

Disertační práce

Vnímání barev při fotopických a mezopických adaptačních jasech

Studijní program:

P3106 Textilní inženýrství

Studijní obor:

Textilní technika a materiálové inženýrství

Autor práce:

Ing. Marcela Pechová

Školitel práce:

prof. Ing. Michal Vik, Ph.D.

Katedra materiálového inženýrství

Liberec 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou disertační práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má disertační práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu disertační práce panu prof. Ing. Michalu Vikovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky, odborné vedení, ochotu, vstřícnost a věnovaný čas, který mi v průběhu realizace a psaní této práce poskytl. Rovněž děkuji i paní doc. Ing. Martině Vikové, Ph.D. za její čas, cenné rady a připomínky, které mi během zpracování této práce věnovala.

Ráda bych také na tomto místě poděkovala všem pozorovatelům, kteří se zúčastnili vizuálních experimentů a také těm, kteří mě podporovali a dodávali odvahu jít dál.

V neposlední řadě bych na tomto místě chtěla z celého srdce poděkovat svým rodičům za materiální, ale především morální podporu v průběhu celého mého studia.

V Liberci dne 21. října 2022

.....
Marcela Pechová

Anotace

Disertační práce se zabývá problematikou vnímání barev a modelem barevného vzhledu CIECAM02 v podmínkách fotopických a mezopických adaptačních jasů. V teoretické části jsou stručně popsány základní poznatky související se zpracováním zrakového vjemu a rozlišováním barev v různých podmínkách adaptačních jasů. Dále je v teoretické části popsán model barevného vzhledu CIECAM02, který umožňuje predikovat barevný vzhled za různých podmínek pozorování. V neposlední řadě je v teoretické části popsáno stanovení a hodnocení chyb, nejistot, preciznosti a přesnosti měření. V první části experimentu jsou na základě hodnocení chyb měření stanoveny korekční faktory, které jsou stanoveny pro přenositelnost dat mezi spektrofotometry. Další část experimentu se věnuje testování barvocitu a vizuálnímu experimentu s cílem zjistit, jak jsou pozorovatelé schopni rozlišovat barvy i při snížených úrovních adaptačních jasů. Hlavním cílem disertační práce je signifikantní zvýšení predikční schopnosti modelu CIECAM02 a CAM02–UCS v podmínkách mezopických úrovních adaptačních jasů. Pro tento účel jsou v závěru práce navrženy a testovány různé úpravy subjektivní chromatičnosti vedoucí ke zlepšení predikční schopnosti těchto modelů.

Klíčová slova: barva, barvivo, adaptační jas, CIECAM02, CAM02–UCS

Annotation

This dissertation addresses the issue of color perception and the evaluation of CIECAM02 and CAM02–UCS color appearance models. The main aim is to significantly increase the predictability of CIECAM02 and CAM02–UCS models under mesopic adaptive luminance levels. The theoretical section describes the basic information about visual perception processing and color discrimination under different adaptive luminance levels and describes the CIECAM02 color appearance model that allows predicting color appearance under different viewing and lighting conditions. This section also describes the determination and evaluation of errors, uncertainties, precision, and accuracy of the measurements. In the first part of the experiment, correction factors are determined for data portability between spectrophotometers based on the evaluation of measurement errors. The main part of the experiment is devoted to the color vision deficiency test and the visual experiment to determine how observers discriminate colors even at reduced levels of adaptive luminance. To accomplish the goal of this research, different adjustments of the colorfulness are proposed and tested leading to an improvement in the predictability of CIECAM02 and CAM02–UCS models.

Keywords: color, dye, adaptive luminance, CIECAM02, CAM02–UCS

Osnova disertační práce

I. ÚVOD	12
II. PŘEDMĚT A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	14
III. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY	16
1. VNÍMÁNÍ BAREV ČLOVĚKEM	16
1.1 Sítnice	19
1.2 Zraková dráha	21
1.3 Fotoreceptory	21
1.3.1 Tyčinky	21
1.3.2 Čípky	21
1.3.3 Opsin	22
1.4 Fotopické vidění	23
1.5 Skotopické vidění	23
1.6 Mezopické vidění	23
1.7 Funkce spektrální světelné účinnosti oka	23
1.8 Purkyňův jev	25
1.9 Adaptace	26
1.9.1 Adaptace na světlo	27
1.9.2 Adaptace na tmu	27
1.9.3 Chromatická adaptace	27
1.10 Barvocit a jeho testování	28
1.10.1 Poruchy barvocitu	28
1.11 Vrozené poruchy barvocitu	29
1.11.1 Monochromazie	29
1.11.2 Dichromazie	30
1.11.3 Anomální trichromazie	31
1.12 Testování barvocitu	32
1.12.1 Farnsworth-Munsell 100-Hue test	32
2. MODEL Y BAREVNÉHO VZHLEDU	35
2.1 Faktory ovlivňující barevný vzhled	35
2.1.1 Simultánní kontrast	35
2.1.2 Crispending – zosřřední obrysů	36
2.1.3 Bezold–Brückeův efekt	36

2.1.4	<i>Stevens–Huntův efekt</i>	37
2.2	Modely chromatické adaptace	37
2.2.1	<i>Von Kriesův model chromatické adaptace</i>	40
2.2.2	<i>Model Bradford chromatické adaptace</i>	42
2.2.3	<i>CMCCAT97</i>	43
2.2.4	<i>CMCCAT2000</i>	44
2.2.5	<i>CAT02</i>	44
2.3	Prostor barev CIELAB	45
2.4	Model barevného vzhledu CAM02	46
2.4.1	<i>Parametry a souřadnice popisující barevného vzhledu</i>	47
2.4.2	<i>Podmínky pozorování</i>	48
2.5	Výpočet chromatické adaptace v modelu barevného vzhledu CIECAM02.	50
2.6	Výpočet korelátů v modelu barevného vzhledu CIECAM02	57
2.7	Model barevného vzhledu CAM02-UCS	65
3.	MĚŘENÍ BAREV	67
3.1	Geometrická uspořádání pro měření sekundárních zářičů	67
3.2	Měření spektrálního činitele rozptýleného odrazu	67
3.2.1	<i>Úhlová geometrie $45^\circ \times 0^\circ$</i>	67
3.2.2	<i>Úhlová geometrie $0^\circ : 45^\circ \times$</i>	68
3.2.3	<i>Úhlová geometrie $45^\circ a : 0^\circ$</i>	68
3.2.4	<i>Úhlová geometrie $0^\circ 45^\circ a$</i>	68
3.3	Měření celkového spektrálního činitele odrazu	69
3.3.1	<i>Difúzní geometrie $d : 8^\circ$</i>	69
3.3.2	<i>Difúzní geometrie $8^\circ : d$</i>	70
3.3.3	<i>Alternativní difúzní geometrie $d : 0^\circ$ a $0^\circ : d$</i>	71
3.3.4	<i>Difúzní geometrie $d : d$</i>	71
3.4	Měření spektrálního činitele prostupu	71
3.4.1	<i>Měřicí geometrie $0^\circ : 0^\circ$</i>	72
3.4.2	<i>Difúzní geometrie $d_i : 8^\circ$</i>	72
3.4.3	<i>Difúzní geometrie $d_e : 8^\circ$</i>	72
3.4.4	<i>Difúzní geometrie $8^\circ : d_i$ a $8^\circ : d_e$</i>	72
3.4.5	<i>Difúzní geometrie $d : d$</i>	72
3.5	Podmínky měření	72
3.6	Kalibrace přístroje	73

3.7	Ověření měření přístroje	74
3.8	Chyby měření	75
3.8.1	<i>Nejistota měření</i>	76
3.8.1.1	Zdroje nejistot měření	77
3.8.1.2	Rozdělení nejistot měření	77
3.8.1.3	Nejistota stanovená metodou A	78
3.8.1.4	Nejistota stanovená metodou B	79
3.8.1.5	Kombinovaná standardní nejistota	81
3.8.1.6	Rozšířená standardní nejistota	82
3.8.2	<i>Stanovení nejistot při nepřímém měření</i>	84
3.8.2.1	Model měření	84
3.8.2.2	Stanovení standardní nejistoty výstupního odhadu metodou A	85
3.8.2.3	Stanovení standardní nejistoty výstupního odhadu metodou B	86
3.8.2.4	Kombinovaná standardní nejistota	86
3.8.2.5	Rozšířená nejistota měření	87
3.8.3	<i>Určování nejistot pro spektrofotometrická měření</i>	87
3.8.3.1	Rozptyl a kovariance trichromatických složek XYZ	91
3.8.3.2	Koeficienty citlivosti	94
3.9	Přesnost, preciznost a pravdivost měření	96
3.9.1	<i>Přesnost měření</i>	96
3.9.2	<i>Preciznost měření</i>	96
3.9.2.1	Opakovatelnost měření	96
3.9.2.2	Reprodukovatelnost měření	97
3.9.2.3	Pravdivost měření	98
3.9.3	<i>Mandelova statistika konzistence</i>	99
3.9.3.1	Vnitrolaboratorní statistika konzistence k	100
3.9.3.2	Cochranův test	100
3.9.3.3	Mezilaboratorní statistika konzistence h	101
3.9.3.4	Grubbsův test odlehlých hodnot	102
3.10	Určování chyb při spektrofotometrických měřeních	104
3.10.1	<i>Chyba určení nulového odrazu</i>	105
3.10.2	<i>Chyba určení fotometrické linearity</i>	105
3.10.3	<i>Chyba určení vlnové délky</i>	106
3.10.4	<i>Chyba určení šířky spektrálního pásu</i>	106

IV. POUŽITÉ METODY	107
4. PŘÍPRAVA BAREVNÝCH CENTER	107
4.1 Materiál	107
4.2 Metody	107
4.2.1 Příprava vzorků I	107
4.2.2 Příprava vzorků II a přístrojové vybavení	110
4.2.3 Příprava vzorků III	111
4.2.4 Příprava vzorků IV	111
4.2.5 Příprava vzorků V – Barevná centra	113
4.2.6 Příprava vzorků VI	114
4.2.7 Příprava vzorků VII	115
4.3 Kontrola stálosti vybraných barevných párů	118
5. PŘÍPRAVA VIZUÁLNÍCH EXPERIMENTŮ	121
5.1 Příprava vizuálního experimentu TUL 1 a TUL 2	121
5.1.1 Měření úrovně adaptačních jasů pro vizuální experiment TUL 1 a TUL 2	121
5.2 Vizuální experiment TUL 1	126
5.3 Vizuální experiment TUL 2	127
5.4 Příprava vizuálního experimentu TUL 3	128
5.4.1 Měření úrovně adaptačních jasů	128
5.5 Vizuální experiment TUL 3	130
5.6 Porovnání simulátorů denního světla pro experimenty TUL 1 a TUL 3	131
V. PŘEHLED DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A DISKUZE	133
6. VYHODNOCENÍ A DISKUZE NEJISTOT MĚŘENÍ	133
6.1 Popis měřicích přístrojů	133
6.2 Hodnocení nejistot měření pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií	137
6.3 Hodnocení nejistot měření pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií	140
7. STANOVENÍ PŘESNOSTI A PRECIZNOSTI MĚŘENÍ	143
7.1 Hodnocení preciznosti měření	143
7.2 Výsledky a diskuze pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií	144
7.2.1 Krátkodobá a dlouhodobá preciznost měření spektrofotometrů s difúzní měřicí geometrií $de:8^\circ$	144
7.2.2 Testování vybočujících hodnot Cochranovým testem pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost pro spektrofotometry s $de:8^\circ$	146

7.2.3	<i>Krátkodobá a dlouhodobá preciznost měření spektrofotometrů s difúzní měřicí geometrií di:8°</i>	148
7.2.4	<i>Testování vybočujících hodnot Cochranovým testem pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost pro spektrofotometry s di:8°</i>	149
7.3	Výsledky a diskuze pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií	151
7.3.1	<i>Krátkodobá a dlouhodobá preciznost měření spektrofotometrů s úhlovou měřicí geometrií</i>	152
7.3.2	<i>Testování vybočujících hodnot Cochranovým testem pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií</i>	153
7.4	Hodnocení přesnosti měření	155
7.5	Výsledky a diskuze pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií	155
7.5.1	<i>Krátkodobá a dlouhodobá přesnost měření spektrofotometrů s difúzní měřicí geometrií de:8°</i>	155
7.5.2	<i>Hodnocení přesnosti podle Grubbsova testu odlehlých hodnot pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií de:8°</i>	156
7.5.3	<i>Krátkodobá a dlouhodobá přesnost měření spektrofotometrů s difúzní měřicí geometrií di:8°</i>	157
7.5.4	<i>Hodnocení přesnosti podle Grubbsova testu odlehlých hodnot pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií di:8°</i>	158
7.6	Výsledky a diskuze pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií	158
7.6.1	<i>Hodnocení přesnosti podle Grubbsova testu odlehlých hodnot pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií</i>	159
8.	HODNOCENÍ CHYB MĚŘENÍ PŘI SPEKTROFOTOMETRICKÝCH MĚŘENÍCH	160
8.1	Postup zpracování dat	160
8.2	Výsledky a diskuze pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií de:8°...	161
8.3	Výsledky a diskuze pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií di:8° ...	167
8.4	Výsledky a diskuze pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií	168
9.	VYHODNOCENÍ TESTOVÁNÍ BARVOCITU POZOROVATELŮ	171
9.1	Pozorovatelé	171
9.2	Barvocit pozorovatelů z experimentu TUL 1	172
9.3	Barvocit pozorovatelů z experimentu TUL 2	176
9.4	Barvocit pozorovatelů z experimentu TUL 3	178
10.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VIZUÁLNÍCH HODNOCENÍ	182

10.1Převod šedé stupnice na vizuálně vnímanou barevnou odchylku	182
10.2Kontrast stupňů šedé stupnice	183
10.3Hodnocení kvality (predikční schopnosti) modelů barevného vzhledu	187
10.3.1 <i>Index STRESS</i>	187
10.4Vyhodnocení experimentu TUL 1	189
10.4.1 <i>Pozorovatelská shoda pro experiment TUL 1</i>	189
10.4.2 <i>Shoda mezi pozorovateli TUL 1</i>	190
10.5Vyhodnocení experimentu TUL 2	194
10.5.1 <i>Pozorovatelská shoda pro experiment TUL 2</i>	194
10.5.2 <i>Shoda mezi pozorovateli TUL 2</i>	195
10.6 Vyhodnocení experimentu TUL 3	198
10.6.1 <i>Pozorovatelská shoda pro experimentu TUL 3</i>	198
10.6.2 <i>Shoda mezi pozorovateli TUL 3</i>	198
11. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ Z VIZUÁLNÍCH EXPERIMENTŮ TUL 1 A TUL 2	201
12. VÝSTUPNÍ KORELÁTY MODELU CIECAM02	204
13. ÚPRAVA MODELU CAM02–UCS	211
13.1 Úprava funkce subjektivní chromatičnosti pro model CAM02–UCS	211
VI. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A NOVÝCH POZNATKŮ	216
14. ZÁVĚR	216
15. STRUČNÝ PŘEHLED VLASTNÍCH PŘÍNOSŮ AUTORA DISERTAČNÍ PRÁCE	220
16. NÁVRH DALŠÍHO MOŽNÉHO POSTUPU	221
VII. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	222
VIII. SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ AUTORA	233
17.1 Publikace se vztahem ke studované problematice	233
17.2 Ostatní publikace v odborných časopisech	233
17.3 Příspěvky ve sbornících se vztahem ke studované problematice	233
17.4 Ostatní příspěvky ve sbornících	235
IX. PŘÍLOHY	236

I. Úvod

Disertační práce se zabývá rozlišováním barev a modelem CIECAM02 v podmínkách fotopických a mezopických adaptačních jasů a možnostmi využití tohoto modelu za zhoršených světelných podmínek.

Rozlišování barev při nízkých úrovních adaptačních jasů je široce diskutované téma napříč různými odvětvími. Součástí diskuzí jsou aktivní i pasivní ochranné prvky, které mají v případě zhoršených světelných podmínek při nepředvídatelných situacích, jakými jsou výpadek elektrického proudu, přírodní katastrofy, kdy může dojít k selhání bezpečnostních systémů, sloužit jako bezpečnostní a rozlišovací prvek. Další diskuzí je i zvýšená ochrana a viditelnost chodců. V posledních letech došlo k výraznému nárůstu usmrcených nebo zraněných osob při dopravních nehodách v důsledku nedostatečného používání bezpečnostních prvků, a v několika případech i vlivem nevhodně nastaveného pouličního osvětlení ve městech a obcích. Toto jsou jedny z důvodů pro sepsání této disertační práce. Nošení výstražných prvků je důležité nejenom mimo města a obce, ale i v nich. V blízkosti přechodů pro chodce je často osoba, která na sobě nemá žádné výstražné prvky nebo jsou tyto prvky nedostačující k zajištění dostatečné viditelnosti, a je proto snadno přehlédnutelná, stejně tak je viditelnost osob značně ovlivněna různými intenzitami pouličního osvětlení, kdy jsou v mnoha případech řidiči oslněni přechody mezi různě intenzivním pouličním osvětlením. Efektivita současných oděvů se zvýšenou viditelností je dostatečně známá, nicméně většina populace v případech, kdy se pohybují v nočním dopravním prostoru výhod těchto oděvů nevyužívá. Je proto určitou výzvou pro návrháře volnočasového oblečení a oblečení pro denní užívání, aby vhodným způsobem zapracovali do těchto oděvů barevně kontrastní prvky při zachování módnosti takovýchto modelů. Z tohoto důvodu se práce věnuje vnímání barev ve fotopické a mezopické oblasti, aby bylo možno doporučit vybrané odstíny jako určitý koncept pro takovéto návrhy.

V současné době je možné použít k popsání barevných povrchů při různých podmínkách různé prostory barev a modely barevného vzhledu. Nejpoužívanějším nástrojem pro tento popis jsou dva prostory barev CIEXYZ a CIELAB, které však mají některá omezení, díky kterým není možné popsat například Huntův či Stevensův efekt. CIELAB je přibližně rovnoměrný prostor barev a popisuje přibližné koreláty, kterými jsou chroma, světlost či úhel barevného tónu. Oproti tomu, modely barevného vzhledu (souhrnně označované jako CAM) umožňují popis barevného vzhledu se započítáním různých podmínek (vliv okolí, pozadí či úrovně adaptačního jasů), a tím pádem predikci barevného vzhledu i při velmi nízkých úrovních adaptačních jasů. Dále umožňují popsat barevný vzhled i pomocí korelátů atributů vnímání.

CAM modely mají však jednu nevýhodu a to tu, že mají nízkou predikční schopnost predikovat vzhled u povrchů s malým barevným rozdílem. Zvýšení predikční schopnosti modelu barevného vzhledu CIECAM02 je i jedním z cílů disertační práce.

Model barevného vzhledu CIECAM02 zahrnuje dva typy adaptačních mechanismů, a to mechanismus chromatické a jasové adaptace. V modelu nejprve dochází k adaptaci chromatické, a až následně adaptaci jasové.

Proto, aby mohla být tato úprava navržena, byly připraveny, provedeny a vyhodnoceny tři vizuální experimenty se skupinou pozorovatelů bez předchozích zkušeností s hodnocením barevné odchylky při různých úrovních adaptačních jasů a při dvou různých typech uspořádání těchto experimentů (Grey-scale a Memory matching method). Pro vizuální experimenty byla připravena čtyři barevná centra tak, aby co nejvíce odpovídala základním barevným tónům definovaným pro model CIECAM02. Data získaná z vizuálních experimentů jsou použita pro hodnocení pozorovatelů a zároveň jako hodnoty pro testování predikční schopnosti modelů.

V rámci experimentální části je testována úprava modelu CIECAM02 s vlastní navrhovanou úpravou, která by měla vést ke zvýšení predikční schopnosti modelu.

V rámci vyhodnocení experimentální části jsou v disertační práci také hodnoceny nejistoty a chyby měření, díky jejichž eliminaci je možné použít pro měření různé spektrofotometry a jejich výsledky pomocí korekčních faktorů použít jako přibližné referenčnímu spektrofotometru, tedy pro možnost vzájemné přenositelnosti dat mezi spektrofotometry.

II. Předmět a cíle disertační práce

Disertační práce je zaměřena na popis rozlišování barev při různých úrovních adaptačních jasů ve fotopické a mezopické oblasti adaptačních jasů (371 cd. m^{-2} až $0,01 \text{ cd. m}^{-2}$). K popisu barevného vzhledu, jak bylo zmíněno v úvodu této práce je používám model barevného vzhledu CIECAM02, který umožňuje zahrnutí různých podmínek pozorování do výpočtu a predikce barevného vzhledu. Dalším předmětem disertační práce je i stanovení nejistot, přesnosti a preciznosti měření v rámci krátkodobých a dlouhodobých měření, a také stanovení chyb u spektrofotometrických měření.

Na základě výše popsané problematiky byly sestaveny následující cíle disertační práce. Hlavní část je rozdělena do následujících částí:

- a) Příprava vzorků s vysokou chromatičností, které umožňují vytvoření datové sady pro vizuální testování. Většina dosud provedených experimentů obsahovala vzorky s nízkou nebo střední chromatičností. Pro přípravu vzorků byla zvolena kationtová barviva, která umožňují dosažení vysoce čistých odstínů.
- b) Příprava a realizace vizuálního experimentu se skupinou pozorovatelů bez předchozích zkušeností s vizuálním hodnocením na širokém rozsahu úrovní adaptačních jasů (fotopické úrovně adaptačních jasů – hranice mezopické a skotopické úrovně adaptačních jasů).
- c) Popis rozlišování barev a testování barvocitu pozorovatelů na různých úrovních adaptačních jasů.
- d) Popis barevného vzhledu na různých úrovních adaptačních jasů pomocí modelu barevného vzhledu CIECAM02.
- e) Zvýšení predikční schopnosti modelu CIECAM02 a CAM02–UCS. Ke zvýšení predikční schopnosti modelu je navrhována a testována úprava faktoru úrovně adaptačního jasu, který slouží v modelu CIECAM02 pro kompenzaci různých úrovní adaptačních jasů ve fotopické, mezopické a skotopické oblasti vidění.
- f) Zvýšení predikční schopnosti modelu CIECAM02 změnou funkce pro výpočet subjektivní chromatičnosti v oblasti nízkých úrovní mezopických adaptačních jasů.
- g) Testování a hodnocení nejistot, přesnosti a preciznosti měření pro možnou vzájemnou přenositelnost dat mezi spektrofotometry.

- h) Stanovení a hodnocení chyb měření pro spektrofotometrická měření a stanovení korekčních faktorů pro účely přenositelnosti dat mezi spektrofotometry v případě, kdy není k dispozici referenční spektrofotometr.

III. Přehled současného stavu problematiky

1. Vnímání barev člověkem

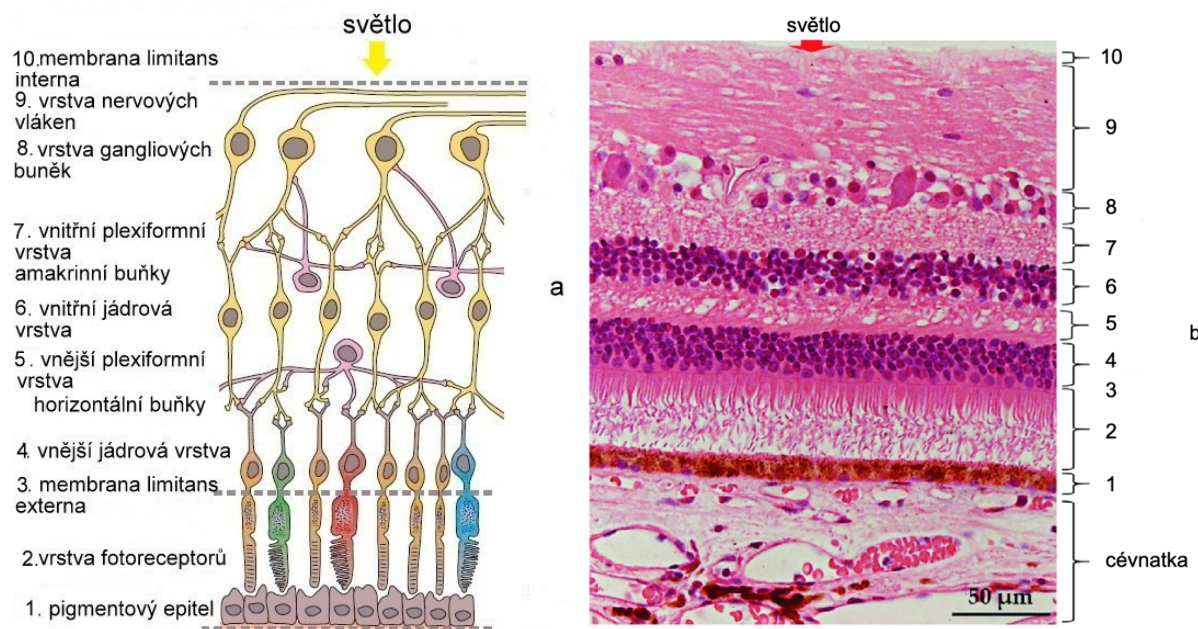
1.1 Sítnice

Sítnice se nachází na zadní stěně oka, je součástí vnitřní vrstvy oka označované tunica nervosa. Z anatomického hlediska je sítnice rozlišena na 10 vrstev (obrázek 1.1). Sítnice je tvořena optickou částí tvořící zádni segment oka (pars optica retinae), která je rozdělena na pigmentový epitel a neuroretinu, tj. vlastní nervovou vrstvu a slepou část (pars caeca retinae), která neobsahuje žádné nervové ani smyslové buňky. [1–9]

Hlavním úkolem sítnice je chemický proces, při kterém se dopadající světelné paprsky mění v elektrické impulsy/vzruchy, které jsou pomocí zrakové dráhy převáděny do mozku. Za tento proces jsou odpovědné vysoce specifické vrstvy sítnice nazývané fotoreceptory, dále poté bipolární a gangliové buňky.

Proces přeměny světelné energie na energii elektrickou je popsán pomocí transdukčního procesu. [1, 2]

Jak je zmíněno v předchozím odstavci, z anatomického hlediska je sítnice 10 vrstevnatá tkáň rozprostírající se na zadní stěně oka. [1–5, 8–12]



Obrázek 1.1 – Funkční vrstvy sítnice – a. schéma řezu sítnicí [převzato 11], b. mikroskopický řez sítnicí [převzato 12]

Vrstvy sítnice tvoří: [1–10]

1. *Pigmentový epitel sítnice* – pigmentový epitel je jedna vrstva silně pigmentovaných epiteliálních buněk hexagonálního tvaru. Odděluje sítnici od cévnatky, na druhé straně částečně zasahuje mezi výběžky fotoreceptorů. Mezi funkce pigmentového epitelu patří absorpce dopadajícího rozptýleného světla, epiteliální transport živin pro fotoreceptory, izolace vnitřních vrstev sítnice od okolních vlivů. Epitel odpovídá i za homeostázu a transport iontů, plní základní úlohu při udržování vizuální funkce, která souvisí s adaptací na různou intenzitu světla.
2. *Vrstva fotoreceptorů* – v této části sítnice se nacházejí vnější výběžky fotoreceptorů.
3. *Membrana limitans externa* – je tenká vrstva gliových buněk oddělující výběžky (dendrity) fotoreceptorů od jejich jader.
4. *Vnější jádrová vrstva* – vnější jádrová vrstva je tvořena buněčnými jádry fotoreceptorů, které tvoří první neuron zrakové dráhy.
5. *Vnější plexiformní vrstva* – vnější plexiformní vrstva je místem synapsí mezi axony fotoreceptorů a dendrity bipolárních buněk.
6. *Vnitřní jádrová vrstva* – vnitřní jádrová vrstva je tvořena buněčnými jádry bipolárních buněk, které tvoří druhý neuron zrakové dráhy, buněčnými jádry horizontálních a amakrinních buněk.
7. *Vnitřní plexiformní vrstva* – vrstva, ve které se nacházejí synapse mezi axony bipolárních a dendrity amakrinních a gangliových buněk.
8. *Vrstva gangliových buněk* – vrstva tvořená buněčnými jádry multipolárních gangliových buněk, které vytvářejí třetí neuron zrakové dráhy. Souhrnně jsou označovány jako ganglion opticum.
9. *Vrstva nervových vláken* – vrstva nervových vláken je tvořena axony gangliových buněk.
10. *Membrana limitans interna* – vrstva oddělující sítnici od vnitřního oka, je tvořená gliovými buňkami. Mezi gliové buňky patří tvarem cylindrické Müllerovy buňky a astrocyty, které mají rozvětvený hvězdicovitý tvar.

Bipolární buňky jsou neuronové buňky v sítnici zajišťující synapse přímo mezi fotoreceptory (vždy pouze tyčinky nebo čípky) a gangliovými buňkami nebo nepřímo mezi fotoreceptory a gangliovými buňkami pomocí horizontálních buněk. Jádra bipolárních buněk tvoří druhý neuron zrakové dráhy. [1–10]

Gangliové buňky jsou neuronové buňky nacházející se v sítnici lidského oka, jejich jádra tvoří třetí neuron zrakové dráhy. Gangliové buňky jsou přes bipolární a horizontální buňky propojeny s fotoreceptory, od kterých přijímají vstupní informace. V místě žluté skvrny je na jednu gangliovou buňku napojen 1 fotoreceptor, oproti tomu na periférii sítnice připadají na jednu gangliovou buňku tisíce fotoreceptorů. [1, 3–6, 10] Axony gangliových buněk vystupují ze sítnice v místě slepé skvrny, kde vytvářejí zrakový nerv. Informace je dále ke zpracování přenášena ve formě akčních potenciálů. [1, 3, 4, 8–10]

Gangliové buňky můžeme rozdělit do tříd podle jejich specifikace nebo podle jejich funkce.

Gangliové buňky se podle specifikace dělí na tři třídy: [1, 2, 3, 8–10, 13, 14]

- a. *Y-gangliové buňky* jsou největší buňky, jsou odpovědné za rychlý pohyb očí a reagují na rychlou změnu intenzity světla.
- b. *X-gangliové buňky* jsou největší skupinou gangliových buněk (55 % všech), detekují pohyb v malém rozsahu zorného pole a odpovídají za zpracování barevného vidění.
- c. *W-gangliové buňky* jsou velmi malé buňky zpracovávající signál z tyčinek, detekují pohyb v širokém rozsahu zorného pole.

Gangliové buňky se na základě funkce dělí na pět tříd: [1–3, 8–10, 13, 14]

- a. *P-gangliové buňky (parvocelulární)* – promítají se do parvocelulárních vrstev corpus geniculatum laterale. Buňky mají malé axony i buněčná těla. Tvoří 80 % všech gangliových buněk. Získávají informace z čípků typu L a M. [14]
- b. *M-gangliové buňky (magnocelulární)* – promítají se do magnocelulárních vrstev corpus geniculatum laterale. Axony i buněčná těla mají velká. Jsou málo citlivé na změny barvy, ale vysoce citlivé i na podněty s malým kontrastem. Tvoří 10 % gangliových buněk. Informace získávají z tyčinek.
- c. *K-gangliové buňky (koniocelulární)* – promítají se do postranních vrstev corpus geniculatum laterale. Buňky jsou velmi malé. Přijímají signály čípků typu S.
- d. *Fotosenzitivní gangliové buňky* – obsahují vlastní fotosenzitivní pigment melanopsin. Odpovídají za udržování cirkadiálního rytmu. [10]
- e. *Gangliové buňky* odpovídající za pohyb očí.

Horizontální buňky jsou neuronové buňky, na rozdíl od ostatních buněk na sítnici vedou impulzy mezi neurony vodorovně uvnitř vnitřní plexiformní vrstvy, kde tvoří synapse mezi axony fotoreceptorů a dendritů bipolárních buněk. [1–10]

Amakrinní buňky jsou neuronové buňky nacházející se ve vnitřní plexiformní vrstvě sítnice. Ovlivňují výstup bipolárních buněk. Přes synapse jsou spojeny s axony bipolárních buněk a dendrity gangliových buněk. [1–10]

Žlutá skvrna (macula lutea) je bezcévná oblast sítnice o průměru 5,5 mm. Anatomicky ji tvoří 5 částí – perifovea, parafovea, fovea, foveola a umbo. [1, 3, 4, 8–10] Její název je odvozen od pigmentu, který obsahuje, od luteinu. [1, 3, 4, 8–10]

Umbo je prohlubeň nacházející se ve středu foveoly s průměrem 0,15 mm a je oblastí s nejvyšší koncentrací čípků. Okolo umba se rozprostírá foveola s průměrem 0,35 mm. I foveola obsahuje stejně jako umbo pouze čípky. Každý jeden čípek je zde spojen s jednou gangliovou buňkou a jednou bipolární buňkou, na základě čehož je tato oblast sítnice označována jako místo nejostřejšího vidění. Fovea je oblast s průměrem 1,5 mm. Vnitřní vrstvy sítnice jsou v místě fovey stlačeny ke stranám, což způsobuje ztenčení sítnice v místě foveoly. Parafovea obklopuje foveu v šířce přibližně 0,5 mm a je obklopena perifoveou o šířce 1,5 mm. [3, 4, 8, 9]

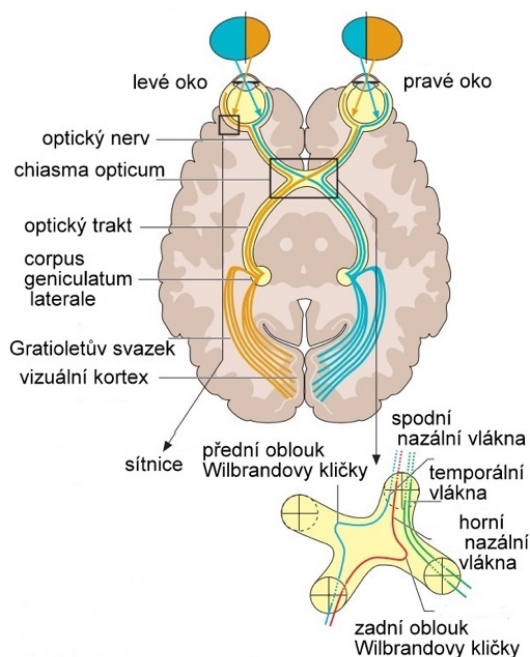
Slepá skvrna je místem, ve kterém se nenacházejí žádné fotoreceptory. Slepá skvrna je místem výstupu zrakového nervu z oka. [1, 3, 4-6, 8, 9]

1.2 Zraková dráha

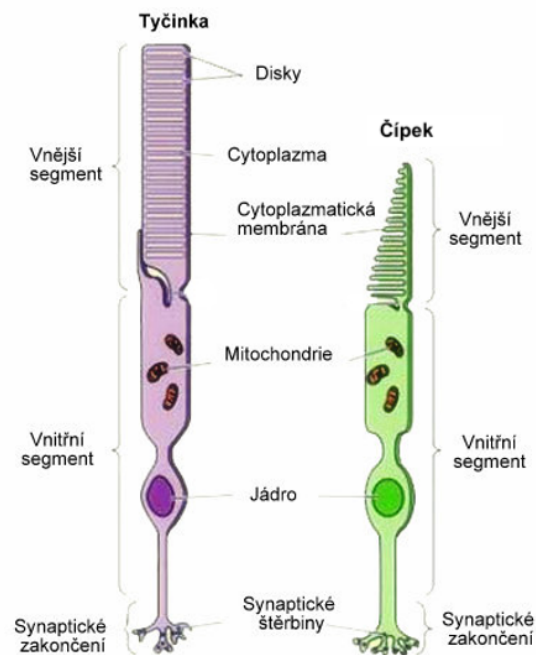
Zraková dráha (*obrázek 1.2*) zajišťuje přenos vizuální informace ze sítnice do zrakových center v mozku, kde dochází k jejímu zpracování. Je tvořena čtyřmi neurony – jádry fotoreceptorů, jádry bipolárních buněk, jádry gangliových buněk a buňkami corpus geniculatum laterale. [1, 3, 4, 8–10, 13, 14]

Zrakový nerv je II. hlavový nerv (nervus opticus). Zrakový nerv vzniká spojením axonů gangliových buněk v místě zvaném papila zrakového nervu. Zrakový nerv přenáší informaci ze sítnice do zrakového centra v mozku. Zrakový nerv je tvořen milionem myelinizovaných vláken. Z vnějšku je obalen třemi vrstvami – měkkou plenou mozkovou (pia matter), střední plenou mozkovou (arachnoidea) a tvrdou plenou mozkovou (dura mater). [1–10, 15]

V místě chiasma opticum dochází ke křížení 60 % vláken zrakových nervů z nazálních polovin sítnice. Vlákna z temporálních polovin sítnice se v chiasma opticum nekříží a za chiasma opticum se spojují s překříženými vlákny pocházející z druhého oka.



Obrázek 1.2 – Zraková dráha [převzato 15]



Obrázek 1.3 – Schéma fotoreceptorů (vlevo tyčinka, vpravo čípek) [převzato 19]

Anatomicky je chiasma opticum bílá čtyřhrá ploténka ležící mezi třetí mozkovou komorou a hypofýzou, ze stran je obklopena karotidami. Předními dvěma rohy vstupují do chiasmatu oba optické nervy, zadními dvěma rohy vystupují z chiasmatu dva optické trakty, které nesou informaci k dalšímu zpracování do corpus geniculatum laterale.

Corpus geniculatum laterale nebo také lateral geniculate nucleus je místem tvořící čtvrtý neuron zrakové dráhy. Corpus geniculatum laterale je tvořeno 2 vnitřními magnocelulárními vrstvami a 4 vnějšími parvocelulárními vrstvami. Vlákna, která z něho vystupují, se nazývají Gratioletovým svazkem nebo také zrakovou radiací a končí ve zrakovém centru. [1–10, 15]

Zraková korová centra se nacházejí v okcipitálním laloku. V lidském mozku se nachází pět zrakových center odpovídajících za zpracování vizuálního vjemu. [1–10, 16, 17]

Area 17 (Brodmanova oblast 17) je místem zpracování informací přicházejících přímo z corpus geniculatum laterale (primární vizuální kortex V1) a je místem, kde končí zraková dráha. V této oblasti jsou zpracovány zrakové počítky včetně barevných. [1, 10, 16–18]

Area 18 (Brodmanova oblast 18 nebo sekundární vizuální kortex V2) obklopuje primární vizuální oblast, ze které přijímá informace ke zpracování, jako jsou například rozpoznávání

objektů, vizuálně-motorické dovednosti nebo prostorová orientace. Zpracované informace posílá zpět do V1 nebo k dalšímu zpracování do V3-V5. [1, 10, 17, 18]

Area 19 (Brodmanova oblast 19 nebo terciální vizuální kortex V3) obklopuje oblast V2 a zpracovává informace související s pohybem i barevným vjemem. [1, 10, 17, 18]

V oblastech V4 a V5 vizuálního kortexu dochází ke zpracování barevného vjemu a motorických funkcí. [10, 16–18]

1.3 Fotoreceptory

Fotoreceptory jsou světločivné buňky sítnice (vysoce senzitivní neurony), které jsou odpovědné za primární zpracování světelného signálu. Mezi fotoreceptory řadíme tyčinky a čípky, které jsou tvořeny vnější částí (vlastní tyčinkou nebo čípkem, vnější segment), jádrovou částí (oblast jádra, vnitřní segment) a částí se synapsemi. [1–3, 7–10, 13]

1.3.1 Tyčinky

Tyčinka (*obrázek 1.3*) je tvořena vnější částí (vnější segment), která se dále rozděluje na vnější a vnitřní výběžek. Ve vnějším výběžku se nachází pigment zvaný rodopsin, ve vnitřním výběžku se nacházejí mitochondrie a polyribosomy. Vnitřní část (vnitřní segment) je tvořen jádrem a nervovými vlákny. Synapse jsou třetí částí tvořící tyčinky, které tvoří spojení s bipolárními buňkami. Na sítnici se nachází 110 – 120 milionů tyčinek.

1.3.2 Čípky

Čípky (*obrázek 1.3*) jsou druhým typem fotoreceptorů, které jsou odpovědné za tzv. ftopické vidění nebo také barevné vidění. Stejně jako tyčinky, mají čípky vnitřní a vnější úsek. Vnitřní úsek je tvořen jádrem. Vnější úsek je poté tvořen vnějším výběžkem, ve kterém se nacházejí mitochondrie a vnitřním výběžkem, kde se nachází světločivný pigment iodopsin. Poslední část tvoří také synapse, které zprostředkovávají spojení s bipolárními buňkami. Na sítnici se nachází oproti tyčinkám pouze 6 milionů čípků.

Oproti tyčinkám jsou čípky méně senzitivní, protože přijímají světlo vyšší intenzity. [1] Na sítnici se nacházejí tři typy čípků. Čípky se liší typem obsahovaného iodopsinu, který je různě citlivý na různou vlnovou délku dopadajícího světla (*obrázek 1.4*). [1, 10] Na základě toho rozlišujeme čípky typu L (citlivý na vlnovou délku 565 nm), čípky typu M (citlivý na vlnovou délku 540 nm) a čípky typu S (citlivý na vlnovou délku 440 nm). Zastoupení čípků na sítnici není rovnoměrné, nejvíce čípků se nachází v oblasti žluté skvrny, postupně směrem k periférii

sítnice jejich hustota klesá. Poměr jednotlivých čípků L:M:S v sítnici v případě bezdefektního vidění je 32:16:1.

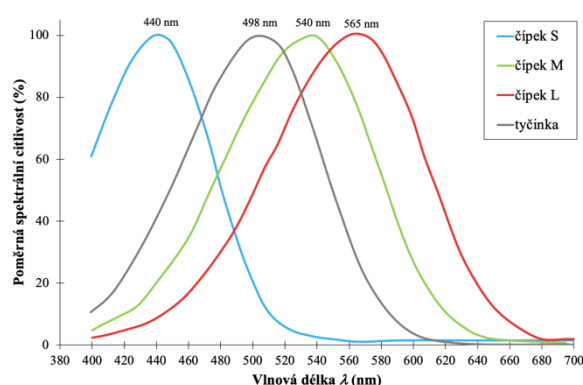
1.3.3 Opsin

Citlivost lidského oka je závislá na přítomnosti světločivného pigmentu, který se v jeho různé formě nachází ve strukturách sítnice. Každá z forem opsinu se liší různou spektrální citlivostí na vlnovou délku dopadajícího světla (*obrázek 1.5*). Další formy opsinu jsou dostupné v literatuře. [20]

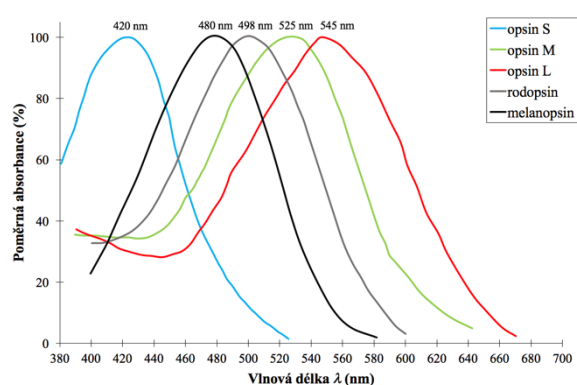
Iodopsin je světločivný pigment skládající se z opsinu a 11-cis-retinalu. Na lidské sítnici se nacházejí tři druhy iodopsinu. Každý druh je různě citlivý na jinou vlnovou délku dopadajícího světla. Na základě této citlivosti rozlišujeme tři druhy čípků – čípky typu L (dlouhovlnné, opsin citlivý na světlo ze žluté/oranžové oblasti viditelného spektra), čípky typu M (středně vlnné, opsin citlivý na světlo ze žluté/zelené oblasti viditelného spektra) a čípky typu S (krátkovlnné, opsin citlivý na světlo z modré/fialové oblasti viditelného spektra). Opsin, nacházející se v čípcích typu S je kódován na chromozomu 7, opsin nacházející se v čípcích typu M a L je kódován na chromozomu X. [1, 13, 21–29]

Rodopsin je zrakový pigment nacházející se v tyčinkách. Je tvořen typem opsinu zvaným rhod-opsin a 11-cis-retinalu. [1, 13, 25, 26]

Melanopsin je typ opsinu nacházející se v gangliových buňkách, který se účastní procesů cirkadiálních rytmů. [1, 13, 30]



Obrázek 1.4 – Poměrná spektrální citlivost fotoreceptorů [převzato 30]



Obrázek 1.5 – Poměrná absorpce opsinů [převzato 30]

1.4 Fotopické vidění

Fotopické vidění je označením pro vidění, při kterém převládají svojí funkcí čípkové a při kterém je umožněno rozlišování a vnímání barev. Pro fotopické vidění odpovídají hodnoty jasů 10^1 a 10^8 cd. m⁻². [31–35]

1.5 Skotopické vidění

Skotopické vidění je vidění při snížených světelných podmínkách odpovídající jasům 10^{-6} a 10^{-2} cd. m⁻². [31, 35] Při tomto vidění odpovídají za vidění tyčinky, které jsou citlivé na světlo vlnové délky přibližně 500 nm. [32–34]

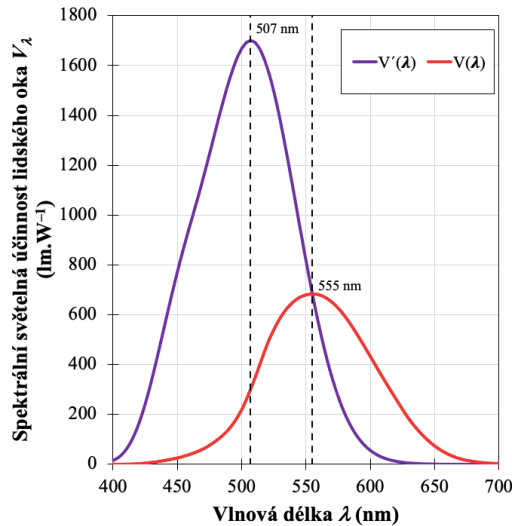
1.6 Mezopické vidění

Mezopické vidění je označením pro vidění, v oblasti mezi fotopickým a skotopickým viděním. S postupným snižováním adaptační úrovně jasů dochází ke ztrátě schopnosti rozlišovat barvy a ztrátě zrakové ostroty. Mezopická oblast vidění je popsána adaptačními jasy 10^{-2} až 10^1 cd. m⁻². V některých zdrojích [33] lze najít rozsah od 0,005 – 5 cd. m⁻² nebo 0,003 – 3 cd. m⁻². [33] V této oblasti fungují oba dva typy fotoreceptorů, se snižující se úrovní jasů postupně převládá větší zastoupení tyčinek. Lidské oko ztrácí postupně schopnost rozlišovat červenou, žlutou, zelenou a modrou barvu. Dopadající světlo díky rozšířené zornici dopadá na větší oblast sítnice. [31–41]

1.7 Funkce spektrální světelné účinnosti lidského oka

Pro popis spektrální citlivosti oka definovala Mezinárodní Komise pro Osvětlování (CIE) funkci Poměrné spektrální světelné účinnosti lidského oka V_λ (obrázek 1.6), která popisuje spektrální citlivost oka ve fotopické oblasti vidění. [33, 34] Pro skotopickou oblast vidění CIE definovala funkci Poměrné spektrální světelné účinnosti lidského oka V'_λ (obrázek 1.6). [33, 34, 35, 39–42]

Pro popis vidění v mezopické oblasti vidění doporučil Technický výbor CIE TC1-58 Systém mezopické fotometrie [33] neboli vhodné funkce popisující posun spektrální citlivosti oka z fotopické do skotopické oblasti vidění. Tato funkce popisující spektrální citlivost oka v mezopické oblasti vidění je označena názvem Poměrná spektrální světelná účinnost lidského oka v mezopické oblasti vidění $V_{mes,\lambda}$. Tato funkce je lineární kombinací V_λ a V'_λ . [33, 34, 39–42]



Obrázek 1.6 – Funkce spektrální světelné účinnosti lidského oka (fotopická a skotopická)

Poměrná spektrální světelná účinnost lidského oka v mezopické oblasti vidění $V_{mes,\lambda}$ je definována podle rovnice (1.1) [33, 34]:

$$M(m)V_{mes,\lambda} = mV_{\lambda} + (1 - m)V'_{\lambda} \quad \text{pro } 0 \leq m \leq 1 \quad (1.1)$$

$$L_{mes} = \frac{683}{V_{mes,\lambda_0}} \int V_{mes,\lambda} L_{e\lambda} d\lambda \quad (1.2)$$

kde $M(m)$ je adjustační faktor takový, aby bylo dosaženo odpovídajícího poměrného průběhu funkce $V_{mes,\lambda}$, m je koeficient udávající poměr mezi V_{λ} a V'_{λ} s ohledem na úroveň adaptačního jasu, V_{mes,λ_0} je hodnota při 555 nm, L_{mes} je mezopický jas v $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$, V_{λ} je funkce poměrné spektrální světelné účinnosti lidského oka ve fotopické oblasti vidění, V'_{λ} je funkce poměrné spektrální světelné účinnosti lidského oka ve skotopické oblasti vidění. [33]

Vztah mezi úrovní mezopického jasu a adaptačním koeficientem m je dán rovnicemi (1.3) a (1.4) [33]. Výpočet rovnic (1.3) a (1.4) je proveden pomocí iteračního výpočtu.

$$L_{mes,n} = \frac{m_{1,(n-1)}L_P + (1 - m_{1,(n-1)})L_S V'_{\lambda_0}}{m_{1,(n-1)} + (1 - m_{1,(n-1)})V'_{\lambda_0}} \quad (1.3)$$

$$m_{1,(n-1)} = a + b \log L_{mes,n} \quad (1.4)$$

kde L_P je úroveň jasu ve fotopické oblasti (shodná s hodnotou L_A), L_S je úroveň jasu ve skotopické oblasti, V'_{λ_0} je funkce poměrné spektrální světelné účinnosti lidského oka při 555 nm

(683/1700), a a b jsou parametry s hodnotou 0,7660 a 0,3334. Koeficient m nabývá hodnoty od 0 do 1. Je-li hodnota $L_{mes} \geq 5 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$, je hodnota koeficientu $m = 1$, je-li hodnota $L_{mes} \leq 0,005 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$, je hodnota koeficientu $m = 0$ a $m_{1,0} = 0,5$, n je iterační krok. [33, 34]

S/P poměr neboli skotopicko/fotometrický poměr je poměrem mezi skotopickou spektrální září $L_{e\lambda S}$ a fotopickou spektrální září $L_{e\lambda P}$ vynásobený poměrem V'_λ a V_λ . S/P poměr lze vypočítat podle rovnice (1.5). [33, 34, 43]

$$S/P = \frac{1700 \int_{380}^{780} L_{e\lambda S} V'_\lambda \Delta\lambda}{683 \int_{380}^{780} L_{e\lambda P} V_\lambda \Delta\lambda} \quad (1.5)$$

S/P poměr se používá pro vyjádření spektrální záře v mezopické oblasti vidění na základě naměřených spektrálních září ve fotopické a skotopické oblasti vidění, respektive lze podle něj hodnotit kvalitu světelného zdroje v různých oblastech vidění. Hodnoty S/P poměru rovné 1 říkají, že světelný zdroj vyzařuje shodně ve všech oblastech.

Poměr nižší než 1 říká, že světelný zdroj produkuje více fotopické spektrální záře než skotopické, a naopak poměr vyšší než 1 říká, že světelný zdroj produkuje více skotopické spektrální záře než fotopické. Hodnoty poměru lze následně použít při porovnávání více druhů světelných zdrojů, chceme-li například hodnotit jejich vliv na lidských zrak nebo hodnotit různé zdroje z hlediska jejich náhradní teploty chromatičnosti. [43–46]

Mimo CIE model rovnice (1.1), který popisuje funkci spektrální účinnosti lidského oka v mezopické oblasti vidění, byly definovány a popsány další modely. Mezi tyto modely patří model MOVE-system navržený Goodmanem [33, 34, 42, 44, 45] a USP-system navržený Reaou [33, 34, 47].

MOVE-system (Mesopic Optimization Visual Efficiency) je definován pro úrovně jasů od 10^{-2} do $10^1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Systém je navržen pro řízení v noci a má tři hlavní cíle, kterými je detekce vizuálního cíle, rychlost detekce a identifikace detailů na vizuálním cíli. [42]

USP-system je (Unified System of Photometry) je definován pro úrovně jasů od 10^{-2} do $10^1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Systém je založen na měření reakční doby. [33]

1.8 Purkyňův jev

Purkyňův jev (někdy nazýván Purkyňův posun nebo efekt) byl popsán Janem Evangelistou Purkyněm v jeho disertační práci předložené v roce 1819. Ve své disertační práci popsal, že úroveň osvětlení má velký vliv na vnímání barev. Popsal svoje pozorování, při kterém

pozoroval květiny v různých denních časech (při svítání, jasném slunečním svitu, při západu slunce a v noci). Všiml si, že barva květin se s ohledem na denní dobu mění. Popsal, že před úsvitem viděl pouze černou a šedou barvu, při východu slunce pozoroval původně velmi jasné barvy (červené a zelené části) tmavší oproti pozorování při denním světle, kdy bylo možné rozeznat několik různých barevných tónů červené. Dále vypořezoval, že modrá barva je lépe viditelná a zelená barva se zdála modřejší než na jasném slunci. [48–51]

Tyto experimenty ho vedly ke zjištění, které definuje Purkyňův jev. Ten popisuje posun maximální citlivosti lidského oka směrem ke kratším vlnovým délkám při snižování úrovně osvětlení. Purkyně (1825) popsal experiment provedený v prvotních fázích adaptace na tmu, při kterém pozoroval bílé světlo procházející hranolem. Po deseti minutové adaptaci na tmu se nejjasnější část posunula směrem ke kratším vlnovým délkám. [48–51]

Na základě tohoto bylo definováno, že maximální spektrální citlivosti lidských čípků je dosaženo při vlnové délce 555 nm (*obrázek 1.6*), kdy maximální spektrální světelná účinnost dosahuje hodnoty $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, zatímco maximální spektrální citlivost lidských tyčinek je dosaženo při 507 nm (*obrázek 1.6*) s maximální spektrální světelnou účinností $1700 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. [48–51]

Z toho vyplývá, že lidské oko je více senzitivní při snížených úrovních osvětlení než při vyšších úrovních osvětlení.

1.9 Adaptace

Adaptace je vlastnost lidského oka reagovat na změny okolních podmínek a podnětů změnou citlivosti na tyto podněty. Popisuje tedy schopnost lidského oka přizpůsobit se různým úrovním jasů okolního světla. Lidské oko je schopné rozlišit široký rozsah úrovní jasů od velmi nízkých jasů ($10^{-6} \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$) až po velmi vysoké úrovně jasů ($10^8 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$). [31] Adaptační mechanismy jsou spojené s foto-pupilárním reflexem a různou spektrální citlivostí lidských fotoreceptorů. Adaptací je tedy označen přechod mezi vysokými úrovněmi adaptačních jasů, při kterých fungují čípky až k velmi nízkým úrovním adaptačních jasů, při kterých fungují tyčinky. Během tohoto přechodu postupně oko ztrácí schopnost vidět barvy a v raných fázích adaptace se orientuje pouze pomocí kontrastu. [49, 50, 52]

Adaptaci jako takovou dělíme na adaptaci na světlo, adaptaci na tmu a adaptaci chromatickou.

