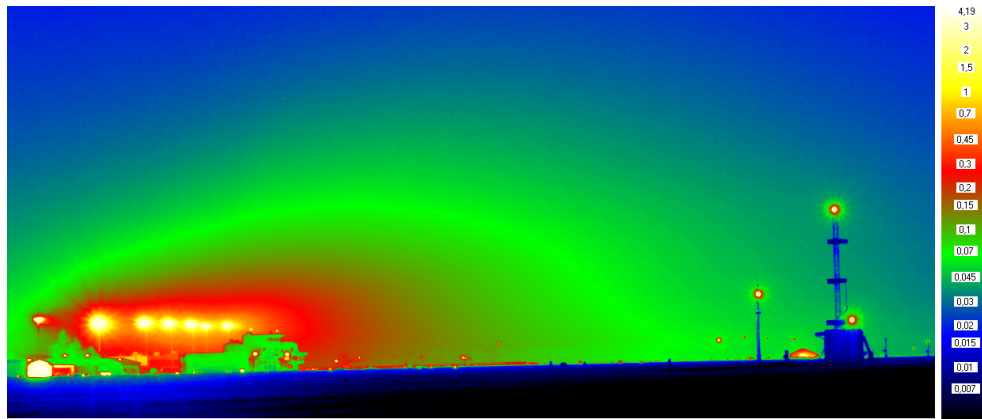


Obr. 9: Veřejné osvětlení se svítidly s nevhodně zvolenou charakteristikou vyzařování.

Návrh osvětlení komunikací se řídí několika pravidly.[32] Jedno z nich je, že svítidla veřejného osvětlení mají mít takovou charakteristiku vyzařování, aby světelný tok ze svítidla dopadal na požadovanou plochu. U soustavy na Obr. 9 jsou zvoleny svítidla s kulovou vyzařovací charakteristikou, a proto je světelný tok distribuován i přímo do horního poloprostoru, což značně zvyšuje velikost rušivého světla a taky snižuje účinnost osvětlovací soustavy.

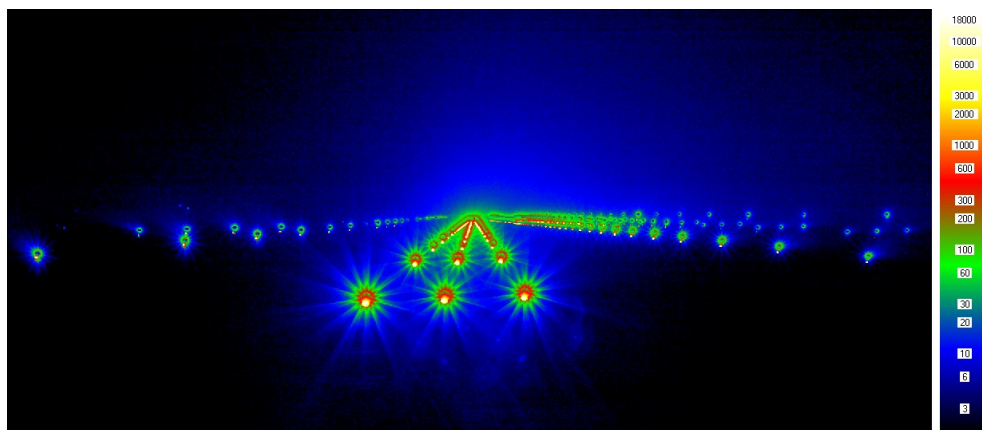
### 4.3.2 Osvětlení letišť

Je záměrně odděleno od pozemních komunikací, neboť jsou zde z důvodů bezpečnosti letového provozu kladeny zvýšené nároky na omezování rušivého světla, zejména oslnění. Od osvětlení pozemních komunikací se také liší tím, že svítidla mohou být přímo určena ke svícení do horního poloprostoru.



Obr. 10: Příklad špatně navrženého osvětlení odbavovací plochy na letišti pomocí svítidel s nesymetrickou vyzařovací charakteristikou.

Během nočního provozu letišť je důležité dobře osvětlit přistávací plochu, tak aby byla bezpečná pro noční přistávání letadel. S nočním provozem je rovněž spojeno osvětlování odbavovacích ploch. Na Obr. 10 je patrné špatné nastavení osvětlení odbavovací plochy. Z jasové mapy vyplývá, že dominantní část světelného toku osvětlovací soustavy je směřována vodorovně a neosvětluje požadovaný prostor odbavovací plochy, ale vzdálené okolí. Volba svítidel s asymetrickou vyzařovací charakteristikou umožňuje nasměrování světelného toku na požadovanou oblast a snížit světelný tok vyzařovaný přímo do horního poloprostoru.



Obr. 11: Osvětlení přistávací dráhy pomocí zabudovaných návěstidel.

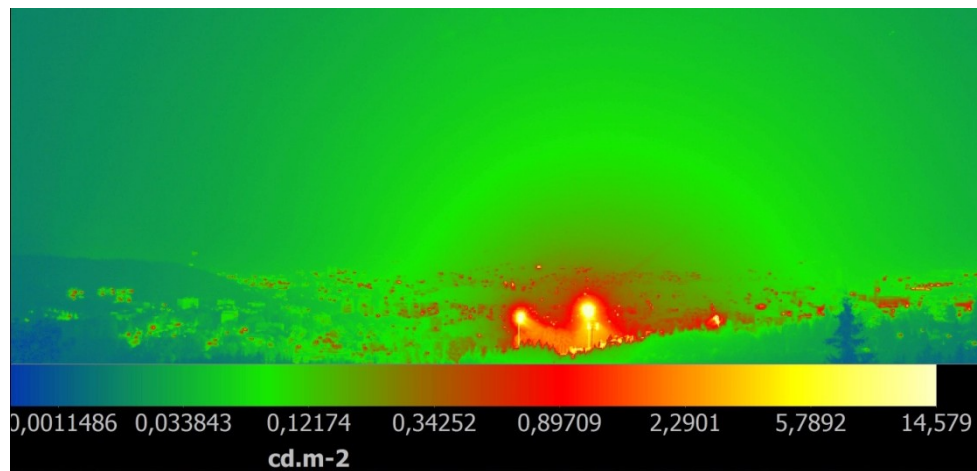
Světelný tok návěstidel je směřován pod určitým úhlem přímo do horního poloprostoru tak, aby byla zajištěna bezpečnost nočního přistání letadel. Takto způsobené rušivé světlo (Obr. 11) ovlivňuje zejména blízkou okolní faunu a flóru, avšak jen po dobu nezbytně nutnou k přistání letadel.

### 4.3.3 Osvětlení venkovních sportovišť

Je specifické použitím svítidel s výkonnými zdroji světla pro dostatečné osvětlení velkých ploch a prostor. Pro možnost vysílání přímého televizního přenosu je nutné dostatečně osvětlit hrací plochu a zároveň omezit oslnění hráčů. Hodnoty oslnění se počítají pro dohodnutá postavení a směry pohledu pozorovatele. [40] K osvětlení sportovišť se používá osvětlování z vysokých stožárů, jak je vidět na Obr. 12. Svítidla na stožárech



několikrát převyšují svým jasem svítidla veřejného osvětlení a způsobují podstatně větší jas noční oblohy.

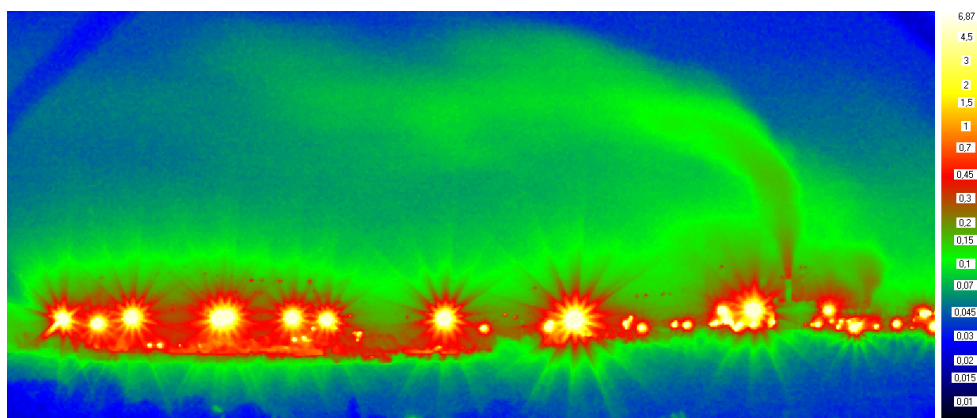


Obr. 12: Jasová mapa s osvětlením stadionu a zvýšeným jasem oblohy nad stadionem.

Při pohledu z místa nad úrovní svítidel osvětlení stadionu je vidět i jas světelných zdrojů. Na jasové mapě (Obr. 12) je uvedena upravená paleta s maximální hodnotou  $14,6 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  pro lepší znázornění jasů noční oblohy. Světelné zdroje v tomto případě dosahují výrazně vyšších hodnot, které již není možné z pořízených snímků korektně vyhodnotit. Toto je způsobeno delším časem expozice snímku pro zachycení jasů noční oblohy.

#### 4.3.4 Osvětlení venkovních pracovišť

Velký výběr svítidel s velkými výkony dovoluje osvětlení rozsáhlých ploch. Tuto možnost využívají průmyslové závody pro osvětlení venkovních pracovních prostor [41] nejen pro nepřetržitou výrobu, ale i pro zajištění bezpečnosti a ochrany. Jedná se o osvětlení velkých výrobních závodů a průmyslových zón, jak je vidět na Obr. 13. Na Obr. 13 je také vidět vliv látek obsažených ve vzduchu na velikost rušivého světla.



Obr. 13: Jasová mapa průmyslové zóny a oblohy nad ní.

#### 4.3.5 Architektonické osvětlení

Jako zdroj rušivého světla může být i osvětlení významných památek a budov, různých monumentů a osvětlení parků a zahrad. V této oblasti se často používají svítidla svítící do horního poloprostoru, které mají významný podíl na závojevém jasů oblohy. [42]

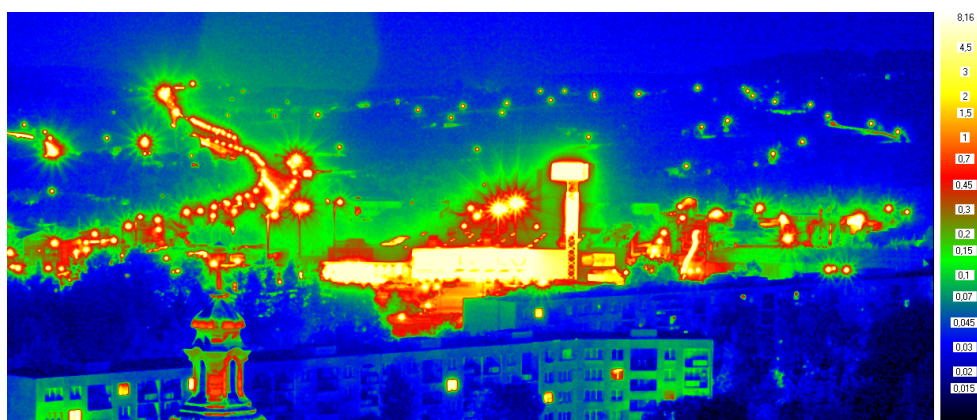


Obr. 14: Jasová mapa osvětleného historického náměstí a přilehlých budov.

Na Obr. 14 je vidět osvětlené historické náměstí v centru města. Z jasové mapy je na první pohled vidět výrazně vyšší jas na stěnách historických budov náměstí, než na okolních panelových budovách.

#### 4.3.6 Reklamní osvětlení

Jedná se o osvětlení billboardů, reklamních ploch, směrových ukazatelů obchodních center, osvětlení čerpacích stanic apod. Hlavním problémem bývá nepřiměřeně vysoká hladina osvětlenosti těchto ploch.



Obr. 15: Jasová mapa s reklamním osvětlením a ukazatelem obchodního domu.

Reklamní tabule na ukazateli u obchodního domu má několikanásobně vyšší jas, než okolní prostředí (Obr. 15). Světelný tok vycházející z těchto ploch směřuje přímo do horního poloprostoru a zvyšuje velikost rušivého světla. Dalším nemalým vlivem je i odražený světelný tok z reklamních tabulí umístěných přímo na obchodním domě.

#### 4.3.7 Osvětlení z oken domácností

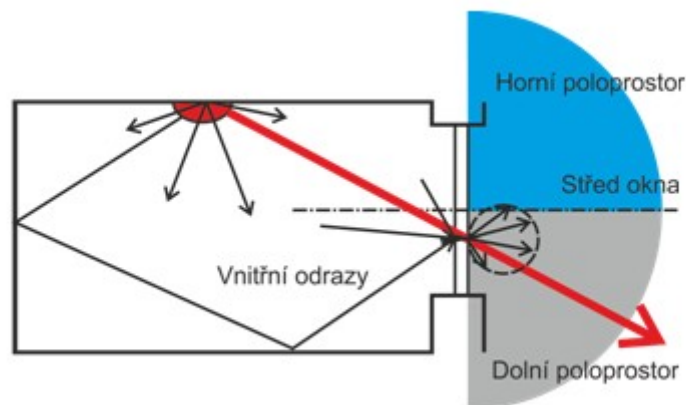
Nezanedbatelným zdrojem rušivého světla jsou okna domácností. Světelný tok vyzařovaný oknem do horního poloprostoru závisí na zdroji světla, jeho pozici v místnosti a na vlastnostech okna (včetně závěsů, rolet, apod.). Na jasové mapě na Obr. 16 můžeme pozorovat různé jasy svítících oken. Maximální hodnoty jasů svítících oken se pohybují

kolem  $15 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  (okna bez závěsů) oproti minimálním jasům, které jsou až 10 x menší (okna se závěsy, žaluziemi).



Obr. 16: Jasová mapa panelového domu.

Na Obr. 17 je znázorněn světelný tok vycházející ze svítidla uvnitř obytných prostorů. Přímý světelný tok ze svítidla směřuje do dolního prostoru, avšak dochází k rovnoměrnému rozptylu na rozhraní okna a část světelného toku ovlivňuje horní poloprostor a zvyšuje velikost rušivého světla. Nejen přímý světelný tok, ale i odražený světelný tok v místnosti vychází ven z okenního otvoru a přispívá k rušivému světlu.



Obr. 17: Světelný tok vyzařovaný z oken domácností do horního poloprostoru. [7]

## 5 Stávající metody CIE pro výpočet mezopického jasu

Současná světelně-technická praxe je založena především na fotopické spektrální světelné citlivosti, pro kterou jsou definovány měřicí systémy zabývající se osvětlením. [38] Tento přístup nebere v úvahu skutečnost, že se v oblasti mezopického vidění uplatňují různé aplikace, jako například osvětlení komunikací, osvětlení v námořní a letecké dopravě, nouzové osvětlení a osvětlení pro bezpečnost a prevenci kriminality. V této oblasti se rovněž pohybují hodnoty jasů noční oblohy. [31]

Mezinárodní komise pro osvětlování CIE proto vydala publikaci CIE 191: 2010 [21], ve které definuje čtyři systémy mezopické fotometrie. Tyto systémy mohou být snadno použitelné ve světelné praxi a jsou založeny na lineární kombinaci fotopického vidění  $V(\lambda)$  a skotopického vidění  $V'(\lambda)$ .

### 5.1 USP-Systém

První systém mezopické fotometrie USP-Systém [21] používá k výpočtu mezopické funkce parametr  $X$ . Tato transformace je definována vztahem:

$$V''(\lambda) = X \cdot V(\lambda) + (1 - X) \cdot V'(\lambda) \quad (8)$$

kde:

$X$  parametr charakterizující podíl fotopické a skotopické světelné citlivosti ( $0 \leq X \leq 1$ ) (-);

$V''(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost mezopického záření (-);

$V(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost fotopického záření (-);

$V'(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost skotopického záření (-).

Pro tento systém byla odvozena následující rovnice pro výpočet mezopického jasu v rozmezí od  $0,001 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  do  $0,6 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ :

$$L_{mes} = 1,834 \cdot L_p - 0,335 \cdot L_s - 1,2 + \sqrt{0,696 \cdot L_p^2 - 1,333 \cdot L_p - 1,56 \cdot L_p \cdot L_s + 1,113 \cdot L_s^2 + 1,537 \cdot L_s + 1,04} \quad (9)$$

kde:

$L_p$  fotopický jas ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ );

$L_s$  skotopický jas ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ );

a pro odpovídající koeficient  $X$  rovnice:

$$X = m \cdot L_{mes} + \beta \quad (10)$$

kde:

$m = 1/0,599$ ;

$\beta = -0,001/0,599$ .

K definování tohoto systému byla základem data získaná při experimentu s monokulárním pozorovatelem, kde byl měřen čas reakce pozorovatele. UPS-system definoval rozsah mezopického vidění v rozsahu od  $0,001 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  do  $0,6 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ .

## 5.2 MOVE-Systém

Dalším systémem mezopické fotometrie je MOVE-Systém [21] charakterizovaný rovnicí:

$$M(x) \cdot V_{mes}(\lambda) = x \cdot V(\lambda) + [1 - x] \cdot V'(\lambda) \quad (11)$$

kde:

$M(x)$  normalizovaná funkce upravující průběh maxima, kde funkce  $V_{mes}(\lambda) = 1$ ;

$V_{mes}(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost mezopického záření (-);

$x$  koeficient závislý na adaptačních podmínkách ( $0 \leq x \leq 1$ ) (-);

$V(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost fotopického záření (-);

$V'(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost skotopického záření (-).

Koeficient  $x$  nabývající hodnot od 0 do 1 je určen iterativní metodou podle vztahu:

$$x_{n+1} = a + b \cdot \log_{10} \left[ \frac{1}{M(x_n)} \left( x_n \frac{L_P}{K_m} + [1 - x_n] \frac{L_S}{K'_m} \right) \right] \quad (12)$$

kde:

$a = 1,49$ ;

$b = 0,282$ ;

$L_P$  fotopický jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ );

$L_S$  skotopický jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ );

$K_m$  maximální hodnota spektrálního průběhu veličiny  $V(\lambda)$  ( $K_m = 683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ );

$K'_m$  maximální hodnota spektrálního průběhu veličiny  $V'(\lambda)$  ( $K'_m = 1699 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ ).

U tohoto systému je definována rovnice pro výpočet mezopického jasu ohraničeného spodní hranicí  $0,01 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  a horní hranicí  $10 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  a její tvar je:

$$L_{mes} = \frac{x \cdot L_P + [1 - x] \cdot L_S \cdot V'(\lambda_0)}{x + [1 - x] \cdot V'(\lambda_0)} \quad (13)$$

kde:

$V'(\lambda_0) = 683/1699$ ;  $\lambda_0 = 555 \text{ nm}$ ;

$L_{mes}$  mezopický jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ );

$L_P$  fotopický jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ );

$L_S$  skotopický jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

Normalizovaná funkce  $M(x)$  je vyjádřena rovnicí:

$$M(x) = \max \left[ x \cdot V(\lambda) + (1-x) \cdot V'(\lambda) \right] \quad (14)$$

kde:

- $x$  koeficient závislý na adaptačních podmínkách ( $0 \leq x \leq 1$ ) (-);
- $V(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost fotopického záření (-);
- $V'(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost skotopického záření (-).

Tento systém vznikl na základě reakcí objektu (člověka) na modelové situace vznikající při řízení automobilu během noci. Systém MOVE definuje podmínky mezopického vidění od  $0,01 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  do  $10 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ .

### 5.3 MES1-Systém

Mezi USP-Systémem s příliš nízkou horní hranicí  $0,6 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  a MOVE-Systémem s příliš vysokou horní hranicí  $10 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  byl vytvořen MES1-Systém, který zajišťuje dostatečně širokou použitelnost a zároveň klade větší důraz na achromatické aplikace oproti MOVE-Systému. MES1-Systém s dolní hranicí jasu  $0,01 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  a horní hranicí  $3 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  je vyjádřen rovnicí [21]:

$$M(m_1) \cdot V_{mes}(\lambda) = m_1 \cdot V(\lambda) + (1-m_1) \cdot V'(\lambda) \quad (15)$$

kde:

$M(m_1)$  normalizovaná funkce upravující průběh maxima, kde funkce  $V_{mes}(\lambda) = 1$ ;

$V_{mes}(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost mezopického záření (-);

$m_1$  koeficient závislý na adaptačních podmínkách (-);

když  $L_{mes} \geq 3 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , pak  $m_1 = 1$ ;

když  $L_{mes} \leq 0,01 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , pak  $m_1 = 0$ ;

když  $0,01 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2} \leq L_{mes} \leq 3 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , pak  $m_1 = 0,404 \cdot \log L_{mes} + 0,807$ ;

$V(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost fotopického záření (-);

$V'(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost skotopického záření (-).

Pro výpočet koeficientu  $m_1$  a mezopického jasu  $L_{mes}$  s použitím iteračních metod a počáteční hodnotou koeficientu  $m_{1,0} = 0,5$  slouží rovnice:

$$L_{mes,n} = \frac{m_{1,n-1} \cdot L_P + (1-m_{1,n-1}) \cdot L_S \cdot V'(\lambda)}{m_{1,n-1} + (1-m_{1,n-1}) \cdot V'(\lambda)} \quad (16)$$

$$m_{1,n} = a + b \cdot \log_{10} L_{mes,n} \text{ pro } 0 \leq m_{1,n} \leq 1 \quad (17)$$

kde

$V'(\lambda_0) = 683/1699$ ;  $\lambda_0 = 555 \text{ nm}$ ;

$$a = 0,807;$$

$$b = 0,404;$$

n počet iteračních kroků (-);

$L_P$  fotopický jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ );

$L_S$  skotopický jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

## 5.4 MES2-System

System mezopické fotometrie se spodní hranici  $0,005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  a horní hranici  $5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  je označován jako MES2-System a je dán rovnicí [21]:

$$M(m_2) \cdot V_{mes}(\lambda) = m_2 \cdot V(\lambda) + (1 - m_2) \cdot V'(\lambda) \quad (18)$$

kde:

$M(m_2)$  normalizovaná funkce upravující průběh maxima, kde funkce  $V_{mes}(\lambda) = 1(-)$ ;

$V_{mes}(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost mezopického záření (-);

$m_2$  koeficient závislý na adaptačních podmínkách (-);

když  $L_{mes} \geq 5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , pak  $m_2 = 1$ ;

když  $L_{mes} \leq 0,005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , pak  $m_2 = 0$ ;

když  $0,005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2} \leq L_{mes} < 5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , pak  $m_2 = 0,333 \cdot \log L_{mes} + 0,767$ ;

$V(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost fotopického záření (-);

$V'(\lambda)$  poměrná spektrální světelná citlivost skotopického záření (-).

Pro výpočet koeficientu  $m_2$  a mezopického jasu  $L_{mes}$  s použitím iteračních metod a počáteční hodnotou koeficientu  $m_{2,0} = 0,5$  jsou uvedeny následující rovnice:

$$L_{mes,n} = \frac{m_{2,n-1} \cdot L_P + (1 - m_{2,n-1}) \cdot L_S \cdot V'(\lambda)}{m_{2,n-1} + (1 - m_{2,n-1}) \cdot V'(\lambda)} \quad (19)$$

$$m_{2,n} = a + b \cdot \log_{10} L_{mes,n} \text{ pro } 0 \leq m_{2,n} \leq 1 \quad (20)$$

kde:

$V'(\lambda_0) = 683/1699$ ;  $\lambda_0 = 555 \text{ nm}$ ;

$$a = 0,767;$$

$$b = 0,333;$$

n počet iteračních kroků (-);

$L_P$  fotopický jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ );

$L_S$  skotopický jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

## 5.5 Doporučení CIE

Tyto systémy byly podrobeny testování. Test se zaměřil na porovnání kontrastu terče monochromatické distribuce stejného výkonu a pozadí s různou spektrální distribucí, kde byla sledována odchylka mezi vypočteným mezopickým kontrastem pro různé systémy mezopické fotometrie pro stejnou úroveň mezopického jasu. Nejmenší odchylka znamená lepší predikci mezopického jasu. Z tohoto testu se jeví jako nejlepší systém pro mezopickou fotometrii MES2-Systém [21].

V následujících tabulkách jsou uvedeny hodnoty koeficientu  $m$  a mezopického jasu  $L_{mes}$  doporučeného systému mezopické fotometrie MES2. Jednotlivé hodnoty obou veličin jsou závislé na poměru S/P (viz. kapitola 3.2.1).

Tab. 6: Hodnoty koeficientu  $m$  v závislosti na S/P. [21]

S/P	Fotopický jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )						
	0,01	0,03	0,1	0,3	1	3	4,5
<b>0,25</b>		0,1542	0,383	0,5644	0,7538	0,9225	0,9841
<b>0,35</b>		0,1804	0,392	0,5688	0,7558	0,923	0,9842
<b>0,45</b>	0	0,1992	0,4	0,573	0,7576	0,9235	0,9843
<b>0,55</b>	0,019	0,214	0,4073	0,577	0,7594	0,924	0,9844
<b>0,65</b>	0,0459	0,2265	0,4139	0,5808	0,7612	0,9245	0,9845
<b>0,75</b>	0,0655	0,2373	0,4201	0,5844	0,7629	0,9249	0,9846
<b>0,85</b>	0,0812	0,2468	0,4258	0,5878	0,7646	0,9254	0,9846
<b>0,95</b>	0,0943	0,2553	0,4311	0,5911	0,7662	0,9258	0,9847
<b>1,05</b>	0,1057	0,2631	0,4361	0,5942	0,7678	0,9263	0,9848
<b>1,15</b>	0,1157	0,2702	0,4408	0,5972	0,7693	0,9267	0,9849
<b>1,25</b>	0,1247	0,2767	0,4452	0,6001	0,7708	0,9272	0,985
<b>1,35</b>	0,1329	0,2828	0,4494	0,6029	0,7723	0,9276	0,9851
<b>1,45</b>	0,1404	0,2885	0,4534	0,6056	0,7737	0,928	0,9852
<b>1,55</b>	0,1473	0,2939	0,4573	0,6082	0,7751	0,9284	0,9853
<b>1,65</b>	0,1538	0,299	0,4609	0,6107	0,7764	0,9289	0,9853
<b>1,75</b>	0,1598	0,3038	0,4645	0,6131	0,7778	0,9293	0,9854
<b>1,85</b>	0,1654	0,3083	0,4678	0,6155	0,7791	0,9297	0,9855
<b>1,95</b>	0,1708	0,3126	0,4711	0,6178	0,7803	0,9301	0,9856
<b>2,05</b>	0,1758	0,3168	0,4742	0,62	0,7816	0,9304	0,9857
<b>2,15</b>	0,1806	0,3207	0,4772	0,6221	0,7828	0,9308	0,9857
<b>2,25</b>	0,1852	0,3245	0,4801	0,6242	0,784	0,9312	0,9858
<b>2,35</b>	0,1895	0,3282	0,483	0,6263	0,7852	0,9316	0,9859
<b>2,45</b>	0,1937	0,3317	0,4857	0,6283	0,7863	0,9319	0,986
<b>2,55</b>	0,1977	0,3351	0,4883	0,6302	0,7875	0,9323	0,986
<b>2,65</b>	0,2015	0,3383	0,4909	0,6321	0,7886	0,9327	0,9861
<b>2,75</b>	0,2052	0,3415	0,4934	0,6339	0,7896	0,933	0,9862



Tab. 7: Hodnoty mezopického jasu doporučeného MES2-Systému.

