



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ OSVĚTLENOSTI NA VOZOVKÁCH POMOCÍ JASOVÉHO ANALYZÁTORU LDA

MEASUREMENT OF ILLUMINANCE DISTRIBUTION ON ROADWAYS USING THE LUMINANCE ANALYSER LDA

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Cudrák

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Motyčka, Ph.D.

BRNO 2022

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Martin Cudrák

**ID:** 195293

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měření rozložení osvětlenosti na vozovkách pomocí jasového analyzátoru LDA

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Rešerše normativních požadavků na osvětlování pozemních komunikací a přístrojů, které se používají k jejich ověření.
2. Laboratorní měření odraznosti materiálů a selekce vhodných materiálů pro terénní měření
3. Realizace laboratorního měření rovnoměrnosti osvětlení pomocí jasového analyzátoru LDA – LumiDISP
4. Terénní měření rozložení osvětlenosti na vybraných osvětlovacích soustavách
5. Zpracování naměřených hodnot, porovnání s referenčními přístroji
6. Zhodnocení metodiky měření osvětlenosti jasovým analyzátozem LDA – LumiDISP

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího závěrečné práce

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 24.5.2022

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Motyčka, Ph.D.

**prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá možností měření osvětlenosti pozemních komunikací pomocí jasového analyzátoru LDA a jeho softwarového prostředí LumiDISP. V teoretické části jsou rozebrány světelné veličiny, optické vlastnosti vybraných materiálů, zejména materiálů vozovek – asfaltu a normativní požadavky na osvětlování pozemních komunikací. V praktické části je realizována výroba měřicích vzorků pro následné terénní měření. V následující části je realizována řada laboratorních a terénních měření. Na základě těchto měření byla stanovena a zdokonalena měřicí metoda a měřicí postup. Cílem diplomové práce je stanovit měřicí metodu, postup měření a vyčíslit přesnost měřicí metody osvětlenosti pomocí jasového analyzátoru LDA.

## **Klíčová slova**

Jas, osvětlenost, pozemní komunikace, normativní požadavky, měření jasu, měření osvětlenosti, jasový analyzátor LDA.

## **Abstract**

The master's thesis deals with the possibility of measuring road illuminance using the LDA luminance analyser and LumiDISP software. The theoretical part describes luminous quantities, optical properties of selected materials, especially road materials – asphalt, and normative requirements for road lighting. In the practical part, the production of measuring samples is implemented for subsequent field measurements. A series of laboratory and field measurements are carried out in the following section. Based on these measurements, the measurement method and the measurement procedure have been determined and refined. The aim of the master's thesis is to determine the measurement method, the measurement procedure and to quantify the accuracy of the illuminance measurement method using the luminance analyser LDA.

## **Keywords**

Luminance, illuminance, roads, normative requirements, measurement of luminance, measurement of illuminance, luminance analyser LDA.

## **Bibliografická citace**

CUDRÁK, Martin. *Měření rozložení osvětlenosti na vozovkách pomocí jasového analyzátoru LDA* [online]. Brno, 2021 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/138001>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Martin Motyčka.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	Martin Cudrák
<b>VUT ID studenta:</b>	195293
<b>Typ práce:</b>	Diplomová práce
<b>Akademický rok:</b>	2021/22
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Měření rozložení osvětlenosti na vozovkách pomocí jasového analyzátoru LDA

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 24.5.2022

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Motyčkovi, Ph.D. za odborné vedení, účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 24.5.2022

-----  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	9
SEZNAM TABULEK.....	11
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>2. ZÁKLADNÍ SVĚTELNÉ VELIČINY A OPTICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ .....</b>	<b>13</b>
2.1 ZÁKLADNÍ SVĚTELNÉ VELIČINY .....	13
2.1.1 <i>Normalizovaný pozorovatel</i> .....	13
2.1.2 <i>Světelný tok</i> .....	13
2.1.3 <i>Prostorový úhel</i> .....	14
2.1.4 <i>Jas</i> .....	14
2.1.5 <i>Svítivost</i> .....	15
2.1.6 <i>Osvětlenost</i> .....	15
2.2 OPTICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ .....	17
2.2.1 <i>Integrální činitelé</i> .....	17
2.2.2 <i>Odraznost materiálů</i> .....	18
2.2.3 <i>BRDF funkce</i> .....	19
2.3 ODRAZNOSTI KONKRÉTNÍCH MATERIÁLŮ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ .....	20
2.3.1 <i>Spektrální odraznost asfaltových vozovek</i> .....	20
2.3.2 <i>Spektrální charakteristiky asfaltových vozovek</i> .....	21
<b>3. NORMATIVNÍ POŽADAVKY NA OSVĚTLOVÁNÍ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ.....</b>	<b>24</b>
3.1 VÝBĚR TŘÍDY OSVĚTLENÍ PRO MOTOROVOU DOPRAVU (M) .....	24
3.2 TŘÍDY OSVĚTLENÍ .....	26
3.2.1 <i>Třídy osvětlení M</i> .....	26
3.2.2 <i>Třídy osvětlení C</i> .....	27
3.2.3 <i>Třídy osvětlení P</i> .....	27
<b>4. MĚŘENÍ FOTOMETRICKÝCH PARAMETRŮ VOZOVEK.....</b>	<b>29</b>
4.1 MĚŘENÍ JASU VOZOVKY .....	29
4.1.1 <i>Jasoměry</i> .....	29
4.1.2 <i>Jasové analyzátory</i> .....	30
4.1.3 <i>Výběr měřené oblasti vozovky</i> .....	32
4.1.4 <i>Rozložení měřicích bodů</i> .....	33
4.1.5 <i>Umístění pozorovatele</i> .....	34
4.2 MĚŘENÍ OSVĚTLENOSTI VOZOVKY .....	34
4.2.1 <i>Podmínky měření</i> .....	34
4.2.2 <i>Požadavky na měřicí systémy</i> .....	34
4.2.3 <i>Luxmetry</i> .....	35
4.2.4 <i>Výběr měřené oblasti vozovky</i> .....	35
4.2.5 <i>Rozložení měřicích bodů</i> .....	36
<b>5. PRAKTICKÁ ČÁST - LABORATORNÍ MĚŘENÍ .....</b>	<b>37</b>
5.1 VYTVOŘENÍ LABORATORNÍCH VZORKŮ PRO MĚŘENÍ.....	37
5.2 MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍ ODRAZNOSTI MĚŘICÍCH VZORKŮ .....	38
5.3 PŘEPRAVNÍ BOX NA MĚŘICÍ VZORKY .....	41

5.4	MĚŘENÍ VLIVU POLOHY VZORKU NA VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	42
5.4.1	<i>Popis měřicího pracoviště</i> .....	42
5.4.2	<i>Použité přístroje a pomůcky:</i> .....	42
5.4.3	<i>Popis měření</i> .....	43
5.4.4	<i>Vyhodnocení měření</i> .....	43
5.5	URČENÍ IDEÁLNÍHO ÚHLU MĚŘENÍ.....	46
5.5.1	<i>Popis měření</i> .....	46
5.5.2	<i>Použité měřicí přístroje a pomůcky</i> .....	46
5.5.3	<i>Zpracování naměřených dat</i> .....	48
5.5.4	<i>Určení referenční osvětlenosti</i> .....	48
5.5.5	<i>Číslování jednotlivých vzorků</i> .....	48
5.5.6	<i>Závěr měření:</i> .....	49
5.5.7	<i>Příklad výpočtu sledovaných hodnot</i> .....	51
<b>6.</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST - TERÉNNÍ MĚŘENÍ .....</b>	<b>53</b>
6.1.1	<i>Použité měřicí přístroje a přípravky</i> .....	53
6.2	PRVNÍ TESTOVACÍ MĚŘENÍ .....	54
6.2.1	<i>Popis měřicího stanoviště:</i> .....	54
6.2.2	<i>Popis měření</i> .....	55
6.2.3	<i>Závěry měření</i> .....	56
6.3	VYTVORENÍ ŠABLONY NA ROZMÍSTĚNÍ VZORKŮ.....	59
6.4	VLIV UMÍSTĚNÍ STŘEDU SNÍMKU A POUŽITÉHO CLONOVÉHO ČÍSLA NA VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	60
6.4.1	<i>Popis měřicího stanoviště</i> .....	60
6.4.2	<i>Popis měření</i> .....	61
6.4.3	<i>Závěry měření</i> .....	62
6.5	VLIV POZICE MĚŘICÍCH VZORKŮ VŮČI POLOZE SVÍTIDLA.....	65
6.5.1	<i>Popis měřicího stanoviště</i> .....	65
6.5.2	<i>Popis měření</i> .....	65
6.5.3	<i>Závěr měření</i> .....	66
6.6	MĚŘENÍ OSVĚTLENOSTI BIODYNAMICKÉHO SVÍTIDLA .....	67
6.6.1	<i>Popis měřicího stanoviště</i> .....	67
6.6.2	<i>Popis měření</i> .....	67
6.6.3	<i>Závěry měření</i> .....	69
6.7	MĚŘENÍ SE SÍTÍ MĚŘICÍCH VZORKŮ.....	72
6.7.1	<i>Korekce měřicího úhlu</i> .....	72
6.7.2	<i>Vyhodnocení měření osvětlenosti se sítí měřicích vzorků</i> .....	75
6.8	MĚŘENÍ OSVĚTLENOSTI S JEDNÍM REFERENČNÍM VZORKEM.....	78
6.8.1	<i>Postup měření</i> .....	78
6.8.2	<i>Zpracování naměřených snímků</i> .....	79
6.8.3	<i>Postup stanovení osvětlenosti na základě jednoho referenčního vzorku</i> .....	80
6.8.4	<i>Korekční koeficienty pro měření osvětlenosti s jedním referenčním vzorkem</i> .....	81
6.8.5	<i>Vyhodnocení měření osvětlenosti s jedním referenčním vzorkem</i> .....	84
6.9	ANALÝZA NEJISTOT MĚŘENÍ MĚŘICÍ METODY .....	86
<b>7.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>89</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>94</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Křivka poměrné spektrální citlivost oka normálního fotometrického pozorovatele [2]	13
Obr. 2	Znázornění steradiánu [4]	14
Obr. 3	Osvětlenost [3]	15
Obr. 4	Definice osvětlenosti bodového zdroje [5]	16
Obr. 5	Izoluxní mapa [3]	16
Obr. 6	Difúzní odraz (Lambertův zářič) [9]	18
Obr. 7	Znázornění dvousměrové distribuční funkce odrazu (BRDF) [6]	19
Obr. 8	Spektrální odraznosti vzorků asfaltových povrchů [11]	23
Obr. 9	Princip fyzikálního (objektivního) jasoměru [12]	30
Obr. 10	Ukázka výstupu z jasového analyzátoru při měření jasu vozovky [19]	31
Obr. 11	Měřicí oblast pro měření jasu a osvětlenosti [15]	32
Obr. 12	Rozložení měřicích bodů pro měření jasu jízdního pruhu vozovky [15]	33
Obr. 13	Příklady umístění pozorovatele vzhledem k oblasti výpočtu [15]	34
Obr. 14	Ilustrativní příklad luxmetru (VOLTCRAFT MS-1300) [20]	35
Obr. 15	Rozložení měřicích bodů pro měření osvětlenosti jízdního pruhu vozovky [15]	36
Obr. 16	Použitá barva pro nástřik vzorků [21]	38
Obr. 17	Měřicí vzorek opatřený nátěrem	38
Obr. 18	spektrofotometr Konica-Minolta CM-3600 D [22]	38
Obr. 19	Průměrná spektrální odraznost všech 25 měřicích vzorků, včetně spektrální citlivosti jasového analyzátoru LDA	41
Obr. 20	Přepravní box na měřicí vzorky	41
Obr. 21	Měření závislosti odchyly jasu na úhlu měření	43
Obr. 22	Závislost průměrné odchyly všech měřicích vzorků na úhlu měření	44
Obr. 23	Měření ve světelné laboratoři	47
Obr. 24	Situační schéma měření v laboratoři	47
Obr. 25	Znázornění měření průměrné osvětlenosti vzorku	48
Obr. 26	Ukázka vymaskovaných vzorků v programu LumiDISP při měření z výšky 250 cm	49
Obr. 27	Jasový analyzátor LDA [23]	53
Obr. 28	Stativ Manfrotto 055 [25]	53
Obr. 29	Luxmetr PRC Krochmann, RadioLux 111 [24]	53
Obr. 30	Objektiv SIGMA circular fisheye 4.5mm 1:2.8 DC HSM [27]	53
Obr. 31	Objektiv SIGMA 135mm 1:1.8 DG ø82 [26]	53
Obr. 32	Měřicí síť vzorků 5x5, rozteč 100x100 cm	54
Obr. 33	Situační schéma pozic jasového analyzátoru při měření	55
Obr. 34	Rozměry šablony pro rozmístění měřicích vzorků	59
Obr. 35	Ukázka používání šablony pro rozmístění měřicích vzorků	59
Obr. 36	Fotka měřené vozovky včetně sítě měřicích vzorků	60
Obr. 37	Situační schéma měření	61
Obr. 38	Příklad nastavení středu snímku jasového analyzátoru na střed 2. řadu vzorků	62
Obr. 39	Situační schéma měření vlivu pozice vzorků vůči svítidlu A) měření vlevo od svítidla, B) měření vpravo od svítidla	65
Obr. 40	Měření biodynamického svítidla (režim $T_{cp} \approx 2500 K$ )	67
Obr. 41	Situační schéma měření biodynamického svítidla	68
Obr. 42	Osvětlenost na jednotlivých vzorcích (ustálený režim $T_{cp} \approx 2500 K$ )	70
Obr. 43	Osvětlenosti na jednotlivých vzorcích (ustálený režim $T_{cp} \approx 1800 K$ )	70
Obr. 44	Průběh osvětlenosti na referenčním vzorku (pozice 13.)	71

Obr. 45	Hodnoty osvětlenosti jednotlivých měřících vzorků pro měření č.1 .....	77
Obr. 46	Situační schéma měření, vlevo – všechny vzorky, vpravo – pouze referenční vzorek .....	79
Obr. 47	Ukázka měření, vlevo - měření se všemi vzorky, vpravo - měření s referenčním vzorkem .....	80
Obr. 48	Hodnoty osvětlenosti jednotlivých vymaskovaných vzorků pro měření č.1 .....	84
Obr. 49	Znázornění vstupujících chyb do měřící metody .....	87

# SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Parametry pro výběr třídy osvětlení M [13] .....	25
Tab. 2 Třídy osvětlení M [14].....	26
Tab. 3 Třídy osvětlení C [14].....	27
Tab. 4 Třídy osvětlení P [14] .....	28
Tab. 5 Spektrální odraznost jednotlivých měřicích vzorků váhovaná podle spektrální citlivosti jasového analyzátoru LDA .....	39
Tab. 6 Naměřené spektrální odraznosti jednotlivých měřicích vzorků .....	40
Tab. 7 Shrnutí průměrných hodnot všech vzorků .....	44
Tab. 8 Změřené průměrné hodnoty jasu na vzorku v závislosti na úhlu měření.....	45
Tab. 9 Stanovení průměrné osvětlenosti vzorku.....	48
Tab. 10 Stručné shrnutí výsledků měření osvětlenosti v jednotlivých výškách.....	50
Tab. 11 Přehled naměřených a vypočítaných hodnot pro měření z výšky 250 cm .....	51
Tab. 12 Podrobný popis jednotlivých pozic jasového analyzátoru LDA .....	55
Tab. 13 Shrnutí výsledku testovacího terénního měření .....	56
Tab. 14 Vliv snížené rozteče na výslednou osvětlenost.....	63
Tab. 15 Vliv použitého clonového čísla při stejném středu snímku .....	64
Tab. 16 Vliv umístění středu snímku při stejné cloně.....	64
Tab. 17 Vliv pozice měřicích vzorků vůči poloze svítidla.....	66
Tab. 18 Měření ustálených stavů biodynamického svítidla .....	69
Tab. 19 Hodnota osvětlenosti na ref. vzorku – pozice 13. (použité clonové číslo 2.8).....	69
Tab. 20 Ukázka měřicích úhlů jednotlivých vzorků a jejich odpovídající korekční koeficienty – sklon vozovky 0° .....	73
Tab. 21 Ukázka měřicích úhlů jednotlivých vzorků a jejich odpovídající korekční koeficienty – sklon vozovky 10° .....	73
Tab. 22 Ukázka korekce osvětlenosti podle úhlu pro měření č.1 (clonové číslo: 2.8).....	74
Tab. 23 Ukázka korekce osvětlenosti podle úhlu pro měření č.2 (clonové číslo: 5.6).....	74
Tab. 24 Souhrn vlivu korekce úhlu měření napříč všemi terénními měřeními – clonové číslo 5.6 .....	75
Tab. 25 Souhrn vlivu korekce úhlu měření napříč všemi terénními měřeními – clonové číslo .....	76
Tab. 26 Konkrétní hodnoty osvětlenosti a její odchylky pro měření č.1 .....	77
Tab. 27 Naměřené hodnoty jasu pro měření č.1 s referenčním vzorkem .....	80
Tab. 28 Přepočtené hodnoty jasu a osvětlenosti na měřené ploše.....	81
Tab. 29 Odchylky vypočítané osvětlenosti .....	81
Tab. 30 Zkorigovaná osvětlenost ideálními korekčními koeficienty .....	82
Tab. 31 Odchylky osvětlenosti od ref. hodnoty při použití ideálních korekčních koeficientů.....	82
Tab. 32 Zkorigovaná osvětlenost průměrnými korekčními koeficienty .....	83
Tab. 33 Odchylky osvětlenosti od ref. hodnoty při použití průměrných korekčních koeficientů .....	83
Tab. 34 Souhrn měření osvětlenosti s jedním referenčním vzorkem - clonové číslo 2.8.....	85
Tab. 35 Souhrn měření osvětlenosti s jedním referenčním vzorkem - clonové číslo 5.6.....	85
Tab. 36 Nejistoty měřicí metody .....	88

# 1. ÚVOD

Měření rozložení osvětlenosti pozemních komunikací se řadí mezi jednu ze základních měřicích metod, která se uplatňuje při měření venkovního osvětlení. Měřením rozložení osvětlenosti můžeme objektivně porovnat, zdali navržená světelná soustava odpovídá normativním požadavkům pro daný typ pozemní komunikace. V praxi je toto měření realizováno pomocí luxmetrů v definované síti měřicích bodů na vozovce. Už ze samotného principu se jedná o velice zdlouhavou metodu měření rozložení osvětlenosti. Jednou z teoretických možností, jak se vyhnout této zdlouhavé metodě měření osvětlenosti je možnost využití nepřímého měření osvětlenosti pomocí jasového analyzátoru LDA a následného softwarového vyhodnocení. Právě ověření možnosti využití jasového analyzátoru k měření osvětlenosti je cílem diplomové práce.

První část práce se věnuje teoretickému podkladu k navazujícímu praktickému měření. Jsou zde tedy popsány základní světelné veličiny a základní optické vlastnosti jednotlivých materiálů vozovek. Včetně popisu jednotlivých tříd osvětlení pro pozemní komunikace a jejich normativní požadavky, zejména na hodnoty osvětlenosti a jasu. Dále je zde popsána závislost osvětlenosti na jasu, která se bude pro měřicí metodu využívat. Na teoretickou část práce navazují dvě části praktického měření.

V první části praktického měření – laboratorní měření, je realizována výroba měřicích vzorků použitých pro měření, jejich následné proměření a stanovení měřicího postupu pro měřicí metodu. Včetně otestování měřicí metody v laboratorních podmínkách.

V druhé části praktického měření – terénní měření, je měřicí metoda testována v reálných podmínkách pozemních komunikací. Je provedena série měření, na různých místech pozemních komunikací, pod různými typy svítidel. Měřicí metoda se upravovala a zdokonalovala na základě poznatků z laboratorního měření, a hlavně na základě poznatků z terénu. Následně byly stanoveny dva postupy měření osvětlenosti pozemních komunikací za pomoci jasového analyzátoru LDA. První postup vychází z použití sítě měřicích vzorků a následnému softwarovému vyhodnocení a výpočtu osvětlenosti měřené plochy z měřicích vzorků na základě naměřených hodnot jasu. Druhý postup vychází z použití pouze jednoho referenčního měřicího vzorku a vyhodnocení osvětlenosti měřené plochy na základě hodnot jasu na asfaltovém povrchu a měřicím vzorku. Tyto dva postupy měření osvětlenosti jsou podrobně rozebrány a vyhodnoceny. V poslední části práce je stanovena nejistota měřicí metody v terénních podmínkách.

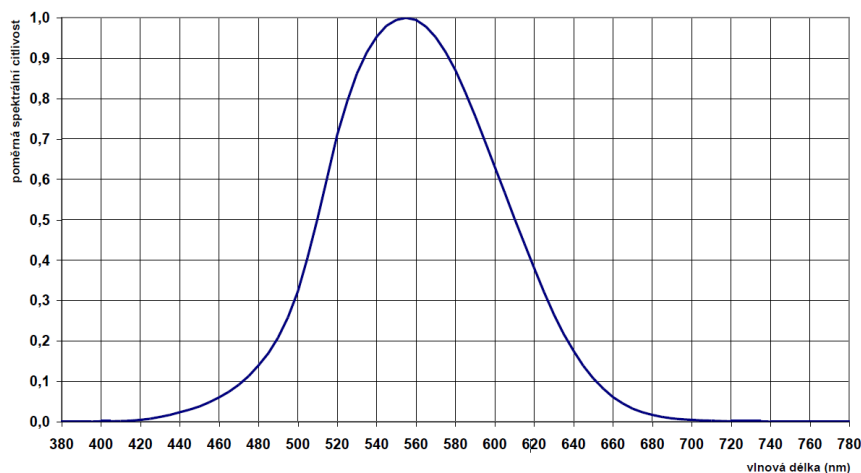
## 2. ZÁKLADNÍ SVĚTELNÉ VELIČINY A OPTICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ

Následující kapitola obsahuje popis základních světelných veličin a světelných vlastností materiálů, se kterými se pracuje v diplomové práci, a které jsou nezbytné pro pochopení a realizaci měření jasu a osvětlenosti komunikací.

### 2.1 Základní světelné veličiny

#### 2.1.1 Normalizovaný pozorovatel

Ve světelné technice se zpravidla neposuzují energetické veličiny jako zářivý tok, zářivost apod. ale pracuje se s fotometrickými pojmy a veličinami, které respektují různou citlivost oka pozorovatele k záření různých vlnových délek. Vzhledem k tomu že každý člověk má trochu jinou spektrální citlivost oka, bylo nutné pro zajištění sjednocení světelných výpočtu zavést spektrální citlivost oka tzv. normálního fotometrického pozorovatele a stanovit křivku poměrné účinnosti optického záření  $V(\lambda)$ , která popisuje citlivost oka na různé vlnové délky záření. Tato křivka byla standardizovaná Mezinárodní komisí pro osvětlování CIE v roce 1924 [1],[2].



Obr. 1 Křivka poměrné spektrální citlivost oka normálního fotometrického pozorovatele [2]

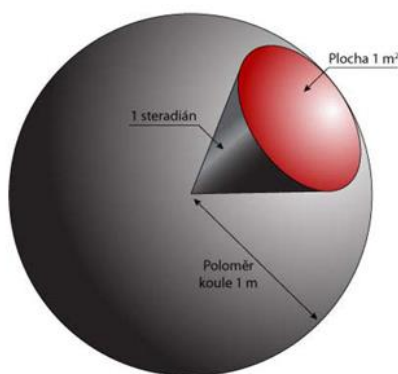
#### 2.1.2 Světelný tok

Světelný tok představuje základní jednotku množství světla, která odpovídá zářivému toku a vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový vjem. Udává, kolik světelné energie vyzáří světelný zdroj do svého okolí („světelný výkon“). Světelný tok se značí veličinou  $\phi$  a jednotkou je *lumen* (lm) [1],[2].

### 2.1.3 Prostorový úhel

Jedná se o geometrickou veličinu používanou ve světelně technických výpočtech. Velikost prostorového úhlu je určena velikostí plochy vyřaté obecnou kuželosečkou na povrchu jednotkové koule, jejíž střed (vrchol prostorového úhlu) je totožný s vrcholem uvažované kuželosečky. Jednotkou prostorového úhlu je steradián (sr). Velikost prostorového úhlu  $\Omega$ , pod kterým je ze středu koule o poloměru  $r$  vidět plocha  $A$  vyřatá na povrchu této koule, se stanoví ze vztahu:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (2.1)$$



Obr. 2 Znárodnění steradiánu [4]

Maximální hodnota, kterou může prostorový úhel nabývat, je hodnota  $\Omega = 4\pi$ . Je to velikost prostorového úhlu, kterou nabývá při uvažování celého prostoru, tj. plochy  $A$  rovnou povrchu celé koule ( $A = 4\pi r^2$ ) [1],[2],[3].

### 2.1.4 Jas

Světelně technická veličina, definovaná jako měrná svítivost. Označuje se  $L$  a udává se v ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Jedná se o veličinu, na kterou bezprostředně reaguje zrakový orgán. Respektive lidské oko reaguje na kontrast jasu. Jas je obecně určen prostorovou a plošnou hustotou světelného toku, který paprsky přenáší. Proto vždy záleží na poloze pozorovatele a na směru jeho pohledu. Nezáleží přitom, zda vychází jas svazku paprsků přímo ze zdroje záření, nebo je odražen od libovolné plochy [1].

$$L = \frac{dI}{dS \cdot \cos \gamma} \quad (2.2)$$

kde:  $I$  – svítivost.

### 2.1.5 Svítivost

Z důvodů nerovnoměrnosti rozložení světelného toku zdrojů a svítidel do různých směrů, je nutné pro popis těchto zdrojů znát nejen celkový světelný tok, ale i jeho prostorovou hustotu v různých směrech, tj. svítivost zdroje. Jednotkou svítivosti je kandela (cd) a tvoří jednu ze základních jednotek soustavy SI. Střední hodnota svítivosti se určí pomocí následujícího vztahu.

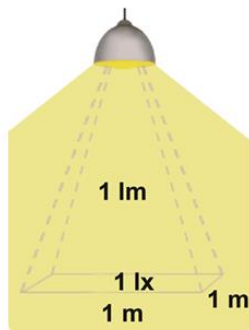
$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (2.3)$$

kde:  $\Omega$  je prostorový úhel.

Svítivost je definovaná pouze pro zdroj bodový, popř. pro svítidlo bodového typu, tj. pro takový zdroj či svítidlo, jehož vyzařovací plocha má rozměry zanedbatelné v porovnání se vzdáleností, ze které je zdroj pozorován. Za bodové zdroje považujeme takové, kde tato vyzařovací plocha nepřesahuje 1/10 vzdálenosti, ze které je zdroj pozorován. Následná chyba ve výpočtech daných tímto zjednodušením obvykle nepřesáhne 1 % [1],[2].

### 2.1.6 Osvětlenost

Osvětlenost, nebo také intenzita osvětlení, představuje jednu z odvozených fotometrických veličin. Udává plošnou hustotu světelného toku  $d\phi$  dopadajícího na plochu  $dA$  viz obr. 3.



Obr. 3 Osvětlenost [3]

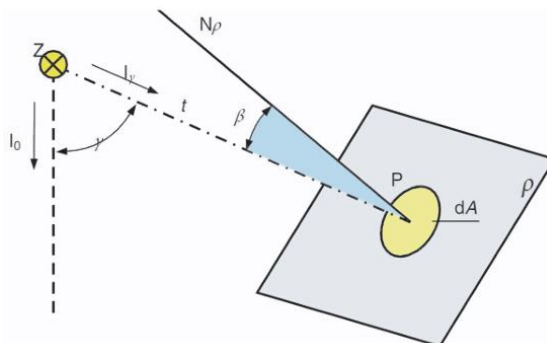
Pro výpočet osvětlenosti, jak již vyplývá z definice, platí vztah:

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad (2.4)$$

Osvětlenost plošky  $dA$  se často uvažuje jako osvětlenost v bodě, jehož elementární okolí v uvažované rovině tvoří ploška  $dA$ . Osvětlenost bodového zdroje lze vyjádřit i pomocí svítivosti, a to na základě tzv. čtvercového a kosinového zákona. Na Obr. 4 je zobrazena rovina  $\rho$ , na které je ve vzdálenosti  $l$  osvětlen bod  $P$ , jehož bezprostřední okolí tvoří plocha  $dA$ . Normála roviny  $N_p$  svírá s paprskem světla úhel  $\beta$ . Hodnotu intenzity osvětlení pak určíme pomocí svítivosti  $I_y$  ze vztahu:

$$E = \frac{I_\gamma}{l^2} \cdot \cos \beta \quad (2.5)$$

Kde:  $I_\gamma$  (cd) je svítivost bodového zdroje ve směru paprsku  $l$ , tj. ve směru pod úhlem  $\gamma$  od zvoleného směru vztažné svítivosti  $I_0$ ;  $l$  (m) vzdálenost světelného zdroje od plochy [1],[3].



Obr. 4 Definice osvětlenosti bodového zdroje [5]

Z rovnice (2.5) je patrné, že intenzita osvětlení v daném bodě  $P$  klesá s rostoucí vzdáleností  $l$  světelného zdroje, respektive se čtvercem vzdálenosti (*čtvercový zákon*). A zároveň je osvětlenost přímo úměrná hodnotě kosinu úhlu  $\beta$  dopadu světelných paprsků (*Lambertův kosinusový zákon*), se vzrůstajícím úhlem  $\beta$  klesá osvětlenost. Maximální osvětlenost plošky  $dA$  je v případě, kdy bude normála roviny svírat s dopadajícím paprskem nulový úhel ( $\beta = 0$ ), tj. tzv. normálová osvětlenost  $E_N$ , pro kterou platí:

$$E_N = \frac{I_\gamma}{l^2} \quad (2.6)$$

Pro získání lepšího přehledu o rozložení hladiny osvětlenosti konkrétní plochy je vhodné na dané ploše stanovit síť měřicích bodů, změřit hodnoty osvětlenosti a následně body se stejnou hodnotou osvětlenosti propojit křivkami (izoluxami), které vytvoří izoluxní mapu viz Obr. 5. [1],[3].



Obr. 5 Izoluxní mapa [3]

## 2.2 Optické vlastnosti materiálů

Optické vlastnosti materiálů jsou velmi důležité zejména pro návrh a konstrukci částí světelných zařízení. Vhodnou volbou materiálů jsme schopni docílit směřování, rozptýlení nebo naopak odstínění světelného toku v jednotlivých konstrukčních částech svítidel při zachování co nejvyšší účinnosti a hospodárnosti světelného zařízení. Znat optické vlastnosti je velice důležité i v jiných oblastech, než je samotná konstrukce svítidel. Nezanedbatelnou roli hrají ve všech oblastech, kde dochází k osvětlování. Například odraznosti stropu a stěn mají významný vliv na kvalitu a hospodárnost osvětlení v domácnosti a stejně tak optické vlastnosti stavebních materiálů jako jsou dlažby, silnice atd. mají významný vliv na kvalitu osvětlení komunikací [1].

Vzhledem k tomu, že hlavní náplní diplomové práce je měření osvětlenosti povrchů pozemních komunikací pomocí jasového analyzátoru LDA je velice důležité znát optické vlastnosti materiálu vozovky, zejména odraznost. Vzhledem k tomu, že jasový analyzátor LDA, jak již vyplývá z názvu, měří jas povrchu pozemní komunikace, který závisí na osvětlenosti povrchu pozemní komunikace, odrazných vlastnostech a poloze pozorovatele.

### 2.2.1 Integrální činitele

Světelný tok  $\phi$  dopadající na uvažovaný materiál se v obecném případě dělí na tři části, a to na část  $\phi_\rho$ , která se odrazí, na část  $\phi_\tau$ , která látkou projde, a na část  $\phi_\alpha$ , kterou látka pohltí. Pro celkový dopadající světelný tok tedy platí:

$$\phi = \phi_\rho + \phi_\tau + \phi_\alpha \quad (2.7)$$

Tomuto rozdělení světelného toku odpovídají světelně technické vlastnosti jednotlivých materiálů/látek, které charakterizují tři integrální činitele, a to:

- integrální činitel odrazu  $\rho = \phi_\rho/\phi$ ,
- integrální činitel prostupu  $\tau = \phi_\tau/\phi$ ,
- integrální činitel pohlcení  $\alpha = \phi_\alpha/\phi$ .

Tyto integrální činitele charakterizují vlastnosti sledované látky z hlediska záření různých vlnových délek souhrnně – integrálně. Pro jednotlivé integrální činitele platí následující rovnice:

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (2.8)$$

Činitele odrazu, prostupu a pohlcení nezávisí pouze na vlastnostech látky samotné, ale také na vlnové délce dopadajícího záření. Proto je nutné definovat i spektrální hodnoty jednotlivých činitelů  $\rho(\lambda)$ ,  $\tau(\lambda)$ ,  $\alpha(\lambda)$  [1].

Dopadá-li na sledovanou látku složený zářivý tok  $\phi_e$ , pak pro hodnotu integrálního činitele odrazu  $\rho$  sledované látky platí obecný výraz:

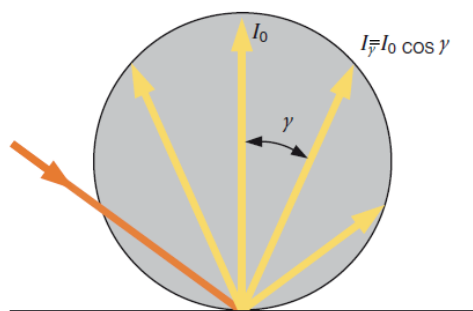
$$\rho = \frac{\int_0^\infty \left( \frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right) \cdot V(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty \left( \frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (2.9)$$

Kde:  $\frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda}$  je spektrum dopadajícího zářivého toku a  $V(\lambda)$  je poměrná spektrální citlivost oka normalizovaného pozorovatele.