Oba typy adaptace jsou ovlivněny mechanismy a vlastnostmi jednotlivých částí zrakového systému. Adaptace je ovlivněna dynamickými (fyziologickými) adaptačními mechanismy,

kteře pomáhají optimalizovat vizuální reakci na změny okolních podmínek a podnětů. Mezi mechanismy se řadí foto-pupilární reflex (reakce zornic), procesy na úrovni sítnice (různá spektrální citlivost fotoreceptorů), přenos elektrického signálu optickým nervem (gangliové buňky, corpus geniculatum laterale) a následné zpracování ve vyšších kortikálních oblastech (vizuální kortex). [1, 49, 50, 52]

1.9.1 Adaptace na světlo

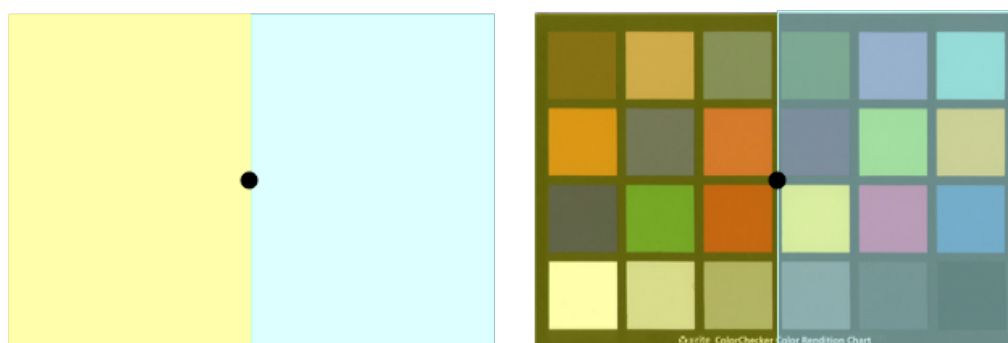
Adaptace na světlo je proces, při kterém spektrální citlivost lidského oka klesá s rostoucí úrovní adaptačního jasu. Protože do oka vstupuje světlo s vyšší intenzitou, oko reaguje na tuto situaci snížením vizuální citlivosti. Jako příklad si můžeme představit situaci, kdy vcházíme z neosvětlené místnosti do osvětlené. [49, 52]

1.9.2 Adaptace na tmou

Adaptace na tmou je opačným procesem adaptace na světlo. Do oka vstupuje světlo s nižší energií a lidské oko reaguje na tento fakt zvýšením své vizuální citlivosti pro zajištění správné citlivosti. Na rozdíl od adaptace na světlo, která trvá v řádu sekund až minut, adaptace na tmou trvá v rozmezí 30 – 60 minut. Jako příklad si můžeme představit opačnou situaci, tedy kdy vstupujeme z osvětlené místnosti do neosvětlené. [6, 49, 50, 52]

1.9.3 Chromatická adaptace

Trichromatická kolorimetrie popisuje situaci, kdy se dva podněty shodují při pozorování za stejných podmínek. Některé podněty posuzované v páru mohou být ve shodě v širokém rozsahu podmínek pozorování. Chromatická adaptace tedy popisuje fakt, kdy shoda mezi posuzovanými předměty zůstává, avšak dochází ke změně jejich barevného vzhledu. [49, 50, 53]



Obrázek 1.7 – Chromatická adaptace – simulace

Chromatická adaptace (simulace na *obrázku 1.7*) popisuje změnu ve vnímání barev objektů při použití různých zdrojů osvětlení (color constancy/stálost barev) oproti Purkyňově jevu, který popisuje vnímání barev z hlediska citlivosti čípků a tyčinek. Chromatická adaptace popisuje schopnost zrakového systému adaptovat se na různé typy osvětlení, aby přibližně zůstal zachován barevný vzhled podnětů.

Chromatická adaptace je tedy procesem, který popisuje chromatické vlastnosti vnímání barev při různých úrovních adaptačních jasů. Lidský zrakový systém je schopen vnímat velmi malou změnu barevnosti podnětů při změně osvětlení, ve značné míře se jedná o nezávislou regulaci mechanismů barevného vidění. Chromatickou adaptaci je nutné brát komplexně, protože na její mechanismus mají vliv mimo změny citlivosti čípků i mechanismy ovlivňující vnímání objektů jako takových.

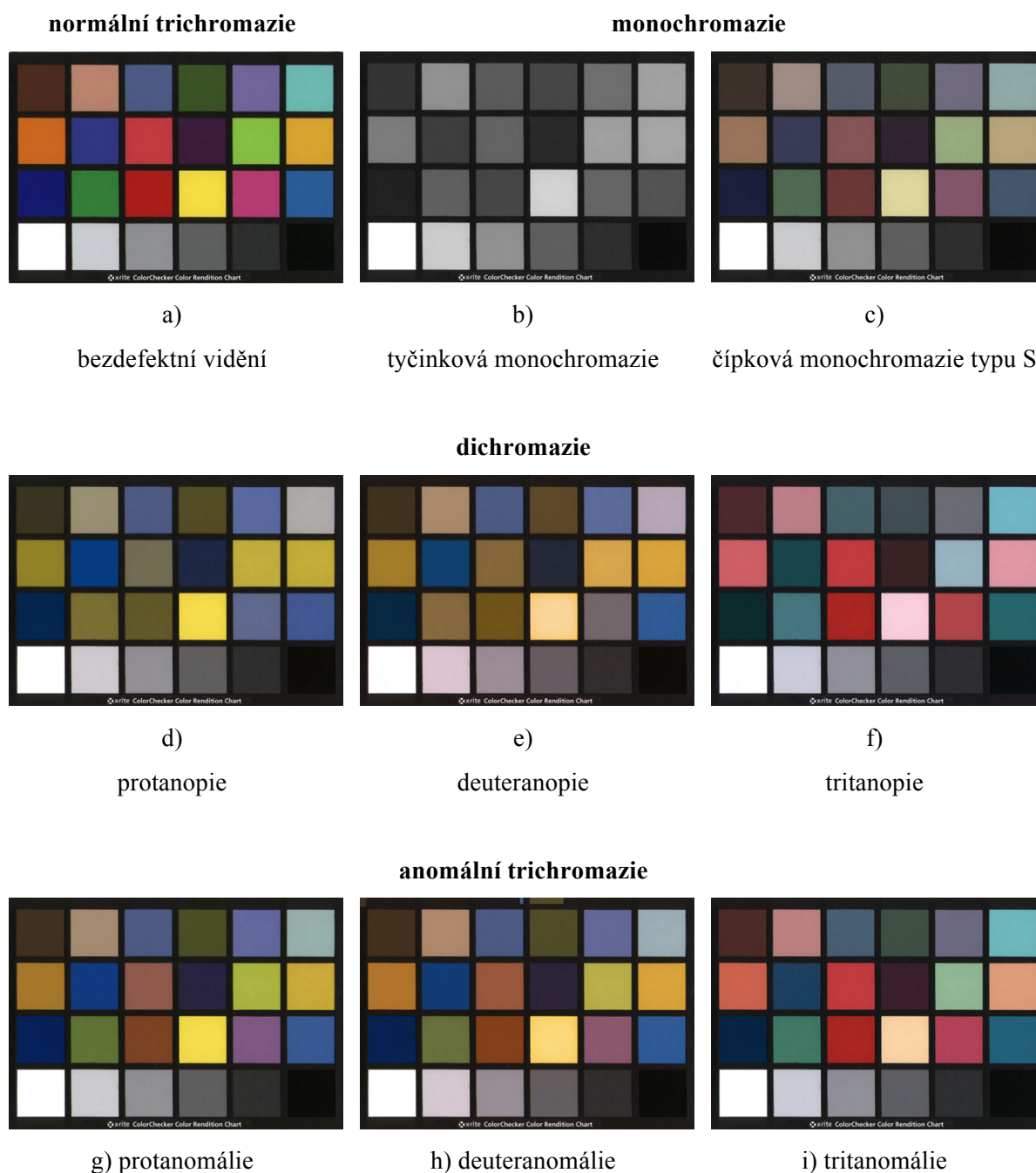
1.10 Barvocit a jeho testování

1.10.1 Poruchy barvocitu

Zrak a s ním spojené barevné vidění je dnešní společností považováno za samozřejmost. Barevné vidění je součástí každodenních situací, při kterých potřebujeme rozlišit věci, se kterými během dne přicházíme do kontaktu. Samotná barevnost věcí nám navíc do značné míry pomáhá si věci či situace s nimi spojené lépe zapamatovat. Toto privilegium však není samozřejmostí. Ve světě bylo k roku 2021 diagnostikováno více než 350 milionů lidí s vrozenou vadou barvocitu. [54] Vrozené vady barvocitu vznikají na základě genetické poruchy, která má za následek úplnou absenci některého z čípků či změnu jeho funkce. Kromě vrozených vad barvocitu může dojít k poruchám barvocitu i ze zdravotních důvodů (diabetes, glaukom, leukémie, věkem podmíněná makulární degenerace, pigmentová retinitida), vlivem dlouhodobého užívání psychotropních látek nebo jako důsledek chronického alkoholismu. Takovéto poruchy barvocitu nazýváme získanými poruchami barvocitu. [1, 54, 56, 57] V neposlední řadě můžeme hovořit o dočasně získaných poruchách barvocitu, které vznikají jako důsledek použití léků, při inhalaci nikotinu či například dlouhém koukání do sněhu. Tyto dočasné poruchy se souhrnně označují jako chromatopsie. [1, 8, 9, 54, 57]

Jedinec, u kterého nebyla diagnostikována porucha barvocitu je označen jako normální trichromat. *Normální trichromazie* neboli bezdefektní vidění (*obrázek 1.8a*) je tedy stav, kdy má jedinec na sítnici přítomny všechny tři druhy čípků a změnou jejich poměru je schopen vidět jakoukoliv barvu podle teorie barevného vidění. [1, 7, 45, 46, 69, 1245]

má jedinec na sítnici přítomny všechny tři druhy čípků a změnou jejich poměru je schopen vidět jakoukoliv barvu podle teorie barevného vidění. [1, 7, 45, 46, 69, 1245]



Obrázek 1.8 – Simulace poruch barvocitu

1.11 Vrozené poruchy barvocitu

1.11.1 Monochromazie

Monochromazie je označena jako porucha barvocitu, při které jedinec nemá schopnost barevného vidění, tedy jeho rozlišovací schopnost je založena na vnímání jasu. [13, 49, 55, 58]

Na sítnici není z důvodu genetické změny přítomen ani jeden funkční čípek (tyčinková monochromazie neboli achromazie) nebo je přítomen pouze jeden funkční čípek (čípková monochromazie). [1, 13, 23, 24, 57–60]

Tyčinková monochromazie (obrázek 1.8b) je typem úplné barvosleposti, kdy na sítnici není přítomen ani jeden funkční čípek. Jedná se o autosomálně recesivní dědičné onemocnění, které postihuje ženy i muže se stejnou pravděpodobností. [60] Tyčinková monochromazie je velmi často doprovázena dalšími přidruženými onemocněními zraku jako je nystagmus, nízká zraková ostrost, fotofobie či dalekozrakost. [4] Zaznamenaná incidence tohoto typu poruchy barvocitu je 1:30 000.

Čípková monochromazie je typem částečné barvosleposti. V případě této monochromazie je na sítnici přítomen vždy pouze jeden funkční čípek. [58, 59, 61] Na základě toho, který z čípků je na lidské sítnici funkční, rozlišujeme tři typy čípkové monochromazie. *Čípková monochromazie typu S* (blue cone monochromacy) – jedná se o velmi vzácné onemocnění vázané na chromozom X (*obrázek 1.8c*) [62], které je způsobeno absencí nebo mutací M a L čípků [1, 76], a které ve vyšší míře postihuje muže (1:100 000) než ženy (1: 10 000 000 000). *Čípková monochromazie typu M* (green cone monochromacy) – je způsobena absencí nebo mutací S a L čípků na sítnici. [1, 62] *Čípková monochromazie typu L* (red cone monochromacy) – je způsobena absencí nebo mutací S a M čípků. Výskyt onemocnění dvou posledně jmenovaných čípkových monochromazií je 1:1 000 000. [1, 23, 24, 62]

1.11.2 Dichromazie

Dichromazie je častější poruchou barvocitu než monochromazie. Je to porucha barvocitu, při které je jeden z na sítnici přítomných čípků zcela nefunkční nebo úplně chybí. [55, 58, 60, 63] Zbývající dva čípky se na základě trichromatické teorie barev snaží dotvořit vnímání barev. Podle typu nefunkčního nebo chybějícího čípku rozdělujeme dichromatické poruchy barvocitu na protanopii, deuteranopii a tritanopii. [1, 23, 24, 55, 57, 62]

Protanopie (obrázek 1.8d) je recesivně dědičná porucha barevného vidění na chromozomu X, která je způsobena nefunkčním nebo nepřítomným čípkem typu L. Jedinec zasažený touto poruchou barvocitu není schopen rozpoznávat mezi sebou zelené a červené barevné tóny z důvodu posunu absorpčního maxima čípku ke kratším vlnovým délkám. Protanopie postihuje ve vyšší míře muže než ženy (1 % : 0,01 %). [1, 58, 62]

Deuteranopie (obrázek 1.8e) je rovněž recesivně dědičná porucha barevného vidění na chromozomu X. [1, 58] Tento typ poruchy barevného vidění je způsoben nefunkčním nebo chybějícím čípkem typu M na sítnici. [1, 62] Jedinec není schopen rozlišovat červené, žluté a žlutozelené barevné tóny z důvodu posunu absorpčního maxima čípku směrem k delším vlnovým délkám. Postihuje více muže (1,5 %) než ženy (0,01 %). [1, 58, 60, 63]

Tritanopie (obrázek 1.8f) je autozomálně dominantní porucha barevného vidění dědičná přes chromozom 7, která způsobuje nepřítomnost či nefunkčnost čípku typu S. Jedinec není schopen rozlišovat mezi modrou, bílou a žlutou nebo mezi modrou a zelenou. Postihuje stejně muže i ženy (0,008 %). [1, 62]

1.11.3 Anomální trichromazie

Anomální trichromazie patří mezi nejčastěji diagnostikované poruchy barevného vidění. Oproti dichromazii mají jedinci na sítnici přítomny všechny druhy čípků. Avšak jeden z přítomných čípků má oslabenou funkci, která vede k nepoměru při vnímání barev, respektive spektrální citlivost oslabeného čípku je oproti správně fungujícímu čípku posunuta ke kratším nebo delším vlnovým délkám. Podle druhu čípku, který je oslaben ve své funkci, rozdělujeme anomální trichromazii na protanomálii, deuteranomálii a tritanomálii. [1, 23, 24, 55, 57, 58, 62]

Protanomálie (obrázek 1.8g) se řadí k nejčastějším poruchám barvocitu, která se přenáší z generace na generaci přes chromozom X. [1, 57, 58, 62] Protanomálie je důsledkem posunu maximální spektrální citlivosti čípku L směrem ke kratším vlnovým délkám, kde se setkává s maximální spektrální citlivostí čípku M. Jedinec, který trpí touto poruchou, není schopen správně rozlišovat červenou a zelenou, nebo zelenou a modrou barvu. Postihuje více muže (1 %) než ženy (0,01 %). [1, 58, 62]

Deuteranomálie (obrázek 1.8h) je nejčastější porucha barvocitu, která se přenáší mezi generacemi přes chromozom X a trpí jí 5 % mužské populace a 0,4 % žen. [1, 57, 58, 62] Jedinec trpící tímto typem poruchy není schopen správně rozlišovat mezi červenou, zelenou a žlutou z důvodu posunu maxima spektrální citlivosti čípku M směrem k delším vlnovým délkám. [1, 58, 62]

Tritanomálie (obrázek 1.8i) stejně jako tritanopie je autosomálně dominantní poruchou barvocitu přenášenou přes chromozom 7 a projevující se poruchou čípku typu S. Jedná se o velmi vzácné onemocnění, které jedinci trpícímu touto poruchou způsobuje problém rozlišit modré a zelené a žluté a červené barevné tóny. [1, 58, 62]

1.12 Testování barvocitu

Testování barvocitu je možné provádět různými způsoby a testy. [64–68] Nejvíce používanými testy pro testování barvocitu jsou v současnosti Ishiharovy tabulky, AO-HRR tabulky, Farnsworth-Munsell 100-Hue Test (FM 100-Hue test) a Anomaloskop. [64, 65]

1.12.1 Farnsworth-Munsell 100-Hue test

FM 100-Hue test patří do skupiny seřazovacích testů na barvocit. Jeho nedostatkem je, že pouze na základě jeho použití nelze rozlišit anomální trichromaty a dichromaty. [64]

FM 100-Hue test je zaměřen na zjišťování získaných poruch barvocitu. Test vychází z Munsellova atlasu barev. Test tvoří celkem 85 barevných terčů rozdělených do čtyř řad (obrázek 1.9). Mezi všemi použitými terči je stejná barevnost. Hlavním úkolem testovaného pozorovatele je seřadit terče v jednotlivých řadách do správné posloupnosti mezi fixními terči na okrajích každé řady.

První řadu tvoří celkem 22 terčů označených čísly 85 – 21, krajní fixní terče jsou vždy shodné s prvním nefixním terčem z následující, respektive předcházející řady. Pro příklad pro řadu 85 – 21 mají fixní terče čísla 84 a 22. Zbylé tři řady jsou tvořeny vždy 21 terči (22 – 42, 43 – 63 a 64 – 84).

Po dokončení testu je vypočteno celkové chybové skóre (TES). Vyhodnocení je provedeno tak, že každý z terčů má přiřazenou hodnotu 2. Ta je součtem absolutních rozdílů mezi pozicí předcházejícího a následujícího terče. Pro příklad uvádím terč 48 ze třetí řady: $(|47-48|)=1$ a $(|48-49|)=1$. Součet těchto absolutních rozdílů je roven 2.



Obrázek 1.9 – Farnsworth-Munsell 100-HUE test

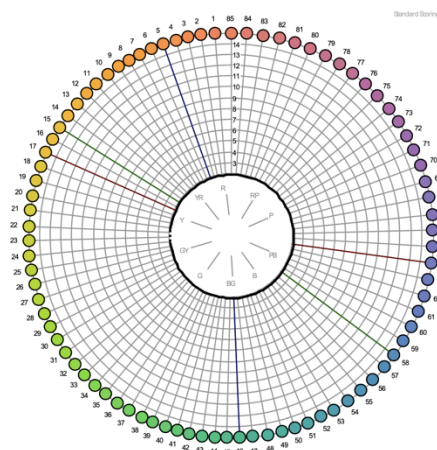
Pokud testovaná osoba/testovaný pozorovatel seřadí terčíky správně, je jeho celkové chybové skóre TES rovno 0. V případě, že pořadí terčků není seřazeno správně, je celkové chybové skóre vypočteno následujícím způsobem. Příklad: pořadí terčků určené pozorovatelem je následující 45 – 46 – 48 – 49 – 47 – 50 – 51. TES skóre tohoto pozorovatele je rovno 8 (2 – 3 – 3 – 3 – 5 – 4 – 2), protože se vždy sčítá hodnota, která se liší od přiřazené hodnoty 2 pro každý terčík.

Podle celkového chybového skóre jsou pozorovatelé rozřazováni do třech kategorií:

1. *pozorovatel s vynikající rozlišovací schopností (SUPERIOR)* – TES skóre je v rozmezí hodnot 0 – 16.
2. *pozorovatel s průměrnou rozlišovací schopností (AVERAGE)* – TES skóre je v rozmezí hodnot 16 – 100.
3. *pozorovatel s nízkou rozlišovací schopností (LOW)* – TES skóre je v rozmezí hodnot 100 a výše.

Celkové chybové skóre TES je vyjádřeno pomocí grafu polárních souřadnic (*obrázek 1.10*), na kterém je možné navíc ještě vidět zobrazené linie ve formě křivek pro tři typy poruch barevného vidění. Červená křivka označující protan poruchu barvocitu, zelená křivka označující deuteran poruchu barvocitu a modrá křivka označující tritan poruchu barvocitu. V *tabulce 1.1* jsou uvedeny terčíky, které pokud je zaměněno pouze jejich pořadí při vykonávání testu, ukazují na vadu barvocitu. [64]

Hodnoty v *tabulce 1.1* označené tučně jsou čísla terčků, v jejichž řazení dělají pozorovatelé chyby při hodnocení FM 100-Hue testu s menší pravděpodobností než u terčků s čísly vypsányými bez zvýraznění.



Obrázek 1.10 – TES skóre (0)

Tabulka 1.1 – Oblast záměny poloh terčků pro různé druhy poruch barvocitu

Porucha barvocitu	Označení terčků
protanopie	62 – 70 a 15 – 26
deuteranopie	56 – 61 a 12 – 17
tritanopie	46 – 52 a 4 – 6

Dalším parametrem vyhodnocování FM 100-Hue testu je hodnocení podle Vingryse [64, 65], který k celkovému chybovému skóre přidal ještě hodnocení podle úhlu anomálie (angle of anomaly), C-indexu (confusion index) a S-indexu (selectivity index). [64, 65]

2. Modely barevného vzhledu

Hodnocení barevného vzhledu povrchů je možné provést pomocí subjektivního/vizuálního hodnocení nebo objektivního měření/hodnocení. Vizualní hodnocení je ovlivněno různými faktory a aspekty, které mají na jeho výsledek různě velký vliv (například úroveň adaptačního jasu, typ osvětlení, okolí, kontrast, bezdefektní vidění). V neposlední řadě je nutné zmínit, že hodnocení každého pozorovatele je subjektivní. Stejně je to i s objektivním hodnocením, ke kterému se používají různé modely barevného vzhledu.

Dva podněty se shodnými trichromatickými složkami XYZ se budou pozorovateli jevit shodné v případě, kdy budou dodrženy podmínky pozorování. Mezi tyto podmínky patří například stejné pozadí, stejná úroveň adaptačního jasu, velikost a tvar vzorku, struktura povrchu, poloha vzorku. V případě praktických aplikací však nebylo možno splnit všechny výše zmíněné předpoklady pro predikci barevné shody pomocí trichromatické kolorimetrie.

2.1 Faktory ovlivňující barevný vzhled

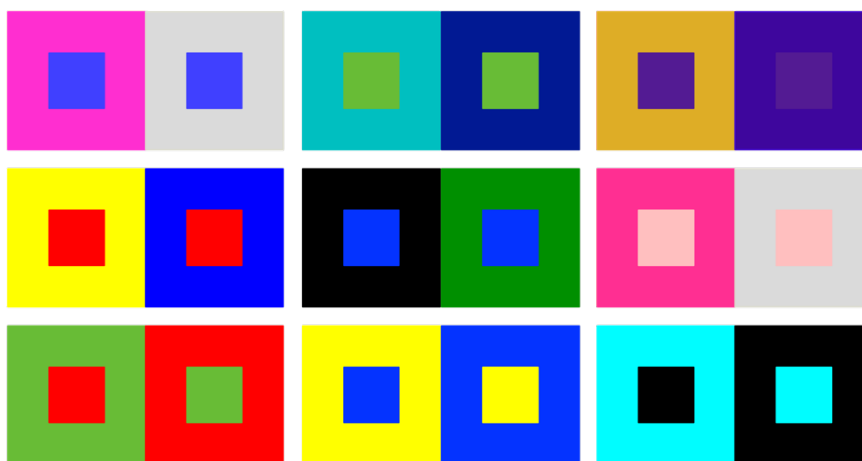
S hodnocením barevného vzhledu při různých úrovních adaptačního jasu či při změnách podmínek pozorování souvisejí jevy, které se objevují jako následek těchto změn. Tyto nastávající jevy narušují předpoklady trichromatické kolorimetrie. Pochopení těchto jevů, a především jejich příčin vedlo k zavedení a odvození modelů pro popis barevného vzhledu s užitím různých sad vizuálních dat [49] tak, aby co nejvíce odpovídaly/popisovaly vizuálnímu hodnocení. [49]

2.1.1 Simultánní kontrast

Simultánní kontrast popisuje jev, který nastává při pozorování dvou podnětů se shodnými trichromatickými složkami XYZ na pozadí s různým barevným tónem. Simultánní kontrast může být jak achromatický (*obrázek 2.1*), tak i chromatický (*obrázek 2.2*). [49, 50, 69, 70]



Obrázek 2.1 – Achromatický simultánní kontrast



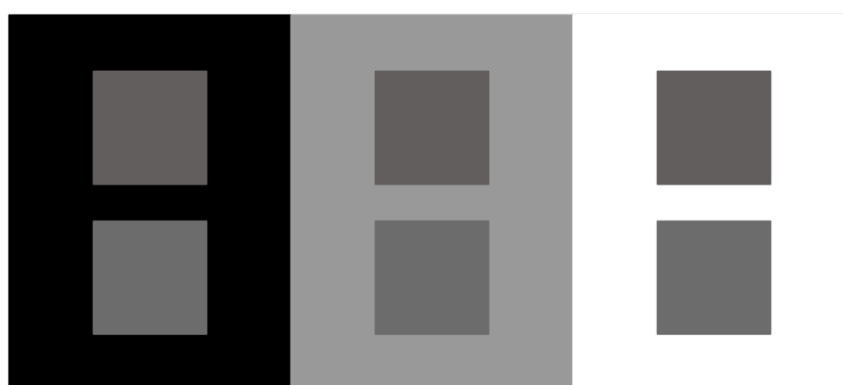
Obrázek 2.2 – Chromatický simultánní kontrast

Při pozorování podnětu na tmavém pozadí (*obrázek 2.1*) se podnět jeví světlejší než tentýž podnět na světlém pozadí.

V případě chromatického simultánního kontrastu (*obrázek 2.2*) dochází k tomu, že červený vzorek se jeví zelenější, zelený naopak červenější, modrý žlutější a žlutý modřejší. Simultánní kontrast není ovlivněn pouze v místě hran, ale rovněž i celkovou strukturou.

2.1.2 Crispensing – zостření obrysů

Crispensing (*obrázek 2.3*) se projevuje zvýšením vnímaného barevného rozdílu u dvou vzorků, jsou-li tyto vzorky pozorovány vůči pozadí s velmi blízkou barevností. [49]



Obrázek 2.3 – Crispensing efekt

2.1.3 Bezold–Brückeův efekt

Bezold–Brückeův efekt popisuje jev, při kterém dochází ke změně barevného tónu barevného podnětu způsobenou změnou úrovně adaptačního jasu. [49, 50, 71]

2.1.4 Stevens–Huntův efekt

Pozorované předměty se při pozorování za jasného dne jeví kontrastnější, barevnější než při soumraku.

Huntův efekt popisuje situaci, kdy se subjektivní chromatičnost (barevný kontrast) zvyšuje s úrovní adaptačního jasu. Název efektu pochází z Huntova haploskopického experimentu (1952) [49] zaměřeného na hodnocení vlivu adaptace na světlo a tmu na vnímání barev. Během experimentu bylo každé oko přizpůsobeno jiným podmínkám pozorování a byla hledána shoda mezi podněty pozorovanými každým okem. Z výsledků vyplynulo, že podnět s nízkou excitační čistotou pozorovaný při vysokých jasech ($10\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$) je shodný s podnětem s vysokou excitační čistotou pozorovaný při nízkých jasech ($1\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$). Z výsledků Huntova experimentu vyplynulo, že je nutné do modelů barevného vzhledu zohlednit i úroveň adaptačního jasu, což u trichromatické kolorimetrie nelze. [49, 50, 69, 70]

Stevensův efekt popisuje situaci, kdy se vnímaný kontrast (z hlediska jasnosti nebo světlosti) zvyšuje s rostoucí úrovní adaptačního jasu. Popis tohoto vychází ze studie Stevense a Stevense (1963), ve kterém byly pozorovatelé požádáni, aby odhadli jasnost podnětu napříč různými úrovněmi adaptačních jasů. Z výsledků vyplynulo, že mezi měřeným a vnímaným jasem existuje vztah, který je popsán Stevensovým mocninovým vztahem (Stevens power law), který se používá k modelování vnímaných jevů, a také při měření barev, kde se používá ve vztahu mezi CIEXYZ a veličin světlosti a chroma v prostoru CIELAB, které jsou založeny na nelineárním kubickém zákoně. [49, 50, 69, 70]

2.2 Modely chromatické adaptace

Modely chromatické adaptace (transformace) poskytují a umožňují predikci odpovídajících barev při změně podmínek pozorování. Transformace jsou základními stavebními kameny modelů barevného vzhledu. Od modelů barevného vzhledu se liší tím, že pouze na základě jejich hodnoty nelze predikovat atributy barevného vzhledu, kterými jsou například světlost, čistota, úhel barevného tónu. Transformace chromatické adaptace umožňují transformovat hodnoty trichromatických složek při jedné podmínce pozorování na odpovídající hodnoty trichromatických složek při jiných podmínkách pozorování. Transformace chromatické adaptace jsou založeny na tzv. odpovídajících datech nebo barvách. [49, 50, 69, 72–75]

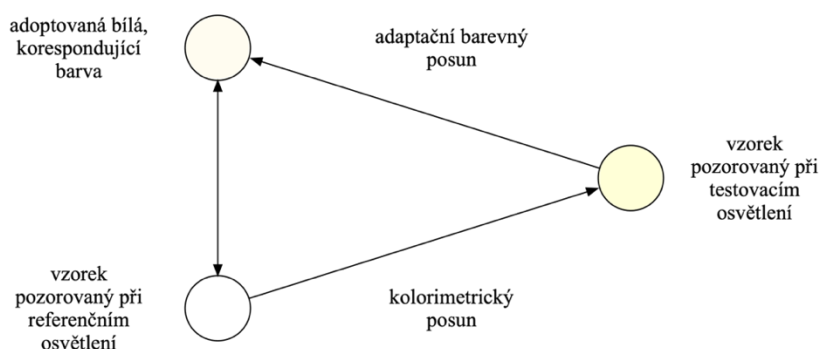
Odpovídající data nebo barvy jsou dva podněty, které mají pod dvěma různými podmínkami pozorování přibližně stejný barevný vzhled. Pomocí transformace lze získat trichromatické složky podnětu při odlišných podmínkách pozorování.

$$X_1Y_1Z_1 \cong X_2Y_2Z_2 \quad (2.1)$$

kde $X_1Y_1Z_1$ jsou trichromatické složky podnětu při jedné podmínce pozorování, $X_2Y_2Z_2$ jsou trichromatické složky podnětu při druhé podmínce pozorování.

Odpovídající datové soubory byly získány pomocí několika různých vizuálních experimentů [49, 50], jako například asymetrický experiment, haploskopický experiment (každé oko je adaptováno na jiné podmínky pozorování, cílem je nalézt shodu při hodnocení v obou polovinách vizuálního pole), paměťový experiment (pozorovatel na základě paměti barevného podnětu při jednom osvětlení se snaží najít shodný barevný podnět při druhém osvětlení), odhad hodnot atributů (pozorovatelé přiřazují jednotlivým atributům barevného vzhledu hodnoty podle stupnice). [49, 50, 71]

Během chromatické adaptace dochází vlivem změny osvětlení k jevům, které ovlivňují vnímání pozorovaných vzorků. Na základě toho mluvíme o kolorimetrickém posuvu (obrázek 2.4) – jedná se o změnu vnímání barev objektů způsobenou změnou světelného zdroje, respektive změnou spektrálního složení světelného zdroje (např. D65 → A) nebo změnou úrovně adaptačního jasu.



Obrázek 2.4 – Kolorimetrický a barevný posuv

Kolorimetrický posuv si můžeme představit například tak, že pozorujeme bílý papír při osvětlení D65, v průběhu toho změníme zdroj osvětlení z D65 na žárovkové osvětlení, jehož barva je žlutá. Tato změna má za následek, že papír po dobu několika sekund až minut vnímáme nažloutle. Po několika minutách se vnímání barev vrátí zpět do normálu. [49, 50, 69, 74]

Adaptační kolorimetrický posuv je matematická úprava chromatičnosti a jasu podnětu barvy předmětu pro korekci změny chromatické adaptace způsobené změnou světelného zdroje. [50]

Další termín, který vyvstává v souvislosti s chromatickou adaptací je barevný posuv. Barevný posuv popisuje změnu vnímané barvy předmětu, která je způsobená změnou světelného zdroje, při které nedochází ke změně chromatické adaptace. [50] Adaptační barevný posuv je posuv, u kterého se jedná o změnu vnímané barvy předmětu, která je způsobená pouze změnou chromatické adaptace. [50] Adaptivní posuv může být popsán kognitivními mechanismy a fyziologickými změnami, které se vyvíjejí na základě vizuálních vlastností pozorovatele. [50]

Adoptovaná bílá je související termín, který popisuje situaci, kdy vzorek pozorovaný při testovacím osvětlení v případě neúplné chromatické adaptace, se vizuálně neshoduje s adaptační bílou. [50] Simulace neúplné adaptace je ukázána na schématu na obrázku 2.4. Rozdíl mezi adoptovanou bílou, respektive odpovídající barvou a vzorkem pozorovaným při referenčním osvětlení (adaptační bílá) můžeme popsat pomocí indexu nekonstantnosti. [50]

Transformace chromatické adaptace mají obecný tvar (2.2) – (2.4). Z důvodu obecného tvaru jsou zde hodnoty čípkových signálů popsány pomocí prvních písmem jejich anglických ekvivalentů. V závislosti na modelu pak mohou být čípkové odezvy rovněž označeny písmeny R, G, B nebo r, g, b , které však v tomto případě neodpovídají RGB hodnotám.

$$L_a = f(L, L_W, \dots) \quad (2.2)$$

$$M_a = f(M, M_W, \dots) \quad (2.3)$$

$$S_a = f(S, S_W, \dots) \quad (2.4)$$

kde L_a, M_a, S_a jsou predikované čípkové signály, L, M, S jsou vstupní čípkové signály a L_W, M_W, S_W jsou minimální čípkové excitace na adaptační podnět.

Čípkové odezvy mohou být velmi přesně popsány lineární transformací trichromatických složek XYZ na relativní čípkové odezvy R, G, B . Tato transformace je základem všech modelů

chromatické adaptace a modelů barevného vzhledu, které jsou kompatibilní s CIE kolorimetrií. [45, 46]

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,400 & 0,708 & -0,081 \\ -0,266 & 1,165 & 0,046 \\ 0,000 & 0,000 & 0,918 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Pro popis chromatické adaptace je používán Von Kriesův zákon, který popisuje různé odezvy tří typů čípků při chromatické adaptaci, respektive tento zákon popisuje vztah mezi osvětlením a lidským vizuálním systémem. Pokud je jeden z čípků méně stimulován, odezva ostatních čípků je redukována ve stejné míře. [49]

2.2.1 Von Kriesův model chromatické adaptace

Von Kriesův model chromatické adaptace je koncepčně i matematicky základem téměř pro všechny další modely chromatické adaptace. Von Kries (1902) ve svých hypotézách uvedl, že jednotlivé čípky jsou odlišně ovlivněny chromatickou adaptací, avšak jejich spektrální citlivost zůstává nezměněna. Své hypotézy von Kries považoval za rozšíření Grassmanových zákonů o aditivním míšení barev při dvou různých podmínkách pozorování. [69, 70, 76–79]

V současné době jsou von Kriesovi hypotézy (The Von Kries coefficient law, 1905) vyjádřeny ve formě modelu chromatické adaptace následujícími rovnicemi (2.6) – (2.8) pro post-adaptační čípkové odezvy. [70, 76–80]

$$R_c = \alpha R \quad (2.6)$$

$$G_c = \beta G \quad (2.7)$$

$$B_c = \gamma B \quad (2.8)$$

kde R, G, B jsou vstupní čípkové odezvy, α, β, γ jsou odpovídající koeficienty ke snížení citlivosti jednotlivých čípků (2.9) – (2.11) vlivem chromatické adaptace, respektive jejichž velikost je ovlivněna barvou podnětu, na který jsou adaptovány (pomocí kontroly zesílení tzv. receptor gain control). [49, 76, 77]

$$\alpha = \frac{R_{W2}}{R_{W1}} \quad (2.9)$$

$$\beta = \frac{G_{W2}}{G_{W1}} \quad (2.10)$$

$$\gamma = \frac{B_{W2}}{B_{W1}} \quad (2.11)$$

kde R_{W1}, G_{W1}, B_{W1} jsou čípkové odezvy pro první podmínky pozorování, R_{W2}, G_{W2}, B_{W2} jsou čípkové odezvy pro druhé podmínky pozorování.

Na základě interpretace, že odezva každého z čípků je upravena pomocí vlastního odpovídajícího koeficientu vede poté k možnosti výpočtu odpovídající barvy R_2, G_2, B_2 pro různé podmínky pozorování. [49, 76–78]

$$R_2 = \left(\frac{R_1}{R_{W1}} \right) R_{W2} \quad (2.12)$$

$$G_2 = \left(\frac{G_1}{G_{W1}} \right) G_{W2} \quad (2.13)$$

$$B_2 = \left(\frac{B_1}{B_{W1}} \right) B_{W2} \quad (2.14)$$

kde R_{W1}, G_{W1}, B_{W1} jsou čípkové odezvy pro první podmínky pozorování, R_{W2}, G_{W2}, B_{W2} jsou čípkové odezvy pro druhé podmínky pozorování, R_1, G_1, B_1 a R_2, G_2, B_2 jsou vstupní a odpovídající čípkové odezvy.

Ve formě maticové transformace vyjádřeno (2.15)

$$\begin{pmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{W2}/R_{W1} & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & G_{W2}/G_{W1} & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & B_{W2}/B_{W1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

kde R_{W1}, G_{W1}, B_{W1} jsou čípkové odezvy pro první podmínky pozorování R_{W2}, G_{W2}, B_{W2} jsou čípkové odezvy pro druhé podmínky pozorování, R, G, B jsou vstupní čípkové odezvy, R_C, G_C, B_C jsou odpovídající adaptované čípkové odezvy. [49, 71, 76–78]

Pro vyjádření odpovídající barvy při dvou různých podmínkách pozorování (2.16).

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} R_{W2}/R_{W1} & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & G_{W2}/G_{W1} & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & B_{W2}/B_{W1} \end{pmatrix} M \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

$$M = \begin{vmatrix} 0,4002 & 0,7076 & -0,0808 \\ -0,2263 & 1,1653 & 0,0457 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,9182 \end{vmatrix} \quad (2.17)$$

kde M je lineární transformace, $X_1Y_1Z_1$ a $X_2Y_2Z_2$ jsou vstupní čípkové odezvy a odpovídající čípkové odezvy, M^{-1} je inverzní lineární transformace, R_{W1}, G_{W1}, B_{W1} jsou čípkové odezvy pro první podmínky pozorování, R_{W2}, G_{W2}, B_{W2} jsou čípkové odezvy pro druhé podmínky pozorování. [49, 71, 76–78]

2.2.2 Model Bradford chromatické transformace

Model Bradford chromatické transformace (BFD transformace) byl odvozen z 58 barevných párů vlněných vzorků hodnocených při denním osvětlení (D65) a žárovkovém osvětlení (A) pomocí paměťového experimentu (memory matching experiment), kdy pozorovatelé měli na základě paměti popsat barevný vzhled vzorků pomocí Munsellovy světlosti, čistoty a úhlu barevného tónu. [49, 50] Na základě zjištěných rozdílů barev mezi vizuálně stanovenými a naměřenými hodnotami kolorimetrických souřadnic byly vypočteny rozdíly barev mezi jednotlivými páry pro osvětlení D65. Takto získané rozdíly pak autoři přičetli ke každému vzorku pomocí aditivní korekce v prostoru CIELAB, aby získal odpovídající barvy pro osvětlení A. [49] Při navrhování a tvorbě chromatické transformace autoři zavedli několik omezení, a to takové, že nově navrhovaná transformace musí umožňovat inverzní výpočet, měla by fungovat pro různá osvětlení a měla by zachovat achromatickou stálost pro všechny neutrální vzorky. [49, 50, 72, 78, 81, 82]

Oproti von Kriesově transformaci došlo ke korekci modrého kanálu odpovídající spektrální odezvy (2.19) a snížení celkového rozdílu barev v prostoru CIELAB. [45] BFD transformace patří mezi nelineární transformace a je odvozena od Nayataniho transformace. [45, 49, 60, 61]

$$\begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix} = \frac{1}{Y} M_{BFD} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \quad (2.18)$$

$$M_{BFD} = \begin{vmatrix} 0,8951 & 0,2664 & 0,1614 \\ -0,7502 & 1,7135 & 0,0367 \\ 0,0389 & -0,0685 & 1,0296 \end{vmatrix} \quad (2.19)$$

kde XYZ jsou vstupní čípkové odezvy, M_{BFD} je Bradford chromatická transformace, Y je jasová složka z CIEXYZ.

$$\begin{bmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{W2}/R_{W1} & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & G_{W2}/G_{W1} & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & B_{W2}/B_{W1}^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ |B|^p \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$p = \left(\frac{B_{W1}}{B_{W2}} \right)^{0,0834} \quad (2.21)$$

kde R_{W1}, G_{W1}, B_{W1} jsou čípkové odezvy pro první podmínky pozorování, R_{W2}, G_{W2}, B_{W2} jsou čípkové odezvy pro druhé podmínky pozorování, R, G, B jsou vstupní čípkové odezvy, p je korekční faktor pro modrou odpovídající spektrální odezvu.

Odpovídající trichromatické složky pro druhé podmínky pozorování jsou vypočteny podle (2.22).

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = M_{BFD}^{-1} \begin{bmatrix} YR_C \\ YG_C \\ YB_C \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

kde R_C, G_C, B_C jsou odpovídající adaptované čípkové odezvy, M_{BFD}^{-1} je inverzní BFD transformace, Y je jasová složka CIEXYZ.

2.2.3 CMCCAT97

V roce 1997 byla Luem a Hunttem navržena modifikace BFD transformace (2.19) pomocí stupně adaptace D (2.24) a nově vzniklá transformace byla pojmenována CMCCAT97, která je součástí modelu barevného vzhledu CIECAM97s. [49, 50, 71, 72, 78, 83–86]

$$\begin{bmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [D(R_{W2}/R_{W1}) + 1 - D]R \\ [D(G_{W2}/G_{W1}) + 1 - D]G \\ [D(B_{W2}/B_{W1}^p) + 1 - D]|B|^p \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$D = F - \frac{F}{1 + 2L_A^{1/4} + L_A^2/300} \quad (2.24)$$

kde R_{W1}, G_{W1}, B_{W1} jsou čípkové odezvy pro první podmínky pozorování, R_{W2}, G_{W2}, B_{W2} jsou čípkové odezvy pro druhé podmínky pozorování, R, G, B jsou vstupní čípkové odezvy, p je korekční faktor pro modrou odpovídající spektrální odezvu, L_A je úroveň adaptačního jasu v $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$.

2.2.4 Model CMCCAT2000

Nově navržená transformace CMCCAT97 však přinesla obtíže při inverzním (zpětném) výpočtu v rámci modelu barevného vzhledu CIECAM97s kvůli korekčnímu faktoru p , navíc nebyla schopna správně proložit všechny datové soubory. Na základě různých výzkumů byla navržena nová lineární optimalizovaná transformace M_{00} , která byla schopna dobře proložit téměř všechny dostupné datové soubory a přinesla přesnější predikci chromatické adaptace a současně byla také navržena nová rovnice pro stupeň adaptace D . [49, 50, 73, 87]

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{00} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [D(R_{W2}/R_{W1}) + 1 - D]R \\ [D(G_{W2}/G_{W1}) + 1 - D]G \\ [D(B_{W2}/B_{W1}^p) + 1 - D]|B|^p \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$M_{00} = \begin{bmatrix} 0,7982 & 0,3389 & -0,1371 \\ -0,5918 & 1,5512 & 0,0406 \\ 0,0008 & 0,0239 & 0,9753 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$\begin{bmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [D(Y_{W1}/Y_{W2})(R_{W2}/R_{W1}) + 1 - D]R \\ [D(Y_{W1}/Y_{W2})(G_{W2}/G_{W1}) + 1 - D]G \\ [DD(Y_{W1}/Y_{W2})(B_{W2}/B_{W1}) + 1 - D]B \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$D = F \left\{ 0,08 \log[0,5(L_{A1} + L_{A2})] + 0,76 - \frac{0,45(L_{A1} - L_{A2})}{(L_{A1} + L_{A2})} \right\} \quad (2.28)$$

Výpočet odpovídajících trichromatických složek je proveden podle (2.29).

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = M_{00}^{-1} \begin{bmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

kde R_{W1}, G_{W1}, B_{W1} jsou čípkové odezvy pro první podmínky pozorování, R_{W2}, G_{W2}, B_{W2} jsou čípkové odezvy pro druhé podmínky pozorování, R, G, B jsou vstupní čípkové odezvy, p je korekční faktor pro modrou odpovídající spektrální odezvu, L_A je úroveň adaptačního jasu v $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$, M_{00} lineární optimalizovaná transformace CMCCAT2000 (2.26).

2.2.5 Model CAT02

Model CAT02 (2.37) je lineární chromatická adaptační transformace, která je schopná proložit všechny datové soubory vyjma McCannových [49], které byly provedeny za vysoce chromatických podmínek na rozdíl od ostatních datových souborů. Zároveň s uvedením nového

modelu chromatické transformace byla Moroneym (2002) [88] navržena nová rovnice pro stupeň adaptace D (2.38). Model CAT02 (2.37) je tedy spojením modelu CMCCAT2000 M_{00} (2.26) a nově navržené rovnice pro stupeň adaptace D (2.38). [49, 50, 72, 88, 89]

Model CAT02 byl vybrán pro použití v modelu barevného vzhledu CIECAM02 vzhledem k tomu, že je kompatibilní s modelem CMCCAT97 a byl optimalizován pro všechny dostupné datové soubory a zahrnuje zostření čípků.

Výpočet odpovídajících čípkových odezev je proveden podle rovnic (2.60) – (2.62). Oproti předchozím modelům byly v modelu CAT02 nahrazeny čípkové odezvy zostřenými čípkovými odezvami, které více odpovídají reálným mechanismům při adaptaci.

2.3 Prostor barev CIELAB

Prostor barev CIELAB (CIELAB) je jedním z nejpoužívanějších modelů barevného vzhledu. CIELAB byl přijat CIE v roce 1976, proto je možné se také setkat s jeho označením prostor barev CIE 1976 $L^*a^*b^*$.

CIELAB je prostor, který je tvořený třemi na sobě vzájemně kolmými osami L^* , a^* a b^* , jedná se tedy o pravoúhlý prostor barev. Osa L^* udává světlost, nabývá hodnot od 0 (černá) do 100 (bílá). a^* a b^* jsou barevné souřadnice, respektive osa červená $+a^*$ – zelená $-a^*$, osa žlutá b^* – modrá $+b^*$.

Souřadnice $L^*a^*b^*$ jsou definovány podle následujících rovnic:

$$L^* = 116 Y^* - 16 \quad (2.30)$$

$$a^* = 500(X^* - Y^*) \quad (2.31)$$

$$b^* = 200(Y^* - Z^*) \quad (2.32)$$

kde

$$X^* = \begin{cases} \sqrt[3]{\frac{X}{X_0}} & \text{pro } \frac{X}{X_0} > 0,008856 \\ 7,787 \left(\frac{X}{X_0}\right) + 0,138 & \text{pro } \frac{X}{X_0} \leq 0,008856 \end{cases}$$

$$Y^* = \begin{cases} \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} & \text{pro } \frac{Y}{Y_0} > 0,008856 \\ 7,787 \left(\frac{Y}{Y_0}\right) + 0,138 & \text{pro } \frac{Y}{Y_0} \leq 0,008856 \end{cases}$$

$$Z^* = \begin{cases} \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_0}} & \text{pro } \frac{Z}{Z_0} > 0,008856 \\ 7,787 \left(\frac{Z}{Z_0}\right) + 0,138 & \text{pro } \frac{Z}{Z_0} \leq 0,008856 \end{cases}$$

kde $X_0Y_0Z_0$ jsou hodnoty trichromatických složek normalizovaného zdroje světla a XYZ jsou hodnoty trichromatických složek vzorků. [90]

CIELAB lze také chápat jako model barevného vzhledu, který ačkoliv se řadí k nejpoužívanějším modelům barevného vzhledu, neumožňuje stejně jako CIEXYZ popsat faktory či jevy související s adaptací na různé úrovně adaptačního jasu (Huntův a Stevensův efekt). Od následujícího modelu CIECAM02 se liší i tím, že s jeho pomocí nelze vypočítat a určit absolutní parametry (koreláty) barevného vzhledu.

Barevná odchylka ΔE^* je definována jako barevná odchylka mezi dvěma barevnými povrchy, které by měly mít přibližně stejnou velikost a tvar, posuzovány by měly být na stejném pozadí. ΔE^* je vypočtena podle následující rovnice

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2.33)$$

$$\Delta L^* = L_{vz}^* - L_{st}^*$$

$$\Delta a^* = a_{vz}^* - a_{st}^*$$

$$\Delta b^* = b_{vz}^* - b_{st}^*$$

kde ΔL^* je odchylka ve světlosti mezi vzorkem a standardem, Δa^* a Δb^* jsou odchylky v osách souřadnic vypočtených mezi vzorkem (a_{vz}^* , b_{vz}^*) a standardem (a_{st}^* , b_{st}^*). [90]

2.4 Model barevného vzhledu CIECAM02

Model barevného vzhledu CIECAM02 byl schválen CIE v roce 2004. Tento barevný model vychází z předchozího modelu CIECAM97. [49] Vzhledem k tomu, že tento model nebyl kompletní, byly v novém modelu CIECAM02 přidány a vylepšeny některé funkce [49, 69, 83, 91, 92]:

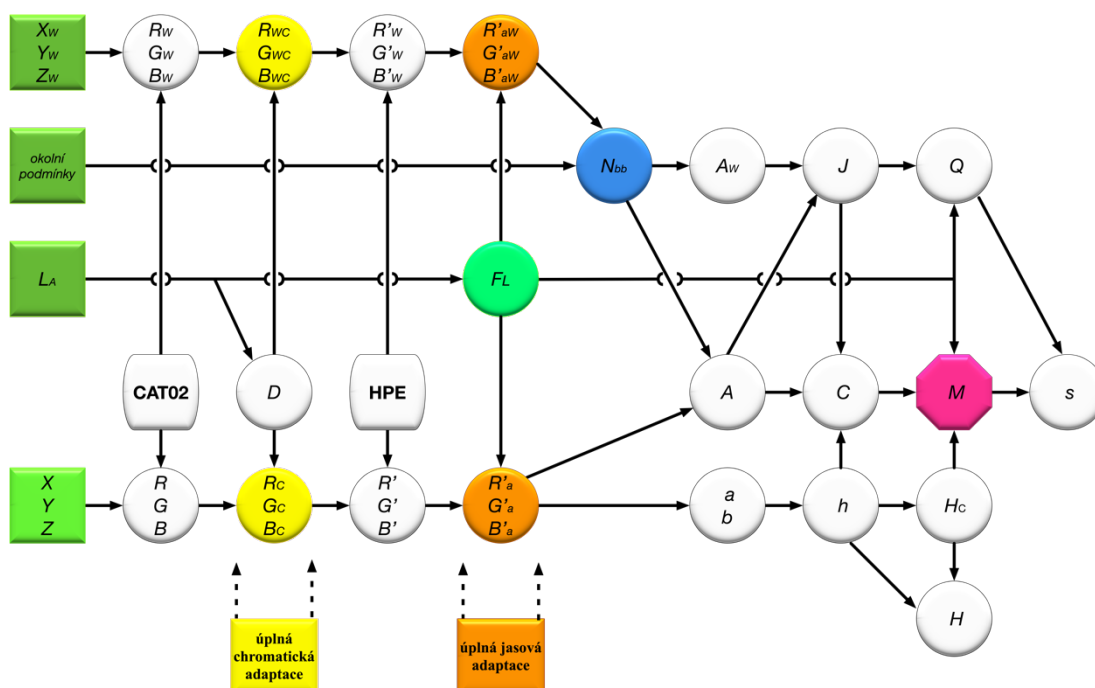
- a) *Linearizace chromatické adaptační transformace, která vedla ke zjednodušení modelu a usnadnění zpětného výpočtu.*
- b) *Korekce světlosti J pro podněty s $Y = 0$ provedená pomocí změny achromatické odezvy A.*
- c) *Korekce stupnice chroma C pro podněty s nízkou hodnotou chroma.*
- d) *Zahrnutí plynulé kompenzace okolí c (tmavé, tlumené, průměrné).*
- e) *Vylepšení funkce pro predikci sytosti s.*
- f) *Zvýšení predikční schopnosti oproti CIECAM97.*

Hlavní část modelu je tvořena popisem chromatické adaptace (CAT02) a rovnicemi pro výpočet vnímaných korelátů (souřadnic). Hlavním cílem modelu je predikce barevného vzhledu při různých úrovních adaptačního jasu a různých podmínkách okolí, ve kterém jsou barevné povrchy pozorovány.

Model CIECAM02 je model, který umožňuje přímý a zpětný výpočet. To znamená, že umožňuje výpočet jednotlivých korelátů barevného vzhledu na základě znalosti trichromatických složek XYZ a příslušných hodnot adaptačního jasu a odraznosti okolí podnětu. Zároveň je možný i inverzní postup, kdy na základě hodnot vybraných korelátů barevného vzhledu je možné vypočítat hodnoty trichromatických složek XYZ pro příslušné hodnoty adaptačního jasu a odraznosti okolí. [49, 50] Vstupní a výstupní parametry modelu CIECAM02 jsou uvedeny v následující části textu.

2.4.1 Parametry a souřadnice popisující barevný vzhled

Pro lepší představení si následujícího popisu všech vstupních a výstupních parametrů modelu CIECAM02 je použit ilustrační *obrázek 2.5*, který schematicky znázorňuje vstupní parametry, které ovlivňují výsledné parametry modelu. [49, 50, 70]



Obrázek 2.5 – Schéma přímého výpočtu modelu CIECAM02

Vstupní parametry modelu:

- a) *trichromatické složky testovaného podnětu X, Y, Z .*
- b) *trichromatické složky referenční bílé odpovídající použitému typu osvětlení X_W, Y_W, Z_W .*
- c) *úroveň adaptačního jasu L_A .*
- d) *relativní jasnost pozadí Y_b .*
- e) *relativní jas okolí S_R .*

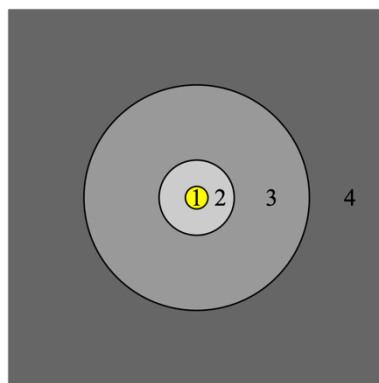
Výstupní parametry modelu – koreláty barevného vzhledu:

- a) *Světlost J .*
- b) *Jasnost Q .*
- c) *Subjektivní chromatičnost M .*
- d) *Chroma C .*
- e) *Sytost s .*
- f) *Úhel barevného tónu h .*
- g) *Kvadratura barevného tónu H .*
- h) *Složení barevného tónu H_C .*
- i) *Oponentní barevná odezva – a (červená–zelená) a b (žlutá–modrá).*

2.4.2 Podmínky pozorování

Již výše bylo zmíněno, že cílem CIECAM02 modelu je predikce barevného vzhledu při různých podmínkách pozorování. Každý jeden vstupní parametr tuto predikci výsledného barevného vzhledu ovlivňuje. Příkladem může být například posuzování vzorků proti bílému, šedému nebo černému pozadí, pozorování při žárovkovém nebo zářivkovém osvětlení, pozorování při svítání nebo při stmívání, dále také velikost a kvalita vzorků, struktura povrchu, ad. [49, 50, 70]

Podnět označuje barevný vzorek, jehož barevný vzhled při různých podmínkách pozorování popisuje tento model. Při predikci barevného vzhledu je podnět popsán vstupními parametry, kterými jsou v tomto případě jeho trichromatické složky XYZ získané přepočtem z hodnot spektrálního činitele odrazu ρ_λ vzhledem k použitému typu osvětlení. [49, 50, 70]



Obrázek 2.6 – Adaptační pole – 1. podnět, 2. blízké okolí, 3. pozadí, 4. okolí

Referenční bílá je ideální bílá s hodnotami trichromatických složek X_W, Y_W, Z_W vztažených k použitému typu osvětlení. [49, 50, 70]

Blízké okolí označuje vše v bezprostředním okolí vzorku ve velikosti 2° od jeho okraje uvažované do všech směrů. V modelu CIECAM02 je toto blízké okolí součástí pozadí. [49, 50, 70]

Pozadí označuje okolí vzorku zabírající plochu 10° od hrany blízkého okolí. V situacích, kdy má blízké okolí i pozadí stejnou barevnost, je plocha 10° počítána již od kraje vzorku. Tato situace nastává právě v modelu CIECAM02. [49, 50, 70]

Okolí označuje vše, co se nachází mimo pozadí. [49, 50, 70] Okolí je popsáno pomocí relativního jasů okolí S_R . Relativní jas okolí S_R je poměrem jasů okolní bílé L_{SW} a jasů bílé podnětu L_{DW} a je definován pomocí následující rovnice (2.34),

$$S_R = \frac{L_{SW}}{L_{DW}} \quad (2.34)$$

kde L_{SW} je jas okolní bílé a L_{DW} je jas bílé podnětu.

Tabulka 2.1 – Vstupní parametry okolí [49]

S_R	Okolí	F	N_c	c
$0,2 \leq S_R$	průměrné	1,0	1,0	0,69
$0 < S_R < 0,2$	tlumené	0,9	0,9	0,59
$S_R = 0$	tmavé	0,8	0,8	0,535

Podle výsledné hodnoty S_R jsou v rámci tohoto modelu rozlišena tři různá okolní prostředí, průměrné (average), tlumené (dim) a tmavé (dark). Příkladem tlumeného okolí je například sledování televize doma, příkladem tmavého okolí je pak například kino, příkladem průměrného okolí jsou barevné povrchy. [49, 50, 69, 70, 83, 84]

Na základě toho jsou pak v rámci výpočtů použity tři parametry. Mezi parametry patří faktor stupně adaptace F , chromatický indukční faktor N_C a efekt okolí c . Hodnoty parametrů pro různé okolí (různou hodnotu poměru S_R) jsou uvedeny v *tabulce 2.1*.

Adaptační pole označuje všechno, co se nachází bezprostředně okolo vzorku a ovlivňuje jej, tj. blízké okolí, pozadí a okolí. Adaptační pole dosahuje hranice vidění ve všech směrech. Adaptační pole je popsáno úrovní adaptačního jasu L_A , která je vztažena k jasnosti pozadí Y_b a jasnosti ideálně bílé Y_W . [49, 50, 69, 70, 83, 84]

$$L_A = \frac{L_W Y_b}{Y_W} \quad (2.35)$$

kde L_W je úroveň adaptačního jasu, Y_b je jasnost pozadí a Y_W je jasnost ideálně bílé.