S/P	Fotopický jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )						
	0,01	0,03	0,1	0,3	1	3	4,5
0,25	0,0025	0,0145	0,0705	0,2467	0,913	2,9255	4,4782
0,35	0,0035	0,0174	0,075	0,2545	0,9253	2,9367	4,4812
0,45	0,0045	0,0198	0,0793	0,262	0,9373	2,9468	4,4842
0,55	0,0057	0,022	0,0834	0,2693	0,9492	2,9568	4,4872
0,65	0,0069	0,0239	0,0873	0,2764	0,9608	2,9666	4,4901
0,75	0,0079	0,0258	0,0911	0,2833	0,9722	2,9763	4,4929
0,85	0,0088	0,0275	0,0947	0,2901	0,9835	2,9859	4,4958
0,95	0,0096	0,0292	0,0983	0,2967	0,9945	2,9953	4,4986
1,05	0,0104	0,0308	0,1017	0,3032	1,0054	3,0046	4,5014
1,15	0,0111	0,0323	0,1051	0,3096	1,0161	3,0139	4,5041
1,25	0,0118	0,0338	0,1063	0,3158	1,0267	3,023	4,5068
1,35	0,0125	0,0353	0,1115	0,322	1,0371	3,0139	4,5095
1,45	0,0132	0,0367	0,1147	0,328	1,0473	3,0408	4,5122
1,55	0,0138	0,0381	0,1178	0,3339	1,0575	3,0496	4,5148
1,65	0,0145	0,0395	0,1208	0,3398	1,0674	3,0582	4,5174
1,75	0,0151	0,0408	0,1238	0,3455	1,0773	3,0668	4,52
1,85	0,0157	0,0421	0,1267	0,3512	1,087	3,0753	4,5225
1,95	0,0163	0,0434	0,1295	0,3568	1,0966	3,0836	4,525
2,05	0,0169	0,0446	0,1324	0,3623	1,106	3,0919	4,5275
2,15	0,0174	0,0459	0,1352	0,3677	1,1154	3,1001	4,5299
2,25	0,018	0,0471	0,1379	0,3731	1,1246	3,1082	4,5323
2,35	0,0185	0,0483	0,1406	0,3784	1,1338	3,1162	4,5347
2,45	0,0191	0,0495	0,1433	0,3836	1,1428	3,1241	4,5371
2,55	0,0196	0,0506	0,1459	0,3888	1,1517	3,1319	4,5395
2,65	0,0201	0,0518	0,1485	0,3939	1,1605	3,1396	4,5418
2,75	0,0207	0,0529	0,1511	0,3989	1,1693	3,1473	4,5441

V následující tabulce jsou uvedeny vybrané světelné zdroje, tak aby charakterizovaly jednotlivé skupiny světelných zdrojů v osvětlovacích soustavách. Z Tab. 8 je zřejmá závislost mezi velikostí S/P a náhradní teplotou chromatičnosti. Tato závislost je dána spektrálním vyzařováním světelného zdroje.

*Tab. 8: Přehled světelných zdrojů S/P poměrem.[44]*

<b>Světelný zdroj</b>	<b>S/P (-)</b>	<b>Poznámka</b>
Nízkotlaká sodíková výbojka	0,25	-
Vysokotlaká sodíková výbojka	0,40-0,76	2000 K
Zářivka – teple bílá	0,98	2900 K
Inkadescentní zdroj	1,41	2850 K
Inkadescentní zdroj	1,54	4100 K
zářivka – studená bílá	1,58	5000 K, triphosphor
zářivka – studená bílá	1,7	5000 K, Ra 90
LED – neutrální bílá	1,68	4180 K
Zářivka – denní	1,72-2,22	-
Indukční výbojka	1,83	4866 K
LED – studená bílá	2,5	6000 K

## 6 Přístroje pro měření jasů

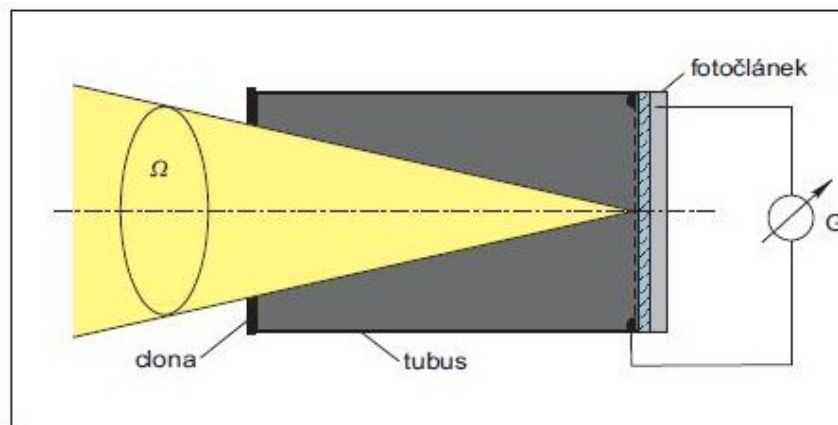
Rušivé světlo vyvolává zvýšení jasů noční oblohy a proto jsou jasoměry považovány za nejdůležitější přístroje pro posouzení účinku rušivého světla.

Metodika měření jasů je problematická z důvodu vývoje speciálních přístrojů. Jas představuje podíl svítivosti a průmětu plochy, kterou vidíme. Nelze tedy měřit přímo hodnotu jasů, ale svítivost. Při měření jasů je měřená plocha považovaná bodově, aby byla tato podmínka splněna, musí se být měření provedeno z velké vzdálenosti. Pro měření jasů existují speciální přístroje.

Zjednodušeně můžeme jasoměr popsat jako fotočlánek, na který je nasazen tubus s kruhovým otvorem v přední části, který určuje prostorový úhel. [37] Skutečné přístroje jsou však mnohem složitější. Podle prostorového úhlu se rozlišují jasoměry na dvě skupiny:

- bodové - s prostorovým úhlem v jednotkách minut,
- integrační - s prostorovým úhlem větším než  $1^\circ$ .

Přístroje pro měření jasů se skládají ze snímače s fotočlánekem a optického systému pro vymezení prostorového úhlu (Obr. 18).



Obr. 18: Obecný princip objektivního jasoměru. [8]

Jas povrchů, které odrážejí nebo vyzařují světelné záření, je závislý na úhlu pozorování a na úhlu dopadu světelného záření na plochu. Proto při měření je třeba uvést i místo a směr měření.

Jelikož je zjišťování jasů důležité pro zajištění zrakové pohody (představuje tedy kvalitativní parametr), bude měření probíhat vesměs v místech, kde vykonáváme nějakou činnost a kde může například jas různých povrchů ovlivňovat tuto činnost. Základním místem pro měření je tedy pracovní prostor a jeho nejbližší okolí. Také stropy, podlahy a stěny mohou odrážet světlo. Při měření jasů se také uvažuje nábytek a další předměty, které jsou součástí prostoru, ve kterém měření probíhá.

Při měření jasů oblohy klasickými přístroji se používají jasoměry s měřicím úhlem do  $20^\circ$ , doporučeny jsou však v rozsahu od  $2,5^\circ$  do  $10^\circ$ . Při menších úhlech dochází k nepřesnosti

měření z důvodů nerovnoměrného jasů oblohy. Při větších úhlech zase může docházet ke stínění okolní výstavbou, terénem, nebo porostem.

Níže uvedené měřicí přístroje jsou kalibrovány podle spektrální křivky světelné citlivosti pro fotopické vidění. Výjimkou však je spektrofotometr, který je určen primárně pro měření spektrálních veličin v daném rozsahu vlnových délek bez omezení podle křivky  $V(\lambda)$ .

## 6.1 Luxmetry s nástavcem

Luxmetry se skládají z přijímače s fotočlánkem a z měřicího a vyhodnocovacího programu. Signál přijímaný z čidla je převeden v měřícím a vyhodnocovacím systému a znázorněn na displeji. Pro měření jasů se může použít luxmetr s nástavcem (Obr. 19).



Obr. 19: Příklad luxmetru s nástavcem pro měření jasů.

Nástavec představuje tubus umístěný na čidle luxmetru. Tubus vymezuje určitý prostorový úhel měření, a pokud je luxmetr přizpůsoben k měření jasů, není zapotřebí přepočítávat naměřené hodnoty osvětlenosti na hodnoty jasů. Pokud tomu tak není, je nutné naměřené hodnoty osvětlenosti přepočítat podle vzorce:

$$L = \frac{E_n}{\Omega} \quad (21)$$

kde:

- L vypočtený jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ );
- $E_n$  naměřená normálová osvětlenost (lx);
- $\Omega$  prostorový úhel (sr).

Tímto způsobem můžeme měřit oblasti vymezené prostorovým úhlem nástavce (tubus). Je ale nutné si uvědomit, že měřená oblast není jednoznačně definována a pokud chceme měřit jas v různých bodech zorného pole, může se situace během měření značně změnit.

## 6.2 Jasové kamery

Tyto přístroje na měření jasů skutečných nebo fiktivních povrchů vyzařujících (odrážejících) světlo bývají doplněny optickým systémem umožňujícím nasměrování fotometrické hlavičky přímo na měřené místo pomocí vyznačené oblasti (hledáčku), kde je zobrazena i hodnota naměřeného jasů.

Příkladem je jasoměr LS-100 (Obr. 120) s měřicím prostorovým úhlem  $1^\circ$ , jeho minimální zaostřovací vzdálenost je 1,014 m, což umožňuje měřit nejmenší plochu s průměrem 14,4 mm.



Obr. 20: Jasoměr Konica Minolta LS-100.

V některých zemích se pro měření jasů používá jednotka fL (foot Lambert), kdy  $1 \text{ fL} = 1 \cdot \pi^{-1} \cdot \text{cd} \cdot \text{m}^{-2} = 3 \,426 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Měřicí rozsah přístroje je od  $0,001 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  do  $299 \,900 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  (od 0,001 fL do 87 530 fL). Verze jasoměru LS-110 měří s prostorovým úhlem  $1/3^\circ$  a maximální měřená hodnota jasů je  $999 \,900 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ .

## 6.3 Spektrofotometry

K měření vlnové délky monochromatického světla, nebo jeho průběh v určitém rozsahu se používají tzv. spektrofotometry.

Jedním ze zástupců spektrofotometru je širokopásmový spektrofotometr Jeti Specbos 1211 (Obr. 21) ve standardním provedení, který je přizpůsoben pro měření v oblasti vlnové délky od 350 nm do 1000 nm. Rozšířená verze Specbos 1211 UV dokáže měřit od vlnové délky 250 nm. Přístroj lze použít v režimu ozáření (irradiance mode), nebo v režimu záření (radiance mode). Pomocí tohoto spektrofotometru je možné měřit různé světelně-technické veličiny, jako jsou: [9]

- jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ );
- osvětlenost (lx);
- spektrální zář ( $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ );
- trichromatické souřadnice x, y, u, v;
- náhradní teplotu chromatičnosti (K);
- dominantní vlnovou délku (nm);
- index barevného podání (-);
- fotosyntézní a cirkadiální činitel záření (-).



Obr. 21: Spektrofotometr Jeti Specbos 1211.

Pro měření jasů v radiance mode je prostorový úhel  $1,8^\circ$ . Ostatní měřené veličiny je možné měřit buď s kosinovým nadstavcem (prostorový úhel je  $2\cdot\pi$ ), nebo bez kosinového nadstavce.

## 6.4 Digitální jasové analyzátory

Digitální jasové analyzátory používají k měření jasů digitální fotografii, která obsahuje informace o snímané scéně. S použitím programu se pořízená fotografie obsahující tzv. surová data (nezměněné informace o jednotlivých pixelech fotografie) převede na jasovou mapu. V takto zpracované jasové mapě je možné vyhodnocovat jak detaily, tak i celou snímanou plochu. Velikost snímané scény záleží především na použitém snímači a optickém systému. Pro tyto účely se používají především digitální zrcadlové fotoaparáty, u kterých je možné měnit objektivy podle potřeby. Další výhodou je, že pořízené snímky lze zpětně vyhodnotit.

### 6.4.1 LMK Mobile Advanced

Starší verze LMK Mobile Advanced firmy TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH používá k měření digitální jednoboký zrcadlový fotoaparát Canon EOS 350D (Obr. 22) společně se software LMK2000. Fotoaparát zaznamená reálnou scénu v digitální podobě na paměťové médium pomocí CMOS snímače. Standardně fotoaparát používá objektiv Sigma 18-50 F2.8 EX DC, pro který je kalibrován.

Nejnovější verze tohoto jasového analyzátoru má k dispozici digitální fotoaparát Canon EOS 450D. Ke zpracování pořízených snímků slouží software Lmk LabSoft. Jako podklad k vyhodnocení jsou použita data ve formátu CR2, ve kterém je obraz zaznamenán ve formě RAW snímku, jenž obsahuje „surová data“, což znamená, že zaznamenaná informace je uložena v původní podobě, bez dodatečných korekcí, jak je tomu u jiných formátů (JPEG, BMP, apod.).

Při měření se využívá režimu AEB, který automaticky zaznamená měřenou oblast na tři samostatné snímky s úrovněmi expozice -2.00 EV, 0.00 EV a +2.00 EV (EV - exposure value). Z naměřeného snímku je vytvořen jasový kanál, ve kterém je uložena informace o hodnotě jasů pro daný makropixel. Makropixel obsahuje 4 pixely (R, G1, B, G2), ve kterých je uložena hodnota zaznamenaná CMOS snímačem fotoaparátu. Přizpůsobení relativní spektrální citlivosti systému k poměrné spektrální citlivosti lidského oka je provedena pomocí numerické matice. Informace uložené v jasovém kanále je dále možné zpracovávat a vyhodnocovat podle žádané metodiky či normy.



Obr. 22: Digitální jednooký zrcadlový fotoaparát Canon EOS 450D. [10]

Digitální fotoaparát Canon EOS 450D se 14-ti bitovým A/D převodníkem používá světlocitlivý snímač Canon CMOS APS-C s rozlišením 5184 x 3456 pixelů. Data z fotografie ve formátu RAW se zpracovávají v programu LMK LabSoft, kde se provede výpočet podle kalibrační rovnice a snímek se převede na jasovou mapu s rozlišením 2145 x 1428.

Ke stanovení jasové hodnoty je nutné určit váženou hodnotu (R, G, B) jednotkového čipu. Prostřednictvím numerické transformace se převedou data na jasovou mapu s numerickým přizpůsobením křivce spektrální citlivosti lidského oka pro fotopické vidění (Obr. 21) podle následujících rovnic:

$$L = K_m \cdot \int L_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (22)$$

$$X_c = K_m \cdot \sum H_e(\lambda) \cdot S'(\lambda) \cdot d\lambda \quad (23)$$

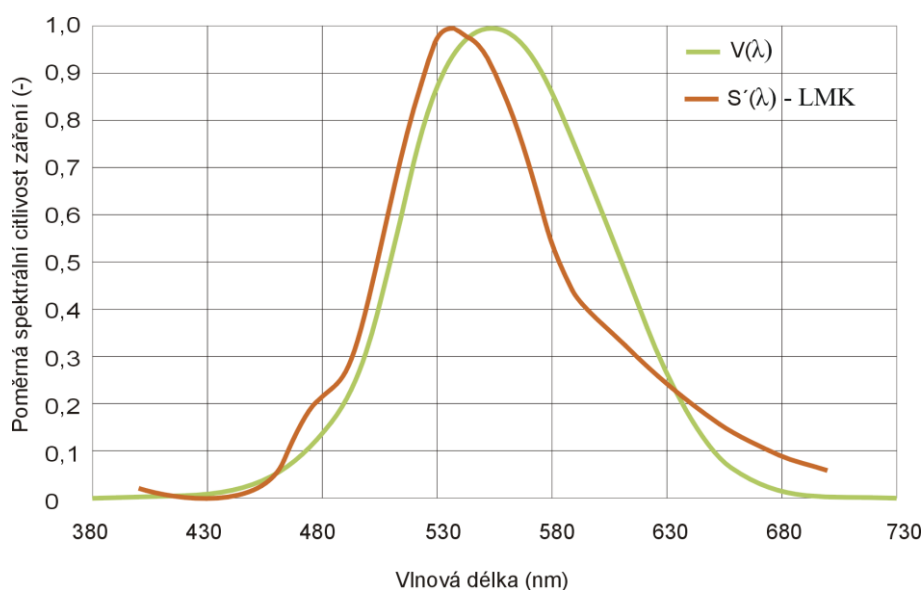
$$X_c \approx \dots \quad (24)$$

$$S'(\lambda) \approx \sum_{i=R,G,B} \zeta_i \cdot R_i(\lambda) \quad (25)$$

$$S'(\lambda) = \zeta_R \cdot R(\lambda) + \zeta_G \cdot G(\lambda) + \zeta_B \cdot B(\lambda) \quad (26)$$

kde:

$L$	jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ );
$K_m$	maximální světelný účinek záření pro fotopické vidění ( $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ );
$L_e(\lambda)$	spektrální zář ( $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ );
$V(\lambda)$	poměrná spektrální citlivost zraku pro fotopické vidění (-);
$X_c$	veličina úměrná jasů (-);
$S'(\lambda)$	spektrální citlivost světlocitlivého senzoru (-);
$K_R, K_G, K_B$	matriční koeficienty senzorů R, G, B pro $V(\lambda)$ přizpůsobení (-);
$R(\lambda), G(\lambda), B(\lambda)$	spektrální citlivosti senzorů R, G, B (-).



Obr. 23: Srovnání průběhu  $V(\lambda)$  s přizpůsobením  $S'(\lambda)$  LMK. [10]

## 6.4.2 Systém LumiDISP

Tento jasový analyzátor (Obr. 24), vyvinutý na Ústavu elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, je založený na digitálním jednookým zrcadlovým fotoaparátu NIKON D90 s objektivem NIKKOR 18-105 f/3,5-5,6G ED-IF AF-S DX. K převedení digitální fotografie na jasovou mapu je použit program LumiDISP, který je schopen spolupracovat s jakýmkoli jiným vhodným fotoaparátem. Program LumiDISP umožňuje zpracovávat fotografie v různých datových formátech (JPEG, RAW, TIF). [24]



Prizpůsobení ke křivce spektrální citlivosti lidského oka pro fotopické vidění  $V(\lambda)$  je v tomto případě řešeno spektrálním korekčním filtrem nasazeném na objektivu fotoaparátu. [11]



Obr. 24: Jasový analyzátor LumiDISP - LDA. [11]

## 6.5 Přístroje pro měření "kvality oblohy"

Mezi jasoměry lze zařadit i SQM (Sky Quality Meter), který se používá k měření jasu noční oblohy a je využíván převážně astronomy. Na Obr. 25 je vidět jednoduchý SQM s prostorovým úhlem  $45^\circ$  pro měření okamžité hodnoty jasu noční oblohy v magnitudách na čtvereční uhlovou vteřinu. Další modifikace tohoto přístroje dovolují měření při jiných prostorových úhlech s použitím optických částí. Běžně se vyrábí SQM s prostorovým úhlem  $20^\circ$ . Pro měření dynamické změny jasu noční oblohy můžeme použít SQM s možností připojení k počítači pomocí ethernet kabelu.



Obr. 25: Měřicí přístroj Sky Quality Meter.

Přístroje SQM měří v jednotkách ( $\text{mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$ ), které je možné převést na jednotky jasu ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Vzorec pro přepočítání je:

$$L = 10,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{-0,4 \cdot \text{mags}} \quad (27)$$

kde:

L vypočtený jas ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ );

mags naměřená hodnota přístrojem SQM ( $\text{mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$ ).

## 7 Vyhodnocování jasů pomocí digitální fotografie

Pomocí digitální fotografie můžeme zaznamenat informace o daném objektu na daném místě a v daný časový okamžik. Poté, pokud jsou data uchována, si je můžeme zpětně a kdykoli znovu zobrazit. Dřívější fotoaparáty používaly pro vytvoření těchto informací analogový signál (kinofilm). V dnešní době je možné s pomocí CMOS a CCD senzorů spolu s AD převodníky převést analogový signál na digitální a ten pak následně upravovat a zpracovávat podle našich požadavků.

Digitální data zaznamenaná pomocí obrazu mají význam pro fotometrii jen tehdy, pokud známe jejich měřítko, tj. dokážeme je převést na známé fyzikální veličiny. U digitální fotografie existují prakticky dva atributy - geometrie a jas. Jas je určen hodnotou signálu na jednotlivých subpixelech a geometrie určuje polohu každého elementárního zdroje světla, který fotografie zachytila.

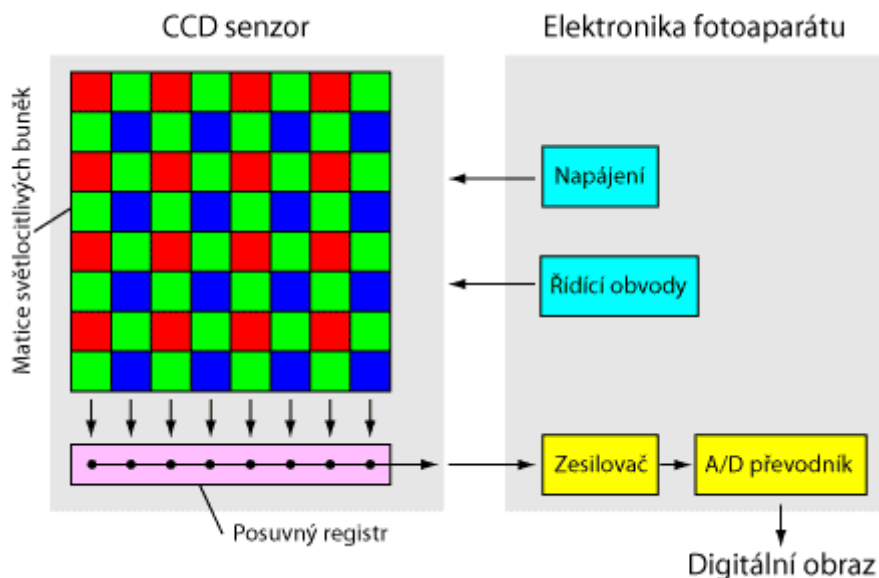
V programech LMK Mobile Advanced (software používaný pro vyhodnocení jasové mapy, který používá pro výpočet data obsažená v RAW formátu pořízeném digitálním fotoaparátem CANON EOS 450D) a LUMIDISP (tento program zpracovává snímky ve formátu JPEG i RAW) se převede snímek na jasovou mapu. V jasové mapě můžeme zvolit buď jednotlivý makropixel, nebo libovolně zvolené oblasti. Ve zvolených oblastech lze pak pomocí různých matematických operací vyhodnocovat nejen hodnotu jasu, ale i další informace (průměrný jas v poli, minimální nebo maximální jas v poli). Programy rovněž umožňují různé matematické operace buď s celými jasovými mapami, nebo s vybranými oblastmi.

Pro vytvoření jasové mapy je nutné znát okolnosti při expozici snímku, jako jsou nastavení ISO (citlivosti snímače), doba exponování, clonu a další informace. Tyto informace jsou zaznamenány v metadatech pořízeného snímku. Informace z metadat jsou použity k přepočtu pomocí kalibrační rovnice. Můžeme říci, že pro měření jasů je možné použít jakýkoli digitální fotoaparát, jehož snímek obsahuje v metadatech potřebné informace a jsou známe jejich optické a spektrální závislosti (přizpůsobení spektrální citlivosti křivce lidského oka) světlocitlivého snímače a optického systému.

### 7.1 Hardwarové komponenty - světlocitlivé senzory

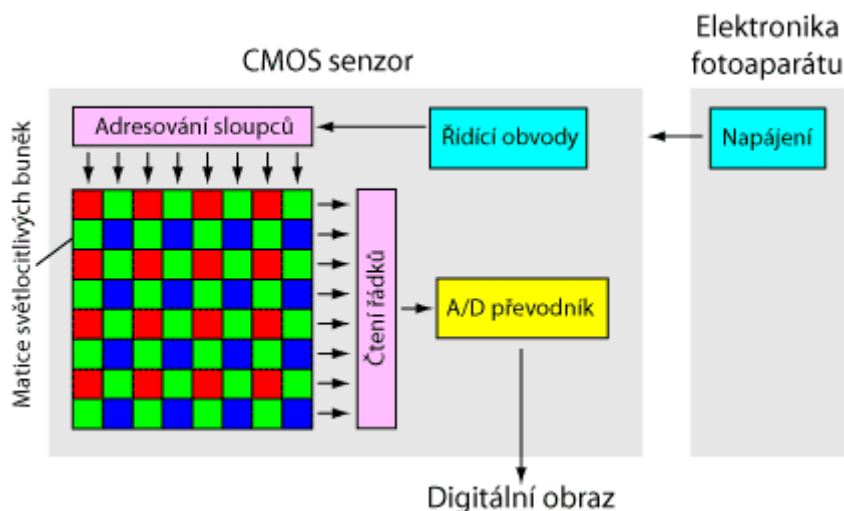
Většina dnešních DSLR (digitální zrcadlový fotoaparát) používá buď CCD (Charge-coupled device) nebo CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor) senzor. Odlišnost není v konstrukci vlastního světlocitlivého pixelu, ale v následném zpracování signálu.