### 2.2.2 Odraznost materiálů

Činitel odrazu, jak již bylo řečeno v předešlé kapitole, nezávisí pouze na vlastnostech látky samotné, ale i na vlnové délce dopadajícího záření a dále ještě na rozložení odraženého světelného toku do různých směrů v prostoru (tzv. směrová odraznost materiálů). Pro popis směrové odraznosti se využívají tzv. BRDF funkce popsané v kapitole 2.2.3.

Z výše uvedeného vyplývá, že přesné popsání odraznosti materiálů je velice náročné, proto se v řadě světelných výpočtů a měření využívá určitých zjednodušení. Zejména zavedení rovnoměrně rozptýleného (difuzního) odrazu viz Obr. 6. V případě rovnoměrně rozptýleného odrazu se paprsek světla dopadající na element povrchu po odrazu rozdělí do celého poloprostoru tak, že jas elementu uvažované plochy je ve všech směrech stejný. Jas dokonale rozptylně odrážející plochy tedy nezávisí na úhlu dopadu světelných paprsků. Tyto dokonale rozptylné odrážející plochy se často označují názvem Lambertovy zářiče [1],[3].



Obr. 6 Difúzní odraz (Lambertův zářič) [9]

Pro jas svítící plošky vyplývá, že svítivost dosahuje maximální hodnoty  $I_0$  v kolmém směru a pod jinými úhly se vypočítá z Lambertova kosinusového zákona:

$$I_\gamma = I_0 \cdot \cos \gamma \quad (2.10)$$

Pro Lambertův zářič platí, že ekvivalentní prostorový úhel je  $\Omega_e = \pi$ . Na základě toho může uvést závislost světlení  $M$  a jasu  $L$ .

$$M = \pi \cdot L \quad (2.11)$$

Světlení  $M$  můžeme vyjádřit také pomocí činitele odrazu  $\rho$  sledované plochy a osvětlením  $E$ :

$$M = \rho \cdot E \quad (2.12)$$

Za předpokladu že osvětlená plocha má difuzní charakter odrazu (Lambertův zářič) a zároveň známe hodnotu činitele odrazu  $\rho$  měřené plochy, lze na základě změřeného jasu stanovit osvětlenost povrchu dle vztahu vyjádřeného z rovnic (2.11) a (2.12):

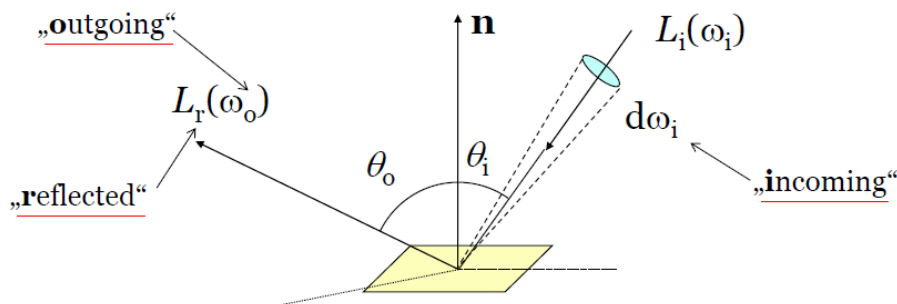
$$E = \frac{L \cdot \pi}{\rho} \quad (2.13)$$

Z výše uvedeného vztahu vyplývá, že pro určení osvětlenosti vozovky na základě měření jasu je stěžejní znát odraznost materiálu vozovky [1],[3].

### 2.2.3 BRDF funkce

BRDF (**B**idirectional **R**eflectance **D**istribution **F**unction) jsou matematické funkce, které nám popisují směrovou odraznost materiálu. Pomocí BRDF jsme tedy schopni matematicky popsat chování odraženého světla. Jedná se o funkci dvou parametrů (směr dopadající světla  $\omega_i$  a směr odraženého světla  $\omega_o$ ), jež vyjadřuje poměr odraženého světla - jasu  $L_r(\omega_o)$  vůči dopadajícímu světlu - osvětlenosti  $E(\omega_i)$ :

$$f_r(\omega_i \rightarrow \omega_o) = \frac{dL_r(\omega_o)}{dE(\omega_i)} = \frac{dL_r(\omega_o)}{L_i(\omega_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i} \quad (2.14)$$



Obr. 7 Znárodnění dvousměrové distribuční funkce odrazu (BRDF) [6]

BRDF funkce nám tedy vyjadřují, jaká je hustota pravděpodobnosti, že foton, který přiletí na povrch ze směru  $\omega_i$  se odrazí ve směru  $\omega_o$ . BRDF popisují tedy to, co se ve skutečnosti děje na úrovni mikrostruktury při pohledu z dálky.

Měření BRDF funkcí je nejčastěji realizováno pomocí goniospektrofotometrů, které využívají jedno nebo více goniometrických ramen k umístění zdroje světla a detektoru v různých směrech. Pro měření úplné BRDF funkce je nutné proces měření mnohokrát opakovat, přičemž se zdroj světla pokaždé přesune tak, aby se změřil jiný úhel dopadu světla na měřený povrch. V případě dokonalého měření povrchu, tzn. použití velkého počtu (hustoty) měřicích bodů je samotné měření velice časově náročné [6],[7].

## 2.3 Odraznosti konkrétních materiálů pozemních komunikací

Následující kapitola popisuje spektrální odraznost u konkrétních materiálů pozemních komunikací, jako je zejména asfalt, který je používán u většiny pozemních komunikací.

### 2.3.1 Spektrální odraznost asfaltových vozovek

V případě asfaltu jde o směs jemného, hrubého kameniva a pojiva. Použitým kamenivem je obvykle drcená hornina, nebo šterk. Aby výsledná směs splňovala parametry pro konstrukci vozovek musí jednotlivé částice směsi splňovat konkrétní požadavky na velikost, tvar, drsnost apod. Jako vazební materiál je obvykle použit bitumen a jeho deriváty. Bitumenové sloučeniny používané v různých typech asfaltu mají přesně definované fyzikální a chemické vlastnosti. Vzhledem k tomu, že všechny částice a pojivo musí splňovat konkrétní fyzikální a chemické vlastnosti, tak i finální směs asfaltu je definována přesnými fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Lze tedy předpokládat, že konkrétní vrstvě (směsi) asfaltu odpovídá konkrétní spektrální odraznost. Ovšem i přestože asfaltové povrchy mají přesně definované fyzikální a chemické vlastnosti, čemuž odpovídá konkrétní spektrální odraznost. Tak všechny tyto parametry vozovek se v čase mění, a to zejména díky stárnutí vozovky a opotřebením vlivem užívání [8].

#### Opotřebením vozovky:

Velikost opotřebením vozovky závisí zejména na poloze vozovky z geografického hlediska a dále na hustotě provozu na dané vozovce. Například vozovky v severovýchodních zemích, kde je povoleno používání hřebů na pneumatikách, trpí větším opotřebením než vozovky, kde je použití hřebů zakázáno. Samotné použití hřebů má za následek odstraňování pojiva asfaltu v místech tzv. kolejí, čímž se stává asfalt hrubší a tím dochází i k ovlivňování odrazných vlastností. Na druhou stranu hřeby odírají/leští použité kamenivo v asfaltu, čímž dochází ke zvýšení odrazivosti asfaltu, zejména v tzv. kolejích.

Naopak u vozovek v mírnějším klimatu, kde je použití hřebů na pneumatikách zakázáno. Dochází obecně k menšímu opotřebením asfaltového povrchu. Ovšem i u normálních

pneumatik dochází díky tření k narušení pojiva asfaltu, které ulpívá na povrchu vozovky spolu s prachem a dalšími nečistotami. Takto vzniklá směs nečistot pak též mění odraznost asfaltu. Takto znečištěný povrch je na pohled více matný [8].

#### Stárnutí vozovky:

Mezi další formu opotřebení vozovky, jak již bylo zmíněno, je přirozené stárnutí. Vlivem působení klimatických podmínek a nadměrnému zatěžování vozovky v čase dochází zejména ke vzniku prasklin [8].

#### Vliv na spektrální odraznost:

Z výše uvedených informací vyplývá, že na samotnou spektrální odraznost asfaltu má vliv nejen samotné stárnutí vozovky, kdy se mění její fyzikální a chemické vlastnosti. Ale také vznik různých konstrukčních problémů jako jsou praskliny, ale i např. oprava prasklin a tzv. „záplatování“ silnice dále ovlivňuje spektrální odraznost povrchu. Proto není možné pro všechny typy asfaltových komunikací, bez ohledu na stáří a stav komunikace, uvažovat stejnou spektrální odraznost.

### **2.3.2 Spektrální charakteristiky asfaltových vozovek**

V následujícím obrázku (Obr. 8) jsou vyobrazeny vzorky asfaltových komunikací v závislosti na stáří a opotřebení, včetně strukturálních poškození. Pro popis stavu vozovky se používají dva základní ukazatele charakterizující stav vozovky:

- PCI – **Pavement Condition Index** – index stavu vozovky
- SI – **Structure Index** – index struktury vozovky

Tyto ukazatele jsou založeny na parametrech jako popraskání, „vyježděnost“ vozovky apod. Oba ukazatele se udávají ve stupnici 0-100, kde 100 charakterizuje ideální stav vozovky [10].

Co se týče samotného Obr. 8, vyobrazuje čtyři grafy spektrální odrazivosti asfaltu ve spektru viditelného světla A, B, C a D. Samotné grafy porovnávají spektrální odraznost vozovek z několika hledisek, jako: stáří, konstrukční vady, opravy apod.

#### Graf A:

Zobrazuje tři spektrální vzorky A, B, C. Všechny tyto vzorky jsou tvořeny z čistého silničního asfaltu bez zjevných konstrukčních poškození, prasklin apod. Jednotlivé vzorky se liší zejména svým stářím. Čímž je ovlivněn jejich index stavu vozovky (PCI) a index struktury (SI), tyto indexy jsou uvedeny ve fotkách daných vzorků. Spektrum A reprezentuje nově položenou asfaltovou vozovku, spektrum B vozovku starou 3 roky a spektrum D vozovku starou 10 let. Jak je patrné z grafů, nejnižší spektrální odraznost

má nově položená vozovka. Dále je patrně, že se stářím vozovky se zároveň zvyšuje její spektrální odraznost [11].

#### Graf B:

Zobrazuje tři spektrální vzorky starších komunikací C, D, E a vliv strukturálního poškození (prasklin) asfaltové vozovky, na spektrální odraznost dané vozovky. Kde vzorek C je 10 let starý povrch vozovky bez viditelného poškození. Naopak u vzorků D, E, jak je patrné z obrázku, se vyskytuje velké množství prasklin vlivem stárnutí vozovky. Všechny tyto konstrukční poškození ovlivňují výsledné spektrální vlastnosti vozovky. Konkrétně s rostoucím poškozením vozovky klesá její spektrální odraznost [11].

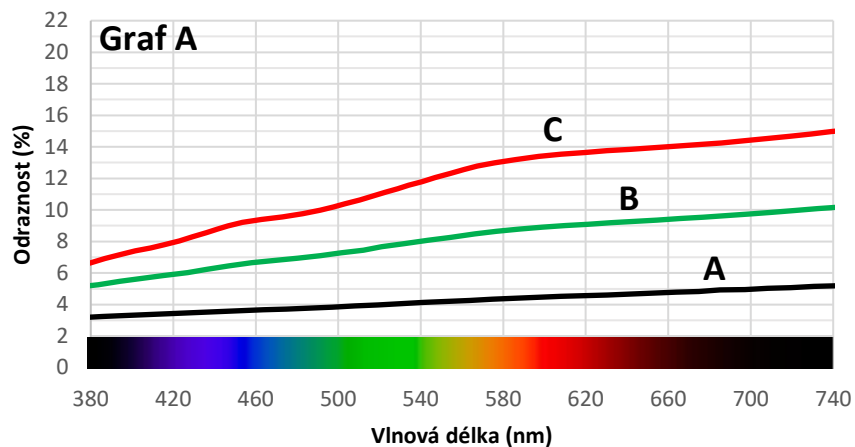
#### Graf C:

Graf C porovnává spektra vzorků z hlediska poškození vlivem drolení/rozpadu povrchu vozovky. Vlivem drolení vozovky dochází k uvolňování jednotlivých částic, ze kterých je vozovka tvořena. Vzniká tedy směs částic (šterk) na povrchu vozovky. Spektrum F je referenční vzorek staré vozovky. Spektrum G zobrazuje vozovku s rozpadem/drolením povrchu a spektrum H zobrazuje spektrum vozovky s velkým drolením povrchu, což má za následek pokrytí jemným kamenivem (šterkem). Vzhledem k tomu že produkty drolení obsahují velké množství kameniva a šterku, čímž dochází k větší spektrální odraznosti vlivem přítomnosti reflexních minerálů obsažených v kamenivu [11].

#### Graf D:

Graf D zobrazuje 4 spektrální vzorky, které porovnávají vliv různých metod oprav asfaltových povrchů na jejich spektrální odraznost v porovnání se spektrem C (10 let stará vozovka bez strukturálního poškození). Spektrum I zobrazuje spektrum asfaltové emulze používané k opravě prasklin vozovky. Asfaltová emulze se vyznačuje nízkou a téměř konstantní spektrální odrazností. Spektrum J zobrazuje asfaltové záplaty, ty se vyznačují obdobným spektrem jako nová vozovka. A spektrum K zobrazuje opravu asfaltové silnice pomocí emulze a jemného kameniva. Použitím této metody dojde k výraznému navýšení odraznosti dané vozovky [11].

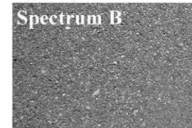
Ze všech dostupných grafů z Obr. 8 je patrné, že u asfaltových vozovek dochází v oblasti viditelného spektra k nejmenší odraznosti v oblasti malých vlnových délek (fialová barva světla) naopak směrem k vyšším vlnovým délkám dochází k nárůstu spektrální odraznosti téměř lineárně).



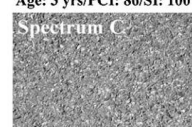
Spectrum A



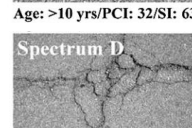
Age: <1 yr/PCI: 99/SI: 100



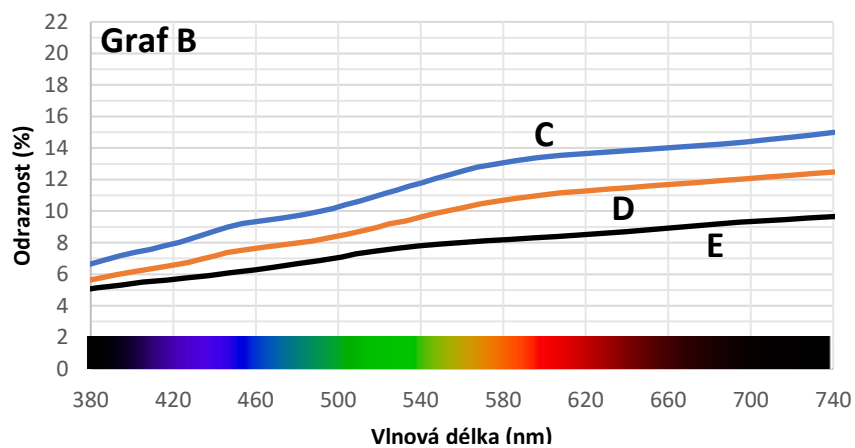
Spectrum B



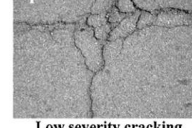
Age: 3 yrs/PCI: 86/SI: 100



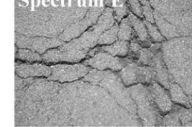
Age: >10 yrs/PCI: 32/SI: 63



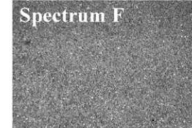
Spectrum D



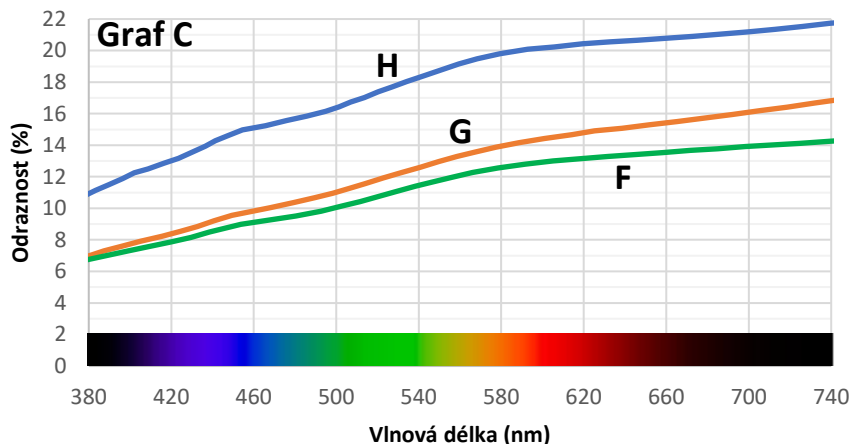
Low severity cracking



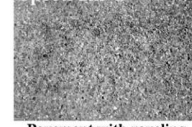
High severity cracking



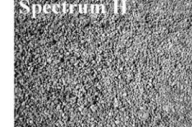
Normal pavement



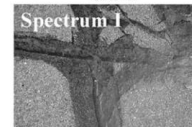
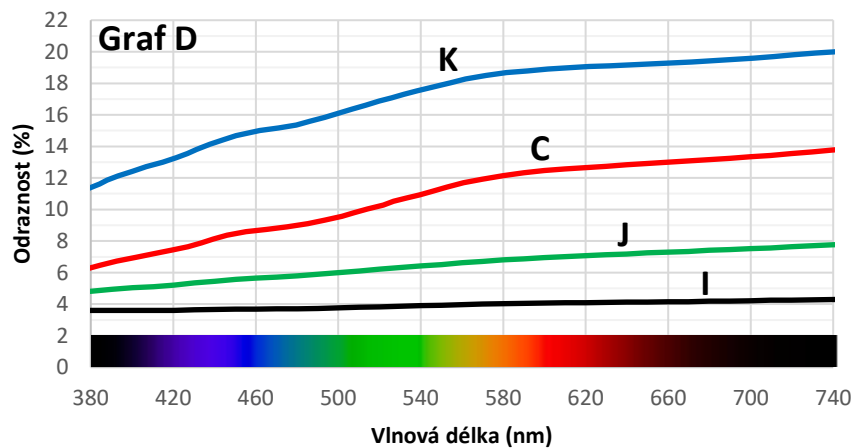
Spectrum F



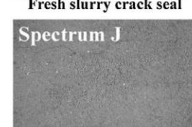
Pavement with raveling



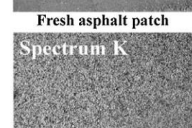
Gravel



Fresh slurry crack seal



Fresh asphalt patch



Chip seal (3 yrs old)

Obr. 8 Spektrální odraznosti vzorků asfaltových povrchů [11]

### **3. NORMATIVNÍ POŽADAVKY NA OSVĚTLOVÁNÍ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ**

V následující kapitole je stručně popsána metodika hodnocení osvětlování pozemních komunikací na základně normativních požadavků daného státu, v tomto případě České republiky. Tuto problematiku podrobně popisují následující normy, z kterých je vycházeno při zpracování této kapitoly:

- ČSN 13201-1, ČSN 13201-2, ČSN 13201-3, ČSN 13201-4 a ČSN 13201-5.

Normativní požadavky na osvětlování pozemních komunikací souvisí zejména s rozdělením jednotlivých pozemních komunikací do jednotlivých tříd osvětlení. Kde každá třída osvětlení vychází z konkrétních fotometrických požadavků pro dané typy pozemních komunikací a prostředí [14].

Jakým způsobem a na základě jakých kritérií se rozdělují jednotlivé pozemní komunikace do tříd osvětlení je demonstrováno na výběru třídy osvětlení pro motorovou dopravu (M) v kapitole 3.1. Bližší informace o výběru dalších tříd osvětlení využívaných v oblastech pro chodce, cyklisty apod. je uveden detailně v normě ČSN 13201-1.

#### **3.1 Výběr třídy osvětlení pro motorovou dopravu (M)**

Třídy osvětlení M jsou určeny pro řidiče motorových vozidel na dopravních pozemních komunikacích. Použití těchto tříd závisí na geometrii vozovky a na dopravních a časových okolnostech. Konkrétní třída osvětlení se volí na základě funkce pozemní komunikace, návrhové rychlosti, geometrického uspořádání komunikace, intenzity dopravy, skladby dopravního proudu a vzhledu okolního prostředí.

Pro stanovení třídy osvětlení M je nutné nejprve stanovit součet váhových hodnot ( $V_{WS}$ ) jednotlivých parametrů ( $V_W$ ). Číslo třídy osvětlení M je poté určeno vztahem:

$$M = 6 - V_{WS} \quad (3.1)$$

Na základě výběru odpovídajících váhových hodnot v Tab. 1 se určí číslo třídy osvětlení v intervalu od 1 do 6. Pokud je součet váhových hodnot  $V_{WS} < 0$ , použije se hodnota  $V_{WS} = 0$ . Pokud je výsledné číslo třídy osvětlení  $M \leq 0$ , použije se třída osvětlení M1. [13]

Tab. 1 Parametry pro výběr třídy osvětlení M [13]

Parametr	Možnosti	Popis		Váhová hodnota $V_w^a$
Návrhová rychlost nebo dovolená rychlost	Velmi vysoká	$v \geq 100$ km/h		2
	Vysoká	$70 < v < 100$ km/h		1
	Střední	$40 < v \leq 70$ km/h		-1
	Nízká	$v \leq 40$ km/h		-2
Intenzita dopravy		Dálnice, vícepruhové pozemní komunikace	Dvoupruhové pozemní komunikace	
	Vysoká	> 65 % maximální kapacity	> 45 % maximální kapacity	1
	Střední	35 % – 65 % maximální kapacity	15 % – 45 % maximální kapacity	0
	Nízká	< 35 % maximální kapacity	< 15 % maximální kapacity	-1
Skladba dopravního proudu	Smíšená s vysokým podílem nemotorové dopravy			2
	Smíšená			1
	Pouze motorová			0
Směrově rozdělená komunikace	Ne			1
	Ano			0
Hustota křižovatek		Úrovně křižovatky (počet/km)	Mimoúrovňové křižovatky, vzdálenost mezi mosty (km)	
	Vysoká	> 3	< 3	1
	Střední	$\leq 3$	$\geq 3$	0
Parkující vozidla	Vyskytují se			1
	Nevyskytují se			0
Jasnost okolí	Vysoká	Výlohy, reklamní plochy, sportoviště, nádražní a skladové areály		1
	Střední	Běžná situace		0
	Nízká			-1
Náročnost navigace	Vysoká			2
	Střední			1
	Nízká			0
<sup>a</sup> Hodnoty uvedené ve sloupci jsou příklady. Na národní úrovni lze postup výběru přizpůsobit nebo použít vhodnějších váhových hodnot.				

## 3.2 Třídy osvětlení

Třídy osvětlení popisují zejména minimální hodnoty fotometrických veličin dané pozemní komunikace. Hlavní kritéria pro hodnocení tříd osvětlení jsou založena zejména na měření jasu povrchu jízdního pásu pozemní komunikace. Každá třída obsahuje hodnoty minimální hodnoty průměrného jasu, celkové rovnoměrnosti a podélné rovnoměrnosti pro suchý povrch pozemní komunikace. Další kritéria, která jsou sledována, souvisí především s oslněním a jsou sledována u komunikací, kde to má opodstatnění [14].

Rozdělení komunikací do správných tříd osvětlení je velice důležité zejména pro správný návrh osvětlovací soustavy. V případě nedodržení tříd osvětlení mohou vznikat nedostatečně osvětlená místa komunikace, případně místa s velkými rozdíly osvětlení, která působí rušivým dojmem a způsobují oslnění. To může mít negativní dopad jak na chodce, tak zejména na bezpečnost účastníků silničního provozu. Dalším hlediskem je i ekonomická a technická stránka věci. Například při příliš velkém naddimenzování osvětlovací soustavy dochází k instalaci zbytečně moc výkonných svítidel, která jsou principiálně dražší, což vede ke zvýšení spotřeby elektrické energie, tedy navýšení provozních nákladů.

### 3.2.1 Třídy osvětlení M

Jak již bylo zmíněno v předcházející kapitole, třídy osvětlení M jsou určeny pro řidiče motorových vozidel. Volba konkrétní třídy je popsána v kapitole 3.1. V Tab. 2 jsou uvedeny minimální hodnoty průměrného jasu vozovky, celkové rovnoměrnosti jasu apod. pro suchý a mokрый povrch jízdního pásu pozemní komunikace [14].

Tab. 2 Třídy osvětlení M [14]

Třída	Jas suchého a mokrého povrchu jízdního pásu pozemní komunikace				Omezující oslnění	Osvětlení okolí
	Suchý povrch		Mokрый povrch		Suchý povrch	Suchý povrch
	$\bar{L}$ ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) (minimální udržovaná hodnota)	$U_0$ (-) (minimální hodnota)	$U_I$ (-) (minimální hodnota)	$U_{ow}$ (-) (minimální hodnota)	$f_{TI}$ (%) (maximální hodnota)	$R_{EI}$ (-) (minimální hodnota)
M1	2,00	0,40	0,70	0,15	10	0,35
M2	1,50	0,40	0,70	0,15	10	0,35
M3	1,00	0,40	0,60	0,15	15	0,30
M4	0,75	0,40	0,60	0,15	15	0,30
M5	0,50	0,35	0,40	0,15	15	0,30
M6	0,30	0,35	0,40	0,15	20	0,30

### 3.2.2 Třídy osvětlení C

Třídy osvětlení C uvedené v Tab. 3 jsou určeny pro řidiče motorových vozidel a další uživatele pozemní komunikace v konfliktních oblastech, jako jsou obchodní třídy, složité křižovatky, okružní křižovatky. Dále je možné třídy osvětlení C použít v oblastech používaných chodci a cyklisty, jako např. podchody, podjezdy. Třída osvětlení C sleduje vodorovnou osvětlenost, konkrétně průměrnou osvětlenost ( $\bar{E}$ ) a celkovou rovnoměrnost osvětlenosti ( $U_0$ ). Návod pro výběr jednotlivé třídy C0-C5 je uveden v normě ČSN 13201-1 [14].

Tab. 3 Třídy osvětlení C [14]

Třída	Vodorovná osvětlenost	
	$\bar{E}$ (lx) (minimální udržovaná hodnota)	$U_0$ (-) (minimální hodnota)
C0	50,0	0,40
C1	30,0	0,40
C2	20,0	0,40
C3	15,0	0,40
C4	10,0	0,40
C5	7,5	0,40

### 3.2.3 Třídy osvětlení P

Třídy osvětlení P jsou určeny pro chodce a cyklisty pohybující se po chodnicích, cyklistických stezkách, zpevněných krajnicích a ostatní oblastech pozemních komunikací, a pro pozemní komunikace v obytných oblastech, pěší zóny, parkovací plochy, školní dvory apod. Opět pro konkrétní výběr třídy P1-P7 je uveden podrobný návod v normě ČSN 13201-1.

U této třídy není sledována jen průměrná osvětlenost ( $\bar{E}$ ) a minimální osvětlenost ( $E_{\min}$ ) ale také doplňující parametry a to: minimální svislá osvětlenost ( $E_{v,\min}$ ) a minimální poloválcová osvětlenost ( $E_{sc,\min}$ ). Sledování svislé osvětlenosti a poloválcové osvětlenosti je zejména z důvodu zajistit dobrou viditelnost svislých ploch, lepší rozlišení obličejů a zvýšení pocitu bezpečí v oblastech určených chodcům. Srovnávací rovina pro vyhodnocení poloválcové osvětlenosti  $E_{sc,\min}$  je ve výšce 1,5 m nad povrchem oblasti pozemní komunikace [14].

Tab. 4 Třídy osvětlení P [14]

Třída	Vodorovná osvětlenost		Doplňující parametry při požadavku na rozpoznání obličeje	
	$\bar{E}$ (lx) (minimální udržovaná hodnota)	$E_{\min}$ (lx) (udržovaná hodnota)	$E_{v,\min}$ (lx) (udržovaná hodnota)	$E_{sc,\min}$ (lx) (udržovaná hodnota)
P1	15,0	3,00	5,0	5,0
P2	10,0	2,00	3,0	2,0
P3	7,50	1,50	2,5	1,5
P4	5,00	1,00	1,5	1,0
P5	3,00	0,60	1,0	0,6
P6	2,00	0,40	0,6	0,2
P7	neurčeno	neurčeno		

## 4. MĚŘENÍ FOTOMETRICKÝCH PARAMETRŮ VOZOVEK

Následující kapitola popisuje měřicí metody a přístroje, kterými se ověřuje splnění podmínek osvětlenosti pozemních komunikací dle platných norem. Při návrhu osvětlení pozemních komunikací se sledují zejména tři nejdůležitější veličiny a to: osvětlenost, index oslnění a index podání barev [17]. V diplomové práci je prostor věnován pouze jedné z těchto veličin a to osvětlenosti. Vzhledem k tomu, že cílem práce je ověřit možnost měření osvětlenosti vozovky nepřímou metodou, pomocí měření jasu spektrálním analyzátozem a následným přepočtem, jsou rozebrány také metody měření jasu, jednotlivé měřicí přístroje a normativní požadavky na samotné měření, ze kterých se v práci vychází.

### 4.1 Měření jasu vozovky

V minulosti se pro měření jasu využívalo zejména metody založené na měření kolmé svítivosti přesně ohraničené a změřené plošky. Na rozptýlném povrchu se vymezila konkrétní plocha a změřila se její svítivost ze vzdálenosti asi 300 až 500 mm. Tuto metodu v dnešní době nahradili pokročilejší a efektivnější metody měření jasu využívající vizuálních nebo fyzikálních jasoměru, případně pokročilé přístroje – tzv. jasové analyzátory [1].

#### 4.1.1 Jasoměry

Jasoměry se principiálně dělí na dvě základní skupiny. A to na jasoměry vizuální a fyzikální. U vizuálních jasoměru se využívá subjektivní metody, při které se jako indikátor využívá zrak pozorovatele. Naopak u fyzikálních jasoměru se využívá objektivního měření, při kterém se měří pomocí fyzikálními čidly [1].

##### Vizuální jasoměry

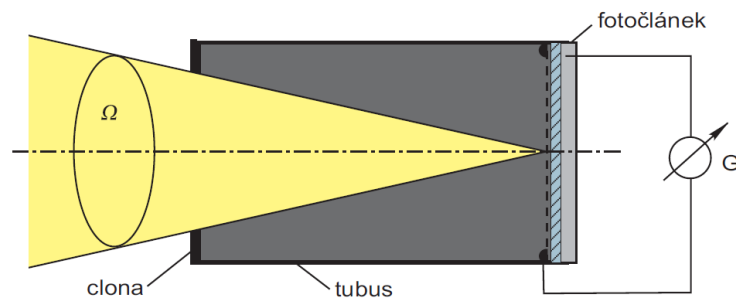
Princip vizuálního jasoměru vychází z porovnávání měřeného (neznámého) jasu s jasmem uměle vytvořeným (známým) vlastním zdrojem instalovaných v přístroji. Vizuálním jasoměrem lze dosáhnout poměrně velké přesnosti měření, ale je třeba aby pozorovatele byli zkušení a zapracovaní. Jelikož přesnost měření je do značné míry ovlivněna osobou provádějící měření, respektive výsledky subjektivního měření nezávisí pouze na přesnosti samotného měřicího přístroje, ale i na individuálních vlastnostech zraku různých pozorovatelů a změnách těchto vlastností v závislosti na podmínkách pozorování a různých subjektivních faktorech. Z těchto důvodů se mnohem častěji využívá fyzikálních měřicích přístrojů, tj. přesných objektivních přístrojů vybavených kvalitními fotoelektrickými články [1].

### Fyzikální jasoměry

Jak již bylo řečeno, fyzikální (objektivní) jasoměr využívá pro měření kvalitního fotoelektrického článku, čímž se eliminují subjektivní faktory, tj. individuální vlastnosti zraku jednotlivých pozorovatelů. Co se týče samotného přístroje, ten je nejčastěji tvořen tubusem, který je opatřený clonkou s kruhovým otvorem, ta vymezuje prostorový úhel, v němž dopadají paprsky z měřené plochy na přijímač. Samotný přijímač je tvořen fotočlánkem. Základní princip objektivního jasoměru je znázorněn na obrázku Obr. 9. Střední jas plochy  $L$  ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) vymezené prostorovým úhlem  $\Omega$  na sledovaném povrchu se určí dle vztahu:

$$L = \frac{E_N}{\Omega} \quad (4.1)$$

Kde  $\Omega$  (sr) je prostorový úhel vymežující plochu na sledovaném povrchu.  $E_N$  (lx) je změřená normálová osvětlenost fotočlánkem.



Obr. 9 Princip fyzikálního (objektivního) jasoměru [12]

Měřením pomocí jasoměru se zjišťuje střední hodnota jasu měřené plochy, kterou vymezuje optika přístroje. Z toho důvodu je velmi důležité, aby měřená plocha zahrnovala pouze povrch, jehož jas měříme. Okolí měřené plochy pozorujeme v okuláru přístroje a nejčastěji bývá vyznačen kroužkem [1].