2.5 Výpočet chromatické adaptace v modelu barevného vzhledu CIECAM02

V této kapitole je uveden přímý výpočet chromatické adaptace v modelu barevného vzhledu CIECAM02. Inverzní (zpětný) výpočet je dostupný v literatuře. [49, 50]

Přímý výpočet je rozdělen do dvou kroků, které jsou nutné pro výpočet výstupních parametrů pro získání hodnot nutných k popisu barevného vzhledu. V prvním kroku jsou vypočteny všechny parametry, které nejsou závislé na vstupních hodnotách vzorků, tedy například úroveň adaptačního jasu, indukční faktor jasu pozadí, stupeň adaptace. V druhém kroku jsou pak vypočteny všechny parametry, které souvisejí s parametry vzorků a samotné výstupní koreláty. [49, 50, 69, 70, 83, 84]

První krok: *Výpočet všech hodnot parametrů, které jsou závislé na vstupních parametrech, které ovlivňují pozorování vzorků, jako jsou například adaptační pole, typ použitého simulátoru osvětlení.*

- a) *Převod CIE trichromatických složek ideálně bílé X_W, Y_W, Z_W na RGB odezvy pomocí optimalizované transformační matice M_{CAT02} . Matice M_{CAT02} je optimalizována tak,*

že trichromatické složky pro izo-energetický zdroj $X = Y = Z = 100$ produkují stejné čípkové odezvy $L = M = S = 100$.

$$\begin{bmatrix} R_W \\ G_W \\ B_W \end{bmatrix} = M_{CAT02} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$M_{CAT02} = \begin{bmatrix} 0,7328 & 0,4296 & -0,1624 \\ -0,7036 & 1,6975 & 0,0061 \\ 0,0030 & 0,0136 & 0,9834 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

kde X_W, Y_W, Z_W jsou CIE trichromatické složky ideálně bílé závislé na typu použitého simulátoru osvětlení, R_W, G_W, B_W jsou RGB odezvy pro ideálně bílou závislé na typu použitého simulátoru osvětlení, M_{CAT02} je optimalizovaná transformační matice [93, 94].

- b) *Výpočet stupně adaptace D. Stupeň adaptace D je funkcí úrovně adaptačního jasu L_A a faktoru stupně adaptace F. Stupeň adaptace D je definován pomocí rovnice (2.38).*

$$D = F \left[1 - \left(\frac{1}{3,6} \right) e^{\left(\frac{-L_A - 42}{92} \right)} \right] \quad (2.38)$$

kde F je faktor stupně adaptace, L_A je úroveň adaptačního jasu v $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$.

Stupeň adaptace D nabývá hodnot od 0 (žádná adaptace) do 1 (úplná adaptace). V případech, kdy vypočtená hodnota stupně adaptace D je menší než 0 nebo větší než 1, je výsledná hodnota použita při dalších výpočtech rovna 0, respektive 1. Hodnoty nižší než 0,6 nastávají výjimečně. Stupeň adaptace D je součástí transformace chromatické adaptace CAT02. Rovnice pro výpočet byla definována pomocí odpovídajících barevných datových souborů. [49, 50, 69, 70, 83, 84]

- c) *Výpočet stupně adaptace pro RGB odezvy pro ideálně bílou je dán podle rovnic (2.39) – (2.41).*

$$D_R = D \frac{Y_W}{R_W} + 1 - D \quad (2.39)$$

$$D_G = D \frac{Y_W}{G_W} + 1 - D \quad (2.40)$$

$$D_B = D \frac{Y_W}{B_W} + 1 - D \quad (2.41)$$

kde R_W, G_W, B_W jsou RGB odezvy pro ideálně bílou, Y_W je trichromatická složka Y pro ideálně bílou, D je stupeň adaptace.

d) *Výpočet parametrů pro následující výpočetní kroky*, které jsou závislé na podmínkách pozorování.

Výsledná odezva čípků však nezávisí pouze na velikosti podnětu, ale také na tom, jak je oko adaptované. Adaptace oka přináší kompenzaci efektů způsobených jednak změnou úrovně osvětlení, ale také změnou barvy osvětlení. Prvním krokem byla kompenzace těchto efektů při změně barvy osvětlení, která byla provedena pomocí chromatické adaptační transformace M_{CAT02} (2.37). Druhým krokem byla kompenzace efektů způsobená změnou úrovně osvětlení.

Tato kompenzace je v modelu CIECAM02 provedena pomocí faktoru úrovně adaptačního jasu F_L , který je definován pomocí rovnice (2.42). Faktor F_L je zahrnut do adaptačního modelu pro možnost predikovat průběh adaptace na světlo v širokém rozsahu úrovní adaptačního jasu.

$$F_L = 0,2 k^4(5L_A) + 0,1(1 - k^4)^2(5L_A)^{1/3} \quad (2.42)$$

$$k = \frac{1}{5L_A + 1} \quad (2.43)$$

kde L_A je úroveň adaptačního jasu v $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Hodnota $5L_A$ je použita jako hodnota pravděpodobného jasu bílé. Při fotopických úrovních jasů je průběh faktoru F_L úměrný třetí odmocnině hodnoty $5L_A$, která dává částečnou kompenzaci změny úrovně adaptačního jasu. Při skotopických úrovních jasů je průběh faktoru F_L úměrný $5L_A$, ke kompenzaci změny úrovně adaptačního jasu tedy nedochází. [49, 50, 69, 70, 83, 84]

Indukční faktor jasu pozadí N_{bb} a indukční faktor chromatického jasu N_{cb} a indukční faktor n .

$$N_{bb} = N_{cb} = 0,725 \left(\frac{1}{n}\right)^{0,2} \quad (2.44)$$

$$n = \frac{Y_b}{Y_W} \quad (2.45)$$

kde Y_b je jasnost pozadí při pozorování, Y_W je jasnost ideálně bílé. Hodnota indukčního faktoru $N_{bb} = 1,0003$ nastává v případě, kdy pozadí ($Y_b = 20$) odpovídá 20% jasnosti ideálně bílé ($Y_W = 100$).

Indukční faktor byl zaveden v Huntových modelech [95] a [96]. Jeho funkce spočívá ve vyjádření vlivu pozadí na barevnou vydatnost posuzovaných vzorků. Vyjdeme-li z definice simultánního kontrastu, víme, že tmavé pozadí u většiny vzorků vytváří dojem, že vzorky jsou světlejší a barevnější, než tomu ve skutečnosti je. [49]

Indukční faktor jasu pozadí N_{bb} lze tedy brát jako vyjádření kontrastu dvou ploch, v tomto případě pozadí a podnětu.

Základní exponenciální nelinearita z je definována podle rovnice (2.48)

$$z = 1,48 + \sqrt{n} \quad (2.48)$$

kde n je indukční faktor (2.45).

e) *Chromatická adaptační transformace CAT02*

RGB odezvy pro ideálně bílou R_W, G_W, B_W jsou převedeny na adaptované *RGB* odezvy (2.49) – (2.51). Tyto adaptované odezvy R_{WC}, G_{WC}, B_{WC} reprezentují odpovídající ideální bílou při implicitních iso-energetických referenčních podmínkách.

$$R_{WC} = D_R R_W \quad (2.49)$$

$$G_{WC} = D_G G_W \quad (2.50)$$

$$B_{WC} = D_B B_W \quad (2.51)$$

kde Y_W je trichromatická složka Y ideálně bílé, R_W, G_W, B_W jsou *RGB* odezvy pro ideálně bílou, D je stupeň adaptace.

Pro možnost použít post-adaptační nelineární kompresi, je následně nutné převést adaptované odezvy R_{WC}, G_{WC}, B_{WC} zpět z prostoru M_{CAT02} *RGB* do prostoru CIEXYZ a následně do systému Hunt–Pointer–Estevez M_{HPE} odezvy, který lépe odpovídá čípkovým odezvám. [49, 50, 69, 70, 97]

Hunt–Pointer–Estevez čípková odezva je vypočtena pomocí rovnice (2.52)

$$\begin{bmatrix} R'_W \\ G'_W \\ B'_W \end{bmatrix} = M_{HPE} M_{CAT02}^{-1} \begin{bmatrix} R_{WC} \\ G_{WC} \\ B_{WC} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

$$M_{HPE} = \begin{bmatrix} 0,38971 & 0,68898 & -0,07868 \\ -0,22981 & 1,18340 & 0,04641 \\ 0,00000 & 0,00000 & 1,00000 \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

$$M_{CAT02}^{-1} = \begin{bmatrix} 1,096124 & -0,278869 & 0,182745 \\ 0,454369 & 0,473533 & 0,072098 \\ -0,009628 & -0,005698 & 1,015326 \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

kde R_{WC}, G_{WC}, B_{WC} jsou adaptované RGB odezvy pro ideálně bílou, M_{HPE} je Hunt–Pointer–Estevez odezva [97], M_{CAT02}^{-1} je transponovaná optimalizovaná transformační matice.

- f) *Post-adaptační čípkové odezvy pro ideálně bílou* vytvářejí jednoduchou funkci s odezvou pro široký dynamický rozsah. Post-adaptační čípkové odezvy pro ideálně bílou jsou vyjádřeny rovnicemi (2.55) – (2.57).

$$R'_{aW} = 400 \frac{\left(\frac{F_L R'_W}{100}\right)^{0,42}}{\left(\frac{F_L R'_W}{100}\right)^{0,42} + 27,13} + 0,1 \quad (2.55)$$

$$G'_{aW} = 400 \frac{\left(\frac{F_L G'_W}{100}\right)^{0,42}}{\left(\frac{F_L G'_W}{100}\right)^{0,42} + 27,13} + 0,1 \quad (2.56)$$

$$B'_{aW} = 400 \frac{\left(\frac{F_L B'_W}{100}\right)^{0,42}}{\left(\frac{F_L B'_W}{100}\right)^{0,42} + 27,13} + 0,1 \quad (2.57)$$

kde R'_W, G'_W, B'_W jsou Hunt–Pointer–Estevez odezvy pro ideálně bílou, F_L je faktor úrovně adaptačního jasu.

- g) Poslední krokem v těchto výpočtech je *výpočet achromatické odezvy pro ideálně bílou* A_W , který je definován podle rovnice (2.58). Ze sítnice do mozku nejsou posílány signály pouze z čípků, ale také achromatický signál, který je kombinací signálu ze všech čípků a také z tyčinek. V modelu CIECAM02 není do výpočtu achromatického signálu započten příspěvek tyčinek. [50]

$$A_W = \left[2R'_{aW} + G'_{aW} + \frac{B'_{aW}}{20} - 0,305 \right] N_{bb} \quad (2.58)$$

kde $R'_{aW}, G'_{aW}, B'_{aW}$ jsou post-adaptační čípkové odezvy pro ideálně bílou, N_{bb} je indukční faktor jasu okolí. [91] Hodnota 0,305 je součtem signálů z jednotlivých čípků s ohledem na jejich poměrné zastoupení na sítnici (2:1:1/20) uvedený Walravenem a Boumanem v roce 1966. [49, 71]

Druhý krok: *výpočet všech hodnot parametrů, které jsou závislé na vstupních parametrech pozorovaných vzorků.* [49, 50, 70]

- a) *Výpočet ostrých RGB odezev z CIE trichromatických složek X, Y, Z vybraného vzorku.* Pomocí matice M_{CAT02} chromatické adaptace jsou tyto složky převedeny na odpovídající barvy, které odpovídají podnětu, který stejný vzhled při referenčních podmínkách.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{CAT02} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

kde X, Y, Z jsou CIE trichromatické složky pro vybraný vzorek, R, G, B jsou RGB odezvy pro vzorek, M_{CAT02} je optimalizovaná transformační matice.

- b) *Výpočet odpovídajících adaptovaných čípkových odezev pro jednotlivé čípky, které jsou ovlivněny úrovní adaptačního jasu L_A i okolními podmínkami při pozorování.* Tento krok je označován za *úplnou chromatickou adaptaci*. [93, 98]

$$R_C = D_R R \quad (2.60)$$

$$G_C = D_G G \quad (2.61)$$

$$B_C = D_B B \quad (2.62)$$

kde Y_W je trichromatická složka Y ideálně bílé, D_R, D_G, D_B je stupeň adaptace pro RGB odezvy a R, G, B jsou RGB odezvy pro vzorek.

c) Výpočet Hunt–Pointer–Estevez čípkové odezvy je proveden podle rovnice (2.63).

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = M_{HPE} M_{CAT02}^{-1} \begin{bmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

kde R_C, G_C, B_C jsou odpovídající adaptované RGB odezvy, M_{HPE} je Hunt–Pointer–Estevez čípková matice, M_{CAT02}^{-1} je transponovaná optimalizovaná transformační matice.

d) Výpočet post-adaptačních čípkových odezev pro vzorek je proveden podle následujících rovnic (2.64) – (2.66). V tomto kroku dochází k úplné jasové adaptaci.

[98]

$$R'_a = 400 \frac{\left(\frac{F_L R'}{100}\right)^{0,42}}{\left(\frac{F_L R'}{100}\right)^{0,42} + 27,13} + 0,1 \quad (2.64)$$

$$G'_a = 400 \frac{\left(\frac{F_L G'}{100}\right)^{0,42}}{\left(\frac{F_L G'}{100}\right)^{0,42} + 27,13} + 0,1 \quad (2.65)$$

$$B'_a = 400 \frac{\left(\frac{F_L B'}{100}\right)^{0,42}}{\left(\frac{F_L B'}{100}\right)^{0,42} + 27,13} + 0,1 \quad (2.66)$$

kde R', G', B' jsou Hunt–Pointer–Estevez odezvy, F_L je faktor úrovně adaptačního jasu.

e) Výpočet achromatické odezvy pro vzorek, která závisí na post-adaptačních čípkových odezvách a podmínkách pozorování. [49, 50, 70, 91, 93, 94]

$$A = \left[2R'_a + G'_a + \frac{B'_a}{20} - 0,305 \right] N_{bb} \quad (2.67)$$

kde R'_a, G'_a, B'_a jsou post-adaptační čípkové odezvy, N_{bb} je indukční faktor jasu okolí.

2.6 Výpočet korelátů v modelu barevného vzhledu CIECAM02

Pro výpočet následujících korelátů jsou použity všechny výpočty provedené v předchozí kapitole. [49, 50, 69, 70, 99]

a) *Oponentní barevné odezvy*

Oponentní barevné odezvy a (červená–zelená) a b (žlutá–modrá) jsou počítány pomocí post-adaptačních čípkových odezev R'_a, G'_a, B'_a podle rovnic (2.64) – (2.66). Jejich poměr v rovnici (2.68) a (2.69) odpovídá jejich poměru na lidské sítnici. [49, 50, 70]

$$a = R'_a - \frac{12}{11} G'_a + \frac{B'_a}{11} \quad (2.68)$$

$$b = \frac{(R'_a + G'_a - 2B'_a)}{9} \quad (2.69)$$

kde R'_a, G'_a, B'_a jsou post-adaptační čípkové odezvy.

b) *Světlost*

Světlost J je definována jako: „Jasnost oblasti pozorované vzhledem k jasnosti stejně osvětlené oblasti, která se jeví jako bílá nebo vysoce propouštějící.“ [45, 58] Světlost je tedy relativní jas vzorku, který porovnáme s ideálně bílou při stejných podmínkách pozorování (může být porovnávána při nízkých i při vysokých úrovních adaptačních jasů). [49, 50, 69, 70, 91, 93, 94]

Světlost J může být vypočtena pomocí hodnot jasnosti vzorku Q_S a ideálně bílé Q_W nebo pomocí poměrů achromatické odezvy vzorku A a ideálně bílé A_W .

$$J = \frac{Q_S}{Q_W} \quad (2.70)$$

$$J = 100 \left(\frac{A}{A_W} \right)^{cz} \quad (2.71)$$

kde Q_S je hodnota jasnosti pro vzorek a Q_W je hodnota jasnosti pro ideálně bílou, A je achromatická odezva pro vzorek a A_W je achromatická odezva pro ideálně bílou, c je efekt okolí, z je základní exponenciální nelinearita. Jsou-li si achromatické odezvy rovny, hodnota světlosti J je rovna 100.

c) *Jasnost*

Jasnost Q je definována jako: „Atribut vizuálního vnímání, podle kterého se jeví oblast více či méně světlá. Odpovídá absolutní úrovni vnímání.“ [49, 50, 70] nebo „Jasnost vzorků je ovlivněna jasem použitého světelného zdroje.“ [49, 50, 70] Jasnost je na rozdíl od světlosti absolutní veličinou. Hodnota jasnosti má stupnici s definovaným počátkem v nule, která značí černou a končící v nekonečnu (jedná se o jednostranně nekonečnou stupnici). Například vzorky, které jsou pozorovány při nízkých úrovních adaptačních jasech se jeví méně jasné než vzorky pozorované při vyšších úrovních adaptačních jasů. [49, 50, 69, 70]

$$Q = \frac{4}{c} \sqrt{\frac{J}{100}} (A_W + 4) F_L^{0,25} \quad (2.72)$$

kde c je efekt okolí, J je světlost, A_W je achromatická odezva pro ideálně bílou a F_L je faktor úrovně adaptačního jasu.

d) *Chroma*

Chroma C je definována jako: „Subjektivní chromatičnost je posuzována jako podíl jasu podobně osvětlené ideálně bílé.“ [70] V případě chroma C a barevné vydatnosti M platí stejný vztah jako v případě světlosti J a jasnosti Q . Chroma C je na rozdíl od subjektivní chromatičnosti M relativně konstantní při změně úrovně adaptačního jasu. Achromatické barvy mají chroma C a subjektivní chromatičnost M nulovou, tzn. že s rostoucí barevností vzorku dochází ke zvyšování jejich hodnot. Protože chroma C je relativní atribut, může se měnit se změnou osvětlení. Chroma C je definována podle rovnice (2.73). [49, 50, 69, 70, 91]

$$C = t^{0,9} \sqrt{\frac{J}{100}} (1,64 - 0,29^n)^{0,73} \quad (2.73)$$

kde t je dočasné množství, J je světlost, n je indukční faktor.

Dočasné množství t (2.74) odpovídá nasycení. Jeho hodnota ovlivňuje chroma C , subjektivní chromatičnost M a sytost s .

$$t = \frac{\left(\frac{5000 \cdot 10}{13}\right) N_c N_{cb} e_t \sqrt{a^2 + b^2}}{R'_a + G'_a + \frac{21}{20} B'_a} \quad (2.74)$$

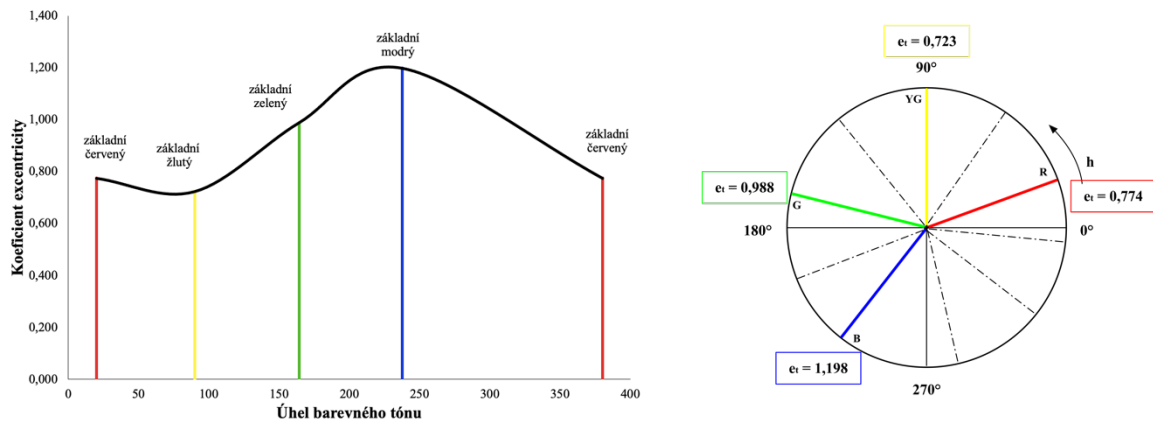
$$e_t = \frac{1}{4} \left[\cos \left(h \frac{\pi}{180} + 2 \right) + 3,8 \right] \quad (2.75)$$

kde R'_a, G'_a, B'_a jsou post-adaptační čípkové odezvy, N_c je chromatický indukční faktor, N_{cb} je indukční faktor jasu okolí, e_t je koeficient excentricity a a a b jsou oponentní barevné odezvy.

Faktor $\frac{10}{13}$ je zaveden pro možnost započítat signál z různých čípků. Chromatický indukční faktor N_c zohledňuje možnost, že tmavé nebo tlumené okolí může snížit subjektivní chromatičnost vzorků. Indukční faktor jasu okolí N_{cb} je zaveden pro pozorování proti šedému pozadí, kdy se subjektivní chromatičnost vzorků může snižovat při světlém pozadí a zvyšovat při tmavém pozadí, napomáhá zvyšovat hodnotu chroma C v případě, kdy se snižuje hodnota jasnosti pozadí a rozdíl $1,64 - 0,29^n$ je definován pro případ hodnocení světlých barev. Hodnota 5000 je zavedena z důvodu úpravy finálních hodnot koeficientu excentricity e_t .

Zavedení hodnoty světlosti J vede k tomu, že snížila-li se světlost J , snižuje se hodnota chroma C . Post-adaptační čípkové odezvy R'_a, G'_a, B'_a jsou ve výpočtu t zavedeny z toho důvodu, že hodnoty oponentních barevných odezev se mění v závislosti na změně adaptační úrovně jasu na rozdíl od chroma, která je na změně adaptační úrovně jasu nezávislá. [49, 50, 69, 70]

Hodnota koeficientu excentricity e_t popisuje pozici achromatického bodu vůči linii s malou konstantní sytostí. Při změně barevného tónu ze žluté na červenou, zelenou a modrou se pozice achromatického bodu přibližuje blíže k linii. Koeficient excentricity se používá pro vyjádření vnímání barevnosti barevných tónů v pořadí žlutá, červená, zelená a modrá. Hodnoty koeficientu excentricity pro čtyři základní barevné tóny jsou uvedeny v *tabulce 2.2*. [49, 50, 69, 70]



Obrázek 2.7 – Závislost koeficientu excentricity na úhlu barevného tónu posuzovaného vzorku

Na *obrázku 2.7* je zobrazena závislost excentricity na barevném tónu. Vyšší hodnota koeficientu excentricity, jak z její definice vyplývá, říká, že tento barevný tón je vnímán méně než barevný tón, který má nižší hodnotu koeficientu excentricity. Tedy, při posuzování například červeného a modrého vzorku, budeme více ovlivněni vnímáním červeného vzorku než modrého. [49, 50, 69, 70]

e) **Subjektivní chromatičnost**

Subjektivní chromatičnost M je definovaná jako: „Atribut vizuálního vnímání, podle kterého se oblast jeví více či méně chromatická.“ [70] Subjektivní chromatičnost M je ovlivněna faktorem úrovně adaptačního jasu F_L , tzn. že je na rozdíl od chroma ovlivněna i úrovní adaptačního jasu. Subjektivní chromatičnost M je definována podle *rovnice (2.77)*. [49, 50, 69, 70]

$$M = CF_L^{0,25} \quad (2.77)$$

kde C je chroma, F_L je faktor úrovně adaptačního jasu.

f) **Sytost**

Sytost s je definována jako: „Subjektivní chromatičnost oblasti posuzovaná k jeho jasnosti.“ [70] Barevný podnět s danou barevností vykazuje stejnou sytost v celém rozsahu fotopických adaptačních jasů kromě těch velmi vysokých. Sytost lze popsat jako relativní subjektivní chromatičnost. Hlavní rozdíl mezi chroma C a sytostí s je, že sytost s je posuzována vzhledem k jasnosti oblasti, zatímco chroma C je popisována jako jasnost oblasti osvětlené stejně jako ideálně bílá. Vzhledem k tomu je chroma C používána při měření barev a v rovnicích

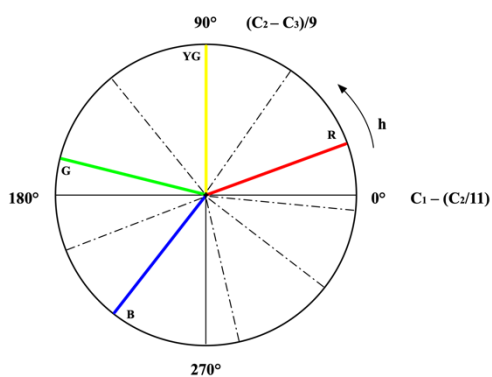
pro výpočet barevného rozdílu, zatímco sytost s je používána při popisu barevného vzhledu. Výpočet sytosti s je proveden podle rovnice (2.78). [49, 50, 69, 70]

$$s = 100 \sqrt{\frac{M}{Q}} \quad (2.78)$$

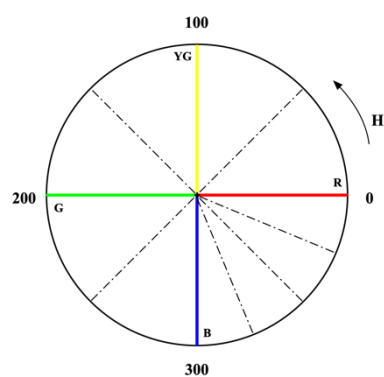
kde M je subjektivní chromatičnost, Q je jasnost.

g) **Barevný tón**

Barevný tón je definován jako: „Barevný tón je atributem vizuálního vnímání, podle kterého se oblast jeví podobná jedné nebo poměru dvou vnímaných barev červená, žlutá, zelená a modrá.“ [70] CIE definuje 4 základní barevné tóny červený, žlutý, zelený a modrý. Původně (Young, Helmholtz, Maxwell) byly za základní barevné tóny považovány pouze tři barevné tóny (červený, zelený a modrý) na základě trichromatického vnímání barev. [49, 50] Hering poté přidal ještě žlutý barevný tón. [49, 50] Od té chvíle je trichromatické vnímání spojeno s přítomností třech různých typů čípků. Jeden základní barevný tón nelze připravit kombinací ostatních základních barevných tónů, na rozdíl od barviv, kde to možné je. Základní barevné tóny vytvářejí oponentní dvojice, které tvoří červená–zelená a žlutá–modrá. Dále se můžeme setkat s názvem binární barevný tón. Binární barevný tón je tvořen kombinací dvou základních barevných tónů, například chceme-li získat fialový barevný tón, získáme ho kombinací červeného a modrého barevného tónu. [50] U kombinací základních barevných tónů platí pravidlo, že v binárním barevném tónu nelze kombinovat oponentní barevné tóny (červená/zelená a žlutá/modrá). Ke 4 základním barevným tónům (označených podle Munsella 5R, 5Y, 5G a 7,5B) CIE navíc přidává ještě dvě barvy, a to bílou a černou. Na rozdíl od základních barevných tónů lze však tyto dvě barvy kombinovat a jejich vzájemné kombinace jsou pak označeny jako odstíny šedi (šedá barva). Achromatické barvy nemají žádný barevný tón, mohou však mít specifický nádech. Toto členění vychází z definice NCS atlasu. [49] Dělení základních barevných tónů podle Munsella pak zahrnuje 5 základních barevných tónů, a to barevné tóny 5R, 5Y, 5G, 5B a 5P. [49] Od výše uvedeného dělení se tedy rozdělení podle Munsella liší o základní barevný tón 5B, který je odlišný od základní barevného tónu podle CIE/NCS označeného 7,5B a přidaný barevný tón 5P z důvodu velkého množství vnímaných barevných tónů mezi základním modrým a červeným barevným tónem. [49, 50]



Obrázek 2.8 – Úhel barevného tónu



Obrázek 2.9 – Kvadratura barevného tónu

V rámci modelu CIECAM02 je barevný tón popsán dvěma vzájemně souvisejícími atributy. Prvním z nich je úhel barevného tónu h (2.79) a druhým z nich je kvadratura barevného tónu H (2.80) nebo složení barevného tónu H_C . [49, 50, 69, 70, 100]

Úhel barevného tónu h nabývá hodnot od 0° do 360° a jeho výpočet je proveden pomocí rovnice (2.79).

$$h = \tan^{-1} \frac{b}{a} \quad (2.79)$$

kde a, b jsou oponentní barevné odezvy. Hodnoty úhlu mezi 0° – 90° značí, že hodnoty oponentních barevných odezev a, b jsou pozitivní; hodnoty úhlu mezi 90° – 180° značí, že hodnota a je negativní, b je pozitivní; hodnoty úhlu mezi 180° – 270° značí, že hodnoty a a b jsou negativní; hodnoty úhlu mezi 270° – 360° značí, že hodnota a je pozitivní a hodnota b je negativní.

Tabulka 2.2 – Parametry pro přepočítání úhlu barevného tónu na složení barevného tónu [49]

Parametr	Červená	Žlutá	Zelená	Modrá	Červená
i	1	2	3	4	5
h_i	20,14	90,00	164,25	237,53	380,14
e_t	0,774	0,723	0,988	1,198	0,774
e_i	0,8	0,7	1,0	1,2	0,8
H_i	0,0	100,0	200,0	300,0	400,0

Druhým způsobem vyjádření poměru základních barevných tónů ve vnímaném barevném tónu je kvadratura barevného tónu H . Kvadratura barevného tónu H je 400–stupňová škála (obrázek 2.9), která nabývá hodnot od **0** (červená), přes **100** (žlutá), **200** (zelená), **300** (modrá). Kvadratura barevného tónu H je lineární interpolací úhlu barevného tónu h pro daný vzorek a úhlu barevného tónu 4 základních barevných tónů, pro které jsou definovány úhly h_i uvedené v tabulce 2.2 společně s dalšími parametry potřebnými pro její výpočet. Pro výpočet kvadratury barevného tónu H je definována rovnice (2.80).

$$H = H_i + \frac{100 \frac{(h - h_i)}{e_i}}{\frac{(h - h_i)}{e_i} + \frac{(h_{i+1} - h)}{e_{i+1}}} \quad (2.80)$$

kde h je úhel barevného tónu, h_i je úhel barevného tónu odpovídající jednomu ze základních barevných tónů, e_i je vypočtena pomocí excentricity, H_i je složení barevného tónu.

Rozdíl mezi úhlem barevného tónu h a kvadraturou barevného tónu H je zobrazen na obrázcích 2.8 a 2.9.

Hodnota úhlu barevného tónu h vyjadřuje rozdíl mezi čarou nakreslenou od středu směrem doprava a čarou, spojující bod, kde se nachází uvažovaná barva. Na obrázku 2.8 jsou plnými čarami označeny základní barevné tóny, čerchovanými čarami poté barevné tóny, které obsahují vždy 50 % okolních základních barevných tónů. Vzhledem k různým váhovým vlastnostem jednotlivých barevných tónů nejsou tyto čáry přesně v polovině mezi základními barevnými tóny. Nejvýrazněji je tento efekt viditelný v oblasti mezi červeným a modrým barevným tónem, který je rozdělen na čtyři stejně vnímané oblasti. [49, 50, 69–71]

U kvadratury barevného tónu H jsou váhové vlastnosti jednotlivých unikátních barevných tónů zahrnuty v jejím výpočtu, tudíž plné čáry i čerchované čáry jsou rozloženy pravidelně (obrázek 2.9). I když jsou oponentní dvojice unikátních barevných tónů vůči sobě v pravém úhlu, 4 vytvořené kvadranty nepředstavují stejné rozdíly. Vnímaný rozdíl mezi žlutým a zeleným, červeným a žlutým a zeleným a modrým barevným tónem je téměř stejný, mezi červeným a modrým barevným tónem je tento rozdíl oproti ostatním vnímán dvojnásobě, proto je tento kvadrant rozdělen na tři části. [49, 50, 69–71]

Úhel barevného tónu h je více uniformní a jeho vyjádření vychází z Munselova systému, zatímco vyjádření pomocí kvadratury barevného tónu H vychází z NCS atlasu. [71, 101]

Kvadratura barevného tónu H je vyjádřena jedním číslem, tak jak bylo popsáno v předchozích odstavcích nebo pomocí složení barevného tónu H_C , které představuje procentuální zastoupení 2 základních barevných tónů. Zjednodušeně si lze tento výpočet představit tak, že vezmeme-li dvě poslední čísla z výsledku kvadratury barevného tónu H a porovnáme ji s hodnotou 50 %, je-li toto číslo nižší než 50 %, značí to, že se jedná o minoritní barevný tón, zbytek do hodnoty 100 % je pak tvořen majoritním barevným tónem. Je-li naopak hodnota dvou posledních čísel vyšší než 50 %, odpovídá tato hodnota majoritnímu barevnému tónu a zbytek do hodnoty 100 % je pak tvořen minoritním barevným tónem. Příklad výpočtu je uveden v *tabulce 2.3*. [49, 50, 69–71, 75]

Tabulka 2.3 – Číselné vyjádření barevného tónu

vzorek	h	H	H_C
modrý	218	277	23G 77B
žlutý	110	135	34G 66Y
základní barevný tón – modrý	237,53	300	100B

Modely barevného vzhledu používají cylindrické souřadnice světlost J , chroma C a úhel barevného tónu h nebo jasnost Q , subjektivní chromatičnost M a úhel barevného tónu h pro popis prostoru barev. Nicméně, tento popis prostoru není dostačující pro všechny aplikace. Proto je potřebné převést cylindrické souřadnice na souřadnice kartézské pomocí jednoduché transformace. Pomocí této transformace jsou zavedeny tři prostory barev založené na attributech chroma C , subjektivní chromatičnosti M a sytosti s . Tyto prostory jsou definovány podle *rovnice* (2.81) – (2.86). [49, 50, 69–71]

$$a_C = C \cos(h) \qquad b_C = C \sin(h) \qquad (2.81)(2.82)$$

$$a_M = M \cos(h) \qquad b_M = M \sin(h) \qquad (2.83)(2.84)$$

$$a_S = s \cos(h) \qquad b_S = s \sin(h) \qquad (2.85)(2.86)$$

kde C je chroma, M je subjektivní chromatičnost, s je sytost.

Barevný rozdíl mezi dvěma vzorky je v modelu CIECAM02 vypočten podle *rovnice* (2.87).

$$\Delta E_{CIECAM02} = \sqrt{(\Delta J)^2 + (\Delta a_i)^2 + (\Delta b_i)^2} \qquad (2.87)$$

kde ΔJ je rozdíl ve světlosti dvou vzorků, Δa_i a Δb_i jsou rozdíl mezi barevnými souřadnicemi podle rovnic (2.81) – (2.86).

2.7 Model barevného vzhledu CAM02–UCS

Model barevného vzhledu CAM02–UCS je rovnoměrný/uniformní barevný model vycházející z modelu barevného vzhledu CIECAM02. Model byl vytvořen na základě toho, že škálování pro malé barevné rozdíly (SCD), které jsou blízko limitu vnímání a pro velké barevné rozdíly (LCD) nebyl lineární. Při odvozování tohoto modelu byly testovány a porovnávány různé soubory dat s malými i velkými barevnými rozdíly (Li et al., Luo et al.) [50, 70]. Na základě tohoto testování byly modifikovány dva nové modely. To však neřešilo problém, kdy je potřeba použít pouze jeden model pro oba typy datových souborů. S ohledem na tuto skutečnost byl navržen uniformní model barevného vzhledu (UCS), který popisuje oba dva typy datových souborů. Tento vzniklý model barevného vzhledu CAM02–UCS byl společně s předchozími modely CAM02–SCD a CAM02–LCD testován a bylo zjištěno, že je schopný dobře popsat oba dva datové soubory. Všechny tři výše zmíněné modely byly odvozeny pomocí modifikace světlosti J a subjektivní chromatičnosti M . [49, 50, 70, 71]

Modifikované koreláty světlosti J' (2.88) a subjektivní chromatičnosti M' (2.89) jsou definovány:

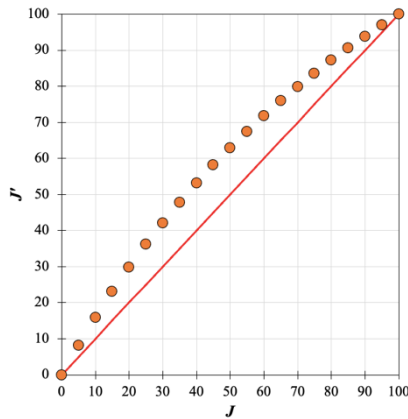
$$J' = \frac{(1 + 100c_1)J}{1 + c_1J} \quad (2.88)$$

$$M' = \frac{1}{c_2} \ln(1 + c_2M) \quad (2.89)$$

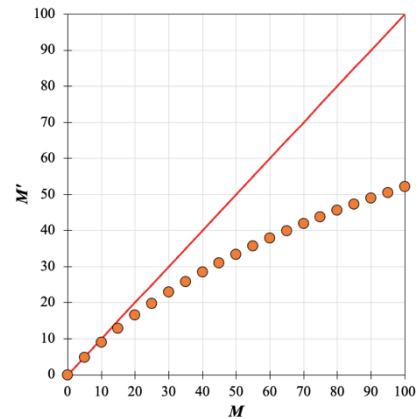
kde J je světlost, M je subjektivní chromatičnost, c_1 a c_2 jsou váhové parametry uvedené v tabulce 2.4, které jsou odvozeny z modifikace modelu a z funkcí rovnice CIEDE2000. [70]

Tabulka 2.4 – Koeficienty a váhové parametry [70]

	K_L	c_1	c_2
CAM02–UCS	1	0,007	0,0228
CAM02–SCD	1,24	0,007	0,0363
CAM02–LCD	0,77	0,007	0,0053



Obrázek 2.10 – Vztah mezi modifikovanou J' a nemodifikovanou hodnotou J [převzato 70]



Obrázek 2.11 – Vztah mezi modifikovanou M' a nemodifikovanou hodnotou M [převzato 70]

Na *obrázcích 2.10 a 2.11* je uveden vztah mezi modifikovanými korelátými J' a M' a jejich nemodifikovanými verzemi J a M . Z porovnávání grafů na *obrázku 2.10 a 2.11* vyplývá, že aby byl model CIECAM02 více jednotný (uniformní), musela by hodnota J být vyšší a hodnota M naopak nižší.

Na základě nově zavedených korelátů jsou nově odvozeny i odpovídající prostory barev J' (2.88), a'_M, b'_M .

$$a'_M = M' \cos(h) \quad (2.90)$$

$$b'_M = M' \sin(h) \quad (2.91)$$

Barevný rozdíl $\Delta E'_{CAM02-UCS}$ je v nově modifikovaném barevném prostoru vypočten jako euklidovská vzdálenost.

$$\Delta E'_{CAM02-UCS} = \sqrt{\left(\frac{\Delta J'}{K_L}\right)^2 + (\Delta a'_M)^2 + (\Delta b'_M)^2} \quad (2.92)$$

kde $\Delta J'$, $\Delta a'_M$ a $\Delta b'_M$ jsou rozdíly ve světlosti a souřadnicích a'_M a b'_M mezi dvěma vzorky, K_L je parametr světlosti podle *tabulky 2.4*.

3. Měření barev

Pro měření sekundárních zářičů (barevných objektů), respektive hodnot spektrálního činitele odrazu lze použít více typů měřících přístrojů s různou měřicí geometrií a různým osvětlením, a to spektrofotometry, více-úhlové spektrofotometry, a v neposlední řadě také systémy obrazové analýzy a spektroradiometry. Výsledné naměřené hodnoty jsou mimo jiné závislé na vstupních parametrech těchto přístrojů, tj. na použité geometrii měření a použitém typu/zdroji osvětlení.

V technické zprávě CIE015:2018 [90] vydané CIE je uvedeno 10 základních uspořádání pro měření barevných povrchů a získání hodnot spektrálního činitele odrazu pomocí spektrofotometrů.

3.1 Geometrická uspořádání pro měření sekundárních zářičů

K popisu geometrických podmínek používá CIE [90] dva základní termíny. Prvním termínem je influx geometrie (dopadající paprsek), pro kterou CIE uvádí: „Úhlové rozložení záření dopadajícího na vzorek, které je měřeno vzhledem ke středu měřicího otvoru.“ [90] Druhým termínem je efflux geometrie (odražený paprsek), pro kterou CIE uvádí: „Úhlové rozložení citlivosti přístroje s ohledem na střed měřicího otvoru umístěného na měřeném vzorku.“ [90]

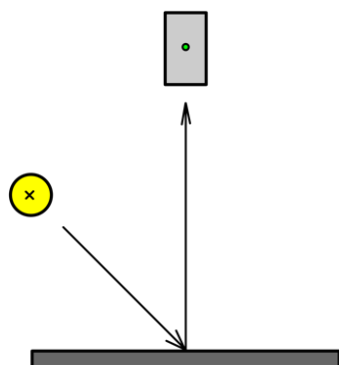
Barevnost barevných objektů závisí a je ovlivněna spektrálním složením zdroje záření, kterým je druhotný objekt osvětlován, samotnou charakteristikou povrchu objektu a typem detektoru. Ve spektrofotometrech je nejčastěji používaným zdrojem normalizovaný zdroj světla D65 s ekvivalentní teplotou chromatičnosti 6 500 K simulovaný xenonovou výbojkou. [90, 102, 103]

Při měření druhotných zdrojů (barevných objektů) můžeme měřit spektrální činitel prostupu τ_λ (celkový nebo přímý) nebo spektrální činitel odrazu ρ_λ nebo β_λ (celkový nebo rozptylný).

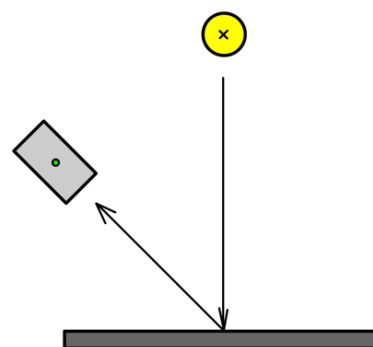
3.2 Měření spektrálního činitele rozptylného odrazu

3.2.1 Úhlová geometrie 45°x:0°

Při měření spektrálního činitele rozptylného odrazu je měřeno spektrální složení záření odražené do všech směrů mimo směr zrcadlového odrazu (primární odraz). Při měření s použitím úhlové geometrie je snímán odražený paprsek v zrcadlovém úhlu.



Obrázek 3.1 – Úhlová geometrie 45°x:0°



Obrázek 3.2 – Úhlová geometrie 0°:45°x

Měřený vzorek (*obrázek 3.1*) je osvětlován v úhlu $45^\circ \pm 5^\circ$ od normály k povrchu. Jednotlivé paprsky osvětlujícího svazku nesmějí přesáhnout úchylku větší než $\pm 5^\circ$ od osy svazku. Odražené paprsky dopadají na detektor ve směru normály povrchu, maximální úchylka svazku nesmí přesáhnout 10° . Tato geometrie je silně ovlivněna povrchem vzorku. Výsledné hodnoty naměřené pomocí úhlové geometrie 45°x:0° jsou označeny jako spektrální činitel odrazu $\beta_{45:0}$. [90, 102, 103]

3.2.2 Úhlová geometrie 0°:45°x

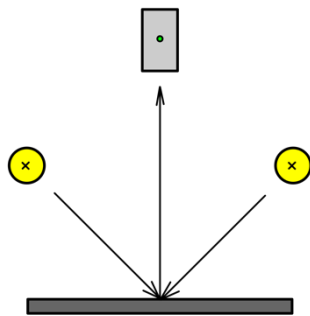
Tato úhlová geometrie má opačně uspořádaný chod paprsků oproti geometrii 45°x:0. Vzorek (*obrázek 3.2*) je osvětlován ve směru normály s maximální úchylkou osy svazku 10° od normály povrchu a odražené záření je snímáno v úhlu 45° od normály k povrchu vzorku. Měřením získáváme hodnoty spektrálního činitele odrazu $\beta_{0:45}$. [90, 102, 103]

3.2.3 Úhlová geometrie 45°a:0°

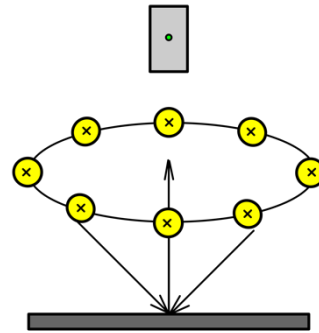
Povrch vzorku je prstencově osvětlován ze všech směrů mezi dvěma kruhovými kužely, jejichž osy jsou kolmé k normále měřicího otvoru a vrcholy dopadají do středu měřicího otvoru (*obrázek 3.3*). Detektor snímá odražené paprsky v ose kuželu $0^\circ \pm 0,5^\circ$. [90] Toto geometrické uspořádání může být někdy nahrazeno geometrií 45°c:0° (*obrázek 3.4*), kdy je k osvětlení povrchu současně použito více světelných zdrojů. [90]

3.2.4 Úhlová geometrie 0°:45°a

Vzorek je osvětlován ve směru normály a odražené paprsky jsou snímány prstencově v úhlu $45^\circ \pm 0,5^\circ$. [90]



Obrázek 3.3 – Úhlová geometrie $45^\circ a:0^\circ$



Obrázek 3.4 – Úhlová geometrie $45^\circ c:0^\circ$

3.3 Měření celkového spektrálního činitele odrazu

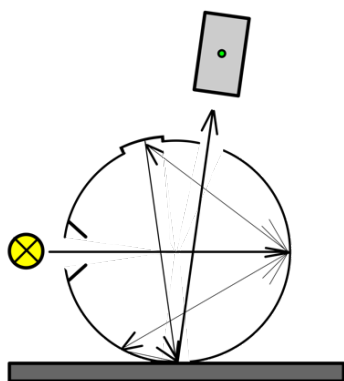
Podle pozice zdroje osvětlení a detektoru je rozlišeno měření celkového spektrálního činitele odrazu na dvě skupiny. Difúzní geometrii $d:x$ a difúzní geometrii $x:d$, kde hodnota x odpovídá v prvním případě pozici detektoru, kde je snímán odražený paprsek od povrchu vzorku a v druhém případě pozici, ze které je měřený vzorek osvětlován.

U tohoto geometrického uspořádání lze navíc zvolit také to, zda bude do výsledného odrazu zahrnuta nebo nebude zahrnuta zrcadlová složka odrazu (primární odraz). Je-li zrcadlová složka odrazu zahrnuta, označujeme toto měření jako specular component included (d_i), tj. měříme celkový spektrální činitel odrazu (obrázek 3.5). Pokud není zrcadlová složka odrazu zahrnuta do výsledného odrazu, označuje se toto měření jako specular component excluded (d_e), tedy měříme pouze rozptylný (nebo také poměrný) spektrální činitel odrazu (obrázek 3.6). Pro zajištění zrcadlové složky odrazu se používá záklopka, která má stejný povrch jako zbytek integrační koule. [90, 102, 103]

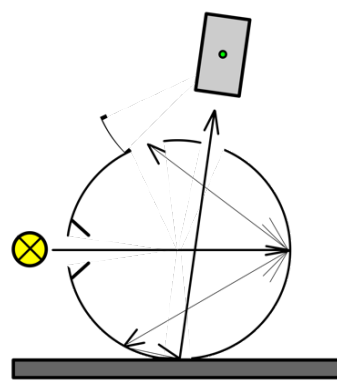
3.3.1 Difúzní geometrie $d:8^\circ$

Měřený objekt je osvětlován difúzně pomocí integrační koule, CIE [90] je dále doporučeno, aby byla měřená plocha rovnoměrně osvětlena rovnoměrně ze všech směrů v polokouli ohraničené její rovinou, aby byla odezva detektoru stejnoměrná v oblasti měřicí apertury, a aby osa odraženého paprsku byla $8^\circ \pm 0,5^\circ$ od normály ke středu měřicího otvoru, a aby záření odražené od povrchu měřeného objektu bylo snímáno rovnoměrně ve všech směrech v kuželu s polovičním úhlem $2^\circ \pm 0,25^\circ$ od osy odraženého paprsku. [90, 102, 103]

U této geometrie je možné zahrnout zrcadlovou složku odrazu (geometrie $d_i:8^\circ$). Pro zahrnutí zrcadlové složky se používá záklopka, jejíž povrch je shodný s povrchem celé



Obrázek 3.5 – Difúzní geometrie di:8°

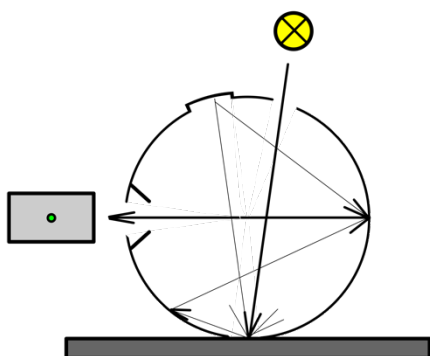


Obrázek 3.6 – Difúzní geometrie de:8°

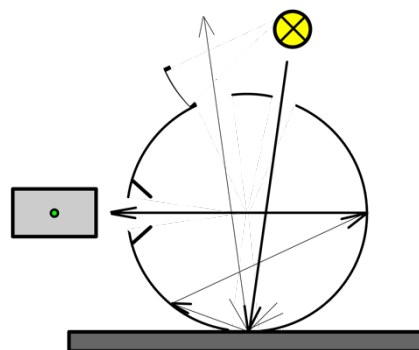
integrační koule. Záklopka je umístěna na opačné pozici, než se nachází detektor, tedy v případě geometrie di:8° (obrázek 3.5), respektive de:8° (obrázek 3.6) na pozici -8° . V případě, kdy do měření není zahrnuta zrcadlová složka odrazu, je geometrie označena jako de:8°. V případě spektrofotometrů, kdy je povrch záklopky shodný s povrchem integrační koule, je záklopka otevřena (obrázek 3.6) nebo jako je tomu u spektrofotometru MF200d firmy Datacolor, má záklopka černý matný povrch.

3.3.2 Difúzní geometrie 8°:d

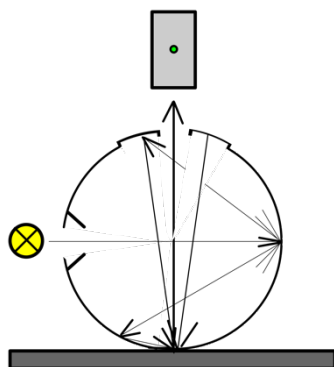
Difúzní geometrie s označením 8°:di (obrázek 3.7) nebo 8°:de (obrázek 3.8) jsou reverzní geometrie ke geometriím di:8° a de:8° v případě splnění podmínek nastavení doporučených pro tyto geometrie. Reverzní v tomto případě znamená, že vzorky jsou osvětlovány v úhlu 8° od normály povrchu a odražené paprsky od povrchu objektu jsou snímány difúzně ze všech úhlů polokoule ohraničené referenční rovinou. Osvětlovací paprsek by měl mít kónický tvar s polovičním úhlem $2^\circ \pm 0,25^\circ$ od osy osvětlovacího paprsku. [90]



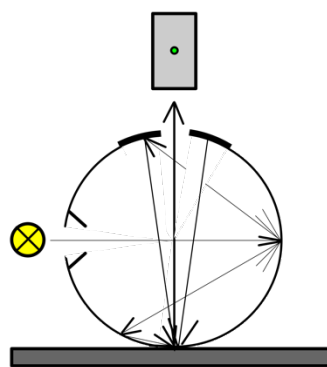
Obrázek 3.7 – Difúzní geometrie 8°:di



Obrázek 3.8 – Difúzní geometrie 8°:de



Obrázek 3.9 – Alternativní difúzní geometrie $d:0^\circ$ pro ideálně hladké povrchy



Obrázek 3.10 – Alternativní difúzní geometrie $d:0^\circ$ pro polomatné či pololesklé povrchy

3.3.3 Alternativní difúzní geometrie $d:0^\circ$ a $0^\circ:d$

Alternativní difúzní geometrie je taková geometrie, u které je striktně vyloučena zrcadlová složka odrazu, pokud je odražený paprsek směřován podél normály k detektoru vzorku ($d_i:0^\circ$). Tento typ geometrie se používá v případě měření ideálně hladkých vzorků. U této geometrie navíc může docházet i k primárnímu odrazu na měřeném povrchu. Je proto nutné u této geometrie podle doporučení CIE [90] mírně „naklonit“ optiku k redukci tohoto odrazu. [90] Pro účely pololesklých či polomatných vzorků se používá geometrie $d_e:0^\circ$.

V případě geometrie $0^\circ:d$ jsou získané hodnoty celkového spektrálního činitele odrazu získány odrazem záření od povrchu vzorku do všech směrů. Při tomto uspořádání je vzorek osvětlován v ose normály a do všech směrů odražené záření je sbíráno kulovým integrátorem a snímáno detektorem. Na *obrázcích 3.9 a 3.10* je ukázka alternativní difúzní geometrie $d:0^\circ$ v nastavení SCI a v nastavení SCE.

3.3.4 Difúzní geometrie $d:d$

Nastavení geometrie je shodné s měřicí geometrií $d_i:8^\circ$. Odražené paprsky z měřicí apertury jsou snímány ve všech úhlech na polokouli ohraničené referenční rovinou. [90]

3.4 Měření spektrálního činitele prostupu

Při měření druhotných objektů je včetně měření spektrálního činitele odrazu možné měřit i spektrální činitel prostupu τ_λ . Stejně jako u měření spektrálního činitele odrazu, je možné spektrální činitel prostupu τ_λ měřit různými způsoby.

3.4.1 Měřicí geometrie 0°:0°

Podle doporučení CIE [90] je doporučeno, aby osvětlovací i měřicí geometrie měla stejný pravoúhlý kuželovitý tvar, jejichž osy jsou kolmé na střed měřicího otvoru ($0^\circ \pm 0,5^\circ$) a polovičním úhlem $5^\circ \pm 0,25^\circ$ tak, aby povrchové i úhlové osvětlení měřicího otvoru bylo rovnoměrné a povrchová i úhlová odezva detektoru byla rovnoměrná.

3.4.2 Difúzní geometrie di:8

Podle doporučení CIE [90] je doporučeno, aby měřicí otvor byl rovnoměrně osvětlován ze všech směrů polokoule ohraničené první referenční rovinou, a aby měřicí paprsek odpovídal specifikaci měření s geometrií 0°:0°.

3.4.3 Difúzní geometrie de:8°

Tato měřicí geometrie odpovídá geometrii uvedené v předchozím odstavci až na to, že nejsou směřovány žádné paprsky přímo k detektoru současně s paprsky do 1° od těchto paprsků.

3.4.4 Difúzní geometrie 8°:di a 8°:de

8°:di a 8°:de geometrie jsou geometrie reverzní k výše zmíněným měřicím geometriím.

3.4.5 Difúzní geometrie d:d

Měřicí otvor je rovnoměrně osvětlován ze všech úhlů polokoule ohraničené první referenční rovinou a prošlý tok je rovnoměrně měřen ve všech úhlech polokoule ohraničené druhou referenční rovinou.

3.5 Podmínky pro měření

Součástí měření je i volba velikosti měřicího otvoru (apertury). Velikost apertury je volena s ohledem na velikost plochy měřeného vzorku, jeho strukturu a účelu měření. Velká apertura (30 mm) se volí vždy, umožňuje-li to plocha vzorku. V případech, kdy je měřená plocha malá nebo chceme-li měřit pouze určité vybrané oblasti na povrchu vzorku, můžeme volit přístroje s malou aperturou (4 mm nebo 6,6 mm). Velikost apertury má vliv na počet opakovaných měření, která jsou doporučena. U malé apertury je nutné opakovat měření minimálně 20krát, oproti tomu u velké apertury postačí změřit vzorek 4krát až 5krát.

Během měření je nutné vzorkem rotovat, vždy o 90° proto, aby bylo zajištěno, že bude brána v potaz jeho povrchová struktura (např. u textilií – vazba tkaniny či pleteniny, matný či lesklý povrch). V rámci opakovaných měření je nutné dodržet pravidlo, že maximální odchylka mezi opakovanými měřeními by neměla přesáhnout 0,1 jednotek ΔE_{CMC} . [49, 90, 103]

Jak bude zmíněno níže, v rámci experimentální části budou porovnávány hodnoty získané měřeními na různých spektrofotometrech s různou měřicí geometrií. Při kalibraci přístroje můžeme také nastavit zahrnutí různého podílu UV složky záření, umožňuje-li nám to konstrukce přístroje.

3.6 Kalibrace přístroje

U všech měřicích zařízení je před započítím měření nutné provést kalibraci. Kalibrace je prováděna za účelem možného porovnávání opakovaných měření na témže přístroji, k porovnání výsledků z různých přístrojů nebo laboratoří. Ke kalibraci jsou u většiny spektrofotometrů používány dva základní kalibrační standardy, černý a bílý standard, které mohou být doplněny jedním nebo několika validačními standardy. [50, 103]

Pořadí při kalibraci je striktní a ve většině případů je obsluha přístroje vyzývána k přikládání standardů na obrazovce monitoru či displeji přístroje softwarem ovládajícím daný kalibrovaný přístroj.