CCD senzor používá sekvenční (postupné) vyčítání obsahu senzoru a potřebuje více elektroniky (řídící obvody, zesilovač, A/D převodník) kolem vlastního senzoru (Obr. 26).



Obr.26: Schéma CCD senzoru. [12]

Naopak CMOS senzor (Obr. 27) má většinu elektroniky integrovanou a proto jsou levnější a méně náročné na energii. U tohoto typu má každá buňka svůj vlastní zesilovač a může být díky tomu přímo adresována a čtena pomocí jejích souřadnic.



Obr. 27: Schéma CMOS senzoru. [12]

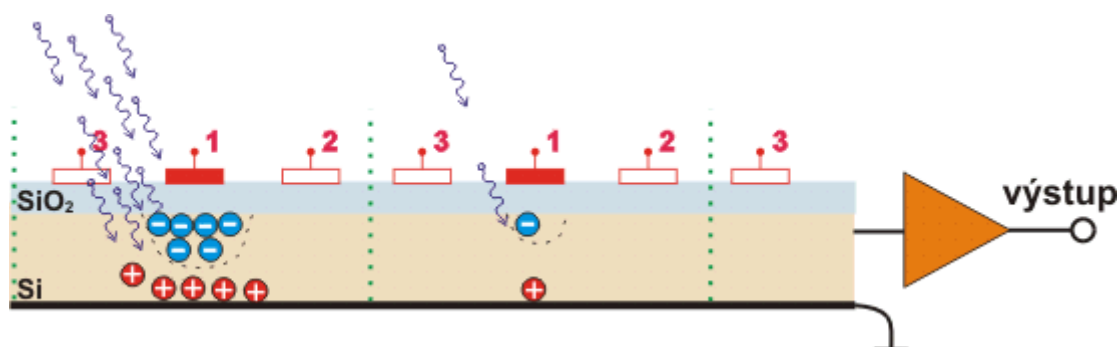
## 7.2 Uživatelské funkce a nastavení

### 7.2.1 Doba expozice a přeměna světla na elektrický signál

Jedním z nejdůležitějších faktorů, které ovlivňují přepočítání digitální fotografie na jasový kanál je doba expozice. Čím déle působí světlo na čip, tím se více elektronů excituje v polovodiči čipu. Pokud dojde k přesycení pixelů fotony, stává se elektrický signál z převodníku zkreslený.

Na elektrody označené na Obr. 28 se přivede kladné napětí a na senzor se nechá působit světlo (například u digitálního fotoaparátu se otevře závěrka). Dopadající fotony excitují v polovodiči elektrony, které jsou pak přitahovány ke kladně nabitým elektrodám. Po

elektronech zůstanou v polovodiči tzv. díry, které vůči svému okolí vykazují kladný náboj a ty jsou naopak přitahovány elektrodou ve spodní části čipu.



Obr. 28: Princip přeměny světla na elektrický signál. [13]

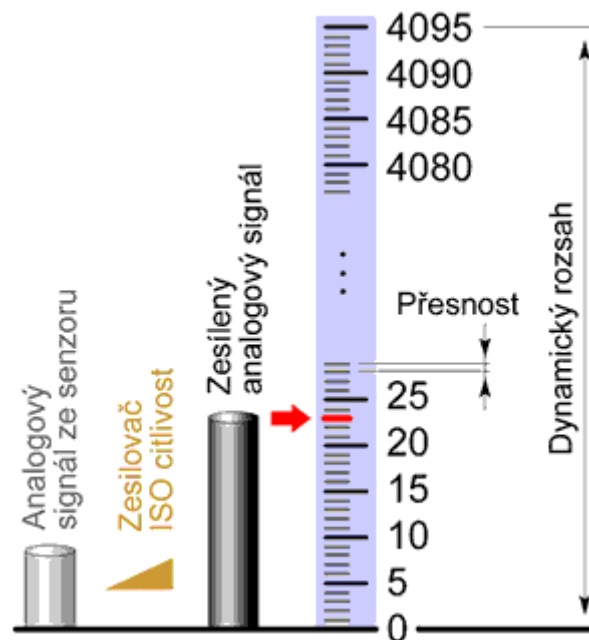
Hranice pixelu jsou na Obr. 28 znázorněny svislými tečkovanými čarami. Protože na pixel vlevo dopadlo více fotonů, je u jeho elektrody shromážděno více elektronů než u pixelu vpravo.

### 7.2.2 A/D převodník

Asi nejdůležitějším členem při zpracování digitální fotografie je A/D (analog/digital) převodník. Každý pixel senzoru měří množství světla (fotonů), které na něj dopadá. Výstupem však není číslo, ale elektrické napětí úměrné počtu excitujících fotonů v polovodiči. Toto napětí je však poměrně malé a proto musí být nejprve zesíleno, aby bylo možné ho dále zpracovat. Míra zesílení základního napěťového signálu senzoru je ovládána nastavenou ISO citlivostí.

Po zesílení výstupního signálu ze senzoru na vhodnou úroveň se převede spojitě (analogové) napětí z každého pixelu na diskrétní (digitální) informaci (Digit). Převod spojitěho signálu na diskrétní se skládá ze dvou fází. V první fázi se provede vzorkování signálu (rozdělení signálu do stejných časových úseků - pro fotografii pouze jeden) a pak následuje kvantování (přidělení časovému úseku digitální informaci v závislosti na velikosti vzorku).

Počet bitů v A/D převodníku udává jeho přesnost. Převodník s 8 bity je schopen přiřadit velikosti analogového signálu jednu z 256 diskrétních úrovní. Čím více bude mít A/D převodník bitů, tím menší bude skok mezi jednotlivými stupni převodu. Digitální fotoaparáty s 12 bitovým převodníkem mají k dispozici 4095 diskrétních úrovní (Obr. 29). V dnešní době se běžně setkáme s digitálními fotoaparáty se 14 bitovým A/D převodníkem.



Obr. 29: Principiální schéma převodu analogového signálu ze senzoru na digitální podobu. [14]

Celkový rozsah možných čísel odpovídá dynamickému rozsahu a nejmenší možný krok určí přesnost převodu. 12 bitový převodník přiřadí nulové hodnotě napětí ze senzoru digitální číslo 0 (černá barva) a maximální hodnotě napětí ze senzoru se přiřadí číslo 4095 (bílá barva). Je-li napětí někde mezi krajními hodnotami, tak se lineárně převede na odpovídající číslo. Pokud na sensor dopadne více světla, než je schopen A/D převodník zpracovat, zůstane na pixelu maximální hodnota převodníku a dochází ke zkreslení informace o dopadajícím světle, potažmo jasů. Tomu se dá zabránit změnou velikosti clony, nebo změnou doby expozice.

### 7.2.3 Clona a ohnisková vzdálenost

Oba faktory ovlivňují množství světla, které projde objektivem až na senzor. Clonu lze řídit nastavením kruhového otvoru ve středu objektivu. Čím větší je průměr clony, tím více světla projde objektivem a dopadne na senzor.

Podle základního optického zákona převrácených čtverců závisí množství světla dopadajícího na senzor nejen na otvoru clony, ale také na vzdálenosti clony od senzoru. Vzdálenost clony od senzoru je rovná ohniskové vzdálenosti objektivu. Intenzita dopadajícího světla na senzor je tedy závislá na průměru clony a na ohniskové vzdálenosti použitého objektivu.

### 7.2.4 ISO šum

Při snaze o vyšší citlivost senzoru (vysoké ISO) je senzor citlivější i na všechny poruchy, které v senzoru probíhají (tepelný šum atd.), což se projeví šumem v obraze. Tento šum způsobí náhodně barevné body v obraze a je tím větší, čím je ISO vyšší.

Mnoho DSLR proto nabízí možnost při použití vyššího ISO šum redukovat. Redukce se provádí výpočtem a je to další zátěž pro obrazový procesor, který obvykle výrazně zpomalí sekvenční fotografování.

Pro korektní měření jasů je nejvhodnější použít co nejmenší nastavení ISO tak, aby se na senzoru neprojevoval nežádoucí šum.

### 7.2.5 Blooming

Každý senzor je tvořen maticí světlocitlivých buněk (pixelů), ve kterých se dopadem světla generují elektrony, které se potom převádějí na elektrický náboj. Blooming je stav, kdy dopadající světlo na buňku má tak vysokou intenzitu, že vytvoří obrovské množství elektronů, a ty přetečou do sousedních buněk a i dál. I když moderní fotoaparáty mají tzv. antibloomingové obvody (obvody, které odvádějí nadbytečné elektrony z čipu), nejsou proti bloomingu zcela odolné a snadno se stane, že přeexponované bílé plochy obrazu poškodí kresbu v místech, kde by měla být normální kresba.

## 7.3 Postup vytvoření jasové mapy

Výše zmíněné programy LMK Mobile Advanced, LMK LabSoft a LumiDISP pracují na podobném principu. Postup pro vytvoření jasové mapy ze snímku pořízeném digitálním fotoaparátem je zjednodušeně popsán v následujících čtyřech krocích.

1. Z digitální fotografie se separují RGB komponenty.
2. Z metadat, která jsou součástí dat uložených v digitální fotografii se zjistí hodnoty potřebné pro přepočítání na jasový kanál. Odečítají se hodnoty času uzávěrky, velikost clonového čísla, citlivost ISO a ohnisková vzdálenost objektivu.
3. Podle vzorce se vypočte pomocná jasová složka z kombinace RGB hodnot a odečtených hodnot z metadat, která je přizpůsobena spektrální křivce lidského oka  $V(\lambda)$ . Výjimku představuje jasový analyzátor LumiDISP - LDA, který používá pro přizpůsobení ke křivce  $V(\lambda)$  spektrální korekční filtr.
4. Podle kalibrační rovnice se přepočte pomocná jasová složka na výsledný jasový kanál. Tato rovnice může obsahovat pouze přenásobení určenou konstantou (v závislosti na době expozice, citlivosti ISO, atd.), nebo další matematické operace, které odstraňují korekce použité u vyhotovení digitální fotografie.

Nemalým problémem je poměrně složité přizpůsobení měřených dat křivce spektrální citlivosti lidského oka  $V(\lambda)$ . Jelikož světlocitlivé senzory (CCD, CMOS) mají různou lineární odezvu v rozsahu viditelného světla (380 až 780 nm) mohou data převedena na jasovou mapu obsahovat chybu.

Tyto nedostatky je možné odstranit použitím černobílého čipu, který vlastně bude udávat po převodu v A/D převodníku pouze jedinou hodnotu každého pixelu závislou na velikosti dopadajícího světla na pixel. Použitím kombinace vhodného optického filtru se spektrální charakteristikou CCD nebo CMOS senzoru je pak možné vytvořit výslednou křivku spektrální citlivosti odpovídající křivce spektrální citlivosti lidského oka pro mezopické, fotopické i skotopické vidění.

Programy rovněž umožňují použití funkce HDR (high dynamic range), která zajišťuje větší dynamický rozsah jasového snímku. Princip funkce HDR je založen na pořízení více snímků s různou hodnotou expozičního času a následným zpracováním v programu, kde jsou pro vyhodnocení separovány pixely, které jsou buď přeexponovány, nebo je jejich

expozice nedostatečná a nenesou relevantní informaci o absorbovaném světle. Výsledná jasová mapa je následně složena z vybraných pixelů s optimální hodnotou absorbovaného světla a umožňuje znázornění nízkých i vysokých hodnot jasů v jedné jasové mapě.



## 8 Metodika vyhodnocování rušivých účinků světla

S rozvojem měření jasů pomocí digitální fotografie je možné zachytit celý horní poloprostor v relativně krátké době pořízením jednoho snímku, který lze pomocí k tomu vytvořených programů převést na jasovou mapu. Digitální jasoměry, které používají k měření digitální fotografii, představují digitální fotoaparáty se zorným úhlem cca 40° horizontálně a 30° vertikálně v závislosti na použité optice. Pro pořízení snímku celého horního poloprostoru se používá cirkulárního objektivu rybí oko s prostorovým úhlem  $2\cdot\pi$  rad.

Na pořízeném snímku převedeném na jasovou mapu je možné vymezením různých oblastí, které jsou zajímavé z hlediska vyhodnocení průměrného, minimálního, nebo maximálního jasu. Tyto oblasti mohou být definovány různými objekty, jako je kruh, čtverec, obdélník nebo jakýkoli mnohoúhelník. Pokud je potřeba určit jasový řez, můžeme zvolit jako objekt čáru a hodnoty na ní zobrazit v grafu.

Další možností je vhodné zvolení palety barev odpovídající úrovním jasů, které jsou hlavním cílem zkoumání. Jednotlivé hodnoty jasů lze také spojit stejnou barvou a vytvořit izočáry jasů. Takto bude možné objektivně zhodnotit jasové poměry (rozdíly) v jednotlivých oblastech vidění.

### 8.1 Přehled současných metod vyhodnocování rušivého světla

Měření rušivých účinků světla je v některých případech poměrně jednoduché, v jiných velmi náročné. Obvykle není problém vyhodnotit množství světla dopadajícího do míst, kde není žádoucí, například světlo dopadající do oken domácností. Obtížné je zhodnocení nežádoucích vlivů umělého osvětlení na noční prostředí, tedy zvýšení závoje jasů oblohy, nebo měření nežádoucího zvýšení osvětlenosti noční krajiny.

Vyhodnotit vliv umělého osvětlení na noční oblohu lze několika způsoby.

- Za nejjednodušší lze označit stanovení mezní hvězdné velikosti. Na obloze se zvolí vhodná oblast, která je např. vymezena čtyřmi jasnými a snadno naležitelnými hvězdami. Měření je podmíněno bezoblačnou oblohou a možností opakování měření v jiných lokalitách. V oblasti se spočítají všechny viditelné hvězdy a ze známých hvězdných velikostí lze odvodit mezní hvězdnou velikost v dané lokalitě při určitých pozorovacích podmínkách. Metoda je velmi subjektivní, věrohodnější výsledky může poskytnout, jen zúčastní-li se pozorování větší počet pozorovatelů. Lze ji označit za orientační, zhruba umožňující posoudit, zda v té či oné lokalitě jsou vhodné podmínky pro astronomická pozorování. [15]
- Další metodou vyhodnocení zvýšeného závoje jasů je fotografování s klasickým fotoaparátem. Existuje standard, který umožňuje porovnávat jednotlivé výsledky. Používá se barevný inverzní film s citlivostí ASA 400, objektiv o ohniskové vzdálenosti 50 až 55 mm s clonou nastavenou na hodnotu 4. Exponuje se po dobu osmdesáti sekund. V případě fotografie závisí konečný výsledek na mnoha okolnostech (např. na vlastnostech fotoaparátu a jeho nastavení). Ze zjištěného rozdílu optické hustoty obrazu pozadí a drah hvězd známých hvězdných velikostí na filmu lze odvodit velikost závoje jasů oblohy. I tato metoda je

závislá na definované jasnosti hvězd a není ji možné použít při zatažené obloze. [16]

- Nyní velmi rozšířená metoda měření stavu noční oblohy je s využitím SQM. Tato pozorování již nejsou podmíněny jasnou oblohou, avšak je nutné detailně popsat stav atmosférických podmínek, kvantifikovat je a srovnávat naměřené hodnoty při obdobných situacích. Existují databáze, do kterých přispívají svými měřeními pozorovatelé z celého světa. Na základě těchto pozorování je možné srovnávat nejen jednotlivé místa měření (velkoměsta, města, vesnice), ale i větší oblasti (světadíly, státy, regiony). [17,18]
- Pro dlouhodobá měření existuje metoda vyhodnocování rušivého světla pomocí měření osvětlenosti vodorovné roviny, které umožňuje integrování jasu celé oblohy a při různých atmosférických podmínkách. Hlavním cílem sledování nočních osvětleností je zjištění vlastností a změn v úrovni rušivého světla v různých lokalitách a při rozdílných atmosférických podmínkách. K tomu slouží vybudované zařízení, které umožňuje prakticky kontinuální měření světelného toku dopadajícího na měřicí stanoviště z horního poloprostoru. Měření je provedeno pomocí kalibrovaného luxmetru, který je umístěn na pevném stanovišti (střecha knihovny VŠB-TU Ostrava). [19]

Nedostatkem výše uvedených metod posouzení rušivého světla, až na poslední metodu, je v podstatě nemožnost vyhodnotit jas celé noční oblohy během krátké doby. Z téhož důvodu nelze měření vykonávat ani v delších časových intervalech a při různých stavech oblohy.

## **8.2 Nově navržené metody vyhodnocení jasu noční oblohy**

Jelikož je jas noční oblohy z velké části závislý na místě pozorování a na velikosti a rozmístění zdrojů rušivého světla, je potřeba pro dostatečné vyhodnocení rušivého světla zkoumat celý horní poloprostor.

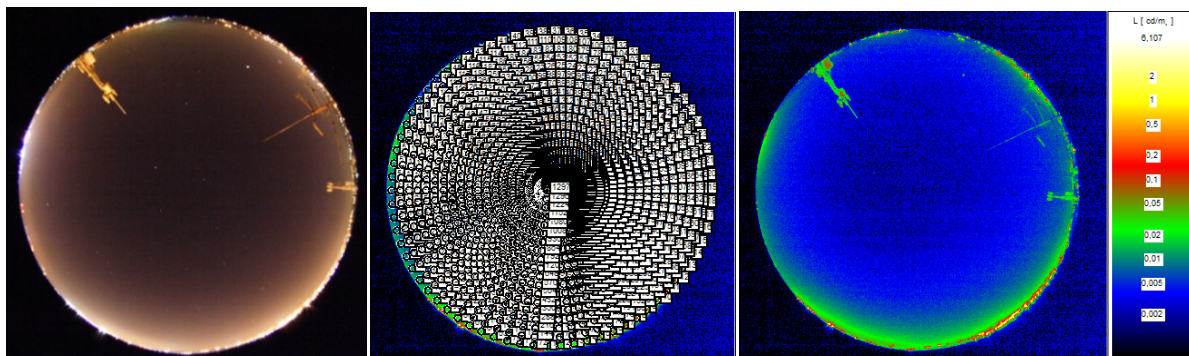
Velikost rušivého světla je závislá na aktuálních atmosférických podmínkách, které se mohou během krátké doby výrazně měnit (proměnlivá oblačnost, vítr, mlha). Pokud chceme zmapovat celý horní poloprostor klasickými přístroji pro měření jasů (např. jasová kamera Minolta LS100, nebo přístrojem SQM) s malými zornými úhly, musíme provést několik měření, přičemž může dojít k náhlé změně atmosférických podmínek a vyhodnocení celého horního poloprostoru bude zatíženo značně velkou chybou.

Snímáním jasu noční oblohy celého horního poloprostoru pomocí jasového analyzátoru s objektivem Rybí oko lze zachytit jasové poměry celého horního poloprostoru během relativně krátké doby měření a zamezit tak znehodnocení měření vlivem proměnlivých atmosférických podmínek.

### **8.2.1 Jasová analýza s objektivem rybí oko**

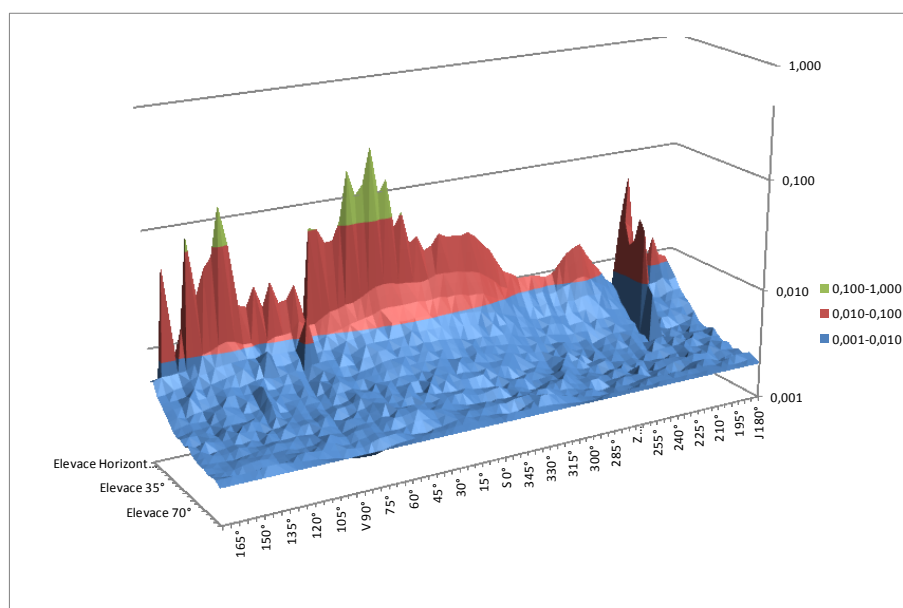
Jednou z možností, jak vyhodnotit jasovou mapu noční oblohy (Obr. 30) pořízenou jasovým analyzátozem je vyhodnocení průměrných jasů dílčích oblastí odpovídajících danému prostorovému úhlu. Tyto oblasti reprezentují kruhové oblasti rozmístěné po 5° azimutu a elevace. Z takto vytvořené sítě oblastí lze pak exportovat průměrné jasy do připravené tabulky a hodnoty vykreslit v grafu (Obr. 31).

Na měřicím stanovišti přibližně uprostřed města Frýdku-Místku na panelovém domě (třináctipatrový obytný panelový dům vysoký cca 50 m) se souřadnicemi 49°40'23.866"N 18°20'30.183"E na křižovatce ulic Hlavní třída a Frýdlantská byly pořízeny snímky jasovým analyzátořm LMK Mobile Advanced k vyhodnocení jasů noční oblohy.



Obr. 30: Jasová mapa s rastrem vyhodnocovaných oblastí po 5° (uprostřed), jasová mapa (vpravo) a pořízený snímek (vlevo).

Pro vyobrazení grafů (Obr. 31) byly odečteny hodnoty z rastru vytvořeného speciálně pro objektiv rybího oka. Tento rast zachycuje hodnoty v 5° krocích v horizontálním směru, kde 0° horizontálně a 0° vertikálně odpovídá směru sever, 90° na horizontu je východ, 180° směru jih a 270° západnímu směru. Vertikálně jsou hodnoty odečítány v krocích: 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 45°, 60°, 75° a 90°, což odpovídá zenitu.



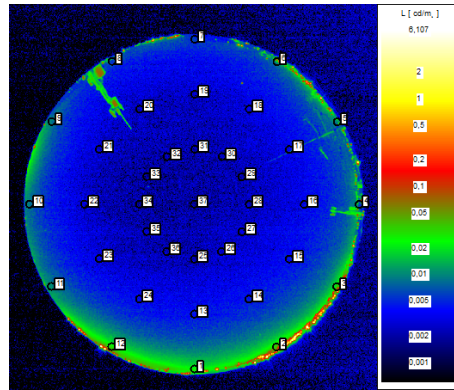
Obr. 31: Graf průměrných hodnot jasů z oblastí masky.

Z grafického vyobrazení hodnot na Obr. 31 je vidět, že se směrem k horizontu průměrný jas oblastí zvyšuje. Rovněž jsou zde vidět zachycené jasy světelných zdrojů, se projevují výrazně vyššími hodnotami průměrných jasů vyhodnocovaných oblastí na horizontu.

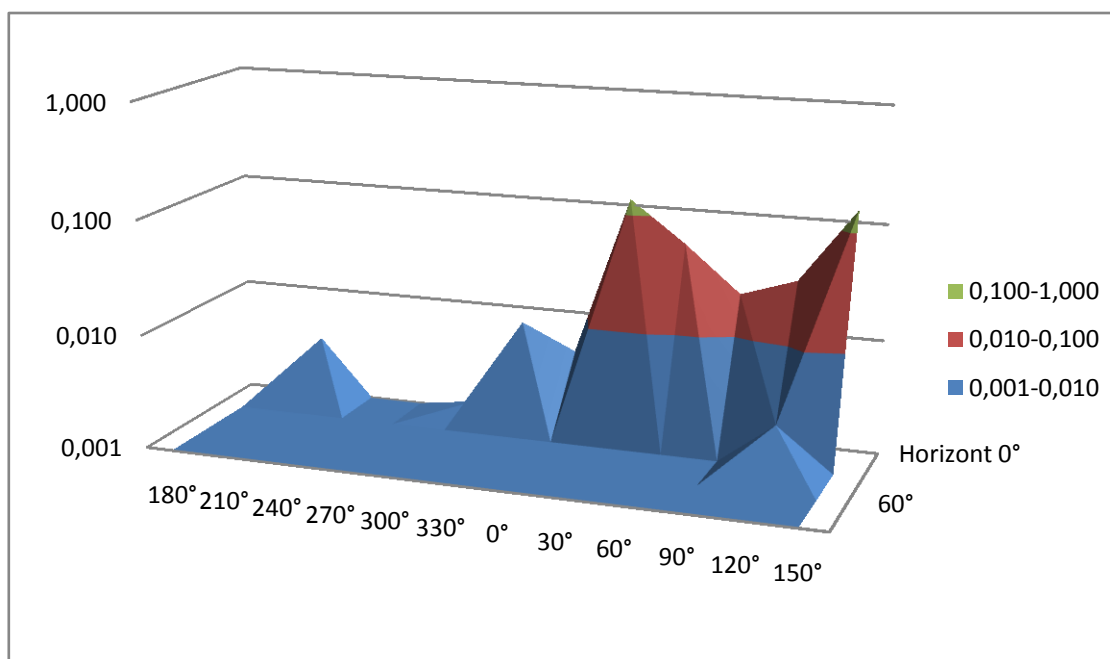
Hodnoty průměrných jasů ve vyhodnocovaných oblastech jsou uvedeny v Tab. 9. Minimální hodnota je  $0,002 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  v zenitu a jeho okolí a maximální hodnota  $0,25 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  je na horizontu v azimutálním úhlu 35°.