#### 4.1.2 Jasové analyzátory

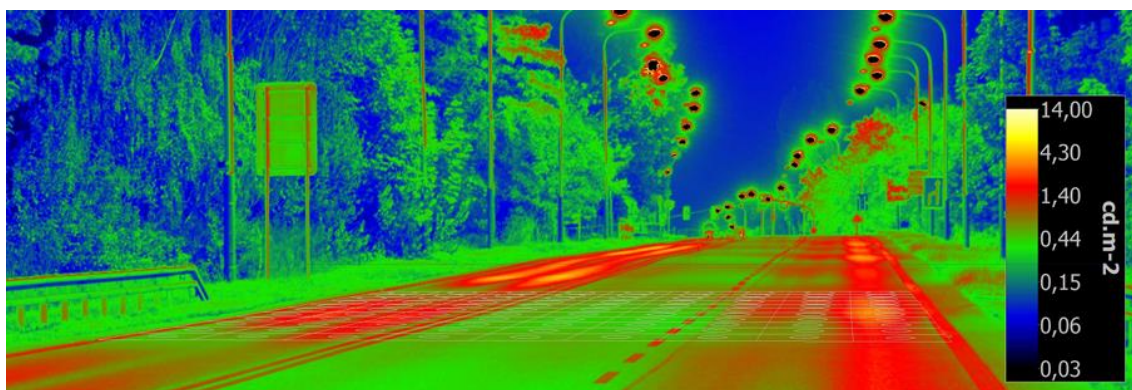
Jasový analyzátor je měřicí přístroj, který umožňuje plošné měření a následné analyzování rozložení jasu na osvětlovaných plochách. Prakticky se jedná o speciální digitální fotoaparát, jehož spektrální citlivost je přizpůsobena (nejčastěji softwarově) citlivosti lidského oka  $V(\lambda)$  normálního fotometrického pozorovatele (viz 2.1.1).

Snímače dnešním moderních digitální fotoaparáty obsahují desítky milionů světlocitlivých buněk – pixelů, ty se dále skládají z ještě menších buněk – subpixelů. Každý tento subpixel má svou specifickou spektrální citlivost, a tudíž je schopen rozlišit barevný vjem dopadajícího světla. Díky tomu je možné z jednoho jediného snímku rozlišovat tisíce úrovní jasu. Navíc díky velmi kvalitní optice fotoaparátu lze zaznamenat detaily, které lidské oko již nerozliší [17],[18].

Pro stanovení jasu z konkrétní fotografie je ovšem nutné, aby daný fotoaparát byl vhodně zkalibrován. Je totiž nutné získat citlivostní funkce, které přesně popisují, jaká je odezva signálu jednotlivých buněk na dopadající světlo. Díky tomu je možné zpětně ze změřeného signálu vypočítat původní jas plochy, kterou zachytil konkrétní pixel. Z toho vyplývá, že pro stanovení hodnot jasů z pořízené fotografie je nutné použít patřičných softwarových nástrojů, které dokážou uložená data z digitálního fotoaparátu dekodovat a reprodukovat do podobny hodnot jasů, místo do podoby obrazu [17],[18].

Výsledkem běžného měření pomocí jasového analyzátoru je tzv. jasová mapa viz Obr. 10. Jedná se o plošné vyjádření hodnot jasů pomocí definované barevné škály (palety). Z výsledné jasové mapy je pak možné snadno odečítat konkrétní hodnoty jasů jednotlivých změřených bodů a oblastí [17],[18].

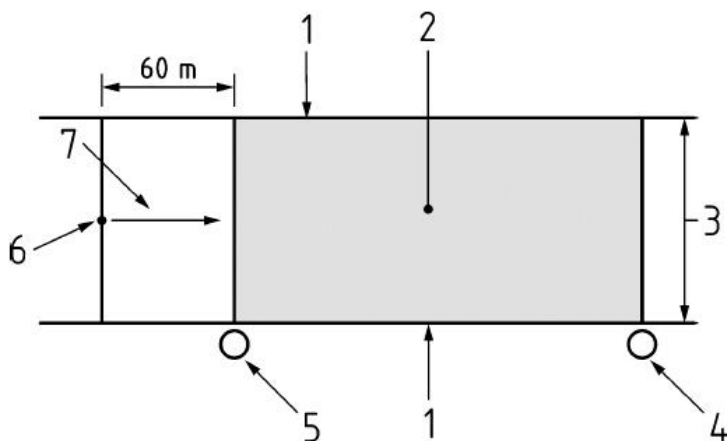
Obrovskou výhodou měření s jasovým analyzátozem je zejména rychlost samotného měření a uložení naměřených dat, které se následně zpracovávají s libovolným časovým odstupem ve vhodném softwarovém prostředí. Navíc díky pořízení digitální fotografie měřené lokality je samotným měřením zaznamenáno přesné místo měření, respektive pozice pozorovatele. Je tedy mnohem jednodušší zpětně určit přesné místo, kde došlo k měření [17],[18].



Obr. 10 Ukázka výstupu z jasového analyzátoru při měření jasů vozovky [19]

### 4.1.3 Výběr měřené oblasti vozovky

Před samotnou realizací měření jasu vozovky je nutné vybrat vhodnou měřenou oblast. Měřenou oblastí se rozumí část vozovky obsahující dvě svítidla ve stejném směru viz Obr. 11. Pokud je osvětlení vozovky realizováno více než jednou řadou svítidel a zároveň se liší rozestupy jednotlivých svítidel je nutné zvolit oblast měření takovou, kde je mezi svítidly největší rozstup. Vzhledem k rozdílnému rozestupu mezi svítidly nebudou tato měřená data přesná pro celou instalaci. Ale jelikož při kontrole osvětlení vozovky nás zajímá, jestli daná vozovka splňuje minimální hodnoty osvětlení a jasu dle normy, tak vybráním svítidel s největším rozstupem změříme nejhůře osvětlenou část vozovky. Pokud tato nejhůře osvětlená část vozovky splňuje minimální hodnoty osvětlení a jasu dle patřičné třídy osvětlenosti (viz kapitola 3.2), tak lze předpokládat, že zbývající úseky měřené vozovky rovněž splňují minimální hodnoty osvětlenosti a jasu. Tento předpoklad platí, pokud na celém úseku vozovky jsou používána svítidla stejného typu a výkonu [15].



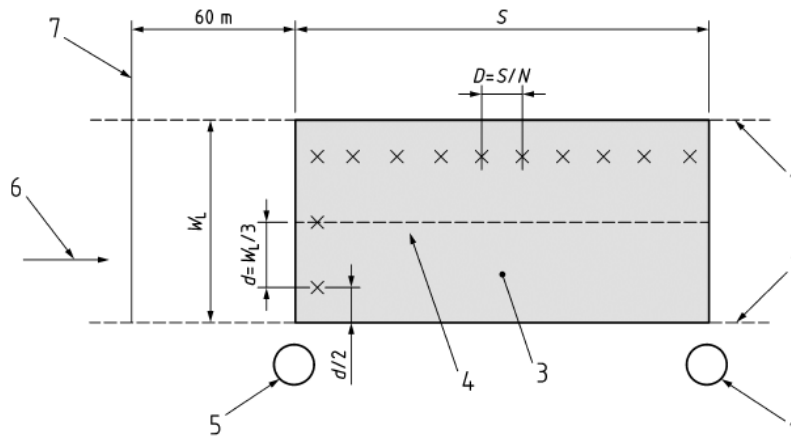
Obr. 11 Měřicí oblast pro měření jasu a osvětlenosti [15]

Kde:

- |   |                                      |   |                                   |
|---|--------------------------------------|---|-----------------------------------|
| 1 | okraj měřené oblasti,                | 5 | první svítidlo v oblasti výpočtu, |
| 2 | oblast výpočtu,                      | 6 | pozorovatel,                      |
| 3 | šířka příslušné oblasti $W_r$ ,      | 7 | směr pozorování,                  |
| 4 | poslední svítidlo v oblasti výpočtu. |   |                                   |

#### 4.1.4 Rozložení měřicích bodů

Konkrétní rozmístění měřicích bodů je znázorněno na Obr. 12. Měřicí body musí být rovnoměrně rozmístěny v měřené ploše, jak udává norma ČSN EN 13201-3.



Obr. 12 Rozložení měřicích bodů pro měření jasu jízdniho pruhu vozovky [15]

Kde:

- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| 1 – okraj jízdniho pruhu,             | 5 – první svítidlo v poli výpočtu,                      |
| 2 – poslední svítidlo v poli výpočtu, | 6 – směr pozorování,                                    |
| 3 – pole (plocha) výpočtu,            | 7 – podélná osa pozorovatele,                           |
| 4 – osa jízdniho pruhu,               | X – označuje měřicí body v podélném<br>a příčném směru. |

Vzdálenost měřicích bodů v podélném směru  $D$  (m) se stanoví:

$$D = \frac{S}{N} \quad (4.2)$$

Kde  $S$  (m) je podélná vzdálenost mezi svítidly ve stejné řadě,  $N$  (-) je počet měřicích bodů v podélném směru, nabývá následujících hodnot:

- Pro  $S < 30$  m,  $N = 10$ ;
- Pro  $S > 30$  m,  $N$  se stanoví jako nejmenší celé číslo splňující podmínku  $D \leq 3$  m. První příčný řádek výpočtových bodů je umístěn ve vzdálenosti  $D/2$  za prvním svítidlem (vzdálenost od pozorovatele).

Vzdálenost měřicích bodů v příčném směru  $d$  (m) se stanoví:

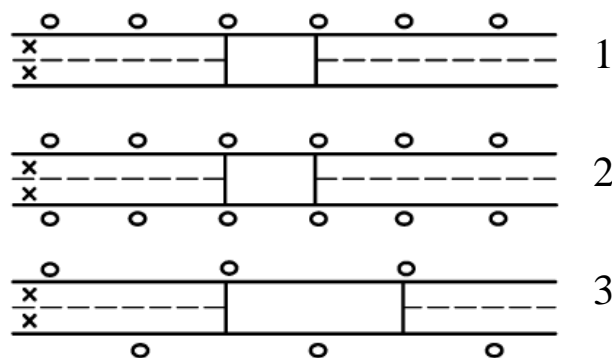
$$d = \frac{W_L}{3} \quad (4.3)$$

Kde  $W_L$  (m) je šířka pruhu vozovky.

V případě výpočtu jasu současně s osvětleností stejné části vozovky je nutné použití stejných měřicích bodů pro obě metody [15].

#### 4.1.5 Umístění pozorovatele

Při měření jasu je oko pozorovatele umístěno do výšky 1,5 m nad úrovní vozovky a zároveň je pozorovatel umístěn v podélné vzdálenosti 60 m od hranice výpočtové oblasti v podélné ose jízdního pruhu komunikace. V případě měření komunikace s více jízdními pruhy je pozorovatel umístěn v ose každého jízdního pruhu viz Obr. 13 [15].



Obr. 13 Příklady umístění pozorovatele vzhledem k oblasti výpočtu [15]

Kde:

- 1 – dvouproudová silnice s uspořádáním svítidel na jedné straně vozovky,
- 2 – dvouproudová silnice s uspořádáním svítidel na obou stranách vozovky symetricky,
- 3 – dvouproudová silnice s uspořádáním svítidel na obou stranách vozovky nesymetricky,
- x – umístění pozorovatele,
- – výpočtové pole.

## 4.2 Měření osvětlenosti vozovky

Měření osvětlenosti se obecně řadí mezi nejčastěji realizované měření ve fotometrii ať už v laboratořích, tak v běžné praxi. Významnou roli v praktických měřeních zastupuje právě měření osvětlenosti vozovky, kde se měřením rozložení hladin osvětlenosti objektivně ověřuje, zda jsou v dané osvětlovací soustavě dodrženy základní požadavky na úroveň a rovnoměrnost hladiny osvětlenosti dle požadavků norem [1].

### 4.2.1 Podmínky měření

Pro měření osvětlenosti vozovky je nutné měřit za suchého počasí, bez sněhové pokrývky a pokud možno za čistého ovzduší. Dále je nutné veškeré rušivé světlo (např. světlo výkladních skříní), které by mohlo výsledné měření, vyloučit vhodným zastíněním fotočlánku [1].

### 4.2.2 Požadavky na měřicí systémy

V případě měření horizontální osvětlenosti je nutné, aby fotočlánek fotometrické hlavy byl vodorovně s měřeným povrchem, v tomto případě vozovkou. Toho lze docílit

například křížovým (tzv. kardanovým kloubem). Dále pro optimální měření je nutné, aby byl fotočlánek umístěn přímo v úrovni měřené vozovky. Čehož ovšem nelze ve skutečnosti dosáhnout vzhledem k samotné tloušťce detektoru. Proto je nutné stanovit výšku roviny ve které je prováděno měření. Tuto výšku je nutné uvést do výsledného protokolu měření. Norma udává maximální výšku vodorovné roviny, ve které je realizováno měření: 20 cm nad měřeným povrchem [1],[16].

Pro minimalizaci chyb měření způsobených zastíněním fotočlánek osobou, provádějící měření, je vhodné, aby byl luxmetr vybaven stíněným kabelem dostatečné délky, jenž spojuje fotočlánek v pouzdře s vlastním měřícím přístrojem. Délka stíněného kabelu musí být taková, aby bylo možno realizovat odečítání naměřených hodnot v takové vzdálenosti, aby nedocházelo k zastínění dopadajícího světla na fotočlánek. Druhou možností je použít luxmetr vybavený dálkově ovládanou funkcí fixace naměřené hodnoty. Čímž se také vyhneme problémům ovlivňování měření osobou odečítající výsledky [1],[16].

Před realizací samotného měření je nutné nechat luxmetr, respektive fotočlánek, po dobu 5 až 15 minut ponechat odkryté ve světelném prostředí, v něm se bude měřit, aby se čidla přizpůsobila daným podmínkám a stabilizovala se [1].

### 4.2.3 Luxmetry

Luxmetry (Obr. 9) jsou nejpoužívanější přístroje pro měření osvětlenosti. Skládají se z přijímače s korigovaným, nejčastěji křemíkovým fotoelektrickým článkem, jenž je opatřen kosinovým nástavcem, a z měřícího a vyhodnocovacího systému s digitálním nebo analogovým indikátorem [1].



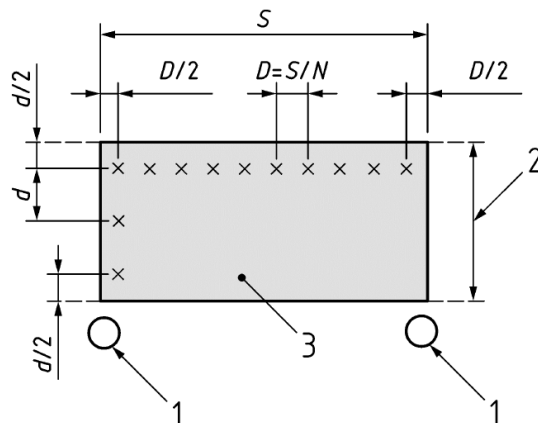
Obr. 14 Ilustrativní příklad luxmetru (VOLTCRAFT MS-1300) [20]

### 4.2.4 Výběr měřené oblasti vozovky

V případě měření osvětlenosti vozovky se volí stejná měřená oblast, jak je popsáno u měření jasu vozovky v kapitole 4.1.3.

#### 4.2.5 Rozložení měřicích bodů

I pro měření osvětlenosti platí, že měřicí body musí být rovnoměrně rozmístěné v měřené oblasti dle ČSN 13201-3 viz Obr. 15.



Obr. 15 Rozložení měřicích bodů pro měření osvětlenosti jízdního pruhu vozovky [15]

Kde:

- 1 svítidlo,
- 2 šířka příslušné oblasti  $W_r$ ,
- 3 měřicí oblast,
- x označení měřicích bodů v příčném a podélném směru.

Vzdálenost měřicích bodů v podélném směru  $D$  (m) se stanoví:

$$D = \frac{S}{N} \quad (4.4)$$

Kde  $S$  (m) je podélná vzdálenost mezi svítidly ve stejné řadě,  $N$  (-) je počet měřicích bodů v podélném směru, nabývá následujících hodnot:

- Pro  $S \leq 30$  m,  $N = 10$ ;
- Pro  $S > 30$  m,  $N$  se stanoví jako nejmenší celé číslo splňující podmínku  $D \leq 3$  m.

První řada výpočtových bodů je rozložena ve vzdálenosti  $D/2$  (m) za prvním svítidlem.

Rozložení měřicích bodů v příčném směru:

$$d = \frac{W_r}{n} \quad (4.5)$$

Kde:

- $d$  je vzdálenost mezi měřicími body v příčném směru (m),
- $W_r$  je šířka vozovky nebo příslušné oblasti (m),
- $n$  je počet bodů v příčném směru s hodnotou  $n \geq 3$  a zároveň je to nejmenší celé číslo splňující podmínku  $d \leq 1,5$  m [15].

## 5. PRAKTICKÁ ČÁST - LABORATORNÍ MĚŘENÍ

Praktická část diplomové práce se věnuje realizaci samotného měření osvětlenosti pomocí jasového analyzátoru LDA. V první řadě je provedena řada laboratorních měření sloužící k ověření realizovatelnosti metody v laboratorních podmínkách a stanovení přesného postupu měření pro následné terénní měření.

Cílem laboratorního měření je výroba a proměření měřicích vzorků, které budou při terénním měření využívány. Dále je nutné stanovit způsob měření, úhel, respektive výšku a vzdálenost kterou se budou zkoumané komunikace měřit, aby byla dosažena uspokojivá přesnost měření.

### 5.1 Vytvoření laboratorních vzorků pro měření

Vzhledem k tomu, že měření osvětlenosti pomocí jasového analyzátoru vychází z využití vzorce (2.13), je nutné znát odraznost měřeného povrchu. Jelikož odraznost asfaltu není pro všechny vozovky stejná, a navíc se mění, ať už se stárím vozovky, konstrukčními vadami, prasklinami, tak i se složením samotné asfaltové směsi (viz kapitola 2.3.1). Dále významným způsobem do samotného měření vstupuje směrová odraznost samotného asfaltu. Proto je nutné pro realizaci měření použít měřicí vzorky s přesně definovanou hodnotou spektrální odraznosti, která se bude co nejvíce blížit ideálně rozptylnému odrazu (tzv. Lambertovu zářiči). Na těchto vzorcích již bude teoreticky možné, použít pro výpočet osvětlenosti vzorec (2.13), s dostatečnou přesností.

Jako vzorky byly vybrány kolečka o průměru 19 cm vyrobené z Albondu, tloušťky 3mm (Obr. 17). Tyto vzorky byly nastříkány interiérovým nátěrem Primalex POLAR, který díky vysokému podílu síranu barnatého  $\text{BaSO}_4$ , v koncentraci min. 92 % (udáváno výrobcem) dosahuje vysokého stupně odraznosti. Jelikož čistý síran barnatý dosahuje odraznosti v rozmezí 96-98 % lze předpokládat, že výsledné vzorky natřené Primalexem POLAR (Obr. 16) budou dosahovat odraznosti kolem 90 %.

Pro samotný nástřik vzorků byl použit obyčejný ruční tlakový postřikovač na kytky, kterým se aplikoval naředěný vodní roztok (v poměru cca 1:2 voda/Primalex) Primalex POLAR na jednotlivé vzorky v jedné vrstvě. Jelikož se naněsla dostatečně silná vrstva barvy již v první aplikační vrstvě, která na pohled dosahovala dostatečně vysoké kryvosti a uniformity, nebyla nanášena další aplikační vrstva barvy.



Obr. 16 Použitá barva pro nástřik vzorků [21]



Obr. 17 Měřicí vzorek opatřený nátěrem

## 5.2 Měření spektrální odraznosti měřicích vzorků

Pro účely měření bylo vyhotoveno a nastříkáno celkem 28 vzorků. U všech těchto vzorků bylo provedeno měření spektrální odraznosti pomocí spektrofotometru Konica-Minolta CM-3600D (Obr. 18).



Obr. 18 spektrofotometr Konica-Minolta CM-3600 D [22]

U vzorků se předpokládala rovnoměrnost nátěru, a proto byly proměřeny pouze tak, že do měřicího otvoru spektrofotometru byl přiložen vzorek středem a byla změřena jeho průměrná odraznost. Pro měření byl použit měřicí otvor o průměru 3 cm.

Tímto způsobem bylo proměřeno všech 28 vzorků ze kterých bylo vybráno 25 vzorků s nejvyšší odrazností, které budou použity pro další měření. Dále byla u všech vzorků vypočítaná průměrná spektrální odraznost váhovaná podle citlivosti jasového analyzátoru LDA  $V(\lambda)$  (dále už jen váhovaná spektrální odraznost), na tuto citlivost je jasový analyzátor přizpůsoben (viz Obr. 19), podle vzorce:

$$\rho_{\text{váhovaná}} = \frac{\sum_{380 \text{ nm}}^{740 \text{ nm}} V(\lambda) \cdot \rho_{\text{vzorek}}(\lambda)}{\sum_{380 \text{ nm}}^{740 \text{ nm}} V(\lambda)} \quad (\%) \quad (5.1)$$

kde:

$V(\lambda)$  je spektrální citlivost jasového analyzátoru,

$\rho_{\text{vzorek}}(\lambda)$  je spektrální odraznost konkrétního vzorku.

Naměřené hodnoty spektrální odraznosti jednotlivých vzorků, jsou uvedeny v Tab. 6. Pro jednotlivé vlnové délky jsou vypočítány také průměrné hodnoty spektrální odraznosti, směrodatná odchylka a rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou. Jak je patrné z naměřených dat, tak k největším odchylkám mezi jednotlivými vzorky dochází ve vlnových délkách 360-400 nm. Což se do výsledné hodnoty váhované spektrální odraznosti příliš nepromítne, jelikož v této oblasti má jasový analyzátor LDA velmi malou citlivost (Obr. 19). Dále je patrné, že vzorek č.14 má největší odchylku z naměřených vzorků a je zde na pováženou, jestli by se u tohoto vzorku neměla aplikovat druhá vrstva nátěru, případně nahradit tento vzorek jiným. Ovšem z důvodů měření spektrální odraznosti pouze ve středu každého vzorku nemůžeme 100 % říci, že má tento vzorek takovouto spektrální odraznost po celém povrchu. Výsledné hodnoty váhované spektrální odraznosti pro konkrétní vzorky, včetně průměrné hodnoty všech měřicích vzorků jsou uvedeny v Tab. 5.

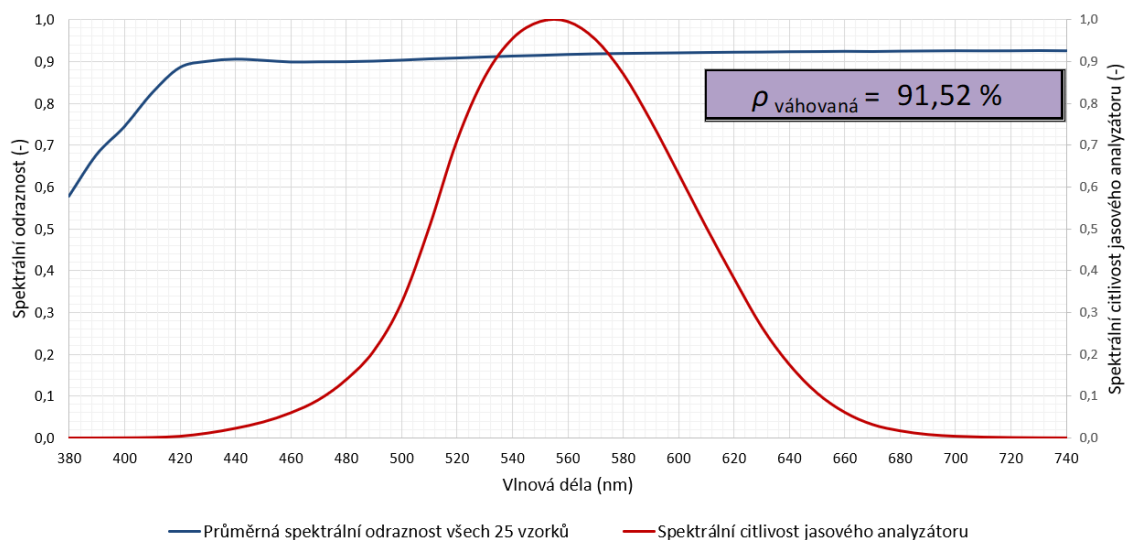
Jelikož cílem první části měření je ověření samotné teoretické úvahy a metody, není kladen takový důraz na dokonalé proměření jednotlivých měřicích vzorků. V případě že se metoda bude jevit jako prakticky realizovatelná s uspokojivou přesností, tak zde bude prostor pro zlepšení kvality nátěru (aplikování více vrstev) a dokonalého proměření jednotlivých vzorků v celé ploše.

Tab. 5 Spektrální odraznost jednotlivých měřicích vzorků váhovaná podle spektrální citlivosti jasového analyzátoru LDA

Průměrná spektrální odraznost jednotlivých měřicích vzorků váhovaná podle spektrální citlivosti jasového analyzátoru LDA (%)									
Vzorek č. 1	91,8 %	Vzorek č. 6	91,9 %	Vzorek č. 11	92,0 %	Vzorek č. 16	91,2 %	Vzorek č. 22	90,8 %
Vzorek č. 2	90,8 %	Vzorek č. 7	92,0 %	Vzorek č. 12	92,0 %	Vzorek č. 18	91,8 %	Vzorek č. 23	91,1 %
Vzorek č. 3	90,5 %	Vzorek č. 8	92,0 %	Vzorek č. 13	91,9 %	Vzorek č. 19	91,2 %	Vzorek č. 24	91,9 %
Vzorek č. 4	91,1 %	Vzorek č. 9	92,0 %	Vzorek č. 14	89,6 %	Vzorek č. 20	91,9 %	Vzorek č. 25	91,8 %
Vzorek č. 5	91,5 %	Vzorek č. 10	91,8 %	Vzorek č. 15	91,9 %	Vzorek č. 21	91,9 %	Vzorek č. 28	91,7 %
Průměrná spektrální odraznost všech měřicích vzorků váhovaná podle spektrální citlivosti jasového analyzátoru LDA (%)							$\rho_{\text{váhovaná}} = 91,52 \%$		

Tab. 6 Naměřené spektrální odraznosti jednotlivých měřicích vzorků

Vlnová délka	Spektrální citlivost jasového analyzátoru	Spektrální odraznost jednotlivých měřicích vzorků (%)																								Směr. odchylka (%)	Rozdíl min. a max. hodnoty (%)	Průměrná hodnota odraznosti vzorků pro jednotlivé vlnové délky (%)	
		Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Vzorek č. 4	Vzorek č. 5	Vzorek č. 6	Vzorek č. 7	Vzorek č. 8	Vzorek č. 9	Vzorek č. 10	Vzorek č. 11	Vzorek č. 12	Vzorek č. 13	Vzorek č. 14	Vzorek č. 15	Vzorek č. 16	Vzorek č. 18	Vzorek č. 19	Vzorek č. 20	Vzorek č. 21	Vzorek č. 22	Vzorek č. 23	Vzorek č. 24	Vzorek č. 25				Vzorek č. 28
380 nm	0,0000390	58,8	58,7	52,1	57,0	59,4	58,7	58,0	59,4	59,9	54,8	58,8	55,6	57,8	61,0	57,8	59,4	60,4	56,9	58,3	57,2	59,4	58,3	58,3	59,7	48,3	2,7	12,7	57,8
390 nm	0,0001200	68,7	69,0	62,0	67,1	69,4	68,6	67,7	69,1	69,6	64,5	68,1	65,1	67,3	70,8	67,5	69,8	70,5	67,3	68,5	67,3	69,3	68,4	68,6	69,8	59,3	2,6	11,6	67,7
400 nm	0,0003960	75,1	75,4	70,2	73,9	75,8	75,0	74,2	75,4	75,7	72,0	74,3	72,1	73,7	76,7	74,0	76,0	77,2	74,0	75,0	74,3	75,4	74,9	75,0	75,9	69,1	1,9	8,1	74,4
410 nm	0,0012100	82,9	82,6	80,4	82,2	83,1	82,7	82,4	83,0	83,1	81,5	82,2	81,4	82,0	83,2	82,1	83,0	84,3	81,9	82,8	82,7	82,6	82,7	82,8	83,2	81,0	0,8	3,9	82,5
420 nm	0,0040000	88,9	88,0	87,9	88,4	88,7	88,7	88,7	88,8	88,9	88,7	88,6	89,1	88,7	87,7	88,7	88,4	88,5	87,9	88,7	88,7	88,1	88,5	88,7	88,7	89,4	0,4	1,7	88,6
430 nm	0,0116000	90,4	89,3	89,7	89,9	90,1	90,2	90,4	90,3	90,3	90,5	90,3	91,0	90,4	88,8	90,3	89,8	89,5	89,4	90,2	90,1	89,5	89,9	90,2	90,1	91,2	0,5	2,5	90,1
440 nm	0,0230000	90,9	89,8	90,2	90,5	90,6	90,7	90,9	90,9	90,8	91,0	90,8	91,4	90,9	89,2	90,8	90,3	90,0	90,0	90,7	90,6	90,0	90,4	90,8	90,6	91,7	0,5	2,5	90,6
450 nm	0,0380000	90,6	89,7	89,8	90,1	90,3	90,5	90,6	90,6	90,6	90,6	90,5	91,0	90,6	89,0	90,5	90,1	89,9	89,7	90,5	90,4	89,8	90,2	90,5	90,4	91,0	0,5	2,0	90,3
460 nm	0,0600000	90,2	89,4	89,2	89,7	90,0	90,1	90,2	90,2	90,2	90,1	90,1	90,4	90,1	88,7	90,0	89,8	89,7	89,4	90,2	90,0	89,5	89,7	90,2	90,1	90,3	0,4	1,7	89,9
470 nm	0,0909800	90,3	89,4	89,2	89,7	90,0	90,2	90,2	90,3	90,3	90,1	90,2	90,4	90,1	88,8	90,1	89,8	89,9	89,5	90,2	90,1	89,6	89,8	90,3	90,2	90,2	0,4	1,6	89,9
480 nm	0,1390200	90,3	89,5	89,2	89,7	90,1	90,2	90,3	90,3	90,3	90,1	90,2	90,3	90,1	88,8	90,1	89,9	90,0	89,6	90,3	90,1	89,6	89,8	90,3	90,2	90,1	0,4	1,6	90,0
490 nm	0,2080200	90,4	89,6	89,3	89,9	90,2	90,4	90,4	90,5	90,4	90,2	90,3	90,4	90,3	88,9	90,3	90,0	90,2	89,7	90,4	90,2	89,7	89,9	90,4	90,4	90,2	0,4	1,6	90,1
500 nm	0,3230000	90,7	89,8	89,5	90,1	90,5	90,6	90,7	90,7	90,7	90,5	90,6	90,6	90,5	89,0	90,5	90,2	90,4	90,0	90,7	90,5	89,9	90,1	90,7	90,6	90,4	0,4	1,7	90,3
510 nm	0,5030000	91,0	90,1	89,8	90,3	90,7	90,9	91,0	91,0	91,0	90,8	90,9	90,9	90,9	89,2	90,8	90,5	90,8	90,3	91,0	90,9	90,1	90,4	91,1	91,0	90,7	0,5	1,8	90,6
520 nm	0,7100000	91,2	90,3	90,0	90,5	90,9	91,2	91,2	91,3	91,2	91,1	91,1	91,2	91,1	89,4	91,1	90,7	91,0	90,5	91,2	91,1	90,3	90,6	91,3	91,2	90,9	0,5	1,9	90,9
530 nm	0,8620000	91,4	90,5	90,2	90,8	91,1	91,4	91,5	91,3	91,5	91,3	91,4	91,4	91,4	89,5	91,4	90,9	91,3	90,8	91,4	91,4	90,5	90,8	91,5	91,4	91,2	0,5	2,0	91,1
540 nm	0,9540000	91,6	90,7	90,3	90,9	91,3	91,6	91,8	91,7	91,7	91,6	91,7	91,7	91,6	89,6	91,6	91,1	91,6	91,0	91,7	91,6	90,7	91,0	91,7	91,6	91,4	0,5	2,2	91,3
550 nm	0,9949501	91,8	90,8	90,5	91,1	91,5	91,8	92,0	91,9	91,9	91,8	91,9	91,9	91,9	89,6	91,8	91,2	91,8	91,2	91,8	91,8	90,8	91,1	91,9	91,8	91,6	0,6	2,3	91,5
560 nm	0,9950000	92,0	90,9	90,6	91,3	91,7	92,1	92,2	92,1	92,1	92,1	92,2	92,2	92,1	89,8	92,1	91,4	92,0	91,4	92,1	92,1	90,9	91,3	92,1	92,0	91,9	0,6	2,4	91,7
570 nm	0,9520000	92,2	91,0	90,8	91,4	91,8	92,2	92,4	92,3	92,3	92,2	92,3	92,4	92,3	89,8	92,3	91,5	92,2	91,5	92,2	92,2	91,1	91,4	92,3	92,2	92,1	0,6	2,6	91,9
580 nm	0,8700000	92,3	91,1	90,8	91,5	91,9	92,3	92,5	92,4	92,4	92,3	92,5	92,5	92,4	89,8	92,4	91,6	92,3	91,6	92,3	92,3	91,1	91,5	92,4	92,3	92,2	0,7	2,6	91,9
590 nm	0,7570000	92,3	91,1	90,9	91,5	91,9	92,4	92,5	92,5	92,5	92,4	92,6	92,6	92,5	89,8	92,5	91,6	92,4	91,6	92,4	92,4	91,2	91,5	92,4	92,3	92,3	0,7	2,8	92,0
600 nm	0,6310000	92,4	91,2	90,9	91,6	92,0	92,5	92,6	92,6	92,6	92,5	92,7	92,7	92,6	89,8	92,6	91,7	92,5	91,7	92,5	92,5	91,2	91,6	92,5	92,4	92,4	0,7	2,9	92,1
610 nm	0,5030000	92,5	91,2	90,9	91,7	92,0	92,6	92,8	92,7	92,7	92,6	92,8	92,8	92,8	89,8	92,7	91,8	92,6	91,8	92,6	92,6	91,3	91,6	92,6	92,5	92,5	0,7	3,0	92,2
620 nm	0,3810000	92,6	91,3	91,0	91,7	92,1	92,7	92,8	92,7	92,7	92,7	92,9	92,9	92,9	89,9	92,8	91,8	92,7	91,8	92,6	92,7	91,3	91,7	92,7	92,6	92,6	0,8	3,1	92,2
630 nm	0,2650000	92,6	91,3	91,0	91,7	92,1	92,7	92,9	92,8	92,8	92,8	92,9	93,0	92,9	90,0	92,9	91,8	92,7	91,9	92,7	92,7	91,3	91,7	92,7	92,6	92,7	0,8	3,1	92,3
640 nm	0,1750000	92,7	91,4	91,1	91,8	92,2	92,8	93,0	92,8	92,9	92,9	93,0	93,1	93,0	90,0	93,0	91,9	92,8	91,9	92,8	92,9	91,3	91,8	92,8	92,7	92,8	0,8	3,2	92,4
650 nm	0,1070000	92,7	91,4	91,1	91,8	92,2	92,8	93,0	92,9	92,9	92,9	93,1	93,2	93,1	89,9	93,0	91,9	92,9	92,0	92,8	92,9	91,4	91,8	92,8	92,7	92,9	0,8	3,3	92,4
660 nm	0,0610000	92,7	91,4	91,1	91,8	92,3	92,9	93,1	92,9	93,0	93,0	93,2	93,3	93,1	89,9	93,2	92,0	93,0	92,0	92,8	93,0	91,4	91,8	92,9	92,8	93,0	0,8	3,4	92,5
670 nm	0,0320000	92,7	91,3	91,0	91,8	92,2	92,9	93,1	92,9	93,0	93,0	93,2	93,3	93,2	89,7	93,1	91,9	93,0	91,9	92,8	92,9	91,3	91,8	92,9	92,7	92,9	0,9	3,6	92,4
680 nm	0,0170000	92,8	91,3	91,0	91,9	92,2	93,0	93,2	93,0	93,1	93,1	93,3	93,4	93,3	89,7	93,3	91,9	93,1	92,0	92,9	93,1	91,4	91,8	93,0	92,8	93,1	0,9	3,7	92,5
690 nm	0,0082100	92,8	91,4	91,1	91,9	92,3	93,0	93,2	93,0	93,1	93,1	93,4	93,5	93,3	89,8	93,3	92,0	93,1	92,1	92,9	93,1	91,4	91,8	93,0	92,9	93,2	0,9	3,7	92,5
700 nm	0,0041020	92,9	91,4	91,2	91,9	92,4	93,1	93,3	93,1	93,2	93,2	93,4	93,5	93,4	89,8	93,4	92,0	93,2	92,1	93,0	93,2	91,4	91,9	93,1	92,9	93,2	0,9	3,7	92,6
710 nm	0,0020910	92,8	91,4	91,1	91,9	92,3	93,0	93,3	93,1	93,1	93,2	93,4	93,5	93,4	89,7	93,4	92,0	93,2	92,1	93,0	93,1	91,3	91,8	93,0	92,9	93,3	0,9	3,8	92,6
720 nm	0,0010470	92,8	91,3	91,1	91,9	92,3	93,1	93,3	93,1	93,1	93,2	93,4	93,6	93,4	89,7	93,4	92,0	93,2	92,1	93,0	93,2	91,4	91,8	93,0	92,9	93,3	1,0	3,9	92,6
730 nm	0,0005200	92,9	91,4	91,1	91,9	92,4	93,1	93,3	93,2	93,2	93,3	93,5	93,7	93,5	89,7	93,5	92,0	93,3	92,1	93,0	93,2	91,4	91,9	93,0	93,0	93,4	1,0	4,0	92,6
740 nm	0,0002492	92,9	91,3	91,0	91,8	92,3	93,1	93,3	93,1	93,1	93,2	93,5	93,6	93,4	89,6	93,5	91,9	93,3	92,1	93,0	93,2	91,3	91,8	93,0	92,9	93,3	1,0	4,1	92,6



Obr. 19 Průměrná spektrální odraznost všech 25 měřicích vzorků, včetně spektrální citlivosti jasového analyzátoru LDA

### 5.3 Přepavní box na měřící vzorky

Jak již bylo uvedeno, pro měřicí metodu bylo vybráno 25 vzorků kruhového průřezu. Jelikož jsou vzorky z jedné strany ošetřeny barvou se změřenou hodnotou spektrální odraznosti, je nutné zabránit znečištění, poškrábání a jakémukoliv znehodnocování odrazného nátěru. Pro tyto účely byl sestaven jednoduchý přepravní box, který zajišťuje jednoduché uložení, přenášení a ochranu jednotlivých vzorků před poškozením.