První krokem kalibrace je přiložení černého standardu. Černý standard je používán k definování spodní hranice měřicího intervalu, tzv. offsetu nebo k definování intensity pozadí. Offset neboli černý proud je elektrický proud generovaný detektorem při nulovém osvětlení. Typ černého standardu se liší podle typu použité měřicí geometrie. Černé standardy pro difúzní geometrii jsou nejčastěji používány ve formě černé pasti, jedná se o dutý válec, jehož dno je vyplněno sametem nebo kuželem, nebo je v prostoru válce umístěno zrcadlo v úhlu 45°. U takovéto černé pasti je pak naznačeno, jak má být standard k přístroji během kalibrace přikládán. Černé standardy pro úhlovou geometrii jsou používány ve formě lisovaných černých vrstev.

Druhým krokem kalibrace je přiložení bílého standardu. Před prvním použitím přístroje jsou do paměti přístroje nebo obsluhujícího softwaru nahrána data spektrálního činitele odrazu ρ_λ nebo jasu β_λ bílého standardu. Bílý standard je používán ve formě keramické kalibrační kachle, tablety s lisovaným síranem barnatým nebo opálového skla pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií nebo kachle pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií.

Hodnoty spektrálního činitele odrazu ρ_λ pro bílé standardy se blíží hodnotě ideálně bílé (100% odraz), nejbližše se této hodnotě přibližuje svými spektrálními charakteristikami síran barnatý.

Výsledné hodnoty spektrálního činitele odrazu ρ_λ jsou získány podle rovnice (3.1).

$$\rho_\lambda = \frac{I_{SAM}(\lambda)}{I_{REF}(\lambda)} = \frac{S_{SAM}(\lambda) - S_{BS}(\lambda)}{S_{WS}(\lambda) - S_{BS}(\lambda)} \cdot \rho_{WS}(\lambda) \quad (3.1)$$

kde $I_{SAM}(\lambda)$ je intenzita signálu měřeného vzorku, $I_{REF}(\lambda)$ je intenzita referenčního signálu, $S_{SAM}(\lambda)$ jsou hodnoty měřeného signálu vzorku, $S_{BS}(\lambda)$ jsou hodnoty měřeného signálu černého standardu, $S_{WS}(\lambda)$ jsou hodnoty měřeného signálu bílého standardu a $\rho_{WS}(\lambda)$ jsou data spektrálního činitele odrazu pro bílý standard nahrané v softwaru.

Výsledné hodnoty spektrálního činitele odrazu ρ_λ jsou tedy poměrem intenzity signálu vzorku $I_{SAM}(\lambda)$ a referenčního signálu $I_{REF}(\lambda)$. Během používání standardů může dojít k jejich poškození nebo znečištění. To může vést k rozdílům, které pak způsobují, že výsledné hodnoty jsou posunuté, například když bílý standard ztmavne, zažloutne, dojde tedy ke změně hodnot $S_{WS}(\lambda)$, a dochází k tomu, že výsledné hodnoty spektrálního činitele odrazu ρ_λ se posouvají k vyšším hodnotám (vzorek se jeví světlejší, než je) a naopak.

3.7 Ověření měření přístroje

Ověření měření (validace) je u většiny spektrofotometrů posledním krokem v rámci kalibračního procesu. Validace jako taková je proces ověření kalibrace. Ověření probíhá tím, že jsou před prvním měřením na přístroji nahrána do softwaru nebo přístroje spektrální data pro barevný standard nebo sadu standardů. Přiložení barevného standardu následuje po změření bílého standardu.

Výsledkem validace je hodnota barevné odchylky ΔE_{CMC} mezi přiloženým standardem a daty nahranými před prvním měřením na přístroji. Nastane-li situace, kdy došlo k záměně nebo poškození jednoho ze standardů, kolísání elektrického proudu, vyosení paprsku mimo měřicí aperturu nebo mimo pozici detektoru, vede to k negativnímu výsledku validace. Například v softwaru firmy Datacolor Tools se v takovémto případě objeví červený semafor. Ten signalizuje chybu v procesu kalibrace a validace, hodnota barevné odchylky ΔE_{CMC} přesahuje hodnotu $\Delta E_{CMC} > 0,5$.

Během tohoto kroku jsou porovnávány hodnoty spektrálního činitele odrazu ρ_λ aktuálně přiřazeného barevného standardu (zde zeleného standardu) s daty, které byly naměřeny před prvním použitím přístroje, podle rovnice (3.1). V případě, že došlo k záměně nebo poškození bílého standardu nebo k záměně zeleného standardu, validace přístroje není provedena. K posunu maxima spektrálního činitele odrazu ρ_λ může dojít i směrem k nižším či vyšším hodnotám činitele nebo ke kratším či delším vlnovým délkám v případě, kdy je použit jiný zelený standard nebo z jiných výše zmíněných důvodů.

Jsou-li data získaná při kalibraci a validaci v daných tolerančních mezích, kalibrace a validace je ukončena (v systému Datacolor Tools se objeví zelená na semaforu) a přístroj je připraven pro měření.

Doporučená doba kalibrace měřicích přístrojů je nejčastěji 8 hodin. Standardy je nutné uchovávat v čistém, suchém, a především tmavém prostředí (k čemuž se používá tmavý box). U některých přístrojů (X-Rite) je prováděna tzv. vnitřní autokalibrace, při které není nutné ručně zvláště přiřkládat jednotlivé standardy. Každý přístroj má určenu vlastní kalibrační a validační sadu, pokud není určeno jinak.

Pro nastavení přesného podílu UV záření během měření fluorescenčních vzorků se používají speciální kalibrační sady s výrobcí udanými hodnotami bělosti nebo speciální filtry zabudované ve spektrofotometrech s označením FL40, FL42 a FL46.

V případě, že chceme u spektrofotometrů nastavit přesný podíl UV záření při měření bělosti a fluorescentních vzorků, je nutné použít speciální kalibrační sady, nejčastěji obsahující 4 vzorky s výrobcí udanými hodnotami bělosti a nádechu (tint). Mezi tyto sady patří sada 4 bavlněných vzorků HOHENSTEIN White Scale nebo textilní UV kalibrační standard americké AATCC.

V rámci validací mohou být použity i sady 12 standardů CERAM/BCRA, 16 standardů (8 chromatických a 8 achromatických) Spectralon® (Labsphere®).

3.8 Chyby měření

Chyba měření je výsledná hodnota, která je tvořena řadou chyb. [104–106] Chyby měření mohou pocházet z různých zdrojů:

- a. *Chyby přístrojové* – chyby přístrojové jsou chyby vycházející z nedokonalosti měřicích zařízení. Tyto chyby se výrobce snaží odstranit již při výrobě. Nekorigovatelné chyby pak výrobce opravuje formou korekčních křivek nebo je popisuje jako maximální dovolené chyby.

- b. *Chyby metody* – vyvstávají z měřicích metod.
- c. *Chyby pozorování*.
- d. *Chyby výpočtové* – tento typ chyb souvisí se zpracováním naměřených hodnot.
- e. *Chyby instalace* – chyby instalace souvisejí s nevhodným zapojením nebo uložením měřicích přístrojů.

Výše popsané chyby (*a. – e.*) se objevují buď jako systematické chyby nebo náhodné chyby. [105]

Absolutní chyba měření (skutečná) je rozdíl mezi výsledkem měření a skutečnou hodnotou. Je uváděna ve stejných jednotkách jako měřená hodnota. [104, 105]

$$\varepsilon = x - x_0 \quad (3.2)$$

Relativní chyba měření je poměrem absolutní chyby ke skutečné hodnotě, udává se v procentech. [104, 105]

$$\delta = \frac{\varepsilon}{x_0} \cdot 100 \% \quad (3.3)$$

Jak bylo zmíněno výše, chyby můžeme podle jejich charakteru rozdělit na systematické (soustavné) a náhodné.

Náhodná chyba je složka chyby, která se při opakovaných měření stejné veličiny mění nepředvídatelným způsobem, zmenšuje se nebo se zvětšuje s opakovaným počtem měření. [104–106]

Systematická chyba je složka chyby, která při opakovaných měřeních téže veličiny zůstává konstantní nebo se mění předvídatelným způsobem. Systematické chyby mohou být známé i neznámé. Vliv systematické chyby lze omezit pomocí korekce, hodnota korekce je úměrná záporné hodnotě systematické chyby (metoda, přístroj, pozorovatel). [104–106]

Nekorigované systematické chyby a náhodné chyby se ve výsledku měření vyjadřují nejistotou měření. [104, 105]

3.8.1 Nejistota měření

Nejistota měření je hodnota úzce související s výsledkem měření. Charakterizuje rozptyl hodnot, které je možné přiřadit k měřené veličině, tj. skutečná hodnota se pohybuje v určitém

intervalu okolo naměřené hodnoty. Nejistota měření může zahrnovat více složek. Některé z těchto složek lze určit statistickým vyhodnocením řady měření, některé se pak dají určit na základě předpokládaného rozdělení. [104, 105, 107]

Nejistota měření je důležitou součástí výsledků společně s hodnotou měřené veličiny. Při vyhodnocování měření je nutné rozlišovat, zda opakovaná měření probíhala za stejných nebo rozdílných podmínek (opakovatelnost a reprodukovatelnost měření).

3.8.1.1 Zdroje nejistot měření

„Zdroji nejistot označujeme jevy přispívající k nejistotě a způsobující to, že výsledek měření nelze charakterizovat pouze jedinou hodnotou.“ [104, 105, 107]

Zdroje nejistot v praxi:

- a. *Nereprezentativní výběr vzorků* – vybraný měřený vzorek nereprezentuje měřenou veličinu
- b. *Neúplná definice měřené veličiny.*
- c. *Nedostatečná znalost vlivů okolí nebo jejich špatné měření.*
- d. *Vliv lidského faktoru při práci s analogovými měřidly.*
- e. *Omezená rozlišovací schopnost přístroje nebo práh jeho rozlišení.*
- f. *Nepřesnost měřících etalonů nebo referenčních materiálů.*
- g. *Nepřesné hodnoty konstant z externích zdrojů, které jsou použity v algoritmu výpočtu.*
- h. *Zjednodušení měřící metody nebo při postupu měření.*
- i. *Změny v opakovaných pozorováních měřené veličiny, která jsou prováděna za evidentně shodných podmínek.*

Nejistoty popsané v bodech a. – h. nejsou vždy nezávislé. Některé z nejistot z uvedených bodů mohou přispívat ke vzniku nejistoty uvedené v bodě i.

„Při stanovení nejistot vycházíme z předpokladu, že měřené hodnoty a chyby mají určité rozdělení pravděpodobnosti. Výsledek měření má poté určité rozdělení pravděpodobnosti.“ [104]

3.8.1.2 Rozdělení nejistot

Nejistoty jsou tvořeny několika jednotlivými nejistotami nebo složkami nejistot. Termín standardní nejistota je základní kvantitativní charakteristikou nejistoty. Standardní nejistota měření $u(y)$ se vztahuje k odhadu výsledku měření y . Standardní nejistota měření je vyjádřena

směrodatnou odchylkou měřené veličiny $s(y)$, jejíž velikost je stanovena jako odhad z měření x_i měřené veličiny X . [104, 105, 107]

Podle způsobu stanovení velikosti nejistot dělíme standardní nejistoty na: [104–109]

- a. *nejistoty stanovené metodou A – u_{Ax} (standardní nejistota typu A) – nejistoty získané statistickým zpracováním z naměřených hodnot, nejistoty stanovené touto metodou se projevují charakteristickým znakem, kdy s rostoucím počtem měření klesají, nejistoty jsou v tomto případě neznámé. Nejistota je vyjádřena výběrovou směrodatnou odchylkou získanou výpočtem nebo pomocí regresní analýzy.*
- b. *nejistoty stanovené metodou B – u_{Bx} (standardní nejistota typu B) – nejistoty získané jiným než statistickým zpracováním z naměřených hodnot, nejistoty stanovené metodou B jsou nezávislé na počtu měření, nejistoty pocházejí ze známých nebo identifikovaných zdrojů.*

Toto dělení nejistot však nedělí nejistoty na metodu A a B, ale popisuje metody jejich stanovení. Při korektním stanovení jsou nejistoty určené metodami A a B rovnocenné.

3.8.1.3 Nejistota stanovená metodou A

Postup stanovení k výpočtu nejistoty stanovené metodou A lze použít pouze tehdy, byla-li provedena nezávislá opakovaná přímá měření hodnot. Na základě opakovaného měření získáme n naměřených hodnot $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. [104, 105, 107, 108] Potom tedy:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.4)$$

kde \bar{x} je aritmetický průměr z naměřených hodnot z opakovaných měření nebo také odhad měřené veličiny, n je počet opakovaných měření.

Nejistota stanovená metodou A [104, 105, 107, 108] je rovna výběrové směrodatné odchylce aritmetického průměru:

$$u_{Ax} = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.5)$$

kde $s_{\bar{x}}$ je výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru, n je počet opakovaných měření, x_i je hodnota jednoho opakovaného měření, \bar{x} je aritmetický průměr z naměřených hodnot z opakovaných měření.

3.8.1.4 Nejistota stanovená metodou B

Nejistoty stanovené metodou B jsou nejistoty stanovené jiným než statistickým zpracováním z naměřených hodnot. Nejistoty jsou nezávislé na počtu měření, pocházejí ze známých nebo kvalifikovaných zdrojů. Mezi zdroji mohou být: předcházející měření a výsledky z nich získaných, informace a znalosti o chování měřeného vzorku, měřicí metody, měřicí přístroje a podmínky měření, specifikace udané výrobcí měřicích přístrojů a jimi určené podmínky měření, údaje z kalibračních listů a certifikátů. [104, 105, 107, 108]

Postup stanovení nejistoty stanovené metodou B: [104, 105, 107, 108]

- a. *určení možných zdrojů nejistot z_1, z_2, \dots, z_n , které mohou být způsobeny použitím měřicích přístrojů, použitými měřicími metodami, podmínkami měření, použitými konstantami a vztahy použitými při vyhodnocování výsledků.*
- b. *určení standardní nejistoty metodou B pro každý zdroj pomocí zjištěných hodnot nejistot z doprovodné technické dokumentace – kalibrační listy, technické normy, údaje výrobců, technické tabulky nebo odhadem.*

Odhad standardní nejistoty u_{Bx} je tvořen několika kroky:

1. *odhad odchylek $\pm z_{max}$ od nominální hodnoty veličiny u zdroje, kde překročení nominální hodnoty má malou pravděpodobnost.*
2. *získané odhady odchylek se rozdělí do intervalů a pomocí tabulek se určí nejvhodnější aproximace.*
3. *určení standardní nejistoty pro tento zdroj je definován podle rovnice (3.6):*

$$u_{zj} = \frac{\Delta z}{\chi} \quad (3.6)$$

kde χ je hodnota odpovídající určené nejvhodnější aproximaci podle rozdělení dat.

Mezi rozdělení, která se používají při hledání aproximace patří normální rozdělení, kde se používá hodnota $\chi = 2$ (95 % interval) nebo $\chi = 3$ (99 % interval). Toto rozdělení se používá

v případě, kdy se objevují pouze malé odchylky od nominální hodnoty a jejich četnost klesá s jejich rostoucí velikostí. [104, 105, 107, 108]

Dalším rozdělením, které se používá pro stanovení nejhodnější aproximace patří rovnoměrné rozdělení, kde se používá hodnota $\chi = \sqrt{3}$. Toto rozdělení se používá v případě, že pravděpodobnost výskytu odchylek $\pm z_{max}$ je v daném intervalu stejná. Tento typ aproximace je nejpoužívanější. Jedním z důvodů, proč tomu tak je, je také to, že v mnoha případech není možné přesně určit pravděpodobnostní rozdělení výskytu. [104, 105, 107, 108]

Třetím používaným rozdělením je trojúhelníkové rozdělení, které se používá stejně, jako bylo popsáno v odstavci o použití normálního rozdělení. Hodnota při použití trojúhelníkového rozdělení je $\chi = 2,45$. [104, 105, 107, 108]

Při používání přístrojů s číslicovým displejem se za zdroj nejistoty mimo jiné považuje rozlišitelnost poslední platné číslice. I když během opakovaných měření nenastává změna poslední číslice, neznamená to, že nejistota je nulová. Pro odhad nejistoty se vychází z předpokladu rovnoměrného rozdělení, které je dáno rozlišitelností daného měřícího přístroje δ_{zi} . Odhad nejistoty je pak stanoven podle rovnice (3.7): [104, 105, 107, 108]

$$u_{B_{zi}} = \frac{\delta_{zi}}{2\sqrt{3}} = 0,29\delta_{zi} \quad (3.7)$$

kde δ_{zi} je rozlišitelnost přístroje.

Při používání přístrojů s analogovým displejem je odčitelnost dána hodnotou 1 dílku stupnice δ_z . Odhad nejistoty je pak stanoven podle rovnice (3.8): [104, 105, 107, 108]

$$u_{B_{zi}} = \frac{\delta_z}{2\sqrt{3}} = 0,29\delta_z \quad (3.8)$$

kde δ_z je odčitelnost 1 dílku stupnice.

- c. *přepočítání hodnot určených nejistot u_{zj} z každého jednotlivého zdroje na složku nejistoty měřené veličiny $u_{x,zj}$.* [104, 105, 107, 108]

$$u_{x,zj} = A_{x,zj} \cdot u_{zj} \quad (3.9)$$

kde A_{x,z_j} jsou hodnoty převodového koeficientu.

Hodnoty převodového koeficientu jsou stanoveny ze závislosti $X = f(Z_1, \dots, Z_j, \dots, Z_m)$ použitím rovnice (3.10):

$$A_{x,z_j} = \left. \frac{\partial X}{\partial Z_j} \right|_{z=z} \quad (3.10)$$

kde $z = [z_1, \dots, z_j, \dots, z_m]$ jsou aktuální hodnoty veličin Z_j .

Jestliže závislost $X = f(Z)$ není známa, určuje se A_{x,z_j} experimentálně změřením hodnoty Δx_{z_j} při malé změně Δz_j a dosadí se do rovnice (3.11):

$$A_{x,z_j} \approx \frac{\Delta x_{z_j}}{\Delta z_j} \quad (3.11)$$

- d. *posouzení korelace mezi zdroji nejistoty stanovených metodou B a odhad korelačního koeficientu $r_{z_j,k}$ z intervalu $< -1; +1 >$. U přímých měření jedné veličiny je korelace mezi veličinami Z_j velmi nízká a do značné míry souvisí i s korelovanými, ovlivňujícími veličinami (např. relativní vlhkost vzduchu, teplota). [104, 105, 107, 108]*
- e. *přepočtené složky nejistot se spojí do výsledné nejistoty u_{Bx} podle rovnice (3.12) [104, 105, 107, 108]:*

$$u_{Bx} = \sqrt{\sum_{j=1}^m A_{x,z_j}^2 \cdot u_{z_j}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{x,z_j}^2} \quad (3.12)$$

3.8.1.5 Kombinovaná standardní nejistota

Při zpracování nejistot se můžeme setkat s termínem kombinovaná standardní nejistota, která se stanovuje jako součet čtverců nejistot stanovených metodou A a B v případě, že mezi zdroji nejistot stanovenými těmito metodami není žádná závislost. [104, 105, 107, 108]

Vztah pro výpočet kombinované standardní nejistoty:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (3.13)$$

kde f je $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ vstupních veličin, $u(x_i)$ jsou standardní nejistoty, a to u_{Ax} je standardní nejistota stanovená metodou A, u_{Bx} je standardní nejistota stanovená metodou B. $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ je koeficient citlivosti, který vyjadřuje závislost výsledné veličiny y na různých měřených vstupních veličinách, respektive popisuje velikost změny v závislosti na vstupních veličinách x_i .

3.8.1.6 Rozšířená standardní nejistota

Standardní nejistota tvoří interval kolem skutečné hodnoty měřené veličiny s poměrně malou pravděpodobností (pro normální rozdělení okolo 68 %). Chceme-li však získat interval s vyšší pravděpodobností kolem skutečné hodnoty, můžeme použít tzv. rozšířenou standardní nejistotu. [104, 105, 107, 108]

Rozšířená standardní nejistota je definována:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (3.14)$$

kde k je koeficient rozšíření nebo koeficient pokrytí, $u_c(y)$ je kombinovaná standardní nejistota.

Koeficient pokrytí se stanovuje pomocí dvou metod. První metodou je konvenční určení. Hodnota koeficientu nabývá hodnot od 2 do 3. Tyto hodnoty jsou uvedeny v technických normách.

Druhou metodou pro určení koeficientu pokrytí je výpočetní metoda. Při volbě této metody záleží, kolik opakovaných měření bylo provedeno. [104, 105, 107, 108]

1. *velký počet opakovaných měření* ($n > 30$) – koeficient pokrytí nabývá hodnot pro rozdělení pravděpodobnosti pokrytí podle *tabulky 3.1*.

Tabulka 3.1 – Hodnoty koeficientu pokrytí pro různé rozdělení pravděpodobnosti [104]

Pravděpodobnost pokrytí	Koeficient pokrytí
0,68	1,00000
0,80	1,28155
0,90	1,64485
0,95	1,95996
0,99	2,57583
0,999	3,29053

2. *malý počet opakovaných měření* ($n < 30$) – koeficient pokrytí je stanoven podle následující rovnice

$$k = t_{p,v_{ef}} \quad (3.15)$$

kde $t_{p,v_{ef}}$ jsou hodnoty ze Studentova rozdělení pro rozdělení pravděpodobnosti pokrytí a pro efektivní počet stupňů volnosti. Hodnoty pro toto rozdělení jsou uvedeny v *tabulce 3.2*.

Tabulka 3.2 – Ukázka tabulky s hodnotami koeficientu pokrytí pro různé rozdělení pravděpodobnosti a efektivní počet stupňů volnosti [104]

Počet opakovaných měření	Pravděpodobnost pokrytí			
	0,90	0,95	0,99	0,999
1	6,314	12,706	63,656	635,578
10	1,812	2,764	3,169	4,587
15	1,753	2,131	2,947	4,073
30	1,697	2,042	2,750	3,646

Efektivní počet stupňů volnosti je určen vztahem:

$$v_{ef} = \left[(n + 1) \cdot \left(1 + \frac{u_{Bx}^2}{u_{Ax}^2} \right)^2 \right] - 2 \quad (3.16)$$

kde u_{Ax} je standardní nejistota stanovená metodou A, u_{Bx} je standardní nejistota stanovená metodou B, n je počet stupňů volnosti.

3. *malý počet opakovaných měření* ($n < 10$) – pro malý počet opakovaných měření je rozšířená standardní nejistota stanovena podle rovnice (3.17).

$$U = 2 \sqrt{k_A \cdot u_{Ax}^2 + u_{Bx}^2} \quad (3.17)$$

kde k_A je koeficient pokrytí, u_{Ax} je standardní nejistota stanovená metodou A, u_{Bx} je standardní nejistota stanovená metodou B. Hodnoty koeficientu pokrytí pro různý počet opakovaných měření jsou uvedeny v *tabulce 3.3*.

Tabulka 3.3 – Tabulka s hodnotami koeficientu pokrytí pro různý počet opakovaných měření s pravděpodobností pokrytí 95 % [104]

Počet opakovaných měření	2	3	4	5	6	7	8	9
Hodnoty koeficientu pokrytí	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2

3.8.2 Stanovení nejistot při nepřímém měření

Výše popsané metody pro stanovení nejistot byly metody stanovení používané pro přímá měření. Následující kapitola je věnována určování nejistot při nepřímém měření. [104, 105, 107, 108]

3.8.2.1 Model měření

V případech, kdy hodnotu veličiny nelze stanovit přímým měřením, stanovuje se její hodnota pomocí funkčního vztahu ze vstupních veličin podle následujícího vztahu: [104, 105, 107, 108]

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_m) \quad (3.18)$$

kde X_i je hodnota vstupní veličiny, pro kterou je $i = 1, \dots, m$.

Množina F složená ze vstupních veličin je tvořena:

- a. *veličinami, jejichž hodnoty a nejistoty lze stanovit normálním měřicím postupem (např. hodnoty z jednoho měření, z opakovaných měření, odhadem založeným na*

zkušenostech nebo zahrnující korekce ovlivňujících veličin (okolní teplota, tlak, relativní vlhkost)).

- b. *veličinami, jejichž hodnoty a nejistoty jsou získány z vnějších zdrojů (např. tabulky, certifikáty, technické normy).*

Následující odstavce jsou vztaheny pro vstupní veličiny, které jsou vzájemně statisticky nezávislé, nekorelované. Měření se opakuje několikrát (n -krát), pro každé opakované i -té měření se získá série hodnot $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ji}, \dots, x_{mi}$. Výslednou hodnotu měření \bar{y} lze stanovit dvěma způsoby: [104, 105, 107, 108]

- a. *množina F je tvořena výběrovými průměry vstupních veličin:*

$$\bar{y} = F(\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{2i}, \dots, \bar{x}_{ji}, \dots, \bar{x}_{mi}) \quad (3.19)$$

$$\bar{x}_{ji} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ji} \quad (3.20)$$

kde \bar{x}_{ji} je hodnota výběrového průměru stanoveného pro sérii hodnot x_{ji} .

- b. *množina F je tvořena výběrovými průměry y_i stanovenými pro každou sérii naměřených hodnot x_{ji}*

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.21)$$

$$y_i = F(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ji}, \dots, x_{mi}) \quad (3.22)$$

Oba způsoby stanovení výsledné hodnoty měření jsou v případě lineární závislosti rovnocenné. V případě nelineární závislosti je způsob *b.* přesnější.

3.8.2.2 Stanovení standardní nejistoty výstupního odhadu metodou A

Standardní nejistota výstupního odhadu metodou A je stanovena: [104, 105, 107, 108]

$$u_{Ay}^2 = \sum_{j=1}^m A_{xj}^2 u_{A,xj}^2 \quad (3.23)$$

$$A_{x_j} = \left| \frac{\partial F(X)}{\partial X_j} \right|_{X=x} \quad (3.24)$$

kde A_{x_j} je převodový koeficient stanovený z parciálních derivací, u_{A,x_j} je nejistota stanovená metodou A jednotlivých vstupních veličin.

Výběrový rozptyl výběrového průměru je stanoven podle vztahu: [104, 105, 107, 108]

$$u_{A_{x_j}}^2 = \frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_{ji} - \bar{x}_j)^2 \quad (3.25)$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ji} \quad (3.26)$$

kde \bar{x}_j je průměr stanovený z veličin x_{ji} .

3.8.2.3 Stanovení standardní nejistoty výstupního odhadu metodou B

Standardní nejistota výstupního odhadu metodou B je stanovena:

$$u_{B_y}^2 = \sum_{j=1}^m A_{x_j}^2 u_{B,x_j}^2 \quad (3.27)$$

$$A_{x_j} = \left| \frac{\partial F(X)}{\partial X_j} \right|_{X=x} \quad (3.28)$$

kde A_{x_j} je převodový koeficient stanovený z parciálních derivací, u_{B,x_j} je nejistota stanovená metodou B jednotlivých vstupních veličin. [104, 105, 107, 108]

3.8.2.4 Kombinovaná standardní nejistota

Kombinovaná standardní nejistota je získaná sloučením nejistot stanovených metodami A a B. [104, 105, 107, 108]

$$u_{C_y} = \sqrt{u_{A_y}^2 + u_{B_y}^2} \quad (3.29)$$

3.8.2.5 Rozšířená nejistota měření

Rozšířená nejistota měření je stanovena podle vztahu:

$$U = t_{p,v_{ef}} u_{Cy} \quad (3.30)$$

kde u_{Cy} je kombinovaná standardní nejistota, v_{ef} je efektivní počet stupňů volnosti. [104, 105, 107, 108]

Efektivní počet stupňů volnosti je určen vztahem

$$v_{ef} = \frac{u_{Cy}^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_{iy}^4}{v_i}} \leq \sum_{i=1}^N v_i \quad (3.31)$$

kde v_i jsou stupně volnosti ($v = n - 1$), u_{iy} jsou standardní nejistoty jednotlivých složek. [104]

Efektivní počet stupňů volnosti zpravidla nevychází jako celé číslo. Výsledek se poté zaokrouhluje na celé číslo směrem dolů. [104]

3.8.3 Určování nejistot pro spektrofotometrická měření

S využitím výše definovaných nejistot pro měření je hodnocení a určování nejistot spjato i se spektrofotometrickými měřeními. Ze získaných hodnot spektrálního činitele odrazu ρ_λ nebo β_λ nebo spektrálního činitele prostupu τ_λ je možné vyjádřit a popsat barevnost objektů vždy pomocí třech atributů. Mezi tyto atributy řadíme atribut světlosti a atributy barevnosti (například xyY , $L^*a^*b^*$, $L^*C_{ab}^*h_{ab}$).

Rozptyl nejistoty pro veličinu X (druhá mocnina nejistoty) je tvořen kombinací vstupních veličin podle rovnice (3.32) nebo (3.33). [110, 111]

Rozptyl nejistoty pro veličinu X je tvořen kombinací vstupních veličin $X = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ a je vyjádřen jako

$$u^2(X) = \sum_i^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (3.32)$$

kde $u(x_i)$ je nejistota veličiny x_i , $u(x_i, x_j)$ je kovariance x_i a x_j . [110]

Pro rovnici (3.32) platí předpoklad, že výstupní veličina X je lineárně závislá na vstupních veličinách x_i .

Při spektrofotometrických měřeních měříme veličiny x_i na různých vlnových délkách. Nejistoty $u(x_i)$ jsou ovlivněny různými složkami měření. Některé tyto složky se mohou měnit na jedné vlnové délce nezávisle na hodnotě náležící další vlnové délce. Tyto složky označované jako šum, jsou náhodné a nekorelované mezi vlnovými délkami. Vzájemná závislost (kovariance) mezi těmito složkami na různých vlnových délkách je poté nulová. Na základě toho je rovnice (3.32) vyjádřena jako

$$u^2(X) = \sum_i^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (3.33)$$

kde $u(x_i)$ je nejistota veličiny x_i . Takto vypočtený rozptyl nejistoty podle rovnice (3.33) je určen pro výpočet v případě, že se vstupní veličiny mění nebo se předpokládá, že se mění náhodným způsobem. [110, 111]

V případě, že faktor ovlivňující vstupní veličiny x_i je způsoben systémem, jsou tyto faktory označeny jako systematické. Protože každý takovýto faktor má vlastní pásmo nejistoty, ve kterém se mění, jsou vstupní veličiny ovlivněny korelovaným způsobem. Většina systematických faktorů má pouze jeden určující faktor, což vede k úplné korelaci mezi veličinami x_i pro různé vlnové délky. [110]

Kovariance pro tyto veličiny je definována

$$u(x_i, x_j) = \pm u(x_i)u(x_j) \quad (3.34)$$

kde $u(x_i)$ a $u(x_j)$ jsou nejistoty pro dvě veličiny. [110]

Jsou-li všechny korelace pozitivní, respektive plně korelované, je rovnice (3.32) upravena na výraz

$$u(X) = \sum_{i=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \quad (3.35)$$

kde $u(x_i)$ je nejistota veličiny x_i . [110]

Obecně však platí, že vstupní veličiny x_i jsou ovlivňovány jak náhodnými, tak i systematickými složkami chyb. Jsou-li tyto složky chyb (jsou nezávislé) pro veličiny x_i spojeny pro výpočet celkové nejistoty, jsou veličiny x_i na různých vlnových délkách částečně korelovány. Pro vyjádření korelace mezi těmito veličinami je použit korelační koeficient $r(x_i, x_j)$. [106]

Korelační koeficient $r(x_i, x_j)$ je definován jako

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (3.36)$$

kde $u(x_i, x_j)$ je kovariance, $u(x_i)$ a $u(x_j)$ jsou nejistoty pro dvě veličiny. Pro nekorelovaná data je hodnota korelačního koeficientu $r(x_i, x_j)$ rovna 0, pro korelovaná data nabývá korelační koeficient $r(x_i, x_j)$ hodnot $-1 \leq r(x_i, x_j) \leq +1$. [110]

Rovnice (3.32) je potom vyjádřena s pomocí korelačního koeficientu $r(x_i, x_j)$ jako

$$u^2(X) = \sum_i^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} r(x_i, x_j) u(x_i, x_j) \quad (3.37)$$

Pokud definujeme další veličinu Y ze vstupních veličin x_i pomocí vztahu $Y = g(x_1, x_2, \dots, x_N)$, jejíž nejistota $u(Y)$ je vyjádřena shodně jako nejistota $u(X)$ pro veličinu X podle rovnice (3.32). Veličiny X a Y jsou korelovány pomocí závislosti na vstupních veličinách x_i . [110, 111]

Kovariance veličin X a Y je dána vztahem [110]

$$u(X, Y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial g}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (3.38)$$

Protože rozptyl veličiny je vlastně vlastní kovariancí $u^2(x_i) \equiv u(x_i, x_i)$, je možné rovnici (3.32) vyjádřit v maticové formě jako

$$u^2(X) = \mathbf{f}_x \mathbf{U}_x \mathbf{f}_x^T \quad (3.39)$$

$$\mathbf{f}_x = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \quad \frac{\partial f}{\partial x_2} \quad \dots \quad \frac{\partial f}{\partial x_n} \right) \quad (3.40)$$

$$\mathbf{U}_x = (u(x_i, x_j)) \quad (3.41)$$

kde \mathbf{f}_x je řádkový vektor koeficientů citlivosti, \mathbf{f}_x^T je jeho transpozicí a \mathbf{U}_x je $N \times N$ variančně-kovariační matice, kde na diagonále jsou hodnoty rozptylů nejistot a na ostatních pozicích matice jsou hodnoty kovariancí. [110]

Kovariance veličin X a Y získaných ze vstupních veličin x_i je vyjádřena v maticové formě jako

$$u(X, Y) = \mathbf{f}_x \mathbf{U}_x \mathbf{g}_x^T \quad (3.42)$$

$$\mathbf{g}_x = \left(\frac{\partial g}{\partial x_1} \quad \frac{\partial g}{\partial x_2} \quad \dots \quad \frac{\partial g}{\partial x_n} \right) \quad (3.43)$$

Je-li ze vstupních veličin x_i vyjádřeno více výstupních veličin Y , je variančně-kovariační matice pro výstupní veličinu \mathbf{U}_y vyjádřena jako rozšíření variančně-kovariační matice \mathbf{U}_x jako

$$\mathbf{U}_y = \mathbf{Q} \mathbf{U}_x \mathbf{Q}^T \quad (3.44)$$

kde \mathbf{Q} je matice koeficientů citlivosti pro výstupní veličiny. [110]

Celkový rozptyl hodnoty na jedné vlnové délce je sumou rozptylů jednotlivých složek. Stejně tak to platí pro vyjádření celkové kovariance mezi dvojicí spektrálních hodnot, kde výsledná celková kovariance je součtem kovariancí pro každou složku. Náhodné složky přispívají k rozptylu pouze v daném bodě. Kombinace náhodných a systematických složek znamená, že kovariance mezi spektrálními hodnotami již není nulová jako v případě náhodných

složek, ani úplná jako v případě systematických složek, ale částečná. Výsledné hodnoty korelačních koeficientů jsou větší než 0, ale zároveň menší než 1. [110]

Rozlišení náhodných a systematických složek chyb v případě spektrofotometrického měření má tři výhody: [110]

1. jsou určeny vlivy jednotlivých složek spektrofotometrického měření na výslednou hodnotu nejistoty veličiny. Tyto složky vyplývají přímo z měření a jejich pochopení a definování může vést ke zdokonalení měřicích postupů.
2. složky jsou náhodné (nekorelované) nebo systematické (plně korelované), a proto pro výpočet výsledného rozptylu nejistoty lze sečíst jejich hodnoty.
3. kovariance mezi kombinací dvou veličin je možné vypočítat jako sumu náhodných složek a součin systematických složek.

Pro body 2 a 3 platí, že větší počet hodnot přináší lépe stanové výsledky.

3.8.3.1 Rozptyl a kovariance trichromatických složek XYZ

Trichromatické složky XYZ jsou používány pro popis barevnosti objektů. Trichromatické složky XYZ jsou podle CIE [90] definovány

$$X = k \int \rho_{\lambda} S_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} d_{\lambda} \quad (3.45)$$

$$Y = k \int \rho_{\lambda} S_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} d_{\lambda} \quad (3.46)$$

$$Z = k \int \rho_{\lambda} S_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} d_{\lambda} \quad (3.47)$$

kde k je normalizační faktor, ρ_{λ} je spektrální činitel odrazu, S_{λ} je činitel poměrného spektrálního složení světelného zdroje, \bar{x}_{λ} , \bar{y}_{λ} a \bar{z}_{λ} jsou funkce vyrovnání barev. Hodnoty S_{λ} a \bar{x}_{λ} , \bar{y}_{λ} , \bar{z}_{λ} jsou tabelovány [90].

Normalizační faktor je definován jako

$$k = \frac{100}{S_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} d_{\lambda}} \quad (3.48)$$

Hodnota trichromatické složky Y pro normalizované zdroje světla je rovna 100. Hodnoty \bar{x}_λ , \bar{y}_λ a \bar{z}_λ jsou definovány pro rozsah vlnových délek 360 až 830 nm. Na základě toho pak je integrál v rovnicích (3.45) – (3.47) nahrazen sumou pro definovaný rozsah vlnových délek v závislosti na spektrofotometru. Výpočet XYZ je ve formě sum

$$X = k \sum_{360}^{830} \rho_\lambda S_\lambda \bar{x}_\lambda \Delta_\lambda \quad (3.49)$$

$$Y = k \sum_{360}^{830} \rho_\lambda S_\lambda \bar{y}_\lambda \Delta_\lambda \quad (3.50)$$

$$Z = k \sum_{360}^{830} \int \rho_\lambda S_\lambda \bar{z}_\lambda \Delta_\lambda \quad (3.51)$$

kde Δ_λ vyjadřuje interval vlnových délek.

Pomocí rovnic (3.49) – (3.51) jsou definovány koeficienty citlivosti, které vyjadřují závislosti trichromatických složek XYZ na hodnotě spektrálního činitele odrazu ρ_λ

$$\frac{\partial X}{\partial \rho_\lambda} = S_\lambda \bar{x}_\lambda \Delta_\lambda \quad (3.52)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \rho_\lambda} = S_\lambda \bar{y}_\lambda \Delta_\lambda \quad (3.53)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \rho_\lambda} = S_\lambda \bar{z}_\lambda \Delta_\lambda \quad (3.54)$$

Jak již bylo zmíněno výše, složky chyb mezi vlnovými délkami mohou být náhodné nebo systematické, a každá z těchto chyb přispívá k celkové nejistotě měření, respektive k hodnotám trichromatických složek XYZ, a zároveň také k hodnotám kovariance. Hodnoty rozptylů a kovariance každé jednotlivé chyby se sečtou dohromady a vytvoří tak celkovou variančně-kovarianční matici. [110]

Náhodné složky chyb

Pro náhodné složky chyb, tedy nekorelované složky, je nejistota pro trichromatickou složku X definována pomocí rovnice (3.41) jako

$$u^2(X) = \sum_i^N (S_\lambda \bar{x}_\lambda \Delta_\lambda)^2 u^2(\rho_\lambda) \quad (3.55)$$

kde $v(\rho_\lambda)$ je nejistota pro složku chyby. Obdobně jako pro trichromatickou složku X , jsou definovány nejistoty pro trichromatické složky Y ($u^2(Y)$) a Z ($u^2(Z)$). [110]

Kovariance mezi hodnotami X a Y je s pomocí rovnice (3.38) definována jako

$$u(X, Y) = \sum_i^N \Delta_\lambda^2 S_\lambda^2 \bar{x}_\lambda \bar{y}_\lambda u^2(\rho_\lambda) \quad (3.56)$$

Obdobně je pak vyjádřena kovariance mezi složkami YZ ($u(Y, Z)$) a XZ ($u(X, Z)$). [110]

Mezi náhodné složky chyb, které lze stanovit při stanovování nejistot spektrofotometrického měření patří offset noise, source noise (zdrojový hluk), chyba vlnové délky (nm). [110]

Systematické složky chyb

Systematické složky chyb jsou korelované mezi vlnovými délkami. Většina složek má pozitivní korelaci mezi dvěma hodnotami na různých vlnových délkách. Pro každou složku vypočítáme velikost nejistoty jako součin koeficientu citlivosti tohoto efektu a nejistoty tohoto efektu. Pro jednu složku je nejistota odrazu vypočtena jako

$$u_s(\rho_\lambda) = \frac{d\rho_\lambda}{dp} u(p) \quad (3.57)$$

kde p je popisuje zkoumanou složku chyby, $u(p)$ je nejistota této složky. [110]

Nejistota trichromatické složky X se započítám této chyby je

$$u_s(X) = \sum_i^N S_\lambda \bar{x}_\lambda \Delta_\lambda u_s(\rho_\lambda) \quad (3.58)$$

Výsledek této nejistoty může být pozitivní či negativní. Obdobně je pak vyjádřena nejistota o pro zbývající trichromatické složky Y ($u_s(Y)$) a Z ($u_s(Z)$). [110]

Kovariance mezi trichromatickými složkami je definována jako součin nejistot podle rovnice (3.38), tedy

$$u_s(X, Y) = u_s(X)v_s(Y) \quad (3.59)$$

Obdobně je pak vyjádřena kovariance mezi složkami YZ ($u_s(Y, Z)$) a XZ ($u_s(X, Z)$).

Mezi systematické složky chyb, které lze zahrnout při stanovování nejistoty spektrofotometrického měření patří background offset (offset pozadí), absolutní škálování (relativní), nelinearita nebo offset vlnové délky. [110]

3.8.3.2 Koefficienty citlivosti

Kolorimetrické souřadnice lze přímo získat ze získaných naměřených hodnot, a pro ně vyjádřit nejistotu. To je však z hlediska výpočtů nepřesné i nepraktické. Je proto doporučeno nejprve vypočítat hodnoty trichromatických složek XYZ a vyjádřit pro ně nejistoty, a teprve potom je rozšířit na další kolorimetrické souřadnice. [110]

Variančně-kovariační matice pro hodnoty trichromatických složek XYZ je dána [110]

$$\mathbf{U}_{XYZ} = \begin{bmatrix} u^2(X) & u(X, Y) & u(X, Z) \\ u(X, Y) & u^2(Y) & u(Y, Z) \\ u(X, Z) & u(Y, Z) & u^2(Z) \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Obecný tvar pro variančně-kovariační matici pro kolorimetrické souřadnice vycházející z rovnice (3.44) je dán

$$\mathbf{U}_{abc} = \mathbf{Q}_{abc} \mathbf{U}_{XYZ} \mathbf{Q}_{abc}^T \quad (3.61)$$

$$\mathbf{Q}_{abc} = \begin{bmatrix} \frac{\partial a}{\partial X} & \frac{\partial a}{\partial Y} & \frac{\partial a}{\partial Z} \\ \frac{\partial b}{\partial X} & \frac{\partial b}{\partial Y} & \frac{\partial b}{\partial Z} \\ \frac{\partial c}{\partial X} & \frac{\partial c}{\partial Y} & \frac{\partial c}{\partial Z} \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

kde \mathbf{Q}_{abc} je matice koeficientů citlivosti pro výstupní veličiny. [110]

Nejistota pro souřadnice xyY

Barevné souřadnice x, y jsou definovány

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (3.63)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (3.64)$$

pro následné výpočty je jmenovatel vyjádřen jako $T_{xy} = X + Y + Z$. [90]

Matice koeficientů citlivosti je dána [110]

$$\mathbf{Q}_{xyY} = \begin{bmatrix} \frac{Y+Z}{T_{xy}^2} & \frac{-X}{T_{xy}^2} & \frac{-X}{T_{xy}^2} \\ -\frac{Y}{T_{xy}^2} & \frac{X+Z}{T_{xy}^2} & \frac{-Y}{T_{xy}^2} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

Variančně-kovariační matice \mathbf{U}_{xyY} vychází z rovnice (3.61) [110]

$$\mathbf{U}_{xyY} = \mathbf{Q}_{xyY} \mathbf{U}_{XYZ} \mathbf{Q}_{xyY}^T \quad (3.66)$$

Nejistota pro souřadnice $L^*a^*b^*$

Výpočet souřadnic $L^*a^*b^*$ je proveden podle rovnic (2.30) – (2.32).

Matice koeficientů citlivosti vyjadřuje závislost $L^*a^*b^*$ na XYZ. Matice koeficientů citlivosti pro $L^*a^*b^*$ vypočtené pomocí troj-odmocninové transformace je dána [110]

$$\mathbf{Q}_{L^*a^*b^*} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{116}{3} Y_0^{-\frac{1}{3}} Y^{-\frac{2}{3}} & 0 \\ \frac{500}{3} X_0^{-\frac{1}{3}} X^{-\frac{2}{3}} & -\frac{500}{3} Y_0^{-\frac{1}{3}} Y^{-\frac{2}{3}} & 0 \\ 0 & \frac{200}{3} Y_0^{-\frac{1}{3}} Y^{-\frac{2}{3}} & -\frac{200}{3} Z_0^{-\frac{1}{3}} Z^{-\frac{2}{3}} \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

Variančně-kovarianční matice $\mathbf{U}_{L^*a^*b^*}$ pro $L^*a^*b^*$ je dána [110]

$$\mathbf{U}_{L^*a^*b^*} = \mathbf{Q}_{L^*a^*b^*} \mathbf{U}_{XYZ} \mathbf{Q}_{L^*a^*b^*}^T \quad (3.68)$$

3.9 Přesnost, preciznost a pravdivost měření

Při měření hodnot, ať už se jedná o barevné objekty, povrchy, hmotnost, aj. je cílem dosažení co možná nejvyšší/největší přesnosti výsledků. K jejich dosažení je nutné dodržovat podmínky pro dodržení přesnosti měření. V rámci hodnocení výsledků se setkáváme ještě s termínem pravdivost a správnost měření. [50, 112–118]

3.9.1 Přesnost měření

Přesnost je definována podle normy ČSN ISO 5725 jako: „Blížkost shody mezi výsledkem testu a referenční očekávané hodnoty.“ [113] Přesnost měření se zajišťuje kalibrací. Na přesnost měření mají vliv soustavné, systematické chyby. [108, 112–115] V některých zdrojích [108, 115, 119] se můžeme setkat s tím, že přesnost zahrnuje preciznost a pravdivost, tedy je ovlivněna systematickými i náhodnými chybami.

3.9.2 Preciznost měření

Preciznost je podle normy ČSN ISO 5725 definována jako: „Těsnost shody mezi nezávislými výsledky testu získanými za specifikovaných podmínek.“ [115]

Preciznost měření je možné popsat pomocí dvou veličin, a těmi jsou opakovatelnost měření (repeatability) a reprodukovatelnost měření (reproducibility). Preciznost měření je ovlivněna náhodnými chybami. Preciznost měření je nezávislá na přesnosti měření. Výsledky preciznosti měření se vyjadřují pomocí směrodatné odchylky. Čím větší je hodnota směrodatné odchylky, tím menší je preciznost měření. [106, 112–114]

3.9.2.1 Opakovatelnost měření

Opakovatelnost měření vyjadřuje těsnost shody mezi výsledky po sobě provedených měření jedné měřené veličiny uskutečněných za stejných podmínek měření neboli podle normy ČSN ISO 5725 – 1 jako: „Preciznost měření za podmínek opakovatelnosti měření.“ [106, 115]

Pro zajištění opakovatelnosti je nutné dodržet následující podmínky:

- a. *stejný postup měření.*
- b. *stejný pozorovatel nebo obsluha měřicího přístroje.*
- c. *stejný měřicí přístroj použitý za stejných podmínek.*
- d. *stejně místo.*
- e. *opakování v krátkém časovém intervalu.*

Opakovatelnost můžeme kvantitativně vyjádřit pomocí charakteristik rozptylu jakou je například směrodatná odchylka opakovatelnosti s_r (rovnice (3.71)). Směrodatná odchylka opakovatelnosti s_r je obvykle menší než výběrová směrodatná odchylka. [108, 112–115]

Aritmetických průměr \bar{x}_j pro jeden přístroj se vypočítá podle rovnice (3.69).

$$\bar{x}_j = \sum_1^n \frac{x_i}{n} \quad (3.69)$$

kde \bar{x}_j je aritmetický průměr pro j -tý měřicí přístroj, i označuje i -té měření na j -tém přístroji, n označuje celkový počet měření na j -tém přístroji.

Výběrová směrodatná odchylka s_j pro j -tý přístroj se počítá podle rovnice (3.70).

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,j} - \bar{x}_j)^2}{n}} \quad (3.70)$$

kde $x_{i,j}$ je i -té měření na j -tém přístroji, \bar{x}_j je aritmetický průměr pro j -tý měřicí přístroj, n je počet měření j -té laboratoře nebo na j -tém přístroji.

Směrodatná odchylka opakovatelnosti s_r vypočítaná pro všechny přístroje se vypočítá podle rovnice (3.71).

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^p s_j^2}{p}} \quad (3.71)$$

kde s_r je směrodatná odchylka opakovatelnosti, s_j je výběrová směrodatná odchylka pro j -tý přístroj, p je počet porovnávaných přístrojů.

3.9.2.2 Reprodukovatelnost měření

Reprodukovatelnost měření vyjadřuje blízkost shody mezi výsledky měření jedné měřené veličiny prováděné za změněných podmínek neboli podle normy ASTM E177 – 14 jako:

„Preciznost měření za podmínek reprodukovatelnosti měření.“ [106, 112–115] Mezi změněné podmínky lze zahrnout:

- a. *princip měření.*
- b. *metoda měření.*
- c. *pozorovatel.*
- d. *měřicí zařízení.*
- e. *referenční standard.*
- f. *místo.*
- g. *podmínky použití.*
- h. *čas.*

Reprodukovatelnost lze kvantitativně popsat pomocí charakteristik rozptylu jakou je například směrodatná odchylka reprodukovatelnosti s_R . Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti s_R zahrnuje směrodatnou odchylku opakovatelnosti s_r , směrodatnou odchylku pro danou laboratoř nebo přístroj s_j a příspěvek související s rozdíly mezi operátory, zařízeními nebo prostředími.

Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti s_R se vypočítá pro všechny přístroje podle rovnice (3.72).

$$s_R = \sqrt{(s_{\bar{x}})^2 + (s_r)^2 \cdot \frac{(n-1)}{n}} \quad (3.72)$$

kde s_r je směrodatná odchylka reprodukovatelnosti, $s_{\bar{x}}$ je směrodatná odchylka vypočtená z aritmetických průměrů (3.81), n je počet měření na každém přístroji. [115]

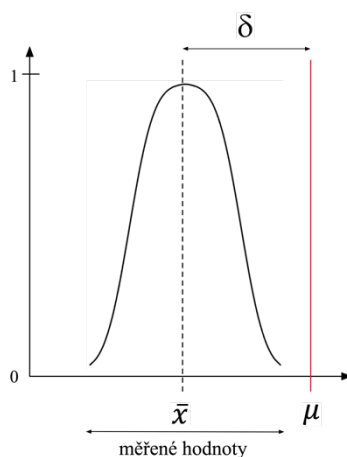
3.9.2.3 Pravdivost měření

Pravdivost měření (nebo také správnost) je podle normy ČSN ISO 5725 definována jako: „Blížkost shody mezi průměrem z výsledků měření a přijatou referenční hodnotou.“ [112–115] Pravdivost není změřitelná veličina, z toho důvodu ji nelze vyjádřit numericky. Nicméně je pravdivost brána jako nepřímá úměrná systematické chybě měření. [106, 108]

Pro stanovení odhadu systematické chyby měření se používá termín vychýlení δ (odchylka, bias). Vychýlení je definováno jako: „Rozdíl mezi střední hodnotou výsledků zkoušky a přijatou referenční hodnotou.“ [106, 108, 112–115]

$$\delta = \bar{x} - \mu \quad (3.73)$$

kde \bar{x} je průměr nebo střední hodnota výsledků zkoušky, μ je přijatá referenční hodnota. Grafické vyjádření vychýlení měření je vyobrazeno na *obrázku 3.11*.



Obrázek 3.11 – Vychýlení měření

3.9.3 Mandelova statistika konzistence

Pro hodnocení přesnosti a preciznosti měření je možné používat různé druhy statistik. V této práci bude k hodnocení přesnosti a preciznosti měření mimo jiné použita Mandelova statistika. [112] Mandelova statistika umožňuje identifikovat a popsat vybočující měření nebo přístroj z mezilaboratorního (zde mezipřístrojového) hodnocení. Mandelova statistika umožňuje porovnat přístroje a měření z různých laboratoří na základě vyjádření mezilaboratorní a vnitrolaboratorní statistiky konzistence. [119]

Mezi Mandelovu statistiku řadíme Mezilaboratorní statistiku konzistence h a vnitrolaboratorní statistiku konzistence k . Obě testové statistiky odpovídají standardní normě ČSN ISO 5725 [115] a z ní vycházející normě ASTM E691 pro mezilaboratorní analýzy přesnosti měření: „Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method.“ V této normě [112] jsou porovnávány výsledky několika laboratoří pro hodnocení množství glukózy v séru. [50, 108, 112, 115–120]

3.9.3.1 Vnitrolaboratorní statistika konzistence k

Vnitrolaboratorní statistika konzistence k (k – statistika) slouží k hodnocení opakovatelnosti měření v rámci laboratoře a vyjádření preciznosti oproti ostatním měřicím přístrojům. [112, 115, 119–121]

Pro výpočet k – statistiky je použita rovnice (3.74).

$$k_j = \frac{s_j}{s_r} \quad (3.74)$$

kde k_j je hodnota k – statistiky pro j -tý přístroj, s_j je výběrová směrodatná odchylka pro j -tý přístroj, s_r je směrodatná odchylka opakovatelnosti.

Hodnoty k – statistiky pro jednotlivé přístroje se mezi sebou porovnávají pomocí k – kritické hodnoty (rovnice (3.75)). Překročí-li hodnota k – statistiky hodnotu k – kritické hodnoty stanovené pro všechny přístroje, poukazuje to na fakt, že výsledky měření z daného přístroje mají nízkou preciznost a jsou vybočující. [115, 121]

$$k_{p,n;1-\alpha} = \sqrt{\frac{p}{1 + \frac{(p-1)}{F_{v_1,v_2;\alpha}}}} \quad (3.75)$$

kde F je hodnota z Fisher–Snedecorova rozdělení s $v_1 = (n - 1)$ a $v_2 = (p - 1) \cdot (n - 1)$ stupni volnosti a hladinou $\alpha = 0,005$, p je počet hodnocených laboratoří, respektive přístrojů.

Testování vybočujících hodnot nebo hodnot s nízkou precizností, jejichž hodnota k – statistiky je blízká k – kritické hodnotě se provádí testováním o blízkosti vnitrolaboratorních rozptylů jednotlivých přístrojů. K testování se používá Cochranův test. Jeho předpokladem je, že rozdíl mezi rozptyly jednotlivých přístrojů je malý. [108, 112, 119, 120]

3.9.3.2 Cochranův test

Cochranův test se používá pro testování vybočujících hodnot nebo hodnot s nízkou precizností. [115, 119, 120]

Testová statistika Cochranova testu je definována podle rovnice (3.76) jako:

$$C_{max} = \frac{s_{j,max}^2}{\sum_1^p s_j^2} \quad (3.76)$$

kde $s_{j,max}^2$ je hodnota nejvyššího výběrového rozptylu pro posuzované přístroje, s_j^2 je výběrový rozptyl j -tého přístroje, p je počet hodnocených přístrojů. [112, 115, 120]

Nulová hypotéza H_0 je testována pro rovnost výběrových rozptylů hodnocených přístrojů

$$H_0: s_1^2 = s_2^2 = \dots s_p^2,$$

oproti alternativě H_1 , kde minimálně jeden z výběrových rozptylů hodnocených přístrojů je odlišný od ostatních

$$H_1: s_1^2 \neq s_2^2 = \dots s_p^2.$$

Testování nulové hypotézy H_0 je provedeno pomocí kritické hodnoty $c_{p,n;1-\alpha}$.

$$c_{p,n;1-\alpha} \quad (3.77)$$

V případě, že hodnota $C_{max} \geq c_{p,n;1-\alpha}$ je nulová hypotéza H_0 zamítnuta. Hodnoty kritické hodnoty lze nalézt v dostupné literatuře. [112, 115, 119, 120]

3.9.3.3 Mezilaboratorní statistika konzistence h

Mezilaboratorní statistika konzistence h (h – statistika) se používá k vyjádření odchylky mezi naměřenými daty na jednom přístroji a zároveň k hodnocení přesnosti výsledků oproti ostatním přístrojům. Čím větší je hodnota h – statistiky, tím větší je odchylka, a tím je nižší přesnost oproti ostatním přístrojům. Hodnoty h – statistiky se symetricky rozprostírají okolo 0. [112, 115, 119, 120]

$$h_j = \frac{d_j}{s_{\bar{x}}} \quad (3.78)$$

kde

$$d_j = \bar{x}_j - \bar{\bar{x}} \quad (3.79)$$

$$\bar{\bar{x}} = \sum_1^p \frac{\bar{x}_j}{p} \quad (3.80)$$

$$s_{\bar{\bar{x}}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^p d_j^2}{p-1}} \quad (3.81)$$

kde h_j je h – statistika pro j -tý přístroj, d_j je rozdíl mezi průměrnou hodnotou ze všech aritmetických průměrů a aritmetickým průměrem pro j -tý přístroj, $\bar{\bar{x}}$ je průměrná hodnota spočítaná ze všech aritmetických průměrů jednotlivých přístrojů, p je počet porovnávaných přístrojů, \bar{x}_j je aritmetický průměr pro j -tý měřicí přístroj, $s_{\bar{\bar{x}}}$ je směrodatná odchylka vypočtená z aritmetických průměrů. [112, 115, 119, 120]

Hodnoty h – statistiky pro jednotlivé přístroje se mezi sebou porovnávají pomocí h – kritické hodnoty. Překročí-li hodnota h – statistiky kritické meze (kritickou hodnotu), výsledky pro přístroj jsou v porovnání s ostatními přístroji méně přesné. [112, 115, 119, 120]

$$h_j - \text{kritická} = \pm \frac{(p-1) \cdot t_{p-2; 1-\alpha/2}}{\sqrt{p \cdot (p-2 + t_{p-2; 1-\alpha/2}^2)}} \quad (3.82)$$

kde t je hodnota Studentova rozdělení s $p-2$ stupni volnosti a hladinou $\alpha = 0,005$, p je počet porovnávaných přístrojů.