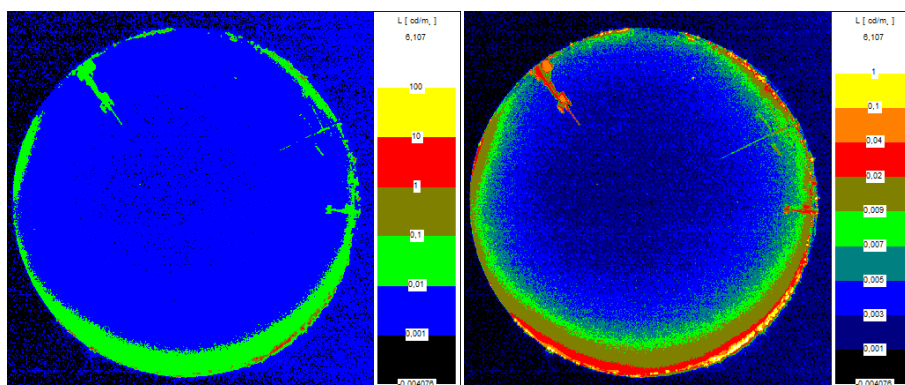
Použití rastru je výhodné při měření pomocí digitální fotografie, avšak pokud bychom chtěli měřit rušivé světlo s klasickými přístroji, je vhodné použít rastr s krokem  $30^\circ$  (Obr. 32), který má celkem 37 dílčích oblastí (Tab. 10). Avšak i takto upravený rastr je pro klasické přístroje, kde je zapotřebí postupně nastavovat jednotlivé stupně elevace a azimutu časově náročné. [20]

Obr. 32: Jasová mapa s maskou po  $30^\circ$ .Tab. 10: Hodnoty průměrných jasů oblastí masky po  $30^\circ$ .

Tab. jasů <sup>2)</sup> (cd·m <sup>-2</sup> )		Elevace			
		Horizont 0°	30°	60°	Zenit 90°
Azimut	<b>J</b> 180°	0,001	0,001	0,001	0,001
	210°	0,003	0,001	0,001	
	240°	0,001	0,001	0,001	
	<b>Z</b> 270°	0,001	0,001	0,001	
	300°	0,001	0,001	0,001	
	330°	0,007	0,001	0,001	
	<b>S</b> 0°	0,004	0,001	0,001	
	30°	0,112	0,001	0,001	
	60°	0,049	0,001	0,001	
	<b>V</b> 90°	0,020	0,001	0,001	
	120°	0,028	0,002	0,001	
	150°	0,125	0,001	0,001	

Obr. 33: Graf s hodnotami průměrných jasů v  $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Při měření celého horního poloprostoru je výhodné použít pro vyobrazení hodnot jasové mapy paletu barev odpovídající jednotlivým úrovním jasů. Na Obr. 34 jsou uvedeny dva příklady vybraných palet. První je zvolena tak, aby zahrnovala co největší rozsah měřených jasů. Pokud je umístění jasového analyzátoru takové, že se v zorném poli objektivu objevují i světelné zdroje (zdroje velmi vysokého jasů) je výhodné použití palety s logaritmickou škálou. Naopak, kde se v jasové mapě nevyskytují vysoké rozdíly jasů, může být použita paleta s hodnotami hranic zvolenými tak, aby byly obsaženy a rovnoměrně rozděleny hodnoty jasů na co největší částí snímku. Příkladem takového rozdělení hranic palety může být paleta na Obr. 34 vpravo.

Obr. 34: Palety barev - vlevo s logaritmickým rozdělením, vpravo s rozdělením od  $10^{-3} \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  do  $1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ .

## 8.2.2 Vyhodnocování jasů noční oblohy pomocí izojas a izoploch

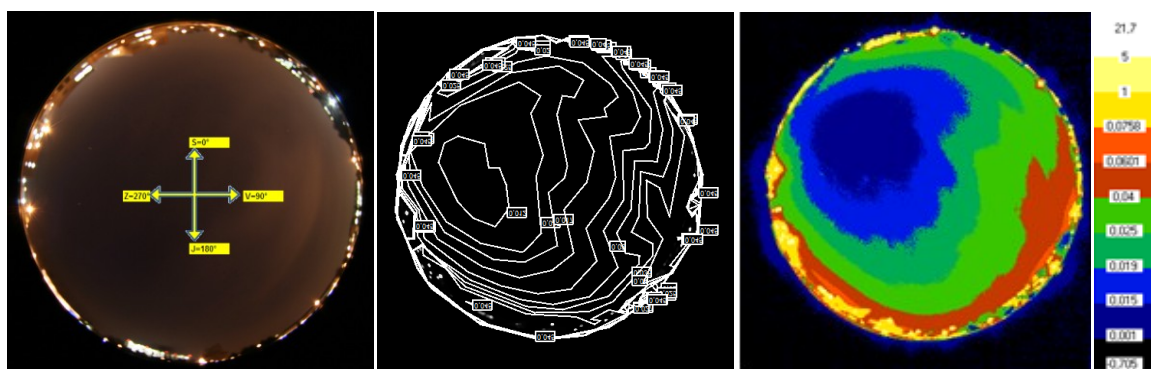
Jasovou mapu vytvořenou z digitální fotografie je možné dále softwarově zpracovávat a zvolit tak vhodné vyobrazení měřených dat. Dalším možným znázorněním měření jasů noční oblohy jsou izojasové čáry, viz. Obr. 36. Tato metodika vyhodnocování je přiblížena na následujícím příkladu měření noční oblohy.

Měření horního poloprostoru bylo provedeno 14. listopadu 2011 v areálu VŠB-TU Ostrava před budovou C v čase 19 hod jasovým analyzátozem LMK Mobile Advanced.



Obr. 35: Mapa s vyznačením měřícího stanoviště.

Toto místo bylo vybráno za účelem zjištění rozložení jasů noční oblohy uprostřed obydlené lokalizace. Na snímku jsou vidět světelné zdroje veřejného osvětlení, místního osvětlení budov a světelné zdroje v oknech obytných domů kolem celého horizontu.



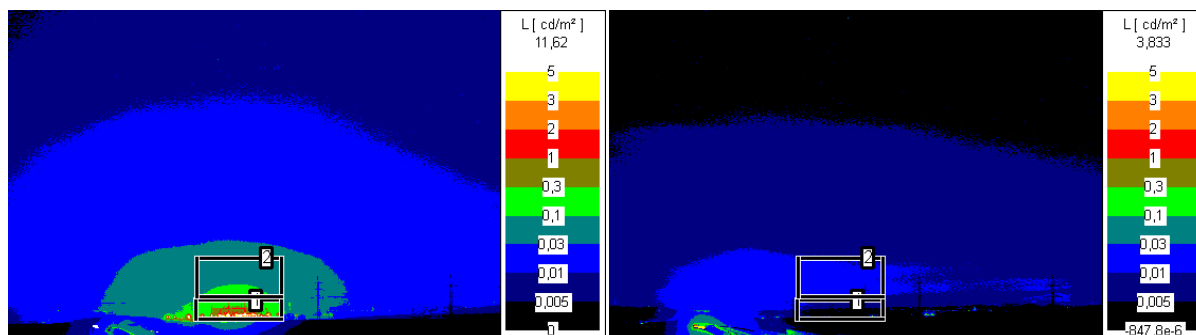
Obr. 36: Snímek horního poloprostoru vlevo, jasová mapa horního poloprostoru s izojasovými čarami uprostřed a paletou vpravo.

Z izojasových čar (Obr. 36 uprostřed) je zřejmé nerovnoměrné rozložení jasů v okolí zenitu. Toto je způsobeno pozicí měřícího stanoviště, jež se nachází na okrajové části Ostrava - Poruba (Obr. 35). Nejvyšší hodnoty jasů, mimo jasů světelných zdrojů, se nacházejí v jihovýchodní části horního poloprostoru, což je obloha nad hlavní částí města Ostravy. Naopak severozápadním směrem s nižšími jasy se nachází zemědělská oblast s řídkou zástavbou rodinných domků.

Zobrazení izojasových čar, nebo ploch noční oblohy je vhodné pro porovnání mezi měřeními a modelováním rušivého světla. [26]

### 8.2.3 Vyhodnocování jasů noční oblohy z pohledu pozorovatele

V některých případech je možné posuzovat zdroje rušivého světla a jejich vliv na okolí prostřednictvím jasového snímku pořízeného z místa pozorovatele, ve kterém se předpokládá nepříznivý vliv tohoto zdroje. Na Obr. 37 je pořízena jasová mapa rozvodné stanice umístěné nedaleko dálnice, která by mohla oslňovat řidiče jedoucí po dálnici.



Obr. 37: Jasová mapa rozvody a jejího okolí.

Vyhodnocovaná oblast rozvodné stanice zahrnuje veškeré osvětlovací soustavy rozvodné stanice s jejím bezprostředním okolím. Po vypnutí osvětlení průměrný jas této oblasti klesl z  $0,842 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  na  $0,006 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , což je více jak 140 krát. Vlivem vypnutí osvětlení rozvodné stanice se průměrný jas oblohy nad rozvodnou, tato oblast je stanovena na dvojnásobek oblasti rozvodny, zmenšil 6,7 krát. Pokud srovnáme celý jasový snímek, průměrný jas klesl 4 krát (Tab.11). Z tohoto pohledu je vidět, že oblast rozvodné stanice zahrnuje i jas světelných zdrojů osvětlovací soustavy a vliv osvětlovacích soustav rozvodné stanice na noční oblohu je výrazně nižší, než na přímý pohled z místa pozorovatele.

Tab. 11: Vyhodnocení oblastí rozvodné stanice, oblohy nad rozvodnou stanicí a celého jasového snímku.

Měřená oblast	Průměrný jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )
Rozvodna - osvětlení zapnuto	0,842
Obloha nad rozvodnou - osvětlení zapnuto	0,074
Celý jasový snímek - osvětlení zapnuto	0,027
Rozvodna - osvětlení vypnuto	0,006
Obloha nad rozvodnou - osvětlení vypnuto	0,011
Celý jasový snímek - osvětlení vypnuto	0,007

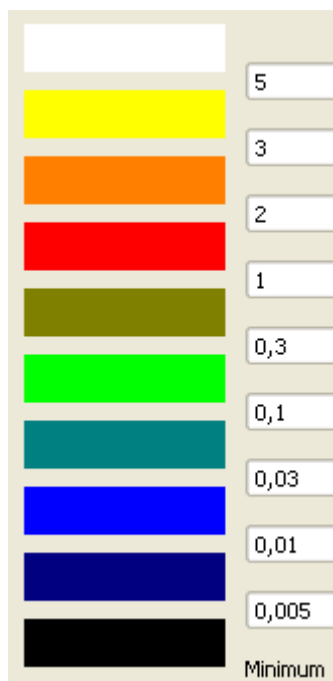
Z výše uvedené jasové mapy vyplývá, že zapnuté osvětlení rozvodné stanice negativně neovlivňuje svými jasy přilehlou dálnicí D1 (Brno – Ostrava). Průměrný jas oblastí rozvodné stanice v pozorovaném kritickém směru nepřevyšuje hodnotu  $1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , což je výrazně nižší, než hodnota jasů, na které se nasvětlují vesnické architektury, či billboardy u dálnic.

### 8.3 Stanovení palet pro vyhodnocování mezopických jasů

Veřejné osvětlení se výrazným poměrem podílí na vzniku rušivého světla. Ve stávajících soustavách se nejvíce užívají jako světelné zdroje nízkotlaké a vysokotlaké sodíkové výbojky, u kterých se uvádí S/P poměr od 0,25 do 0,76 (viz. Tab. 8). V dnešní době rozvoje LED se už vytváří nové aplikace s těmito zdroji a pomalu nahrazují výbojky. U LED světelných zdrojů se S/P poměr pohybuje od 1,68 do 2,5.

Na Obr. 38 je uvedena paleta barev s hranicemi jasů zvolenými tak, aby byly zachyceny jasy v mezopické oblasti. Hodnotám jasů pixelů ve fotopické oblasti, tedy větší jak  $5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , je přiřazena bílá barva a naopak pixely s hodnotami jasů ve skotopické oblasti jsou zobrazeny černě.





Obr. 38: Paleta přiřazující rozmezí fotopických jasů jednotlivým barvám s definovanými mezemi

V požadavcích na osvětlení se uvažují mezní hodnoty jasů pro fotopickou křivku světelné citlivosti. Avšak skutečně vnímaný jas v mezopické oblasti je závislý na spektrální vyzařovací charakteristice vnímaného světelného toku (odražený světelný tok vnímaný zrakovým systémem). Aby bylo možné srovnávat fotopický jas, který je měřen v mezopické oblasti, je zapotřebí jej přepočítat.

Pro výpočet skutečně vnímaného jasů se pro přepočet použijí vzorce 19 a 20, kde stačí pro dostatečně přesný odhad 20 iteračních kroků. S využitím Excelu (Tab. 12) lze sestavit jednoduchý program, kde se zadávají vstupní hodnoty naměřeného fotopického jasů a S/P poměr. Příklad takového výpočtu je proveden pro fotopický jas  $0,02 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  a S/P poměr 0,25. Ve výpočtu je vidět, že i po dvaceti iteračních krocích se ještě vypočtené hodnoty mezopického jasů a konstanty  $m$  mění. Toto je způsobeno hraničními hodnotami zvoleného fotopického jasů a S/P poměru, pokud bychom zvolili fotopický jas  $0,3 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  při stejném S/P poměru, stačilo by k výpočtu mezopického jasů 5 iteračních kroků.

Tab. 12: Výpočet mezopického jasů, skotopického jasů a faktoru  $m$ .

Vstupní hodnoty		n	$m_0$ (-)	$m_{n+1}$ (-)	$L_{\text{mes}}$ ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )
Fotopický jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	0,02	1	0,5000	0,1655	0,015699
S/P-poměr (-)	0,25	2	0,1655	0,0996	0,009955
		3	0,0996	0,0721	0,008236
		4	0,0721	0,0572	0,007429
		5	0,0572	0,0479	0,006966
		6	0,0479	0,0415	0,006667
		7	0,0415	0,0369	0,006458
		8	0,0369	0,0334	0,006305
		9	0,0334	0,0307	0,006188
		10	0,0307	0,0285	0,006095
		11	0,0285	0,0267	0,006021
		12	0,0267	0,0253	0,005960

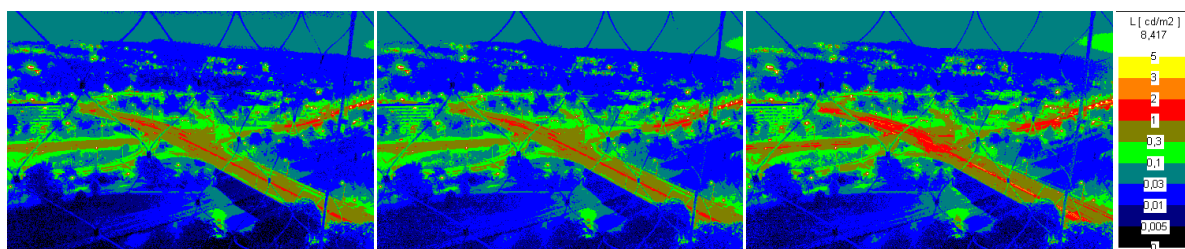
Vypočtené hodnoty	
Skotopický jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	0,005
Mezopický jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	0,006
Faktor $m$ (-)	0,019

13	0,0253	0,0240	0,005908
14	0,0240	0,0229	0,005865
15	0,0229	0,0220	0,005828
16	0,0220	0,0212	0,005795
17	0,0212	0,0205	0,005767
18	0,0205	0,0199	0,005743
19	0,0199	0,0193	0,005721
20	0,0193	0,0188	0,005701

Pomocí tohoto výpočtu lze přepočítat naměřený fotopický jas na skutečně vnímanou hodnotu. Pokud je provedeno měření horního poloprostoru pomocí jasového analyzátoru, kde výstupní jasová mapa obsahuje více než 800 000 hodnot, bylo by použití programu na přepočet složité. V předchozím textu je uveden postup vyhodnocení horního poloprostoru, kde je stanovena paleta deseti hladin hodnot jasů. Na základě výpočtu v Tab. 12 byly vypočteny hodnoty hranic hladin, které odpovídají skutečně vnímanému jasů závislé na poměru S/P a velikosti mezopického jasu. Aplikací těchto palet je pak možné zobrazit v barevné škále (Obr. 38) odpovídající fotopické jasy (Tab. 13).

Tab. 13: Mezní hranice hladin pro různý S/P poměr.

S/P	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75
Fotopický jas (cd·m <sup>-2</sup> )	Vypočtený mezopický jas (cd·m <sup>-2</sup> )										
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
3	2,927	2,952	2,976	3	3,023	3,045	3,067	3,088	3,108	3,128	3,147
2	1,908	1,94	1,971	2	2,029	2,056	2,083	2,109	2,134	2,158	2,181
1	0,913	0,943	0,972	1	1,027	1,052	1,077	1,101	1,125	1,147	1,169
0,3	0,247	0,266	0,283	0,3	0,316	0,331	0,346	0,34	0,373	0,386	0,399
0,1	0,071	0,081	0,09	0,1	0,108	0,116	0,124	0,131	0,138	0,145	0,151
0,03	0,015	0,021	0,026	0,03	0,034	0,037	0,041	0,044	0,047	0,05	0,053
0,01	-	0,005	0,008	0,01	0,012	0,014	0,015	0,017	0,018	0,019	0,021
0,005	-	-	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01	0,011	0,012



Obr. 39: Porovnání jasového snímku části města Ostravy s paletou pro fotopické jasy (vlevo), mezopické jasy s  $S/P = 0,7$  (uprostřed) a skotopické jasy (vpravo).

Jako příklad použití vyhodnocení jasových snímků pomocí palet s vypočtenými hodnotami úrovní je uveden jasový snímek pořízený z radniční věže v Ostravě. Snímek zachycuje křižovatku ulic Českobratrské a Bohumínské a její okolí (Obr. 39). Na snímcích jsou patrné rozdíly zejména na komunikaci a na jasu fasádách budov.

## 9 Doporučení stanovení environmentálních zón v České Republice

Klasifikace vybraných oblastí do environmentálních zón je provedena podle druhu zástavby, vzdáleností přírodních parků a vzdáleností observatoří. Zatřídění do environmentálních zón omezuje u velkých venkovních světelných zdrojů zejména přímé vyzařování světelného toku do horního poloprostoru. V Tab. 2 jsou uvedena přístupná maxima rušivého světla generovaného venkovními osvětlovacími soustavami. Hodnoty rušivého světla jsou rozděleny do čtyř environmentálních zón, a to jak pro dobu mimo noční klid, tak i v době nočního klidu. Tab. 2 uvádí kromě maximálně přípustných hodnot světelného toku vyzářeného přímo do horního poloprostoru (URL) i přípustné hodnoty osvětleností na objektech (dominantně vertikálních osvětleností) a maximální svítivosti použitých svítidel. Poslední dva sloupce tabulky obsahují maximální přípustné hodnoty jasů na fasádách budov a na dopravním značení.

V současné době ani projektanti, ani úředníci stavebních úřadů zatřídění do environmentálních zón neprovádějí, protože se jedná o relativně novou problematiku a v ČR neexistuje prováděcí vyhláška, která by zatřídění do těchto zón upravovala. Z těchto důvodů nelze jednoznačně stanovit v jaké environmentální zóně se to, které území nachází.

Ve větších zkoumaných oblastech se mohou vyskytovat různé zóny vedle sebe. Pokud je tomu tak, neměly by přecházet environmentální zóny mezi sebou víc, jak o jeden stupeň. Rovněž hranice mezi zónami by neměly být skokové, nýbrž postupné. Tab. 5 uvádí doporučení pro minimální rozestupy referenčních bodů mezi jednotlivými environmentálními zónami. Je ale nutné podotknout, že definice referenčního bodu není stanovena. To znamená, že zejména u velkých oblastí (např. národní parky) není jasné, zda tento referenční bod volit v centru oblasti, nebo na jejím okraji. Někteří odborníci se dokonce domnívají, že vzdálenosti mezi jednotlivými zónami uvedené v Tab. 5 by měly být minimálně dvojnásobné.

Pro zatřídění oblastí do jednotlivých environmentálních zón byly stanoveny okrajové podmínky, které vyplývají z požadavků a charakteristiky environmentálních zón [1].

Z hlediska velikosti posuzovaných oblastí je můžeme rozdělit do několika skupin:

- **referenční bod** - z hlediska velikosti se jedná o malou oblast, která ovlivňuje jas noční oblohy, nebo může být ovlivňována rušivým světlem, příkladem mohou být observatoře, malá náměstí, nebo rozvodné stanice;
- **intravilán** - je souhrnné označení pro zastavěné plochy obcí mimo odlehlých částí, nebo samostatných budov, typickým příkladem je vesnice s počtem obyvatel nepřevyšujícím 3000 soustředěná kolem hlavní komunikace, nebo město mimo okrajové části;
- **extravilán** - je souhrnné označení pro nezastavěnou část obce, zde se jedná o souvislý pás kolem intravilánu, který bývá podstatně větší;
- **území** - jedná o velké územní celky bez zastavěných ploch, například národní parky, chráněná krajinná území, nebo přírodní rezervace.

Další hledisko, jak posuzovat environmentální oblast je podle jejího charakteru. Buď se jedná o oblast, která svou funkcí způsobuje rušivé světlo, nebo je rušivým světlem negativně ovlivňována. Pokud je oblast ovlivňována rušivým světlem, její environmentální zóna představuje výchozí bod a nově navrhované osvětlovací soustavy musí splňovat podmínky pro její environmentální zónu. V případě, kdy je oblast zdrojem rušivého světla, nové osvětlovací soustavy, nebo rekonstrukce již vybudovaných, musí splňovat podmínky stávající environmentální zóny. Avšak snahou o snižování energetické náročnosti a nežádoucího vzniku rušivého světla vlivem světelného toku vyzařovaného přímo do horního poloprostoru, by měla být nová osvětlovací soustava navrhována na podmínky pro nižší stupeň environmentální zóny.

V Tab. 14 jsou uvedeny typické příklady oblastí environmentálních zón.

*Tab. 14: Charakteristické oblasti daných environmentálních zón.*

<p><b>zóna E1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• observatoře s okolím 1 km</li> <li>• extravilán vesnic</li> <li>• národní park, chráněné krajinné území s okolím 1 km</li> </ul>	<p><b>zóna E2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• rozvodná stanice</li> <li>• intravilán vesnic s okolím 1 km</li> <li>• extravilán měst</li> </ul>
<p><b>zóna E3</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• intravilán města s okolím 1 km</li> </ul>	<p><b>zóna E4</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• centrum města – poloměr zóny minimálně 1 km</li> <li>• průmyslová a nákupní oblast - poloměr zóny minimálně 1 km</li> </ul>

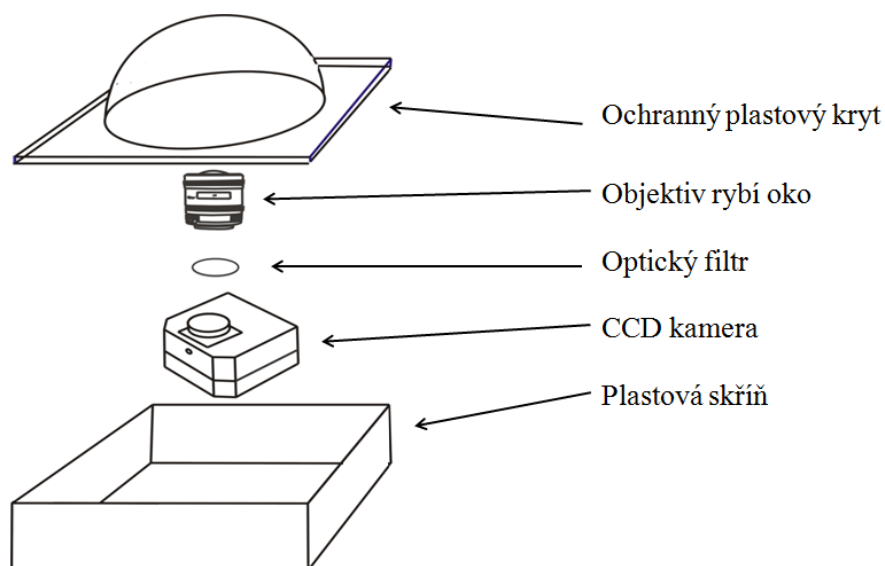
Aby nebyla narušena kontinuita oblastí, je v příkladech uvedena rozšiřující podmínka rozšíření velikost oblasti od její hranice o 1 km (v případě referenčního bodu kruh s poloměrem 1 km).

## 10 Návrh měřícího řetězce pro přímé měření jasů noční oblohy v mezopické oblasti vidění

V předchozích kapitolách je uvedeno, že hodnoty jasů noční oblohy vyvolaného světelným tokem jdoucím do horního poloprostoru se pohybují v mezopické oblasti, tedy od  $0,005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  do  $5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ . Pro posouzení rušivého světla je zapotřebí citlivého přístroje, který je schopný zachytit takto nízké úrovně jasů, aniž by docházelo ke zkreslení měřených údajů. Proto je v této kapitole navržen měřící řetězec, který splňuje jak požadavky na vysokou citlivost, tak i možnost zachycení jasů celého horního poloprostoru.

### 10.1 Filozofie měřícího řetězce

Základním prvkem měřícího řetězce je CCD kamera uložena v ochranném boxu. Na Obr. 40 je nákres celého měřícího řetězce.



Obr. 40: Nákres měřícího řetězce.

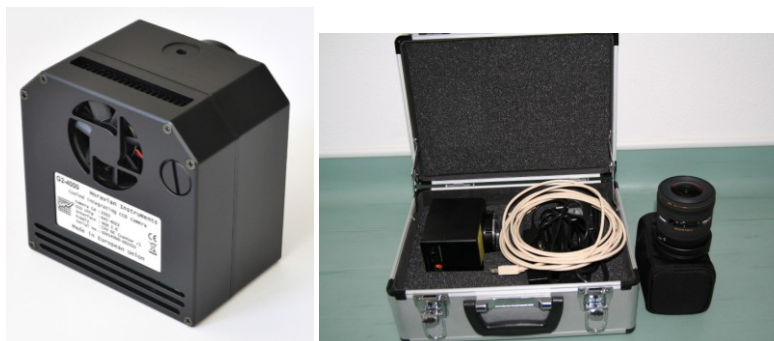
Měřící řetězec určený pro měření rušivého světla je sestaven z černobílé CCD kamery s objektivem rybí oko (Obr. 41) pro zachycení celého horního poloprostoru, speciálně navrženého filtru pro měření v mezopické oblasti a vhodného ochranného krytu pro možnost měření v různých klimatických podmínkách. Všechny součásti jsou zvoleny tak, aby co nejméně ovlivňovaly přesnost měření.