Pro vytvoření boxu bylo použité PVC tloušťky 5mm, ve kterém bylo pomocí CNC frézky vyfrézováno 30 drážek o šířce 5 mm, do kterých jsou následně vzorky zasouvány viz Obr. 20.



Obr. 20 Přepavní box na měřící vzorky

## 5.4 Měření vlivu polohy vzorku na výsledky měření

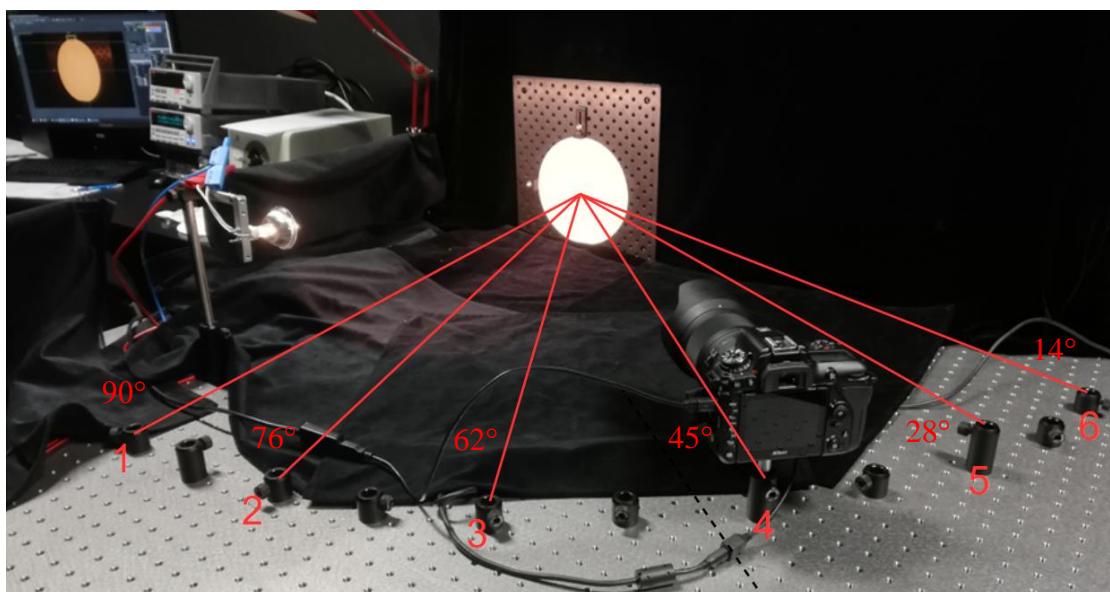
V rámci tohoto měření bylo cílem zjistit, jaký má vliv úhel měření na výslednou odchylku měřeného jasu od výchozí hodnoty u všech měřicích vzorků. U dokonale rozptýlně odrážející plochy (Lambertova zářiče) bychom měli v ideálním případě naměřit stejné hodnoty jasu nezávisle na měřícím úhlu. Jelikož připravené vzorky nedosahují hodnoty 100 % spektrální odraznosti, ale „pouze“ průměrně 91,5 %, tj. nejedná se o dokonalý Lambertovský povrch. Lze tedy očekávat, že se zvětšováním měřicího úhlu bude docházet ke zvyšování odchylky jasu od výchozí hodnoty. Dále se dá očekávat vliv případné odchylky způsobené nedokonalostí nátěru povrchu jednotlivých vzorků. Tento předpoklad se ověří právě tímto měřením. Jako výchozí hodnotu v tomto měření budeme uvažovat měření v pozici 1, tj. úhel  $90^\circ$  mezi středem objektivu jasového analyzátoru LDA a rovinou plochy měřicího vzorku – viz Obr. 21.

### 5.4.1 Popis měřicího pracoviště

Pro měření vlivu úhlu měření na výslednou odchylku měřeného jasu byl použit laboratorní stůl se sítí závitových otvorů, do kterých se umístili svorky pro uchycení jasového analyzátoru LDA. Jasovým analyzátor, respektive střed objektivu jasového analyzátoru, byl umístěn do stejné výšky, jako je střed měřeného vzorku. Střed použitého svítidla (halogenová žárovka), bylo taktéž umístěno do stejné výšky jako je střed měřeného vzorku. Cílem měření bylo měnit úhel měření při zachování konstantní vzdálenosti mezi měřeným vzorkem a jasovým analyzátozem. Vzhledem k tomu, že rozteč závitových otvorů na laboratorním stole, pro uchycení jasového analyzátoru, je 25 mm, bylo nutno při měření vycházet z těchto roztečí. Proto výsledná vzdálenost mezi měřeným vzorkem a jasovým analyzátozem není konstantní, ale pohybuje se v rozmezí 84 - 86 cm. Tento rozptyl na výsledky měření nemá žádný vliv, jelikož při měření jasu je vzdálenost měření irelevantní.

### 5.4.2 Použité přístroje a pomůcky:

- Světelný zdroj: halogenová žárovka 20W, 205 lm, 2800 K.
- Laboratorní zdroj napájející světelný zdroj: KEITHLEY 2231A-30-3.
- Jasový analyzátor LDA.
- PC: program LumiDISP.
- Laboratorní stůl + sada svorek na uchycení jasového analyzátoru.
- Svorky a dorazy pro uchycení měřeného vzorku.



Obr. 21 Měření závislosti odchytky jasů na úhlu měření

### 5.4.3 Popis měření

Jasový analyzátor se umístil do **výchozí pozice** (pozice 1 = úhel  $90^\circ$ ), do takové výšky, aby střed objektivu a střed měřeného vzorku byly ve stejné výšce a střed snímku jasového analyzátoru byl na středu měřeného vzorku. Poté byly postupně proměřeny všechny měřící vzorky. S jasovým analyzátozem se během měření nehýbalo, pořizování snímku bylo realizováno dálkově pomocí PC, a jednotlivé vzorky se umísťovaly do připravené měřící aparatury. Aparatury byla opatřena třemi dorazy, aby všechny vzorky byly umístěny přesně na stejném místě a nevznikali tak odchylky měření mezi jednotlivými vzorky vlivem nepřesného umístění. Tímto způsobem bylo pro každou pozici jasového analyzátoru (pozice 1 až 6) proměřeno všech 25 vzorků. Naměřené hodnoty, včetně odchylek od výchozího hodnoty (přímého směru – pozice 1.), jsou uvedeny v Tab. 8.

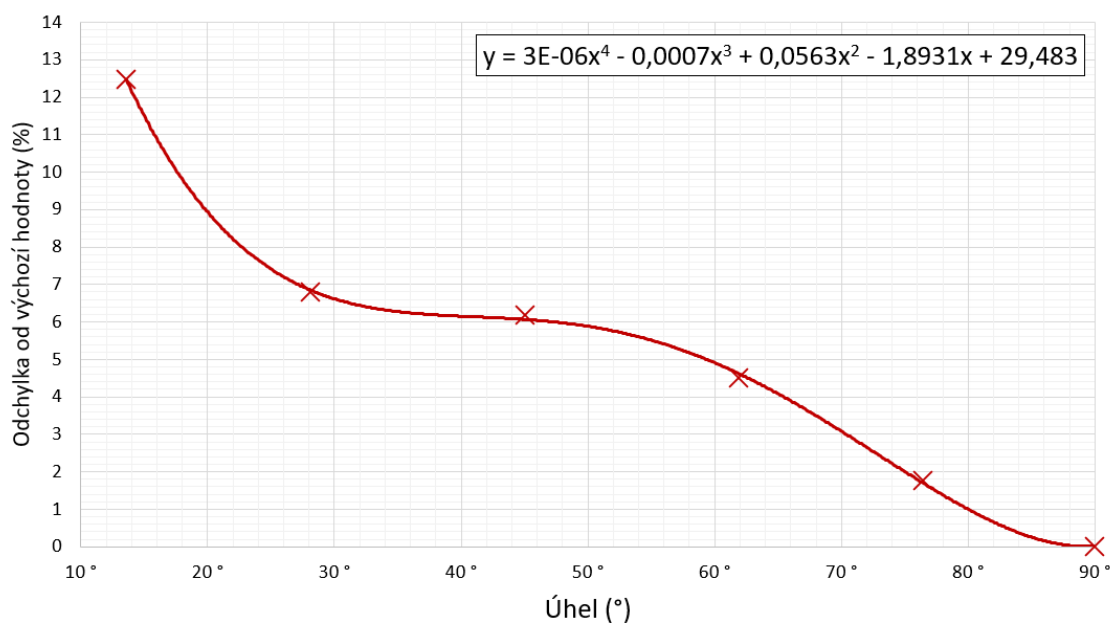
### 5.4.4 Vyhodnocení měření

Pro vyhodnocení měření jsou v Tab. 7 shrnuty průměrné hodnoty všech vzorků. Co se týče průměrné odchytky od výchozí hodnoty tak se potvrzuje výchozí předpoklad, že se snižujícím se úhlem měření bude docházet k růstu odchytky od výchozí hodnoty vlivem nedokonalosti nátěru vzorků a následnému vlivu směrové odraznosti. Už v tomto bodě lze tedy vyloučit měření, kde úhel měření bude nižší než cca  $20^\circ$ , kde již dochází k odchylce od referenční hodnoty o téměř 10 %. Výsledná závislost procentuální odchytky na úhlu je zobrazena na Obr. 22.

Co se týče rozdílnosti jasů jednotlivých vzorků, tak při vyčíslení dvojnásobku směrodatné odchylky ( $2 \cdot \sigma$ ) je vidět, že i při největším měřeném úhlu se lišil jas jednotlivých vzorků v cca 95 % případech maximálně o 1,1%.

Tab. 7 Shrnutí průměrných hodnot všech vzorků

Pozice	Úhel	Průměrné odchylky jasů všech vzorků od výchozí hodnoty (přímý směr)		Směrodatná odchylka	2*směrodatná odchylka
		( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	(%)		
(-)	(°)			(%)	(%)
1	90°	0,0	0,0	0,0	0,0
2	76°	4,9	1,8	0,2	0,4
3	62°	12,5	4,5	0,2	0,5
4	45°	17,1	6,2	0,3	0,6
5	28°	18,8	6,8	0,5	1,0
6	14°	34,6	12,5	0,6	1,1



Průměrná odchylka všech měřicích vzorků od výchozí hodnoty (přímý směr)

Obr. 22 Závislost průměrné odchylky všech měřicích vzorků na úhlu měření

Tab. 8 Změřené průměrné hodnoty jasu na vzorku v závislosti na úhlu měření

Vzorek	Průměrný jas	Úhel	Odchylka od výchozí hodnoty (přímý směr)		Vzorek	Průměrný jas	Úhel	Odchylka od výchozí hodnoty (přímý směr)	
			(cd·m <sup>-2</sup> )	(%)				(cd·m <sup>-2</sup> )	(%)
1	277,8	90°	0,0	0,0	14	277,3	90°	0,0	0,0
	273,5	76°	4,3	1,6		273,4	76°	4,0	1,4
	264,5	62°	13,3	4,8		264,8	62°	12,5	4,5
	261,6	45°	16,2	5,8		260,6	45°	16,7	6,0
	256,2	28°	21,7	7,8		259,9	28°	17,4	6,2
	241,5	14°	36,4	13,1		243,5	14°	33,8	12,1
2	275,0	90°	0,0	0,0	15	278,6	90°	0,0	0,0
	270,7	76°	4,3	1,6		272,9	76°	5,7	2,0
	262,8	62°	12,3	4,5		265,4	62°	13,2	4,7
	257,9	45°	17,1	6,2		260,5	45°	18,1	6,5
	253,4	28°	21,7	7,9		260,2	28°	18,3	6,6
	240,6	14°	34,5	12,5		243,6	14°	35,0	12,6
3	271,9	90°	0,0	0,0	16	275,6	90°	0,0	0,0
	267,9	76°	4,0	1,5		270,6	76°	5,0	1,8
	260,6	62°	11,3	4,2		263,6	62°	12,0	4,4
	257,2	45°	14,7	5,4		258,8	45°	16,8	6,1
	254,8	28°	17,1	6,3		255,8	28°	19,8	7,2
	241,6	14°	30,3	11,1		241,1	14°	34,5	12,5
4	276,0	90°	0,0	0,0	18	278,2	90°	0,0	0,0
	271,9	76°	4,1	1,5		272,9	76°	5,3	1,9
	264,1	62°	11,9	4,3		265,7	62°	12,5	4,5
	259,8	45°	16,2	5,9		260,9	45°	17,3	6,2
	257,9	28°	18,1	6,6		259,4	28°	18,9	6,8
	241,8	14°	34,2	12,4		240,6	14°	37,6	13,5
5	276,7	90°	0,0	0,0	19	274,6	90°	0,0	0,0
	271,6	76°	5,1	1,8		269,6	76°	5,0	1,8
	263,8	62°	12,9	4,7		262,1	62°	12,5	4,5
	259,6	45°	17,1	6,2		256,8	45°	17,8	6,5
	256,5	28°	20,2	7,3		254,3	28°	20,2	7,4
	242,8	14°	33,9	12,2		242,1	14°	32,4	11,8
6	278,4	90°	0,0	0,0	20	277,5	90°	0,0	0,0
	273,4	76°	4,9	1,8		272,7	76°	4,8	1,7
	265,3	62°	13,0	4,7		265,3	62°	12,2	4,4
	260,6	45°	17,8	6,4		260,8	45°	16,7	6,0
	258,7	28°	19,7	7,1		260,5	28°	17,0	6,1
	242,5	14°	35,8	12,9		243,0	14°	34,5	12,4
7	278,6	90°	0,0	0,0	21	276,9	90°	0,0	0,0
	273,3	76°	5,2	1,9		272,1	76°	4,8	1,7
	265,5	62°	13,1	4,7		265,2	62°	11,6	4,2
	261,7	45°	16,9	6,1		260,4	45°	16,5	6,0
	259,7	28°	18,9	6,8		259,1	28°	17,7	6,4
	243,5	14°	35,1	12,6		244,2	14°	32,7	11,8
8	277,2	90°	0,0	0,0	22	276,1	90°	0,0	0,0
	272,4	76°	4,8	1,7		270,7	76°	5,3	1,9
	264,5	62°	12,8	4,6		263,4	62°	12,6	4,6
	260,0	45°	17,3	6,2		258,8	45°	17,2	6,2
	256,3	28°	20,9	7,5		257,5	28°	18,6	6,7
	242,9	14°	34,3	12,4		240,6	14°	35,5	12,8
9	278,0	90°	0,0	0,0	23	274,7	90°	0,0	0,0
	272,8	76°	5,2	1,9		270,2	76°	4,6	1,7
	264,8	62°	13,2	4,8		263,2	62°	11,5	4,2
	260,3	45°	17,7	6,4		257,9	45°	16,8	6,1
	258,9	28°	19,1	6,9		258,6	28°	16,2	5,9
	242,9	14°	35,1	12,6		242,2	14°	32,5	11,8
10	276,7	90°	0,0	0,0	24	277,7	90°	0,0	0,0
	272,3	76°	4,4	1,6		271,9	76°	5,8	2,1
	264,8	62°	11,9	4,3		265,2	62°	12,5	4,5
	260,5	45°	16,2	5,9		260,1	45°	17,6	6,4
	259,4	28°	17,3	6,3		260,3	28°	17,4	6,3
	245,4	14°	31,3	11,3		241,3	14°	36,4	13,1
11	278,5	90°	0,0	0,0	25	277,9	90°	0,0	0,0
	273,1	76°	5,4	1,9		272,3	76°	5,7	2,0
	265,2	62°	13,2	4,8		265,9	62°	12,0	4,3
	260,5	45°	18,0	6,5		261,3	45°	16,6	6,0
	260,2	28°	18,3	6,6		260,1	28°	17,8	6,4
	242,3	14°	36,1	13,0		242,4	14°	35,5	12,8
12	278,8	90°	0,0	0,0	28	277,8	90°	0,0	0,0
	273,3	76°	5,5	2,0		273,4	76°	4,4	1,6
	265,5	62°	13,3	4,8		266,8	62°	11,0	4,0
	260,6	45°	18,2	6,5		260,0	45°	17,8	6,4
	259,3	28°	19,5	7,0		258,0	28°	19,8	7,1
	243,4	14°	35,4	12,7		241,3	14°	36,5	13,1
13	278,6	90°	0,0	0,0	13	278,6	90°	0,0	0,0
	273,0	76°	5,5	2,0		273,0	76°	5,5	2,0
	265,1	62°	13,5	4,8		265,1	62°	13,5	4,8
	260,1	45°	18,4	6,6		260,1	45°	18,4	6,6
	259,3	28°	19,3	6,9		259,3	28°	19,3	6,9
	243,6	14°	35,0	12,5		243,6	14°	35,0	12,5

## 5.5 Určení ideálního úhlu měření

V rámci tohoto měření bylo cílem ověřit již samotnou metodu v laboratorních podmínkách a stanovit přesné měřicí podmínky pro následné terénní měření. V první řadě je nutné určit s jakou sítí měřících bodů se bude měřit. Vzhledem k tomu, že bylo vybráno a proměřeno 25 vzorků, tak se nabízí použít měřicí síť 5x5 vzorků. Dále je nutno stanovit výšku jasového analyzátoru, ze které se budou jednotlivé vzorky snímat, respektive úhel, pod kterým se bude měřit. S čímž souvisí i samotné umístění samotného jasového analyzátoru vůči měřícím vzorkům.

### 5.5.1 Popis měření

Vzorky byly rozmístěny na podlaze laboratoře světelné techniky v síti 5x5 s roztečí 61 cm (Obr. 23). Vzorky tedy pokrývají měřicí plochu 305x305 cm. Následně byl umístěn jasový analyzátor do osy měřícího pole ve vzdálenosti 80 cm od okraje první řady vzorků (Obr. 24) do následujících výšek za použití dvou různých stativů.

- 250 cm  $\Rightarrow$  stativ Manfrotto 161MK2B
- 200 cm  $\Rightarrow$  stativ Manfrotto 161MK2B
- 149,5 cm  $\Rightarrow$  maximální poloha stativu Stativ Manfrotto 055
- 107,5 cm  $\Rightarrow$  střední poloha stativu Stativ Manfrotto 055
- 69,5 cm  $\Rightarrow$  minimální poloha stativu Stativ Manfrotto 055

Výšky byly zvoleny tak, aby byla zajištěna co nejjednodušší opakovatelnost měření v terénních podmínkách, tj. bylo využito jednotlivých maximálních dorazů použitého stativu. Čímž odpadá pracné nastavování a doměřování správně výšky v terénu. Výškou měření se rozumí vertikální vzdálenost mezi středem objektivu jasového analyzátoru LDA, který je namířen na prostřední vzorek (pozice 13.), a podlahou (terénem) na kterém jsou umístěny měřící vzorky.

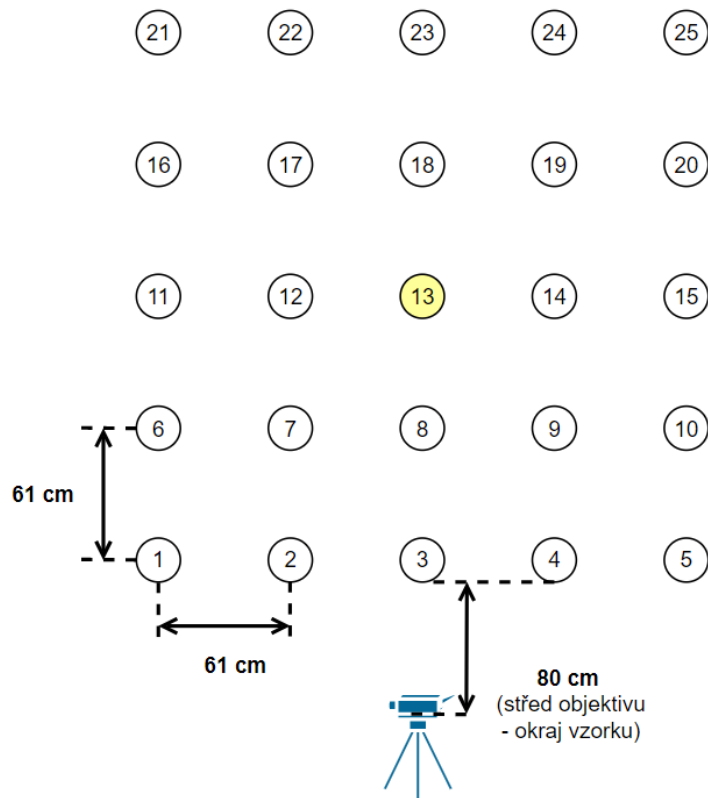
Po rozmístění měřících vzorků, nastavení požadované výšky jasového analyzátoru, namíření a zaostření objektivu jasového analyzátoru na prostřední vzorek bylo pořízeno 5 snímků, které byly dále zpracovány.

### 5.5.2 Použité měřicí přístroje a pomůcky

- Jasový analyzátor LDA,
- objektiv SIGMA circular fisheye 4.5mm 1:2.8 DC HSM,
- luxmetr PRC Krochmann, RadioLux 111,
- stativ Manfrotto 161MK2B,
- stativ Manfrotto 055,
- notebook – program LumiDISP.



Obr. 23 Měření ve světelné laboratoři



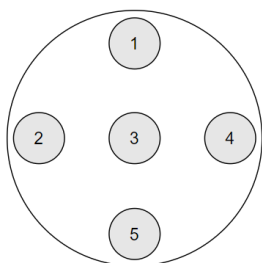
Obr. 24 Situační schéma měření v laboratoři

### 5.5.3 Zpracování naměřených dat

Jak již bylo řečeno, pro všechny uvedené výšky měření bylo provedeno 5 snímků jasovým analyzátozem. Tyto snímky se následně zpracovávají v prostředí programu LumiDISP, kde se nejdříve všechny snímky převedly na jasové mapy a následně se pomocí funkce „maskový detektor“ vymaskovaly jednotlivé měřené vzorky (Obr. 26). Z vymaskovaných vzorků program LumiDISP vypočítal průměrnou hodnotu jasu každého daného vzorku. Následně díky znalosti váhované spektrální odraznosti jsme schopni dopočítat průměrnou osvětlenost na daném vzorku podle vzorce (2.13). Veškeré vypočítané hodnoty osvětlenosti a jejich odchylky se hodnotily na základě posouzení s referenční hodnotou osvětlenosti – viz kapitola 5.5.4.

### 5.5.4 Určení referenční osvětlenosti

Pro určení referenční osvětlenosti byl použit luxmetr PRC Krochmann, RadioLux 111 vybavený stíněným kabelem, jenž spojuje fotočlánek v pouzdře s vlastním měřicím přístrojem pro minimalizaci chyby měření způsobenou stíněním obsluhy při odečítání naměřených dat. Nejprve byl podrobněji proměřen 1 referenční vzorek (Obr. 25) a na základě změřených dat určena jeho průměrná osvětlenost (Tab. 9). Z naměřených dat je patrné, že pokud budeme měřit osvětlenost každého vzorku pouze uprostřed každého vzorku, a tuto hodnotu budeme uvažovat jako průměrnou osvětlenost celého vzorku, tak se nedopouštíme výrazné chyby měření a velice se nám sníží časová náročnost a pracnost měření, vzhledem k použití 25 měřicích vzorků.



Tab. 9 Stanovení průměrné osvětlenosti vzorku

Pozice	Osvětlenost	Průměrná osvětlenost referenčního vzorku	Procentuální odchylka od osvětlenosti ve středu vzorku
(-)	(lx)	(lx)	(%)
1	1233	1234	0,1
2	1229		
3	1235		
4	1231		
5	1241		

Obr. 25 Znárodnění měření průměrné osvětlenosti vzorku

### 5.5.5 Číslování jednotlivých vzorků

Vzhledem k tomu, že program LumiDISP maskuje a pojmenovává vymaskované vzorky od nejbližšího po nejvzdálenější vzorek zleva doprava, tak jsou pro přehlednost všechny vzorky řazeny podle jejich pozice (Obr. 24), nikoliv podle názvu detektorů přiřazeným programem LumiDISP (Obr. 26). Jelikož díky deformaci obrazu způsobené použitím objektivu typu fisheye nedochází ke stejnému číslování napříč všemi provedenými měřeními.



v laboratoři světelné techniky při využití osvětlení celé laboratoře pomocí stropních svítidel (lineární zářivky). Zároveň při výškách 250 a 200 cm byl použit velký a robustní stativ (Manfrotto 161MK2B), který nám svoji konstrukcí stínil příspěvky od svítidel, které nebyly umístěny přímo nad měřenými vzorky. Tyto chyby způsobené stíněním stativu jsou dobře patrné z naměřených dat v Tab. 10, zejména pro první řadu vzorků (tj. pozice 1. až 5.). Kde je měřeno pod největším úhlem, ale paradoxně zde dochází vlivem stínění k největším chybám.

Tab. 10 Stručné shrnutí výsledků měření osvětlenosti v jednotlivých výškách

Použité clonové číslo	9							
Odchylka od ref. osvětlenosti	Výška měření - 250 cm				Výška měření - 107,5 cm			
	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>
5. řada	4 %	4 %	5 %	1 %	-8 %	8 %	-10 %	-7 %
4. řada	4 %	4 %	5 %	1 %	-7 %	7 %	-8 %	-5 %
3. řada	5 %	5 %	7 %	3 %	-4 %	4 %	-5 %	-3 %
2. řada	5 %	5 %	7 %	1 %	-3 %	3 %	-6 %	0 %
1. řada	7 %	7 %	9 %	7 %	0 %	2 %	4 %	-3 %
Odchylka od ref. osvětlenosti	Výška měření - 200 cm				Výška měření - 69,5 cm			
	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>
5. řada	1 %	2 %	3 %	-1 %	-22 %	22 %	-20 %	-12 %
4. řada	2 %	2 %	3 %	0 %	-18 %	18 %	-16 %	-13 %
3. řada	4 %	4 %	5 %	2 %	-13 %	13 %	-13 %	-11 %
2. řada	4 %	4 %	6 %	1 %	-10 %	10 %	-15 %	-7 %
1. řada	8 %	8 %	11 %	6 %	-5 %	5 %	-16 %	-1 %
Odchylka od ref. osvětlenosti	Výška měření - 149,5 cm							
	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>				
5. řada	-2 %	2 %	-4 %	0 %				
4. řada	-1 %	1 %	-3 %	1 %				
3. řada	1 %	1 %	3 %	0 %				
2. řada	2 %	3 %	5 %	-2 %				
1. řada	4 %	4 %	8 %	2 %				

Vezmeme-li v potaz, že tato metoda měření je koncipována především pro terénní měření pozemních komunikací (silnice, chodníky, pěší zóny), kde měření bude realizováno z chodníku/okraje komunikace za vertikální osou svítidla. Tedy nebude docházet ke stínění měřených vzorků vlivem stativu (pokud se nebude u komunikace vyskytovat parazitní osvětlení např. ze světelných výloh), jsou tyto výšky z hlediska odchylky měření použitelné pro venkovní měření.

Pro terénní měření je tedy z hlediska odchylky měření výhodné použít co největší výšku měření, s čímž souvisí i použití velkého, robustního a těžkého stativu, což je pro praktické využití problematické, zejména díky obtížnému převozu a manipulaci s takto velkým stativem. Z toho důvodu bude pro venkovní měření použit menší stativ a menší výšky měření v rozmezí 180-200 cm, které zajistí jednodušší obsluhu jasového analyzátoru LDA.

### 5.5.7 Příklad výpočtu sledovaných hodnot

V Tab. 11 jsou uvedeny všechny naměřené a vypočítané hodnoty pro měření z výšky 250 cm. Žlutě podbarveny jsou veškeré hodnoty, které jsou počítány/používány v příkladu výpočtu. Všechny data v jednotlivých dílčích tabulkách jsou uspořádány tak, aby korespondovali s měřicí sítí vzorků a jejich odpovídající pozicí uvedenou na situačním schématu Obr. 24.

Tab. 11 Přehled naměřených a vypočítaných hodnot pro měření z výšky 250 cm

Referenční osvětlenosti jednotlivých vzorků změřená luxmetrem (lx)				
954	931	1163	1146	872
996	1040	1216	1187	979
1025	1064	1235	1204	990
1050	1091	1249	1196	962
1076	1129	1255	1153	946

Úhel pod kterým je snímán jednotlivý vzorek (°)				
37°	36°	37°	37°	36°
41°	43°	43°	43°	41°
46°	50°	51°	50°	46°
53°	58°	60°	58°	53°
60°	68°	72°	68°	60°

Naměřená průměrná hodnota jasu na jednotlivé vzorku (cd·m <sup>-2</sup> )				
290	284	341	343	267
302	317	359	354	300
314	327	371	364	307
323	339	381	353	300
335	353	390	362	300

Absolutní odchylka vypočítané osvětlenosti od referenční hodnoty (lx)				
41	43	8	30	46
42	48	18	30	51
52	59	37	44	65
57	72	59	16	68
74	83	83	88	82

Vypočítaná průměrná osvětlenost vzorků na základě změřeného jasu (lx)				
995	974	1171	1176	918
1038	1088	1234	1217	1030
1077	1123	1272	1248	1055
1107	1163	1308	1212	1030
1150	1212	1338	1241	1028

Procentuální odchylka vypočítané osvětlenosti od referenční hodnoty (%)				
4	5	1	3	5
4	5	1	3	5
5	6	3	4	7
5	7	5	1	7
7	7	7	8	9

Příklad výpočtu pro Tab. 10, první řádek (výška měření 250 cm) – žlutě podbarvený řádek. Veškeré výsledné procentuální odchylky se pro přehlednost zaokrouhlují na celá procenta.