Testování vybočujících hodnot nebo hodnot s nízkou přesností, jejichž hodnota h – statistiky je blízká h – kritické hodnotě se provádí pomocí Grubbsova testu odlehlých hodnot. [112, 115, 119, 120]

3.9.3.4 Grubbsův test odlehlých hodnot

Grubbsův test odlehlých hodnot se používá pro testování vybočujících hodnot nebo hodnot blízkých h – kritické hodnotě ve variantě jednostranné (one-sided test) nebo oboustranné (two-sided test). [112, 115, 119, 120]

Oboustranný Grubbsův test odlehlých hodnot

Oboustranný Grubbsův test odlehlých hodnot se používá na testování 1 vybočující odlehlé hodnoty. Takto vybočující hodnota je odstraněna a test je prováděn znovu, dokud není v souboru dat žádná vybočující hodnota. Opakované testování je však doporučeno pro soubory obsahující minimálně 6 hodnot.

Testová statistika oboustranného Grubbsova testu je definována podle rovnice (3.83):

$$G = \frac{\max_{i=1,\dots,n} (x_i - \bar{x})}{s_j} \quad (3.83)$$

Nulová hypotéza H_0 je testována pro případ, že mezi testovanými hodnotami není žádná odlehlá hodnota

$$H_0: x_1 = x_2 = \dots x_n,$$

oproti alternativě H_1 , kde je právě jedna odlehlá hodnoty mezi testovanými hodnotami

$$H_1: x_1 \neq x_2 = \dots x_n.$$

Nulová hypotéza H_0 je zamítnuta, pokud je testová statistika G větší než kritická hodnota G_C .

$$G_C = \frac{n-1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{t_{\left(\frac{\alpha}{2n}, n-2\right)}^2}{n-2 + t_{\left(\frac{\alpha}{2n}, n-2\right)}^2}} \quad (3.84)$$

kde $t_{\left(\frac{\alpha}{2n}, n-2\right)}$ je kritická hodnota ze Studentova t rozdělení s $n-2$ stupni volnosti a hladinou $\frac{\alpha}{2n}$.

Jednostranný Grubbsův test odlehlých hodnot

Testování odlehlých hodnot lze provést i pomocí jednostranného testu. Pro tento případ jsou data seřazena vzestupně. Podle toho, jestli za odlehlou považujeme nejmenší nebo největší hodnotu z tohoto souboru dat, použijeme následující testové statistiky (rovnice (3.85) a (3.86)).

Testová statistika Grubbsova testu pro jedno odlehlé pozorování je definována podle rovnice (3.85) pro případ, kdy považujeme za odlehlé pozorování nejmenší hodnotu.

$$G = \frac{\bar{x} - x_{min}}{s} \quad (3.85)$$

kde \bar{x} je aritmetický průměr, x_{min} je nejmenší hodnota ze vzestupně seřazeného souboru dat, s je směrodatná odchylka.

V případě, kdy za odlehlé pozorování považujeme největší hodnotu z testovaného souboru dat, je testová statistika definována podle rovnice (3.86).

$$G = \frac{x_{max} - \bar{x}}{s} \quad (3.86)$$

kde \bar{x} je aritmetický průměr, x_{max} je největší hodnota ze vzestupně seřazeného souboru dat, s je směrodatná odchylka.

Nulová hypotéza H_0 je jako u oboustranné alternativy testu testována pro případ, že nejmenší, respektive největší z hodnot není odlehlá oproti alternativě H_1 , že nejmenší, respektive největší z hodnot je odlehlá.

Testování nulové hodnoty H_0 je prováděno pomocí kritické hodnoty G_C podle rovnice (3.84) s tím rozdílem, že hladina významnosti je rovna $\frac{\alpha}{(n)}$. V případě, že testová statistika G je větší než kritická hodnota G_C , je H_0 zamítnuta.

3.10 Určování chyb při spektrofotometrických měřeních

Pro zajištění přesnosti měření je nutné zjistit, které systematické chyby, a jak tyto chyby ovlivňují měření na jednotlivých přístrojích. V případě spektrofotometrických měření může nastat několik typů systematických chyb, tj. například chyba určení nulového odrazu (offset), chyba určení fotometrické linearity, chyba určení vlnové délky, chyba určení šířky spektrálního pásu, chyba určení fotometrické nelinearity. [7, 50, 103, 116–118, 122–126]

Pro zjištění velikosti jednotlivých systematických chyb je možné použít vícenásobnou regresi (multiple regression), díky které je možné stanovit podíl a velikost těchto chyb ve

výsledné hodnotě spektrálního činitele odrazu ρ_λ (difúzní) nebo β_λ (úhlová). Velikost těchto chyb (diagnostika chyb) se stanovuje mezi tzv. referenčním přístrojem (vztažným přístrojem) a posuzovaným/porovnávaným přístrojem. [50, 103, 116–118, 123]

Ke stanovení těchto chyb se používá následující rovnice (3.87).

$$\rho_0(\lambda) = \beta_0 + \beta_1 \rho_t(\lambda) + \beta_2 \frac{d\rho_t(\lambda)}{d\lambda} + \beta_3 \frac{d^2\rho_t(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (3.87)$$

kde $\rho_0(\lambda)$ je korigovaná hodnota spektrálního činitele odrazu, $\rho_t(\lambda)$ je měřená hodnota spektrálního činitele odrazu, β_0 je nejistota určení černé, β_1 je nejistota určení fotometrické lineariry, β_2 je nejistota určení vlnové délky, β_3 je nejistota určení šířky spektrálního pásu, $\frac{d\rho_t(\lambda)}{d\lambda}$ je první derivace měřené hodnoty spektrálního činitele odrazu podle vlnové délky a $\frac{d^2\rho_t(\lambda)}{d\lambda^2}$ je druhá derivace měřené hodnoty spektrálního činitele odrazu podle vlnové délky.

3.10.1 Chyba určení nulového odrazu

Chyba určení nulového odrazu (princiálně se jedná o chybu v nastavení v offsetu) způsobuje posunutí celé fotometrické stupnice. Je způsobena rozptýleným světlem spojeným se vstupní optikou nebo ignorováním tzv. černého proudu detektoru. [50, 103, 116–118, 123]

$$\rho_0(\lambda) = \rho_t(\lambda) + \beta_0 \quad (3.88)$$

kde $\rho_0(\lambda)$ je korigovaná hodnota spektrálního činitele odrazu, $\rho_t(\lambda)$ je měřená hodnota spektrálního činitele odrazu, β_0 je chyba určení nulového odrazu.

3.10.2 Chyba určení fotometrické lineariry

Chyba určení fotometrické lineariry je chyba úměrná měření činitele spektrálního odrazu. Důvodem vzniku této chyby může být nesprávná kalibrace bílým standardem zapříčiněná fyzickou změnou standardu vlivem používání nebo odchylka detektoru od lineární odezvy. [50, 103, 116–118, 123]

$$\rho_0(\lambda) = \rho_t(\lambda) + \beta_1 \cdot \rho_t(\lambda) \quad (3.89)$$

kde $\rho_0(\lambda)$ je korigovaná hodnota spektrálního činitele odrazu, $\rho_t(\lambda)$ je měřená hodnota spektrálního činitele odrazu, β_1 je chyba určení fotometrické linearit.

3.10.3 Chyba určení vlnové délky

Chyba určení vlnové délky je chyba v hodnotě spektrálního činitele odrazu v důsledku posunu v měřítku vlnových délek. Je přibližně úměrná první derivaci spektrálního činitele odrazu. [50, 103, 116–118, 123]

$$\rho_0(\lambda) = \rho_t(\lambda) + \beta_2 \frac{d\rho_t(\lambda)}{d\lambda} \quad (3.90)$$

kde $\rho_0(\lambda)$ je korigovaná hodnota spektrálního činitele odrazu, $\rho_t(\lambda)$ je měřená hodnota spektrálního činitele odrazu, β_2 je chyba určení vlnové délky.

3.10.4 Chyba určení šířky spektrálního pásu

Pokud se spektrální šířka pásma mění s vlnovou délkou nebo pokud je šířka pásma příliš velká (linearita nasvícení detektoru, šířka štěrbiny), může nastat chyba ve výsledné naměřené hodnotě spektrálního činitele odrazu. Za předpokladu symetrické šířky pásma je výsledná chyba přibližně aproximována jako druhá derivace spektrálního činitele odrazu vzhledem k vlnové délce. [50, 103, 116–118, 123]

$$\rho_0(\lambda) = \rho_t(\lambda) + \beta_3 \frac{d^2\rho_t(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (3.91)$$

kde $\rho_0(\lambda)$ je korigovaná hodnota spektrálního činitele odrazu, $\rho_t(\lambda)$ je měřená hodnota spektrálního činitele odrazu, β_3 je chyba určení šířky spektrálního pásu.

IV. Použité metody

4. Příprava barevných center

4.1 Materiál

Pro experimentální část disertační práce, respektive pro část tvořenou vizuálními experimenty a část zabývající se popisem barevného vzhledu při různých adaptačních úrovních jasů, bylo potřebné připravit sadu barevných textilních vzorků pomocí kterých bude mapován barevný prostor. Pro testování byl zvolen textilní materiál značky Dralon® (polyakrylonitril). Vlastnosti zvoleného materiálu jsou uvedeny v *tabulce 4.1*.

Tabulka 4.1 – Vlastnosti použitého textilního materiálu

Materiál	Dralon®
Struktura	plátno
Plošná hmotnost (g. cm ⁻²)	220
Dostava osnovy (počet nití. 10 cm ⁻¹)	325
Dostava útku (počet nití. 10 cm ⁻¹)	140
Tloušťka (mm)	0,58

Polyakrylonitril byl zvolen pro barvení koncentračních řad a barevných vzorků pro možnost obarvení kationtovými (bazickými) barvivy, která umožňují dosažení vysoce čistých odstínů.

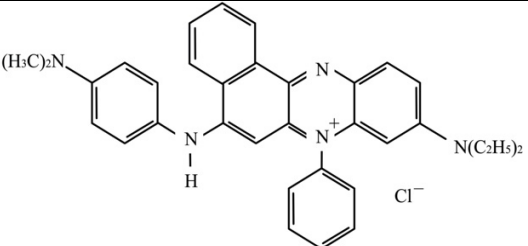
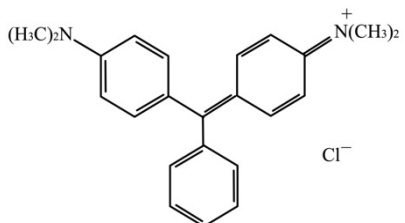
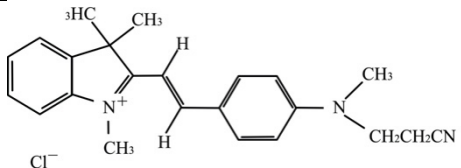
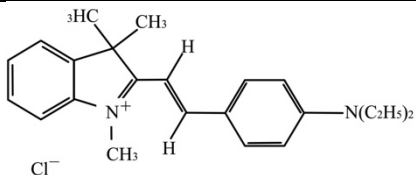
4.2 Metody

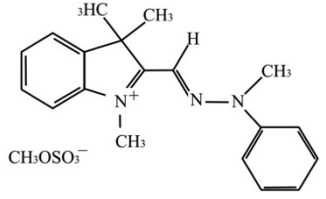
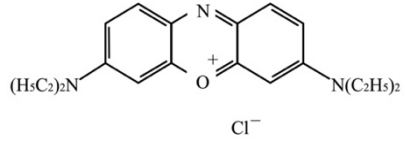
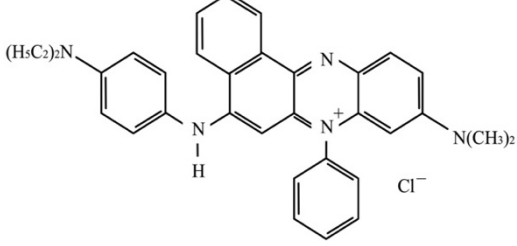
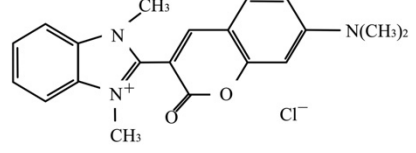
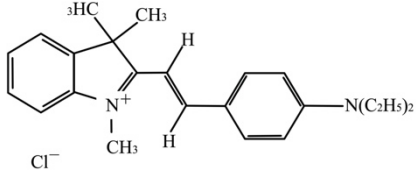
4.2.1 Příprava vzorků I

První částí přípravy vzorků byla příprava barevní a následné vybarvení koncentračních řad dostupných kationtových barviv. Jak bylo zmíněno výše, kationtová barviva byla vybrána jednak pro svoje vlastnosti dosáhnout při vybarvení vysoce čistých odstínů, ale také proto, že mají vysoké stálosti na světle. Dostupná barviva použitá v této disertační práci byla dodána firmami Huntsman International LLC (dále Huntsman) a DyStar Textilfarben GmbH & Co. Deutschland KG (dále DyStar).

Dostupná kationtová barviva použitá v této práci jsou uvedena pod Colour indexovým číslem v *tabulce 4.2* společně s chemickou strukturou a jejich kombinačním číslem.

Tabulka 4.2 – Vlastnosti a chemická struktura kationových barviv

Colour Index	Chemická struktura	Forma	Kombinační číslo	Obchodní název barviva	Zkratka
C. I. Basic Blue 14		prášková	3	Astrazon® Blue F2RL 200%	AB
C. I. Basic Green 4		prášková	3	Astrazon® Green M	AG
C. I. Basic Red 14		tekutá	3	Astrazon® Brilliant Red 4G liq 200%	AR
C. I. Basic Violet 16		prášková	1,5	Astrazon® Red Violet 3RN	ARV

C. I. Basic Yellow 51		prášková	3	Astrazon® Yellow 5GL 200%	AY
C. I. Basic Blue 3		prášková	3,5	Maxilon® Blue 5G EC 300%	MB5
C. I. Basic Blue 145		tekutá	2,5	Maxilon® Blue TRL LIQ.	MBT
C. I. Basic Yellow 40		prášková	3,5	Maxilon® Flavine 10 GFF 300%	MF
C. I. Basic Violet 16		tekutá	1,5	Maxilon® Red 2B-01 LIQ.	MR

V *tabulce 4.2* se nacházejí dvě barviva se stejnou chemickou strukturou, která se od sebe odlišují tím, že jsou dodávána každé v jiné formě. Jedná se o barviva s označením C. I. Basic Violet 16 a C. I. Basic Blue 14/ C. I. Basic Blue 145.

Koncentrační řady vybraných barviv byly připraveny podle Ostwaldovy metody rovnoměrného škálování. Koncentrace barviv použitých v této disertační práci jsou uvedeny v *tabulce 4.3*.

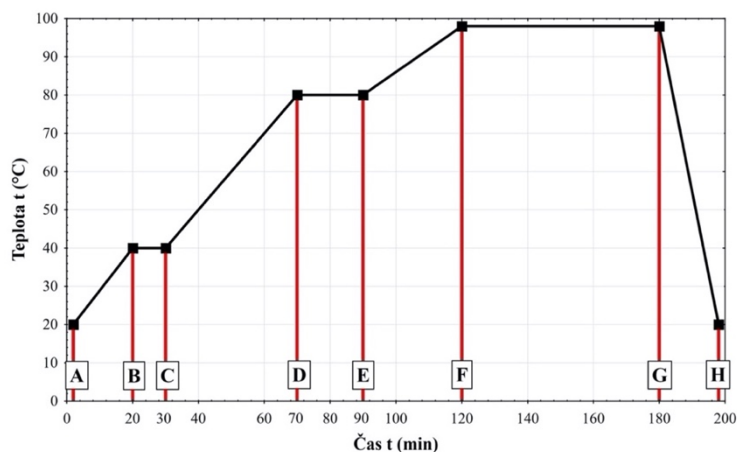
Tabulka 4.3 – Koncentrační řada kationtových barviv

Označení	a	c	e	g	i	l
Koncentrace (%)	89	56	35	22	14	8,9

4.2.2 Příprava vzorků II a přístrojové vybavení

K barvení vzorků bylo použito barvicí zařízení Multicolor Pretema, systém Ellner se 6 barvicími místy, typ 311.

Při barvení koncentračních řad a vzorků byl dodržen barvicí postup (*obrázek 4.1*) vycházející z doporučení výrobců barviv.



Obrázek 4.1 – Barvicí postup použitý při barvení vzorků –

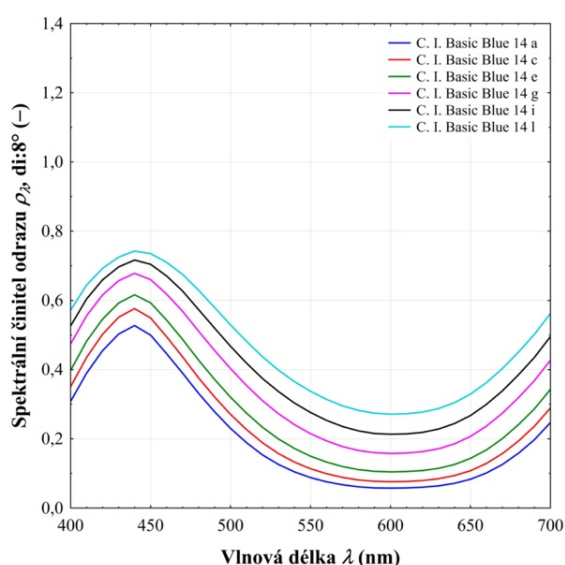
- A. Vložení vzorků o hmotnosti přibližně 6 g do kovových patron, které byly následně umístěny do skleněných kapslí a zality 320 ml destilované vody.
- B. Po dosažení nastavené teploty lázně 40 °C byl do lázně přidán retardační a migrační prostředek TINEGAL® BDR a TINEGAL® M a kyselina octová.
- C. Po uplynutí doby 10 minut, při které byla lázeň udržována při teplotě 40 °C, byla lázeň postupně ohřáta na teplotu 80 °C.
- D. Při dosažení teploty 80 °C bylo do lázně přidáno barvivo požadované koncentrace, a takto kompletní lázeň byla po dobu 20 minut ponechána při stávající teplotě.

- E. Po 20 minutách byla lázeň postupně zahřívána na teplotu 98 °C.
- F. Po dosažení požadované teploty 98 °C byl nastaven odpočet 60 minut, po dobu kterých došlo k vytažení barviva z lázně, a tedy k obarvení vzorku.
- G. Po uplynutí nastaveného času 60 minut byla barvicí lázeň ochlazena na teplotu 20 – 25 °C.
- H. Vzorky byly po vytažení z lázně a z patrony vyprány v roztoku Syntaponu ABA (1 g.L⁻¹) a ponechány uschnout při laboratorních podmínkách (22 – 25 °C a 55 – 60 % relativní vlhkosti).

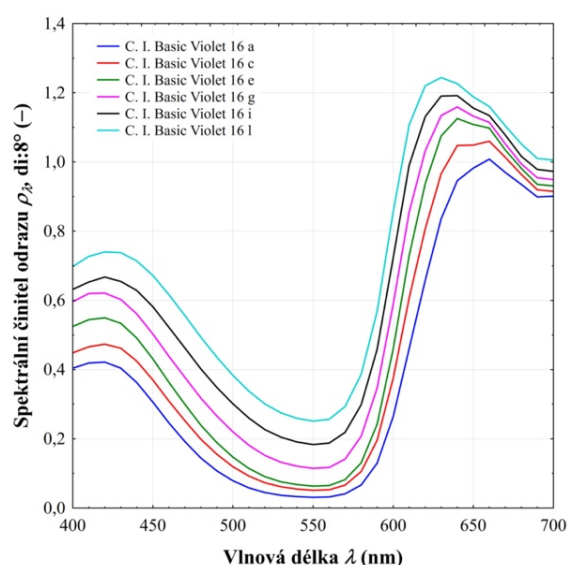
4.2.3 Příprava vzorků III

Před měřením byl vzorek ponechán minimálně 2 dny při laboratorních podmínkách a následně změřen. K měření byl použit přístroj spektrofotometr Datacolor Spectraflash 600 Plus (3926) s nastavením di:8°. Získaná data spektrálního činitele odrazu ρ_λ byla poté použita pro výpočet barevných souřadnic a barevné odchylky ΔE^* v prostoru barev CIELAB a současně byla tato data zanesena do databáze pro následnou přípravu receptur pro finální barvení vzorků použitých při vizuálním experimentu.

Na *obrázku 4.2* a *4.3* jsou ukázány 2 koncentrační řady barviv C. I. Basic Blue 14 a C. I. Basic Violet 16.



Obrázek 4.2 – koncentrační řada C. I. Basic Blue

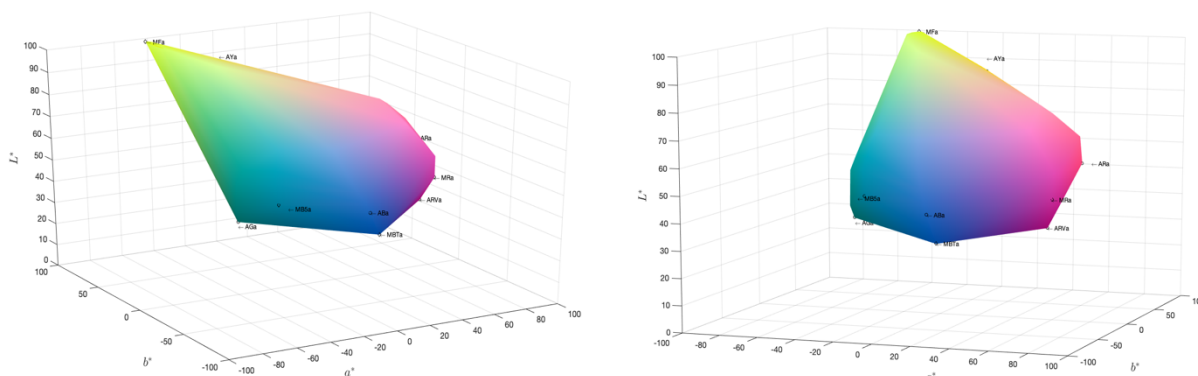


Obrázek 4.3 – koncentrační řada
C. I. Basic Violet 16

14

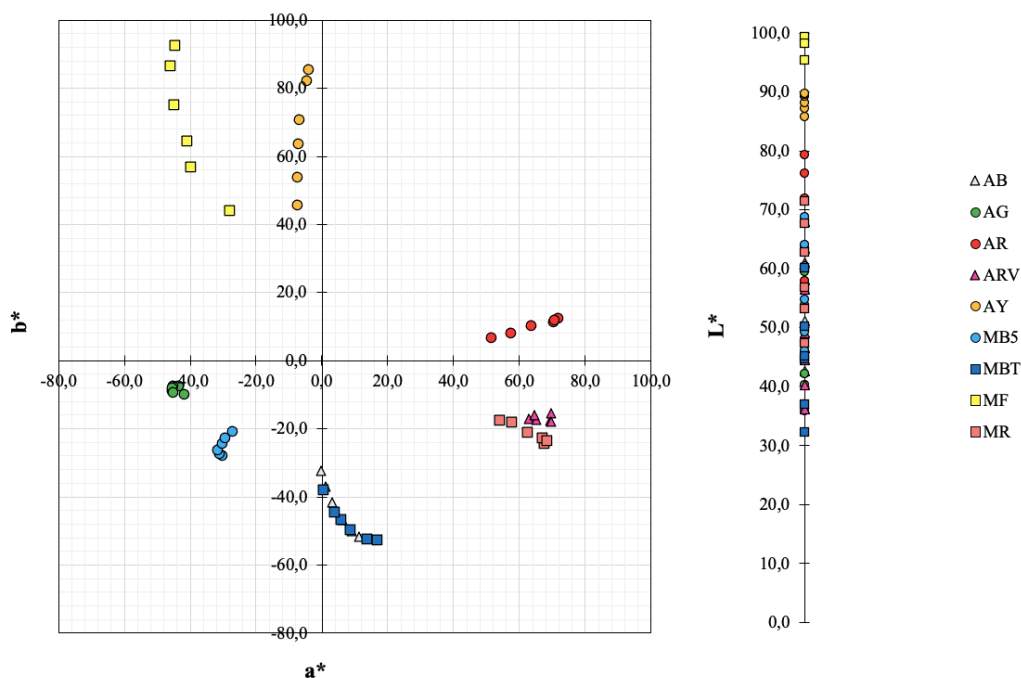
4.2.4 Příprava vzorků IV

Změřením koncentračních řad byl vytvořen prostor dosažitelných barev (gamut) se vzorky s vysoce čistými odstíny (*obrázek 4.4*). Tento prostor definuje všechny vzorky (jejich pozice), které je možné připravit kombinací těchto barviv.



Obrázek 4.4 – Prostor dosažitelných barev vytvořený koncentračními řadami – pohled zepředu a pohled z boku

K přípravě receptur byl použit program Datacolor® MATCH TEXTILE. Před započítím výpočtů receptur byly do interní paměti programu nahrány informace o materiálu (substrát), jeho složení, výrobci, o typu barviv, hodnoty koncentrací a naměřená data ze spektrofotometru pro jednotlivé koncentrační řady. Pozice vzorků tvořících koncentrační řady je zobrazena na *obrázku 4.5* na chromatické ploše a^*b^* společně s hodnotami jejich měrné světlosti L^* .



Obrázek 4.5 – Pozice vzorků koncentračních řad v prostoru barev CIELAB

Při měření koncentračních řad byla správnost vybarvení jednotlivých vzorků koncentračních řad kontrolována pomocí vyjádření závislosti Kubelka–Munkovy funkce $\frac{K}{S}$ pro remisní minimum

každého barviva. Při správném vybarvení koncentračních řad jsou hodnoty Kubelka–Munkovy funkce pro dominantní vlnovou délku lineárně závislé na koncentraci barviva.

Cílem receptování bylo získat takovou kombinaci barviv s co možná nejmenší predikovanou hodnotou barevné odchylky ΔE^* mezi „imaginárním“ vzorkem (předloha) z vytvořeného gamutu a recepturou navrhovanou pro barvení. Předpokladem dosažení tohoto cíle je volba receptur s menším počtem barviv (optimálně 3 barviva). Pomocí výše uvedeného postupu a s pomocí softwaru byla následně připravena barevná centra.

V následující *tabulce 4.4* je uvedena receptura pro vzorek o hmotnosti 6 g z modrého barevného centra. Pro vybarvení vzorku z modrého centra s označením modra 8e5 byla použita kombinace tří barviv (modrého, zeleného a červeného). Kombinační číslo všech tří použitých barviv je stejné, čímž bylo zajištěno to, že se barviva budou z lázně vytahovat stejně rychle.

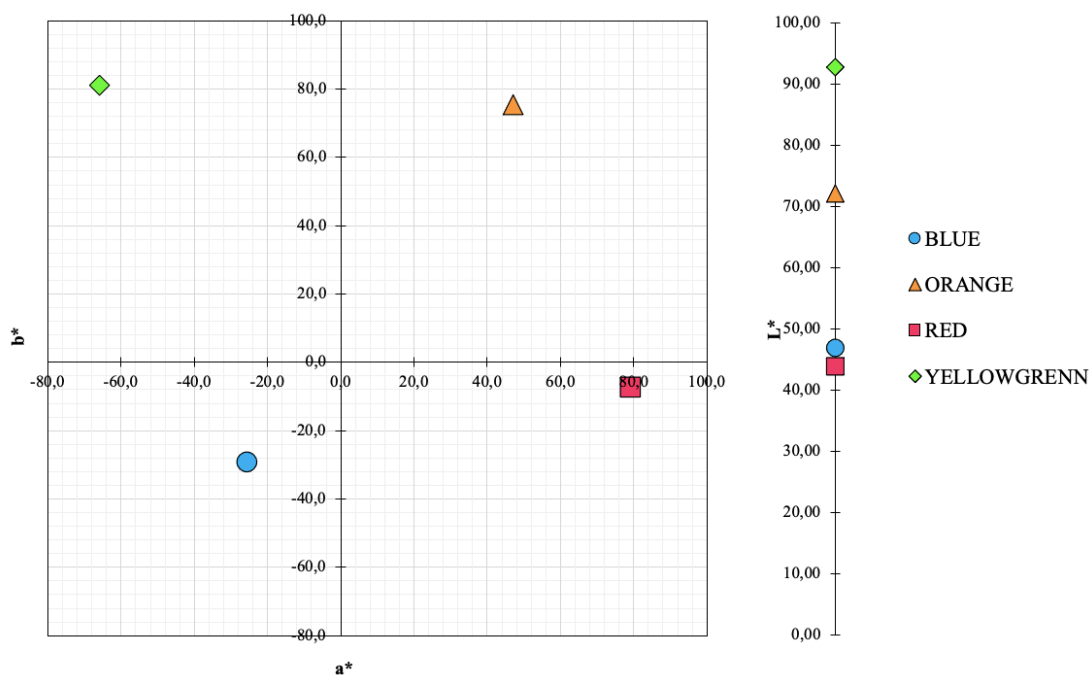
Tabulka 4.4 – Vzorová receptura pro vzorek z modrého barevného centra

Použitá barviva a chemikálie	Koncentrace
C. I. Basic Blue 3	0,1842 %
C. I. Basic Green 4	0,0184 %
C. I. Basic Red 14	0,0070 %
kyselina octová	10 g·L ⁻¹
Tinegal® M	1 g·L ⁻¹
Tinegal® BDR	1 g·L ⁻¹

Pro zajištění kyselého pH barvicí lázně byla použita kyselina octová, čímž bylo zlepšeno vytažení barviva z lázně a zároveň zajištění stability použitých barviv. Migrační a retardační prostředky byly použity pro zajištění egalizace vybarvení pomocí ustálenějšího vytahování barviva z lázně.

4.2.5 Příprava vzorků V – Barevná centra

Barvením vzorků a pomocí informací o koncentračních řadách byla připravena 4 vysoce chromatická barevná centra, která odpovídají čtyřem z pěti barevných center definovaných podle CIE, a to barevná centra s označením BLUE (B), ORANGE (O), RED (R) a YELLOWGREEN (YG). Na *obrázku 4.7* jsou zobrazeny středy zvolených center na chromatické ploše a^*b^* společně s hodnotami jejich měrné světlosti L^* .



Obrázek 4.7 – Pozice středů zvolených barevných center v prostoru barev CIELAB

Z obrázku 4.7 vyplývá, že zvolená barevná centra jsou blízká pozici vzorků tvořících koncentrační řady, respektive jsou blízká pozici základního použitého barviva. Pro centrum yellowgreen bylo základní použité barvivo C. I. Basic Yellow 40, pro centrum red barvivo C. I. Basic Violet 16, pro centrum orange C. I. Basic Yellow 40 a C. I. Basic Red 14 a pro centrum blue barvivo C. I. Basic Blue 3.

V tabulce 4.5 jsou uvedeny hodnoty chroma C^* a úhlu barevného tónu h_{ab} pro čtyři barevná centra. Pozice vzorků vůči středu barevného centra byla přibližně uniformní.

Tabulka 4.5 – Barevné souřadnice barevných center

Centrum	h_{ab}	C^*
O	63°	90
YG	126°	96
B	229°	39
R	354°	79

4.2.6 Příprava vzorků VI

Posledním krokem byla finální adjustace vzorků do třívrstvého sendviče zpevněného polyethylenovou tenkou fólií při teplotě 175 °C. Takto připravený sendvič byl upevněn na tvrdý karton z důvodů lepší manipulace při měření a hodnocení vzorků.

Všechny vzorky byly připraveny ve čtyřech sadách, aby bylo možné v případě poškození vzorky vyměnit.

4.2.7 Příprava vzorků VII

V rámci dalšího kroku bylo z barevných center vybráno několik barevných párů, které byly použity při vizuálních experimentech pro popis barevného vzhledu při různých úrovních adaptačního jasu. Barevné páry byly vybrány na základě odchylek v úhlu barevného tónu, chroma a světlosti.

Vybrané barevné páry byly vybrány tak, aby druhá mocnina podílu mezi odchylkou v úhlu barevného tónu ΔH^* , chroma ΔC^* nebo světlosti ΔL^* a celkovou barevnou odchylkou ΔE^* byla oproti dvěma ostatním dvěma odchylkám majoritní.

Kontrolním pravidlem při výpočtu těchto podílů bylo, že součet druhých mocnin všech tří odchylek musel být vždy roven 100 %.

Na základě tohoto bylo ustanoveno 18 barevných párů pro každé barevné centrum. Z toho vždy 6 párů s odchylkou v úhlu barevného tónu ΔH^* , chroma ΔC^* a světlosti ΔL^* . Celkem bylo vybráno 72 barevných párů, které jsou vypsány v příloze v následujících *tabulkách P1.1 – P1.4*. Hodnoty pro odchylky v úhlu barevného tónu ΔH^* a celkovou barevnou odchylkou ΔE^* jsou uvedeny v procentech a jsou vypočteny podle *rovnice 4.1*

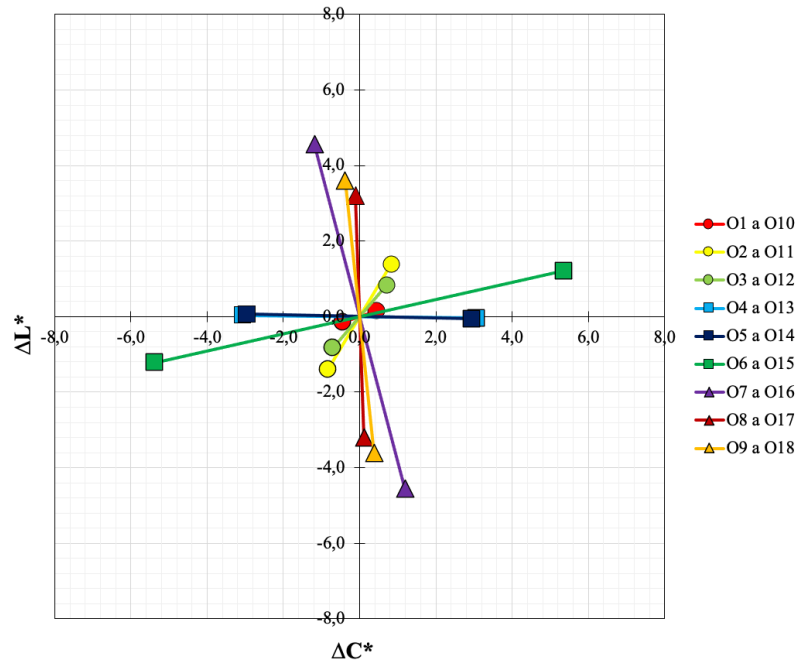
$$\left(\frac{\Delta H^*}{\Delta E^*}\right)^2 \times 100 \% \quad (4.1)$$

kde ΔH^* je odchylka v úhlu barevného tónu, ΔE^* je celková barevná odchylka. Obdobně jsou vypočteny i podíly pro odchylky v chroma ΔC^* a světlosti ΔL^* .

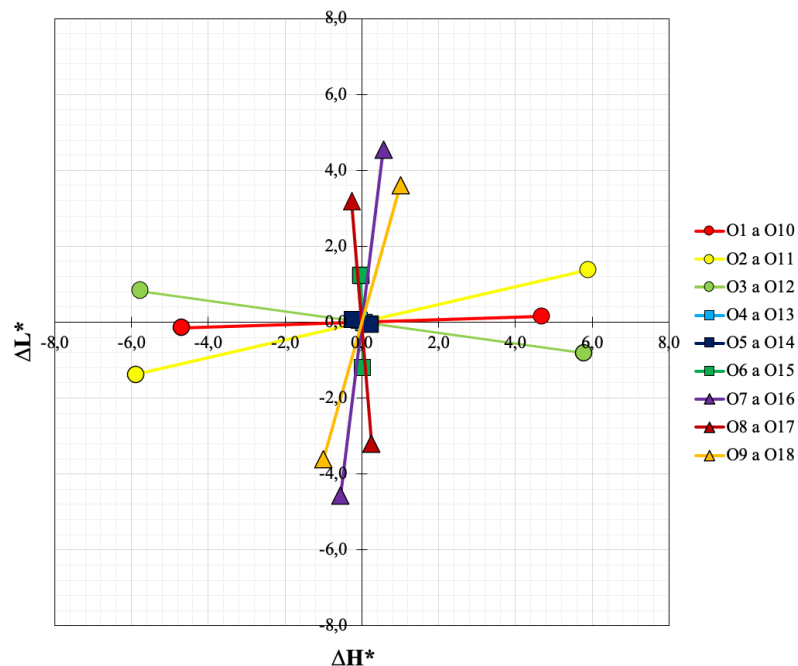
Na *obrázcích 4.8 – 4.10* se nacházejí grafy vyjadřující odchylky ve světlosti ΔL^* , chroma ΔC^* a úhlu barevného tónu ΔH^* pro centrum orange. Páry s majoritní odchylkou ve světlosti ΔL^* jsou zvýrazněny značkou trojúhelníku, páry s majoritní odchylkou v chroma ΔC^* jsou zvýrazněny značkou čtverce a páry s majoritní odchylkou v úhlu barevného tónu ΔH^* jsou označeny značkou kruhu.

Na *obrázku 4.8* se nachází graf vyjadřující závislost mezi odchylkou ve světlosti ΔL^* a odchylkou v chroma ΔC^* . Na grafu je možné vidět páry mající majoritní odchylkou ve světlosti ΔL^* (páry O7 až O9, O16 až O18) a majoritní odchylku v chroma ΔC^* (páry O4 až O6, O13 až O15). Na *obrázku 4.9* se nachází graf vyjadřující závislost mezi odchylkou ve světlosti ΔL^*

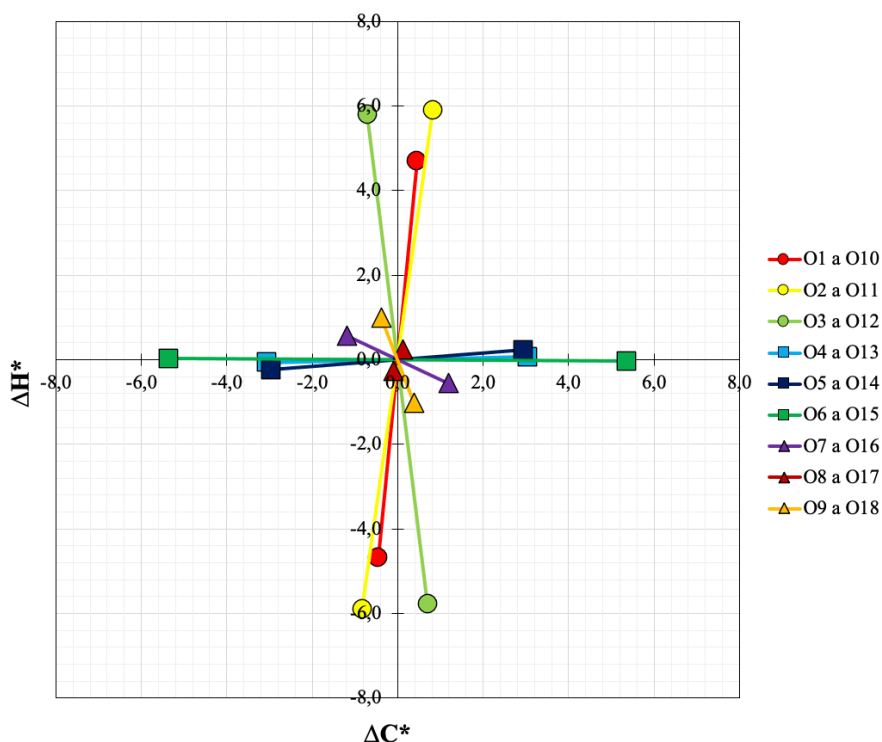
a odchylkou v úhlu barevného tónu ΔH^* . Na grafu je možné vidět majoritní odchylky ve světlosti ΔL^* u barevných párů O7 až O9 a O16 až O18 a majoritní odchylky v úhlu barevného tónu u barevných párů O1 až O3 a O10 až O12. Na *obrázku 4.10* se nachází graf vyjadřující závislost mezi odchylkou v úhlu barevného tónu ΔH^* a odchylkou v chroma ΔC^* . Na grafu je možné vidět majoritní odchylky v úhlu barevného tónu ΔH^* u barevných párů O1 až O3 a O10 až O12 a majoritní odchylky v čistotě u barevných párů O4 až O6 a O13 až O15.



Obrázek 4.8 – Pozice barevných párů centra orange vyjádřená odchylkami ΔL^* a ΔC^*



Obrázek 4.9 – Pozice barevných párů centra orange vyjádřená odchylkami ΔL^* a ΔH^*



Obrázek 4.10 – Pozice barevných párů centra orange vyjádřená odchylkami ΔH^* a ΔC^*

Hodnoty všech odchylek doplněných o hodnoty barevných odchylek pro všechny barevné páry z centra orange jsou uvedeny v příloze v *tabulce P1.2*. U všech barevných párů byla vždy snaha, aby majoritní odchylka byla vždy vyšší než 90 %.

Výjimku tvoří páry s označením R6 a R15, jejichž majoritní odchylka v chroma ΔC^* je rovna 88 % a páry s označením R8 a R17, jejichž majoritní odchylka ve světlosti ΔL^* je rovna 83 %. Toto kritérium bylo u všech ostatních barevných párů ve všech barevných centrech dodrženo, a to tak, že vyjma výše jmenovaných barevných párů měly všechny zbývající barevné páry majoritní odchylky vyšší nebo rovné 90 %. V případě, že by se nepodařilo z dostupných vzorků vytvořit barevné páry tak, aby bylo dodrženo vybrané pravidlo o výši majoritní odchylky vyšší než 80 %, byly by vybrány páry tak, aby majoritní odchylka byla, co možná nejvyšší a hodnotící pozorovatelé by byly u takového páru informováni, kterou z odchylek mají hodnotit.

Celkově lze však na základě hodnocení říct, že nejlépe se pozorovatelům hodnotily vzorky s odchylkou ve světlosti ΔL^* , a to bez ohledu na úroveň adaptačního jasu. Naopak s většími obtížemi hodnotili pozorovatelé odchylky v úhlu barevného tónu ΔH^* .

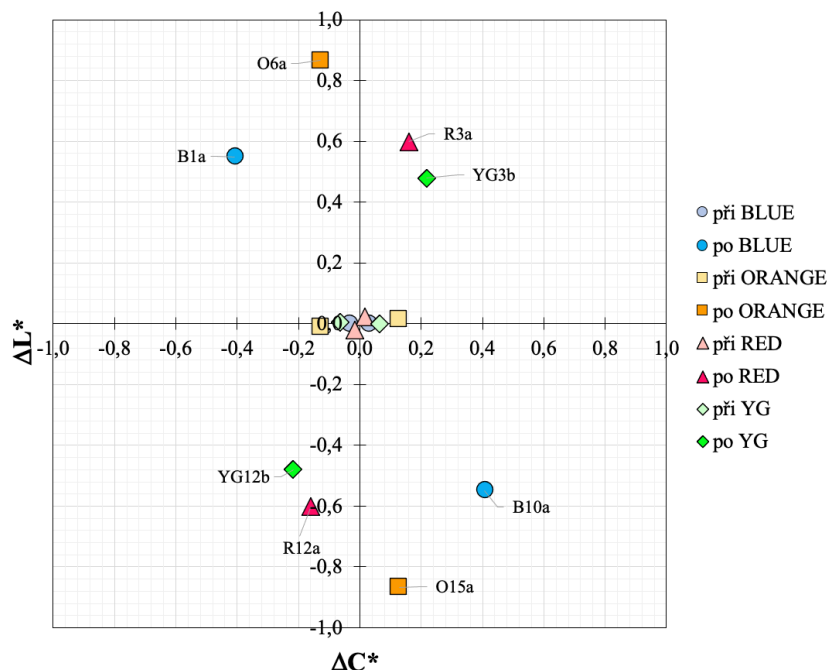
Grafy vyjadřující odchylky pro barevné páry barevných center blue, red a yellowgreen jsou uvedeny v příloze na *obrázcích P1.1 – P1.9*. Pro každé barevné centrum jsou vloženy tři grafy, které vyjadřují závislost mezi odchylkou ve světlosti ΔL^* a odchylkou v chroma ΔC^* , mezi

odchylkou ve světlosti ΔL^* a odchylkou v úhlu barevného tónu ΔH^* a odchylkou v úhlu barevného tónu ΔH^* a odchylkou v chroma ΔC^* .

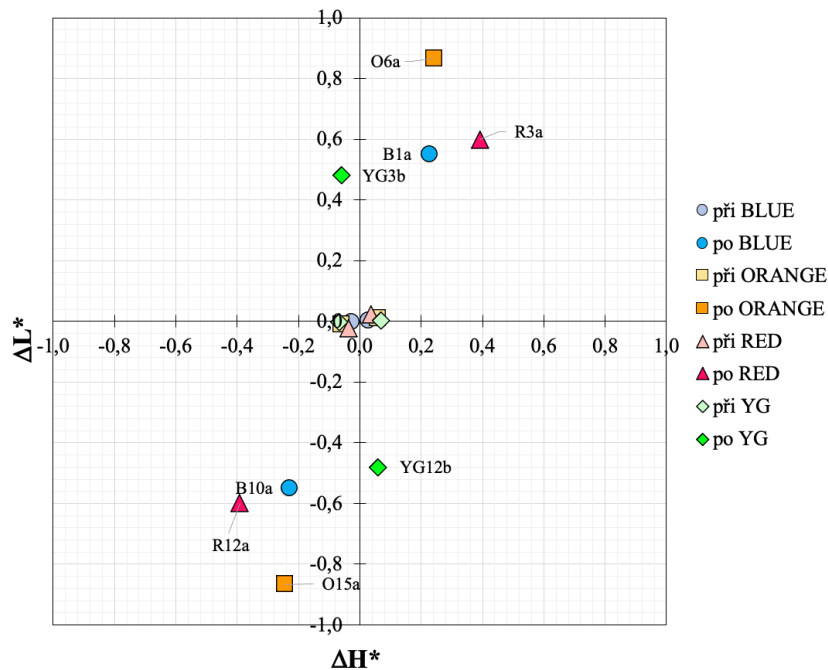
V příloze v *tabulkách P1.1 – P1.4* jsou uvedeny zvolené barevné páry se zvýrazněním majoritní odchylky ΔH^* , ΔC^* nebo ΔL^* . Všechny hodnoty v *tabulkách P1.1 – P1.4* jsou vztaženy k nejvyšší úrovni adaptačního jasu $L_A = 371 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Zelené zvýraznění odpovídá majoritní odchylce v úhlu barevného tónu ΔH^* , oranžové odchylce v chroma ΔC^* a fialové odchylce ve světlosti ΔL^* .

4.3 Kontrola stálosti vybraných barevných párů

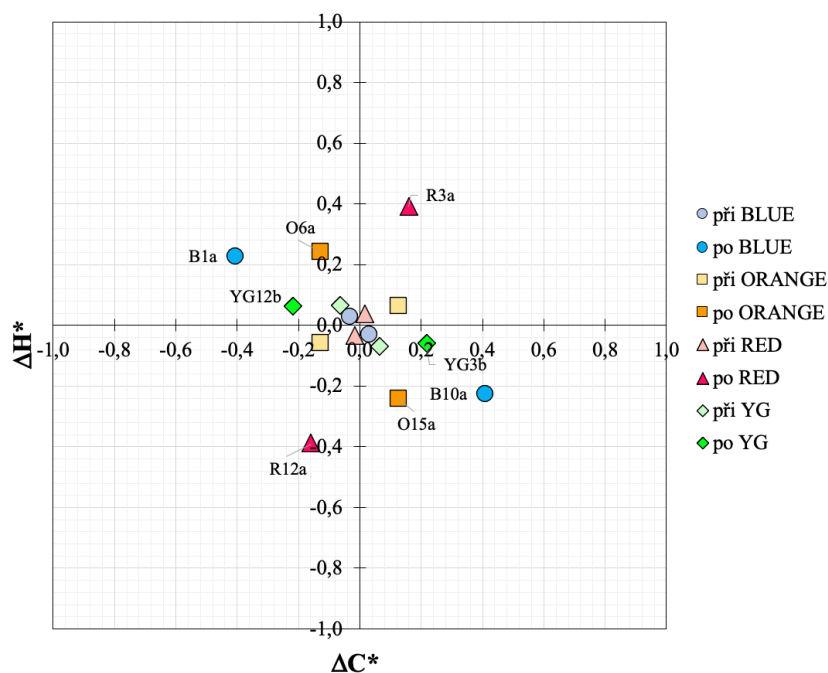
Vlivem manipulace během vizuálních hodnocení může dojít k poškození vzorků, které může ovlivnit následné hodnocení pozorovatelů. V rámci vizuálních hodnocení tak byly vzorky opakovaně měřeny z důvodů kontroly stálosti barevného vzhledu. V případě, že by došlo k takovému poškození vzorků, které by výrazně ovlivnilo vizuální hodnocení, bylo by možné vzorek vyměnit za vzorek totožný z náhradní sady vzorků a do dalších výpočtů vložit data pro nový vzorek. Pro ověření a kontrolu stálosti barevného vzhledu barevných párů byl použit spektrofotometr X-Rite ERX30 s úhlovou měřicí geometrií $45^\circ\text{c}:0^\circ$. Vzorky byly změřeny opakovaně celkem třikrát, a to na začátku hodnocení, během probíhajících vizuálních experimentů (při) a po skončení vizuálních experimentů (po). Výsledky třech opakovaných měření jsou zobrazeny na následujících *obrázcích 4.11 – 4.13*.



Obrázek 4.11 – Pozice vzorků s nejvyššími změnami vyjádřená odchylkami ΔL^* a ΔC^*



Obrázek 4.12 – Pozice vzorků s nejvyššími změnami vyjádřená odchylkami ΔL^* a ΔH^*



Obrázek 4.13 – Pozice vzorků s nejvyššími změnami vyjádřená odchylkami ΔH^* a ΔC^*

Opakovaným měřením bylo zjištěno, že mezi měřením v průběhu experimentu (při) a před jeho začátkem (před) byla maximální hodnota barevného rozdílu ΔE^* rovna 0,33. Nejvyšší rozdíly byly vypočteny pro centrum red. Maximální hodnota barevného rozdílu ΔE^* mezi měřením provedeným před a po skončení (po) experimentu byla rovna 0,91. Největší změny byly vypočteny pro centrum orange. Změna rozdílu především po skončení hodnocení byla způsobena manipulací

vzorků během hodnocení, a také tím, že byly dlouhodobě vystaveny osvětlení používanému během vizuálních hodnocení.

Nejvýrazněji ovlivněna byla světlost vzorků, jak je vidět na *obrázcích 4.12 a 4.13*. U všech barevných center došlo ke zvýšení světlosti vzorků a ke snížení čistoty.

5. Příprava vizuálních experimentů

Součástí experimentální části disertační práce byla příprava, realizace a vyhodnocení vizuálních experimentů provedených v koloristické skříní při definovaném osvětlení a při předem definovaných podmínkách. V rámci disertační práce byly připraveny, realizovány a vyhodnoceny tři základní experimenty s označením *TUL 1*, *TUL 2* a *TUL 3*.

Vizuálních experimentů se zúčastnila skupina pozorovatelů bez předchozích zkušeností s vizuálním hodnocením.

Cíle vizuálního experimentu:

1. připravit různé úrovně adaptačních jasů, které pokryjí široké spektrum adaptačních jasů na fotopických a mezopických úrovních až na hranici mezopické a skotopické úrovně adaptačních jasů.
2. realizace vizuálních experimentů s pomocí skupiny pozorovatelů, kteří hodnotili vybrané barevné páry z centra blue, orange, red a yellowgreen.
3. zpracování a vyhodnocení výsledků získaných během vizuálních experimentů pro vyjádření pozorovatelské shody pozorovatelů a shody mezi pozorovateli.
4. zpracování a vyhodnocení výsledků získaných během vizuálních experimentů pro skupiny pozorovatelů rozdělených podle národnosti (skupina Evropa – pozorovatelé z České a Slovenské republiky, skupina Asie – pozorovatelé z Číny, Japonska a Indie, experiment *TUL 3* – Španělé), kterou všichni pozorovatelé při experimentu uvedli a souhlasili s uvedením tohoto údaje při vyhodnocení.
5. vyhodnocení shody vizuálně určené barevné odchylky a přístrojově změřené barevné odchylky.
6. návrh úpravy stávajícího modelu barevného vzhledu CIECAM02 a CAM02–UCS.
7. testování barvocitu pozorovatelů účastnících se vizuálních experimentů *TUL 1*, *TUL 2* a *TUL 3*.

5.1 Příprava vizuálního experimentu *TUL 1* a *TUL 2*

5.1.1 Měření úrovní adaptačních jasů pro vizuální experiment *TUL 1* a *TUL 2*

Pro vizuální experiment bylo nutné změřit úrovně adaptačních jasů vybraného simulátoru denního osvětlení F7 (zářivka) umístěného v koloristické skříní Atelier Technik Color (AT) a ICS-TEXICON. První dvě jmenované skříně se nacházeli v laboratoři LCAM na TUL. Pro

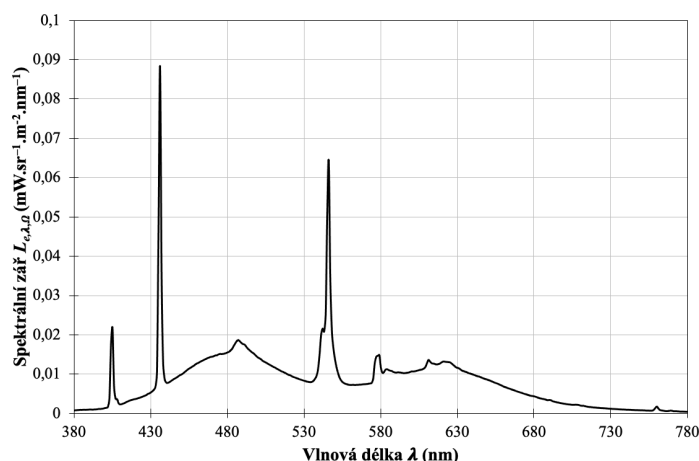
změření úrovní adaptačních jasů byl použit Photo Research SpectraScan® Spectroradiometer PR-740 se spektrálním rozsahem 380 – 780 nm. Pomocí přístroje byla získána data pro spektrální zář použitého simulátoru denního osvětlení F7 $L_{e,\lambda,\Omega}$ ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$), hodnoty úrovně adaptačního jasu L_W ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$), barevné souřadnice x, y , náhradní teplota chromatičnosti (CCT) a velikost měřicí apertury A. Získané hodnoty jsou uvedeny v *tabulce 5.1* a spektrální průběh simulátoru F7 pro nejvyšší úroveň adaptačního jasu je uveden na *obrázku 5.1* jako spektrální zář $L_{e,\lambda,\Omega}$ ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$).

Všechna měření byla provedena po 10 opakováních. Vypočtené hodnoty nejistot měření jsou uvedeny rovněž v *tabulce 5.1*. Hodnoty v *tabulce 5.1* jsou vztaženy ke standardnímu kolorimetrickému pozorovateli CIE 1931. Pro úroveň 1 adaptačního jasu byly použity dvě sady shodných simulátorů F7.

V *tabulce 5.1* je navíc doplněna hodnota L_A . Jedná se o hodnotu úrovně adaptačního jasu vztaženou k pozadí použitému v koloristické skříni a typu použitého simulátoru denního světla. Výpočet je proveden podle *rovnice (2.35)*. Hodnota S – GS odpovídá hodnotě úrovně adaptačního jasu pro skříň, kde byla umístěna šedá stupnice sloužící k zapamatování pro následné vizuální hodnocení při experimentu TUL 2.