Kamera obsahuje výměnné kolo pro 5 různých optických filtrů. Podle naprogramování je kamera schopna měnit jednotlivé filtry a snímat tak jasy přizpůsobené fotopickému, mezopickému nebo skotopickému vidění v závislosti na zvoleném filtru.

Měřící řetězec je schopen snímat jasy noční oblohy a zachytit dynamiku změny rušivého světla během celé noci.

Tato astronomická kamera byla vybrána pro měřící řetězec z několika hlavních důvodů:

- černobílý světlocitlivý senzor s vysokým rozlišením a citlivostí;
- možnost výměny optických filtrů - různé spektrální světelné citlivosti;
- možnost použití různých optických systému - objektivů;
- aktivní chlazení světlocitlivého senzoru - omezení vzniku tepelného šumu.

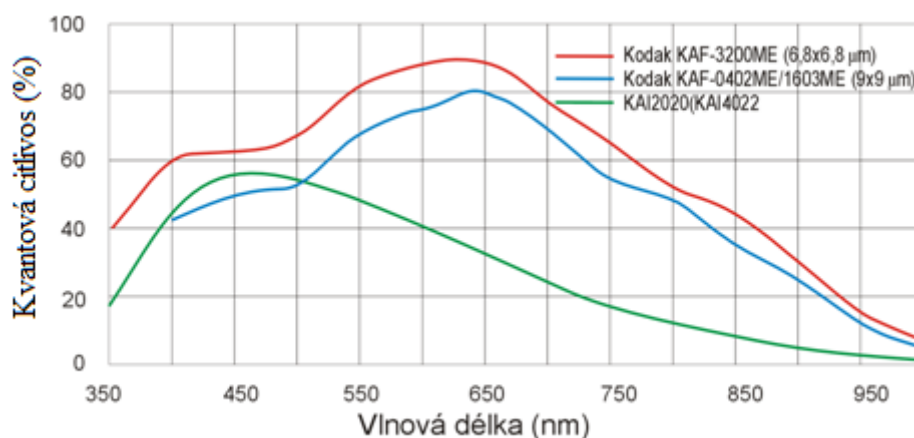


Obr. 41: Astronomická kamera G2-4000.

### 10.1.1 Světlocitlivý senzor CCD kamery

Model astronomické kamery G2-4000 používá 4 megapixelový světlocitlivý CCD senzor Kodak KAI-4022 s rozlišením 2056 x 2062 pixelů. Velikost jednoho pixelu je 7,4 x 7,4  $\mu\text{m}$  s obrazovou plochou 15,2 x 15,2 mm. Komerčně využívané jasové analyzátoři využívají barevných snímků k matematickému přizpůsobení spektrální citlivosti měření. Volba černobílého senzoru se speciálně navrženým optickým filtrem tak odstraňuje chybu vzniklou matematickým přizpůsobením.

Na grafu na Obr. 42 jsou křivky kvantových citlivostí různých světlocitlivých senzorů používaných u CCD kamer. Z hlediska spektrální citlivosti senzorů je nejvhodnější senzor Kodak KAI-4022, který má v oblasti od 450 nm do 550 nm téměř lineární průběh. Ostatní typy mají maximum kvantové citlivosti ve vyšších vlnových délkách blízcím se infračervenému záření a jsou vhodné spíše k pozorování vesmírných objektů.



Obr. 42: Citlivost CCD čipů Kodak používaných v kamerách série G2.

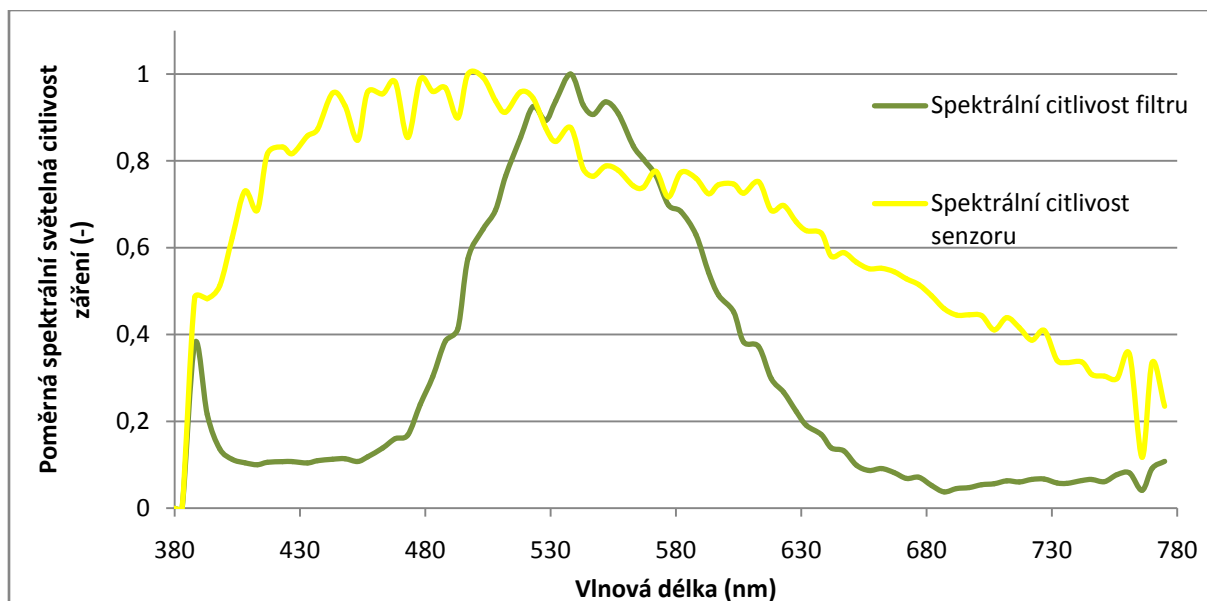
### 10.1.2 Přizpůsobení spektrální světelné citlivosti

Na Obr. 43 je vidět nástavec pro použití různých optických filtrů u CCD kamery. Tento nástavec umožňuje použít 5 samostatných filtrů. Kamera je schopná pořídit jeden snímek pouze s použitím jednoho filtru. Pokud bychom chtěli pomocí černobílé kamery pořídit barevný snímek, museli bychom pořídit tři snímky s jednotlivými RGB filtry a výsledný barevný snímek pak softwarově upravit (sečíst).



*Obr. 43: Filtrové kolo kamer G2 CCD s instalovanými LRGB filtry.*

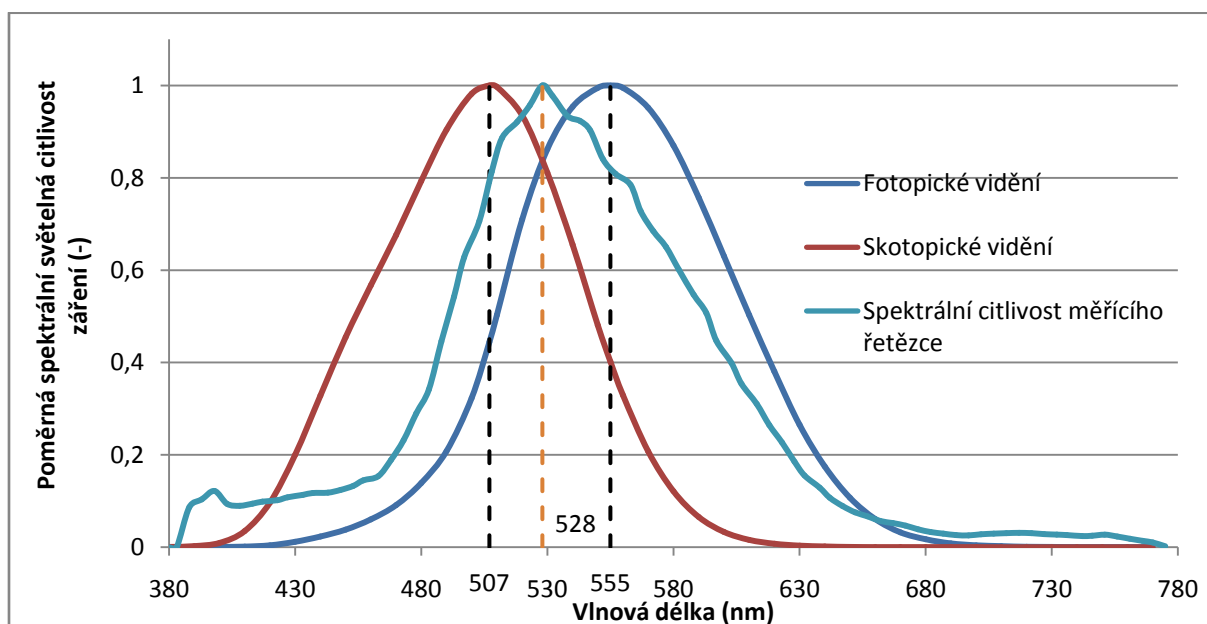
K přizpůsobení měřicího řetězce pro mezopickou fotometrii byl navržen speciální optický filtr se spektrální charakteristikou vyznačenou na Obr. 44 zeleně. Tato charakteristika byla změřena v laboratoři světelné techniky ústavu elektroenergetiky na FEKT VUT Brno pomocí programovatelného světelného zdroje OL490 [22]. Tímto přístrojem byla ověřena i spektrální kvantová citlivost použitého senzoru CCD kamery, která je na Obr. 51 znázorněna žlutě.



Obr. 44: Charakteristiky spektrálních světelných citlivostí senzoru a optického filtru.

Kombinací těchto dvou spektrálních charakteristik byla získána výsledná spektrální světelná citlivost měřicího řetězce. Tato charakteristika je vyobrazena na Obr. 45 spolu s fotopickou a skotopickou spektrální světelnou citlivostí.

Výsledná křivka dosahuje maximální hodnoty v 528 nm, což odpovídá spektrální charakteristice mezopického vidění s koeficientem  $m = 0,7$ .



Obr. 45: Výsledná spektrální citlivost měřicího řetězce.

### 10.1.3 Optické příslušenství CCD kamery

Astronomické kamery jsou standartě dodávány s kompaktní hlavou, která umožňuje připojení k menším dalekohledům. Pro potřeby zachycení celého horního poloprostoru s využitím objektivu rybí oko byla ke kameře připevněna standardizovaná objímka pro objektivy Sigma (Obr. 46). Použitím standardní objímky je možné měřicí řetězec doplnit o

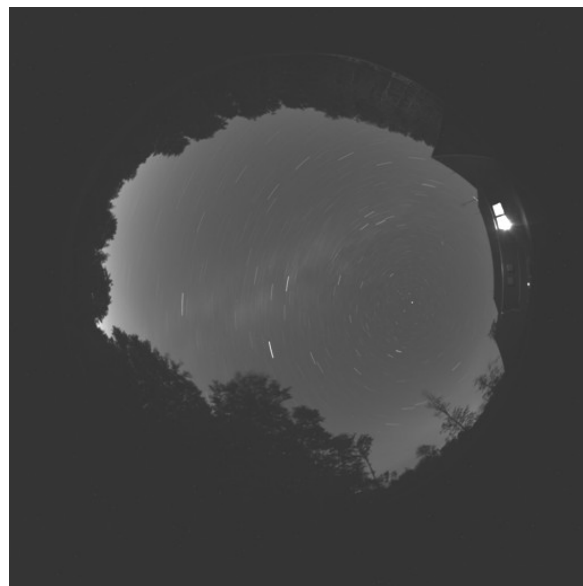


další objektivy podle požadavků měření. Například pro měření jasů noční oblohy z místa pozorovatele (kapitola 8.2.3) lze využít klasický objektiv.



*Obr. 46: Objektiv Sigma Fish-Eye a objímka pro objektivy Sigma.*

Na Obr. 47 je černobílý snímek pořízený CCD kamerou s objektivem rybí oko. Tato fotografie nese údaje o pořízení snímku v metadatech důležité pro přepočítání černobílého snímku na jasový kanál. Pořízený snímek nese rovněž informaci o velikosti pohlceného světla každého pixelu. Snímek byl pořízen 20. 8. 2012 v Modré na Slovensku.

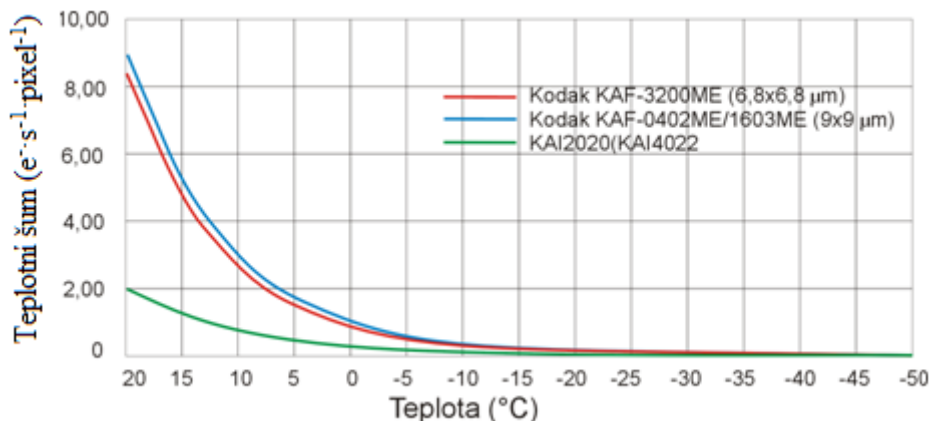


*Obr. 47: Snímek pořízený CCD kamerou s objektivem Fish-Eye*

#### **10.1.4 Chlazení CCD kamery**

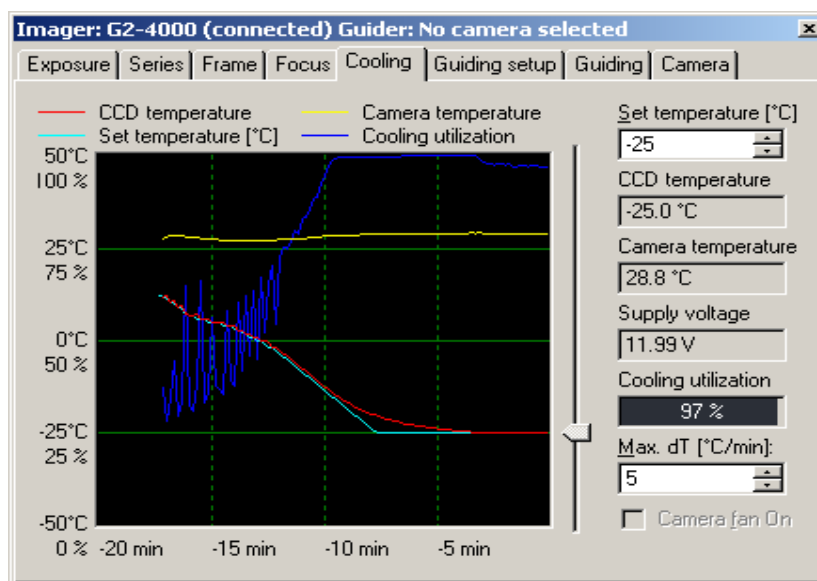
Pro pořízení korektních dat je zapotřebí dlouhé expozice snímku. Při delších časech exponování dochází k ohřívání senzoru. CCD kamera má regulované dvoustupňové termoelektrické chlazení s nuceným oběhem vzduchu, které minimalizuje teplotní šum senzoru a dovoluje tedy exponovat dlouhou dobu. Plná kapacita pixelu je přibližně 40 000 elektronů a plná kapacita výstupu přibližně 100 000 elektronů. Temný proud (teplotní šum) uvedený výrobcem je  $0,3 \text{ e}^- \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{pixel}^{-1}$  (počet absorbovaných elektronů

jednoho pixelu za sekundu) při teplotě 0°C. Ke zdvojení temného proudu dochází při 7 °C (Obr. 48) [23].



Obr. 48: Temný proud senzoru kamery G2-4000 – KAI 4022 ve srovnání s ostatními senzory.

Regulované dvoustupňové termoelektrické chlazení dokáže ochladit CCD čip až o 50 °C pod okolní teplotu. Horká strana Peltiérových článků je chlazena ventilátorem. Teplota CCD senzoru je regulována s přesností  $\pm 0.1$  °C. Účinné chlazení minimalizuje vlastní temný proud CCD senzoru a přesná regulace teploty (Obr. 49) dovoluje správnou kalibraci pořízených snímků. Hlava kamery obsahuje dva tepelné senzory – první měří přímo teplotu CCD senzoru, druhý senzor měří teplotu vzduchu chladicího horkou stranu Peltiérových článků.

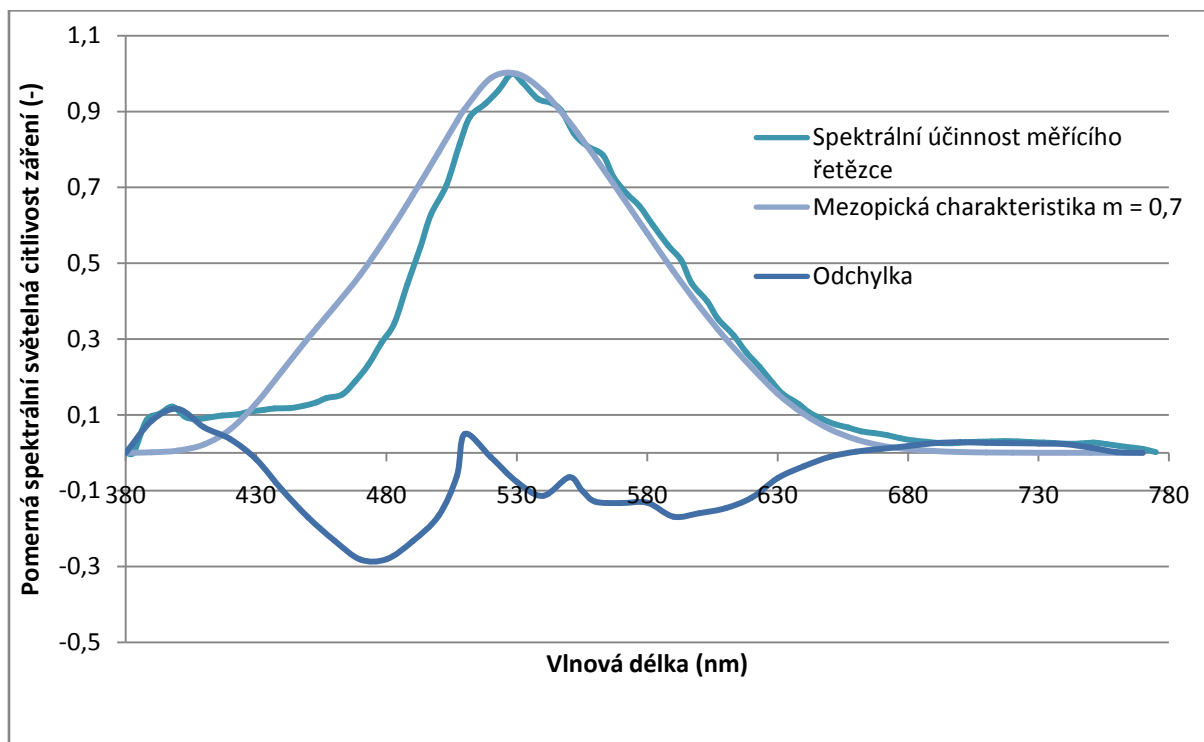


Obr. 49: Časový průběh chlazení senzoru CCD kamery G2-4000 v programu SIMS. [23]

## 10.2 Chyba měřicího řetězce

Měření jasu navrženým měřicím řetězcem je zatíženo určitou chybou způsobenou nejružnějšími negativními vlivy, které se v měřicím procesu vyskytují. To se projevuje odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou sledované veličiny. Výsledek měření se tak vždy pohybuje v určitém pravděpodobném rozsahu (tzv. chybovém intervalu), o který se může skutečná hodnota jasu odlišovat od naměřené.

Vlivem nelineárního průběhu kvantové citlivosti senzoru vzniká systematická chyba měřícího řetězce. Grafické znázornění odchylky je uvedeno v Obr. 50, kde jsou rovněž zobrazeny křivky spektrální světelné citlivosti měřícího řetězce a mezopické charakteristiky pro konstantu  $m = 0,7$ .



Obr. 50: Spektrální citlivost měřícího řetězce, křivka spektrální citlivosti mezopického vidění pro konstantu  $m = 0,7$  a jejich vzájemná odchylka.

Systematická chyba ovlivňuje měřenou hodnotu konstantně jedním směrem, i když se velikost ovlivnění může časem měnit např. v důsledku stárnutí měřícího přístroje. Chybu můžeme matematicky korigovat a po následné korekci naměřených dat dostáváme správné výsledky měření.

Výpočet systematické chyby byl proveden odečtením poměrné spektrální světelné citlivosti mezopického vidění s konstantou  $m = 0,7$  od poměrné spektrální světelné citlivosti měřícího řetězce. Výsledkem je pak chyba závislá na vlnové délce měřeného světla. Systematická chyba měřícího řetězce dosahuje maxima  $e_{vmax} = -0,281$  na vlnové délce  $\lambda = 470$  nm a průměrná hodnota systematické chyby je  $e_v = -0,058$ . Korekce systematické chyby měřených hodnot jasů měřícím řetězcem pak bude podle vzorce:

$$L = L_p \cdot (1 + e_v) \quad (28)$$

kde:

- $L$  výsledný jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ );
- $L_p$  jas pixelu ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ );
- $e_v$  systematická chyba (-).

Tato systematická chyba je vypočtena pro celé spektrum viditelného záření. Je proto pouze teoretická. Pokud bude měřeno jiné spektrum, chyba se bude lišit. Například

světelný zdroj s dominantním vyzařováním v oblasti 480 nm bude mít větší chybu (až 30 % odchylka), než zdroj s dominantním vyzařováním s vlnovou délkou 580 nm (odchylka 12 %).

### 10.3 Kalibrace CCD kamery

Aby bylo možné pomocí měřicího řetězce vyhodnocovat jas v  $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$  je zapotřebí provést jeho kalibraci. V podstatě se jedná o funkční závislost, která přiřadí hodnotou vybuzení pixelu hodnotě jasů. Tato funkce je závislá především na podmínkách expozice (to znamená na času expozice, na cloně - průměr kruhového otvoru ve středu objektivu a na citlivosti ISO - elektronicky řízená citlivost senzoru). Jelikož jsou hodnoty clony a ISO konstantní, kalibrační rovnice bude závislá pouze na hodnotě času expozice.

Ze známých vlastností CCD kamery a z kalibrace pomocí referenčního přístroje byla sestavena výsledná kalibrační rovnice měřicího řetězce:

$$L = \frac{Y}{S} \cdot (1,1 + 8,6 \cdot e_v) \quad (29)$$

kde:

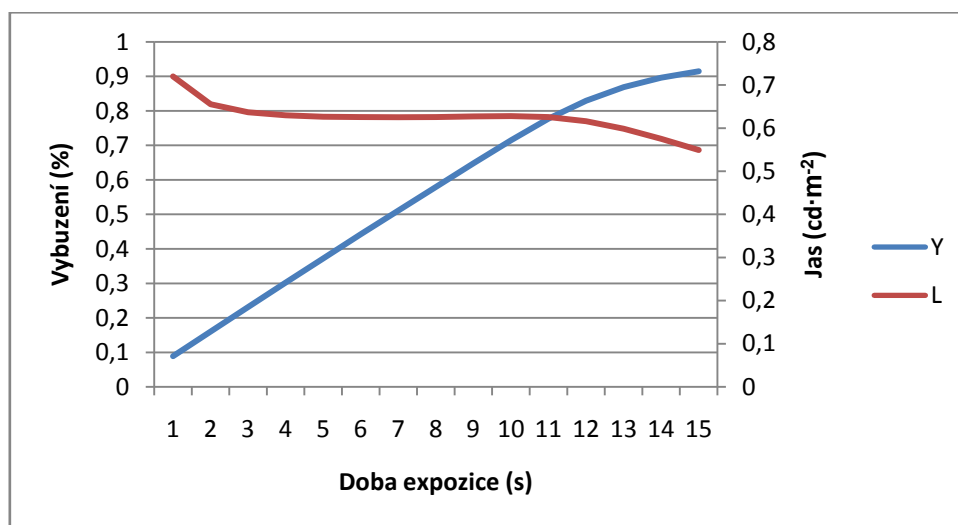
- L výsledný jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ );
- Y vybuzení pixelu ( $0 \leq Y \leq 1$ ) (-);
- S hodnota času expozice (s);
- $e_v$  průměrná hodnota systematické chyby (-).

Na základě kalibrační rovnice bylo provedeno měření závislosti vybuzení pixelu Y na délce expozice. V Tab. 15 jsou v prvním sloupci uvedeny nastavované hodnoty času expozice, ve druhém sloupci je průměrná hodnota vybuzení pixelů ve sledovaném poli a ve třetím sloupci je vypočtený jas podle kalibrační rovnice měřicího řetězce. Tato závislost byla provedena na referenční hodnotě jasů  $0,629 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Tab. 15: Hodnoty vybuzení pixelu a jas vypočítaný pomocí kalibrační rovnice měřicího řetězce pro různé hodnoty expozičního času.