Průměrná procentuální odchylka osvětlenosti dané řady měřicích vzorků, tj. vždy pro 5 vzorků, se určí ze vztahu:

$$\bar{x}_{\%} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{\%,i} = \frac{1}{5} \cdot (4 + 4 + 1 + 2 + 5) \cong 3 \% \quad (5.2)$$

Obdobným způsobem je stanovena průměrná absolutní procentní odchylka osvětlenosti dané řady viz rovnice (5.3). Absolutní procentní odchylka osvětlenosti se ve většině případů shoduje s relativní procentní odchylkou, jelikož ve většině případů dochází

ke stejné odchylce v rámci jedné řady vzorků (kladné/záporné). Ovšem v případě, kdy toto neplatí, tak dochází k vzájemnému vykompenzování finální procentuální odchylky a zkrácení výsledných dat. Z toho důvodu je uváděna i absolutní procentní odchylka.

$$|\bar{x}|_{\%} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{\%,i}| = \frac{1}{5} \cdot |4 + 4 + 1 + 2 + 5| \cong 3 \% \quad (5.3)$$

kde  $n$  je počet vzorků v konkrétní řadě a  $x_{\%}$  je procentní odchylka osvětlenosti od ref. hodnoty, která se určí vztahem:

$$x_{\%} = \frac{x_{\text{abs}} \cdot 100}{E_{\text{ref}}} = \frac{39 \cdot 100}{954} \cong 4 \% \quad (5.4)$$

kde  $x_{\text{abs}}$  je absolutní odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty a  $E_{\text{ref}}$  je referenční osvětlenost změřená luxmetrem.

Absolutní procentní odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty je vypočtena obdobně na základě vztahu (5.4) s tím rozdílem, že výsledek je uváděn v absolutní hodnotě.

$$|x_{\%}| = \left| \frac{x_{\text{abs}} \cdot 100}{E_{\text{ref}}} \right| = \left| \frac{39 \cdot 100}{954} \right| \cong 4 \% \quad (5.5)$$

Absolutní odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty se stanoví jako:

$$x_{\text{abs}} = E_{\text{vyp}} - E_{\text{ref}} = 993 - 954 = 39 \text{ lx} \quad (5.6)$$

kde  $E_{\text{vyp}}$  je vypočítaná hodnota osvětlenosti a  $E_{\text{ref}}$  je změřená hodnota osvětlenosti pomocí luxmetru.

Vypočítaná hodnota osvětlenosti se stanoví ze vztahu (2.13). Pro přehlednost je zde uveden i příklad výpočtu:

$$E_{\text{vyp}} = \frac{L \cdot \pi}{\rho_{\text{váhovaná}}} = \frac{290 \cdot \pi}{0,915} \cong 995 \text{ lx} \quad (5.7)$$

Kde  $L$  je průměrný naměřený jas konkrétního vzorku a  $\rho_{\text{váhovaná}}$  je průměrná spektrální odraznost měřicích vzorků váhovaná podle citlivosti  $V(\lambda)$  jasového analyzátoru LDA (dále již uváděna pouze jako váhovaná spektrální odraznost vzorků).

Dále veličiny  $\text{min}_{\%}$  a  $\text{max}_{\%}$  značí minimální a maximální procentuální odchylku osvětlenosti konkrétního vzorku od referenční hodnoty osvětlenosti v dané řadě vzorků.

## 6. PRAKTICKÁ ČÁST - TERÉNNÍ MĚŘENÍ

V rámci terénního měření je cílem ověřit poznatky z laboratorního měření v reálném prostředí pozemních komunikací a vyhodnotit metodu měření, případně metodu upravit na základě poznatků z terénu.

### 6.1.1 Použité měřicí přístroje a přípravy

V rámci celého terénního měření se používaly následující měřicí přístroje:

- jasový analyzátor LDA (Obr. 27),
- luxmetr PRC Krochmann, RadioLux 111 – třída A (Obr. 29),
- stativ Manfrotto 055 (Obr. 28),
- objektiv SIGMA 135mm 1:1.8 DG ø82 (Obr. 31),
- objektiv SIGMA circular fisheye 4.5mm 1:2.8 DC HSM (Obr. 30).



Obr. 27 Jasový analyzátor LDA [23]



Obr. 29 Luxmetr PRC Krochmann, RadioLux 111 [24]



Obr. 28 Stativ Manfrotto 055 [25]



Obr. 31 Objektiv SIGMA 135mm 1:1.8 DG ø82 [26]



Obr. 30 Objektiv SIGMA circular fisheye 4.5mm 1:2.8 DC HSM [27]

## 6.2 První testovací měření

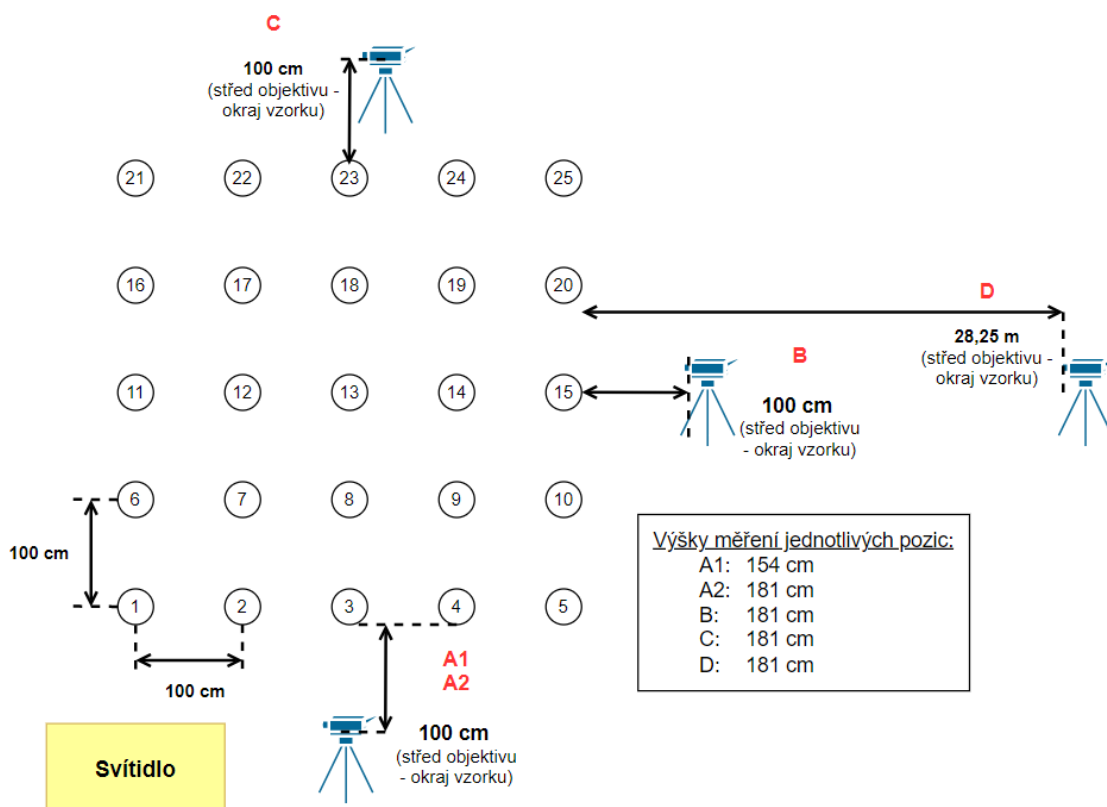
Cílem prvního terénního měření bylo ověřit poznatky z laboratorního měření v terénních podmínkách a stanovit základní vstupní zdroje odchylek do měření. Na základě, kterých bude koncipována série dalších terénních měření. Konkrétně bylo cílem tohoto měření zhodnotit zvolenou rozteč sítě měřících bodů, polohu jasového analyzátoru LDA vůči síti měřících vzorků a vliv použitého clonového čísla. Poté na základě získaných dat stanovit úpravy a cíle pro další sérii terénních měření.

### 6.2.1 Popis měřícího stanoviště:

Terénní měření bylo realizováno v Brně na parkovišti před Vědeckotechnickým parkem Profesora Lista (Kolejní 3093/7, 612 00 Brno-Královo Pole). Pro měření byla vybraná část asfaltové vozovky poblíž svítidla (vysokotlakou sodíkovou výbojkou). Svítidlo v tomto místě je natočeno na parkovací stání, tj. o 90° otočeno vůči vozovce. Dále měřená část vozovky, jelikož se vyskytuje v blízkosti křižovatky, vykazuje určitý diagonální sklon napříč měřícími vzorky. Síť měřících vzorků tedy není v horizontální rovině (Obr. 32). Na měřenou část vozovky se rozložilo 25 měřících vzorků v s roztečí 100x100 cm. Celková měřená plocha tedy pokrývala plochu 25 m<sup>2</sup>.



*Obr. 32 Měřicí síť vzorků 5x5, rozteč 100x100 cm*



Obr. 33 Situační schéma pozic jasového analyzátoru při měření

## 6.2.2 Popis měření

Měření pro pozice A1, A2, B, C jasového analyzátoru byl použit objektiv typu fisheye, který se umístil do konkrétní výšky (viz Obr. 33), nasměřoval a zaostřil na prostřední vzorek sítě měřících bodů (pozice 13). V rámci tohoto terénního měření bylo realizováno i měření pomocí objektivu SIGMA 135mm 1:1.8 DG ø82 na vzdálenost 28,25 m (pozice D). Od tohoto měření se díky velmi malému úhlu měření (3-4°) nepředpokládala velká přesnost měření, jednalo se pouze o informativní měření. Pro všechny pozice jasového analyzátoru byl pořízen 1 snímek, který byl zpracován v programu LumiDISP stejným způsobem jako v laboratorním měření viz kapitola 5.5.3. Přesnost metody se hodnotila na základě porovnání vypočítané osvětlenosti s referenční osvětleností na každém vzorku. Referenční osvětlenost byla stanovena luxmetrem obdobně jako v podkapitole 5.5.4.


























Tab. 12 Podrobný popis jednotlivých pozic jasového analyzátoru LDA

Pozice jasového analyzátoru	A1	A2	B	C	D
Typ objektivu	fisheye	fisheye	fisheye	fisheye	135 mm
Clonové číslo	2.8	5.6	5.6	5.6	3.2
Čas expozice	1.3 s	2.5 s	2.5 s	3 s	1.6 s
Výška analyzátoru	154 cm	181 cm	181 cm	181 cm	181 cm
Vzdálenost analyzátoru	100 cm	100 cm	100 cm	100 cm	28,25 m
Rozteč měřících vzorků	100 cm	100 cm	100 cm	100 cm	100 cm

### 6.2.3 Závěry měření

V rámci závěru měření jsou shrnuty stěžejní výsledky měření v Tab. 13.

Tab. 13 Shrnutí výsledku testovacího terénního měření

Pozice jasového analyzátoru	A1				
Odchylka od ref. osvětlenosti	$\bar{x}$ %	$ \bar{x} $ %	max %	min %	
5. řada	 -16 %	16 %	-20 %	-13 %	
4. řada	 -17 %	17 %	-20 %	-13 %	
3. řada	 -8 %	8 %	-10 %	-4 %	
2. řada	 -8 %	8 %	-14 %	-6 %	
1. řada	 -6 %	6 %	-11 %	-3 %	
Pozice jasového analyzátoru	A2				
Odchylka od ref. osvětlenosti	$\bar{x}$ %	$ \bar{x} $ %	max %	min %	
5. řada	 -17 %	17 %	-19 %	-13 %	
4. řada	 -17 %	17 %	-21 %	-13 %	
3. řada	 -17 %	17 %	-20 %	-12 %	
2. řada	 -5 %	5 %	-9 %	-1 %	
1. řada	 -3 %	3 %	-11 %	1 %	
Pozice jasového analyzátoru	B				
Odchylka od ref. osvětlenosti	$\bar{x}$ %	$ \bar{x} $ %	max %	min %	
5. řada	 -28 %	28 %	-37 %	-17 %	
4. řada	 -25 %	25 %	-31 %	-17 %	
3. řada	 -17 %	17 %	-22 %	-11 %	
2. řada	 -10 %	10 %	-13 %	-7 %	
1. řada	 -3 %	3 %	-7 %	-1 %	
Pozice jasového analyzátoru	C				
Odchylka od ref. osvětlenosti	$\bar{x}$ %	$ \bar{x} $ %	max %	min %	
5. řada	 -13 %	13 %	-16 %	-10 %	
4. řada	 -10 %	10 %	-12 %	-6 %	
3. řada	 -3 %	3 %	-6 %	-2 %	
2. řada	 -2 %	2 %	-3 %	0 %	
1. řada	 -2 %	3 %	-10 %	2 %	
Pozice jasového analyzátoru	D				
Odchylka od ref. osvětlenosti	$\bar{x}$ %	$ \bar{x} $ %	max %	min %	
5. řada	 -51 %	51 %	-55 %	-48 %	
4. řada	 -51 %	51 %	-54 %	-47 %	
3. řada	 -45 %	45 %	-48 %	-42 %	
2. řada	 -39 %	39 %	-43 %	-36 %	
1. řada	 -31 %	31 %	-34 %	-28 %	

#### Vliv výšky měření (pozice A1, A2):

V případě měření z pozice A1 a A2, se jedná o stejnou pozici jasového analyzátoru, pouze jsou rozdílné výšky měření. Je patrné, že paradoxně měření z nižší výšky (154 cm) vychází menší odchylka měření, než při měření ve vyšší výšce (181 cm), což odporuje poznatkům z laboratorního měření, že s vyšší výškou měření, tj. větším měřicím úhlem, klesá odchylka jasů (viz kap. 5.4). Tento jev bude s největší pravděpodobností způsobený použitým odlišným clonovým číslem jasového analyzátoru, jelikož při měření došlo pouze ke změně výšky měření, clonového čísla a času expozice při zachování konstantní pozice jasového analyzátoru a měřicích vzorků. Z tohoto důvodu se další terénní měření věnuje bližšímu zkoumání právě vlivu použitého clonového čísla.

#### Vliv pozice jasového analyzátoru:

Při pohledu na měření v pozicích A2, B a C jasového analyzátoru, u kterých byla dodržena stejná výška i vzdálenost měření, je patrné že odchylka měření se podle předpokladu zvyšuje se zvyšující vzdáleností vzorků od analyzátoru, tj. se zmenšujícím se pozorovacím úhlem. Ovšem výsledky měření jednotlivých pozic jasového analyzátoru se mezi sebou výrazně liší (Tab. 13). Nejlepších výsledků dosahuje měření z pozice C, tj. proti světlu. Naopak nejhorsích výsledků dosahuje měření z pozice B.

V případě měření z jednotlivých pozic jasového analyzátoru je nutné vzít v úvahu, že měřená plocha (vozovka) v tomto měření vykazovala určitý sklon diagonálně napříč měřenými vzorky (Obr. 32). Sklon vozovky se promítne do výsledného měření díky změně úhlu měření jednotlivých vzorků. Zatímco vzorky umístěné směrem do kopce, dosahují nižší vertikální vzdálenosti vůči středu objektivu jasového analyzátoru, tj. jsou měřeny pod nižším úhlem. Ovšem, na druhou stranu, sklon vozovky způsobí sklon vzorku pod stejným úhlem, jaký je sklon vozovky, což naopak zvýší měřicí úhel a výsledný úhel měření tedy do jisté míry kompenzuje. Obdobným způsobem je ovlivněn měřicí úhel u vzorků, které jsou umístěny směrem z kopce. Výsledný úhel měření je tedy závislý na konkrétním sklonu dané měřené plochy (komunikace). Další terénní měření bude provedeno na rovnější vozovce, aby došlo k omezení chyby vlivem sklonu vozovky a mohly se snáze prozkoumat další vlivy vstupující do měření.

Dalším potenciální chybou vstupující do měření je pořízení pouze 1 snímku pro každou pozici měření. Z toho důvodu pro další měření bude použito větší množství snímků, aby se vyhodnotil vliv opakovatelnosti jednotlivých pořízených snímků jasovým analyzátozem LDA.

#### Měření z velké vzdálenosti:

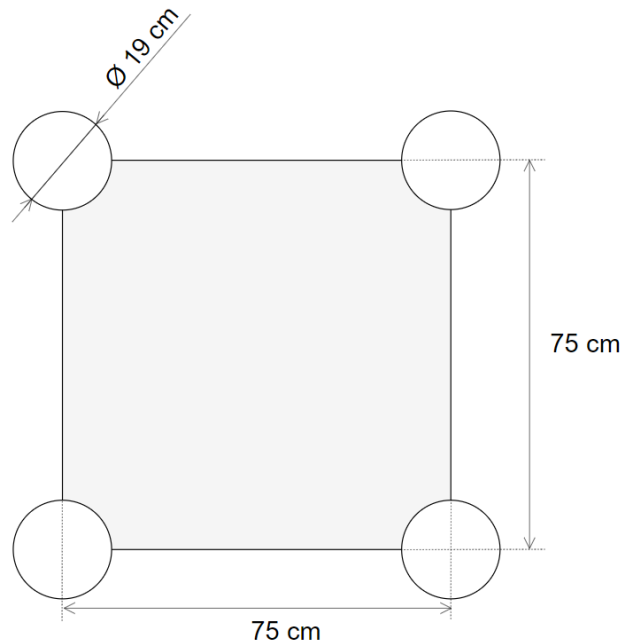
V případě měření z pozice D, tj. ve vzdálenosti 28,25 m se měřící úhly pohybovaly v rozmezí 3-4°, proto se nepředpokládala velká přesnost měření. Šlo pouze o informativní měření za použití objektivu SIGMA 135mm 1:1.8 DG ø82. Výsledná průměrná procentuální odchylka sítě měřících vzorků dosahovala hodnoty -43,4 % od referenční osvětlenosti. Jedná se tedy o nepoužitelnou vzdálenost a objektiv pro následné praktické využití měřící metody. Z tohoto důvodu se měření z této vzdálenosti a objektivem nebude dále v diplomové práci podrobněji zkoumat.

#### Hodnocení rozteče vzorků:

I přes rozlišnosti mezi jednotlivými měřeními z pozic A2,B,C je z naměřených dat patrné, že i přes použití výšky měření 181 cm dosahuje metoda velké chyby měření. Je to způsobeno, jak již bylo řečeno, vlivem sklonu vozovky na úhel měření, ale tak i použitím velké rozteče mezi měřícími vzorky a tím souvisejícím nízkým úhlem měření zejména v posledních dvou řadách měřených vzorků, kde se úhel pohybuje v rozmezí 19-24° (v případě rovné vozovky). Proto bude pro další měření použita opět síť měřících vzorků 5x5 ovšem s roztečí 75 cm, čímž se výsledná měřená plocha zmenší z 25m<sup>2</sup> na 9m<sup>2</sup>. Vzhledem k tomu, že metoda je koncipovaná tak, že se bude měřit vozovka z chodníku/okraje komunikace, je tato vzdálenost dostatečná, jelikož čtvercová plocha 9m<sup>2</sup> + odstup od obrubníku zajistí proměření celého jednoho jízdního pruhu komunikace, případně pěší komunikace.

### 6.3 Vytvoření šablony na rozmístění vzorků

Vzhledem k zdlouhavému rozmisťování vzorků do přesně definované sítě měřicích bodů, s konstantní roztečí, se pro potřeby terénního měření vytvořila šablona na jednodušší a rychlejší přesné rozmístění vzorků (Obr. 34). Šablona byla vyhotovena z tvrdého kartonu. Při použití této šablony se výrazně snížil čas rozmístění měřicích vzorků a významně se zvýšila přesnost jejich umístění.



Obr. 34 Rozměry šablony pro rozmístění měřicích vzorků



Obr. 35 Ukázka používání šablony pro rozmístění měřicích vzorků

## 6.4 Vliv umístění středu snímku a použitého clonového čísla na výsledky měření

Cílem tohoto měření bylo ověřit, jestli má na přesnost metody vliv nasměrování středu snímku jasového analyzátoru LDA na různé řady měřících vzorků. Zároveň se ověřoval vliv použitého clonového čísla na výsledky měření.

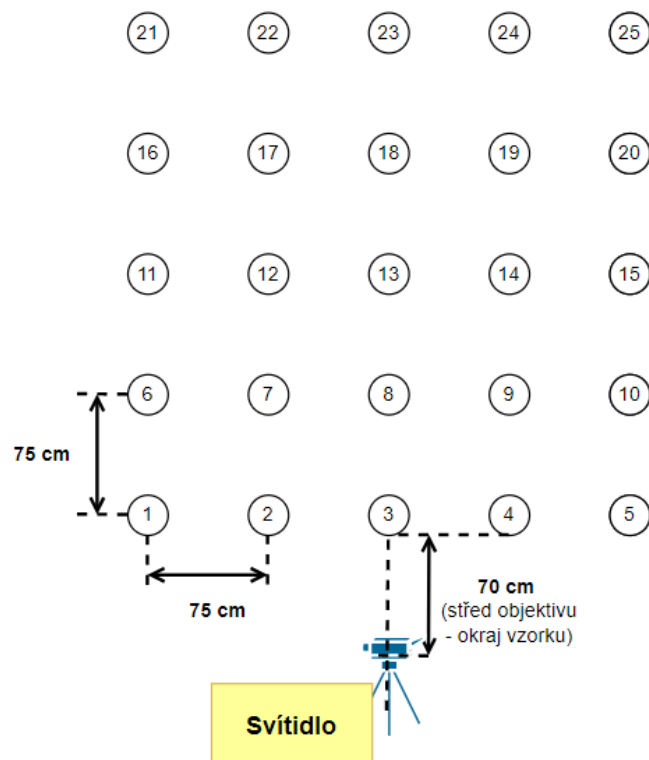
Dále je nutné zhodnotit změny provedené na základě poznatků z prvního terénního měření (kap. 6.2).

### 6.4.1 Popis měřícího stanoviště

Terénní měření bylo realizováno opět v Brně na parkovišti před Vědeckotechnickým parkem Profesora Lista (Kolejní 3093/7, 612 00 Brno-Královo Pole), stejně jako v měření v kapitole 6.2. Ovšem na základě poznatků z předchozího měření se měřilo pod jiným svítidlem stejného typu (sodíková výbojka), které již bylo natočeno nad měřenou vozovkou a zároveň měřená vozovka měla minimální sklon (Obr. 36). Zároveň byla zmenšena rozteč měřících vzorků na 75 cm, měřící síť byla zachována 5x5 vzorků. Těmito úpravami by se měla eliminovat chyba způsobená sklonem vozovky a velkou roztečí vzorků. Tento předpoklad je v tomto měření ověřen a zhodnocen. Vzhledem k tomu, že se měřící vzorky cíleně rozmístily v osové souměrnosti podle osy svítidla, tak je jasový analyzátor umístěn lehce mimo osu vzorků, jelikož v přesném umístění analyzátoru do osy bránila konstrukce svítidla. Výsledná odchylka od osy měřících vzorků je patrná z Obr. 38.



Obr. 36 Fotka měřené vozovky včetně sítě měřících vzorků

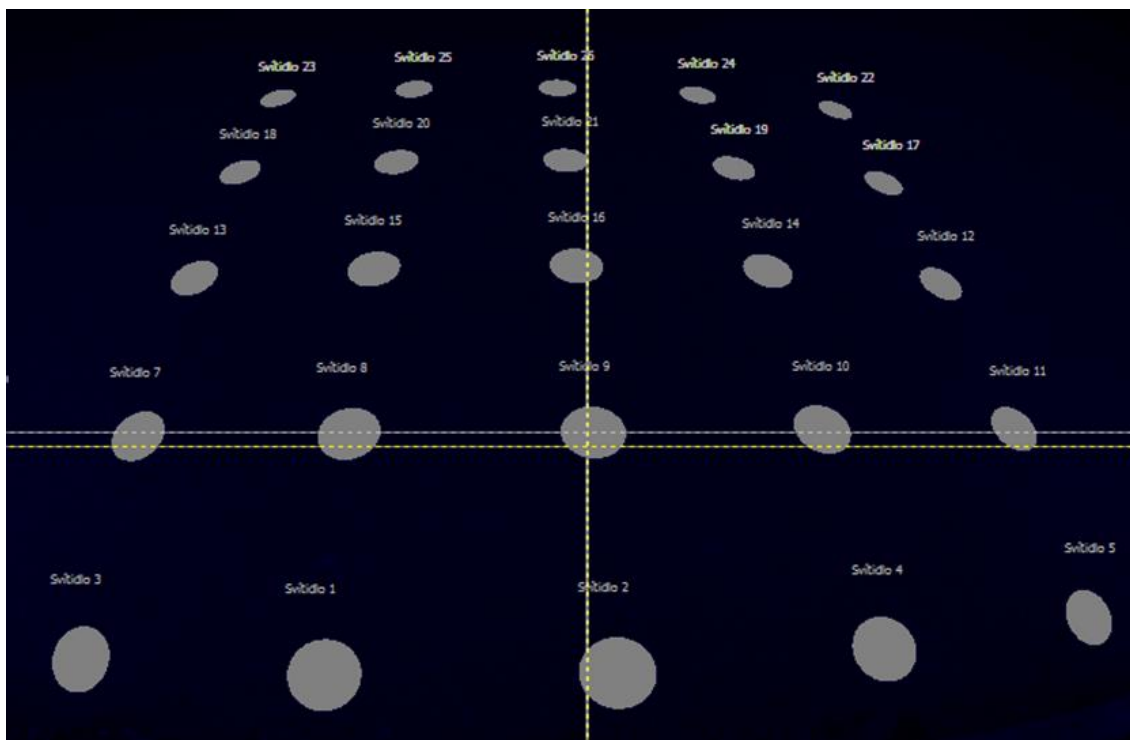


Obr. 37 Situační schéma měření

#### 6.4.2 Popis měření

Celé měření probíhalo při konstantní pozici jasového analyzátoru a měřicích vzorků viz Obr. 37. Střed objektivu jasového analyzátoru byl umístěn do výšky 191 cm a namířen na prostřední tzv. referenční vzorek (pozice 13). Výška měření je vyšší, i přes zachování stejného maximálního dorazu použitého stativu než v předchozím měření. Je to způsobeno tím, že měření v tomto případě je realizováno z vyvýšeného terénu (nad obrubníkem), což je patrné z fotky z měření - Obr. 36. Vyšší výška měření, dle dřívějších poznatků, působí pozitivně na výslednou velikost odchylky. Z tohoto důvodu se výška měření ponechala vyšší.

V průběhu měření se měnilo použité clonové číslo a expoziční čas jasového analyzátoru a pořizovali se 3 snímky pro každé toto nastavení. Dále byla zkoumán vliv umístění středu snímku jasového analyzátoru na různé pozice měřicích vzorků. Při tomto měření docházelo pouze ke změně sklonu jasového analyzátoru v jedné ose, tj. v ose prostředního sloupce měřicích vzorků. Přesnost metody se hodnotila na základě porovnání vypočítané osvětlenosti s referenční osvětleností na každém vzorku. Referenční osvětlenost byla stanovena luxmetrem obdobně jako v podkapitole 5.5.4.



Obr. 38 Příklad nastavení středu snímku jasového analyzátoru na střed 2. řadu vzorků

### 6.4.3 Závěry měření

V rámci první části tohoto měření bylo cílem vyhodnotit úpravy měřicí soustavy oproti prvnímu testovacímu měření, tj. snížení rozteče měřících vzorků a vzdálenosti jasového analyzátoru od sítě vzorků. V další části měření bylo cílem zhodnotit vliv použitého clonového čísla a umístění středu snímku jasového analyzátoru na výsledky měření.

Zhodnocení úprav na základě poznatků z testovacího měření:

Při porovnání odchylek měření při testovacím měření, kdy se používala rozteč mezi vzorky 100x100 cm a vzdálenost jasového analyzátoru 100 cm, s aktuálním měřením s roztečí 75x75 cm a vzdáleností jasového analyzátoru 75 cm je patrné, že se průměrná procentní odchylka osvětlenosti v 3. až 5. řadě vzorků zmenšila zhruba o 2 %. Snížením rozteče vzorků dojde ke zvýšení měřicího úhlu jednotlivých vzorků, zejména v posledních řadách a tím k menší odchylce měřeného jasu a tím i následné vypočítané osvětlenosti viz Obr. 22. Z výsledků měření je patrné, že i při rozteči 75x75 cm dosahuje procentní odchylka osvětlenosti hodnot přes 10 %. Bude tedy nutné tyto hodnoty korigovat, čemuž se věnuje samostatná kapitola 6.7.1.

Tab. 14 Vliv snížené rozteče na výslednou osvětlenost

Specifikace měření		Typ měření	Aktuální měření				
			Odchylka od ref. osvětlenosti	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>
Výška analyzátoru	191 cm	5. řada		-15 %	15 %	-16 %	-14 %
Vzdálenost analyzátoru	80 cm	4. řada		-15 %	15 %	-16 %	-14 %
Rozteč měřících vzorků	75 cm	3. řada		-13 %	13 %	-16 %	-11 %
Čas expozice	1 s	2. řada		-12 %	12 %	-13 %	-10 %
Clonové číslo	2.8	1. řada		-11 %	11 %	-16 %	-7 %
Specifikace měření		Odchylka od ref. osvětlenosti	Aktuální měření				
			$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	
Výška analyzátoru	191 cm	5. řada		-13 %	13 %	-14 %	-12 %
Vzdálenost analyzátoru	80 cm	4. řada		-13 %	13 %	-14 %	-12 %
Rozteč měřících vzorků	75 cm	3. řada		-10 %	10 %	-12 %	-9 %
Čas expozice	2.5 s	2. řada		-8 %	8 %	-10 %	-6 %
Clonové číslo	5.6	1. řada		-6 %	6 %	-10 %	-3 %
Specifikace měření		Odchylka od ref. osvětlenosti	První testovací měření				
			$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	
Výška analyzátoru	181 cm	5. řada		-17 %	17 %	-19 %	-13 %
Vzdálenost analyzátoru	100 cm	4. řada		-17 %	17 %	-21 %	-13 %
Rozteč měřících vzorků	100 cm	3. řada		-17 %	17 %	-20 %	-12 %
Čas expozice	2.5 s	2. řada		-5 %	5 %	-9 %	-1 %
Clonové číslo	5.6	1. řada		-3 %	3 %	-11 %	1 %

#### Vliv použitého clonového čísla:

Z hlediska opakovatelnosti měření, tj. změny velikosti naměřeného jasu v rámci 3 pořízených snímků, nejlépe vychází použití clonového čísla 2.8 (viz Tab. 15). Je to způsobeno zejména tím, že při použití clonového čísla 2.8 je clona jasového analyzátoru otevřená na maximum, nedochází zde tedy k chybě nastavení clony vlivem nepřesnosti mechanického nastavení řídicím mechanismem jasového analyzátoru. Ovšem při použití clonového čísla 2.8 dochází k velké odchylce výsledné osvětlenosti na měřících vzorcích, přes 10 %. Naopak u clonového čísla 5.6 dochází k největší chybě vlivem opakovatelnosti měření, ale výsledná přesnost výpočtu osvětlenosti dosahuje nejlepších hodnot. Použití menších clonových čísel, s čímž souvisí větší čas expozice, aby nedošlo k přexponování výsledného snímku, nemá příliš velké opodstatnění na základě opakovatelnosti měření, i výsledné přesnosti osvětlenosti.

Pro další měření byly vybrány clonová čísla 2.8 a 5.6 z výše uvedených důvodů a budou se nadále porovnávat. Zároveň na základě zjištěné průměrné reálné odchylky jasu pro 1 měření u clonového čísla 5.6 přes 4 % bude nutné pořizovat alespoň 5 snímků každé konfigurace měření. Z toho důvodu, aby se eliminovala chyba vlivem opakovatelnosti měření, kdy jeden „ulítlý“ snímek může výrazně ovlivnit měření.