Tabulka 5.1 – Naměřené hodnoty úrovně adaptačních jasů L_W pro experiment TUL 1 a TUL 2

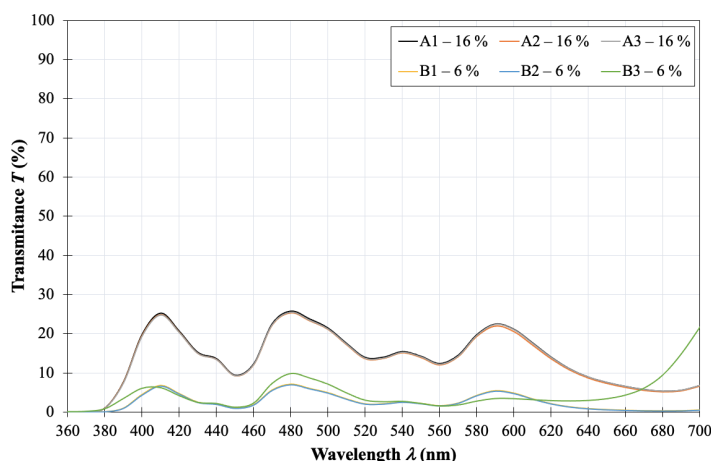
Úroveň	L_W ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	L_A ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	CCT (K)	x	y	A (deg)
1	885±6	371	6 431±41	0,3135±0,0007	0,3324±0,0004	0,2
2	481±2	202	6 466±19	0,3127±0,0003	0,3337±0,0002	0,2
3	76±0,44	32	7 458±46	0,3045±0,0008	0,3349±0,0004	1
4	14,5±0,03	6	7 458±14	0,2967±0,0002	0,3260±0,0001	1
5	2,21±0,01	0,93	8 486±11	0,2868±0,0001	0,3112±0,0001	2
6	0,56±0,001	0,25	10222±11	0,2758±0,0001	0,2935±0,0001	2
7	0,12±0,001	0,05	12793±42	0,2661±0,0002	0,2785±0,0002	2
8	0,02±0,0001	0,01	N/A	0,2127±0,0010	0,2484±0,0003	2
S – GS	639	268	6724±35	0,3105±0,0004	0,3180±0,0003	0,2



Obrázek 5.1 – Průběh spektrální záře $L_{e,\lambda,\Omega}$ pro úroveň 1 adaptačního jasu

Měření bylo provedeno ze vzdálenosti 50 cm, tedy ze vzdálenosti, kdy objektiv spektrometru byl umístěn ve vzdálenosti 50 cm kolmo na standard Zenith Lite targets.

Tento standard byl umístěn na podložce v úhlu 45° (obrázek 5.7). Toto uspořádání měření odpovídá i uspořádání při vizuálních experimentech. Pro dosažení požadovaných úrovní adaptačních jasů byly použity filtry, s jejichž pomocí bylo možné postupně snižovat úroveň osvětlení. Filtry byly vyrobeny z PMMA desek, které byly potaženy tenkými fóliemi s propustností světla 6 a 16 %, které byly udány výrobcem filtrů. Kombinací filtrů s různou propustností bylo dosaženo úrovní uvedených v tabulce 5.1.



Obrázek 5.2 – Transmittance filtrů s označením A a B pro experiment TUL 1 a TUL 2

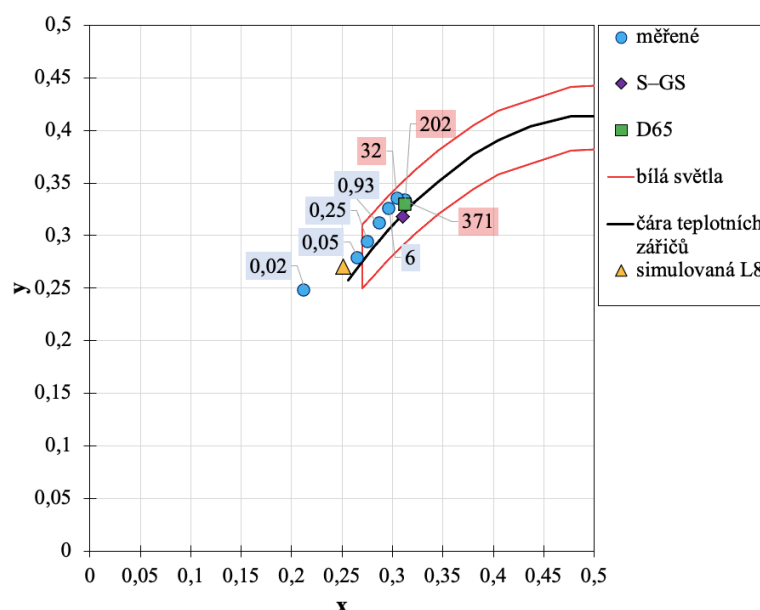
Naměřená data pro jednotlivé úrovně adaptačního jasu byla porovnána s daty vypočtenými pomocí Lambert–Beerova zákona s využitím naměřené transmittance použitých filtrů. Měřením filtrů bylo zjištěno, že střední hodnota transmittance je pro filtry s označením A rovna $13,41 \pm 7,06 \%$ a pro filtry s označením B rovna $3,25 \pm 3,14 \%$, což u filtrů s označením B je

přibližně 50 % propustnost oproti udané hodnotě výrobcem filtrů. Na *obrázku 5.2* je zobrazena transmittance filtrů naměřeni pomocí spektrofotometru.

Na následujícím *obrázku 5.3* jsou do CIE kolorimetrického trojúhelníku vložena data odpovídající naměřeným datům ze spektroradiometru zároveň také s hranicí pro bílá světla podle CIE a s pozicí bodu nepestrosti pro normalizovaný druh světla D65 (CIED65).

Na *obrázku 5.3* jsou světla červeně vyznačeny úrovně ve fotopické oblasti vidění a světla modře úrovně v mezopické oblasti vidění.

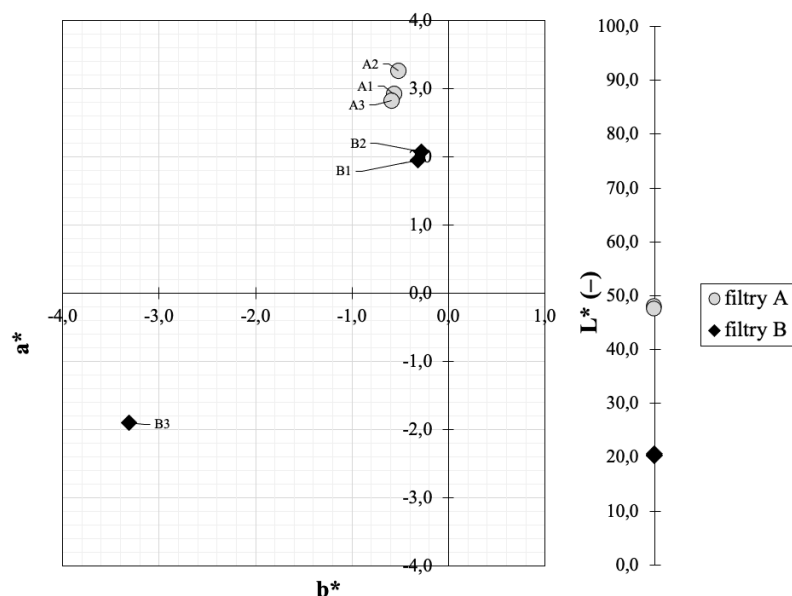
Body pro úrovně 1 a 2 odpovídají pozici CIE D65 vzhledem k tomu, že se jedná o úrovně, u kterých nebyly použity filtry pro snížení úrovně adaptačního jasu. Jak je možné vidět na *obrázku 5.3*, úroveň 8 leží mimo hranice pro bílá světla, pro tuto úroveň nebylo možné pomocí spektroradiometru naměřit hodnotu náhradní teploty chromatičnosti CCT. Pro tuto úroveň je možné odhadnout CCT s odkazem na čáru teplotních zářičů vztaženou ke standardnímu kolorimetrickému pozorovateli CIE 1931 na teplotu přesahující 25 000 K.



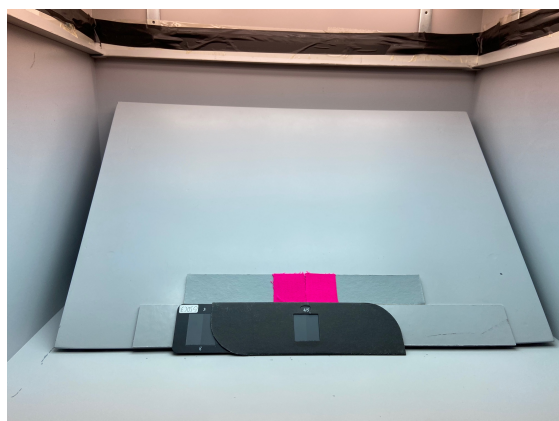
Obrázek 5.3 – Posuv bodu nepestrosti pro různé úrovně adaptačního jasu v CIE kolorimetrickém trojúhelníku pro experimenty TUL 1 a TUL 2

Zároveň je na *obrázku 5.3* vidět, že vlivem použití filtrů dochází k posunu směrem k modrozelené oblasti diagramu chromatičnosti, nejvýraznější změna nastává u poslední 8. úrovně adaptačního jasu. V tomto případě je použit filtr B3, který je oproti ostatním filtrům s označením B1 a B2 více do zelena a do modra. Z tohoto důvodu je ve výpočtech provedena korekce na situaci, kdy by filtr B3 byl stejný jako filtry B1 a B2. Pozice filtrů A1–A3 a B1–B3 na prostoru barev CIELAB ukázána na *obrázku 5.4*.

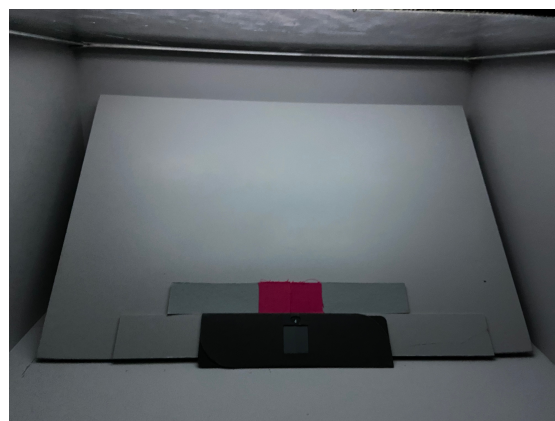
Ačkoliv bylo během experimentu zjištěno, že filtr B3 se od zbývajících filtrů B1 a B2 liší, nebylo z technických důvodů možné zaměnit tento filtr za jiný filtr shodný s filtry B1 a B2. Při výpočtech a výsledném hodnocení jsou pro 8. úroveň adaptačního jasu (L_8) použita simulovaná data, která byla získána pomocí výpočtů s použitím dat pro filtr B1. Pozice takto simulované úrovně je ukázána na *obrázku 5.3*.



Obrázek 5.4 – Pozice filtrů v prostoru barev CIELAB



Obrázek 5.5 – Ukázka 2. úrovně adaptačního jasu $L_A = 202 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$



Obrázek 5.6 – Ukázka 5. úrovně adaptačního jasu – $L_A = 0,93 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$

Na *obrázku 5.7* je zeleně zvýrazněna pozice filtru při snižování úrovně adaptačního jasu. Modře zvýrazněna je pozice vzorků při hodnocení a standardu při měření úrovně adaptačních jasů. Toto uspořádání je označováno jako uspořádání $45^\circ:0^\circ$. Úhel 45° odpovídá úhlu, pod kterým dopadá osvětlení na povrch vzorku/standardu a úhel 0° odpovídá úhlu, pod kterým je vzorek/standard pozorován/měřen. Na *obrázcích 5.5* a *5.6* je vidět ukázka situace při použití

filtrů ke snížení úrovně adaptačního jasu. Na *obrázku 5.6* je možné si povšimnout umístění filtru a zároveň snížení kontrastu mezi barevným párem pocházejícím z centra red.

Během měření úrovně adaptačního jasu, během všech vizuálních experimentů a během testování barvocitu pozorovatelů, byla v místnosti, kde docházelo k vizuálním experimentům zajištěno tma, aby pozorovatelé ani měření nebylo ovlivněno okolními efekty.

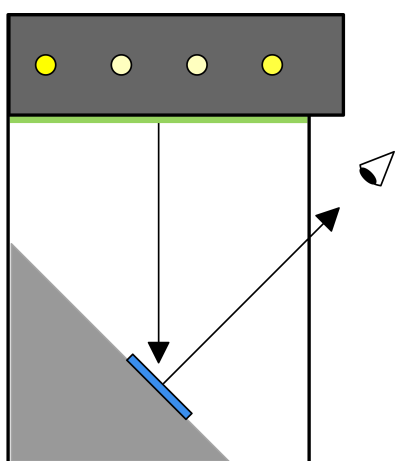
5.2 Vizuální experiment TUL 1

Vizuální experiment TUL 1 byl realizován v Laboratoři měření barevnosti a vzhledu na Technické univerzitě v Liberci (LCAM TUL). Experiment TUL 1 byl realizován v koloristické skříni Atelier Technik Color podle metody Gray scale method. Tato metoda popisuje hodnocení, při kterém je Šedá stupnice pro hodnocení změny odstínu odpovídající ISO normě 105A:02-1993 [127] umístěna ve stejné koloristické skříni jako posuzované barevné páry, tedy je stejně jako barevné páry ovlivněna snižující se úrovní adaptačního jasu (*obrázek 5.8*).

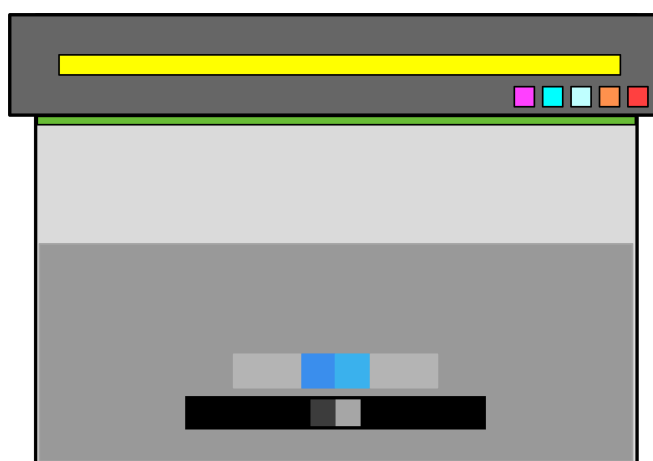
Experiment byl proveden pod 8 úrovněmi adaptačního jasu (*tabulka 5.1 a 5.2*).

Experimentu se zúčastnilo 17 pozorovatelů různých národností a pohlaví narozených v letech 1964 – 1999 a bez předchozích zkušeností s hodnocením se šedou stupnicí. Každý z pozorovatelů hodnotil všechny barevné páry 5krát pod každou úrovní adaptačního jasu. Všichni pozorovatelé souhlasili se zveřejněním roku narození, pohlaví a národnosti během zpracování této práce.

V *tabulce 5.2* jsou uvedeny hodnoty času, po který se pozorovatelé adaptovali na jednotlivé úrovně adaptačního jasu během vizuálního experimentu TUL 1.



Obrázek 5.7 – Uspořádání vizuálního experimentu – boční pohled



Obrázek 5.8 – Uspořádání vizuálního experimentu TUL 1 – přímý pohled

Tabulka 5.2 – Hodnoty času pro adaptaci pozorovatelů

Úroveň	L_A (cd. m ⁻²)	Adaptační čas (min)
1	371	2
2	202	2
3	32	5
4	6	7
5	0,93	10
6	0,25	12
7	0,05	12
8	0,01	15

Určené hodnoty adaptačního času vycházejí z předchozích provedených experimentů. [9] Dvě poslední úrovně hodnotili pozorovatelé vždy společně a adaptační čas 15 minut byl pro úplnou adaptaci dostačující.

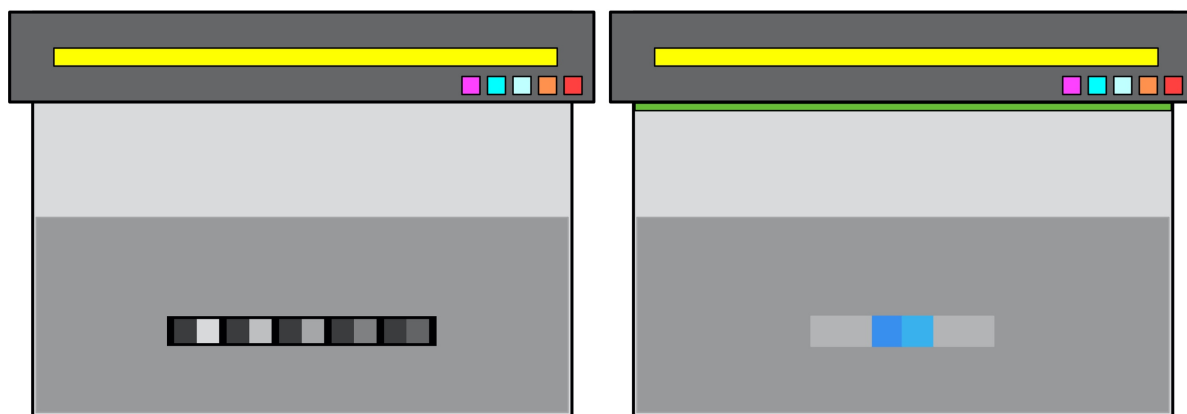
5.3 Vizualní experiment TUL 2

Vizuální experiment TUL 2 byl realizován rovněž v Laboratoři měření barevnosti a vzhledu na Technické univerzitě v Liberci. Experiment TUL 2 byl realizován v koloristické skříni Atelier Technik Color a koloristické skříni ICS-TEXICON podle metody Memory matching method, která spočívá v tom, že je šedá stupnice pro hodnocení změny odpovídající ISO normě 105A:02-1993 umístěna mimo hlavní skříň, tedy, že pozorovatel si před hodnocením barevných párů stupnici „zapamatuje“ a hodnotí pak barevné páry pouze pomocí paměti. Stupnice byla ovlivněna pouze hlavní úrovní osvětlení koloristické skříně uvedené na *obrázku 5.9* vlevo. Každý z pozorovatelů měl před každou úrovní čas 2 minuty, aby si zapamatoval šedou stupnici. Po zapamatování byla skříň vlevo zhasnuta, aby pozorovatele neovlivňovala během hodnocení barevných párů.

Experiment byl realizován pod 5 úrovněmi adaptačního jasu z úrovní uvedených v *tabulce 5.1* a *5.2*, a to úrovněmi 2 – 5 a 7.

Experimentu se zúčastnilo 10 pozorovatelů různých národností a pohlaví narozených v letech 1964 – 1995 a bez předchozích zkušeností s hodnocením. Každý z pozorovatelů hodnotil všechny barevné páry 5krát pod každou úrovní adaptačního jasu.

Všichni pozorovatelé souhlasili se zveřejněním roku narození, pohlaví a národnosti během zpracování této práce.



Obrázek 5.9 – Uspořádání vizuálního experimentu TUL 2 – přímý pohled

Adaptační čas pro experiment TUL2 je uveden v *tabulce 5.2*.

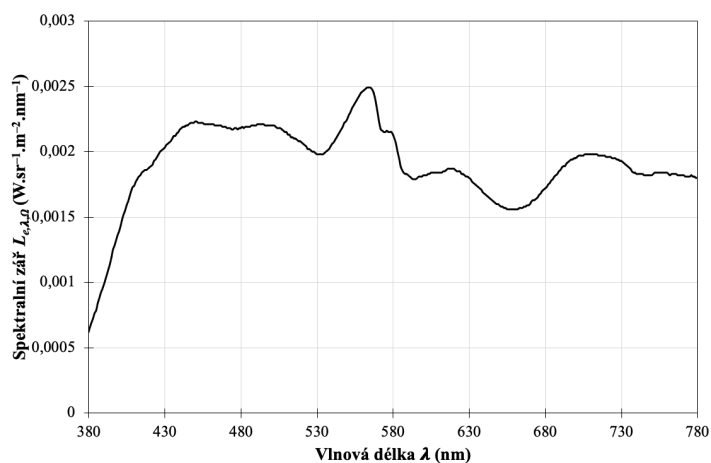
5.4 Příprava vizuálního experimentu TUL 3

5.4.1 Měření úrovní adaptačních jasů pro experiment TUL 3

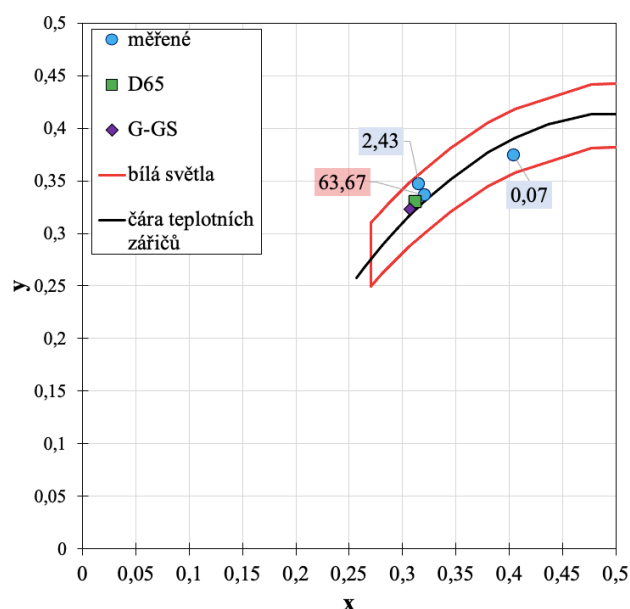
Pro vizuální experiment TUL 3 bylo také potřebné změřit úrovně adaptačních jasů vybraného simulátoru denního osvětlení umístěného v koloristické skříně GretagMacbeth SPECTRALIGHT® III (SPL III) a VeriVide CAC Portable. Jako osvětlení byl v koloristické skříně použit simulátor denního světla založený na kombinaci modrého filtru a halogenové žárovky. Obě skříně se nacházeli v laboratoři na Universitě v Granadě. Pro změření úrovní adaptačních jasů byl použit spektrometr Konica Minolta CS-2000 se spektrálním rozsahem 380 – 780 nm. Pomocí přístroje byla získána data pro spektrální zář použitého simulátoru denního osvětlení $F7 L_{e,\lambda,\Omega}$ ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \text{nm}^{-1}$), hodnoty úrovně adaptačního jasů L_W ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$), barevné souřadnice x , y , náhradní teplota chromatičnosti (CCT) a velikost měřicí apertury A . Získané hodnoty jsou uvedeny v *tabulce 5.3* a spektrální průběh simulátoru ve skříně SPL III pro nejvyšší úroveň je uveden na *obrázku 5.10*.

Tabulka 5.3 – Naměřené hodnoty úrovně adaptačních jasů L_W pro experiment TUL 3

Úroveň	L_W ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	L_A ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	CCT (K)	x	y	A (deg)
G1	151,79	63,67	6 516	$0,3212 \pm 0,0003$	$0,3213 \pm 0,0003$	0,1
G2	5,79	2,43	6 466	$0,3123 \pm 0,0004$	$0,3447 \pm 0,0003$	0,1
G3	0,17	0,07	4 142	$0,3741 \pm 0,0007$	$0,3619 \pm 0,0006$	1
G – GS	348	146	6 941	$0,3068 \pm 0,0005$	$0,3237 \pm 0,0005$	0,1



Obrázek 5.10 – Průběh spektrální záře $L_{e,\lambda,\Omega}$ pro úroveň 1 adaptačního jasu



Obrázek 5.11 – Posuv bodu nepestrosti pro různé úrovně adaptačního jasu v CIE kolorimetrickém trojúhelníku pro experiment TUL 3

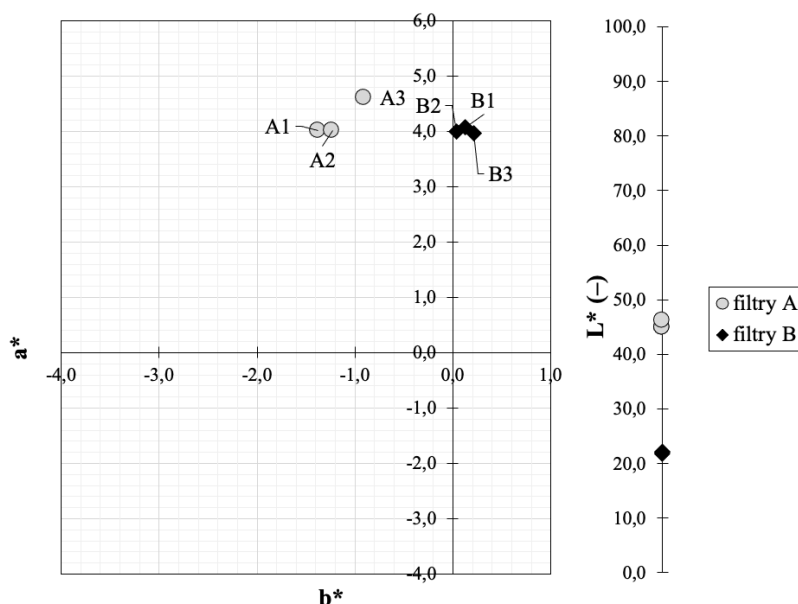
Všechna měření byla provedena po 10 opakováních. Vypočtené hodnoty nejistot měření jsou uvedeny rovněž v *tabulce 5.3*. Hodnoty v *tabulce 5.3* jsou vztaženy ke standardnímu kolorimetrickému pozorovateli CIE 1931. Hodnota G – GS odpovídá hodnotě úrovně adaptačního jasu pro skříň, kde byla umístěna šedá stupnice sloužící k zapamatování pro následné vizuální hodnocení při experimentu TUL 3.

Měření bylo provedeno ze vzdálenosti 50 cm, tedy ze vzdálenosti, kdy objektiv spektrometru byl umístěn ve vzdálenosti 50 cm kolmo na bílý standard.

Tento standard byl umístěn na podložce v úhlu 45° (obrázek 5.9). Toto uspořádání měření odpovídá i uspořádání při vizuálních experimentech. Pro dosažení požadovaných úrovní adaptačních jasů byly použity filtry, s jejichž pomocí bylo možné postupně snižovat úroveň osvětlení. Filtry byly vyrobeny z PMMA desek, které byly potaženy tenkými fóliemi s propustností světla 6 a 16 %, které byly udány výrobcem filtrů. Kombinací filtrů s různou propustností bylo dosaženo úrovní uvedených v tabulce 5.3.

Na obrázku 5.11 jsou do CIE kolorimetrického trojúhelníku vložena data odpovídající naměřeným datům ze spektrometru doplněná o hranici pro bílá světla podle CIE, pro porovnání je zde uvedena pozice bodu nepestrosti pro normalizovaný druh světla D65 (D65), a také čára teplotních zářičů.

Pozice filtrů v prostoru barev CIELAB je zobrazena na obrázku 5.12.



Obrázek 5.12 – Pozice filtrů v prostoru barev CIELAB

5.5 Vizuální experiment TUL 3

Vizuální experiment TUL 3 byl realizován podle stejné metody jako experiment TUL 2. Experiment se sestával ze 3 úrovní adaptačního jasů a zúčastnilo se jej 6 pozorovatelů různých národností a pohlaví narozených v letech 1955 – 1995 a bez předchozích zkušeností s hodnocením. Jeden pozorovatel měl již dříve diagnostikovanou vadu barvocitu, tudíž je jeho hodnocení vyhodnoceno samostatně (pozorovatel G6) a porovnáno se zbývajících pozorovateli. Každý z pozorovatelů hodnotil všechny barevné páry 5krát pod každou úrovní adaptačního jasů. Každý z pozorovatelů měl před každou úrovní čas 2 minuty, aby si

zapamatoval šedou stupnici. Po zapamatování byla skříň vlevo zhasnuta, aby pozorovatele neovlivňovala během hodnocení barevných párů. Všichni pozorovatelé souhlasili se zveřejněním roku narození, pohlaví a národnosti během zpracování této práce.

Hodnoty úrovní adaptačních jasů pro experiment TUL 3 jsou uvedeny v *tabulce 5.3*.

V *tabulce 5.4* jsou uvedeny hodnoty adaptačního času, který byl dodržován při provádění experimentu TUL 3.

Tabulka 5.4 – Naměřené hodnoty úrovně adaptačních jasů L_W pro experiment TUL3

Úroveň	L_A (cd. m ⁻²)	Adaptační čas (min)
G1	63,67	5
G2	2,43	10
G3	0,07	15

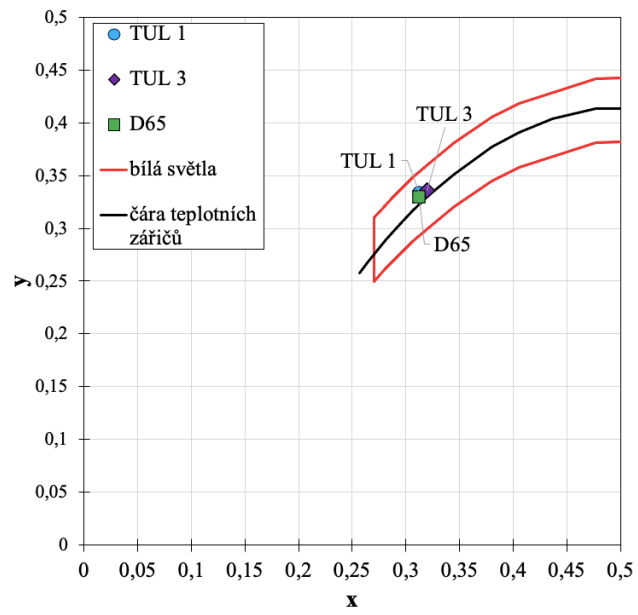
Adaptační časy v případě tohoto experimentu byly voleny tak, aby poskytly pozorovateli dostatečný čas pro adaptaci a zároveň byly odpovídající časům používaným při experimentech TUL 1 a TUL 2.

5.6 Porovnání simulátorů denního světla pro experimenty TUL 1 a TUL 3

Vizuální experimenty TUL 1 a TUL 2 byly provedeny ve stejné koloristické skříni, ve které byly instalovány speciální zářivky s více luminofory. Provedení vizuálního experimentu TUL 3 bylo naplánováno provedení během studijní stáže. V rámci tamější laboratoře nebyla shodná koloristická skříň s tou, která se nachází v laboratoři LCAM na FT TUL, proto byla jako hlavní koloristická skříň pro provedení vizuálního experimentu zvolena skříň SPL III. Ta však na rozdíl od skříně použité u experimentů TUL 1 a TUL 2, je osazena simulátorem denního světla založeného na kombinaci halogenové žárovky a modrého konverzního filtru.

Na *obrázku 5.13* jsou zobrazeny pozice referenční bílé pro oba použité simulátory denního světla použité při experimentech TUL 1 a TUL 3.

Spektrální distribuce osvětlení těchto simulátorů se liší (*obrázek 5.1* a *obrázek 5.10*), avšak jak je vidět na *obrázku 5.13*, pozice referenční bílé pro tyto dva simulátory je velmi blízká. Náhradní teplota chromatičnosti (CCT) je pro simulátor pro koloristickou skříň v experimentu TUL 1 přibližně 6 466 K, pro koloristickou skříň v experimentu TUL 3 přibližně 6 516 K. Rozdíl mezi CCT pro tyto simulátory je 50 K, tento rozdíl je menší, než je hranice rozlišitelnosti lidským okem (200 K) mezi dvěma různými CCT. Na základě tohoto je možné výsledky těchto vizuálních experimentů mezi sebou porovnat aniž by musely být výsledky nějak korigovány.



Obrázek 5.13 – Pozice referenční bílé pro simulátory z experimentů TUL 1 (TUL 2) a TUL 3

V. Přehled dosažených výsledků a jejich diskuze

Následující kapitoly obsahují získané výsledky, jejich vyhodnocení a diskuzi těchto výsledků. Experimentální část je tvořena hodnocením a diskuzí nejistot měření, stanovením a vyhodnocením přesnosti a preciznosti měření, hodnocením a diskuzí chyb měření při spektrofotometrických měření, hodnocením a diskuzí hodnocení barvocitu pozorovatelů a vyhodnocením vizuálního experimentu.

6. Vyhodnocení a diskuze nejistot měření

Pro získání hodnot spektrálního činitele odrazu ρ_λ a β_λ , byly zvoleny dva postupy měření zeleného standardu. Pro hodnocení nejistot byl vybrán standard s označením Green tile ze sady C.C.S. Series II od British Ceramic Research, nyní Lucideon.

- A. **Krátkodobé měření** (postup A) – provedeno bylo postupně 10 opakovaných měření v rychlém sledu při jedné kalibraci spektrofotometru.
- B. **Dlouhodobá měření** (postup B) – provedeno bylo 10 opakovaných měření při znovu provedené kalibraci a v různých dnech.

Všechna krátkodobá i dlouhodobá měření proběhla při průměrné teplotě $24,4 \pm 1$ °C a průměrné hodnotě relativní vlhkosti 48 ± 5 %.

6.1 Popis měřicích přístrojů

Pro získání hodnot spektrálního činitele odrazu ρ_λ nebo β_λ lze v současné době použít celou řadu přístrojů a analýz. V této práci byly pro získání požadovaných hodnot spektrálního činitele odrazu ρ_λ a β_λ a pro následné hodnocení nejistot měření, hodnocení přesnosti měření a stanovení chyb při spektrofotometrických měření použity spektrofotometry z *tabulky 6.1*, respektive *6.2*. Ze získaných hodnot spektrálního činitele odrazu ρ_λ a β_λ byly výpočtem získány hodnoty souřadnic $L^*a^*b^*$ v pravoúhlém prostoru CIELAB [97] odpovídající osvětlení D65 a standardnímu kolorimetrickému pozorovateli CIE 1931.

V *tabulkách 6.1* a *6.2* jsou uvedena označení, parametry a nastavení spektrofotometrů během prováděných měření. Spektrofotometry byly podle typu měřicí geometrie rozděleny do třech skupin. Ve skupině 1 byly zařazeny spektrofotometry (spektrofotometry 1 – 3) s difúzní měřicí geometrií a s nastavením bez zrcadlové složky odrazu (SCE), v *tabulkách 6.1* a *6.2* jsou z důvodu odlišení od spektrofotometrů z ostatních skupin zvýrazněny modrou barvou. Ve

skupině 2 byly zařazeny spektrofotometry (spektrofotometry 4 – 6) s difuzní měřicí geometrií a s nastavením se zahrnutím zrcadlové složky odrazu (SCI), v *tabulkách 6.1 a 6.2* zvýrazněny žlutou barvou. Ve skupině 3 byly zařazeny spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií (spektrofotometry 7 – 9). V *tabulkách 6.1 a 6.2* jsou zvýrazněny zelenou barvou.

Pro následné hodnocení byl pro každou skupinu zvolen referenční spektrofotometr, vůči kterému bylo následně provedeno hodnocení jak nejistot měření, tak i hodnocení přesnosti z hlediska krátkodobého a dlouhodobého způsobu měření, tak v neposlední řadě i měření pro zjištění a stanovení chyb měření. Výběr referenčního spektrofotometru pro každou skupinu byl proveden podle požadovaných kritérií, a to například kalibrace podílu UV, velikost apertury a měřený rozsah. Pro skupinu 1 byl zvolen jako referenční spektrofotometr spektrofotometr 1. Stejný spektrofotometr (nyní označen jako spektrofotometr 4) byl zvolen jako referenční spektrofotometr i pro skupinu 2, avšak s tím rozdílem, že při kalibraci bylo zvoleno zahrnutí zrcadlové složky odrazu. Ostatní parametry a nastavení zůstaly stejné. Pro skupinu 3 byl jako referenční spektrofotometr zvolen spektrofotometr s číslem 7.

Volba spektrofotometrů zvolených pro výše uvedená hodnocení byla provedena podle požadavků a účelů pro použití v disertační práci. Spektrofotometr 2 byl zvolen pro porovnání a hodnocení vzhledem k podobnému nastavení, ale zároveň také proto, že díky horizontálnímu uspořádání (spektrofotometr 1 je proveden ve vertikálním uspořádání) bylo možné snadněji měřit mimo spektrálního činitele odrazu také hodnoty spektrálního činitele transmise. Toto měření bylo využito pro ověření světelné propustnosti filtrů (transmitance), které byly použity během vizuálních experimentů ke snižování úrovně adaptačního jasu. Spektrofotometr 3 byl zvolen pro porovnání a hodnocení zvolených charakteristik z toho důvodu, že se jedná o přenosný spektrofotometr s vlastním displejem, takže jím lze měřit barevné povrchy prakticky na jakémkoliv místě, a především také z toho důvodu, že k němu není potřeba počítač s ovládacím softwarem. Spektrofotometr 5 byl vybrán ze stejného důvodu jako spektrofotometr 3. Spektrofotometr 6 je stejný spektrofotometr jako spektrofotometr 3, avšak během měření byla zahrnuta zrcadlová složka odrazu.

Spektrofotometry 8 a 9 byly vybrány z důvodu volného měření na jakémkoliv místě, a také z toho, že se jedná o spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií. Změřené hodnoty lze použít pro porovnání s hodnotami získanými z vizuálního hodnocení.

V textu může být slovo spektrofotometr nahrazeno slovem přístroj.

Tabulka 6.1 – Označení měřicích přístrojů

Spektrofotometr	Označení
1	Spektrofotometr Datacolor SpectraFlash 600 plus 3926
2	Spektrofotometr Datacolor SpectraFlash 450
3	Spektrofotometr Microflash 200d
4	Spektrofotometr Datacolor SpectraFlash 600 plus 3926
5	Spektrofotometr HunterLab Miniscan Xe
6	Spektrofotometr Microflash 200d
7	Spektrofotometr X-Rite ERX30
8	Spektrofotometr HunterLab Miniscan Xe Plus
9	Spektrofotometr X-Rite i1Pro2 XRGB

Tabulka 6.2 – Nastavení přístrojů

Nastavení	Spektrofotometr								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Spektrální rozsah (nm)	360 – 700	360 – 700	400 – 700	360 – 700	400 – 700	400 – 700	330 – 730	400 – 700	380 – 730
Interval (nm)	10	10	10	10	10	10	1	10	10
Simulátor osvětlení D65	Xe ¹	Xe	Xe	Xe	Xe	Xe	Xe	Xe	A ² +UV LED, D50
UV kalibrace	GG ³	GG	není	GG	není	není	±UV	není	±UV
Měřicí otvor (mm)	30	30	20	30	25	20	10	25	4
Měřicí geometrie	de:8°	de:8°	de:8°	di:8°	di°:8°	di:8°	45°c:0°	45°a:0°	45°c:0°

¹ Xe – xenonová výbojka

² A – žárovka

³ GG – Ganz-Griesserova kalibrace

6.2 Hodnocení nejistot měření pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií

Ze změřených hodnot spektrálního činitele odrazu ρ_λ byly vypočteny hodnoty $L^*a^*b^*$, pro které byly výpočtem stanoveny nejistoty měření pro náhodné složky chyb z hlediska krátkodobého a dlouhodobého měření. Hodnocení chyb měření při spektrofotometrických měření z hlediska stanovení systematické složky nejistoty je uvedeno v kapitole 8.

V *tabulce 6.3* jsou uvedeny výsledky pro difúzní geometrii s nastavením SCE. V *tabulce 6.5* jsou uvedeny výsledky pro difúzní geometrii s nastavením SCI. Výsledky v *tabulce 6.4* a *6.6* udávají vypočtenou nejistotu stanovenou pro spektrofotometr s difúzní geometrií s SCE nebo s SCI nastavením z hlediska stanovení náhodné složky chyby podle *rovnice (3.55)*.

Tabulka 6.3 – Výsledky souřadnic pro spektrofotometry s difúzní geometrií s nastavením SCE

	dlouhodobá měření			krátkodobá měření		
	1	2	3	1	2	3
L^*	53,00	53,04	53,93	53,05	52,95	53,72
a^*	-36,75	-36,93	-35,78	-37,33	-36,76	-35,78
b^*	18,24	18,67	16,10	18,24	18,53	16,12
X	13,46	13,46	14,25	13,41	13,43	14,11
Y	21,04	21,08	21,91	21,10	21,00	21,71
Z	13,91	13,75	15,52	13,95	13,75	15,34
x	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,26
y	0,43	0,44	0,42	0,44	0,44	0,42

Z výsledků dlouhodobých a krátkodobých měření zeleného standardu je vidět, že největší rozdíl nastává u souřadnic a^* , b^* , respektive Z pro spektrofotometr 3. Výsledné hodnoty ukazují na změnu barevného tónu směrem do červena a do modra oproti zbývajícím dvěma spektrofotometrům. Výsledné hodnoty L^* pro tentýž spektrofotometr, ukazují na změnu měrné světlosti L^* k vyšším hodnotám. Porovnáme-li získané hodnoty pro krátkodobé a dlouhodobé měření mezi sebou pomocí celkové barevné odchylky ΔE^* , u spektrofotometru 1 je $\Delta E^* = 0,58$, což už je rozdíl, který je viditelný lidským okem. Porovnáme-li získané hodnoty pro spektrofotometry 2 a 3 oproti referenčnímu spektrofotometru 1, získáme hodnoty $\Delta E^* = 0,65$ a $\Delta E^* = 2,71$ pro krátkodobé měření, v přepočtu na vnímaný rozdíl se jedná o rozdíl 4,5 a 3,5 podle šedé stupnice pro hodnocení změny odstínu. Pro dlouhodobé měření se hodnoty $\Delta E^* = 0,47$ a $\Delta E^* = 2,53$ pro spektrofotometry 2 a 3.

Tabulka 6.4 – Výsledky nejistot pro spektrofotometry s difúzní geometrií s nastavením SCE

	dlouhodobá měření			krátkodobá měření		
	1	2	3	1	2	3
L^*	0,0140	0,0072	0,0171	0,0002	0,0120	0,0016
a^*	0,5673	0,2038	0,5630	0,0070	0,3143	0,0386
b^*	0,0716	0,0474	0,1622	0,0031	0,0813	0,0110
X	0,0863	0,0411	0,0804	0,0098	0,0470	0,0148
Y	0,1083	0,0777	0,1227	0,0116	0,1001	0,0376
Z	0,0717	0,0663	0,1491	0,0214	0,0880	0,0349
x	0,0026	0,0006	0,0029	0,0001	0,0011	0,0001
y	0,0030	0,0020	0,0067	0,0001	0,0033	0,0005

Jak vyplývá z vypočtených hodnot nejistoty pro spektrofotometry s nastavením SCE, vypočtené hodnoty nejistot se až na hodnoty pro barevnou souřadnici a^* příliš neliší. Důvodem pro vyšší hodnoty nejistot pro tuto hodnotu vychází ze samotného barevného tónu použitého zeleného standardu. Nejvyšší hodnoty nejistot pro téměř všechny souřadnice vycházejí u spektrofotometru 3. V porovnání s nejistotou pro krátkodobá měření, jsou hodnoty stanovené a vypočtené pro dlouhodobá měření vyšší. Vyplývá z toho, že opakovaná měření v rychlém sledu mají vyšší opakovatelnost než opakovaná měření při různé kalibraci. Rozdíl v hodnotách stanovených a vypočtených nejistot spektrofotometrických měření je v případě dlouhodobého měření, tedy měření při opakované kalibraci v různých dnech více zatíženo náhodnými vlivy.

Výsledky v *tabulce 6.5* ukazují výsledky pro zelený standard změřený na spektrofotometrech s nastavením $di:8^\circ$. Nejvíce se odlišují hodnoty b^* u spektrofotometru 5, což ve výsledku přináší posun barevného tónu více do žluta v porovnání s referenčním spektrofotometrem. Celková barevná odchylka se rovná $\Delta E^* = 0,09$ mezi dlouhodobým a krátkodobým měřením pro referenční spektrofotometr. Při porovnání spektrofotometrů 5 a 6 oproti referenčnímu spektrofotometru při dlouhodobém měření je $\Delta E^* = 0,48$ a $\Delta E^* = 1,36$ a $\Delta E^* = 0,34$ a $\Delta E^* = 1,41$ při krátkodobém měření. V porovnání s vnímaným rozdílem se jedná o stupeň 4,5 až 5 podle šedé stupnice u spektrofotometru 5 a stupeň 4 šedé stupnice u spektrofotometru 6.

Z výsledků uvedených v *tabulce 6.6* je vidět, že dlouhodobá a krátkodobá měření se co do velikosti stanovených nejistot neliší tolik, jako tomu bylo u geometrie s nastavením SCE.

Na základě získaných výsledků nejistot lze říci, že spektrofotometry není možné porovnávat bez udání nejistot.

Tabulka 6.5 – Výsledky souřadnic pro spektrofotometry s difúzní geometrií s nastavením SCI

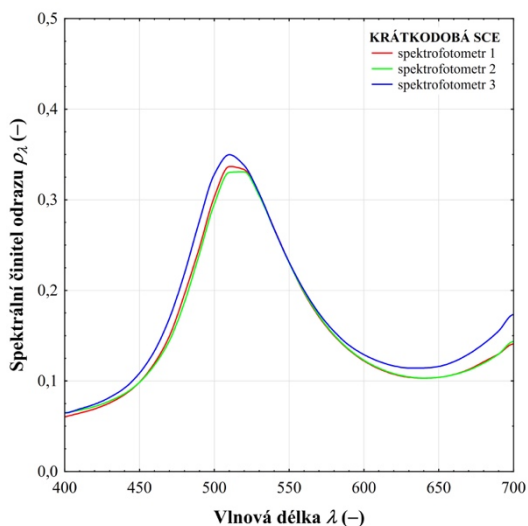
	dlouhodobá měření			krátkodobá měření		
	4	5	6	4	5	6
L^*	56,88	56,85	56,98	56,89	56,77	57,00
a^*	-30,92	-31,31	-31,18	-31,01	-31,18	-31,24
b^*	12,87	13,15	14,20	12,89	13,16	14,28
X	17,27	17,18	17,31	17,27	17,14	17,31
Y	24,80	24,77	24,91	24,81	24,69	24,92
Z	19,52	19,35	18,93	19,52	19,28	18,91
x	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
y	0,40	0,40	0,41	0,40	0,40	0,41

Tabulka 6.6 – Výsledky nejistot pro spektrofotometry s difúzní geometrií s nastavením SCI

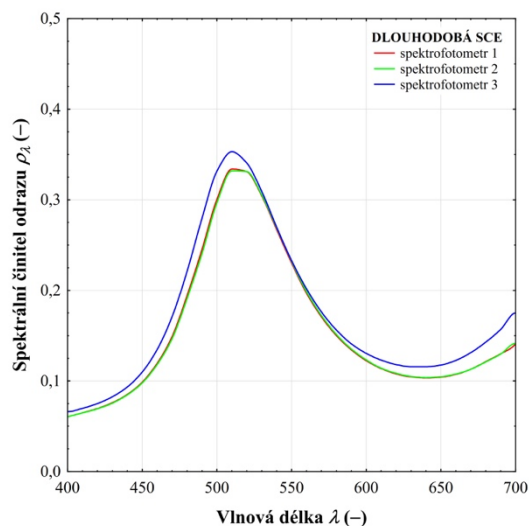
	dlouhodobá měření			krátkodobá měření		
	4	5	6	4	5	6
L^*	0,0009	0,0057	0,0017	0,0003	0,0010	0,0002
a^*	0,0245	0,0675	0,0477	0,0074	0,0564	0,0081
b^*	0,0087	0,0467	0,0103	0,0044	0,0166	0,0039
X	0,0153	0,0455	0,0230	0,0094	0,0352	0,0128
Y	0,0314	0,0769	0,0424	0,0164	0,0326	0,0134
Z	0,0397	0,0891	0,0367	0,0315	0,0600	0,0296
x	0,0001	0,0008	0,0002	0,0001	0,0004	0,0001
y	0,0005	0,0027	0,0006	0,0002	0,0009	0,0002

Na *obrázku 6.1* a *6.2* jsou grafy s naměřenými hodnotami spektrálního činitele odrazu ρ_λ při krátkodobém a dlouhodobém měření pro spektrofotometry 1 – 3. Na obou *obrázcích 6.1* a *6.2* je vidět, že mezi křivkami ρ_λ je nejvýraznější rozdíl v oblasti maxima, tedy v rozsahu 510 – 530 nm.

Modrá křivka odpovídající měření na spektrofotometru 3 je v této oblasti posunuta směrem ke kratším vlnovým délkám, stejně jako v oblasti nad 600 nm. V obou případech, tedy krátkodobého i dlouhodobého měření se tento posun projevil na výsledných hodnotách kolorimetrických souřadnic.



Obrázek 6.1 – Graf ρ_λ pro spektrofotometry s SCE nastavením při krátkodobém měření



Obrázek 6.2 – Graf ρ_λ pro spektrofotometry s SCE nastavením při dlouhodobém měření

Provedenou analýzou výsledků měření a vypočtením nejistot měření pro spektrofotometr 3 bylo zjištěno, že výsledky měření jsou ovlivněny použitým bílým standardem při kalibraci spektrofotometru. Tento posun (chyba) byl korigován pomocí korekce s využitím vícenásobné regrese uvedené v kapitole 8.2.

6.3 Hodnocení nejistot měření pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií

Stejně jako v předchozí kapitole pro hodnoty naměřené na spektrofotometrech s difúzní měřicí geometrií byly vypočteny hodnoty $L^*a^*b^*$ i pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií, pro které byly stanoveny hodnoty nejistot měření z hlediska krátkodobého a dlouhodobého měření (*tabulka 6.7 a 6.8*).

Z výsledků uvedených v *tabulkách 6.7 a 6.8* je vidět, že rozdíl mezi krátkodobým a dlouhodobým měřením je v případě referenčního spektrofotometru 7 malý, vyjádřeno pomocí barevné odchylky je rozdíl $\Delta E^* = 0,05$. Přirovnáme-li to k šedé stupnici, je tato odchylka pod hranicí rozlišitelnosti lidským okem. Při porovnání spektrofotometru 8 a 9 vůči referenčnímu spektrofotometru, je celková barevná odchylka $\Delta E^* = 0,56$ a $\Delta E^* = 0,37$ pro dlouhodobé měření a $\Delta E^* = 0,51$ a $\Delta E^* = 0,33$ pro krátkodobé měření. V porovnání s šedou stupnicí pro hodnocení změny odstínu se v případě spektrofotometru 8 jedná o stupeň 4,5, u spektrofotometru 9 o stupeň 4,5 až 5.

Tabulka 6.7 – Výsledky souřadnic pro spektrofotometry s úhlovou geometrií

	dlouhodobá měření			krátkodobá měření		
	7	8	9	7	8	9
L^*	53,26	53,52	53,52	53,25	53,48	53,52
a^*	-37,22	-37,49	-37,28	-37,26	-37,43	-37,28
b^*	18,81	19,24	19,06	18,78	19,21	18,98
X	13,57	13,70	13,74	13,56	13,69	13,73
Y	21,29	21,52	21,53	21,28	21,49	21,53
Z	13,86	13,86	13,94	13,86	13,85	13,97
x	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
y	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44

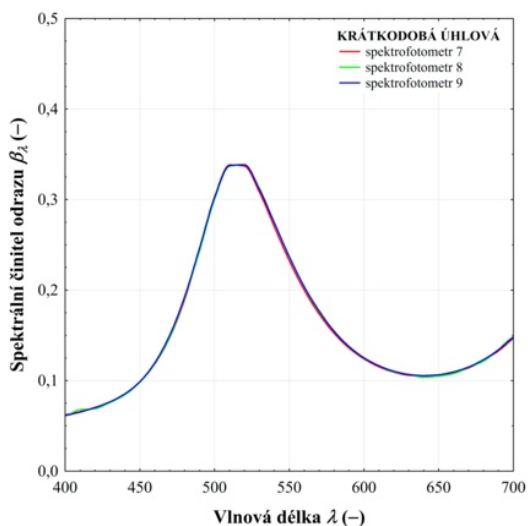
Tabulka 6.8 – Výsledky nejistot pro spektrofotometry s úhlovou geometrií

	dlouhodobá měření			krátkodobá měření		
	7	8	9	7	8	9
L^*	0,0111	0,0355	0,0070	0,0034	0,0418	0,0086
a^*	0,2839	0,9417	0,2347	0,1089	1,1912	0,3059
b^*	0,0502	0,2146	0,0655	0,0220	0,2291	0,556
X	0,0438	0,0899	0,0508	0,0332	0,1028	0,0601
Y	0,0970	0,1700	0,0779	0,0538	0,1897	0,0864
Z	0,0544	0,1405	0,0876	0,0449	0,1343	0,0718
x	0,0007	0,0027	0,0008	0,0004	0,0034	0,0009
y	0,0021	0,0093	0,0027	0,0009	0,0091	0,0022

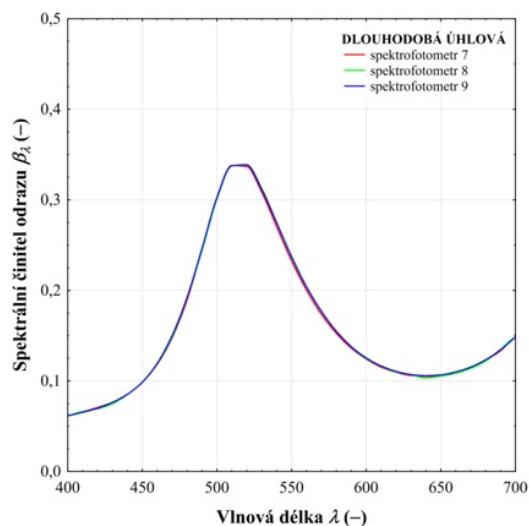
U všech porovnávaných spektrofotometrů s úhlovou měřicí geometrií byly stanoveny největší nejistoty pro barevnou souřadnici a^* (osa červená–zelená). Nejistoty stanovené pro spektrofotometr 8 ukazují v obou způsobech měření na nižší opakovatelnost prováděných měření.

Na *obrázcích 6.3 a 6.4* jsou vyneseny křivky spektrálního činitele odrazu β_λ pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií z hlediska krátkodobého a dlouhodobého měření.

Na obou *obrázcích 6.3 a 6.4* je vidět, že mezi křivkami β_λ pro naměřený zelený standard je minimální rozdíl a měření jdou s ohledem na výsledky nejistot považovat za konzistentní.



Obrázek 6.3 – Graf β_λ pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií při krátkodobém měření



Obrázek 6.4 – Graf β_λ pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií při dlouhodobém měření

Z hodnocení difúzní, tak i úhlové geometrie vyplývá, že i při vyjadřování kolorimetrických souřadnic je nutné k výsledku uvádět nejistotu, s jakou byly dané kolorimetrické souřadnice stanoveny. Cílem měření a nastavení přístrojů by měla být eliminace systematických chyb a snaha předcházet chybám náhodným. Zároveň bylo zjištěno, že na výsledné hodnoty má velký vliv i použitý bílý standard ke kalibraci spektrofotometru.

7. Stanovení přesnosti a preciznosti měření

Při hodnocení spektrofotometrů z hlediska hodnocení výsledků může být včetně vyjádření nejistoty měření použito i hodnocení preciznosti (opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření) a přesnosti měření. Pro účely vyjádření přesnosti a preciznosti měření nad rámec vyjádření nejistoty měření byla použita Mandelova statistika konzistence, která umožňuje spojení více hledisek hodnocení výsledků měření. V následující kapitole bude hodnocena přesnost a preciznost měření pro spektrofotometry s různou měřicí geometrií. Všechna následující měření probíhala při průměrné teplotě $24,4 \pm 1$ °C a průměrné hodnotě relativní vlhkosti 48 ± 5 %.

7.1 Hodnocení preciznosti měření

Hodnocení preciznosti měření pro spektrofotometry s difúzní a úhlovou měřicí geometrií bylo provedeno pro podmínky uvedené v *tabulce 6.2*. Před měřením a vyhodnocením byly stanoveny následující hypotézy, které byly na základě testování Mandelovou vnitrolaboratorní a mezilaboratorní statistikou konzistence přijaty nebo zamítnuty.

Hypotéza I – U všech spektrofotometrů s difúzní i úhlovou měřicí geometrií bude preciznost měření za podmínek opakovatelnosti (s_r) pro všechny souřadnice CIELAB vždy vyšší u krátkodobého měření než u dlouhodobého měření.

Hypotéza II – U všech spektrofotometrů s difúzní i úhlovou měřicí geometrií bude preciznost měření za podmínek reprodukovatelnosti (s_R) pro všechny souřadnice CIELAB vždy vyšší u krátkodobého měření než u dlouhodobého měření.

Hypotéza III. – Pro všechny spektrofotometry je stanovena nulová hypotéza H_0 o rovnosti výběrových rozptylů pro testování spektrofotometrů v případě dlouhodobého i krátkodobého měření pomocí Cochranova testu pro testování odlehlých hodnot nebo hodnot s nízkou precizností. Alternativní hypotéza H_1 je stanovena pro případ, že minimálně jeden z výběrových rozptylů hodnocených spektrofotometrů se liší.

Hypotéza IV. – U všech spektrofotometrů s difúzní i úhlovou měřicí geometrií bude přesnost měření pro všechny souřadnice CIELAB vždy vyšší u krátkodobého měření než u dlouhodobého měření.

Hypotéza V. – Pro všechny spektrofotometry je stanovena nulová hypotéza H_0 pro případ, kdy mezi testovanými hodnotami pro každý jeden spektrofotometr není žádná odlehlá hodnota a alternativní hypotéza H_1 pro případ, kdy mezi testovanými hodnotami pro každý jeden spektrofotometr je právě jedna odlehlá hodnota. Testování hypotézy V. je provedeno pomocí Grubbsova testu odlehlých hodnot.