Čas expozice S (s)	Vybuzení pixelů Y (-)	Jas L ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Odchylka od referenční hodnoty (%)
1	0,089	0,729	15,8
2	0,160	0,663	5,4
3	0,231	0,644	2,3
4	0,302	0,636	1,1
5	0,372	0,632	0,5
6	0,442	0,631	0,4
7	0,511	0,630	0,2
8	0,580	0,631	0,2
9	0,648	0,632	0,4
10	0,715	0,632	0,5
11	0,778	0,630	0,1
12	0,829	0,619	-1,5
13	0,869	0,602	-4,3
14	0,897	0,578	-8,1
15	0,915	0,552	-12,2

Závislost vybuzení pixelu na nastavené hodnotě expozice je zobrazena na Obr. 51. Z této závislosti je zřejmé, že pro výpočet jasů je minimální hodnota vybuzení 0,2 kde odchylka od referenční hodnoty dosahuje 4,4%. Horní hranice hodnoty vybuzení, při které chyba nepřekračuje 5% je přibližně 0,85.



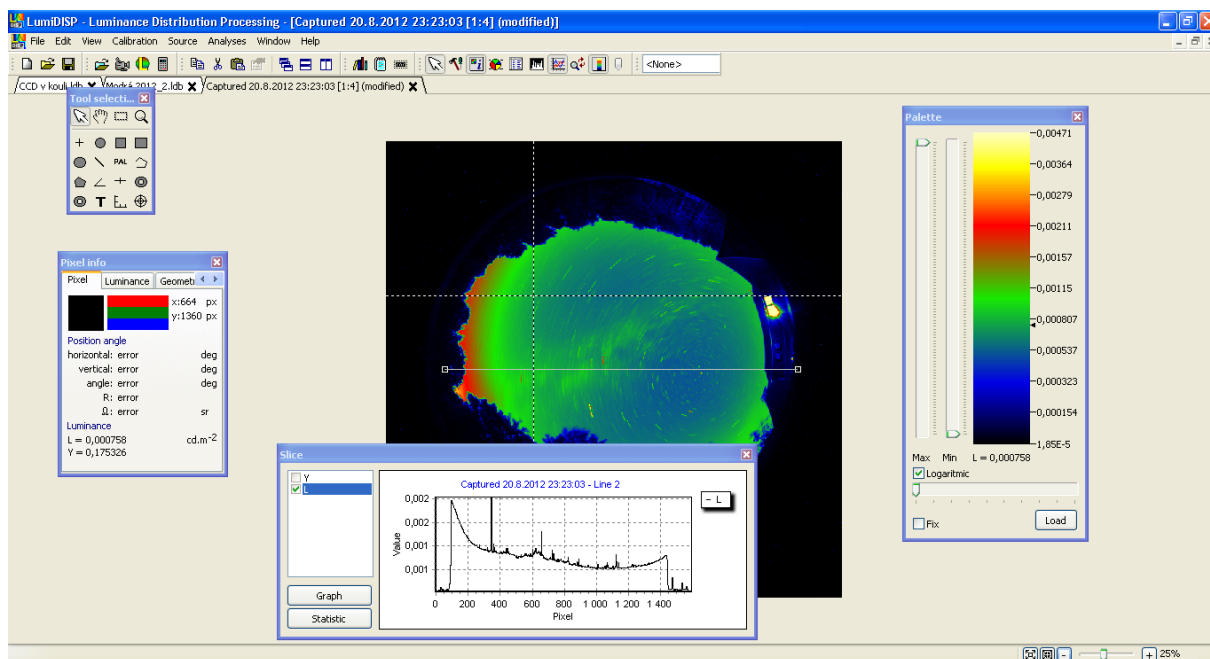
Obr. 51: Závislost velikosti vybuzení světlocitlivého senzoru a vypočítaného jasů na době expozice

Nejkratší možný čas expozice uzávěrky CCD kamery G2 - 4000 je 0,1 s [23], což by při optimálním vybuzení senzoru (hodnota  $Y = 0,5$ ) odpovídalo jasů  $43,1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ . Jelikož je měřicí řetězec speciálně navržen pro měření v mezopické oblasti, to je od hodnot jasů  $0,005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  do  $5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , jsou reálné hodnoty expozice od cca 0,8 s pro horní úroveň mezopického jasů až po 900 s pro dolní hranici.

#### 10.4 Programové vybavení měřicího řetězce

Astronomická kamera G2 - 4000 je uzpůsobena pro komunikaci s počítačem přes USB port. Součástí kamery jsou vlastní systémové ovladače, které pracují jako jádra operačního systému a program SIMS (Simple Image Manipulation System), pomocí kterého je možné kameru ovládat. Po instalaci ovladačů kamery a programu SIMS lze u kamery nastavovat hodnoty expozice, výběr optického filtru, nebo úroveň chlazení senzoru dle požadavků uživatele. Takto pořízené snímky mohou být následně různě upravovány podle potřeb uživatele, nebo zpracované v jiných programech.

Pro potřeby vyhodnocování jasových poměrů je využit počítačový program LumiDISP, který je schopen analyzovat jasové poměry na základě obrazových dat z digitální fotografie. Tento program byl vyvinut realizačním týmem pod vedením Doc. Ing. Petra Baxanta, Ph.D. na Ústavu elektroenergetiky VUT v Brně [24].



Obr. 52: Náhled vyhodnocovacího prostředí programu LumiDISP

Program LumiDISP umožňuje vytvořit kalibrační funkci nejen pro běžně dostupné digitální fotoaparáty, ale i pro astronomické CCD kamery. Pomocí sestavené kalibrační rovnice (rovnice 29) se vytvoří funkce pro převod kanálu Y (hodnota vybuzení pixelu) na hodnotu jasu v jednotkách  $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ . Na Obr. 52 je uveden náhled dialogového okna programu LumiDISP s jasovou mapou horního poloprostoru s jasovým řezem. Pomocí tohoto programu je pak možné dále zpracovávat jasový snímek a vyhodnocovat požadované informace.

Pořízením více snímků s různou dobou expozice je možné pomocí funkce HDR se stavit jasovou mapu, která bude obsahovat korektní informace v požadovaném rozsahu.

Sestavený měřicí řetězec je možné využít i pro dlouhodobé měření jasových poměrů noční oblohy. Programové vybavení umožňuje nastavení automatického snímání v daných intervalech a rovněž volbu optického filtru, aniž by byla nutná přítomnost obsluhy. Pro tuto možnost byl navržen ochranný kryt pro měřicí řetězec, tak aby způsoboval co nejmenší zkreslení měřeného signálu a zároveň zabraňoval nepříznivému působení vnějších atmosférických vlivů na měřicí řetězec.

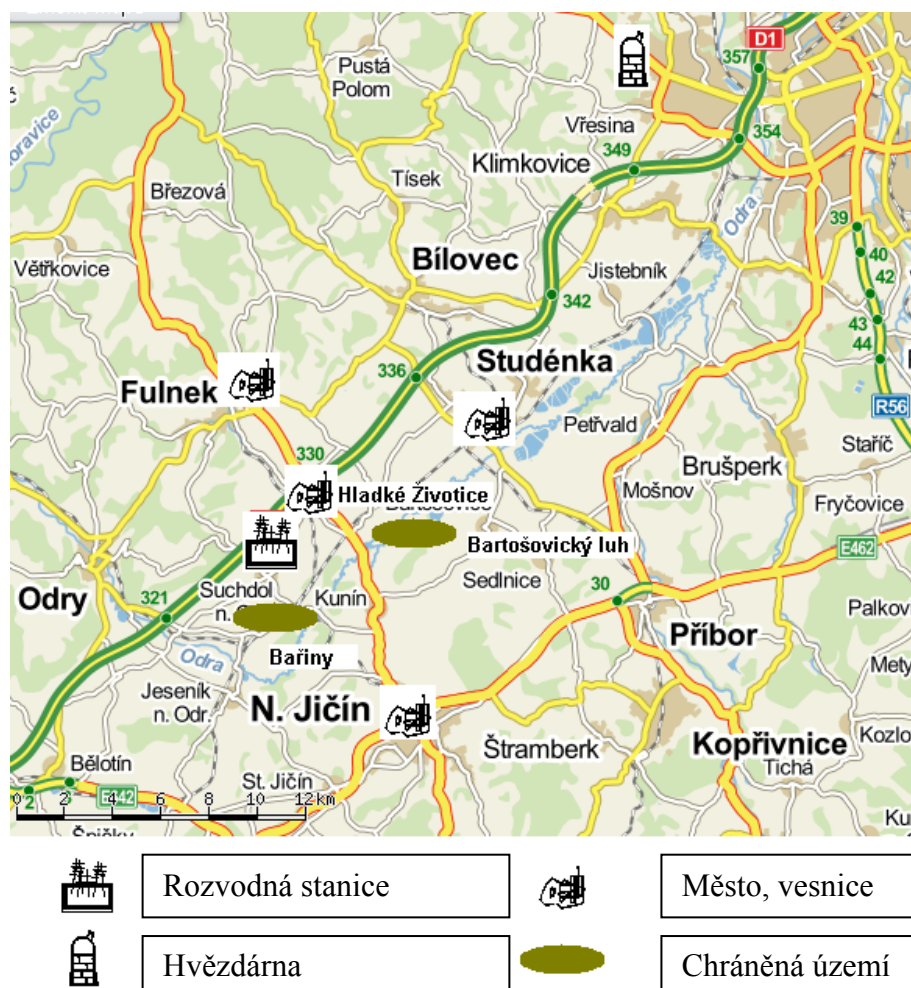
## 11 Aplikace nově navržených metod

### 11.1 Návrh zařídění venkovní rozvodné stanice VVN 420 kV

Pro příklad zařídění byla vybrána venkovní rozvodná stanice z několika zásadních důvodů. Rozvodné stanice přenosové soustavy jsou většinou budovány daleko od ostatních zdrojů rušivého světla, lze je tedy měřit bez okolních vlivů ostatních světelných zdrojů, a protože jsou u těchto světelných zdrojů většinou k dispozici světelně-technické výpočty, lze modelovat i přímý i celkový světelný tok vyzařovaný venkovní rozvodnou stanicí do horního poloprostoru.

Dle doporučení literatury [16] lze při stanovování environmentálních zón vycházet ze vzdáleností od oblastí, u nichž jsou požadavky na environmentální zóny stanoveny vzhledem k jejich funkci (Tab. 5).

Na Obr. 53 je znázorněna mapa s geografickým uspořádáním nejbližších kritických oblastí, které se týkají zařazení rozvodné stanice Kletné do environmentálních zón.



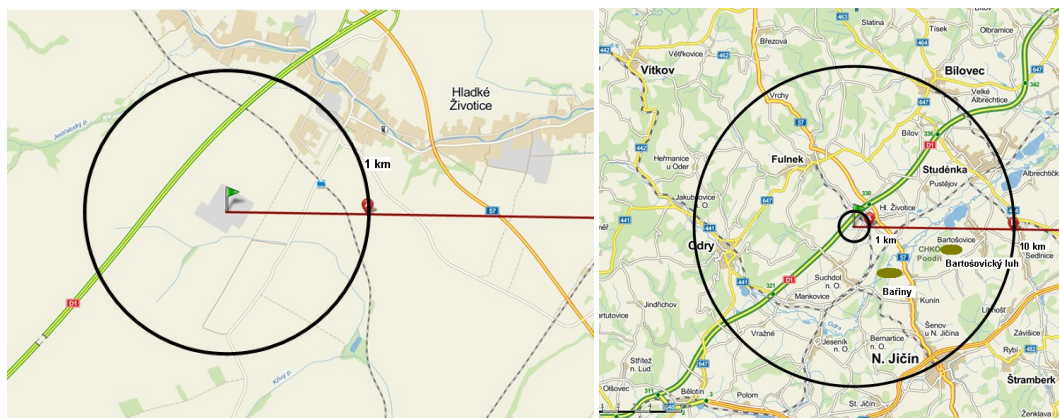
Obr. 53: Mapa s významnými místy v blízkosti rozvodny.

V oblasti kolem rozvodny se nachází několik přírodních parků, hvězdáren, vesnic i měst. Jednotlivé oblasti se vzdálenostmi od rozvodné stanice jsou uvedeny v Tab. 16.

Tab. 16: Rozvodná stanice a vzdálenosti od referenčních bodů.

Hvězdárny	Ostrava	24km
	Valašské Meziříčí	24km
	Vsetín	37km
Chráněná území	PR Bařiny	5,2 km
	PR Bartošovický luh	5,9 km
Vesnice	obec Hladké Životice	1,3 km
	obec Kletné	2,2 km
Města	Nový Jičín	9,8 km
	Příbor	15,5 km
	Studénka	10,9 km
	Ostrava	29,8 km

Na Obr. 54 je mapa rozvodné stanice s vyznačeným okolím 1 km. Rozvodná stanice je umístěna na okraji obce (vesnice) Hladké Životice s počtem 959 obyvatel. Vzdálenost středu rozvodné stanice od okraje vesnice je cca 1 km. Z hlediska vzdálenosti od obytné oblasti můžeme rozvodnou stanici zařadit do environmentální zóny E2, stejně jako obec Hladké Životice.



Obr. 54: Bezprostřední okolí rozvodny vlevo a okolí rozvodny s vyznačením 10 km oblasti vpravo.

Zatřídění environmentální zóny rozvodné stanice se opírá o:

- Vzdálenost vůči nejbližší vesnici Hladké Životice. Tato překračuje hodnotu 1 km. To znamená, že na základě vzdálenosti od nejbližší vesnice lze zatřídít prostor do environmentální zóny E3 – E1.
- Vzdálenost vůči nejbližší přírodní rezervaci (PR) Bařiny. Tato se pohybuje v oblasti do 10 km okolo zóny stanovené PR. To znamená, že na základě příslušnosti do 10-ti km okolí zóny E1 lze zatřídít prostor do environmentální zóny E2 – E1.
- Vzdálenost vůči nejbližšímu městu Nový Jičín. Pokud bude centrum Nového Jičína zatříděno do environmentální zóny E4 na základě architektonického osvětlení památek v centru, tak nelze rozvodnou stanici zatřídít pouze do environmentální zóny E1



- Vzdálenost vůči nejbližší observatoři malého významu v Ostravě nemá na stanovení Environmentální zóny rozvodné stanice vliv.

Na základě výše uvedených částečných zařídění lze k rozvodné stanici 420 kV v Kletné přiřadit environmentální zónu E2 s povoleným přímým vyzařováním světelného toku do horního poloprostoru do 5 % z celkového vyzářeného toku produkovaného osvětlovacími soustavami rozvodné stanice.

## 11.2 Měření jasů noční oblohy

Ve spolupráci se Slovenskou akademií věd, ve které se mimo jiné zabývají sestavením matematického modelu pro výpočet rušivého světla v závislosti na vstupních datech [26, 27] byla provedena měření jasů noční oblohy nad městem Frýdek - Místek, v blízkosti astronomické observatoře v Modré ve Slovenské Republice a v rozvodné stanici Přeštice. Tato měření jsou poskytována pro porovnání matematického modelu s konkrétním měřením [28].

### 11.2.1 Měřicí stanoviště - astronomická observatoř Modrá

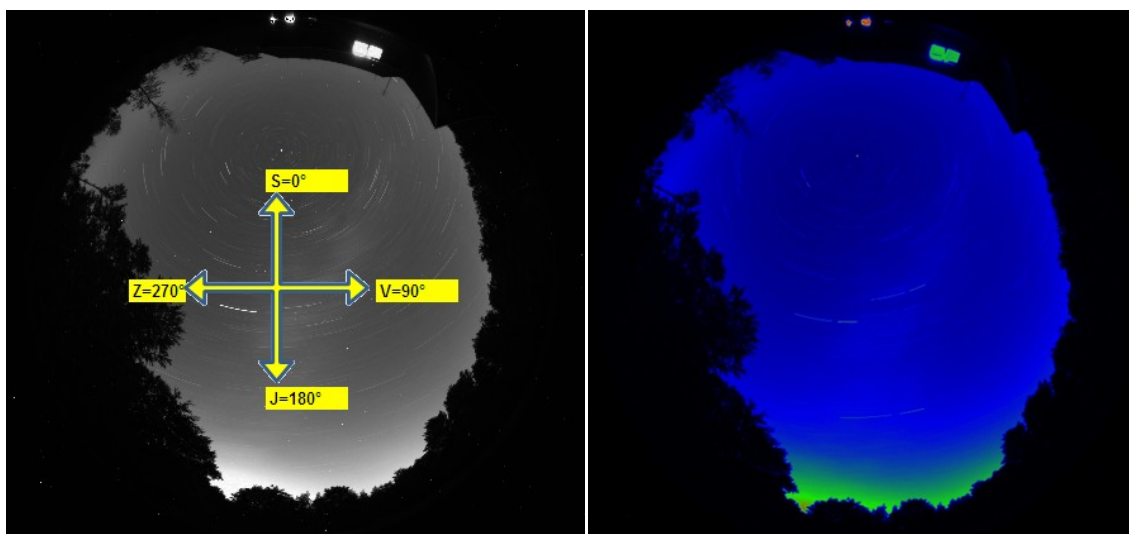
Měřicí stanoviště blízko astronomické observatoře je vyznačeno na mapě na Obr. 55. V okolí měřicího stanoviště se nenacházejí žádné větší zdroje rušivého světla. Vzdálenost centra od nejbližší vesnice Modrá je 4,3 km. Ve vzdálenosti 23 km východním směrem se nachází město Trnava a jižním směrem je hlavní město Slovenské Republiky Bratislava, vzdálené 25 km vzdušnou čarou.



Obr. 55: Mapa s vyznačením měřicího stanoviště a jeho okolím.

Měření se uskutečnilo 21. a 22. 8. 2012 při bezoblačné obloze. Měřicí řetězec byl umístěn ve dvoumetrové výšce od země, a proto jsou na pořizovaných snímcích zachyceny stromy v okolí a blízka chata. Jak je vidět na jasové mapě na Obr. 56, jas noční oblohy je téměř

rovnoměrný a pohybuje se kolem hodnoty  $0,0007 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ . Zvýšený jas jižním směrem je způsoben rušivým světlem v oblasti Bratislavy.



Obr. 56: Snímek pořízený CCD kamerou s objektivem rybí oko (vlevo) a jasová mapa (vpravo) noční oblohy na astronomické observatoři v Modré.

Jednotlivé hodnoty jasů v oblastech rozmístěných podle metodiky vyhodnocení v kapitole 8.2.1 jsou uvedeny v Tab. 17.

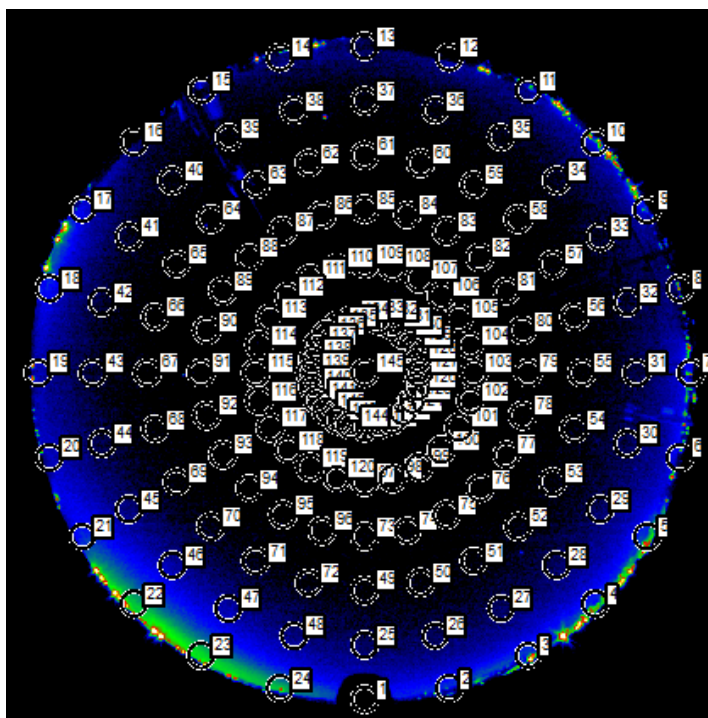
Tab. 17: Hodnoty jasů noční oblohy.

Tabulka jasů ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )		Elevace						Zenit 90°
		Horizont 0°	15°	30°	45°	60°	75°	
Azimut	J 180°	0,00003	0,00122	0,00136	0,00102	0,00084	0,00086	0,00072
	195°	0,00002	0,00215	0,00145	0,00097	0,00081	0,00083	
	210°	0,00002	0,00003	0,00075	0,00088	0,00077	0,00076	
	225°	0,00002	0,00003	0,00007	0,00077	0,00070	0,00074	
	240°	0,00002	0,00002	0,00016	0,00047	0,00064	0,00065	
	255°	0,00002	0,00003	0,00004	0,00015	0,00061	0,00062	
	Z 270°	0,00002	0,00003	0,00005	0,00045	0,00057	0,00060	
	285°	0,00002	0,00005	0,00021	0,00057	0,00056	0,00060	
	300°	0,00002	0,00086	0,00064	0,00055	0,00054	0,00058	
	315°	0,00002	0,00083	0,00064	0,00054	0,00054	0,00058	
	330°	0,00003	0,00081	0,00059	0,00055	0,00054	0,00057	
	345°	0,00002	0,00073	0,00059	0,00053	0,00054	0,00059	
	S 0°	0,00065	0,00051	0,00059	0,00055	0,00054	0,00061	
	15°	0,00010	0,00050	0,00062	0,00056	0,00058	0,00063	
	30°	0,00004	0,00077	0,00066	0,00060	0,00060	0,00066	
	45°	0,00002	0,00020	0,00070	0,00070	0,00065	0,00066	
	60°	0,00002	0,00005	0,00072	0,00064	0,00070	0,00069	
	75°	0,00002	0,00003	0,00075	0,00063	0,00066	0,00073	
	V 90°	0,00002	0,00004	0,00077	0,00065	0,00065	0,00078	
	105°	0,00002	0,00003	0,00082	0,00068	0,00065	0,00077	
120°	0,00002	0,00007	0,00090	0,00072	0,00068	0,00074		
135°	0,00002	0,00005	0,00102	0,00078	0,00071	0,00078		
150°	0,00003	0,00143	0,00114	0,00085	0,00076	0,00081		
165°	0,00003	0,00111	0,00128	0,00091	0,00082	0,00084		

Buňky označené červenou barvou neobsahují relevantní hodnoty jasů, protože vyhodnocované oblasti jsou ovlivněny okolím měřicího stanoviště. Toto označení je uváděno pro následné porovnání s navrženým výpočetním modelem, tak aby nedošlo ke zkreslení výsledků porovnání.

### 11.2.2 Měřicí stanoviště - město Frýdek Místek

Měření pomocí jasového analyzátoru LMK Mobile Advanced ve Frýdku - Místku v roce 2009 [29] bylo provedené na střeše panelového domu v blízkosti centra města. Jasová mapa s vyznačenými oblastmi pro vyhodnocování je uvedena Obr. 57, hodnoty průměrných jasů oblastí pak v Tab. 23.



Obr. 57: Jasová mapa noční oblohy nad Frýdkem - Místkem s vyznačenými vyhodnocovanými oblastmi.

Tab. 18: Hodnoty jasů noční oblohy nad Frýdkem - Místkem.

Tab. jasů <sup>2)</sup> (cd·m <sup>-2</sup> )		Elevace						Zenit 90°
		Horizont 0°	15°	30°	45°	60°	75°	
Azimut	<b>J 180°</b>	0,00857	0,00592	0,00372	0,00319	0,00297	0,00254	0,00298
	<b>195°</b>	0,01139	0,00581	0,00389	0,00326	0,00312	0,00265	
	<b>210°</b>	0,00970	0,00538	0,00540	0,00326	0,00316	0,00288	
	<b>225°</b>	0,00599	0,00657	0,00445	0,00367	0,00308	0,00303	
	<b>240°</b>	0,01715	0,00776	0,00504	0,00361	0,00315	0,00294	
	<b>255°</b>	0,02219	0,00836	0,00477	0,00372	0,00361	0,00320	
	<b>Z 270°</b>	0,04019	0,00846	0,00494	0,00394	0,00332	0,00304	
	<b>285°</b>	0,01970	0,00945	0,00558	0,00403	0,00333	0,00292	
<b>300°</b>	0,02416	0,01217	0,00597	0,00430	0,00333	0,00293		

315°	0,14210	0,01555	0,00698	0,00434	0,00345	0,00323
330°	0,10770	0,01562	0,00682	0,00422	0,00325	0,00343
345°	0,04969	0,01279	0,00656	0,00458	0,00335	0,00315
S 0°	0,00051	0,01060	0,00602	0,00468	0,00362	0,00310
15°	0,02487	0,00974	0,00582	0,00459	0,00336	0,00312
30°	0,15240	0,01043	0,00596	0,00422	0,00353	0,00335
45°	0,09868	0,01033	0,00631	0,00448	0,00359	0,00324
60°	0,05852	0,01040	0,00601	0,00451	0,00364	0,00310
75°	0,01740	0,00977	0,00615	0,00436	0,00365	0,00296
V 90°	0,01780	0,00872	0,00543	0,00393	0,00336	0,00293
105°	0,02012	0,00843	0,00502	0,00396	0,00338	0,00274
120°	0,01561	0,00770	0,00511	0,00365	0,00319	0,00301
135°	0,05168	0,00746	0,00468	0,00394	0,00292	0,00285
150°	0,01788	0,00675	0,00463	0,00370	0,00322	0,00281
165°	0,00765	0,00635	0,00436	0,00340	0,00313	0,00253

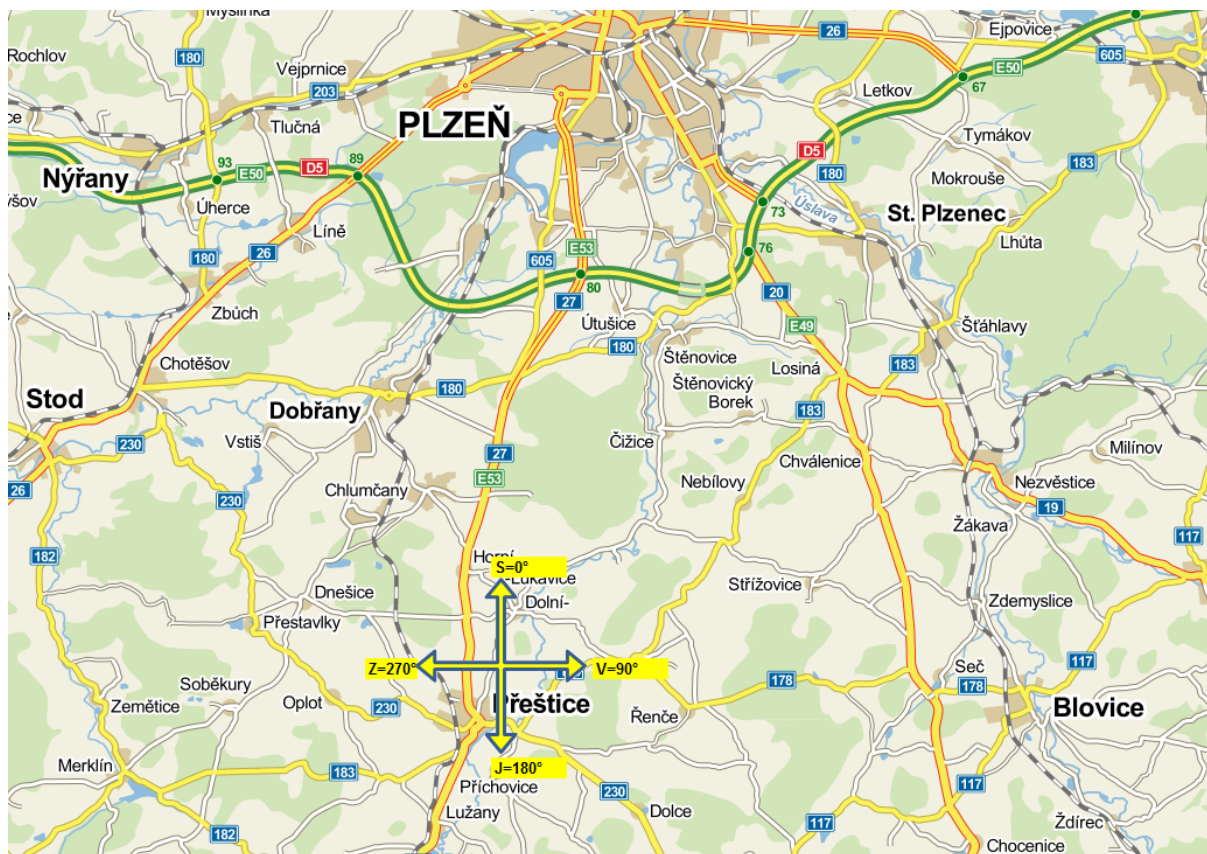
Vlivem polohy měřicího stanoviště, které bylo na vyvýšeném místě ve městě, nejsou na pořízených snímcích vidět ani okolní budovy ani jiné překážky. Avšak není možné považovat horizontální hodnoty za zcela korektní (buňky označené červeně v Tab. 23), protože vyhodnocované oblasti zachycují i jasy světelných zdrojů, které jsou ve stejné nadmořské výšce, jako měřicí stanoviště. Jelikož je město situováno v údolí, tak se tyto světelné zdroje nacházejí na okolních vyvýšených místech.