Tab. 15 Vliv použitého clonového čísla při stejném středu snímku

Střed snímku	Čas expozice	Clonové číslo	Průměrná reálná odchylka jasu pro 1 měření	Průměrná reálná odchylka jasu pro 3 měření	Průměrná procentní odchylka osvětlenosti vzorků	Průměrná absolutní procentní odchylka osvětlenosti vzorků	Směrodatná odchylka procentní odchylky osvětlenosti	
			( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	(%)	(%)	$\sigma$ (%)	$2\cdot\sigma$ (%)
Horizont	1.3	2.8	0,24	0,17	-12,6	12,6	2,1	4,1
Horizont	2.5	5.6	1,60	0,92	-18,8	18,8	4,4	8,8
5. řada	1.3	2.8	0,66	0,46	-11,6	11,6	1,9	3,8
5. řada	2.5	5.6	2,59	1,50	-12,3	12,3	3,0	5,9
5. řada	6	9	0,73	0,42	-10,8	10,8	3,0	6,1
5. řada	15	14	1,89	1,09	-12,2	12,2	2,8	5,7
5. řada	30	20	0,21	0,12	-11,3	11,3	3,0	6,0
4. řada	1.3	2.8	0,11	0,08	-14,9	14,9	4,3	8,6
4. řada	2.5	5.6	4,67	2,70	-9,8	9,8	2,6	5,1
4. řada	6	9	1,19	0,69	-9,4	9,4	2,7	5,4
4. řada	13	14	2,46	1,42	-8,3	8,3	3,1	6,2
4. řada	25	20	1,37	0,79	-11,7	11,7	3,3	6,5
3. řada	1	2.8	0,60	0,43	-13,1	13,1	2,5	5,0
3. řada	2.5	5.6	2,25	1,30	-9,9	9,9	3,4	6,9
2. řada	1	2.8	0,08	0,06	-13,1	13,1	2,4	4,9
2. řada	2.5	5.6	1,66	0,96	-8,2	8,2	3,2	6,5

Vliv umístění středu snímku jasového analyzátoru při stejném clonovém čísle:

Co se týče vlivu umístění středu snímku jasového analyzátoru, při stejném clonovém čísle, tak z naměřených dat (Tab. 16) je patrné, že umístění středu snímku má vliv na výslednou odchylku počítané osvětlenosti. K největší chybě dochází při nastavení středu snímku jasového analyzátoru na horizont. Naopak se snižujícím se sklonem jasového analyzátoru, tj. umístění středu snímku na nižší řady, dochází k menší odchylce výsledné vypočítané osvětlenosti. Z tohoto důvodu se pro další měření bude využívat umístění středu snímku jasového analyzátoru na prostřední řadu, tj. na vzorek na pozici č.13.

Umístění středu snímku, právě na tento vzorek, bude výhodné z hlediska dalšího terénního měření. Jelikož cílem dalších měření je provést měření osvětlenosti na vozovce s použitím pouze 1 vzorku, tzv. referenčního, který se bude umísťovat právě na pozici č.13.

Tab. 16 Vliv umístění středu snímku při stejné cloně

Střed snímku	Čas expozice	Clonové číslo	Průměrná reálná odchylka jasu pro 1 měření	Průměrná reálná odchylka jasu pro 3 měření	Průměrná procentní odchylka osvětlenosti vzorků	Průměrná absolutní procentní odchylka osvětlenosti vzorků	Směrodatná odchylka procentní odchylky osvětlenosti	
			( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )	(%)	(%)	$\sigma$ (%)	$2\cdot\sigma$ (%)
Horizont	1.3	2.8	0,24	0,17	-12,61	12,6	2,1	4,1
5. řada			0,66	0,46	-11,62	11,6	1,9	3,8
4. řada			0,11	0,08	-14,94	14,9	4,3	8,6
3. řada			0,60	0,43	-13,14	13,1	2,5	5,0
2. řada			0,08	0,06	-13,09	13,1	2,4	4,9
Horizont	2.5	5.6	1,60	0,92	-18,75	18,8	4,4	8,8
5. řada			2,59	1,50	-12,27	12,3	3,0	5,9
4. řada			4,67	2,70	-9,78	9,8	2,6	5,1
3. řada			2,25	1,30	-9,89	9,9	3,4	6,9
2. řada			1,66	0,96	-8,18	8,2	3,2	6,5
5. řada	6	9	0,73	0,42	-10,81	10,8	3,0	6,1
4. řada			1,19	0,69	-9,37	9,4	2,7	5,4
5. řada	15	14	1,89	1,09	-12,24	12,2	2,8	5,7
4. řada			2,46	1,42	-8,29	8,3	3,1	6,2
5. řada	30	20	0,21	0,12	-11,25	11,3	3,0	6,0
4. řada			1,37	0,79	-11,72	11,7	3,3	6,5

## 6.5 Vliv pozice měřících vzorků vůči poloze svítidla

Cílem tohoto měření bylo ověřit vliv pozice měřících vzorků vůči svítidlu na výslednou odchylku měření osvětlenosti.

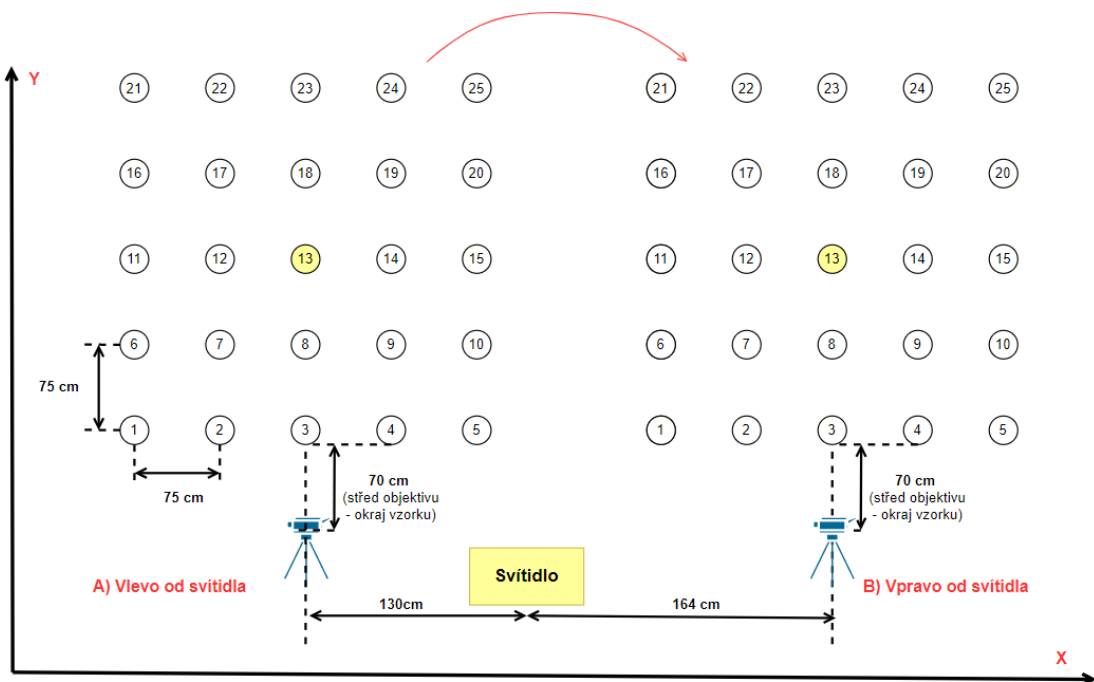
### 6.5.1 Popis měřícího stanoviště

Měření bylo realizováno stejném místě se stejným svítidlem jako je uvedeno v 6.4.1.

### 6.5.2 Popis měření

V rámci měření byly proměřeny dvě konfigurace vzorků: vlevo a vpravo od svítidla. Přičemž y-nová vzdálenost mezi svítidlem a vzorky byla zachována konstantní, stejně tak y-nová vzdálenost mezi měřícími vzorky a jasovým analyzátozem. Měnila se pouze x-ová pozice celé sítě měřících vzorků, včetně jasového analyzátozu. Jelikož cílem bylo zachovat stejnou konfiguraci měření a tím hodnotit pouze vliv posunu sítě měřících vzorků vůči svítidlu (viz Obr. 39).

Umístění jasového analyzátozu, tj. výška a vzdálenost od vzorků, stejně tak rozteč jednotlivých vzorků a umístění středu snímku je shodná jako v 6.4.2 (viz Obr. 39). Střed snímku jasového analyzátozu byl namířen na prostřední vzorek sítě měřících bodů (pozice 13.). Při samotném měření bylo pořízeno 5 snímků pro každou konfiguraci měřících vzorků. Výsledná hodnota vypočítané osvětlenosti vycházela z průměrné hodnoty jasu těchto 5 snímků.



Obr. 39 Situační schéma měření vlivu pozice vzorků vůči svítidlu A) měření vlevo od svítidla, B) měření vpravo od svítidla

### 6.5.3 Závěr měření

Pro možné srovnání vlivu pozice měřících vzorků vůči poloze svítidla bylo použité stejné clonové číslo pro obě konfigurace. V tomto případě clonové číslo 5.6. Výsledné naměřené a vyhodnocená data jsou uvedeny v Tab. 17.

Tab. 17 Vliv pozice měřících vzorků vůči poloze svítidla

Specifikace měření		Typ měření	A) Vlevo od svítidla (130 cm)				
			Odchylka od ref. osvětlenosti	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x} _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>
Výška analyzátoru	181 cm	5. řada		-7 %	7 %	-7 %	-5 %
Vzdálenost analyzátoru	80 cm	4. řada		-7 %	7 %	-8 %	-7 %
Rozteč měřících vzorků	75 cm	3. řada		-6 %	6 %	-7 %	-5 %
Čas expozice	2.5 s	2. řada		-4 %	4 %	-6 %	-3 %
Clonové číslo	5.6	1. řada		-3 %	3 %	-5 %	-2 %
Specifikace měření		Odchylka od ref. osvětlenosti	B) Vpravo od svítidla (165 cm)				
			$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x} _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	
Výška analyzátoru	181 cm	5. řada		-7 %	7 %	-9 %	-6 %
Vzdálenost analyzátoru	80 cm	4. řada		-6 %	6 %	-7 %	-5 %
Rozteč měřících vzorků	75 cm	3. řada		-6 %	6 %	-8 %	-4 %
Čas expozice	2.5 s	2. řada		-4 %	4 %	-6 %	-3 %
Clonové číslo	5.6	1. řada		-1 %	1 %	-2 %	0 %

Z naměřených hodnot je vyplývá, že při změně sítě měřících bodů, včetně jasového analyzátoru vůči svítidlu, přičemž dochází ke změně pouze v X-ose (Obr. 39), tj. jsou zachovány měřící úhly a pozice jasového analyzátoru vůči měřícím vzorkům. Dochází k minimální změně procentní odchylky osvětlenosti vůči referenční osvětlenosti napříč všemi řadami vzorků, včetně maximálních a minimálních odchylek. Vliv na tyto malé odchylky má především opakovatelnost jednotlivých měření s clonovým číslem 5.6, dále se do této odchylky promítne samotná přesnost umístění měřících vzorků, umístění analyzátoru a zejména samotná přesnost měření jasového analyzátoru.

Přes výše uvedené vstupující zdroje chyb lze konstatovat, že pozice měřících vzorků vůči svítidlu má zanedbatelný vliv na výslednou přesnost vypočítané osvětlenosti. Ovšem je nutné dodržení konstantní polohy jasového analyzátoru vůči měřeným vzorkům.

## 6.6 Měření osvětlenosti biodynamického svítidla

Cílem tohoto měření je otestovat měřící metodu pod jiným typem svítidla (LED), na jiném asfaltovém povrchu a za jiných okolních podmínek. Dále je cílem zaznamenat přechodný děj biodynamického svítidla, kdy v nočních hodinách dochází ke změně teploty chromatičnosti a intenzity osvětlení daného svítidla.

### 6.6.1 Popis měřícího stanoviště

Měření bylo realizováno na komunikaci v Brně, mezi fakultami VUT elektrotechniky a komunikačních technologií T12 a T10. Osvětlení na této komunikaci je realizováno biodynamickými svítidly. Tyto svítidla mění svoji teplotu chromatičnosti a intenzitu osvětlení ve třech režimech v závislosti na denní době (ráno/večer).



Obr. 40 Měření biodynamického svítidla (režim  $T_{cp} \approx 2500$  K)

### 6.6.2 Popis měření

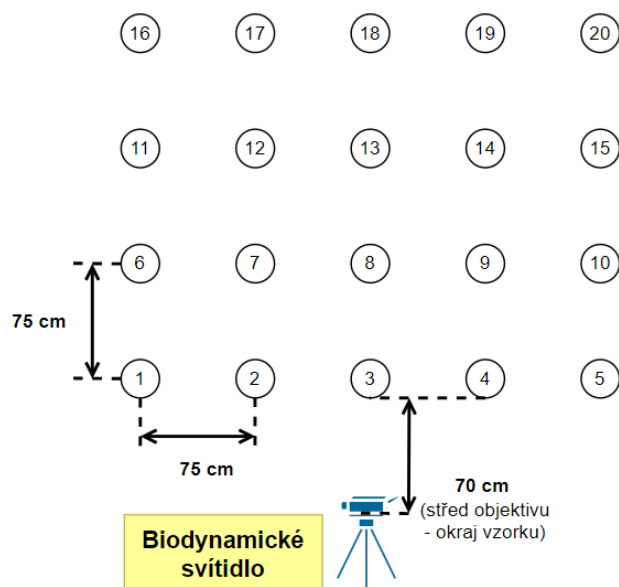
Při měření biodynamického svítidla bylo nutné použít pouze sít měřících vzorků 4x5, tj. byly použity pouze 4 měřící řady (Obr. 40). Tato úprava byla nutná vzhledem k malé šířce měřené vozovky, kde při použití 5 řad vzorků bylo zabráno 70 % šířky měřené komunikace a nebyla zajištěna průjezdnost projíždějících vozidel alespoň v jednom směru komunikace. Rozteč měřících vzorků byla opět 75x75 cm. Umístění středu

objektivu jasového analyzátoru bylo taktéž opět ve vzdálenosti 70 cm od okraje první řady vzorků a výška středu objektivu nad měřenou vozovkou byla 190 cm (viz Obr. 41)

Samotné měření se díky přechodnému ději dělí na tři samostatné části:

- měření v ustáleném režimu ( $T_{cp} \approx 1800$  K),
- měření přechodného děje mezi dvěma režimy,
- měření v ustáleném režimu ( $T_{cp} \approx 2500$  K).

V případě měření ustálených stavů bylo pořízeno vždy 5 snímků pro clonové číslo 2.8 a 5.6. Výsledná hodnota vypočítané osvětlenosti vycházela z průměrné hodnoty jasu těchto 5 snímků. V případě měření přechodného děje byl jasový analyzátor LDA nastaven na automatické pořizování snímků v intervalu cca 7 vteřin. Výsledná změna režimů trvala zhruba 1 minutu a je tedy zaznamenána celkem 10 snímky (včetně snímků před a po přechodném ději).



Obr. 41 Situační schéma měření biodynamického svítidla

### 6.6.3 Závěry měření

#### Poznámka:

V rámci vyhodnocení tohoto měření již byla použita korekce měřicího úhlu jednotlivých měřicích vzorků, která je blíže popsána v kapitole 6.7.1.

#### Ustálené stavy svítidla:

Shrnutí výsledků obou ustálených stavů biodynamického svítidla je uvedené v Tab. 18. Z výsledků měření je patrné, že při nízkých hodnotách osvětlenosti se zvyšuje odchylka výsledné vypočítané osvětlenosti. Při bližším pohledu na referenční vzorek (Tab. 19) je patrné, že při režimu svítidla  $T_{cp} \approx 2500$  K dosahuje referenční osvětlenost na referenčním vzorku hodnoty 44 lx. Přičemž následná vypočítaná osvětlenost, z měření jasu na vzorku, dosahuje hodnoty 38 lx bez korekce a 40 lx s korekcí úhlu. Což odpovídá procentuální odchylce od referenční osvětlenosti -6 % a -4 %. Následně po přechodu svítidla do druhého režimu ( $T_{cp} \approx 1800$  K) dosahuje referenční osvětlenost hodnoty 22 lx, vypočítaná osvětlenost 19 lx bez korekce a 20 lx s korekcí úhlu. Což odpovídá procentuální odchylce -14 % a -9 % od referenční osvětlenosti. Přičemž se měřicí soustava a okolní podmínky žádným způsobem během změny režimu svítidla nezměnily, jedinou proměnou je pouze změna režimu svítidla.

Tab. 18 Měření ustálených stavů biodynamického svítidla

Použité clonové číslo	2.8									
Typ měření	Měření č.5 - biodynamické svítidlo - před změnou ( $T_{cp} \approx 2500$ K)									
Odchylka od ref. osvětlenosti	Bez korekce				Korekce pozorovacího úhlu					
	$\bar{x}\%$	$ \bar{x} \%$	max%	min%	$\bar{x}\%$	$ \bar{x} \%$	max%	min%		
4. řada		-12%	12%	-15%	-3%		-5%	6%	-9%	-3%
3. řada		-12%	12%	-16%	-2%		-5%	6%	-11%	-2%
2. řada		-9%	9%	-13%	0%		-2%	3%	-8%	0%
1. řada		-6%	6%	-10%	1%		-1%	1%	-3%	1%
Typ měření	Měření č.6 - biodynamické svítidlo - po změně ( $T_{cp} \approx 1800$ K)									
Odchylka od ref. osvětlenosti	Bez korekce				Korekce pozorovacího úhlu					
	$\bar{x}\%$	$ \bar{x} \%$	max%	min%	$\bar{x}\%$	$ \bar{x} \%$	max%	min%		
4. řada		-14%	14%	-16%	-11%		-8%	8%	-10%	-5%
3. řada		-12%	12%	-14%	-10%		-7%	7%	-9%	-4%
2. řada		-9%	9%	-13%	-8%		-3%	3%	-7%	-1%
1. řada		-7%	7%	-11%	-4%		-1%	2%	-5%	1%

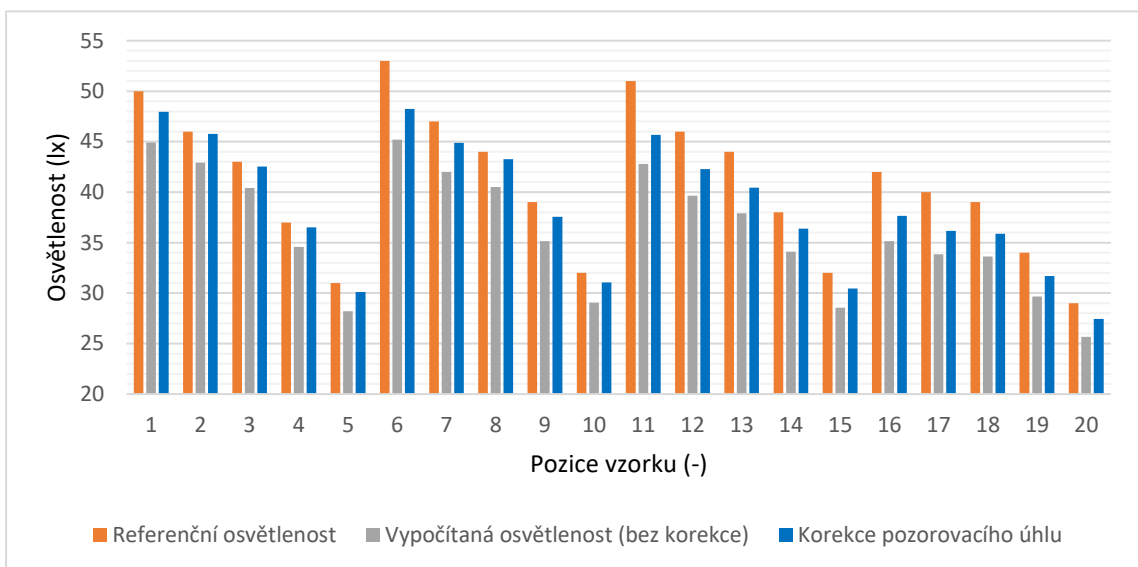
Tab. 19 Hodnota osvětlenosti na ref. vzorku – pozice 13. (použité clonové číslo 2.8)

Režim svítidla	Referenční osvětlenost	Vypočítaná osvětlenost (bez korekce)		Korekce pozorovacího úhlu		Ideální korekce	
		$E$ (lx)	$x_{\%}$ (%)	$E$ (lx)	$x_{\%}$ (%)	$E$ (lx)	$x_{\%}$ (%)
$T_{cp}$ (K)	$E$ (lx)	$E$ (lx)	$x_{\%}$ (%)	$E$ (lx)	$x_{\%}$ (%)	$E$ (lx)	$x_{\%}$ (%)
2500	44	38	-6	40	-4	44	0
1800	22	19	-14	20	-9	22	0

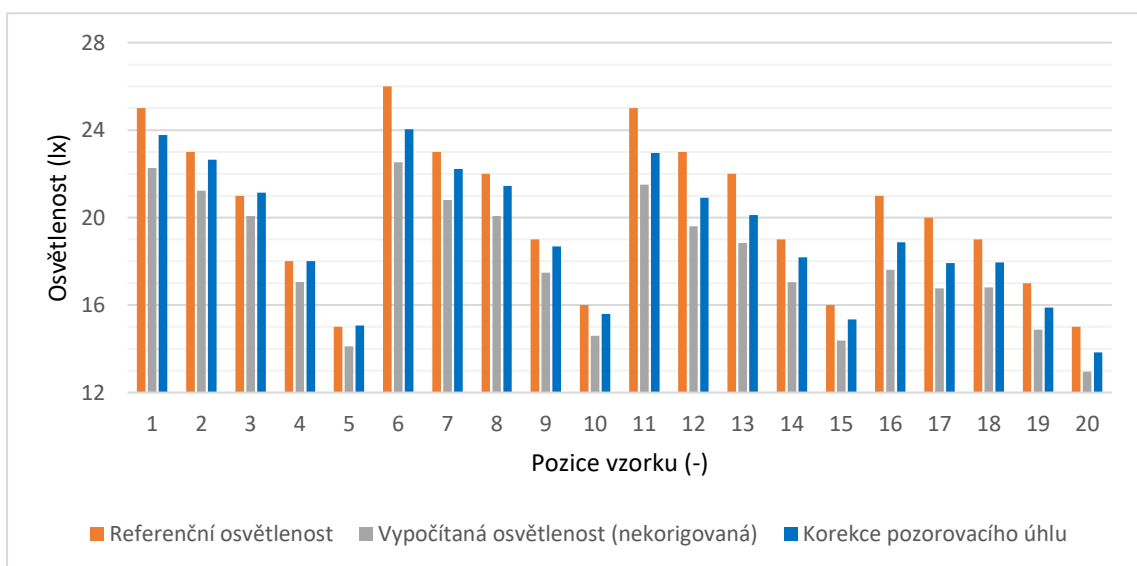
Tato změna procentuální odchylky je způsobená především tím, že při nízkých hodnotách osvětlenosti už do výsledné přesnosti vypočítané osvětlenosti významně vstupuje chyba určení referenční osvětlenosti. Například při osvětlenosti 20 lx odpovídá odchylka 1 lx

přibližně 5 % odchylce vypočítané osvětlenosti. Je zde měření tedy velmi ovlivněno přesností použitého luxmetru, a hlavně přesností odečtu naměřené hodnoty z přístroje. Jelikož veškeré referenční hodnoty osvětlenosti byly odečítány s přesností na celé jednotky luxů.

Z tohoto měření tedy vyplývá, že přesnost metody se v tomto případě snižuje s klesající hodnotou osvětlenosti. Výsledné hodnoty osvětlenosti všech měřicích vzorků v obou režimech svítidla jsou uvedeny na Obr. 42 a Obr. 43. Tento závěr ovšem platí při použití luxmetru jako referenčního měřicího přístroje. Při finálním použití měřicí metody se neuvažuje používání luxmetru a jasový analyzátor LDA má nejistotu měření stejnou nezávisle na hodnotě měřeného jasu.



Obr. 42 Osvětlenost na jednotlivých vzorcích (ustálený režim  $T_{cp} \approx 2500$  K)



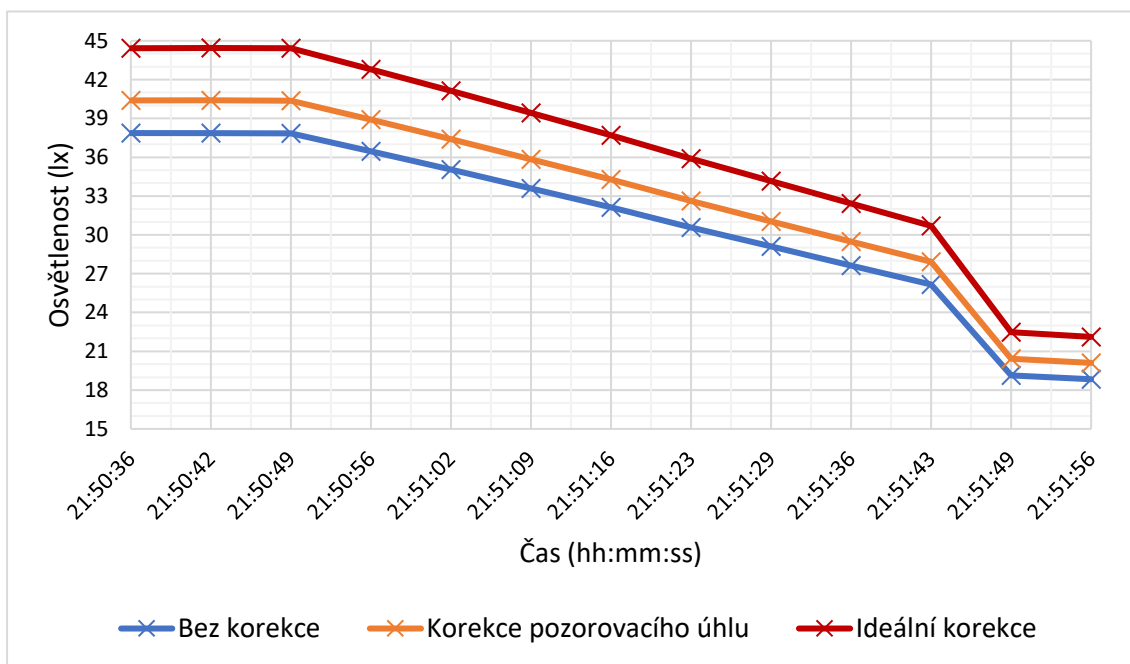
Obr. 43 Osvětlenosti na jednotlivých vzorcích (ustálený režim  $T_{cp} \approx 1800$  K)

### Přechodný děj svítidla:

V případě přechodného děje je zde pro přehlednost uveden podrobněji průběh osvětlenosti pouze na referenčním vzorku (pozice 13.).

Výsledné průběhy naměřené osvětlenosti jsou uvedeny na Obr. 44. Konkrétně se jedná o následující průběhy.

- Bez korekce, kde se jedná pouze o přepočítání naměřené jasů na vzorku na osvětlenost dle vzorce (2.13).
- Korekce úhlu vychází z korekce hodnoty naměřené jasů podle korekčních koeficientů stanovených v podkapitole 6.7.1.
- Ideální korekce je v tomto případě realizována tak, že se vypočítaná osvětlenost zkorigovala tak, aby výsledná odchylka od referenční osvětlenosti byla 0 %. Tato korekce lze v tomto případě realizovat, jelikož v tomto měření známe referenční hodnotu osvětlenosti na každém vzorku. Tato korekce je zde použita jenom z důvodu zaznamenání co nejpřesnějšího průběhu osvětlenosti. V případě reálného použití metody, kdy nebude známá referenční osvětlenost, již tato korekce není možná a měření je nutné realizovat pouze s korekčními koeficienty stanovenými v podkapitole 6.7.1 případně 6.8.4.



Obr. 44 Průběh osvětlenosti na referenčním vzorku (pozice 13.)

## 6.7 Měření se sítí měřicích vzorků

V rámci této kapitoly je shrnuto a vyhodnoceno veškeré terénní měření, kde byly splněny finální podmínky určené pro měřicí metodu, tj.:

- rozteč měřicích vzorků 75x75 cm,
- vzdálenost středu snímku jasového analyzátoru 70 cm od okraje první řady vzorků,
- výška středu snímku jasového analyzátoru LDA v rozmezí 180-200 cm nad měřenou vozovkou,
- střed snímku jasového analyzátoru namířen na prostřední vzorek sítě měřicích vzorků (13. pozice),
- použita clona 2.8 nebo 5.6.

Pro přehlednost shrnutí jednotlivých výsledků jsou jednotlivá měření pojmenována následujícím způsobem:

- **měření č.1 a č.2** – realizováno v rámci měření vlivu umístění středu snímku a použitého clonového čísla na výsledky měření viz kap. 6.4,
- **měření č.3 a č.4** – realizováno v rámci měření vlivu pozice měřicích vzorků vůči poloze svítidla – vlevo (č.3) a vpravo (č.4) od svítidla – viz kap. 6.5,
- **měření č.5 a č.6** – realizováno v rámci měření biodynamického svítidla – před změnou (č.5) a po změně (č.6) – viz kap. 6.6.

Všechna měření se dále hodnotila na základě použitého clonového čísla, tj. měření s clonovým číslem 2.8 a 5.6. Souhrn těchto jednotlivých měření je uveden v Tab. 25 a Tab. 24. Jelikož každé jednotlivé měření obsahuje sadu 25 měřicích vzorků a každý vzorek má konkrétní úhel, jas, odchylku od referenční osvětlenosti apod. Jsou jednotlivé měření hodnoceny na základě jednotlivých řad vzorků. Kde 1. řada značí řadu vzorků nejbliže k jasovému analyzátoru.

Vzhledem k tomu, že jas měřený na jednotlivých vzorcích je závislý na úhlu měření, jak již bylo zjištěno v laboratorním měření (viz Obr. 22), a potvrzeno v řadě testovacích terénních měření, nabízí se zde možnost korekce této odchylky.

### 6.7.1 Korekce měřicího úhlu

Pro samotnou korekci měřicího úhlu byla využita naměřená závislost průměrné odchylky vzorků na úhlu měření (viz Obr. 22) v rámci laboratorního měření. Výsledná závislost je proložena spojnicí trendu – polynomem 4. stupně. Jelikož se jedná o závislost průměrné odchylky všech 25 vzorků na měřicím úhlu, tak byl vybrán právě polynom 4. stupně, který nejlépe reflektuje naměřená data. Z této spojnice trendu byla určena následující rovnice trendu:

$$y = 3 \cdot 10^{-6}x^4 - 0,0007x^3 + 0,0563x - 1,8931x + 29,483 \quad (6.1)$$

kde  $y$  je výsledná procentní odchylka jasu a  $x$  je úhel měření.

Následně se určí korekční koeficienty pro každý jednotlivý úhel, pod kterým jsou jednotlivé vzorky snímány, podle vzorce:

$$k_{\text{úhel}} = \frac{(100 + y)}{100} \quad (-) \quad (6.2)$$

Do úhlu měření jednotlivých vzorků je uvažován i sklon dané vozovky. Ovšem i při měření na vozovce se sklonem  $10^\circ$  (Tab. 21) dojde ke změně měřicího úhlu, vůči rovné vozovce (Tab. 20), maximálně o  $5^\circ$  a to pouze v první řadě vzorků. Se snižující se vzdáleností vzorku od jasového analyzátoru dochází k menší změně výsledného úhlu měření při sklonu vozovky.

Tab. 20 Ukázka měřicích úhlů jednotlivých vzorků a jejich odpovídající korekční koeficienty – sklon vozovky  $0^\circ$

Úhel pod kterým je snímán jednotlivý vzorek					$k_{\text{úhel}} (-)$				
25°	26°	27°	26°	25°	1,076	1,073	1,073	1,073	1,076
29°	31°	32°	31°	29°	1,069	1,068	1,068	1,068	1,069
35°	38°	40°	38°	35°	1,067	1,067	1,067	1,067	1,067
42°	48°	51°	48°	42°	1,068	1,068	1,068	1,068	1,068
48°	60°	67°	60°	48°	1,068	1,062	1,052	1,062	1,068
LDA					LDA				

Tab. 21 Ukázka měřicích úhlů jednotlivých vzorků a jejich odpovídající korekční koeficienty – sklon vozovky  $10^\circ$

Úhel pod kterým je snímán jednotlivý vzorek					$k_{\text{úhel}} (-)$				
24°	26°	26°	26°	25°	1,076	1,073	1,073	1,073	1,076
28°	30°	32°	32°	30°	1,069	1,068	1,068	1,068	1,069
33°	37°	40°	39°	36°	1,067	1,067	1,067	1,067	1,067
38°	45°	51°	50°	44°	1,068	1,068	1,068	1,068	1,068
43°	55°	67°	65°	53°	1,068	1,062	1,052	1,062	1,068
LDA					LDA				

Výsledná zkorigovaná hodnota naměřeného jasu se určí:

$$L_{\text{korig}} = L_{\text{prům}} \cdot k_{\text{úhel}} \quad (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (6.3)$$

kde  $L_{\text{prům}}$  je aritmetický průměr naměřeného jasu na konkrétním vzorku stanovený jako aritmetický průměr ze všech pořízených snímků:

$$L_{\text{prům}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{\text{vzorku},i} \quad (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (6.4)$$

Kde  $n$  je počet pořízených snímků v rámci konkrétního měření a  $L_{\text{vzorku},i}$  je konkrétní hodnota změřeného jasu daného vzorku.

Efektivnost korekce se hodnotila z hlediska změny procentní odchylky osvětlenosti od referenční hodnoty osvětlenosti. Pro ukázkou vlivu korekce úhlu jsou zde uvedeny dva příklady pro jedno konkrétní měření, kdy celé měřicí stanoviště zůstalo pro obě měření konstantní. Jediná proměnná je zde pou žitá clona 2.8 (Tab. 22) a 5.6 (Tab. 23).

Tab. 22 Ukázka korekce osvětlenosti podle úhlu pro měření č.1 (clonové číslo: 2.8)

Specifikace měření - měření č.1		Procentní odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty - bez korekce (%)					Procentní odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty - korekce pozorovacího úhlu (%)				
Výška analyzátoru	191 cm	-14	-15	-14	-16	-16	-8	-8	-8	-9	-10
Vzdálenost analyzátoru	70 cm	-16	-15	-14	-14	-16	-10	-9	-9	-9	-10
Rozteč měřících vzorků	75 cm	-14	-12	-11	-11	-16	-8	-6	-5	-5	-10
Čas expozice	1 s	-13	-10	-8	-10	-13	-8	-4	-2	-4	-8
Clonové číslo	2.8	-14	-7	-9	-12	-13	-8	-1	-4	-6	-7

Tab. 23 Ukázka korekce osvětlenosti podle úhlu pro měření č.2 (clonové číslo: 5.6)

Specifikace měření - měření č.2		Procentní odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty - bez korekce (%)					Procentní odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty - korekce pozorovacího úhlu (%)				
Výška analyzátoru	191 cm	-12	-13	-13	-14	-14	-6	-6	-6	-8	-8
Vzdálenost analyzátoru	70 cm	-13	-12	-13	-12	-14	-7	-6	-7	-6	-8
Rozteč měřících vzorků	75 cm	-10	-9	-9	-9	-12	-4	-3	-3	-3	-7
Čas expozice	1 s	-9	-6	-6	-7	-10	-3	0	1	-1	-4
Clonové číslo	5.6	-3	-3	-3	-4	-10	4	3	2	2	-4

Na uvedené ukázce je patrné, že při zkorigování úhlu jednotlivých vzorků, dojde k výraznému poklesu výsledné odchylky osvětlenosti od referenční hodnoty.