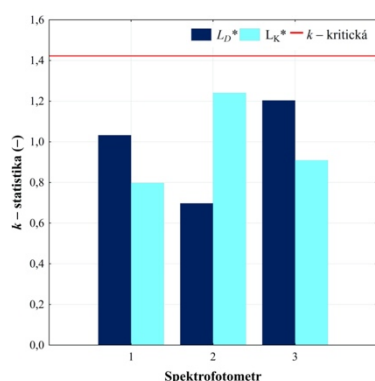
7.2 Výsledky a diskuze pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií

V následující části budou uvedeny výsledky pro skupinu spektrofotometrů s difúzní měřicí geometrií s nastavením SCE a SCI.

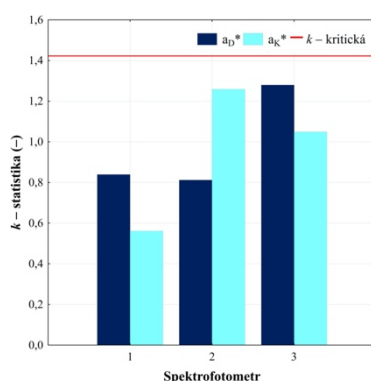
Z naměřených hodnot spektrálního činitele odrazu ρ_λ naměřených na jednotlivých spektrofotometrech pro hodnocení krátkodobé a dlouhodobé preciznosti měření byly vypočteny hodnoty souřadnic $L^*a^*b^*$. Při hodnocení preciznosti měření byly odděleně hodnoceny výsledky pro měrnou světlost L^* a pro osy barevnosti a^* a b^* .

7.2.1 Krátkodobá a dlouhodobá preciznost měření spektrofotometrů s difúzní měřicí geometrií de:8°

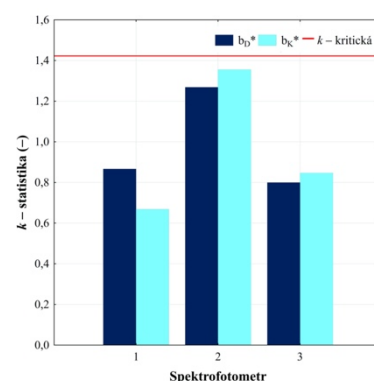
Hodnocení preciznosti měření je v této části provedeno pomocí Mandelovy vnitrolaboratorní statistiky konzistence k a vyjádření opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření pomocí směrodatných odchylek opakovatelnosti s_r a reprodukovatelnosti s_R . Grafické výsledky k – statistiky pro jednotlivé souřadnice z prostoru CIELAB jsou zobrazeny na grafech na obrázcích 7.1 – 7.3. Výsledky vyobrazené na těchto grafech odpovídají vypočtené krátkodobé a dlouhodobé preciznosti vyjádřené pro spektrofotometry s měřicí geometrií de:8°.



Obrázek 7.1 – Výsledky k – statistiky pro preciznost měření spektrofotometrů s de:8° – L^*



Obrázek 7.2 – Výsledky k – statistiky pro preciznost měření spektrofotometrů s de:8° – a^*



Obrázek 7.3 – Výsledky k – statistiky pro preciznost měření spektrofotometrů s de:8° – b^*

Tabulka 7.1 – Výsledky preciznosti pro spektrofotometry s měřicí geometrií de:8°

Veličín y	L_D^*	L_K^*	a_D^*	a_K^*	b_D^*	b_K^*
\bar{x}	53,31±0,71	53,22±0,59	-37,00±0,92	-36,57±1,03	17,66±1,82	17,62 ±1,74
$s_{\bar{x}}$	0,53	0,44	0,69	0,78	1,37	1,31
s_r	0,07	0,01	0,08	0,02	0,07	0,01
s_R	0,54	0,44	0,70	0,78	1,37	1,31

Pro výpočet k – kritické hodnoty byla použita hodnota F rozdělení rovna 4,1410, hodnota n je rovna 10 a hodnota p je rovna 3. Hodnota k – kritické hodnoty byla rovna 1,4223.

Podle získaných výsledky k – statistiky žádný z hodnocených spektrofotometrů 1 – 3 nebyl vyřazen z dalšího hodnocení, protože u žádného z nich nedošlo k překročení k – kritické hodnoty. V tabulce 7.1 můžeme vidět výsledky pro dlouhodobé a krátkodobé měření. Písmeno **K** označuje výsledky pro krátkodobou preciznost, písmeno **D** pro dlouhodobou preciznost.

Opakovatelnost měření při sledování krátkodobé i dlouhodobé preciznosti je z hlediska směrodatné odchylky opakovatelnosti s_r vysoká, tedy preciznost za podmínek opakovatelnosti je vysoká.

Z výsledků získaných provedenou analýzou pomocí Mandelovy vnitrolaboratorní statistiky konzistence je zřejmé, že všechny tři spektrofotometry mají vyšší opakovatelnost při krátkodobém měření než při dlouhodobém měření, avšak celkově lze zhodnotit, že opakovatelnosti měření všech třech posuzovaných spektrofotometrů je vysoká. Z hlediska hodnocení reprodukovatelnosti je však nutné podotknout, že ze získaných výsledků byla nejvíce ovlivněna reprodukovatelnost souřadnice b^* jak v rámci krátkodobých, tak i dlouhodobých měření stejnou měrou. U referenčního spektrofotometru 1 je opakovatelnost i reprodukovatelnost krátkodobého měření vždy vyšší než při dlouhodobém měření, z hlediska k – statistiky má referenční spektrofotometr vždy vyšší preciznost při krátkodobém měření než při dlouhodobém. U spektrofotometru 2 má spektrofotometr vyšší preciznost při dlouhodobém měření než při krátkodobém měření, což ukazuje na fakt, že opětovně provedená kalibrace má na výsledky měření vliv, což souvisí i s použitým bílým standardem.

Na základě výsledků získaných pro souřadnice $L^*a^*b^*$ je potvrzena hypotéza I, kdy preciznost za podmínek opakovatelnosti je vyšší u krátkodobých měření než u dlouhodobých měření. Hypotéza II je potvrzena pro souřadnice L^* a b^* , tedy preciznost za podmínek reprodukovatelnosti je vyšší při krátkodobých měření než u dlouhodobých měření. Pro souřadnici a^* je hypotéza II zamítnuta, tedy preciznost za podmínek reprodukovatelnosti je

vyšší při dlouhodobém měření než při krátkodobém. Z celkového pohledu lze však spektrofotometry 1 – 3 považovat z hlediska opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření považovat za spektrofotometry s vysokou precizností.

7.2.2 Testování vybočujících hodnot Cochranovým testem pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost pro spektrofotometry s $de:8^\circ$

Při testování vybočujících hodnot nebo hodnot s nízkou precizností byly testovány jednotlivé spektrofotometry pomocí *Cochranova testu* podle rovnice (3.76). Před testováním byly stanoveny nulová a alternativní hypotéza III.

A. Cochranův test pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost L^* pro $p = 3, \alpha = 0,05$

$$H_0: s_1^2 = s_2^2 = s_3^2$$

$$H_1: s_{max}^2 \neq \text{se liší od ostatních } s_j^2.$$

V tabulce 7.2 se nacházejí výsledky Cochranova testu krátkodobé a dlouhodobé preciznosti měření.

Tabulka 7.2 – Výsledky Cochranova testu pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost L^*

K	1	2	3	D	1	2	3
s_j^2	1,55E-05	3,75E-05	2,01E-05	s_j^2	0,005	0,002	0,007
C	0,212	0,513	0,275	C	0,355	0,162	0,483

$$C_{max} = 0,513$$

$$C_{kritická} = 0,617$$

$$C_{max} = 0,483$$

$$C_{kritická} = 0,617$$

Hodnota $c_{kritická}$ je větší než C_{max} , platí tedy nulová hypotéza o rovnosti výběrových rozptylů pro souřadnici L^* , tedy mezi spektrofotometry není žádný spektrofotometr s vybočujícími hodnotami nebo hodnotami s nízkou precizností.

Testování vybočujících hodnot a hodnocení preciznosti bylo provedeno stejně i pro obě zbývající souřadnice. V následující *tabulce 7.3* a *7.4* jsou shrnuty výsledky pro souřadnici a^* a b^* .

**B. Cochranův test pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost a^* a b^*
pro $p = 3, \alpha = 0,05$**

$$H_0: s_1^2 = s_2^2 = s_3^2$$

$$H_1: s_{max}^2 \neq \text{se liší od ostatních } s_j^2.$$

Tabulka 7.3 – Výsledky testování vybočujících hodnot pomocí Cochranovy statistiky pro souřadnici

a^*

K	1	2	3	D	1	2	3
s_j^2	8,88E-05	4,47E-04	3,11E-04	s_j^2	0,005	0,005	0,013
C	0,105	0,528	0,367	C	0,235	0,220	0,545

$$C_{max} = 0,528$$

$$c_{kritická} = 0,617$$

$$C_{max} = 0,545$$

$$c_{kritická} = 0,617$$

Tabulka 7.4 – Výsledky testování vybočujících hodnot pomocí Cochranovy statistiky pro souřadnici

b^*

K	1	2	3	D	1	2	3
s_j^2	6,34E-05	2,61E-04	1,02E-04	s_j^2	0,004	0,008	0,003
C	0,149	0,612	0,239	C	0,250	0,536	0,213

$$C_{max} = 0,612$$

$$c_{kritická} = 0,617$$

$$C_{max} = 0,536$$

$$c_{kritická} = 0,617$$

Na základě výsledků uvedených v *tabulkách 7.3* a *7.4* není žádný ze spektrofotometrů vyřazen z dalšího hodnocení. U spektrofotometru 2 v případě krátkodobého měření je hodnota Cochranova testu C blízká $c_{kritická}$ hodnotě, avšak na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ není možné zamítnout nulovou hypotézu.

Na základě testování Cochranovým testem nebyl vyřazen žádný z testovaných spektrofotometrů, tedy byla přijata nulová hypotéza o rovnosti výběrových rozptylů stanovená v hypotéze III.

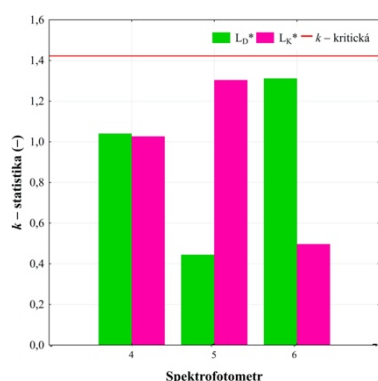
Z výsledků vyplývajících z této části testování lze říci, že lze použít pro následná hodnocení výsledky měření za podmínek uvedených pro krátkodobá měření, tedy ta, která jsou provedena při jedné kalibraci, pokud jsou doplněna hodnotou nejistoty měření a je proveden dostatečný počet opakovaných měření.

7.2.3 Krátkodobá a dlouhodobá preciznost měření spektrofotometrů s difúzní měřicí geometrií $di:8^\circ$

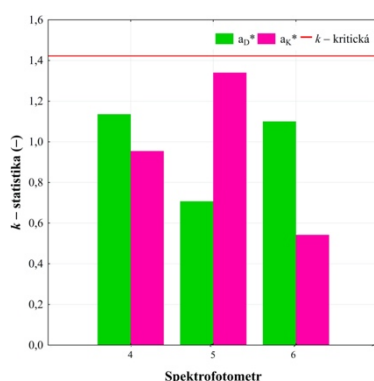
Hodnocení preciznosti měření je v této části provedeno rovněž pomocí Mandelovy vnitrolaboratorní statistiky konzistence k a vyjádření opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření pomocí směrodatných odchylek opakovatelnosti s_r a reprodukovatelnosti s_R . Grafické výsledky k – statistiky pro jednotlivé souřadnice z prostoru CIELAB jsou zobrazeny na grafech na *obrázcích 7.4 – 7.6*. Výsledky vyobrazené na těchto grafech odpovídají vypočtené krátkodobé a dlouhodobé preciznosti vyjádřené pro spektrofotometry s měřicí geometrií $di:8^\circ$.

Pro výpočet k – kritické hodnoty byla použita hodnota F rozdělení rovna 4,1410, hodnota n je rovna 10 a hodnota p je rovna 3. Hodnota k – kritické hodnoty byla rovna 1,4223.

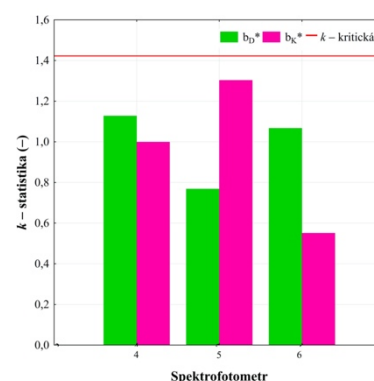
Podle získaných výsledky k – statistiky žádný z hodnocených spektrofotometrů 4 – 6 nebyl vyřazen z dalšího hodnocení, protože u žádného z nich nedošlo k překročení k – kritické hodnoty. V *tabulce 7.5* můžeme vidět výsledky pro dlouhodobé a krátkodobé měření.



Obrázek 7.4 – Výsledky k – statistiky pro preciznost měření spektrofotometrů s $di:8^\circ - L^*$



Obrázek 7.5 – Výsledky k – statistiky pro preciznost měření spektrofotometrů s $di:8^\circ - a^*$



Obrázek 7.6 – Výsledky k – statistiky pro preciznost měření spektrofotometrů s $di:8^\circ - b^*$

Tabulka 7.5 – Výsledky preciznosti pro spektrofotometry s měřicí geometrií di:8°

Veličín y	L_D^*	L_K^*	a_D^*	a_K^*	b_D^*	b_K^*
\bar{x}	56,88±0,14	56,93±0,09	-31,09±0,19	-31,18±0,19	13,40 ±0,92	13,44 ±0,92
$s_{\bar{x}}$	0,11	0,07	0,15	0,15	0,69	0,74
s_r	0,01	0,01	0,04	0,02	0,02	0,02
s_R	0,11	0,07	0,15	0,15	0,70	0,74

Preciznost měření za podmínek opakovatelnosti je u všech hodnocených spektrofotometrů 4 – 6 a souřadnice CIELAB vždy vyšší u krátkodobých měření než u dlouhodobých měření. Na základě těchto výsledků je přijata hypotéza I.

Preciznost měření za podmínek reprodukovatelnosti je pro souřadnice L^* a a^* vyšší u krátkodobých měření než u dlouhodobých měření, tedy je přijata hypotéza II. Hypotéza II je zamítnuta pro souřadnici b^* , kde je reprodukovatelnost vyšší při dlouhodobém měření než při krátkodobém.

Z výsledků získaných provedenou analýzou pomocí Mandelovy vnitrolaboratorní statistiky konzistence je zřejmé, že všechny tři spektrofotometry 4 – 6 mají vyšší opakovatelnost při krátkodobém měření než při dlouhodobém měření, celkově lze zhodnotit, že opakovatelnost měření všech třech posuzovaných spektrofotometrů je vysoká.

Preciznost měření hodnocená podle k – statistiky je u referenčního spektrofotometru 4 vždy nižší pro krátkodobá měření než pro dlouhodobá stejně jako u spektrofotometru 6. Naopak je tomu u spektrofotometru 5, kde má naopak dlouhodobé měření vyšší preciznost než u krátkodobé.

7.2.4 Testování vybočujících hodnot Cochranovým testem pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost pro spektrofotometry s di:8°

Při testování vybočujících hodnot nebo hodnot s nízkou precizností byly testovány jednotlivé spektrofotometry pomocí *Cochranova testu* podle rovnice (3.76). Před testováním byly stanoveny nulová a alternativní hypotéza III.

A. Cochranův test pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost L^* pro $p = 3, \alpha = 0,05$

$$H_0: s_1^2 = s_2^2 = s_3^2$$

$$H_1: s_{max}^2 \neq \text{se liší od ostatních } s_j^2.$$

V *tabulce 7.6* se nacházejí výsledky Cochranova testu krátkodobé a dlouhodobé preciznosti měření.

Tabulka 7.6 – Výsledky Cochranova testu pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost L^*

K	4	5	6	D	4	5	6
s_j^2	3,78E-05	6,10E-05	8,86E-06	s_j^2	2,94E-04	4,00E-05	3,48E-04
C	0,351	0,567	0,082	C	0,361	0,066	0,573

$$C_{max} = 0,567$$

$$c_{kritická} = 0,617$$

$$C_{max} = 0,573$$

$$c_{kritická} = 0,617$$

Hodnota $c_{kritická}$ je větší než C_{max} , platí tedy nulová hypotéza o rovnosti výběrových rozptylů pro souřadnici L^* , tedy mezi spektrofotometry není žádný spektrofotometr s vybočujícími hodnotami nebo hodnotami s nízkou precizností.

**B. Cochranův test pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost a^* a b^*
pro $p = 3, \alpha = 0,05$**

$$H_0: s_1^2 = s_2^2 = s_3^2$$

$$H_1: s_{max}^2 \neq \text{se liší od ostatních } s_j^2.$$

Testování vybočujících hodnot a hodnocení preciznosti bylo provedeno stejně i pro obě zbývající souřadnice. V následující *tabulce 7.7* a *7.8* jsou shrnuty výsledky pro souřadnici a^* a b^* .

Tabulka 7.7 – Výsledky testování vybočujících hodnot pomocí Cochranovy statistiky pro souřadnici

a^*

K	4	5	6	D	4	5	6
s_j^2	5,22E-04	1,03E-03	1,68E-04	s_j^2	0,003	0,001	0,003
C	0,304	0,598	0,098	C	0,430	0,167	0,403

$$C_{max} = 0,598$$

$$c_{kritická} = 0,617$$

$$C_{max} = 0,430$$

$$c_{kritická} = 0,617$$

Tabulka 7.8 – Výsledky testování vybočujících hodnot pomocí Cochranovy statistiky pro souřadnici b^*

K	1	2	3	D	1	2	3
s_j^2	3,77E-04	6,40E-04	1,15E-04	s_j^2	0,001	2,62E-04	0,001
C	0,333	0,566	0,101	C	0,424	0,197	0,380

$$C_{max} = 0,566$$

$$c_{kritická} = 0,617$$

$$C_{max} = 0,424$$

$$c_{kritická} = 0,617$$

Na základě výsledků uvedených v *tabulkách* 7.7 a 7.8 není žádný ze spektrofotometrů vyřazen z dalšího hodnocení na základě vybočujících hodnot.

Na základě testování Cochranovým testem nebyl vyřazen žádný z testovaných spektrofotometrů, tedy byla přijata nulová hypotéza o rovnosti výběrových rozptylů stanovená v hypotéze III.

7.3 Výsledky a diskuze pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií

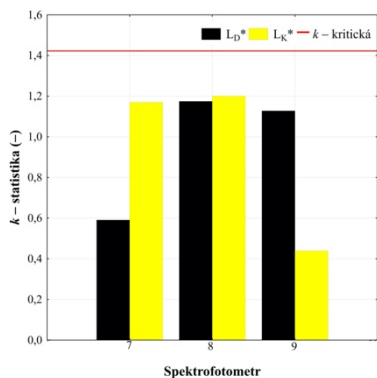
V následující části budou uvedeny výsledky pro skupinu spektrofotometrů s úhlovou měřicí geometrií (spektrofotometry 7 – 9).

Z naměřených hodnot spektrálního činitele odrazu β_λ naměřených na jednotlivých spektrofotometrech pro hodnocení krátkodobé a dlouhodobé preciznosti měření byly vypočteny hodnoty souřadnic $L^*a^*b^*$ z prostoru CIELAB. Při hodnocení preciznosti měření byly odděleně hodnoceny výsledky pro měrnou světlost L^* a pro osy barevnosti a^* a b^* .

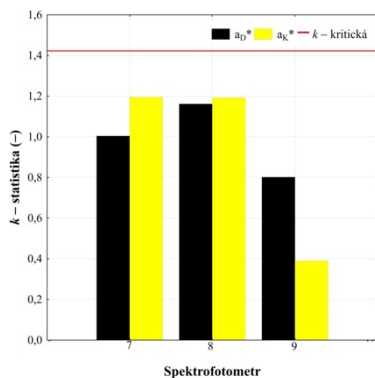
Krátkodobá a dlouhodobá preciznost je hodnocena pomocí Mandelovy vnitrolaboratorní statistiky konzistence k a vyjádření opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření pomocí směrodatných odchylek opakovatelnosti s_r a reprodukovatelnosti s_R .

7.3.1 Krátkodobá a dlouhodobá preciznost měření spektrofotometrů s úhlovou měřicí geometrií

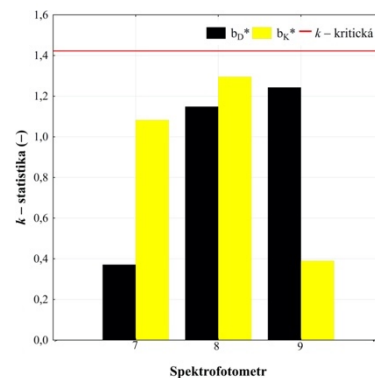
Na grafech na *obrázcích 7.7 – 7.9* jsou uvedeny grafické výsledky k – statistiky pro souřadnice z prostoru CIELAB pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost spektrofotometrů 7 – 9.



Obrázek 7.7 – Výsledky k – statistiky pro preciznost měření spektrofotometrů úhlovou měřicí geometrií – L^*



Obrázek 7.8 – Výsledky k – statistiky pro preciznost měření spektrofotometrů úhlovou měřicí geometrií – a^*



Obrázek 7.9 – Výsledky k – statistiky pro preciznost měření spektrofotometrů úhlovou měřicí geometrií – b^*

Z hlediska preciznosti měření hodnocené pomocí k – statistiky je u referenčního spektrofotometru 7 a spektrofotometru 8 k – statistiky vždy vyšší pro krátkodobé měření než pro dlouhodobé měření. U spektrofotometru 9 je tomu naopak. Odlišnost výsledků pro souřadnici b^* může být způsobena jednak odlišným simulátorem osvětlení D65, ale také velikostí měřicího otvoru, která je pouze 4 mm a může tak při měření docházet k větším odchylkám než u spektrofotometrů s větším měřicím otvorem.

Krátkodobá i dlouhodobá preciznost měření byla dále hodnocena pomocí opakovatelnosti s_r a reprodukovatelnosti měření s_R . Výsledky tohoto hodnocení jsou uvedeny v následující *tabulce 7.9*. Výsledky jsou doplněny o hodnoty \bar{x} a $s_{\bar{x}}$ a hodnoty nejistoty. Pro výpočet k – kritické hodnoty byla použita hodnota F rozdělení rovna 4,1410, hodnota n je rovna 10 a hodnota p je rovna 3. Hodnota k – kritické hodnoty byla rovna 1,4223.

Z výsledků uvedených v *tabulce 7.9* je patrné, že nejvíce ovlivněna byla reprodukovatelnost u souřadnice b^* , kde oproti dlouhodobému měření byla její hodnota o 2,4x nižší než u krátkodobého měření. Opakovatelnost měření je u všech souřadnic vždy vyšší u krátkodobých než u dlouhodobých měření. Na základě těchto výsledků je u všech souřadnic přijata hypotéza I a hypotéza II je přijata pouze u souřadnice L^* .

Tabulka 7.9 – Výsledky krátkodobé a dlouhodobé preciznosti pro hodnocené spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií

Veličiny	L_D^*	L_K^*	a_D^*	a_K^*	b_D^*	b_K^*
\bar{x}	53,49±0,29	53,53±0,27	-37,22±0,19	-37,43±0,24	19,13 ±0,39	13,44 ±0,92
$s_{\bar{x}}$	0,22	0,21	0,14	0,18	0,30	0,74
s_r	0,06	0,02	0,09	0,04	0,08	0,02
s_R	0,23	0,21	0,17	0,19	0,31	0,74

7.3.2 Testování vybočujících hodnot Cochranovým testem pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií

A. Cochranův test pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost L^* pro $p = 3, \alpha = 0,05$

$$H_0: s_1^2 = s_2^2 = s_3^2$$

$$H_1: s_{max}^2 \neq \text{se liší od ostatních } s_j^2$$

V tabulce 7.10 se nacházejí výsledky Cochranova testu krátkodobé a dlouhodobé preciznosti měření.

Tabulka 7.10 – Tabulka s výsledky Cochranova testu pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost souřadnice L^*

K	7	8	9	D	7	8	9
s_j^2	4,27E-04	4,50E-04	6,01E-05	s_j^2	0,002	0,006	0,006
C	0,456	0,480	0,064	C	0,116	0,460	0,424

$$C_{max} = 0,480$$

$$C_{kritická} = 0,617$$

$$C_{max} = 0,460$$

$$C_{kritická} = 0,617$$

Hodnota $c_{kritická}$ je větší než C_{max} , platí tedy nulová hypotéza o rovnosti výběrových rozptylů pro souřadnici L^* , tedy mezi spektrofotometry není žádný spektrofotometr s vybočujícími hodnotami nebo hodnotami s nízkou precizností.

**B. Cochranův test pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost a^* a b^*
pro $p = 3, \alpha = 0,05$**

$$H_0: s_1^2 = s_2^2 = s_3^2$$

$$H_1: s_{max}^2 \neq \text{se liší od ostatních } s_j^2$$

Testování vybočujících hodnot a hodnocení preciznosti bylo provedeno stejně i pro obě zbývající souřadnice. V následující *tabulce 7.11* a *7.12* jsou shrnuty výsledky pro souřadnici a^* a b^* .

Tabulka 7.11 – Výsledky testování vybočujících hodnot pomocí Cochranovy statistiky pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost souřadnice a^*

K	7	8	9	D	7	8	9
s_j^2	0,003	0,003	2,18E-04	s_j^2	0,009	0,013	0,006
C	0,476	0,473	0,051	C	0,336	0,450	0,214

$$C_{max} = 0,476$$

$$c_{kritická} = 0,617$$

$$C_{max} = 0,450$$

$$c_{kritická} = 0,617$$

Tabulka 7.12 – Výsledky testování vybočujících hodnot pomocí Cochranovy statistiky pro krátkodobou a dlouhodobou preciznost souřadnice b^*

K	7	8	9	D	7	8	9
s_j^2	0,006	0,008	0,001	s_j^2	0,001	0,009	0,010
C	0,391	0,559	0,051	C	0,046	0,439	0,515

$$C_{max} = 0,559$$

$$c_{kritická} = 0,617$$

$$C_{max} = 0,515$$

$$c_{kritická} = 0,617$$

Na základě výsledků uvedených v *tabulkách 7.11 a 7.12* není žádný ze spektrofotometrů vyřazen z dalšího hodnocení.

Na základě testování Cochranovým testem nebyl vyřazen žádný z testovaných spektrofotometrů, tedy byla přijata nulová hypotéza o rovnosti výběrových rozptylů stanovená v hypotéze III.

U většina hodnocení byla variabilita C_{max} vyšší pro krátkodobá měření než pro dlouhodobá měření s výjimkou souřadnice a^* u geometrie $de:8^\circ$ (spektrofotometr 3) a L^* u geometrie $di:8^\circ$ (spektrofotometr 6).

7.4 Hodnocení přesnosti měření

Hodnocení přesnosti měření spočívá v hodnocení blízkosti shody mezi výsledkem testu a očekávanou hodnotou, jak bylo zmíněno výše. Hodnocení přesnosti je ovlivněno systematickými, soustavnými chybami, jejichž velikost můžeme zmírnit či vyloučit například kalibrací nebo korekcí. Pro hodnocení přesnosti měření je během následujících vyhodnocení a diskuzí použita Mezilaboratorní statistika konzistence h , pomocí které je hodnoceno, jak se mezi sebou shodují hodnoty získané během jedné provedené kalibrace (krátkodobá přesnost) a hodnoty získané po opakovaně provedené kalibraci (dlouhodobá přesnost). Dále budou testovány odlehlé hodnoty pomocí Grubbsova testu odlehlých hodnot pro každý jeden spektrofotometr. Odděleně jsou hodnoceny stejně jako v předchozí části, kde byla hodnocena preciznost měření, spektrofotometry s difúzní a úhlovou měřicí geometrií.

Jako vstupní hodnoty pro hodnocení přesnosti jsou použity vypočtené hodnoty $L^*a^*b^*$ z prostoru CIELAB, jenž budou hodnoceny odděleně jako kapitolách.

7.5 Výsledky a diskuze pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií

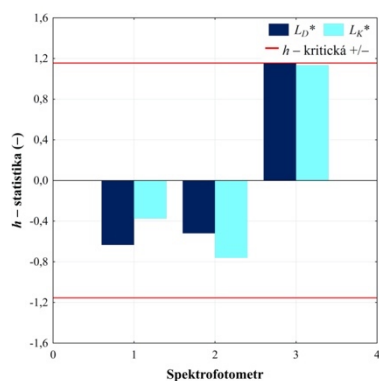
7.5.1 Krátkodobá a dlouhodobá přesnost pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií $de:8^\circ$

V rámci hodnocení přesnosti budou postupně vyhodnocovány a diskutovány výsledky získané pro jednotlivé souřadnice CIELAB.

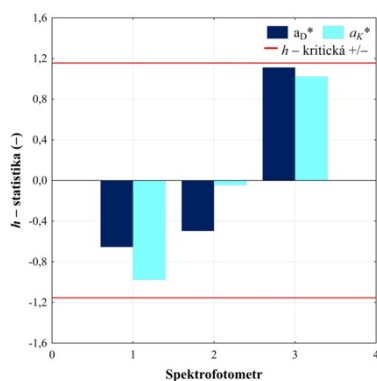
Pro výpočet h – kritické hodnoty byla použita hodnota Studentova rozdělení t rovna 127,3213, hodnota p rovna 3 a hodnota rovna $\alpha = 0,005$. Hodnota h – kritické hodnoty je rovna $\pm 1,1547$.

Grafy na *obrázcích 7.10 – 7.12* ukazují výsledky h – statistiky pro krátkodobou a dlouhodobou přesnost pro jednotlivé barevné souřadnice.

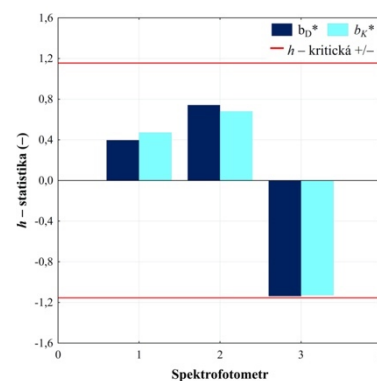
Jak je možné vidět, výsledky h – statistiky pro všechny souřadnice ani pro jeden spektrofotometr nepřesáhly hodnotu h – kritické hodnoty. Hodnoty h – statistiky větší než 0 značí, že aritmetický průměr pro konkrétní spektrofotometr je menší než celkový aritmetický průměr pro všechny spektrofotometry. Analogicky pak platí to samé pro hodnoty h – statistiky menší než 0.



Obrázek 7.10 – Výsledky h – statistiky pro přesnost – L^*



Obrázek 7.11 – Výsledky h – statistiky pro přesnost – a^*



Obrázek 7.12 – Výsledky h – statistiky pro přesnost – b^*

Z výsledků je jasně patrné, že nejméně přesné výsledky (výsledky s nejvyššími hodnotami h – statistiky) jsou pro spektrofotometr 3. U všech třech souřadnic jsou hodnoty h – statistiky blízké hodnotě h – kritické hodnoty. Z hlediska výsledků, jsou hodnoty h – statistiky blízké pro všechny souřadnice v případě dlouhodobé přesnosti pro referenční spektrofotometr 1. Nejvíce je ovlivněna přesnost v případě souřadnice a^* .

U všech spektrofotometrů zůstala stejná směřovost h – statistiky (záporná nebo kladná) u výsledků krátkodobé i dlouhodobé přesnosti, což značí to, že způsob měření nemá vliv na hodnoty přesnosti.

Hypotéza IV stanovená pro hodnocení přesnosti měření byla pro spektrofotometry s de:8° geometrií přijata pro spektrofotometr 1 pro souřadnici L^* , pro spektrofotometr 2 pro souřadnice a^* a b^* a spektrofotometr 3 pro souřadnice L^* a a^* . Pro ostatní souřadnice byla hypotéza IV na základě zmíněných výsledků zamítnuta.

7.5.2 Hodnocení přesnosti podle Grubbsova testu odlehlých hodnot pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií de:8°

Pro testování odlehlých hodnot z měření pro každý spektrofotometr byl zvolen oboustranný Grubbsův test podle rovnice (3.83).

Před testováním každého spektrofotometru byla stanovena nulová H_0 a alternativní hypotéza H_1 . Nulová hypotéza H_0 je definována pro případ, kdy mezi hodnotami není žádná odlehlá hodnota. Alternativní hypotéza H_1 je definována pro případ, kdy mezi hodnotami je právě jedna odlehlá hodnota (hypotéza V).

Hodnota kritické hodnoty Grubbsova testu je rovna 2,290 a hladina α je rovna 0,05.

Při testování odlehlých hodnot podle Grubbsova testu pro spektrofotometry při hodnocení krátkodobé i dlouhodobé přesnosti byla u všech spektrofotometrů přijata nulová hypotéza H_0 na hladině α , tedy pro všechny spektrofotometry byla testová statistika oboustranného Grubbsova testu menší než kritická hodnota 2,290, tedy byla přijata hypotéza V.

7.5.3 Krátkodobá a dlouhodobá přesnost pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií di:8°

Pro výpočet h – kritické hodnoty byla použita hodnota Studentova rozdělení t rovna 127,3213, hodnota p rovna 3 a hodnota rovna $\alpha = 0,005$. Hodnota h – kritické hodnoty je rovna $\pm 1,1547$.

Grafy na *obrázcích 7.13. – 7.15* ukazují výsledky h – statistiky pro krátkodobou a dlouhodobou přesnost pro souřadnice $L^* a^* b^*$.

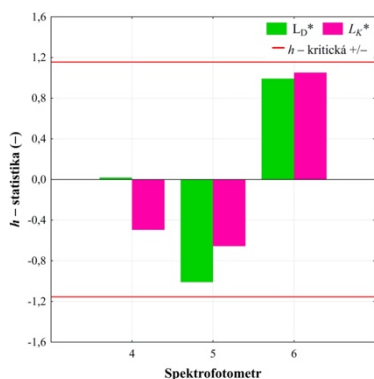
Jak je možné vidět, výsledky h – statistiky pro všechny souřadnice ani pro jeden spektrofotometr nepřesáhly hodnotu h – kritické hodnoty.

U všech spektrofotometrů zůstala stejná směrovost h – statistiky u výsledků krátkodobé i dlouhodobé přesnosti až na spektrofotometr 4, kde je v případě souřadnice L^* hodnota rovna 0,02, což ukazuje na to, že se tato hodnota nepříliš liší od průměru z průměrů.

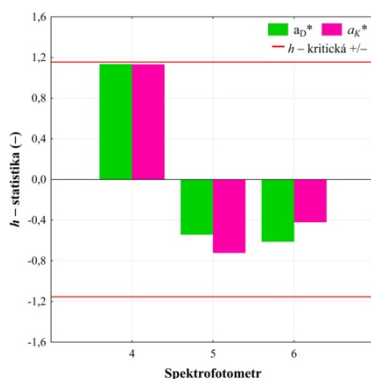
Nejvíce je ovlivněna přesnost měření v případě souřadnice a^* u referenčního spektrofotometru 4 oproti spektrofotometrům 5 a 6 a L^* a b^* u spektrofotometru 6 oproti spektrofotometrům 4 a 5.

Hypotéza IV stanovená pro hodnocení přesnosti měření byla pro spektrofotometry s di:8° geometrií přijata pro spektrofotometr 4 pro souřadnici b^* , pro spektrofotometr 5 pro souřadnici L^* a spektrofotometr 6 pro souřadnici a^* .

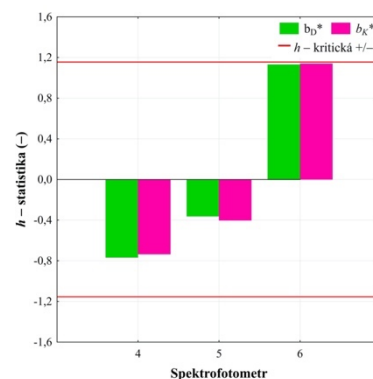
Pro ostatní souřadnice byla hypotéza IV na základě zmíněných výsledků zamítnuta, tedy více přesnější jsou měření v případě dlouhodobého měření.



Obrázek 7.13 – Výsledky h – statistiky pro přesnost – L^*



Obrázek 7.14 – Výsledky h – statistiky pro přesnost – a^*



Obrázek 7.15 – Výsledky h – statistiky pro přesnost – b^*

7.5.4 Hodnocení přesnosti podle Grubbsova testu odlehlých hodnot pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií di:8°

Před testováním každého spektrofotometru byla stanovena nulová H_0 a alternativní hypotéza H_1 . Hodnota kritické hodnoty Grubbsova testu je rovna 2,290 a hladina α je rovna 0,05. Pro testování odlehlých hodnot z měření pro každý spektrofotometr byl zvolen oboustranný Grubbsův test podle rovnice (3.83).

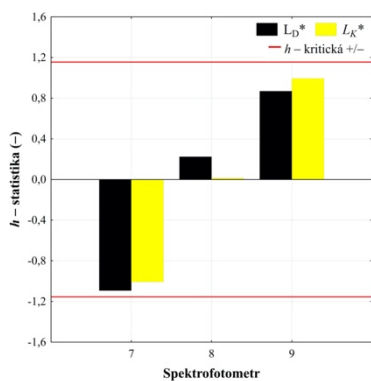
Při testování odlehlých hodnot podle Grubbsova testu pro spektrofotometry při hodnocení krátkodobé i dlouhodobé přesnosti byla u všech spektrofotometrů přijata nulová hypotéza H_0 na hladině α , tedy pro všechny spektrofotometry byla testová statistika oboustranného Grubbsova testu menší než kritická hodnota 2,290, na základě toho byla přijata hypotéza V , tedy mezi výsledky měření není žádná odlehlá hodnota.

7.6 Výsledky a diskuze pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií

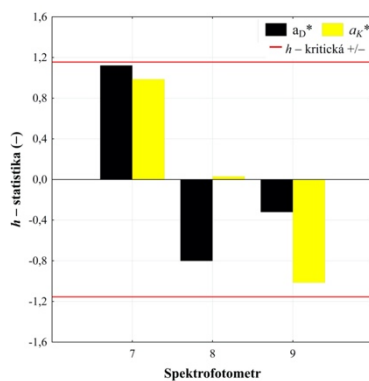
Pro výpočet h – kritické hodnoty byla použita hodnota Studentova rozdělení t rovna 127,3213, hodnota p rovna 3 a hodnota rovna $\alpha = 0,005$. Hodnota h – kritické hodnoty je rovna $\pm 1,1547$.

Grafy na obrázcích 7.16 – 7.18 ukazují výsledky h – statistiky pro krátkodobou a dlouhodobou pravdivost pro jednotlivé barevné souřadnice.

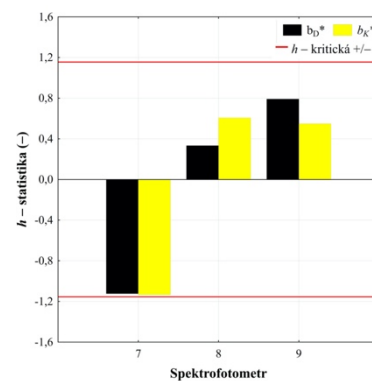
Z výsledků na grafech 7.16 – 7.18 je patrné, že spektrofotometr s nejmenší přesností je referenční spektrofotometr 7. Oproti ostatním spektrofotometrům je u všech třech souřadnic hodnota h – statistiky blízká hodnotě h – kritické hodnotě, avšak ani v jednom případě tuto hranici nepřekračuje, jakožto i ostatní spektrofotometry.



Obrázek 7.16 – Výsledky h – statistiky pro přesnost – L^*



Obrázek 7.17 – Výsledky h – statistiky pro přesnost – a^*



Obrázek 7.18 – Výsledky h – statistiky pro přesnost – b^*

Směrovost h – statistiky je stejná pro všechny spektrofotometry u krátkodobé i dlouhodobé přesnosti měření vyjma spektrofotometru 8 u souřadnice a^* , kde u krátkodobé přesnosti je hodnota kladná (0,029) oproti záporné hodnotě při dlouhodobém měření.

Ze získaných výsledků lze říci, že výsledky ze spektrofotometrů 8 a 9 jsou blízké, ale liší se od měření získaného na referenčním spektrofotometru 7.

Hypotéza IV stanovená pro hodnocení přesnosti měření byla pro spektrofotometry s úhlovou geometrií přijata pro spektrofotometry 7 a 8 pro souřadnice a^* a L^* . Pro ostatní souřadnice byla hypotéza IV na základě zmíněných výsledků zamítnuta.

7.6.1 Hodnocení přesnosti podle Grubbsova testu odlehlých hodnot pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií

Před testováním každého spektrofotometru byla stanovena nulová H_0 a alternativní hypotéza H_1 . Hodnota kritické hodnoty Grubbsova testu je rovna 2,290 a hladina α je rovna 0,05. Pro testování odlehlých hodnot z měření pro každý spektrofotometr byl zvolen oboustranný Grubbsův test podle rovnice (3.83).

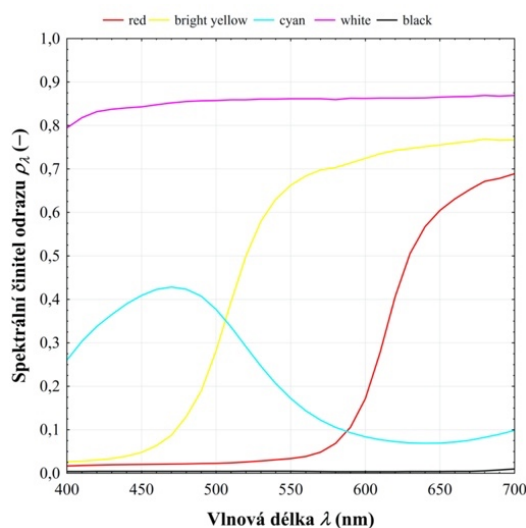
Při testování odlehlých hodnot podle Grubbsova testu pro spektrofotometry při hodnocení krátkodobé i dlouhodobé přesnosti byla u všech spektrofotometrů přijata nulová hypotéza H_0 na hladině α , tedy pro všechny spektrofotometry byla testová statistika oboustranného Grubbsova testu menší než kritická hodnota 2,290, na základě tohoto byla přijata hypotéza V, která říká, že mezi hodnotami není žádná odlehlá hodnota.

8. Hodnocení chyb měření při spektrofotometrických měřeních

V případě přesnosti měření se používají kalibrované sady standardů (CCS Series II). V této práci byla pro zjištění přesnosti měření použita sada 12 standardů Datacolor SN355 vyrobená vyříznutím ze sady CCS Series II (obrázek 8.1). Tuto sadu tvoří standardy: pale grey, mid grey, deep grey, deep pink, red, orange, bright yellow, green, cyan, deep blue, white a black.



Obrázek 8.1 – Sada standardů s označením Datacolor SN355



Obrázek 8.2 – Ukázka hodnot spektrálního činitele odrazu ρ_λ pro vybrané standardy naměřené na referenčním spektrofotometru 1

Všechny standardy ze sady Datacolor SN355 (standardy vyrobeny ze standardů C.C.S. Series II od British Ceramic Research Limited) byly změřeny na spektrofotometrech z tabulky 6.1, podle podmínek uvedených v tabulce 6.2. Na obrázku 8.2 se nachází graf spektrálního činitele odrazu ρ_λ s 5 vybranými standardy ze sady Datacolor SN355, které byly naměřeny na referenčním spektrofotometru 1 pro difúzní geometrii $d_e:8^\circ$.

8.1 Postup zpracování dat

Pro následné zpracování naměřených dat byla vybrána data spektrálního činitele odrazu pro všechny standardy odděleně pro všechny referenční spektrofotometry, dále data spektrálního činitele odrazu ρ_λ nebo β_λ pro ostatní posuzované spektrofotometry. Pro všechny spektrofotometry byla použita spektrální data v rozsahu 400 – 700 nm s rozlišením 10 nm.

Prvním krokem zpracování dat byl výpočet první (8.1) a druhé derivace (8.2) spektrálního činitele odrazu podle vlnové délky.

$$\frac{d\rho_t(\lambda)}{d\lambda} = \frac{\rho_{i+10} - \rho_i}{\lambda} \quad (8.1)$$

kde ρ_t je hodnota spektrálního činitele odrazu, λ je rozlišení vlnové délky.

$$\frac{d^2\rho_t(\lambda)}{d\lambda^2} = \frac{d\rho_{i+10} - d\rho_i}{\lambda^2} \quad (8.2)$$

kde ρ_t je hodnota spektrálního činitele odrazu, λ je rozlišení vlnové délky.

Pro získání hodnot chyby určení nulového odrazu β_0 (3.88), chyby určení fotometrické veličiny β_1 (3.89), chyby určení vlnové délky β_2 (3.90) a chyby určení šířky spektrálního pásu β_3 (3.91) byla použita vícenásobná regrese (3.87).

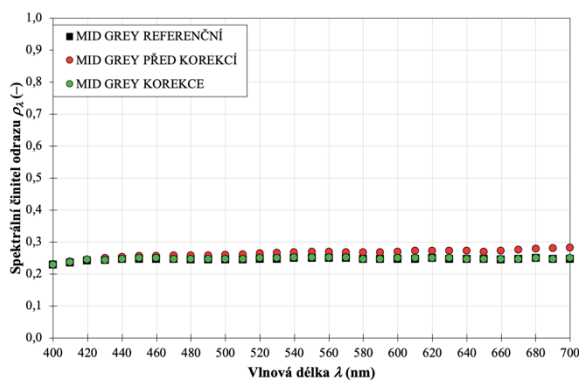
V následujícím vyhodnocení jsou ukázány a popsány výpočty pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií $d_e:8^\circ$ (spektrofotometr 1 – 3) a s $d_i:8^\circ$ (spektrofotometr 4 – 6) a s úhlovou měřicí geometrií (spektrofotometry 7 – 9).

8.2 Výsledky a diskuze pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií $d_e:8^\circ$

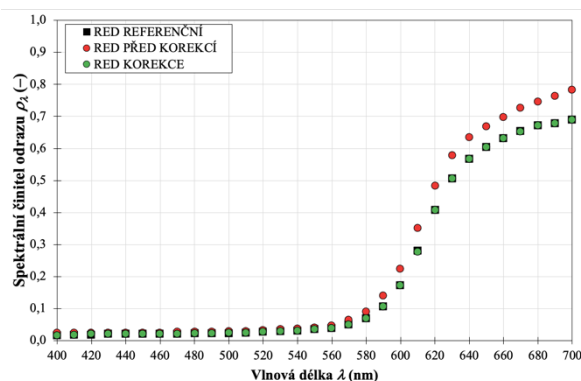
V *tabulce 8.1* jsou uvedeny hodnoty spektrálního činitele odrazu ρ_λ pro vlnovou délku 500 nm pro referenční spektrofotometr 1 a spektrofotometr 3, dále poté hodnoty 1. a 2. derivace pro spektrofotometr 3 a 2. Následující postup byl využit pro všechny vlnové délky v rozsahu 400 – 700 nm.

Grafické výsledky pro data z *tabulky 8.1* jsou na *obrázcích 8.3 – 8.6* pro standardy mid grey, red, green a cyan před a po korekci spektrofotometru 3 na referenční spektrofotometr 1.

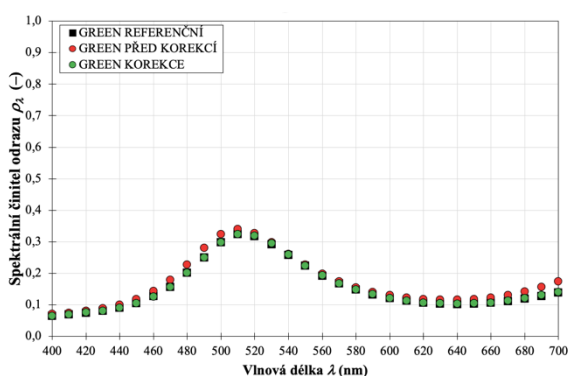
Na hodnoty spektrálního činitele odrazu ρ_λ měla nejvýraznější vliv korekce u vzorku mid grey. Pro tento standard měla korekce za následek snížení ρ_λ v oblasti 430 – 700 nm, tedy téměř v celém rozsahu vlnových délek. Největší vliv měla korekce na snížení spektrálního činitele odrazu ρ_λ na vlnových délkách delších než 500 nm. U vzorku green došlo vlivem korekce k hypochromnímu posunu v celém rozsahu vlnových délek. Hlavním důvodem je změna bílého kalibračního standardu způsobená jeho opotřebením a zažloutnutím. Tento vliv byl zmíněn i v kapitole 6.



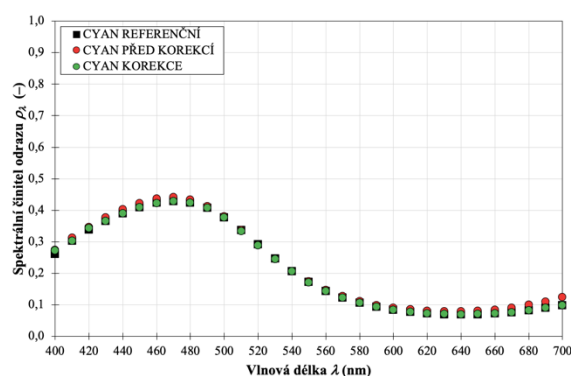
Obrázek 8.3 – Spektrální činitel odrazu ρ_λ standardu mid grey pro spektrofotometr 3 před a po korekci



Obrázek 8.4 – Spektrální činitel odrazu ρ_λ standardu red pro spektrofotometr 3 před a po korekci



Obrázek 8.5 – Spektrální činitel odrazu ρ_λ standardu green pro spektrofotometr 3 před a po korekci



Obrázek 8.6 – Spektrální činitel odrazu ρ_λ standardu cyan pro spektrofotometr 3 před a po korekci

V *tabulce 8.2* jsou shrnuty hodnoty nejistot β_0 , β_1 , β_2 a β_3 pro vybrané vlnové délky 450, 500, 550, 600 a 650 nm pro spektrofotometr 3.

Nízké hodnoty nejistot β_2 a β_3 jsou způsobeny 1. a 2. derivací. Hodnoty z *tabulky 8.2* jsou použity pro výpočet nových hodnot spektrálního činitele odrazu označených jako hodnoty po korekci uvedených v šestém sloupci v *tabulce 8.1*.

K výpočtu hodnot po korekci je použita *rovnice (3.87)*, respektive „ukázková“ *rovnice (8.3)*, která z *rovnice (3.87)* vychází, jejímž výsledkem je změna hodnoty spektrálního činitele odrazu ρ_λ pro standard mid grey z hodnoty před korekcí 0,259 na hodnotu po korekci 0,247.

Tabulka 8.1 – Hodnoty spektrálního činitele odrazu ρ_λ pro spektrofotometry 1 a 3 před korekcí a spektrofotometru 3 po korekci pomocí vícenásobné regrese

Standard	$\rho_{500 \text{ nm}}$ pro spektrofotometr 1	$\rho_{500 \text{ nm}}$ pro spektrofotometr 3	1.derivace $\rho_{500 \text{ nm}}$ pro spektrofotometr 3	2.derivace $\rho_{500 \text{ nm}}$ pro spektrofotometr 3	$\rho_{500 \text{ nm}}$ pro spektrofotometr 3 po korekci
pale grey	0,587	0,613	5,357E-04	4,280E-06	0,587
mid grey	0,245	0,259	1,943E-04	1,584E-06	0,247
deep grey	0,045	0,050	4,316E-04	3,183E-07	0,045
deep pink	0,072	0,078	-2,470E-04	1,298E-06	0,072
red	0,023	0,028	1,067E-04	4,983E-07	0,023
orange	0,059	0,067	4,220E-04	2,569E-06	0,060
bright yellow	0,282	0,335	1,045E-02	3,079E-05	0,281
green	0,297	0,324	4,443E-03	-7,626E-06	0,297
cyan	0,377	0,379	-3,328E-03	-1,194E-05	0,376
deep blue	0,016	0,018	-2,328E-04	1,552E-06	0,015
white	0,858	0,895	8,711E-04	4,949E-06	0,857
black	0,004	0,007	1,774E-05	3,883E-07	0,003

Tabulka 8.2 – Hodnoty parametrů nejistot pro vybrané vlnové délky pro spektrofotometr 3

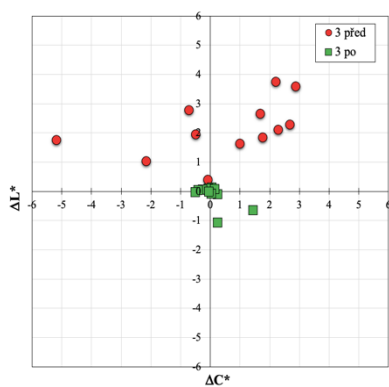
Vlnová délka λ (nm)	Hodnoty nejistot			
	β_0	β_1	β_2	β_3
450	-3,45E-03	0,99	-3,86	-249,50
500	-3,15E-03	0,97	-3,13	-197,58
550	-2,81E-03	0,94	-3,63	-141,26
600	-3,04E-03	0,93	-3,64	-104,83
650	-3,26E-03	0,92	-3,43	-127,01

$$\rho_1(500) = -0,01 + 1,02\rho_3(500) + 0,10\frac{d\rho_3(500)}{d10} + 0,10\frac{d^2\rho_3(500)}{d10^2} \quad (8.3)$$

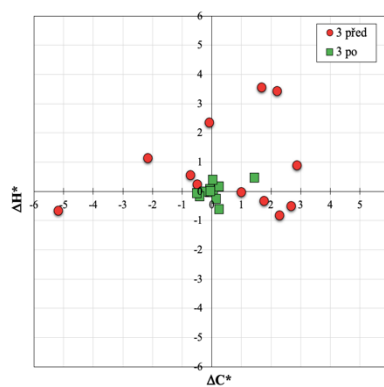
kde ρ_1 odpovídá hodnotě spektrálního činitele odrazu $\rho_\lambda = 500$ pro referenční spektrofotometr 1, ρ_3 odpovídá hodnotě spektrálního činitele odrazu $\rho_\lambda = 500$ pro spektrofotometr 3.

Změna v hodnotách spektrálního činitele odrazu ρ_λ přinesla i změny v hodnotách odchylek kolorimetrických souřadnic $L^*a^*b^*$ před a po korekci na referenční spektrofotometr 1. Změna všech hodnot barevnosti je vyjádřena pomocí odchylek v měrné světlosti ΔL^* , chroma ΔC^* a v úhlu barevného tónu ΔH^* a odchylek barevnosti Δa^* , Δb^* , tato změna je uvedena v *tabulce 8.3* společně s hodnotami barevných odchylek vyjádřených vůči referenčnímu spektrofotometru před korekcí a po korekci. Všechny hodnoty v *tabulce 8.3* jsou vypočteny pro osvětlení D65 a standardního kolorimetrického pozorovatele CIE 1931.

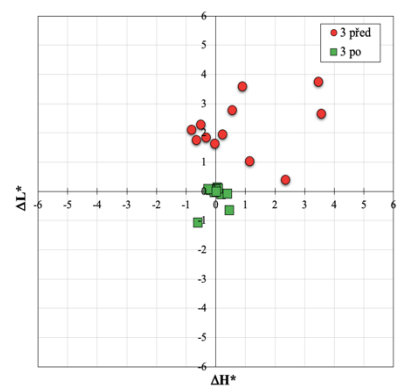
Na *obrázku 8.7 – 8.9* jsou zobrazeny grafy rozdílů vyjadřující změnu měrné světlosti ΔL^* v závislosti na změně chroma ΔC^* , změnu měrného odstínu ΔH^* v závislosti na změně chroma ΔC^* a změnu měrné světlosti ΔL^* na změně měrného odstínu ΔH^* před a po korekci na referenční spektrofotometr 1.