### 11.2.3 Měřicí stanoviště - rozvodná stanice Přeštice

V návaznosti na tuto spolupráci jsou prováděna další měření jasů noční oblohy, z nichž je uveden příklad měření v rozvodné stanici Přeštice.

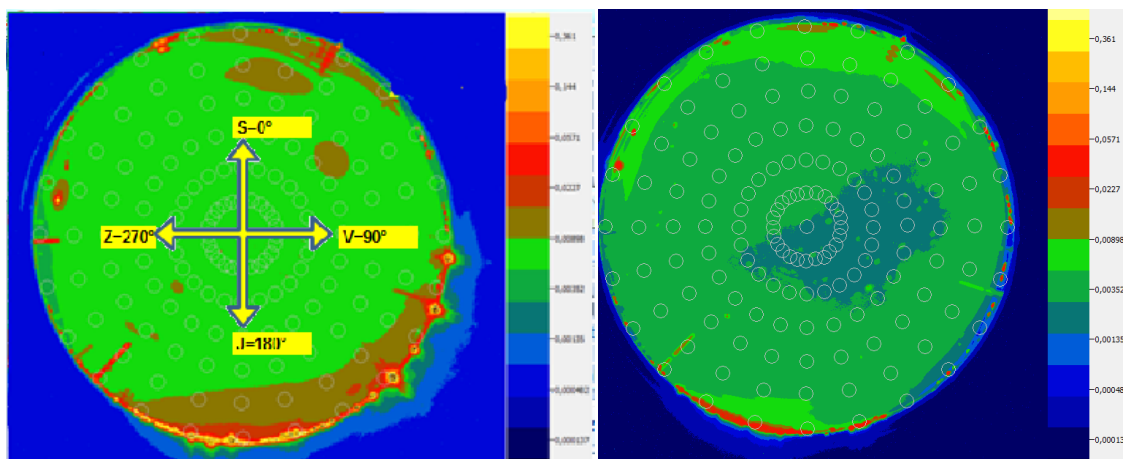
Měření bylo provedeno 24.4. 2012 v čase 23 h 20 minut, kdy byl pořízen měřicím řetězcem snímek noční oblohy při zapnutém celkovém osvětlení rozvodné stanice a poté v čase 23 h 36 min z toho samého stanoviště byl pořízen snímek noční oblohy při vypnutém osvětlení rozvodné stanice. Měřicí stanoviště bylo v úrovni světelných zdrojů rozvodné stanice na střeše řídicí budovy, která je umístěna severním směrem od hlavní osvětlované části rozvodné stanice.

Výhoda měření jasových poměrů noční oblohy v rozvodné stanici spočívá nejen v její poloze (Obr. 58), kdy je umístěna ve většině případů v odlehlých oblastech mimo obydlené části, ale také ve znalosti osvětlovacích soustav v rozvodné stanici, složení jednotlivých zdrojů a znalosti přímého světelného toku jdoucího do horního poloprostoru z projektové dokumentace.



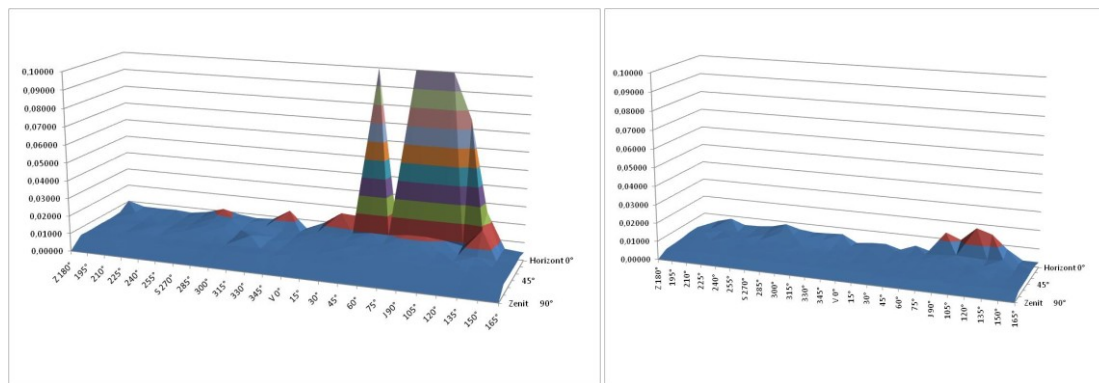
Obr. 58: Mapa s vyznačeným místem měřicího stanoviště a jeho okolím.

Pro vyhodnocení jasů noční oblohy byl použit rast oblastí rozmístěných po  $15^\circ$  azimutu a elevace.



Obr. 59: Jasové mapy noční oblohy nad rozvodnou stanicí při zapnutém (vlevo) a vypnutém (vpravo) celkovém osvětlení rozvodné stanice.

Z jasových map na Obr. 59 je vidět pokles jasů po vypnutí celkového osvětlení rozvodné stanice zejména v okolí zenitu a v jihovýchodní části, kde je situována rozvodná stanice. Opět hodnoty jasů v Tab. 19 a Tab. 20 označené červeně zahrnují jasy světelných zdrojů. Toto je vidět na Obr. 60, kde jsou naměřené hodnoty vyneseny do grafů se stejnou maximální hodnotou jasů na svislé ose.



Obr. 60: Grafické znázornění jasů noční oblohy.

Tab. 19: Tabulka průměrných hodnot jasů oblastí při zapnutém celkovém osvětlení rozvodné stanice.

Tab. jasů <sup>2)</sup> (cd·m <sup>-2</sup> )		Elevace						
		Horizont 0°	15°	30°	45°	60°	75°	Zenit 90°
Azimut	J 180°	0,11985	0,01116	0,00794	0,00672	0,00625	0,00606	0,00613
	195°	0,11942	0,01016	0,00747	0,00662	0,00619	0,00605	
	210°	0,07519	0,00821	0,00669	0,00671	0,00611	0,00601	
	225°	0,02497	0,01816	0,00688	0,00608	0,00593	0,00599	
	240°	0,00540	0,00602	0,00559	0,00576	0,00580	0,00611	
	255°	0,00441	0,00590	0,00551	0,00563	0,00567	0,00590	
	Z 270°	0,01028	0,00627	0,00579	0,00591	0,00565	0,00583	
	285°	0,00762	0,00718	0,00589	0,00617	0,00574	0,00590	
	300°	0,00751	0,00666	0,00594	0,00597	0,00563	0,00599	
	315°	0,00768	0,00652	0,00625	0,00668	0,00571	0,00591	
	330°	0,00697	0,00676	0,00631	0,00621	0,00554	0,00586	
	345°	0,00846	0,00764	0,00712	0,00660	0,00558	0,00584	
	S 0°	0,01133	0,00951	0,00811	0,00666	0,00563	0,00584	
	15°	0,00900	0,00990	0,00827	0,00640	0,00563	0,00586	
	30°	0,00788	0,00838	0,00742	0,00612	0,00567	0,00611	
	45°	0,00841	0,00745	0,00693	0,00871	0,00583	0,00629	
	60°	0,01438	0,00638	0,00579	0,00629	0,00571	0,00624	
	75°	0,00497	0,00618	0,00579	0,00568	0,00566	0,00607	
	V 90°	0,00931	0,00717	0,00618	0,00582	0,00583	0,00589	
	105°	0,01604	0,00783	0,00660	0,00617	0,00594	0,00596	
120°	0,01531	0,00869	0,00703	0,00664	0,00605	0,00604		
135°	0,10574	0,00997	0,00749	0,00658	0,00633	0,00614		
150°	0,02229	0,00983	0,00776	0,00675	0,00626	0,00606		
165°	0,17340	0,01103	0,00802	0,00685	0,00632	0,00605		

Tab. 20: Tabulka průměrných hodnot jasů oblastí při vypnutém celkovém osvětlení rozvodné stanice.

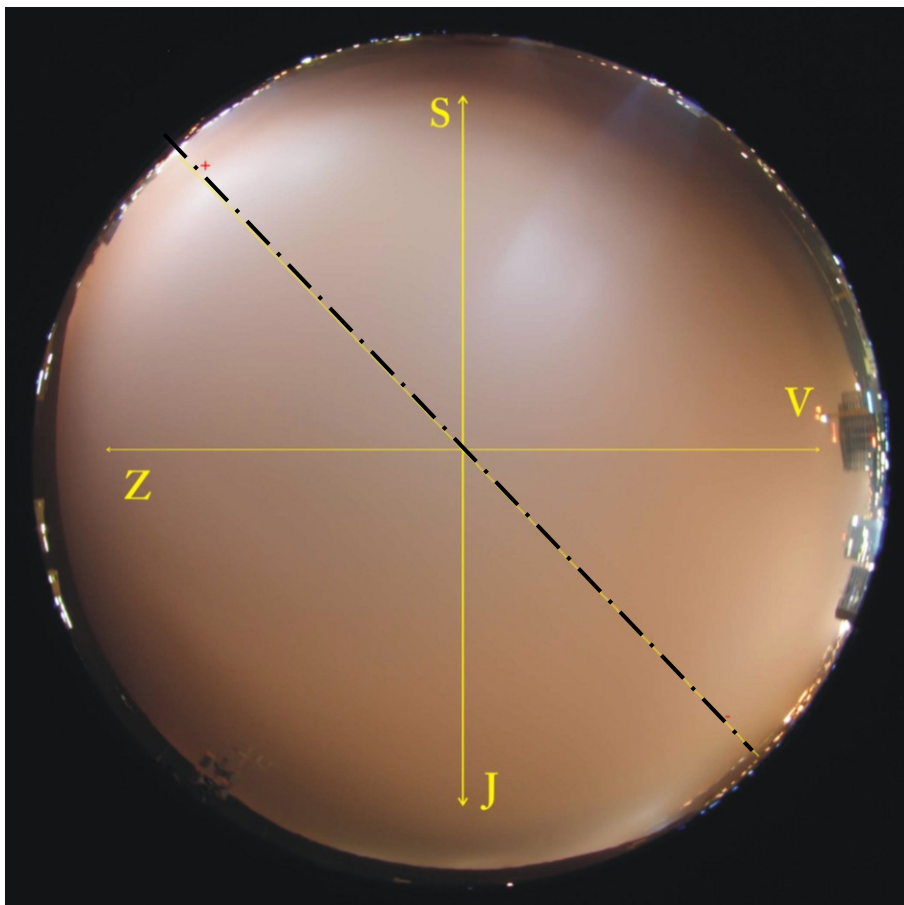
Tab. jasů <sup>2)</sup> (cd·m <sup>-2</sup> )		Elevace						Zenit 90°
		Horizont 0°	15°	30°	45°	60°	75°	
Azimut	J 180°	0,01042	0,00474	0,00359	0,00304	0,00283	0,00271	0,00274
	195°	0,01769	0,00445	0,00363	0,00319	0,00289	0,00272	
	210°	0,01513	0,00402	0,00361	0,00350	0,00292	0,00275	
	225°	0,00793	0,00514	0,00347	0,00304	0,00286	0,00273	
	240°	0,00276	0,00393	0,00327	0,00295	0,00279	0,00272	
	255°	0,00273	0,00378	0,00371	0,00315	0,00295	0,00280	
	Z 270°	0,00302	0,00445	0,00434	0,00357	0,00318	0,00293	
	285°	0,00626	0,00432	0,00437	0,00378	0,00333	0,00309	
	300°	0,00839	0,00428	0,00387	0,00384	0,00339	0,00315	
	315°	0,00563	0,00414	0,00428	0,00364	0,00339	0,00311	
	330°	0,00580	0,00410	0,00420	0,00351	0,00327	0,00310	
	345°	0,00659	0,00479	0,00389	0,00361	0,00323	0,00309	
	S 0°	0,00866	0,00603	0,00369	0,00364	0,00318	0,00304	
	15°	0,00655	0,00597	0,00369	0,00351	0,00313	0,00299	
	30°	0,00571	0,00533	0,00372	0,00315	0,00298	0,00290	
	45°	0,00599	0,00468	0,00321	0,00294	0,00284	0,00278	
	60°	0,00645	0,00384	0,00288	0,00277	0,00265	0,00271	
	75°	0,00237	0,00343	0,00289	0,00268	0,00254	0,00261	
	V 90°	0,00328	0,00335	0,00281	0,00254	0,00253	0,00259	
	105°	0,00359	0,00327	0,00300	0,00275	0,00252	0,00258	
120°	0,00132	0,00314	0,00293	0,00286	0,00263	0,00260		
135°	0,00446	0,00301	0,00313	0,00282	0,00267	0,00263		
150°	0,00230	0,00343	0,00325	0,00288	0,00271	0,00265		
165°	0,01359	0,00415	0,00344	0,00297	0,00276	0,00272		

Toto měření ukázalo, že vliv osvětlení rozvodné stanice způsobuje zvýšený jas oblohy v oblasti kolem zenitu a v oblasti horizontu nad rozvodnou stanicí (jihovýchodní část horizontu). Jas v zenitu klesl z 0,00613 cd·m<sup>-2</sup> na hodnotu 0,00274 cd·m<sup>-2</sup>, což je 2,23 krát. Kdežto hodnoty jasů noční oblohy nad Plzní pouze 1,6 krát. Z tohoto lze usuzovat, že osvětlení rozvodné stanice není hlavním zdrojem rušivého světla v oblasti.

### 11.3 Spektrální měření

Velikost rušivého světla závisí na mnoha parametrech. Jeden z nich je i spektrální charakteristika světelného toku vyvolávajícího zvýšený jas oblohy. Rovněž při průchodu světelného toku atmosférou, která obsahuje různé druhy nečistot, nebo následkem odrazu, se může měnit spektrální složení světla dopadajícího na senzory jasových analyzátorů. Proto byly souběžně s měřeními jasových poměrů noční oblohy měřeny i její spektrální rozložení.

Měřící stanoviště bylo umístěno na střeše budovy ústavu stavebnictví a architektury Slovenské akademie věd v Bratislavě. Byla měřena noční obloha v kroku  $15^\circ$  se dvěma významnými zdroji rušivého světla.

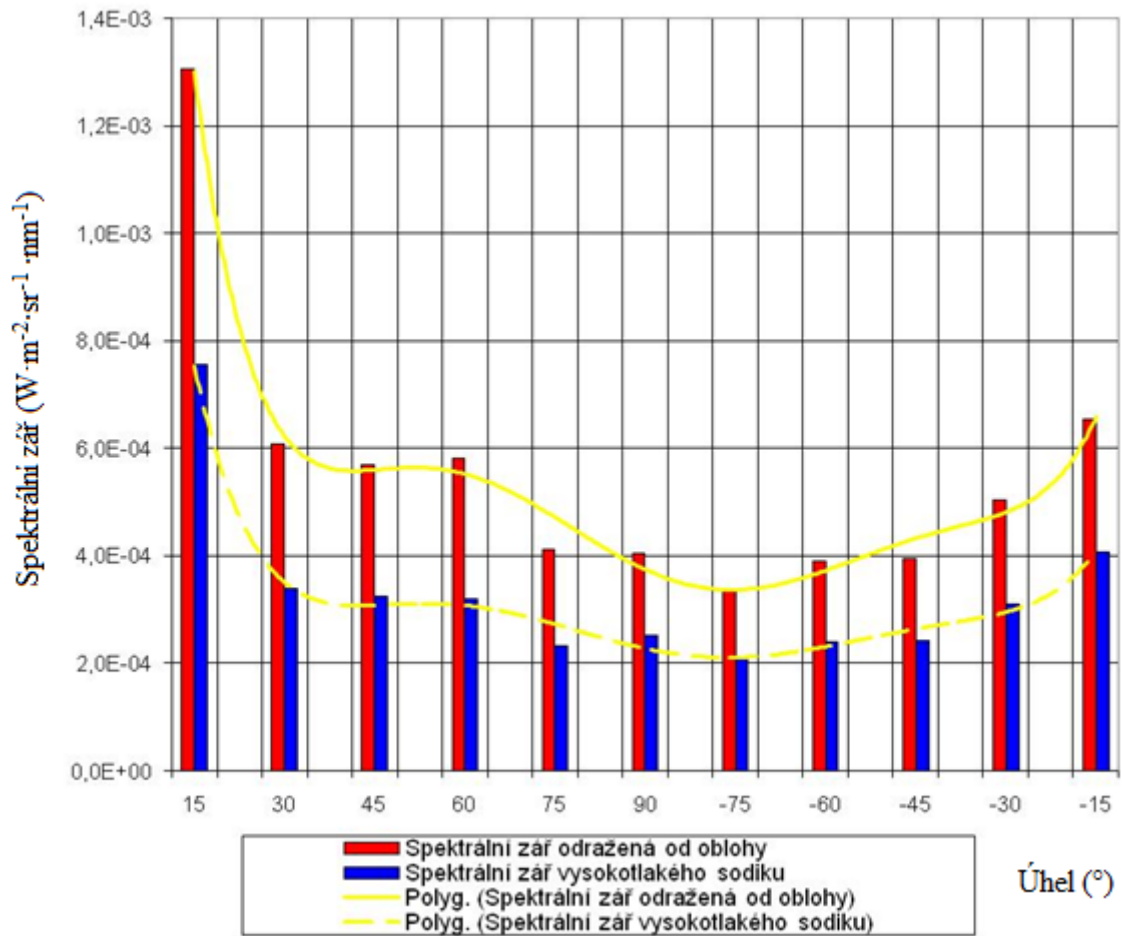


Obr. 61: Snímek noční oblohy s vyznačením osy měření.

Na Obr. 61 je naznačena osa měření, která probíhala směrem od nákupního centra (významný zdroj rušivého světla - severozápad) k centru města (jihovýchod). Po této ose bylo provedeno měření spektrální charakteristiky po  $15^\circ$ .

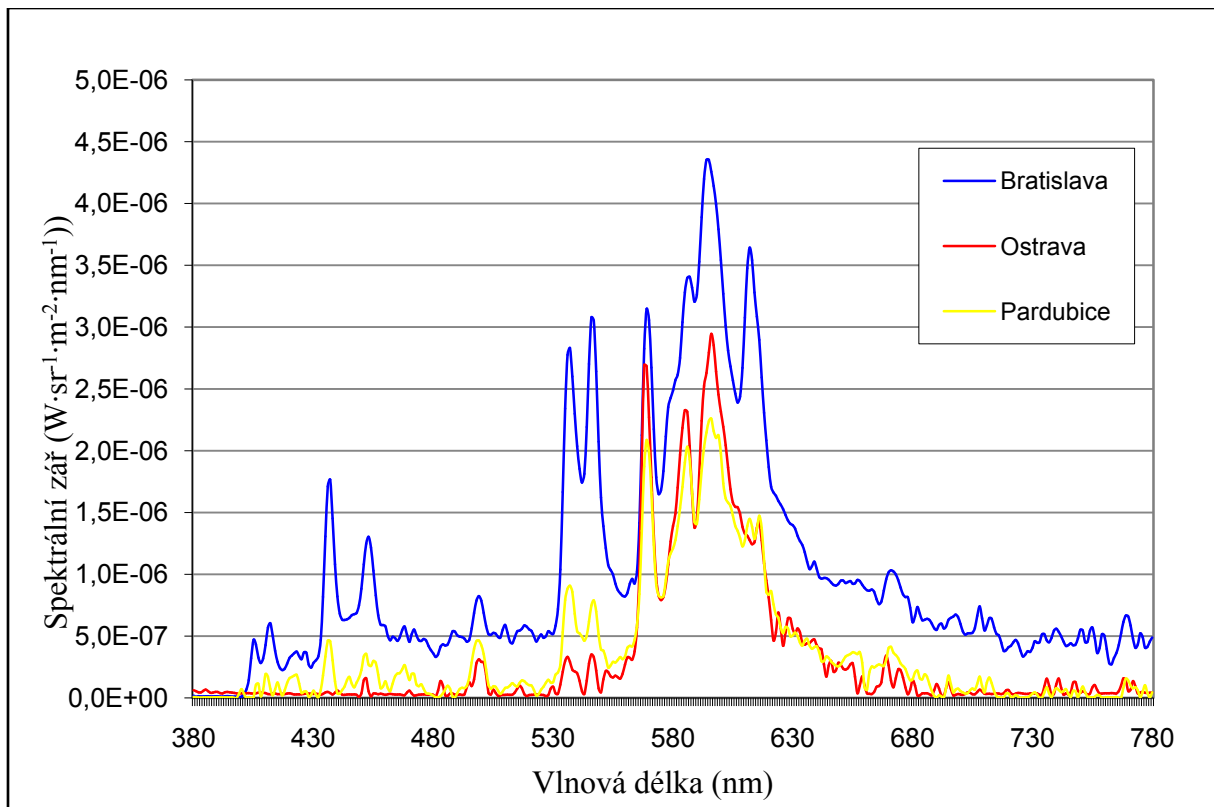
Na následující graf na Obr. 62 je uvedeno porovnání celkové naměřené hodnoty energie odraženého světelného toku od noční oblohy vůči definované části spektra, kde dominantně vyzařuje vysokotlaká sodíková výbojka v závislosti na úhlech od horizontu nad nákupním centrem k zenitu a opět k horizontu nad centrem města. Vysokotlaká sodíková výbojka je rovněž nejčastěji používaným světelným zdrojem ve veřejném osvětlení. Podíl těchto zdrojů je až 90 %. [36]





Obr. 62: Pokles hodnot směrem k zenitu.

Podíl odražené složky viditelného záření v oblasti vlnových délek 550 nm – 700 nm (vysokotlaká sodíková výbojka) se pohybuje okolo 60 % z celkové dopadající měřené energie viditelného záření. Hodnoty odražené energie světelného záření směrem k zenitu klesají, kdežto v zenitu jsou nejmenší. Tuto skutečnost potvrzují i měření jasů noční oblohy.



Obr. 63: Spektrální složení rušivého světla noční oblohy v různých oblastech.

Spektrální charakteristiky na Obr. 63 představují naměřené průběhy odražené energie od oblohy v zenitu z měst Ostrava, Pardubice a Bratislava. Z těchto naměřených dat, které sice nejsou naměřeny za zcela stejných meteorologických podmínek (vždy ale bylo měření provedeno při nízké oblačnosti), lze vyvodit závěr, že v Bratislavě se na rušivém světle podílí ve značné míře i jiné světelné zdroje než jsou vysokotlaké sodíkové výbojky. Jedná se zejména o halogenidové výbojky instalované v osvětlení obchodních center a reklamních tabulí.

## 12 Závěr

### 12.1 Shrnutí vlastního přínosu

V teoretické části práce byl proveden rozbor problému vyhodnocování v mezopické oblasti vidění.

V osmé kapitole jsou navrženy postupy vyhodnocování jasu horního poloprostoru. Tyto postupy mohou sloužit jako určitý standard posuzování rušivých účinků světelného toku jdoucího do horního poloprostoru.

Jelikož jsou kladeny čím dál, tím větší nároky na nežádoucí ovlivňování životního prostředí, proto je dalším přínosem navržení metodiky přiřazování environmentálních zón podle vzdáleností typických oblastí v okolí zkoumané oblasti. Tato metodika může sloužit projektantům venkovních osvětlovacích soustav k posouzení rušivých účinků nově navržených osvětlovacích soustav, nebo při rekonstrukci stávajících osvětlovacích soustav, tak aby vyhovovaly. Ti musí respektovat omezení přímo vyzářeného světelného toku do horního poloprostoru.