## 6.7.2 Vyhodnocení měření osvětlenosti se sítí měřicích vzorků

V následující podkapitole jsou shrnuty všechny terénní měření realizované s celou sítí měřicích vzorků 5x5, včetně měření biodynamického svítidla, kde je použita síť 4x5 měřicích vzorků. Dále jsou terénní měření rozlišeny podle použitého clonového čísla, tj. 5.6 (Tab. 24) a 2.8. (Tab. 25). U všech měření jsou uvedeny procentuální odchylky osvětlenosti pro osvětlenost před korekcí a po korekci měřicího o úhlu.

Tab. 24 Souhrn vlivu korekce úhlu měření napříč všemi terénními měřeními – clonové číslo 5.6

Použité clonové číslo	5.6									
Typ měření	Měření č.1 - sodíková vysokotlaká výbojka									
Odchylka od ref. osvětlenosti	Před korekcí				Korekce pozorovacího úhlu					
	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>		
5. řada		-13 %	13 %	-14 %	-12 %		-7 %	7 %	-8 %	-6 %
4. řada		-13 %	13 %	-14 %	-12 %		-7 %	7 %	-8 %	-6 %
3. řada		-10 %	10 %	-12 %	-9 %		-4 %	4 %	-7 %	-3 %
2. řada		-8 %	8 %	-10 %	-6 %		-1 %	2 %	-4 %	1 %
1. řada		-5 %	5 %	-10 %	-3 %		1 %	3 %	-4 %	4 %
Typ měření	Měření č.2 - sodíková vysokotlaká výbojka									
Odchylka od ref. osvětlenosti	Před korekcí				Korekce pozorovacího úhlu					
	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>		
5. řada		-15 %	15 %	-16 %	-14 %		-8 %	8 %	-9 %	-7 %
4. řada		-15 %	15 %	-15 %	-14 %		-9 %	9 %	-10 %	-9 %
3. řada		-11 %	11 %	-14 %	-10 %		-5 %	5 %	-8 %	-4 %
2. řada		-9 %	9 %	-12 %	-7 %		-3 %	3 %	-6 %	-1 %
1. řada		-6 %	6 %	-9 %	-4 %		-1 %	2 %	-3 %	1 %
Typ měření	Měření č.3 - sodíková vysokotlaká výbojka - vlevo od svítidla									
Odchylka od ref. osvětlenosti	Před korekcí				Korekce pozorovacího úhlu					
	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>		
5. řada		-7 %	7 %	-7 %	-5 %		0 %	1 %	0 %	2 %
4. řada		-7 %	7 %	-8 %	-7 %		-1 %	1 %	-1 %	0 %
3. řada		-6 %	6 %	-7 %	-5 %		0 %	1 %	-1 %	1 %
2. řada		-4 %	4 %	-6 %	-3 %		2 %	2 %	0 %	4 %
1. řada		-3 %	3 %	-5 %	-2 %		3 %	3 %	2 %	4 %
Typ měření	Měření č.4 - sodíková vysokotlaká výbojka - vpravo od svítidla									
Odchylka od ref. osvětlenosti	Před korekcí				Korekce pozorovacího úhlu					
	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>		
5. řada		-7 %	7 %	-9 %	-6 %		0 %	1 %	-2 %	1 %
4. řada		-6 %	6 %	-7 %	-5 %		0 %	1 %	-1 %	2 %
3. řada		-6 %	6 %	-8 %	-4 %		1 %	1 %	-2 %	2 %
2. řada		-4 %	4 %	-6 %	-3 %		3 %	3 %	1 %	4 %
1. řada		-1 %	1 %	-2 %	0 %		5 %	5 %	4 %	6 %
Typ měření	Měření č.5 - biodynamické svítidlo - před změnou (T <sub>cp</sub> ≈ 2500 K)									
Odchylka od ref. osvětlenosti	Před korekcí				Korekce pozorovacího úhlu					
	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>		
4. řada		-10 %	10 %	-12 %	-6 %		-4 %	4 %	-6 %	0 %
3. řada		-9 %	9 %	-13 %	-6 %		-3 %	3 %	-7 %	1 %
2. řada		-6 %	6 %	-10 %	-4 %		1 %	2 %	-4 %	3 %
1. řada		-3 %	3 %	-6 %	-1 %		3 %	3 %	1 %	6 %
Typ měření	Měření č.6 - biodynamické svítidlo - po změně (T <sub>cp</sub> ≈ 1800 K)									
Odchylka od ref. osvětlenosti	Před korekcí				Korekce pozorovacího úhlu					
	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>		
4. řada		-13 %	13 %	-15 %	-11 %		-7 %	7 %	-9 %	-5 %
3. řada		-12 %	12 %	-14 %	-9 %		-6 %	6 %	-8 %	-3 %
2. řada		-9 %	9 %	-12 %	-7 %		-2 %	2 %	-6 %	-1 %
1. řada		-7 %	7 %	-11 %	-3 %		-1 %	2 %	-4 %	2 %

Tab. 25 Souhrn vlivu korekce úhlu měření napříč všemi terénními měřeními – clonové číslo

Použité clonové číslo	2.8															
Typ měření	Měření č.1 - sodíková vysokotlaká výbojka															
Odchylna od ref. osvětlenosti	Bez korekce				Korekce pozorovacího úhlu				Korekce lineárního trendu							
	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k. koef.			
5. řada		-15%	15%	-16%	-14%		-9%	9%	-10%	-8%		0%	1%	-1%	1%	1,10
4. řada		-15%	15%	-16%	-14%		-9%	9%	-10%	-9%		-1%	1%	-2%	0%	1,09
3. řada		-13%	13%	-16%	-11%		-7%	7%	-10%	-5%		-1%	2%	-4%	1%	1,07
2. řada		-11%	11%	-13%	-8%		-5%	5%	-8%	-2%		-1%	2%	-4%	2%	1,04
1. řada		-11%	11%	-14%	-7%		-5%	5%	-8%	-1%		-3%	4%	-6%	1%	1,02
Typ měření	Měření č.2 - sodíková vysokotlaká výbojka															
Odchylna od ref. osvětlenosti	Bez korekce				Korekce pozorovacího úhlu				Korekce lineárního trendu							
	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k. koef.			
5. řada		-15%	15%	-16%	-14%		-8%	8%	-9%	-7%		1%	1%	0%	2%	1,10
4. řada		-15%	15%	-15%	-14%		-9%	9%	-10%	-9%		-1%	1%	-1%	0%	1,09
3. řada		-11%	11%	-14%	-10%		-5%	5%	-8%	-4%		1%	2%	-1%	2%	1,07
2. řada		-9%	9%	-12%	-7%		-3%	3%	-6%	-1%		1%	2%	-2%	3%	1,04
1. řada		-6%	6%	-9%	-4%		-1%	2%	-3%	1%		1%	2%	-1%	3%	1,02
Typ měření	Měření č.5 - biodynamické svítidlo - před změnou (T <sub>cp</sub> = 2500 K)															
Odchylna od ref. osvětlenosti	Bez korekce				Korekce pozorovacího úhlu				Korekce lineárního trendu							
	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k. koef.			
4. řada		-12%	12%	-15%	-3%		-5%	6%	-9%	-3%		2%	2%	-1%	6%	1,09
3. řada		-12%	12%	-16%	-2%		-5%	6%	-11%	-2%		0%	3%	-4%	4%	1,07
2. řada		-9%	9%	-13%	0%		-2%	3%	-8%	0%		1%	3%	-4%	4%	1,04
1. řada		-6%	6%	-10%	1%		-1%	1%	-3%	1%		1%	2%	-2%	3%	1,02
Typ měření	Měření č.6 - biodynamické svítidlo - po změně (T <sub>cp</sub> = 1800 K)															
Odchylna od ref. osvětlenosti	Bez korekce				Korekce pozorovacího úhlu				Korekce lineárního trendu							
	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_{\%}$	$ \bar{x}' _{\%}$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k. koef.			
4. řada		-14%	14%	-16%	-11%		-8%	8%	-10%	-5%		1%	2%	-2%	3%	1,09
3. řada		-12%	12%	-14%	-10%		-7%	7%	-9%	-4%		0%	2%	-2%	3%	1,07
2. řada		-9%	9%	-13%	-8%		-3%	3%	-7%	-1%		1%	2%	-3%	3%	1,04
1. řada		-7%	7%	-11%	-4%		-1%	2%	-5%	1%		1%	2%	-3%	3%	1,02

Při porovnání všech provedených terénních měření se všemi měřicími vzorky je patrné, že korekce měřicího úhlu ve všech případech významně přispěla k přesnosti vypočítané osvětlenosti.

#### Clonové číslo 5.6:

V případě měření s clonovým číslem 5.6 dochází napříč měřeními k různým odchylkám napříč všemi měřicími řadami. Nelze tedy na základě naměřených dat provést bližší korekci. Ovšem i přes zmíněné nedostatky nedošlo po zkorigování měřicího úhlu v žádném terénním měření k větší odchylce výsledné osvětlenosti než 10 % od referenční osvětlenosti.

#### Clonové číslo 2.8:

Měření s clonovým číslem 2.8 vykazuje obecně větší odchylky od referenční hodnoty osvětlenosti, ale má lepší opakovatelnost napříč všemi terénními měřeními. V případě zkorigování měřicího úhlu nedošlo v žádném terénním měření k větší odchylce výsledné osvětlenosti než 11 % od referenční osvětlenosti. Jelikož při tomto clonovém čísle vykazuje odchylka osvětlenosti určitý lineární trend se zvyšující se vzdáleností od jasového analyzátoru, tak byla na korekci úhlu aplikovaná ještě „korekce lineárního trendu“. Kde jde pouze o vynásobení osvětlenosti všech vzorků v jednotlivé řadě určitým

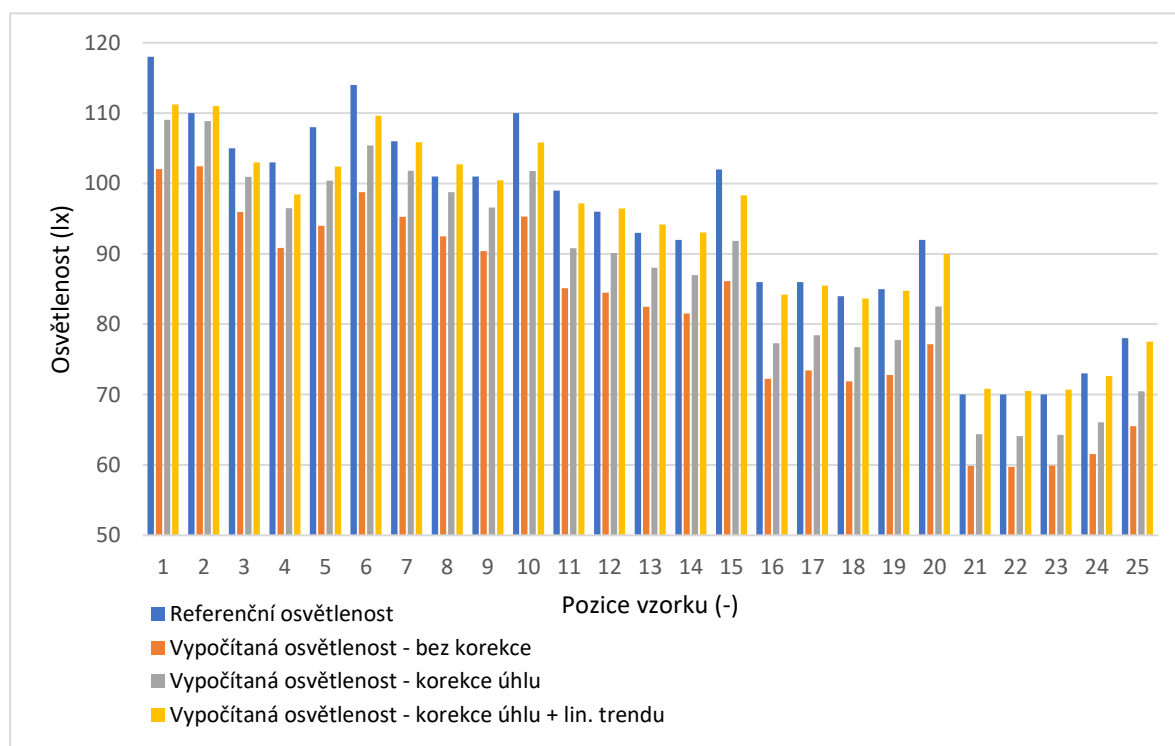
korekčním koeficientem. Korekční koeficienty byly stanoveny experimentálně tak, aby výsledná odchylka napříč všemi měřeními s clonovým číslem 2.8 byla co nejmenší. Výsledné korekční koeficienty jsou uvedeny v Tab. 25. Při aplikaci těchto korekčních koeficientů dojde k významnému snížení odchylky osvětlenosti. Pro ukázkou jsou v Tab. 26 uvedeny konkrétní hodnoty osvětlenosti a odchylky osvětlenosti pro měření č.1. Výsledné hodnoty osvětlenosti jsou dále zobrazeny v grafu (Obr. 45).

Tab. 26 Konkrétní hodnoty osvětlenosti a její odchylky pro měření č.1

Specifikace měření - měření č.1		Procentuální odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty - bez korekce (%)					Procentuální odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty - po korekci pozorovacího úhlu (%)					Procentuální odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty - po korekci pozorovacího úhlu a lineárního trendu (%)				
Výška analyzátoru	191 cm	-14	-15	-14	-16	-16	-8	-8	-8	-9	-10	1	1	1	0	-1
Vzdálenost analyzátoru	70 cm	-16	-15	-14	-14	-16	-10	-9	-9	-9	-10	-2	-1	0	0	-2
Rozteč měřících vzorků	75 cm	-14	-12	-11	-11	-16	-8	-6	-5	-5	-10	-2	0	1	1	-4
Čas expozice	1 s	-13	-10	-8	-10	-13	-8	-4	-2	-4	-8	-4	0	2	-1	-4
Clonové číslo	2.8	-14	-7	-9	-12	-13	-8	-1	-4	-6	-7	-6	1	-2	-4	-5

Referenční osvětlenost jednotlivých vzorků (lx)					Vypočítaná průměrná osvětlenost jednotlivých měřících vzorků - bez korekce (lx)					Vypočítaná průměrná osvětlenost jednotlivých vzorků - po korekci pozorovacího úhlu (lx)					Vypočítaná průměrná osvětlenost jednotlivých vzorků - po korekci pozorovacího úhlu a lineárního trendu (lx)				
70	70	70	73	78	60	60	60	62	66	64	64	64	66	70	71	71	71	73	78
86	86	84	85	92	72	73	72	73	77	77	78	77	78	83	84	85	84	85	90
99	96	93	92	102	85	84	82	82	86	91	90	88	87	92	97	96	94	93	98
114	106	101	101	110	99	95	92	90	95	105	102	99	97	102	110	106	103	100	106
118	110	105	103	108	102	102	96	91	94	109	109	101	97	100	111	111	103	98	102



Obr. 45 Hodnoty osvětlenosti jednotlivých měřících vzorků pro měření č.1

## 6.8 Měření osvětlenosti s jedním referenčním vzorkem

Tato kapitola se věnuje určení osvětlenosti konkrétní plochy vozovky na základě měření pouze s jedním referenčním vzorkem. Jako referenční vzorek je používán vzorek na pozici č.13, tj. prostřední vzorek sítě měřících bodů. Veškerá měření s referenčním vzorkem byly realizovány současně s měřením se všemi vzorky. Tedy pro výsledné vyhodnocení měření se použije stejných pojmenování jednotlivých měření jako je definované v úvodu kapitoly 6.7. Jednak z hlediska zvýšení přehlednosti měření, ale také pro porovnání výsledků měření mezi jednotlivými metodami – měření se všemi vzorky a měření s jedním referenčním vzorkem.

### 6.8.1 Postup měření

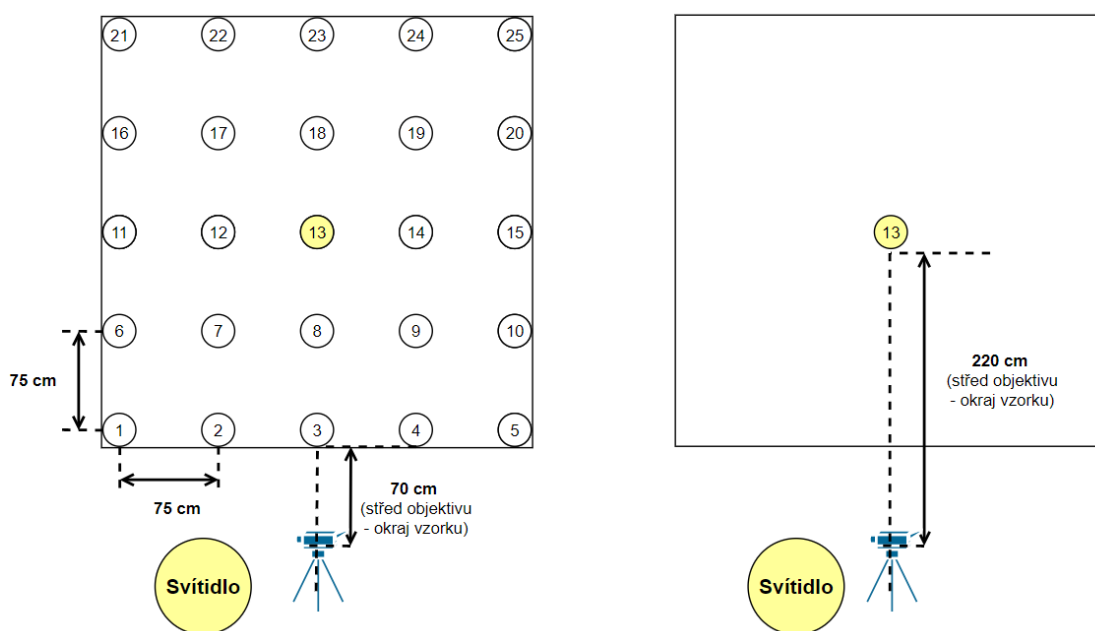
Jak již bylo řečeno, měření s referenčním vzorkem probíhalo současně s měřením se všemi vzorky. Tento postup byl zvolen záměrně, jelikož pro vyhodnocení metody je nutné znát referenční hodnotu osvětlenosti v celé měřené ploše. Z toho důvodu měření probíhalo následujícím způsobem.

1. Rozmístily se měřící vzorky v síti 5x5 s roztečí 75cm.
2. Jasový analyzátor se umístil do definované pozice, tj. v ose prostřední řady vzorků do vzdálenosti 70 cm od okraje první řady vzorků, do výšky 180-200cm (Obr. 46) a namířil se středem snímku na prostřední referenční vzorek (pozice 13.).
3. Tato síť bodů se následně nasnímala pomocí jasového analyzátoru.
4. Dále se pro tuto síť měřících vzorků stanovila referenční osvětlenost každého jednotlivého vzorku pomocí luxmetru.
5. Poté se odebraly všechny vzorky kromě prostředního referenčního vzorku (pozice 13.)
6. Pořízení snímků měřené plochy, tj. pouze s jedním referenčním vzorkem.
7. Poté došlo k odebrání i referenčního vzorku.
8. Pořízení snímků měřené plochy, tj. v tomto případě již „prázdné“ měřené plochy (vozovky).
9. Vyhodnocení naměřených dat.

Pozn.: Při celém měření nedošlo k posunutí jednotlivých vzorků a změně pozice jasového analyzátoru a jeho nastavení, kvůli zachování konstantních podmínek po celou dobu měření.

V případě měření pouze s referenčním vzorkem a uvažování odchylky měření stanovené v rámci diplomové práce, je možné postup měření zkrátit a realizovat následujícím způsobem.

1. Umístit referenční vzorek na měřenou komunikaci.
2. Umístit jasový analyzátor do definované pozice, tj. v ose referenčního vzorku do vzdálenosti 70 cm od okraje první řady vzorků, do výšky 180-200cm (Obr. 46) a namířit střed snímku na střed referenčního vzorku.
3. Pořízení sady snímků jasovým analyzátozem LDA.
4. Změření referenční osvětlenosti na referenčním vzorku pomocí luxmetru.
5. Odebrání referenčního vzorku a zopakování pořízení sady snímků jasovým analyzátozem, tentokrát již „prázdné“ měřené plochy (vozovky).
6. Vyhodnocení naměřených dat.



Obr. 46 Situační schéma měření, vlevo – všechny vzorky, vpravo – pouze referenční vzorek

### 6.8.2 Zpracování naměřených snímků

V případě zpracování dat z jasového analyzátoru se postupovalo následovně:

1. Všechny pořízené snímky byly převedeny na jasové mapy v programu LumiDISP.
2. Následně se provedlo vymaskování měřících vzorků pomocí funkce „maskový detektor“ v programu LumiDISP (Obr. 26).
3. Výsledné vymaskované detektory se pomocí funkce „dávkové zpracování“ přenesly do všech pořízených snímků (včetně těch, kde je pouze referenční vzorek a samotný asfaltový povrch). Toto je nutné dodržet, aby bylo možné vyhodnotit stejná místa a plochy na všech snímcích.
4. Následně byly z programu LumiDISP exportována data o průměrných hodnotách jasu jednotlivých vymaskovaných detektorů pro všechna měření a tyto data byly následně zpracovány v programu Excel.



Obr. 47 Ukázka měření, vlevo - měření se všemi vzorky, vpravo - měření s referenčním vzorkem

### 6.8.3 Postup stanovení osvětlenosti na základě jednoho referenčního vzorku

V následující podkapitole je pro názornost uveden konkrétní postup, jak se stanovila osvětlenost měřené plochy při měření pouze s jedním referenčním vzorkem pro měření č.1 s clonovým číslem 2.8.

V rámci měření je nutné provést měření jasů měřené plochy s jedním referenčním vzorkem umístěných na pozici č.13 (Obr. 46). Dále se tento vzorek odstraní a změří se stejná plocha. Výsledné naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 27.

Tab. 27 Naměřené hodnoty jasů pro měření č.1 s referenčním vzorkem

Naměřená průměrná hodnota jasů na referenčním vzorku (cd·m <sup>-2</sup> )				
		24,2		

Naměřená průměrná hodnota jasů na asfaltu (cd·m <sup>-2</sup> )				
3,7	3,6	3,6	3,8	4,2
4,2	4,1	4,0	4,2	4,6
4,6	4,4	4,2	4,4	4,9
5,1	4,7	4,4	4,5	4,9
4,9	4,4	4,1	4,0	4,1

Pozn.: Aby bylo možné toto měření provést, je nutné použít stejnou vymaskovanou síť měřicích vzorků z měření se všemi měřicími vzorky viz Obr. 26.

Následně se vypočítá poměr jasů na referenčním vzorku:

$$p = \frac{L_{\text{vzorku}}}{L_{\text{ref.asf.}}} = \frac{24,2}{4,2} = 5,76 \quad (-) \quad (6.5)$$

Tímto poměrem se následně vynásobí veškeré průměrné hodnoty jasů naměřené na asfaltové vozovce (ve vymaskovaných plochách). Dále se tento jas přepočte na osvětlenost pomocí vztahu (2.13).

Tab. 28 Přepočtené hodnoty jasů a osvětlenosti na měřené ploše

Vynásobený jas poměrem $\rho$ ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ )					Vypočítaná průměrná osvětlenost vzorků na základě vynásobeného jasů poměrem (lx)				
21	20	20	21	24	72	70	70	73	81
24	23	22	23	26	82	79	77	80	89
26	25	23	24	27	88	84	80	84	94
29	26	25	25	27	99	90	85	86	94
27	24	23	22	23	94	84	80	77	78

Pro tuto vypočítanou osvětlenost se stanoví odchylky od referenční hodnoty osvětlenosti stanovené luxmetrem, tyto odchylky jsou uvedeny v Tab. 29.

Tab. 29 Odchylky vypočítané osvětlenosti

Odchylka vypočítané osvětlenosti od referenční hodnoty (lx)					Procentuální odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty (%)				
2	0	0	0	3	2	0	0	0	4
-4	-7	-7	-5	-3	-5	-8	-8	-6	-3
-11	-12	-13	-8	-8	-12	-12	-14	-9	-8
-15	-16	-16	-15	-16	-13	-15	-16	-15	-15
-31	-26	-25	-26	-30	-25	-24	-24	-25	-28

Jak je patrné z Tab. 29, tak výsledná odchylka dosahuje velkých hodnot. Ovšem jednotlivé odchylky vykazují určitý lineární trend napříč jednotlivými řadami vymaskovaných vzorků. Nabízí se zde tedy možnost této korekce pomocí korekčních koeficientů.

#### 6.8.4 Korekční koeficienty pro měření osvětlenosti s jedním referenčním vzorkem

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, tak výsledná odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty vykazuje určitý lineární trend napříč řadami vymaskovaných vzorků. Z tohoto důvodu nebude prováděna korekce každého jednotlivého vzorku, ale bude použita korekce celých jednotlivých řadách jedním korekčním koeficientem.

Vzhledem k tomu, že se všechna měření, s pomocí jednoho referenčního vzorku, realizovali současně s dvěma odlišnými clonovými čísly (2.8 a 5.6), a pro každé použité clonové číslo dochází k odlišným odchylkám, ať už co se týče velikosti, tak jejich rozložení v měřené ploše. Proto je nutné stanovit korekční koeficienty zvlášť pro každé použité clonové číslo.

V případě měření osvětlenosti s jedním referenčním vzorkem není možné jednotlivé vymaskované místa plochy korigovat na základě úhlu měření jako v případě měření se všemi vzorky (viz 6.7.1). Jelikož pro konkrétní asfaltový povrch neznáme jeho konkrétní spektrální odraznost a závislost odchylky měřeného jasu v závislosti na úhlu měření. Proto byly jednotlivé korekční koeficienty určeny experimentálně. A to tak, že každá hodnota jasu jednotlivého vymaskované plochy v konkrétní řadě byla vynásobena určitým korekčním koeficientem.

V následující části podkapitoly je pro názornost uveden konkrétní postup stanovení korekčních koeficientů pro měření č.1 s clonovým číslem 2.8, tedy navazuje na příklad výpočtu z předchozí kapitoly.

Pro každé jednotlivé měření s referenčním vzorkem byly stanoveny tzv. **ideální korekční koeficienty**, kterými byly vynásobeny všechny vymaskované plochy konkrétní řady viz Tab. 30.

Tab. 30 Zkorigovaná osvětlenost ideálními korekčními koeficienty

Zkorigovaná osvětlenost ideálními korekčními koeficienty (lx)					Použité ideální korekční koeficienty (-)
71	69	69	72	80	0,99
87	84	82	85	95	1,06
98	94	90	94	105	1,12
116	105	99	101	110	1,17
125	112	107	103	104	1,34

Konkrétní hodnota ideálních korekčních koeficientů byla stanovena pomocí modulu v programu Excel, konkrétně: „citlivostní analýza – hledání řešení“. Kde tento modul pomocí iterační metody určil hodnotu korekčního koeficientu dané řady vymaskovaných vzorků tak, aby výsledná průměrná odchylka osvětlenosti dané řady byla 0 %. Výsledné odchylky měření po použití ideální korekčních koeficientů jsou uvedeny v Tab. 31.

Tab. 31 Odchylky osvětlenosti od ref. hodnoty při použití ideálních korekčních koeficientů

Odchylka korigované osvětlenosti ideálními korekčními koeficienty od referenční hodnoty (lx)					Procentní odchylka zkorigované osvětlenosti ideálními korekčními koeficienty od referenční hodnoty (%)				
1	-1	-1	-1	2	1,1	-1,1	-1,2	-1,2	2,4
1	-2	-2	0	3	1,2	-2,2	-2,4	0,1	3,3
-1	-2	-3	2	3	-0,8	-1,7	-3,1	2,3	3,4
2	-1	-2	0	0	1,7	-0,5	-1,6	0,1	0,4
0	2	2	0	-4	0,1	1,8	1,5	0,2	-3,5

Vzhledem k tomu, že jde o ideální korekční koeficienty pro dané konkrétní měření, tak výsledná odchylka dosahuje velmi malých hodnot. Tímto způsobem byly stanoveny ideální korekční koeficienty pro všechny měření s použitím jednoho referenčního vzorku pro použité clonové číslo 2. 8 i 5.6.

Poté pro každé konkrétní clonové číslo byly stanoveny tzv. průměrné korekční koeficienty. Pro každé jednotlivé měření vyšli lehce odlišné ideální korekční koeficienty, jak je patrné ze souhrnu měření v Tab. 34 a Tab. 35. Proto byly stanoveny tzv. **průměrné korekční koeficienty**. Ty byly stanoveny jako aritmetický průměr jednotlivých korekčních koeficientů konkrétních řad vzorků napříč všemi měřeními. Průměrné korekční koeficienty jsou tedy stanovené obecné koeficienty, které jsou pro všechny měření stejné. Jejich přesnost je omezena počtem provedených terénních měření.

Opět je zde pro ukázkou uvedena aplikace průměrných korekčních koeficientů na měření č.1 s clonovým číslem 2.8, tedy navazuje opět na předchozí příklad.

V Tab. 32 je uvedena zkorigovaná osvětlenost průměrnými korekčními koeficienty. Pokud porovnáme tyto hodnoty osvětlenosti a průměrných korekčních koeficientů s korekcí ideálními korekčními koeficienty Tab. 30, tak je patrné, že korekční koeficienty se od sebe příliš neliší, tj. stejně tak i výsledná hodnota osvětlenosti.

Tab. 32 Zkorigovaná osvětlenost průměrnými korekčními koeficienty

Zkorigovaná osvětlenost průměrnými korekčními koeficienty (lx)					Použité průměrné korekční koeficienty (-)
71	69	69	72	80	0,99
86	84	81	85	94	1,06
98	94	90	94	105	1,11
115	104	98	100	109	1,16
117	105	100	97	98	1,25

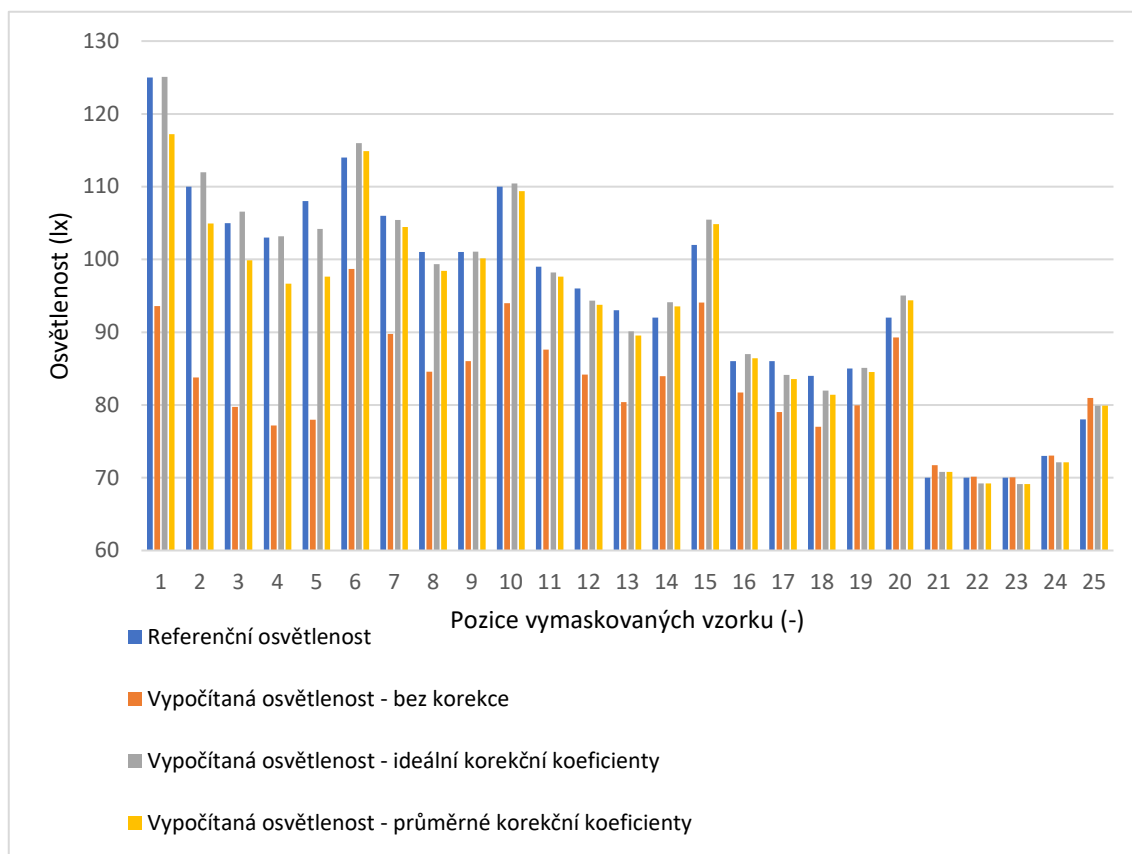
Výsledné odchylky osvětlenosti od referenční hodnoty, při použití průměrných korekčních koeficientů, jsou uvedeny v Tab. 33.

Tab. 33 Odchylky osvětlenosti od ref. hodnoty při použití průměrných korekčních koeficientů

Odchylka korigované osvětlenosti průměrnými korekčními koeficienty od referenční hodnoty (lx)					Procentní odchylka zkorigované osvětlenosti průměrnými korekčními koeficienty od referenční hodnoty (%)				
1	-1	-1	-1	2	1	-1	-1	-1	2
0	-2	-3	0	2	0	-3	-3	-1	3
-1	-2	-3	2	3	-1	-2	-4	2	3
1	-2	-3	-1	-1	1	-1	-3	-1	-1
-8	-5	-5	-6	-10	-6	-5	-5	-6	-10

Jak vyplývá z výsledných odchylek osvětlenosti, tak při použití průměrných korekčních koeficientů dojde konkrétně v tomto měření ke zvýšení odchylky zejména v první řadě vzorků. Je to způsobeno tím, že přesnost a použitelnost průměrných korekčních koeficientů byla hodnocena napříč všemi měřeními realizovanými v diplomové práci. Jejich hodnota je tedy limitovaná počtem provedených terénních měření.

Výsledné hodnoty osvětlenosti ve vymaskovaných plochách na asfaltu jsou zobrazeny v Obr. 48.



Obr. 48 Hodnoty osvětlenosti jednotlivých vymaskovaných vzorků pro měření č.1

### 6.8.5 Vyhodnocení měření osvětlenosti s jedním referenčním vzorkem

Všechna měření osvětlenosti na základě použití jednoho referenčního vzorku se opět hodnotila na základě použitého clonového čísla, tj. měření s clonovým číslem 2.8 a 5.6. Dále, obdobně jako u měření se všemi měřicími vzorky, jsou z důvodu velkého množství naměřených a zpracovaných dat, jednotlivé měření hodnoceny na základě jednotlivých řad vzorků. Což v tomto případě je velice výhodné, díky korekčním koeficientům aplikovaných právě po jednotlivých řadách.

Souhrny měření s clonovým číslem 2.8 je uveden v Tab. 34 a měření s clonovým číslem 5.6 v Tab. 35. Pro obě varianty jsou uvedeny procentuální odchylky od referenční osvětlenosti pro měření bez korekce, poté pro korekci s ideálními korekčními koeficienty a dále pro použití průměrných korekčních koeficientů.

Jak vyplývá z naměřených dat, tak při použití průměrných korekčních koeficientů dosahuje metoda uspokojivých výsledků, kdy se průměrná procentní odchylka osvětlenosti pohybuje v rozmezí 0 až -6 %, přičemž maximální procentní odchylka dosahuje hodnoty -10 %.

Tab. 34 Souhrn měření osvětlenosti s jedním referenčním vzorkem - clonové číslo 2.8

Použité clonové číslo	2.8														
Typ měření	Měření č.1 - sodíková vysokotlaká výbojka														
Průměrná odchylka od ref. osvětlenosti	Bez korekce				Korekce s ideálními k. koeficienty					Korekce s průměrnými k. součiniteli					
	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>ideal.</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>prům.</sub>	
5. řada	1%	1%	4%	0%	0%	1%	2%	-1%	0,99	0%	1%	2%	-1%	0,99	
4. řada	-6%	6%	-8%	-3%	0%	2%	3%	-2%	1,06	-1%	2%	-3%	3%	1,06	
3. řada	-11%	11%	-14%	-8%	0%	2%	3%	-3%	1,12	-1%	2%	-4%	3%	1,11	
2. řada	-15%	15%	-16%	-13%	0%	1%	2%	-2%	1,17	-1%	1%	-3%	1%	1,16	
1. řada	-25%	25%	-28%	-24%	0%	1%	-4%	2%	1,34	-6%	6%	-10%	-5%	1,25	
Typ měření	Měření č.5 - biodynamické světlo - před změnou (T <sub>cp</sub> ≈ 2500 K)														
Průměrná odchylka od ref. osvětlenosti	Bez korekce				Korekce s ideálními k. součiniteli					Korekce s průměrnými k. součiniteli					
	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>ideal.</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>prům.</sub>	
4. řada	-4%	4%	-8%	1%	0%	3%	5%	-4%	1,04	1%	3%	7%	-3%	1,06	
3. řada	-9%	9%	-13%	-4%	0%	3%	6%	-4%	1,10	1%	3%	7%	-3%	1,11	
2. řada	-14%	14%	-16%	-9%	0%	3%	5%	-3%	1,16	1%	3%	6%	-3%	1,16	
1. řada	-18%	18%	-22%	-15%	0%	3%	-5%	4%	1,22	1%	4%	7%	-2%	1,25	
Typ měření	Měření č.6 - biodynamické světlo - po změně (T <sub>cp</sub> ≈ 1800 K)														
Průměrná odchylka od ref. osvětlenosti	Bez korekce				Korekce s ideálními k. součiniteli					Korekce s průměrnými k. součiniteli					
	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>ideal.</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>prům.</sub>	
4. řada	-6%	6%	-9%	-3%	0%	2%	3%	-3%	1,07	-1%	2%	-4%	3%	1,06	
3. řada	-11%	11%	-14%	-7%	0%	3%	4%	-3%	1,12	-1%	3%	4%	-4%	1,11	
2. řada	-14%	14%	-16%	-10%	0%	3%	4%	-2%	1,16	0%	2%	4%	-2%	1,16	
1. řada	-19%	19%	-22%	-14%	0%	3%	6%	-4%	1,23	2%	4%	8%	-3%	1,25	

Tab. 35 Souhrn měření osvětlenosti s jedním referenčním vzorkem - clonové číslo 5.6

Použité clonové číslo	5.6														
Typ měření	Měření č.1 - sodíková vysokotlaká výbojka														
Průměrná odchylka od ref. osvětlenosti	Bez korekce				Korekce s ideálními k. koeficienty					Korekce s průměrnými k. součiniteli					
	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>ideal.</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>prům.</sub>	
5. řada	6%	6%	9%	5%	0%	2%	3%	-1%	0,94	-2%	2%	-4%	0%	0,92	
4. řada	-2%	3%	-5%	2%	0%	2%	4%	-3%	1,02	-1%	2%	-4%	2%	1,01	
3. řada	-7%	7%	-10%	-3%	0%	2%	4%	-4%	1,07	-1%	2%	-4%	3%	1,07	
2. řada	-11%	11%	-13%	-9%	0%	1%	2%	-2%	1,12	-1%	1%	-3%	1%	1,11	
1. řada	-21%	21%	-22%	-20%	0%	1%	-2%	1%	1,27	-4%	4%	-6%	-3%	1,21	
Typ měření	Měření č.3 - sodíková vysokotlaká výbojka - vlevo od světla														
Průměrná odchylka od ref. osvětlenosti	Bez korekce				Korekce s ideálními k. koeficienty					Korekce s průměrnými k. součiniteli					
	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>ideal.</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>prům.</sub>	
5. řada	10%	10%	12%	7%	0%	1%	2%	-2%	0,91	1%	2%	4%	-1%	0,92	
4. řada	0%	2%	4%	-2%	0%	2%	4%	-3%	1,00	1%	2%	5%	-2%	1,01	
3. řada	-6%	6%	-8%	-2%	0%	2%	5%	-2%	1,07	0%	2%	5%	-2%	1,07	
2. řada	-9%	9%	-11%	-7%	0%	1%	2%	-2%	1,10	1%	1%	3%	-1%	1,11	
1. řada	-19%	19%	-20%	-17%	0%	1%	2%	-2%	1,23	-2%	2%	-4%	1%	1,21	
Typ měření	Měření č.4 - sodíková vysokotlaká výbojka - vpravo od světla														
Průměrná odchylka od ref. osvětlenosti	Bez korekce				Korekce s ideálními k. koeficienty					Korekce s průměrnými k. součiniteli					
	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>ideal.</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>prům.</sub>	
5. řada	10%	10%	13%	7%	0%	1%	4%	-2%	0,91	1%	2%	5%	-1%	0,92	
4. řada	2%	3%	9%	-2%	0%	3%	7%	-3%	0,98	2%	3%	9%	-1%	1,01	
3. řada	-5%	5%	-9%	1%	0%	3%	6%	-4%	1,05	1%	2%	7%	-3%	1,07	
2. řada	-11%	11%	-15%	-5%	0%	4%	7%	-5%	1,12	-1%	4%	6%	-6%	1,11	
1. řada	-19%	19%	-22%	-13%	0%	4%	7%	-4%	1,23	-1%	4%	6%	-6%	1,21	
Typ měření	Měření č.5 - biodynamické světlo - před změnou (T <sub>cp</sub> ≈ 2500 K)														
Průměrná odchylka od ref. osvětlenosti	Bez korekce				Korekce s ideálními k. součiniteli					Korekce s průměrnými k. součiniteli					
	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>ideal.</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>prům.</sub>	
4. řada	0%	3%	6%	-3%	0%	3%	6%	-3%	1,00	1%	3%	7%	-2%	1,01	
3. řada	-4%	5%	-9%	1%	0%	3%	6%	-5%	1,04	2%	4%	8%	-3%	1,07	
2. řada	-9%	9%	-12%	-4%	0%	3%	5%	-3%	1,10	1%	2%	7%	-2%	1,11	
1. řada	-14%	14%	-19%	-10%	0%	4%	-7%	4%	1,16	5%	6%	9%	-2%	1,21	
Typ měření	Měření č.6 - biodynamické světlo - po změně (T <sub>cp</sub> ≈ 1800 K)														
Průměrná odchylka od ref. osvětlenosti	Bez korekce				Korekce s ideálními k. součiniteli					Korekce s průměrnými k. součiniteli					
	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>ideal.</sub>	$\bar{x}_\%$	$ \bar{x}' _\%$	max <sub>%</sub>	min <sub>%</sub>	k <sub>prům.</sub>	
4. řada	-3%	3%	-7%	0%	0%	2%	4%	-3%	1,04	-3%	3%	-6%	1%	1,01	
3. řada	-8%	8%	-12%	-4%	0%	3%	5%	-4%	1,09	-3%	4%	-7%	2%	1,07	
2. řada	-11%	11%	-14%	-7%	0%	3%	4%	-3%	1,13	-1%	3%	-4%	3%	1,11	
1. řada	-17%	17%	-23%	-11%	0%	4%	-8%	7%	1,20	1%	4%	8%	-7%	1,21	

## 6.9 Analýza nejistot měření měřící metody

V případě vyhodnocení nejistoty metody měření se nemůže vycházet pouze z odchylky vypočítané osvětlenosti od referenční hodnoty změřenou luxmetrem. Jelikož i samotná uvažovaná referenční hodnota osvětlenosti není zcela přesně známá. Je tedy nutné napříč celým měřením je uvažovat řadu nejistot všech použitých měřicích přístrojů, včetně referenčního luxmetru.

V případě vyhodnocení nejistoty metody se budou uplatňovat zejména dílčí standardní nejistoty měření:

- Standartní nejistota typu A. Příčiny nejistot typu A nejsou známé, proto se určují statistickou analýzou série naměřených hodnot z opakovaných měření stejné veličiny.
- Standartní nejistota typu B. Nejistotami typu B se obvykle charakterizují známé příčiny chyb s určitou pravděpodobností jejich výskytu okolo pravé, resp. konvenční pravé hodnoty. [1]

Konkrétní výpočet dílčích nejistot měření je uveden v následujících rovnicích.

Standartní nejistota typu A:

$$u_{Ax} = \frac{100}{\bar{x}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\%) \quad (6.6)$$

Nejistota typu B:

$$u_B = \frac{z_{\max}}{\chi} \quad (\%) \quad (6.7)$$

Kde  $z_{\max}$  je největší velikost chyby v % a  $\chi$  je činitel daný pravděpodobností statistického rozdělení uvažované chyby. Pro rovnoměrné rozdělení je  $\chi = \sqrt{3}$ .

Jelikož tato měřící metoda osvětlenosti vychází z měření jasu a jeho následného přepočtu podle vzorce (2.13), je nutné stanovit ještě citlivostní koeficienty. Citlivostní koeficienty nám vyjadřují, jakou mírou se promítne odchylka měřené veličiny (jasu) na výsledné odchylce vypočítané veličiny (osvětlenosti). Dosazením známých konstantních hodnot do vzorce (2.13) získáme závislost osvětlenosti na jasu.

$$E = \frac{L \cdot \pi}{\rho_{\text{váhovaná}}} = \frac{L \cdot \pi}{0,915} \cong 3,4 \cdot L \quad (-) \quad (6.8)$$

Výsledný citlivostní koeficient přepočtu jasů na osvětlenost je tedy 3,4 a uplatňuje se pro měření jasů pomocí jasového analyzátoru LDA.

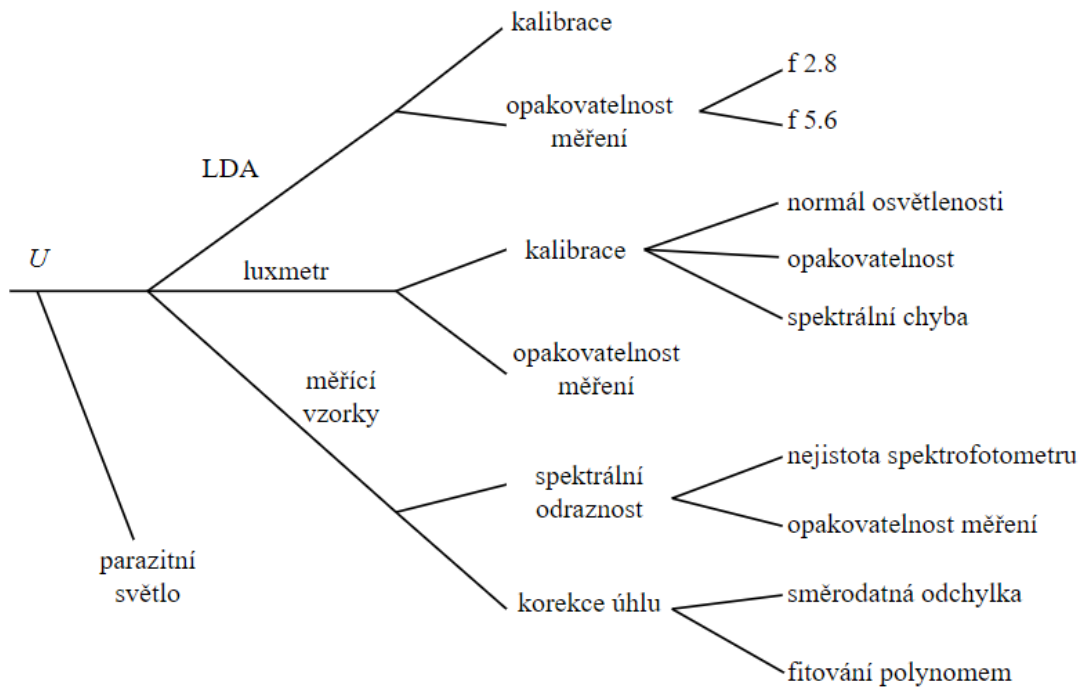
Výsledná kombinovaná standardní nejistota  $u_c$  (%) se podle Gaussova principu šíření nejistot stanovuje sloučením všech dílčích nejistot, ať již typu A či typu B. Pro sloučení chyb platí následující vztah.

$$u_c = \sqrt{(u_{A1})^2 + (u_{A2})^2 + \dots + (u_{B1})^2 + (u_{B2})^2 + \dots} \quad (\%) \quad (6.9)$$

Pravděpodobnost že rozdíl mezi naměřenou a pravou (skutečnou) hodnotou nepřekročí určenou standardní nejistotu, závisí na rozdělení chyb. Při normálním rozdělení chyb je tato pravděpodobnost 68,3 % a při rovnoměrném rozdělení 57,7 %. Z tohoto důvodu se v praxi používá tzv. rozšířená standardní nejistota  $U$ , která se stanovuje ze vztahu:

$$U = k_U \cdot u_c \quad (\%) \quad (6.10)$$

kde  $k_U$  je činitel rozšíření který se obvykle volí  $k_U = 2$ . V takovém případě je pravděpodobnost, že pravá hodnota leží ve vypočítaném intervalu 95,5 % při normálním rozdělení chyb a téměř 100 % při rovnoměrném rozdělení [1].



Obr. 49 Znárodnění vstupujících chyb do měřící metody

Tab. 36 Nejistoty měřící metody

Zdroj nejistoty	Název nejistoty	Hodnota nejistoty		Citlivostní koeficient	Celková nejistota	
		f 2.8	f 5.6		f 2.8	f 5.6
Jasový analyzátor LDA	kalibrace	4,4 %		3,4	14,9 %	
	opakovatelnost měření	0,2 %	1,8 %	3,4	0,7 %	6,2 %
Luxmetr	nejistota měření osvětlenosti	1,5 %		1	1,5 %	
	opakovatelnost měření	0,2 %		1	0,2 %	
Měřící vzorky	spektrální odraznost					
	nejistota spektrofotometru	0,4 %		1	0,4 %	
	opakovatelnost měření	1,1 %		1	1,1 %	
	korekce úhlu					
	směrodatná odchylka	0,5 %		1	0,5 %	
	odchylka proložení funkce polynomem	0,2 %		1	0,2 %	
Parazitní světlo	Vliv okolního parazitního světla	1,0 %		1	1,0 %	

Výsledná rozšířená standardní nejistota měřící metody je:

- Pro měření se všemi měřícími vzorky s clonovým číslem f 2.8:  $U_{2.8} = 30,2 \%$
- Pro měření se všemi měřícími vzorky s clonovým číslem f 5.6:  $U_{5.6} = 32,6 \%$

Pro stanovení nejistot měřící metody pro měření s jedním referenčním vzorkem je zapotřebí znát vlastnosti měřených vozovek. Z toho důvodu zde není tato nejistota vyčíslena. K tomu je zapotřebí v budoucnu provést další měření na více lokalitách a vozovkách.

Vzhledem k výsledné rozšířené standardní nejistotě měřící metody přes 30 % je patrné, že měřící metoda může dosahovat velmi velkých odchylek. Ovšem jak je patrné z dílčích nejistot viz Tab. 36, tak největší mírou do nejistot měřící metody přispívá jasový analyzátor LDA. Jelikož nejistota analyzátoru je určena pro nejhorší nastavení snímku a pro nejhorší místo ve snímku, tj. v rozích snímku, kde je největší vinětace obrazu. Ovšem terénní měření bylo realizováno při ideálních podmínkách. Tedy snímání jednotlivých měřících vzorků probíhalo na krátkou vzdálenost (do 5 m) přičemž střed snímku jasového analyzátoru byl umístěn na prostřední vzorek. Měřící síť vzorků tedy byla uprostřed výsledného snímku a nedocházelo k tak výrazným chybám vlivem vinětace obrazu. Dále bylo měřeno na asfaltových površích, které nebyly znečištěny a jinak poškozeny. Proto při hodnocení měřící metody na základě odchylky osvětlenosti od referenční osvětlenosti stanovené luxmetrem vycházela přesnost metody výrazně lépe než výsledná rozšířená nejistota měřící metody.

## 7. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce je ověřit realizovatelnost měření osvětlenosti pozemních komunikací pomocí jasového analyzátoru LDA. Práce je rozdělena do dvou základních částí – teoretického úvodu a praktického měření.

V teoretické části práce jsou uvedeny základní světelné veličiny, a jejich vzájemné vztahy. Zejména možnost výpočtu osvětlenosti na základě hodnoty jasu. Tento výpočet je možný pouze, pokud známe odraznost měřeného povrchu a zavedeme-li zjednodušení, že měřený povrch se chová jako ideálně rozptýlný povrch (tzv. Lambertův zářič). Toto je základní předpoklad, ze kterého vychází měřicí metoda. Aby bylo možné toto zjednodušení provést v praxi, bylo nutné vyrobit měřicí vzorky s vysokou a přesně definovanou hodnotou spektrální odraznosti, u kterých poté můžeme uvažovat ideálně difúzní povrch. Výrobě a měření měřicích vzorků se věnuje první část praktické práce (laboratorní měření). Dále v rámci laboratorního měření byl navrhnout a otestován postup měření osvětlenosti komunikací na základě sítě měřicích vzorků 5x5.

V první části terénního měření bylo cílem otestovat měřicí metodu v terénních podmínkách a na základě poznatků z měření metodu a postup měření upravit do finální podoby. Na základě poznatků z terénu byly pro samotné měření vybrány dvě konfigurace nastavení jasového analyzátoru. A to měření s clonovým číslem 2.8 a clonovým číslem 5.6.

Po stanovení finální podoby měřicí metody byly realizovány dva odlišné postupy měření osvětlenosti. První postup spočíval ve měření jasu sítě měřicích vzorků (5x5), se známou hodnotou spektrální odraznosti, pomocí jasového analyzátoru LDA a následného přepočítání na osvětlenost. Tento postup měření osvětlenosti je v práci podrobně popsán a vyhodnocen. Jelikož pro toto měření jsou použity měřicí vzorky, které se v laboratoři podrobně proměřily, bylo možné u vzorků provést korekci osvětlenosti na základě pozorovacího úhlu. V případě tohoto postupu se výsledná odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty, stanovené luxmetrem, pohybovala v závislosti na použitém clonovém čísle následovně.

- Clonové číslo 5.6 + korekce úhlu: odchylka do 10 % (Tab. 24).
- Clonové číslo 2.8 + korekce úhlu, korekce lin. trendu: odchylka do 7 % (Tab. 25).

Druhý postup měření vycházel opět z měření jasu pomocí jasového analyzátoru LDA, ale v tomto případě pouze za pomoci jednoho referenčního vzorku, který se umístil do středu měřené plochy. Na základě měření jasu tohoto vzorku a samotné asfaltové vozovky byla následně stanovena hodnota osvětlenosti této plochy. Tento postup měření osvětlenosti

byl opět v práci podrobně popsán a vyhodnocen. Včetně stanovení korekčních koeficientů. Výsledná odchylka osvětlenosti tohoto postupu se pohybovala následovně.

- Clonové číslo 5.6 + korekce: odchylka do 10 % (Tab. 35)
- Clonové číslo 2.8 + korekce: odchylka do 9 % (Tab. 34)

Veškeré korekční koeficienty v diplomové práci jsou stanoveny na základě poznatků z laboratorního a terénního měření. Proto je jejich přesnost a univerzálnost omezena právě počtem realizovaných měření. Pro praktické využití metody by bylo potřeba provést alespoň 20 na sobě nezávislých měření na různých typech vozovek s různými typy použitých svítidel.

Na základě realizovaných měření a vyhodnocení obou způsobů měření osvětlenosti lze říci, že měření osvětlenosti pozemních komunikací pomocí jasového analyzátoru LDA a měřicích vzorků lze realizovat. Zejména měření pouze s jedním referenčním vzorkem je velice rychlé a odpadá zde pracné měření osvětlenosti pomocí luxmetru v síti měřicích bodů. Další výhodou měření osvětlenosti jasovým analyzátozem LDA je ten, že je možné zaznamenat časové průběhy osvětlenosti na dané vozovce v měřené ploše, což pomocí luxmetru nejsme schopni realizovat.

Rozšířená nejistota měření osvětlenosti pomocí této metody dosahuje hodnoty 30,2 % pro clonové číslo 2.8 a 32,6 % pro clonové číslo 5.6. Ovšem je nutné vzít v úvahu, že tuto nejistotu z velké části ovlivňuje právě nejistota použitého jasového analyzátoru LDA, která je určena pro nejhorší možný případ, tj. nejhorší nastavení snímku + nejhorší místo ve snímku (rohy). Jelikož je měřicí metoda koncipována pro konkrétní měřicí výšku, vzdálenost a umístění měřicích bodů, přičemž vzdálenost měřicích bodů se pohybuje do 5 m od jasového analyzátoru. Navíc měřená plocha se nachází ve středu snímku, tak lze konstatovat, že při měření byly zajištěny ideální podmínky měření a nedocházelo k tak výrazným chybám, jaké uvádí celková nejistota měřicí metody.

## LITERATURA

- [1] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [2] BAXANT, Petr. *Světelná technika: Elektronický text*. Brno: VUT v Brně.
- [3] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [4] Měření prostorového úhlu. *Laboratoř světelné techniky: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT Brno* [online]. Brno: Ing. Jan Škoda, Ph.D., 2012 [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: [http://www.svetelnalaborator.cz/files/sylabus/72\\_Mereni\\_prostoroveho\\_uhlu.pdf](http://www.svetelnalaborator.cz/files/sylabus/72_Mereni_prostoroveho_uhlu.pdf)
- [5] Základy světelné techniky (3): Světelně technické veličiny (1. část). *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování* [online]. © 2014 - 2021 - FCC Public s. r. o. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-3--15576>
- [6] Odraz světla, BRDF. *Computer Graphics Group* [online]. Praha: Karlova Univerzita, 2011 [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: <https://cgg.mff.cuni.cz/~jaroslav/teaching/2011-pg3/index.html>
- [7] SHELL, James R. Bidirectional Reflectance : An Overview with Remote Sensing Applications & Measurement. *Semantic Scholar* [online]. New York: Center for Imaging Science; Rochester Institute of Technology, 2004 [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Bidirectional-Reflectance-%3A-An-Overview-with-Remote-Shell/4ea2d6b64583c8f764c501078d7c414539a59682#citing-papers>
- [8] PUTTONEN, E., J. SUOMALAINEN, T. HAKALA a J. PELTONIEMI. Measurement of Reflectance Properties of Asphalt Surfaces and Their Usability as Reference Targets for Aerial Photos. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2009, **47**(7), 2330-2339. ISSN 1558-0644. Dostupné z: doi:10.1109/TGRS.2008.2010132
- [9] Základy světelné techniky (3): Světelně technické veličiny (2. část). *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování* [online]. © 2014 - 2021 - FCC Public, 2009 [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-3--15628>
- [10] HEROLD, Martin, Dar ROBERTS, Val NORONHA a Omar SMADI. Imaging spectrometry and asphalt road surveys. *Trans Res Part C: Emerg Technol: Emerg Technol. Transportation Research Part C Emerging Technologies*. 2007/08/19. Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2007.07.001
- [11] HEROLD, Martin a Dar ROBERTS. Spectral characteristics of asphalt road aging and deterioration: Implications for remote-sensing applications: Implications for remote-sensing applications. *Applied optics*. 2005/08/01, **44**, 4327-34. Dostupné z: doi:10.1364/AO.44.004327

- [12] Základy světelné techniky (4): Základy fotometrie (1. část). *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování* [online]. © 2014 - 2021 - FCC Public, 2009 [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-4--15601>
- [13] ČSN CEN/TR 13201-1. *Osvětlení pozemních komunikací Část 1: Návod pro výběr tříd osvětlení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [14] ČSN EN 13201-2. *Osvětlení pozemních komunikací – Část 2: Požadavky*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [15] ČSN EN 13201-3. *Osvětlení pozemních komunikací – Část 3: Výpočet*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [16] ČSN EN 13201-4. *Osvětlení pozemních komunikací – Část 4: Metody měření*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [17] Digitální fotografie a její využití ve světelné technice 1. část. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování* [online]. © 2014 - 2021 - FCC Public, 2010 [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/digitalni-fotografie-a-jeji-vyuziti-ve-svetelne-technice--15419>
- [18] Digitální fotografie a její využití ve světelné technice 2. část. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování* [online]. © 2014 - 2021 - FCC Public, 2010 [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/digitalni-fotografie-a-jeji-vyuziti-ve-svetelne-technice--15476>
- [19] Měření jasovým analyzátozem v soustavách VO. *Světlo v praxi* [online]. Praha: METROLUX [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <https://svetlovpraxi.cz/wp-content/uploads/2018/11/M%C4%9B%C5%99en%C3%AD-jasov%C3%BDm-analyz%C3%A1tozem.pdf>
- [20] VOLTCRAFT MS-1300 luxmetr 0.1–50000 lx Conrad.cz. *Conrad Electronic » Your Sourcing Platform* [online]. Copyright © Conrad Electronic Česká republika, s.r.o. Všechna práva vyhrazena. [cit. 09.12.2021]. Dostupné z: [https://www.conrad.cz/p/voltcraft-ms-1300-luxmetr-01-50000-lx-101148?&vat=true&gclid=CjwKCAjw2vOLBhBPEiwAjEeK9oudePVw5hF2aoS yxoQwIDYD1vFp4ViXkmrYWLXmyqKyRPMqlrGi6BoCcgMQAvD\\_BwE](https://www.conrad.cz/p/voltcraft-ms-1300-luxmetr-01-50000-lx-101148?&vat=true&gclid=CjwKCAjw2vOLBhBPEiwAjEeK9oudePVw5hF2aoS yxoQwIDYD1vFp4ViXkmrYWLXmyqKyRPMqlrGi6BoCcgMQAvD_BwE)
- [21] Primalex Polar. *Vše potřebné k malování | Dům barev e-shop* [online]. Copyright © 2020, [cit. 15.05.2022]. Dostupné z: <https://www.dumbarev.cz/produkty/nastenu/bile-interierove/primalex-polar-bily-1-l>
- [22] Laboratoř světelné techniky: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT Brno. In: *Světelná laboratoř* [online]. Brno: ÚEEN FEKT, c2006-2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.svetelnalaborator.cz/?section=galerie>
- [23] LumiDISP: Luminance Distribution Analyser. *LumiDISP* [online]. Brno, Technická 12: Brno University of Technology, Copyright © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://lumidisp.eu/>

- [24] Radiolux 111 – Luxmetry.cz. *Luxmetry.cz – obchod s luxmetry PRC Krochmann* [online]. Copyright © Copyright 2017 [cit. 15.05.2022]. Dostupné z: <https://luxmetry.cz/product/radiolux/>
- [25] MANFROTTO MT055XPRO3 055 ALUMINIUM 3-SECTION TRIPOD WITH HORIZONTAL COLUMN (BLACK). *Ace Photo: Dominion Camera* [online]. Virginia: Ace Photo, Copyright © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://acephoto.net/accessories/camera-supports/tripods/tripod-legs/manfrotto-mt055xpro3-055-aluminium-3-section-tripod-with-horizontal-column-black/>
- [26] SIGMA 135MM F/1.8 DG HSM ART LENS FOR LEICA L. *Ace Photo: Dominion Camera* [online]. Virginia: Ace Photo, Copyright © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://acephoto.net/cameras/sigma-135mm-f-1-8-dg-hsm-art-lens-for-leica-l/>
- [27] SIGMA 4.5MM F2.8 EX DC HSM CIRC. FISHEYE FOR CANON. *Ace photo: Dominion Camera* [online]. Virginia: Ace Photo, Copyright © 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://acephoto.net/lenses/slr-lenses/sigma-4-5mm-f-2-8-for-canon/>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky	Význam
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování
BRDF	obousměrná distribuční funkce odrazu světla
PCI	index stavu vozovky
SI	index struktury vozovky
LED	svítivá dioda
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Symboly	Význam	Jednotka
$\phi$	světelný tok	lm
$\phi_e$	zářivý tok	W
$\Omega$	prostorový úhel	sr
$A$	plocha	m <sup>2</sup>
$r$	poloměr	m
$L$	jas	cd · m <sup>-2</sup>
$I$	svítivost	cd
$E$	osvětlenost	lx
$l$	vzdálenost	m
$\beta$	úhel	°
$\rho$	integrální činitel odrazu	-
$\tau$	integrální činitel prostupu	-
$\alpha$	integrální činitel pohlcení	-
$p(\lambda)$	spektrální integrální činitel odrazu	-
$\tau(\lambda)$	spektrální integrální činitel prostupu	-
$\alpha(\lambda)$	spektrální integrální činitel pohlcení	-
$V(\lambda)$	poměrná spektrální citlivost oka normalizovaného pozorovatele	-
$M$	světlení	lm · m <sup>-2</sup>
$D$	vzdálenost měřicích bodů v podélném směru	m
$S$	podélná vzdálenost mezi svítidly	m
$N$	počet měřicích bodů v podélném směru	-
$n$	počet měřicích bodů v příčném směru	-
$W_L$	šířka pruhu vozovky	m
$W_r$	šířka měřené oblasti vozovky	m
$\rho_{\text{váhovaná}}$	spektrální odraznost váhovaná podle spektrální citlivosti jasového analyzátoru LDA	%

<b>Symbole</b>	<b>Význam</b>	<b>Jednotka</b>
$\rho_{\text{vzorek}}(\lambda)$	spektrální odraznost vzorku	%
$\sigma$	směrodatná odchylka	%
$\bar{x}_{\%}$	průměrná procentuální odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty	
$ \bar{x} _{\%}$	průměrná absolutní procentní odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty	%
$x_{\text{abs}}$	absolutní odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty	-
$E_{\text{vyp}}$	vypočítaná osvětlenost	lx
$E_{\text{ref}}$	referenční hodnota osvětlenosti	lx
$\text{min}_{\%}$	minimální procentuální odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty	%
$\text{max}_{\%}$	maximální procentuální odchylka osvětlenosti od referenční hodnoty	%
$f$	clonové číslo	-
$T_{\text{cp}}$	teplota chromatičnosti	K
$k_{\text{úhel}}$	korekční koeficient úhlu měření	-
$k_{\text{ideal.}}$	ideální korekční koeficient	-
$k_{\text{prům.}}$	průměrný korekční koeficient	-
$p$	poměr jasů	-
$u_{\text{A}}$	standartní nejistota typu A	%
$u_{\text{B}}$	standartní nejistota typu B	%
$u_{\text{C}}$	standartní nejistota typu C	%
$\chi$	činitel daný pravděpodobností statistického rozdělení uvažované chyby	-
$k_{\text{U}}$	činitel rozšíření	-
$U$	rozšířená standartní nejistota	%