Hlavním přínosem této doktorské disertační práce je navržení měřicího řetězce pro dlouhodobé měření rušivého světla a pro přímé měření v mezopickém vidění. Základním prvkem modelu je černobílá astronomická CCD kamera, která je chlazená Peltierovými články. Chlazení kamery značně snižuje výskyt nežádoucího šumu, což je u měření tohoto typu velice důležité. Konvenčně používané jasoměry slouží především k měření jasu ve fotopické oblasti vidění, kdežto měřicí řetězec je speciálně uzpůsoben k měření nízkých úrovní jasů. Dále byl navržen spektrální korekční filtr pro přizpůsobení měření v mezopické oblasti vidění. Tento filtr pro mezopickou oblast má maximální spektrální propustnosti na vlnové délce 543 nm, jež odpovídá mezopické křivce s konstantou  $m = 0,7$ . Použitím speciálního filtrů je možné měřit jas přímo, to znamená, že není zapotřebí přepočít pomocí složitých matematických funkcí, které se používají u stávajících jasoměrů.

Z provedených experimentů vyplývá, že navržené metodiky mohou přispět k řešení problematiky měření nízkých úrovní jasů v oblastech mezopického a skotopického vidění.

### 12.2 Návrh dalšího postupu

Měřicí řetězec umožňuje použití 5-ti různých optických filtrů. Dalším krokem by mohl být návrh dalších mezopických filtrů, popřípadě i návrh optického filtru pro skotopické vidění a s použitím klasických objektivů přizpůsobit měřicí řetězec k měření jasových poměrů na komunikacích, kde se jasy pohybují rovněž v mezopické oblasti.

Použitím objektivu rybí oko lze zachytit celý horní poloprostor pomocí jednoho snímku. Tento objektiv vyžaduje pro svou složitou konstrukci zvláštní pozornost při stanovení jeho zobrazovací funkce. Nynější kalibrace měřicího řetězce tuto chybu nezahrnuje a bylo by vhodné popsat tuto zobrazovací funkci.

V kapitole zabývající se určováním environmentálních zón jsou uvedena základní rozdělení posuzovaných oblastí podle velikosti a charakteru. Toto může sloužit k stanovení základních typů oblastí v kombinaci použitých osvětlovacích soustav.

## **Seznam příloh**

**Příloha č. 1 - Tabulka hodnot spektrálních citlivostí fotonického a skotopického vidění**

**Příloha č. 2 - Tabulka spektrální světelné citlivosti mezopického vidění ( $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ ) v závislosti na konstantě  $m$**

**Příloha č. 3 - Tabulka spektrálních citlivostí korekčního filtru a světlocitlivého senzoru CCD kamery**

## Seznam použité literatury

- [1] Veřejné osvětlení a jeho současný stav v České Republice. In: Wwww.dvs.cz [online]. 2010 [cit. 201-010-27]. Dostupné z: <http://www.dvs.cz/clanek.asp?id=6437936>
- [2] ČSN EN 13201-2. Osvětlení pozemních komunikací – Část 2: Výkonnostní požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004. 17 s.
- [3] ISO 23539:2005(E) / CIE S010/E:2004. Photometry: The CIE System of Physical Photometry. CIE National Committees, 2005.
- [4] SOKANSKÝ, K., T. NOVÁK, M. BÁLSKÝ, Z. BLÁHA, Z. CARBOL, D. DIVIŠ, B. SOCHA, J. ŠNOBL, J. ŠUMPICH a P. ZÁVADA. Světelná technika. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN ISBN 978-80-01-04941-9.
- [5] GAŠPAROVSKÝ, D. a A. SMOLA. Návrh umělého osvetlenia interiérov a exteriérov. Bratislava: Slovenský elektrotechnický zväz - komora elektrotechnikov Slovenska, 2011. ISBN ISBN 978-80-8106-046-5.
- [6] NAVE, Carl R. Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu. [online]. [cit. 2012-10-20]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/bright.html>
- [7] DARULA, S. Windows in buildings: potential source of light pollution. In: Proceedings: International Conference on Light Pollution Theory, Modelling and Measurements. Bratislava: Astronomical Institute, Slovak Academy of Sciences, 2013, s. 51-55. ISBN 978-80-970059-5-5.
- [8] HABEL, J. Základy světelné techniky (4): Základy fotometrie (1. část). Světlo. 2009, č. 3. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=39195](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=39195)
- [9] Broadband Spectroradiometer: specbos 1211. JETI TECHNISCHE INSTRUMENTE GMBH. Wwww.jeti.com [online]. 1998-2013 [cit. 2012-11-23]. Dostupné z: <http://www.jeti.com/cms/index.php/instruments-55/radiometer/specbos-1211>
- [10] LMK mobile advanced. TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH [online]. © 2004 [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: [http://www.technoteam.de/products/lmk\\_luminance\\_measuring\\_camera/lmk\\_mobile\\_advanced/index\\_eng.html](http://www.technoteam.de/products/lmk_luminance_measuring_camera/lmk_mobile_advanced/index_eng.html)
- [11] ŠKODA, J. Nekonenční metody měření ve fotometrii. Brno, 2012. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=44020](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=44020). Zkrácená verze Ph.D. thesis. Vysoké učení technické v Brně.
- [12] HABEL, J. a P. ŽÁK. Význam mezopického vidění pro praxi. Světlo. 2007, č. 6. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=36187](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36187)
- [13] Charge-coupled device. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-11-13]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/CCD>
- [14] PIHAN, R. A/D PŘEVODNÍK. In: FotoRoman [online]. © 2011 [cit. 2012-11-13]. Dostupné z: [http://fotoroman.cz/glossary2/1\\_ad\\_converter.htm](http://fotoroman.cz/glossary2/1_ad_converter.htm)
- [15] SOKANSKÝ, K., T. NOVÁK a T. MAIXNER. Rušivé světlo Část 7. – Měření rušivého světla. Světlo. 2007, č. 5. Dostupné z:

[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=36147](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36147)

- [16] CIE. Technical report: Guidelines for minimizing sky glow. 1997. ISBN 3 900 734 83 6.
- [17] Sky Quality Meter. Unihedron [online]. [cit. 2012-12-12]. Dostupné z: <http://www.unihedron.com/projects/darksky/index.php>
- [18] Less of Our Light for More Star Light. Globe at Night [online]. [cit. 2012-12-12]. Dostupné z: <http://www.globeatnight.org/index.html>
- [19] DOSTÁL, F. Rušivé světlo v podmínkách ČR. Ostrava, 2011. Disertační práce. V3B-TU Ostrava.
- [20] ZÁVADA, P., T. NOVÁK a F. DOSTÁL. Rušivé světlo v podmínkách Slovenské a České republiky. In: ENERGETIKA –EKOLÓGIA –EKONÓMIA '09. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 2009, s. 1-10. Dostupné z: [file:///D:/01\\_DATA/skola/06\\_Sborn%C3%ADky/EEE%202009\\_Nov%C3%BD%20Smokovec,%20Slovensko/full/Zavada\\_023.pdf](file:///D:/01_DATA/skola/06_Sborn%C3%ADky/EEE%202009_Nov%C3%BD%20Smokovec,%20Slovensko/full/Zavada_023.pdf)
- [21] CIE 191:2010 Technical report: Recommended system for mesopic photometry based on visual performance. 2010. ISBN 978 3 901906 88 6.
- [22] OL 490 Agile Light Source. Gooch & Housego [online]. © 2013 [cit. 2013-01-21]. Dostupné z: <http://www.goochandhousego.com/products/instrumentation/spectral-imaging-synthesis/ol-490-agile-light-source/>
- [23] CCD kamery G2-2000 a G2-4000. Moravské přístroje [online]. 2013 [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: <http://ccd.mii.cz/art?id=361&cat=1&lang=405>
- [24] Lumidisp. Lumidisp [online]. 2011 [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: [www.lumidisp.eu](http://www.lumidisp.eu)
- [25] SOKANSKÝ, K., T. NOVÁK, F. DOSTÁL, P. ZÁVADA a D. DIVIŠ. Zpráva o měření jasu noční oblohy v Libereckém kraji, Společnost pro rozvoj veřejného osvětlení, Brno 2009
- [26] KOCIFAJ, M. Modeling the night-sky radiances and inversion of multiangle and multispectral radiance data. In: Book of Abstracts: International Conference on Light Pollution Theory, Modelling and Measurements. Bratislava: Astronomical Institute, Slovak Academy of Sciences, 2013, 34 - 35. ISBN 978-80-970059-5-5.
- [27] KOCIFAJ, M. Modelling the spectral behaviour of night skylight close to artificial light sources. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. USA: ISI Journal Citation Reports, 2011, 2105 - 2110. ISSN 0035-8711.
- [28] KOCIFAJ, M., I. KOHÚT, T. NOVÁK, M. BEDNÁRIK a L. KOMÁR. Night-sky luminance under clear sky conditions: theory vs. experiment. Field campaign in Frýdek-Místek. In: Book of Abstracts: International Conference on Light Pollution Theory, Modelling and Measurements. Bratislava: Astronomical Institute, Slovak Academy of Sciences, 2013, 36 - 38. ISBN 978-80-970059-5-5.
- [29] ZÁVADA, P., K. SOKANSKÝ, T. NOVÁK a Z. ŽWAK. Měření jasů noční oblohy ve Frýdku-Místku. In: Kurz osvětlovací techniky XXVII. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 238 - 243. ISBN 978-80-248-2087-3.
- [30] HLAVÁČ, V. [felk.cvut.cz \[online\]. \[cit. \]. Human Eye Physiology. Dostupné z WWW: <http://cmp.felk.cvut.cz/~hlavac/TeachPresEn/15ImageAnalysis/61HumanEyePhysiology](http://cmp.felk.cvut.cz/~hlavac/TeachPresEn/15ImageAnalysis/61HumanEyePhysiology)

.ppt>.

- [31] NARISADA, K. a D. SCHREUDER. Light Pollution Handbook. Netherland: Springer, 2004. ISBN 1-4020-2665-X.
- [32] ČSN EN 13201-2. *Osvětlení pozemních komunikací: Část 2: Požadavky*. Český normalizační institut, 2008.
- [33] SOKANSKÝ, K. a kol. Potenciál energetických úspor veřejného osvětlení v ČR. Ostrava, 2007. Dostupné z: [http://www.csorsostrava.cz/publikace/Potencial\\_energetickych\\_uspor\\_VO\\_v\\_CR.pdf](http://www.csorsostrava.cz/publikace/Potencial_energetickych_uspor_VO_v_CR.pdf)
- [34] CIE, TC 4-21, DRAFT PUBLICATION - „Guide for minimizing sky glow“
- [35] Světelná technika: Podstata a základní vztahy [online]. 2012 [cit. 2013-02-27]. Dostupné z: [http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni\\_materialy/prezentace/elektricka\\_zarizeni/svetlo\\_1.pps](http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/prezentace/elektricka_zarizeni/svetlo_1.pps)
- [36] SOKANSKÝ, K. a kol. Snižování energetické náročnosti venkovních osvětlovacích soustav. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2481-9. Dostupné z: [http://www.csorsostrava.cz/publikace/EFEKT\\_2011.pdf](http://www.csorsostrava.cz/publikace/EFEKT_2011.pdf)
- [37] PLCH, J. Světelná technika v praxi. Praha: IN-EL, 1999. ISBN 80-86230-09-0.
- [38] The IESNA Lighting Handbook. 9. vyd. USA: Mark Stanley Rea, 2000. ISBN 0-87995-150-8.
- [39] Barevné vidění: druhý pohled. In: PALADIX foto-on-line [online]. 2003 [cit. 2012-12-15]. Dostupné z: <http://www.paladix.cz/clanky/barevne-videni-druhy-pohled.html>
- [40] ČSN EN 12193. *Světlo a osvětlení: Osvětlení sportovišť*. Český normalizační institut, 2008.
- [41] ČSN EN 12464-2. Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů: Část 2: Venkovní pracovní prostory. Český normalizační institut, 2005.
- [42] SOKANSKÝ, K. a kol. Racionalizace v osvětlování venkovních prostor. Ostrava, 2005. Dostupné z: <http://www.csorsostrava.cz/publikace/racionalizace%20-%202005.pdf>
- [43] DOSTÁL, F., T. NOVÁK a K. SOKANSKÝ. Město a jeho vliv na hodnoty osvětlení v nočních hodinách. In: Kurz osvětlovací techniky XXVII. Ostrava: VŠB-TUO, 2009, 30 - 36. ISBN 978-80-248-2087-3.
- [44] NOVÁK, T., D. DIVIŠ a K. SOKANSKÝ. Snižovat jasy při použití světla s vysokou teplotou chromatičnosti ve veřejném osvětlení, či nikoliv?. *Světlo*. 2012, č. 5. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Svetlo/2012/05/Svetlo\\_05\\_2012\\_output/web/flipviewerxpress.html?pn=0050](http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Svetlo/2012/05/Svetlo_05_2012_output/web/flipviewerxpress.html?pn=0050)

## **Seznam projektů, na kterých autor spolupracoval**

1. Výzkum rušivých účinků umělého venkovního osvětlení, GA102/09/1986, 2009 - 2011
2. Pasport VO v Ostravě, Statutární město Ostrava, HA451906, 2009-2010
3. Světelné znečištění v podmínkách Slovenské a České republiky, MEB 080857, 2008 - 2009
4. Pozemní zdroje světla, jas a zář noční oblohy, MEB0810007, 2010 - 2011
5. Výzkum využití LED a OLED světelných zdrojů ve speciálních aplikacích, SP2013/88, 2013
6. ICCES (Innovation and Creativity for Complex Engineering Systems) ERASMUS IP course, University of Minho, Portugalsko a VŠB-TU Ostrava, 2012



## Seznam publikací autora

### WEO OF SCIENCE

#### 2011

1. ZÁVADA, P. a K. SOKANSKÝ. Diagram of daily consumption of electricity, houses appliances, distribution them into categories by importance of electricity supply. *Przegląd elektrotechniczny*. 2011, č. 7, s. 264-265. ISSN: 0033-2097.
2. NOVÁK, T., K. SOKANSKÝ a P. ZÁVADA. Measurement of obtrusive light in terms of Czech Republic. *Przegląd elektrotechniczny*. 2011, č. 4, s. 32-34. ISSN: 0033-2097.
3. NOVÁK, T., P. ZÁVADA a K. SOKANSKÝ. Instrumentation for long term measuring of parameters under night sky. *Przegląd elektrotechniczny*. 2011, č. 4. ISSN: 0033-2097.

#### 2009

4. ZÁVADA, P., K. SOKANSKÝ a T. NOVÁK. Draft evaluation methodology of outdoor lighting fixtures. *Electric Power Engineering: 10th International Scientific Conference*. 2009, s. 67-70. ISBN: 987-80-248-1947-1.

### OBD

#### 2012

5. SOKANSKÝ, K., T. NOVÁK a P. ZÁVADA. *Mobilní měřicí stand pro ověřování světelných vlastností svítidel instalovaných na přistávacích drahách letišť* [patent]. Užitný vzor, CZ 23714 U1. Uděleno 19.4. 2012.
6. ZÁVADA, P., T. NOVÁK a K. SOKANSKÝ. Nový přístup k měření křivek svítivosti návěstidel na přistávacích drahách letišť. *LUMEN V4*. Praha, 2012, s. 328-33. ISBN:978-80-89275-32-8.
7. ZÁVADA, P., T. NOVÁK a K. SOKANSKÝ. UGR s využitím jasového analyzátoru. *Kurz osvětlovací techniky XXIX*. Ostrava, 2012, s. 284-290. ISBN: 987-80-248-2833-6.

#### 2011

8. SOKANSKÝ, K., T. NOVÁK, M. BÁLSKÝ, Z. BLÁHA, Z. CARBOL, D. DIVIŠ, B. SOCHA, J. ŠNOBL, J. ŠUMPICH a P. ZÁVADA. *Světelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04941-9.

#### 2010

9. NOVÁK, T., K. SOKANSKÝ, P. ZÁVADA, V. KOLÁŘ a R. HRBÁČ. Development of measuring instruments for long-term measurement of low level illuminances and luminances. In: *International Conference on Environment and Electrical Electrical Engineering*. Praha, 2010, s. 89-92. ISBN 978-1-4244-5374-0.

## OSTATNÍ PUBLIKACE

### 2013

10. ZÁVADA, P., T. NOVÁK a K. SOKANSKÝ. Environmental zones classification in the Czech Republic, mezinárodní konference. In: *Proceeding: International Conference on Light Pollution, Theory, Modelling and Measurements*. Bratislava: Astronomical Institute SAS, 2013, s. 73. ISBN 987-80-970059-5-5.

### 2012

11. ZÁVADA, P., T. NOVÁK, K. SOKANSKÝ a L. MRUZKOVÁ. *Vyhodnocení veřejného osvětlení pomocí jasového analyzátoru*. SRVO, 2012.

### 2011

12. ZÁVADA, P. a T. NOVÁK, T. Environmental zones in the ČR and their classification by luminance analysis. *Světlo 2011: ekologie - ekonomika - efektivita : 19. mezinárodní konference : 21.9.-23.9.2011, Praha*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU, 2011. ISBN 978-80-248-2480-2.
13. NOVÁK, T., P. ZÁVADA, K. SOKANSKÝ a D. DIVIŠ. Analysis and evaluation of lighting parameters measuring of the night sky. In: *27th Session of the CIE South Africa*. Vienna: CIE, 2011, s. 162-165. ISBN 978-3-901906-99-2.

### 2010

14. SOKANSKÝ, K., T. NOVÁK, a P. ZÁVADA. Measurement of obtrusive light in terms of Czech Republic. In: *LUMEN V4: IIIrd Conference of the Visegrad Countries on Lighting : Czech Republic, Brno, hotel Santon, 23-25 June 2010. 1st ed. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2247-1.*
15. SOKANSKÝ, K., T. NOVÁK, a P. ZÁVADA. Astronomická kamera s aktivním chlazením čipu pro měření nízkých úrovní jasů. In: *Kurz osvětlovací techniky*, Ostrava:, 2010, s.204-207, ISBN 978-80-248-2307-2
16. SOKANSKÝ, K. a P. ZÁVADA. Diagram of daily consumption of electricity, houses appliances, distribution them into categories by importance of electricity supply. In: *LUMEN V4: IIIrd Conference of the Visegrad Countries on Lighting : Czech Republic, Brno, hotel Santon, 23-25 June*. 1st ed. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, 2010, s. 204-207. ISBN 978-80-248-2247-1.
17. ZÁVADA, P., K. SOKANSKÝ a T. NOVÁK. Instrumentation for long term measuring of parameters under night sky. In sborníku. Ed. Michal Krátký, Jiří Dvorský, Pavel Moravec, Ostrava:VŠB-Technical University of Ostrava, 2010, 44-49, 978-80-248-2276-1
18. ZÁVADA, P., F. DOSTÁL a T. NOVÁK. Obtrusive light measurement. In: *Proceedings of CIE 2010 "Lighting quality and energy efficiency", 14-17 March 2010, Hilton Vienna, Vienna, Austria*. Vienna, Austria: CIE, 2010, s. 738. ISBN 978-3-901906-83-1.

**2009**

19. ZÁVADA, P., K. SOKANSKÝ a T. NOVÁK. Suggestion methodology of classification luminaries outside lighting. In: ŽILINA, University of a [ed.Peter Bracíník and Peter Brída] [ED. BY MILAN SMETANA. *TRANSCOM 2009: 8-th European Conference of Young Research and Scientific Workers, Žilina, June 22-24, 2009, Slovak Republic*. Žilina: University of Žilina, 2009. ISBN 978-80-554-0032-7.
20. SOKANSKÝ, K., T. NOVÁK, P. ZÁVADA, F. DOSTÁL a D. DIVIŠ. Krajina posedlá tmou aneb vypnuté veřejné osvětlení. *SVĚTLO*. 2009, č. 6, s. 48-50.
21. ZÁVADA, P., K. SOKANSKÝ, T. NOVÁK a Z. ŽWAK. Měření jasů noční oblohy ve Frýdku-Místku. In: Kurz osvětlovací techniky XXVII. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 238 - 243. ISBN 978-80-248-2087-3.
22. Závada, P., Sokanský, K., Novák, T.: Metering of light pollution, VSB-TU Ostrava, 2009, 124-129
23. ZÁVADA, P., K. SOKANSKÝ a T. NOVÁK. Modelování rušivého světla. In: Světlo 2009. Ed. Erme Erkin, Jasná:, 2009, ISBN 978-80-969403-7-0
24. ZÁVADA, P., K. SOKANSKÝ a T. NOVÁK. Návrh metodiky hodnocení svítidel venkovního osvětlení. In: *Proceedings of the 10th international scientific conference: electric power engineering 2009*. Poruba: VSB, 2009. ISBN 978-80-248-1947-1.
25. ZÁVADA, P., F. DOSTÁL, K. SOKANSKÝ a T. NOVÁK. RUŠIVÉ SVĚTLO V PODMÍNKÁCH SLOVENSKÉ A ČESKÉ REPUBLIKY. Ed. František Janíček, Daniela Reváková, Ivan Daruľa, Juraj Kubica, Igor Šulc, Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2009, ISBN 978-80-89402-08-3

## Příloha č. 1 - Tabulka hodnot spektrálních citlivostí fotopického a skotopického vidění

Vlnová délka (nm)	Poměrná spektrální citlivosti zraku pro fotopické vidění (-)	Spektrální citlivosti zraku pro fotopické vidění (lm·W <sup>-1</sup> )	Poměrná spektrální citlivosti zraku pro skotopické vidění (-)	Spektrální citlivosti zraku pro skotopické vidění (lm·W <sup>-1</sup> )
380	0,0000	0,0	0,0006	1,0
390	0,0001	0,1	0,0022	3,8
400	0,0004	0,3	0,0093	15,8
410	0,0012	0,8	0,0348	59,2
420	0,0040	2,7	0,0966	164,2
430	0,0116	7,9	0,1998	339,7
440	0,0230	15,7	0,3281	557,8
450	0,0380	26,0	0,4550	773,5
460	0,0600	41,0	0,5670	963,9
470	0,0910	62,1	0,6760	1149,2
480	0,1390	95,0	0,7930	1348,1
490	0,2080	142,1	0,9040	1536,8
500	0,3230	220,6	0,9820	1669,4
507	0,4443	303,5	1,0000	1700,0
510	0,5030	343,5	0,9970	1694,9
520	0,7100	484,9	0,9350	1589,5
530	0,8620	588,7	0,8110	1378,7
540	0,9540	651,6	0,6550	1105,0
550	0,9950	679,6	0,4810	817,7
555	1,0000	683,0	0,4020	683,0
560	0,9950	679,6	0,3288	559,0
570	0,9520	650,2	0,2076	352,9
580	0,8700	594,2	0,1212	206,0
590	0,7570	517,0	0,0655	111,4
600	0,6310	431,0	0,0332	56,4
610	0,5030	343,5	0,0159	27,1
620	0,3810	260,2	0,0074	12,5
630	0,2650	181,0	0,0033	5,7
640	0,1750	119,5	0,0015	2,5
650	0,1070	73,1	0,0007	1,2
660	0,0610	41,7	0,0003	0,5
670	0,0320	21,9	0,0001	0,3
680	0,0170	11,6	0,0001	0,1
690	0,0082	5,6	0,0000	0,1

700	0,0041	2,8	0,0000	0,0
710	0,0021	1,4	0,0000	0,0
720	0,0010	0,7	0,0000	0,0
730	0,0005	0,4	0,0000	0,0
740	0,0002	0,2	0,0000	0,0
750	0,0001	0,1	0,0000	0,0
760	0,0001	0,0	0,0000	0,0
770	0,0000	0,0	0,0000	0,0
780	0,0000	0,0	0,0000	0,0





### Příloha č. 3 - Tabulka spektrálních citlivostí korekčního filtru a světlocitlivého senzoru CCD kamery

Vlnová délka (nm)	Poměrná spektrální citlivost korekčního filtru (-)	Poměrná spektrální citlivost světlocitlivého senzoru CCD kamery (-)
380	0	0
383	0	0
388	0,379	0,4858
393	0,216	0,4824
398	0,1367	0,5123
403	0,1122	0,6242
408	0,1045	0,7303
413	0,1002	0,6865
417	0,1057	0,8163
423	0,1072	0,8321
427	0,1074	0,8168
433	0,1043	0,8576
437	0,1093	0,8727
443	0,1129	0,956
448	0,114	0,9269
453	0,1075	0,8476
457	0,1182	0,9588
463	0,1386	0,9545
468	0,1602	0,9813
473	0,1685	0,8538
478	0,2393	0,9877
483	0,3031	0,9601
488	0,385	0,9684
493	0,4138	0,8991
497	0,5748	1
503	0,6427	0,9926
508	0,6864	0,9387
512	0,7651	0,9123
518	0,8541	0,959
523	0,9251	0,9447
528	0,8931	0,8763
532	0,9381	0,8448
538	1	0,8766
543	0,9286	0,7819
547	0,907	0,7646
552	0,9359	0,7881



557	0,909	0,7783
563	0,8342	0,7426
567	0,804	0,7391
572	0,7664	0,7759
577	0,6987	0,717
582	0,6831	0,7735
588	0,6295	0,76
593	0,5434	0,7245
597	0,4905	0,745
603	0,4524	0,7465
607	0,3831	0,7256
613	0,3724	0,7521
618	0,2987	0,6861
623	0,267	0,6973
628	0,2231	0,6594
632	0,1909	0,6394
638	0,1694	0,6334
642	0,1388	0,5804
647	0,1318	0,5886
652	0,0991	0,5665
657	0,0868	0,5517
662	0,0912	0,5527
667	0,0821	0,5449
672	0,0686	0,5282
677	0,0712	0,5148
682	0,0524	0,4893
687	0,0376	0,4596
692	0,0452	0,4449
697	0,0476	0,4455
702	0,054	0,4433
707	0,0562	0,4105
712	0,0631	0,4389
717	0,0605	0,416
722	0,0663	0,387
727	0,0671	0,4094
732	0,058	0,3411
736	0,0571	0,3355
742	0,0636	0,3367
746	0,0661	0,3077
751	0,0612	0,3042
756	0,0773	0,2988
761	0,0811	0,3537
766	0,0412	0,1173
770	0,0916	0,3354
775	0,1078	0,2349