Obrázek 8.7 – Graf
znázorňující změnu odchylky ΔL^* a ΔC^* před a po korekci pro spektrofotometr 3



Obrázek 8.8 – Graf
znázorňující změnu odchylky ΔC^* a ΔH^* před a po korekci pro spektrofotometr 3



Obrázek 8.9 – Graf
znázorňující změnu odchylky ΔL^* a ΔH^* před a po korekci pro spektrofotometr 3

Tabulka 8.3 – Výsledné hodnoty barevnosti před a po korekci pro spektrofotometr 3

Název	Odchylka											
	před korekcí						po korekci					
	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE^*
pale grey	2,10	0,11	2,42	2,28	-0,82	3,21	0,03	0,06	-0,02	-0,06	-0,03	0,07
mid grey	1,85	-0,03	1,80	1,77	-0,31	2,58	0,12	-0,08	0,03	0,06	0,06	0,15
deep grey	1,65	0,11	0,99	1,00	-0,02	1,93	-0,09	-0,17	0,25	0,25	0,17	0,32
deep pink	2,65	0,83	3,85	1,69	3,55	4,74	0,12	-0,09	0,07	-0,08	0,08	0,16
red	3,59	1,81	2,42	2,88	0,90	4,69	0,06	-0,21	-0,16	-0,26	-0,01	0,27
orange	3,75	-1,79	3,69	2,21	3,45	5,55	0,05	-0,08	-0,44	-0,41	-0,17	0,45
bright yellow	2,79	-0,52	-0,74	-0,71	0,56	2,93	-0,03	0,07	-0,50	-0,51	-0,04	0,51
green	1,03	1,53	-1,89	-2,15	1,14	2,64	0,08	-0,02	0,29	0,14	-0,25	0,30
cyan	0,41	2,25	-0,73	-0,08	2,36	2,40	-0,08	0,36	-0,17	0,03	0,40	0,41
deep blue	1,74	-3,36	3,99	-5,18	-0,66	5,50	-0,65	1,18	-0,94	1,43	0,46	1,64
white	2,28	0,07	2,73	2,69	-0,51	3,56	-0,02	0,00	-0,05	-0,05	0,01	0,05
black	1,94	0,52	-0,09	-0,48	0,23	2,01	-1,06	-0,13	0,65	0,24	-0,62	1,25

Vypočtená a provedená korekce hodnot získaných změřením na spektrofotometru 3 oproti referenčnímu spektrofotometru 1 výrazně napomohla ke snížení barevné odchylky ΔE^* mezi spektrofotometrem 3 a referenčním spektrofotometrem 1.

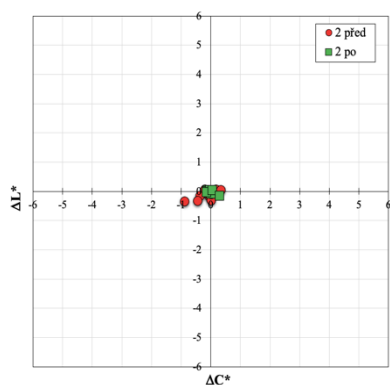
Jak ukazují grafy na *obrázcích 8.7 – 8.9*, korekce pomohla výrazně i ke snížení odchylek v chroma, v úhlu barevného tónu i světlosti, a to ve všech směrech a se stejnou velikostí.

Nejmenší vliv měla provedená korekce na vzorek s označením black a deep blue. U těchto dvou vzorků s ohledem na jejich barevnost není mezi spektrofotometry tolik výrazný rozdíl jako u světlých vzorků (pale grey, mid grey, white), kde použití korekce má významný vliv na výsledné hodnoty odchylek. Odlišnost spektrálního činitele odrazu ρ_λ především v žlutočervené oblasti vlnových délek je způsobena především změnou barevnosti bílého kalibračního standardu. S použitím korekčních faktorů lze použít data naměřená na spektrofotometru 3 a nahradit je v případě, kdyby nebyl referenční spektrofotometr 1 k dispozici.

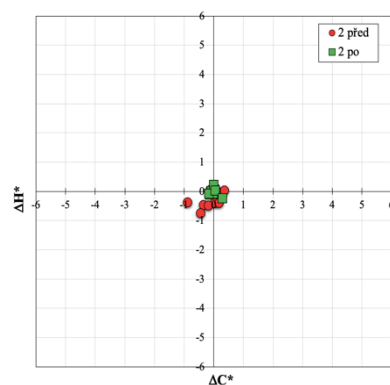
Při stanovení a hodnocení vlivu korekčních faktorů na velikost barevných odchylek byly pro spektrofotometr 2 získány barevné odchylky před a po korekci (obrázek 8.10 – 8.12). Ačkoliv došlo ke snížení barevných odchylek, změna nebyla tak výrazná, jako pro spektrofotometr 3.

Cílem stanovení korekčních koeficientů bylo možné použití jiného spektrofotometru v případě, že by nebyl k dispozici zvolený referenční spektrofotometr nebo v případě, že by získané hodnoty mohly být pomocí korekčních koeficientů považovány za hodnoty blízké referenčnímu spektrofotometru, tzn. z důvodu přenositelnosti dat mezi spektrofotometry.

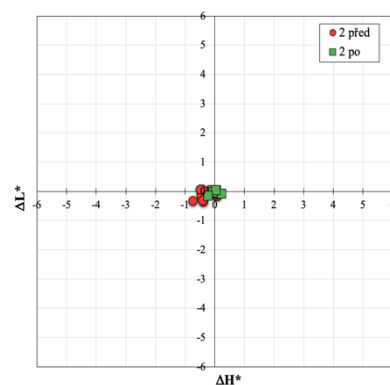
Porovnáme-li výsledky s výsledky preciznosti a přesnosti z předchozích částí této kapitoly, zjistíme, že mezi spektrofotometry hodnocenými v této části disertační práce existují rozdíly (v této části vyjádřené odchylkami), tak jak je například ukázáno v tabulce 8.3 pro spektrofotometr Datacolor Microflash 200d (spektrofotometr 3).



Obrázek 8.10 – Graf
znázorňující změnu odchylky ΔL^* a ΔC^* před a po korekci pro spektrofotometr 2



Obrázek 8.11 – Graf
znázorňující změnu odchylky ΔC^* a ΔH^* před a po korekci pro spektrofotometr 2



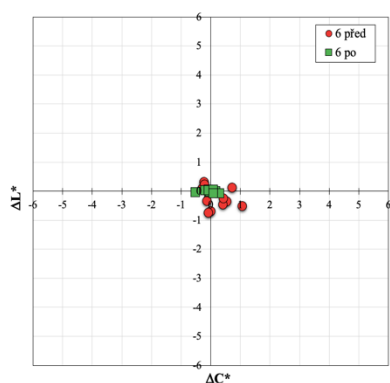
Obrázek 8.12 – Graf
znázorňující změnu odchylky ΔL^* a ΔH^* před a po korekci pro spektrofotometr 2

Je proto nutné v případě, kdy nemáme možnost z různých důvodů měřit na referenčním spektrofotometru použít k vyjádření výsledků korekční koeficienty zahrnující chyby měření, ale také hodnoty nejistot měření a hodnoty preciznosti a pravdivosti měření.

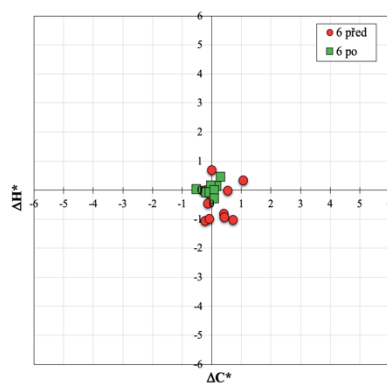
8.3 Výsledky a diskuze pro spektrofotometry s difúzní měřicí geometrií di:8°

Obdobně jako pro spektrofotometry s měřicí geometrií de:8°, byly korekční koeficienty stanoveny i pro spektrofotometry s di:8° a pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií.

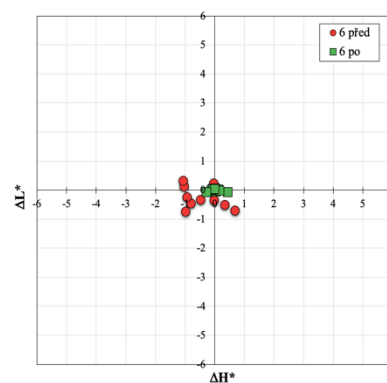
Výsledky pro spektrofotometry s měřicí geometrií di:8° jsou zobrazeny na *obrázcích 8.13 – 8.15* ve formě odchylek ΔL^* , ΔC^* a ΔH^* pro spektrofotometr 6 před a po korekci na referenční spektrofotometr 4. V *tabulce 8.4* se nacházejí výsledky s hodnotami barevnosti pro spektrofotometr 6 před a po korekci na referenční spektrofotometr 4. Barevné označení ΔE^* v *tabulce 8.4* odpovídá označení v *tabulce 8.3*. Jak je možné vidět, v případě geometrie di:8°, rozdíl mezi odchylkami před a po korekci není tak výrazný, jako tomu bylo u geometrie de:8°.



Obrázek 8.13 – Graf
znázorňující změnu odchylky ΔL^* a ΔC^* před a po korekci pro spektrofotometr 6



Obrázek 8.14 – Graf
znázorňující změnu odchylky ΔC^* a ΔH^* před a po korekci pro spektrofotometr 6



Obrázek 8.15 – Graf
znázorňující změnu odchylky ΔL^* a ΔH^* před a po korekci pro spektrofotometr 6

Stejně jako u měřicí geometrie de:8°, i u měřicí geometrie di:8° došlo ke změně hodnoty ΔE^* . V porovnání s geometrií de:8°, u geometrie di:8° byl mezi vzorky změřenými na spektrofotometru 6 a referenčním spektrofotometrem menší rozdíl ΔE^* než mezi spektrofotometrem 3 a referenčním spektrofotometrem 1.

Tabulka 8.4 – Výsledné hodnoty barevnosti před a po korekci pro spektrofotometr 6

Název	Odchylka											
	před korekcí						po korekci					
	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE^*
pale grey	0,11	0,23	-0,19	-0,30	-0,01	0,32	-0,03	0,09	0,01	-0,06	-0,07	0,09
mid grey	0,01	0,16	-0,01	-0,05	-0,15	0,16	0,03	0,03	-0,02	-0,03	-0,02	0,05
deep grey	-0,35	0,00	0,55	0,55	-0,02	0,65	0,01	-0,16	0,13	0,16	0,14	0,21
deep pink	-0,34	-0,06	-0,49	-0,14	-0,47	0,60	0,05	-0,10	0,00	-0,10	0,01	0,11
red	-0,70	-0,32	0,60	0,00	0,68	0,98	-0,06	0,05	0,53	0,29	0,45	0,54
orange	-0,46	0,90	-0,14	0,42	-0,81	1,02	0,03	-0,06	-0,20	-0,19	-0,07	0,21
bright yellow	-0,25	0,91	0,48	0,43	-0,93	1,05	-0,05	0,01	-0,53	-0,53	0,03	0,53
green	0,12	-0,22	1,24	0,72	-1,03	1,26	0,00	-0,01	0,13	0,06	-0,11	0,13
cyan	0,33	-0,89	0,62	-0,24	-1,06	1,14	-0,01	0,16	-0,03	-0,03	0,16	0,16
deep blue	-0,50	0,79	-0,79	1,06	0,34	1,22	0,02	-0,10	0,04	-0,08	-0,07	0,11
white	0,24	0,10	-0,18	-0,21	-0,03	0,32	0,04	-0,04	0,07	0,08	0,01	0,09
black	-0,74	-0,11	0,99	-0,09	-0,99	1,24	-0,06	-0,24	0,16	0,08	-0,28	0,30

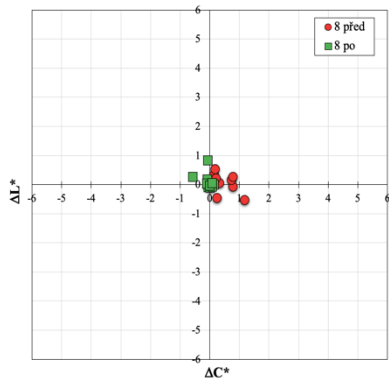
8.4 Výsledky a diskuze pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií

Výsledky pro spektrofotometry s úhlovou měřicí geometrií jsou zobrazeny na *obrázcích 8.16 – 8.18*, kde jsou vyjádřeny ve formě odchylek ΔL^* , ΔC^* a ΔH^* pro spektrofotometr 8 před

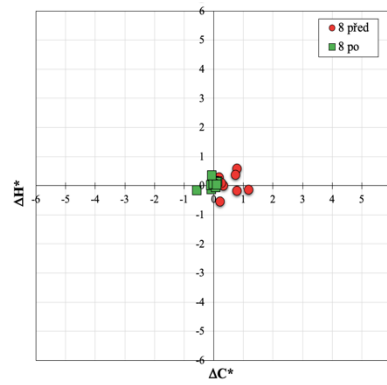
a po korekci na referenční spektrofotometr 7. V tabulce 8.5 se nacházejí výsledky s hodnotami barevnosti pro spektrofotometr 8 před a po korekci na referenční spektrofotometr 7.

Tabulka 8.5 – Výsledné hodnoty barevnosti před a po korekci pro spektrofotometr 8

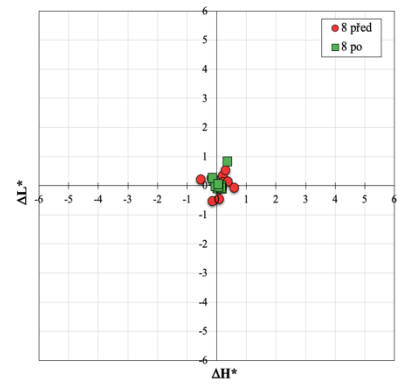
Název	Odchylka											
	před korekcí						po korekci					
	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE^*
pale grey	0,34	-0,25	-0,01	0,15	0,20	0,42	-0,06	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,06
mid grey	0,13	-0,21	-0,02	0,07	0,20	0,25	-0,09	0,00	-0,04	-0,04	0,00	0,10
deep grey	-0,06	-0,12	-0,04	-0,05	0,12	0,14	0,17	0,10	-0,10	-0,08	-0,11	0,22
deep pink	-0,09	0,04	0,05	0,05	0,04	0,11	-0,09	-0,01	0,17	0,02	0,17	0,20
red	-0,06	0,30	0,93	0,78	0,59	0,98	0,05	-0,10	-0,04	-0,10	0,03	0,11
orange	0,15	0,09	0,81	0,73	0,37	0,83	0,00	-0,05	0,20	0,14	0,15	0,21
bright yellow	0,26	0,13	0,79	0,78	-0,17	0,84	-0,02	0,05	0,07	0,07	-0,05	0,09
green	0,06	-0,29	0,13	0,32	0,00	0,33	-0,05	-0,14	-0,09	0,09	0,14	0,17
cyan	0,22	-0,58	0,01	0,21	-0,54	0,62	-0,04	0,06	-0,01	-0,01	0,06	0,07
deep blue	-0,53	0,54	-1,06	1,18	-0,14	1,30	0,27	-0,45	0,40	-0,58	-0,15	0,65
white	0,54	-0,33	0,08	0,18	0,29	0,64	0,06	-0,06	0,08	0,09	0,04	0,12
black	-0,47	-0,21	-0,18	0,26	0,09	0,54	0,84	0,24	-0,28	-0,07	0,36	0,92



Obrázek 8.16 – Graf
znázorňující změnu odchytky
 ΔL^* a ΔC^* před a po korekci
pro spektrofotometr 8



Obrázek 8.17 – Graf
znázorňující změnu odchytky
 ΔC^* a ΔH^* před a po korekci
pro spektrofotometr 8



Obrázek 8.18 – Graf
znázorňující změnu odchytky
 ΔL^* a ΔH^* před a po korekci
pro spektrofotometr 8

V *tabulce 8.5* jsou uvedeny hodnoty barevných odchylek pro vzorky naměřené na spektrofotometru 8 s odchylkami vypočtenými po provedení korekce na referenční spektrofotometru 7. U vzorku black došlo vlivem korekce ke zvýšení barevné odchylky především z důvodu navýšení odchylky ve světlosti a odchylky Δb^* , což je opět způsobeno vlivem žlutějšího bílého standardu.

9. Vyhodnocení barvocitu pozorovatelů

Každý z pozorovatelů účastnících se vizuálních experimentů TUL 1, TUL 2 a TUL 3 absolvoval FM 100-Hue test. Testování proběhlo při všech úrovních adaptačních jasů.

Testování barvocitu na různých úrovních adaptačních jasů bylo provedeno s cílem zjistit, při které z adaptačních úrovní a jak je pozorovatel ještě schopen seřadit jednotlivé terčíky, tedy to, jak úroveň adaptačního jasu ovlivňuje barvocit a kdy je ještě schopen rozlišovat barvy.

Pro účely disertační práce bylo vyhodnocení FM 100-Hue testu provedeno pouze pomocí TES skóre.

9.1 Pozorovatelé

Jak je uvedeno v *tabulce 9.1*, vizuálních experimentů se zúčastnili pozorovatelé z různých zemí. V následující *tabulce 9.1* je uvedeno rozdělení pozorovatelů v rámci experimentů podle národností a podle pohlaví. Všechny údaje uvedené v *tabulce 9.1* jsou uvedeny se souhlasem pozorovatelů. Z důvodu ochrany osobních údajů nejsou v *tabulce 9.1* uvedeny jména a příjmení pozorovatelů a jejich věk, který mi je však znám. V *tabulce 9.1* je uvedena hodnota TES skóre každého pozorovatele, kterého dosáhl na nejvyšší shodné úrovni adaptačního jasu. Pro experimenty TUL 1 a TUL 2 je to 2. úroveň s hodnotou adaptačního jasu $202 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Pro experiment TUL 3 se jedná o 1. úroveň s hodnotou adaptačního jasu $63,67 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$.

Popis výsledků pro další úrovně adaptačního jasu a pro jednotlivé vizuální experimenty je uveden v *příloze P2*.

Pozorovatelé, kteří se zúčastnili vizuálního experimentu TUL 1, jsou označeni písmenem **L**. Pozorovatelé, kteří se zúčastnili vizuálního experimentu TUL 2, jsou označeni písmenem **S**. Pozorovatelé, kteří se zúčastnili vizuálního experimentu TUL 3, jsou označeni písmenem **G**. Zelenou barvou jsou označeni pozorovatelé z kategorie s vynikající rozlišovací schopností (Superior) podle TES skóre, červenou barvou jsou označeni pozorovatelé z kategorie s průměrnou rozlišovací schopností (Average) podle TES skóre a modrou barvou jsou označeni pozorovatelé z kategorie s nízkou rozlišovací schopností (Low) podle TES skóre.

Tabulka 9.1 – Rozdělení pozorovatelů podle experimentů a TES skóre

Označení	Národnost	Pohlaví	TES	Označení	Národnost	Pohlaví	TES
L1	česká	žena	36	S1	česká	žena	12
L2	česká	žena	12	S2	česká	žena	16
L3	česká	žena	12	S3	česká	žena	12
L4	česká	žena	28	S4	česká	žena	28
L5	česká	žena	8	S5	česká	žena	8
L6	indická	muž	32	S6	japonská	muž	40
L7	česká	žena	16	S7	japonská	žena	20
L8	turecká	muž	8	S8	japonská	žena	20
L9	česká	muž	36	S9	česká	žena	0
L10	česká	muž	36	S10	česká	žena	4
L11	slovenská	muž	24	G1	česká	žena	16
L12	polská	muž	60	G2	španělská	muž	16
L13	čínská	žena	20	G3	španělská	muž	12
L14	čínská	žena	32	G4	španělská	žena	16
L15	čínská	žena	12	G5	španělská	žena	4
L16	čínská	žena	92	G6	španělská	muž	132
L17	čínská	žena	16				

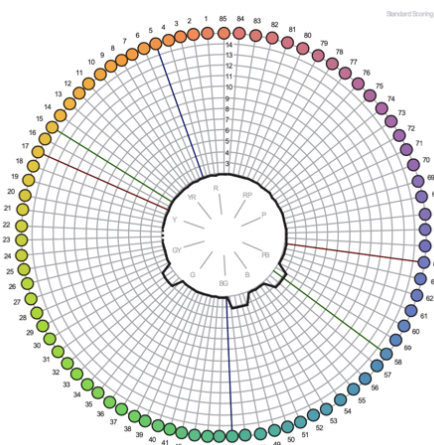
9.2 Barvocit pozorovatelů z experimentu TUL 1

V rámci hodnocení experimentu TUL 1 nebyl na nejvyšších úrovních žádný z pozorovatelů testován s poruchou barvocitu. 7 pozorovatelů bylo podle výsledku testu zařazeno do skupiny s vynikající rozlišovací schopností, 10 pozorovatelů do skupiny s průměrnou rozlišovací schopností.

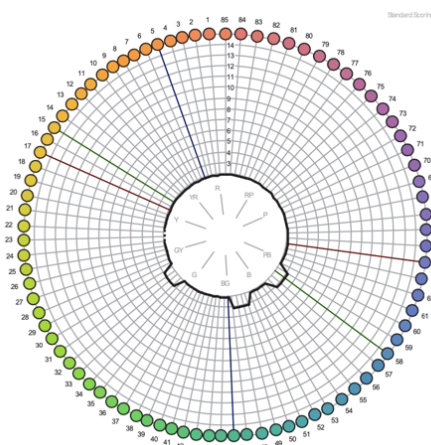
Během testování a následujícího vyhodnocování bylo zjištěno, že při nízkých adaptačních úrovních (nižších než $0,25 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$) dochází u 2/3 pozorovatelů k výraznému navýšení hodnoty TES skóre především ve žlutozelené, modrozelené a modré oblasti terčů, což u těchto pozorovatelů bylo ovlivněno tzv. pseudotritanopickým efektem. Tento efekt, pozorovatelný na *obrázcích 9.6 až 9.8*, je způsoben postupnou adaptací oka na nízké úrovně adaptačních jasů a posunem citlivosti lidského oka směrem ke kratším vlnovým délkám a může být způsoben tzv. „oslepnutím“ krátkovlnných čípků. U zbývajících pozorovatelů byla na základě výsledků

zjištěna snížená nebo velmi nízká rozlišovací schopnost při nízkých úrovních adaptačních jasů, avšak bez pseudotritanopického efektu.

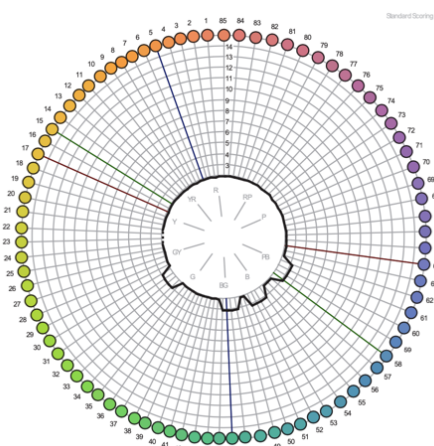
Na následujících *obrázcích 9.1 až 9.8* je ukázáno vyhodnocení pro pozorovatele L17, který byl označen a zařazen podle hodnoty TES skóre na nejvyšší úrovni adaptačního jasů jako pozorovatel s vynikající rozlišovací schopností.



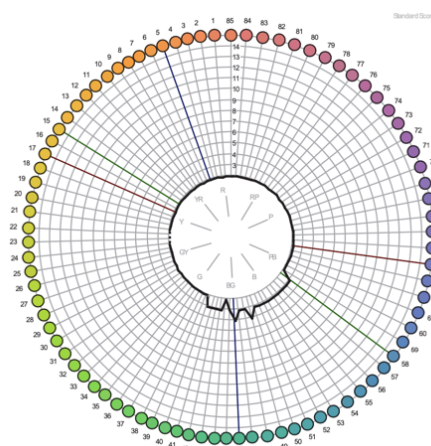
Obrázek 9.1 – TES skóre (12) pozorovatele L17 s vynikající rozlišovací schopností – úroveň $L_A = 371 \text{ cd. m}^{-2}$



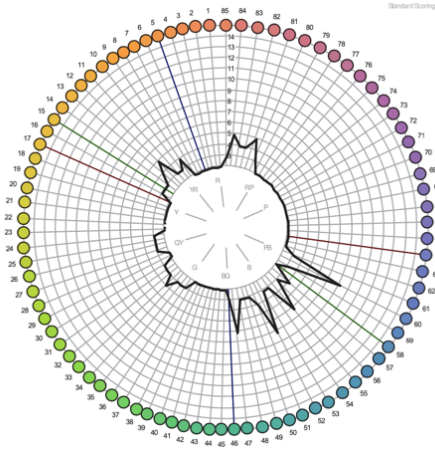
Obrázek 9.2 – TES skóre (16) pozorovatele L17 s vynikající rozlišovací schopností – úroveň $L_A = 202 \text{ cd. m}^{-2}$



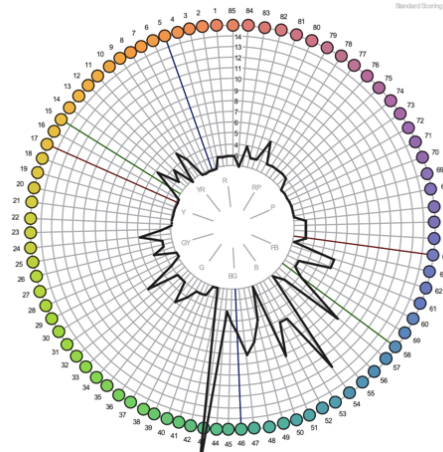
Obrázek 9.3 – TES skóre (16) pozorovatele L17 s vynikající rozlišovací schopností – úroveň $L_A = 32 \text{ cd. m}^{-2}$



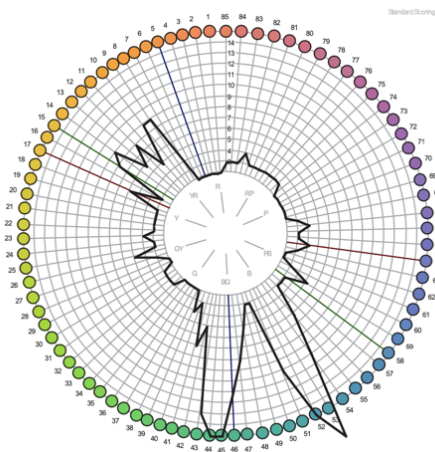
Obrázek 9.4 – TES skóre (20) pozorovatele L17 s vynikající rozlišovací schopností – úroveň $L_A = 6 \text{ cd. m}^{-2}$



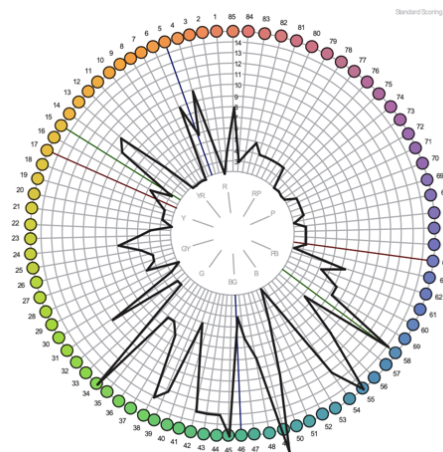
Obrázek 9.5 – TES skóre (68) pozorovatele L17 s vynikající rozlišovací schopností – úroveň $L_A = 0,93 \text{ cd. m}^{-2}$



Obrázek 9.6 – TES skóre (144) pozorovatele L17 s vynikající rozlišovací schopností – úroveň $L_A = 0,25 \text{ cd. m}^{-2}$



Obrázek 9.7 – TES skóre (208) pozorovatele L17 s vynikající rozlišovací schopností – úroveň $L_A = 0,05 \text{ cd. m}^{-2}$



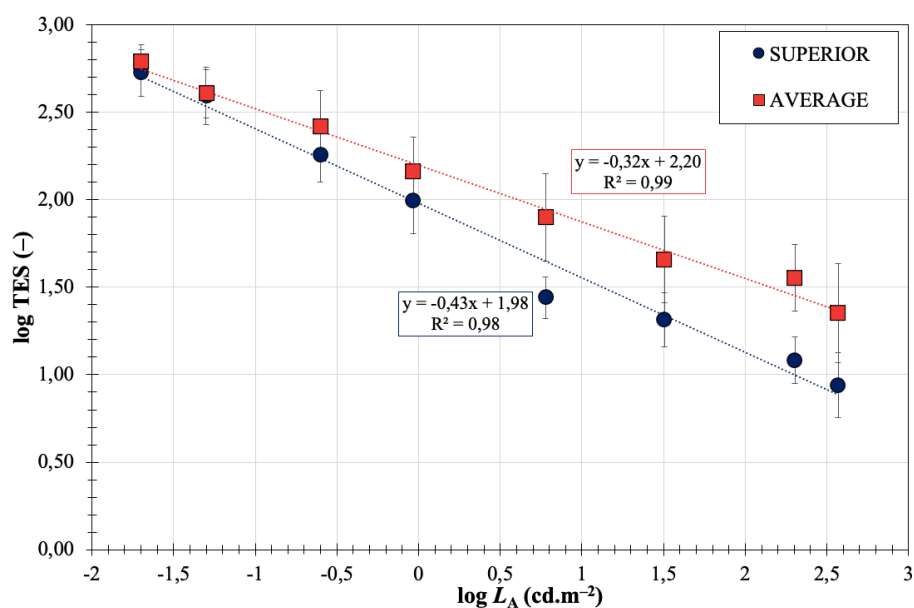
Obrázek 9.8 – TES skóre (316) pozorovatele L17 s vynikající rozlišovací schopností – úroveň $L_A = 0,01 \text{ cd. m}^{-2}$

U pozorovatele L17 je možné vidět výše zmiňovaný pseudotritanopický efekt (*obrázky 9.6 – 9.8*), který se u pozorovatele objevil při testování při třech nejnižších úrovních adaptačního jasu. Pozorovatel L17 při seřazování terčů chybně seřadil terčůky v pravé části druhé řady a v celé třetí řadě, tedy v oblasti zeleno/modrých a modro/fialových odstínů (*obrázek 1.9*). Chyby pozorovatel udělal i u ostatních řad, ale jednalo se spíše o prohození maximálně o dvě nebo tři pozice proti správnému seřazení terčůků.

V příloze P2 k této kapitole se nachází *tabulka P2.1* s hodnotami TES skóre pro FM 100-Hue test pro pozorovatele, kteří se zúčastnili vizuálních hodnocení experimentu TUL 1. Zelenou barvou jsou označeni pozorovatelé z kategorie s vynikající rozlišovací schopností (S),

červenou barvou jsou označeni pozorovatelé z kategorie s průměrnou rozlišovací schopností (A) a modrou barvou jsou označeni pozorovatelé z kategorie s nízkou rozlišovací schopností (L). Tučně jsou označeny hodnoty těch pozorovatelů, u kterých se v rámci vyhodnocení FM 100-Hue testu objevil pseudotritanopický efekt.

Na *obrázku 9.9* je vyjádřena závislost TES skóre pozorovatelů účastnících se experimentu TUL 1 na úrovni adaptačního jasu.



Obrázek 9.9 – TES skóre pozorovatelů z experimentu TUL 1 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

Z *obrázku 9.9* vyplívá, že vlivem snížení úrovně adaptačního jasu došlo u pozorovatelů ze skupiny superior i average k postupné ztrátě schopnosti rozlišovat barvy, což potvrzuje i platnost Purkyněho jevu. Zároveň je vidět, že se snižující se úrovní adaptačního jasu dochází ke stírání rozdílu mezi skupinami pozorovatelů superior a average. Jak je možné vidět na nejnižší úrovni adaptačního jasu, která je blízká hranici skotopické oblasti, rozdíl mezi pozorovatelem superior a average je velmi malý (2,15 %).

Z pohledu rozdělení pozorovatelů do skupin podle kategorií s vynikající, průměrnou a nízkou rozlišovací schopností (superior, average, low), nastala největší změna mezi 4. a 5. úrovní (6 a $0,93 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$). V rámci hodnocení dosáhl hodnoty TES skóre rovné 0 pouze pozorovatel L2 na 1. úrovni adaptačního jasu (neměl žádnou chybu v řazení terčů). Pozorovatel L3 měl na téže úrovni TES skóre rovné 4, tedy zaměnil pozici pouze jednoho

terčíku. Pozorovatelé L12 a L16 dosáhli na nejvyšší úrovni adaptačního jasu hodnoty TES skóre 48 a 68. I když jsou tyto hodnoty vysoké, ani u jednoho z nich se nepotvrdila vada barvocitu. Na čtyřech nejnižších úrovních se jejich hodnocení nelišilo od ostatních pozorovatelů. U pozorovatele L12 se na úrovních 5 – 7 objevil pseudotritanopický efekt, u pozorovatele L16 pouze na úrovni 5.

Na úrovních 7 a 8, které jsou blízko hranice mezopického a skotopického vidění, byli všichni pozorovatelé již ve skupině s nízkou rozlišovací schopností, tedy oblasti, kdy vidění zprostředkovávají tyčinky.

Je nutno podotknout, že FM 100-Hue test se provádí vždy při denním osvětlení, tedy vyhodnocení pro úrovně 3 – 8 je potřeba brát spíše jako orientační. Na druhou stranu je to také ukazatel toho, do jaké míry je rozlišování barev ovlivněno úrovní adaptačního jasu. V případě úrovní adaptačního jasu 1 – 3 trval test pozorovatelům podstatně rychleji než při nižších úrovních adaptačních jasů.

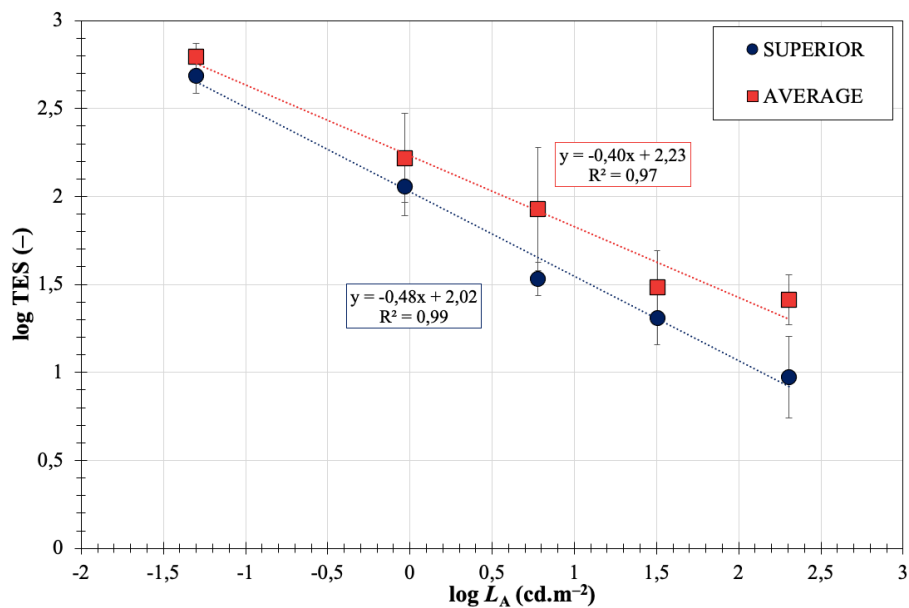
9.3 Barvocitu pozorovatelů z experimentu TUL 2

Pozorovatelé byli na základě vyhodnocených výsledků TES skóre vypočtených na jednotlivých úrovních adaptačního jasu rozřazeni do kategorie s vynikající, průměrnou a nízkou rozlišovací schopností (superior, average, low).

Podle TES skóre na nejvyšší úrovni adaptačního jasu bylo 6 pozorovatelů zařazeno do kategorie s vynikající rozlišovací schopností a 4 pozorovatelé do kategorie s průměrnou rozlišovací schopností. U žádného z pozorovatelů nebyla nalezena vada barvocitu mimo těch pozorovatelů, u kterých se objevil tzv. pseudotritanopický efekt. Efekt nastal u pozorovatelů S3, S6 a S9 pouze na jedné úrovni, u pozorovatele S4 na dvou úrovních. Tento efekt se během vyhodnocení testu neobjevil u pozorovatelů S1, S2, S5, S7, S8 a S10.

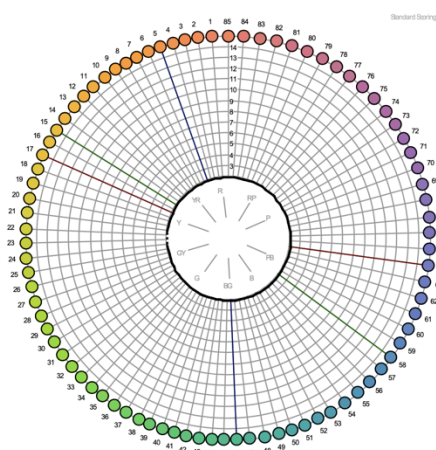
Na *obrázku 9.10* je vyjádřena závislost TES skóre pozorovatelů účastnících se experimentu TUL 2 na úrovni adaptačního jasu. Na *obrázcích 9.11 – 9.15* jsou vyneseny grafy s TES skóre pro pozorovatele S9.

Stejně jako u experimentu TUL 1, i u pozorovatelů z experimentu TUL 2 došlo vlivem snižující se úrovně adaptačního jasu k postupné ztrátě schopnosti rozlišovat barvy (popsáno Purkyněho jevem). Rovněž jako u experimentu TUL 1, i u pozorovatelů z experimentu TUL 2 došlo vlivem snižující se úrovně adaptačního jasu k tomu, že se zmenšil rozdíl mezi pozorovateli ze skupin superior a average.

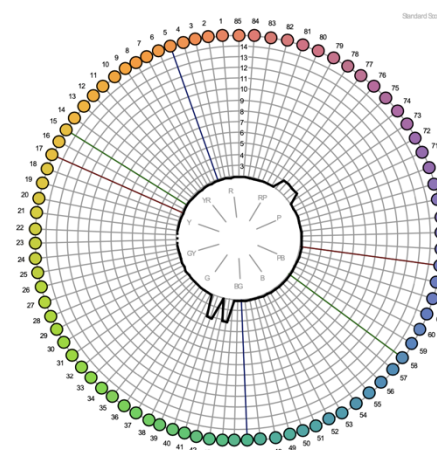


Obrázek 9.10 – TES skóre pozorovatelů z experimentu TUL 2 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

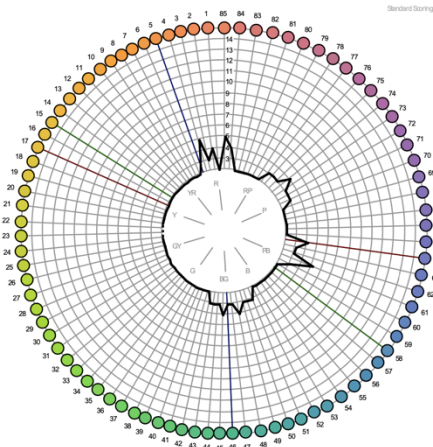
Pozorovatel S9 je pozorovatel, který na prvních dvou úrovních experimentu TUL 2 byl zařazen do kategorie s vynikající rozlišovací schopností. Na dalších dvou úrovních v kategorii s průměrnou rozlišovací schopností. Při vyhodnocení poslední úrovně byl zařazen do kategorie s nízkou rozlišovací schopností. U tohoto pozorovatele se projevil rovněž pseudotritanopický efekt u nejnižší úrovně adaptačního jasu.



Obrázek 9.11 – TES skóre (0) pozorovatele S9 s vynikající rozlišovací schopností – úroveň $L_A = 202 \text{ cd. m}^{-2}$

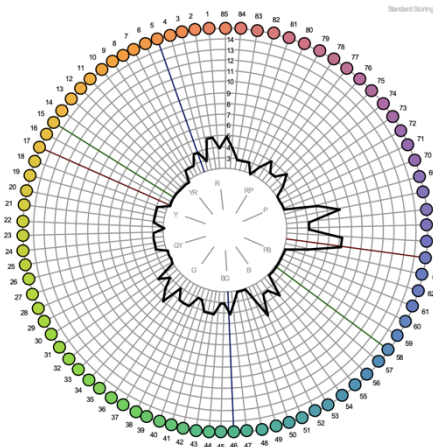


Obrázek 9.12 – TES skóre (12) pozorovatele S9 s vynikající rozlišovací schopností – úroveň $L_A = 32 \text{ cd. m}^{-2}$



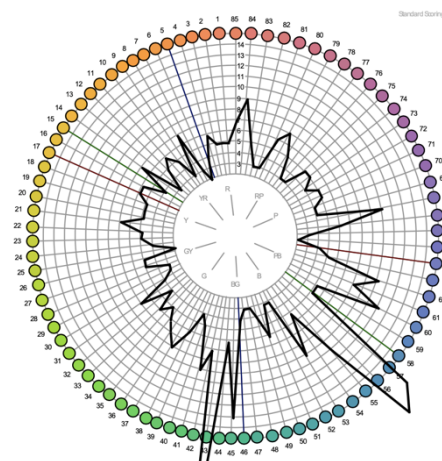
Obrázek 9.13 – TES skóre (40) pozorovatele S9 s vynikající rozlišovací schopností – úroveň

$$L_A = 6 \text{ cd. m}^{-2}$$



Obrázek 9.14 – TES skóre (100) pozorovatele S9 s vynikající rozlišovací schopností – úroveň

$$L_A = 0,93 \text{ cd. m}^{-2}$$



Obrázek 9.15 – TES skóre (328) pozorovatele S9 s vynikající rozlišovací schopností – úroveň $L_A = 0,05 \text{ cd. m}^{-2}$

Na poslední úrovni adaptačního jasu byli všichni pozorovatelé TUL 2 zařazeni do skupiny s nízkou rozlišovací schopností (low).

V příloze P2 se nachází *tabulka P2.2* s hodnotami TES skóre pro FM 100-Hue test pro pozorovatele, kteří se zúčastnili vizuálních hodnocení experimentu TUL 2. Zvýraznění v *tabulce P2.2* je provedeno shodně jako pro *tabulku P2.1*.

9.4 Barvocit pozorovatelů z experimentu TUL 3

U tohoto experimentu byli všichni pozorovatelé zařazeni do kategorie s vynikající rozlišovací schopností na úrovni 1G vyjma pozorovatele G6, do kategorie s průměrnou

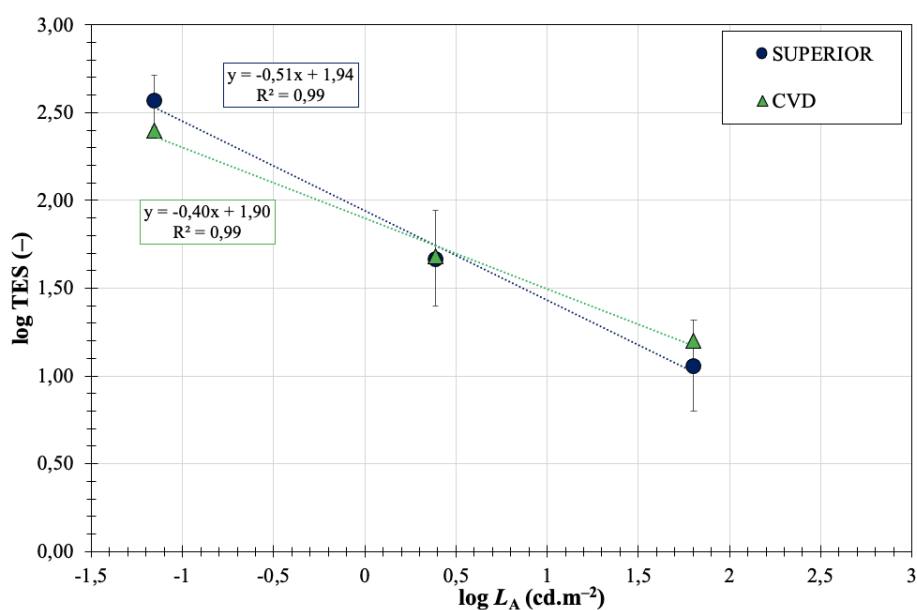
rozlišovací schopností na úrovni 2G vyjma pozorovatele G1 a G6. Na nejnižší úrovni jsou na základě výsledků všichni pozorovatelé zařazeni do kategorie s nízkou rozlišovací schopností. U všech pozorovatelů vyjma pozorovatele G6 se na nejnižší úrovni adaptačního jasu objevil pseudotritanopický efekt.

Na *obrázku 9.16* je vyjádřena závislost TES skóre pozorovatelů účastnících se experimentu TUL 3 na úrovni adaptačního jasu. Označení CVD v grafu na *obrázku 9.16* je označením pro pozorovatele s poruchou barvocitu.

Jak je vidět na *obrázku 9.16*, rovněž jako u předchozích dvou experimentů, i u experimentu TUL 3 došlo u pozorovatelů k postupné ztrátě rozlišování barev. Jak bylo napsáno výše, pozorovatelé z tohoto experimentu byli zařazeni do skupiny s vynikající rozlišovací schopností (superior) vyjma pozorovatele G6, kterému byla již dříve diagnostikována porucha barvocitu (protanomálie).

Na tomto obrázku je rovněž vidět, že ačkoliv se jedná o pozorovatele s diagnostikovanou poruchou barvocitu, jeho výsledky se příliš neliší od výsledků pozorovatelů ze skupiny superior.

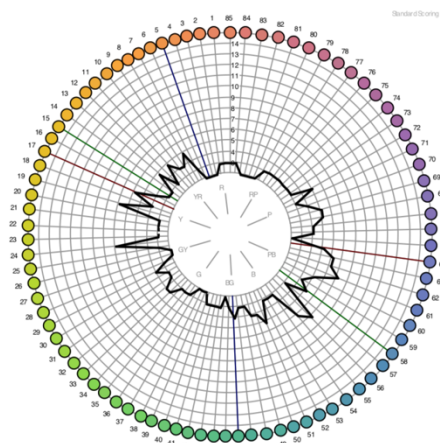
Na nejnižší úrovni adaptačního jasu je dokonce jeho výsledek lepší, než u ostatních pozorovatelů. Jak vyplývá z Purkyněho jevu, s klesající úrovní adaptačního jasu dochází u člověka k postupné ztrátě schopnosti rozlišovat barvy od červené po modrou barvu.



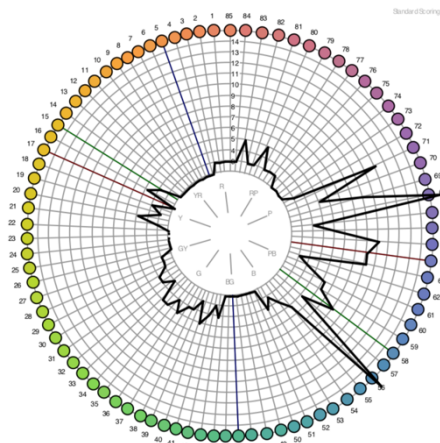
Obrázek 9.16 – TES skóre pozorovatelů z experimentu TUL 3 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

U pozorovatele s touto poruchou barvocitu je důležité říci, že rozlišování barev na ftopické úrovni je ovlivněno posunem absorpčního maxima čípků směrem ke kratším vlnovým délkám. Jedinec s takovou poruchou není schopen rozlišit mezi sebou červené a zelené odstíny.

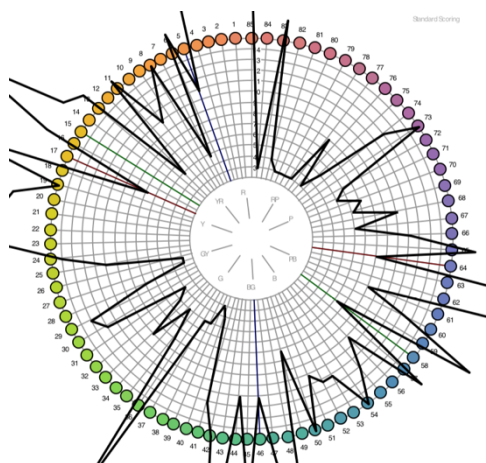
Na *obrázcích 9.17 – 9.19* je ukázáno vyhodnocení pro pozorovatele G6, tedy pozorovatele s diagnostikovanou poruchou barvocitu (anomální trichromazie).



Obrázek 9.17 – TES skóre (132) pozorovatele G6 s nízkou rozlišovací schopností – úroveň $L_A = 63,67 \text{ cd. m}^{-2}$



Obrázek 9.18 – TES skóre (164) pozorovatele G6 s nízkou rozlišovací schopností – úroveň $L_A = 2,43 \text{ cd. m}^{-2}$



Obrázek 9.19 – TES skóre (892) pozorovatele G6 s nízkou rozlišovací schopností – úroveň $L_A = 0,07 \text{ cd. m}^{-2}$

Na grafech na *obrázcích 9.17 a 9.18* je možné si všimnout, že pozorovatel výrazněji chyboval v oblasti terčíků 55 – 72 (řada 3 a 4), stejně jako v oblasti terčíků 8 – 24 (řada 1 a 2), tedy v oblastech popisující poruchu barvocitu v oblasti červená – zelená. Oproti grafu na

obrázku 9.19, kde je vidět chybovost ve všech řadách tvořícího test, avšak i přesto je vidět výraznější trend v oblasti červená – zelená (popsáno červenou a zelenou křivkou).

V příloze P2 se nachází *tabulka P2.3* s hodnotami TES skóre pro FM 100-Hue test pro pozorovatele, kteří se zúčastnili vizuálních hodnocení experimentu TUL 3. Zvýraznění v *tabulce P2.3* je provedeno shodně jako pro *tabulku P2.1*.

V nadcházejících hodnoceních je skupina pozorovatelů v rámci jednotlivých experimentů hodnocena nejprve dohromady bez ohledu na jejich zařazení podle nejvyšší úrovně adaptačního jasu kromě zmíněného pozorovatele G6. V krátkosti pak budou diskutovány výsledky s ohledem na zařazení do skupiny s vynikající a průměrnou rozlišovací schopností podle nejvyšší společné úrovně adaptačního jasu odpovídající dané části experimentu.

Na základě provedeného testování a hodnocení FM 100-Hue testu nebyl žádný z pozorovatelů vyřazen z hodnocení na základě výsledků tohoto testu.

10. Výsledky vizuálních hodnocení

Výsledky vizuálních hodnocení pozorovatelů jsou hodnoceny z hlediska několika různých pohledů (experiment, pohlaví, národnost, výsledek testu na barvocitu).

Pro vizuální experiment TUL 1 je provedeno vyhodnocení výsledků pozorovatelské shody a shody mezi pozorovateli pro celou skupinu pozorovatelů bez ohledu na pohlaví, národnost či výsledek testování barvocitu, druhé hodnocení je provedeno pro pozorovatele podle pohlaví, podle národnosti a podle výsledku testování barvocitu.

Shodné hodnocení jako pro experiment TUL 1 je provedeno i pro experimenty TUL 2 a TUL 3.

V další části jsou porovnány výsledky vizuálních experimentů TUL 1 a TUL 2 z hlediska porovnání výsledků získaných ze dvou odlišně realizovaných experimentů.

V druhé části tohoto vyhodnocení je provedeno porovnání predikční schopnosti modelů rovněž podle zmíněných kritérií.

10.1 Převod šedé stupnice na vizuálně vnímanou barevnou odchylku

Vizuálně vnímaná barevná odchylka je vyjádřením barevného rozdílu mezi dvěma vzorky, podněty. K vyjádření barevného rozdílu jsou při vizuálních hodnoceních používány šedé stupnice. V této práci jsou použity šedé stupnice pro hodnocení změny odstínu odpovídající normě ČSN EN ISO 105A:02 [127]. Samotné stupně šedé stupnice mají podle normy definovanou barevnou odchylku [127]. Při vizuálních hodnocení uvádějí pozorovatelé stupeň šedé stupnice. Pro další hodnocení je proto potřebné převést stupně šedé stupnice (dále označeny jako GS) na vizuálně vnímanou odchylku (dále označena jako ΔV , respektive ΔV_{rp}). K tomuto přepočtu lze použít hodnoty uvedené přímo v normě [127] nebo použít postup, který byl použit pro stanovení ΔV v této práci. Je nutné zároveň podotknout, že v normě [127] je uveden barevný rozdíl pomocí ΔE^* . Označení ΔV je použito pro vizuální, tedy subjektivní hodnocení, označení ΔE^* je používáno pro hodnocení barevné odchylky mezi vzorky vypočtené ze spektrálního činitele odrazu.

Pro výpočet odchylky ΔV (10.1) bylo použito proložení spektrofotometricky naměřených a vypočtených hodnot odchylek ΔE^* pro jednotlivé stupně šedé stupnice pomocí funkce One Phase Decay v programu GraphPad Prism 8. Obecný tvar rovnice pro výpočet ΔV je uveden níže

$$\Delta V_i = (Y_0 - Y_\infty) * e^{-k*GS} + Y_\infty \quad (10.1)$$

kde Y_0 je taková hodnota, pro kterou je $X = 0$, Y_∞ je hodnota Y v nekonečnu, k je rychlostní konstanta vyjádřená v reciprokových jednotkách X a GS je stupeň šedé stupnice.

Výsledky proložení parametrů pro výpočet vizuálně vnímané barevné odchylky pro jednotlivé experimenty TUL 1 – TUL 3 je uveden v *tabulce 10.1*.

Tabulka 10.1 – Parametry rovnice pro výpočet vizuálně vnímané barevné odchylky

Experiment	Y_0	Y_∞	k
TUL 1	25,30	-0,7430	0,6224
TUL 2	25,89	-0,7823	0,6182
TUL 3	28,86	-0,2746	0,7221

Odlišné hodnoty jednotlivých parametrů jsou způsobeny z důvodu použití třech různých stupnic, avšak všech splňujících normu ČSN EN ISO 105A:02. Šedá stupnice pro experiment TUL 1 a TUL 3 byla vyrobena firmou SDC Enterprises Limited, šedá stupnice pro experiment TUL 2 byla vyrobena firmou AATCC. Posledně jmenovaný typ stupnice byl použit především proto, že lze od sebe snadno oddělit jednotlivé poloviny stupnice a lépe ji tak umístit na podložku pro tento typ experimentu.

Pro následující hodnocení budou použity tyto dva termíny – vizuálně vnímaná barevná odchylka ΔV_i odpovídající jednomu hodnocení pozorovatele a robustní průměrná vizuálně vnímaná barevná odchylka ΔV_{rpi} , která odpovídá robustnímu průměru vypočtenému z hodnocení jednoho pozorovatele (pozorovatelská shoda) nebo z hodnocení všech pozorovatelů (shoda mezi pozorovateli).

10.2 Kontrast stupňů šedé stupnice

Kontrast, jak vyplívá z výše uvedeného textu, je rozdíl vzhledu mezi dvěma nebo více částmi pozorované oblasti. [49, 50, 53, 69] Vnímaný kontrast můžeme rozlišovat jako kontrast jasností, kontrast světlostí, kontrast barvy nebo simultánní kontrast dvou částí nebo ploch. [49, 50]

K vyjádření kontrastu dvou částí pozorovaného pole je používám Weberův kontrast C_W nebo Michelsonův kontrast C_M . Oba dva kontrasty jsou definovány pro vyjádření kontrastu jasů dvou částí, kde se vychází z jasů pozadí L_B a podnětu L_S nebo z jasů světlejší L_{max} a tmavší L_{min} části. [1, 49, 128] V případě, že nejsou k dispozici hodnoty jasů pro podnět a pozadí, je

možné ve výpočtu Weberova a Michelsonova kontrastu nahradit tyto hodnoty hodnotami jasností Y . [1, 49, 128]

Kontrast jasností dvou částí pozorované oblasti (zde podnět a pozadí) můžeme vyjádřit jako Weberův kontrast C_W (10.2)

$$C_W = \frac{Y_S - Y_B}{Y_B} \quad (10.2)$$

nebo Michelsonův kontrast C_M (10.3)

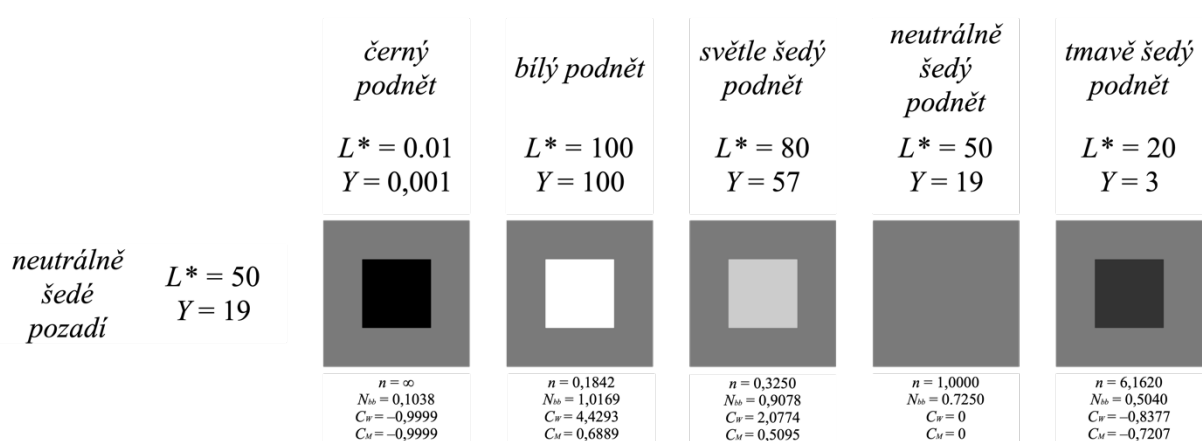
$$C_M = \frac{Y_S - Y_B}{Y_S + Y_B} \quad (10.3)$$

kde Y_S je jasnost podnětu a Y_B je jasnost pozadí.

V případě, že hodnota jasnosti pozadí Y_B je vyšší než hodnota jasnosti podnětu Y_S , mluvíme o negativním kontrastu, respektive kdy jas pozadí L_B je vyšší než jas podnětu L_S . V opačném případě mluvíme o pozitivním kontrastu, a to v případě, že hodnota jasnosti podnětu Y_S je vyšší než hodnota jasnosti pozadí Y_B , respektive hodnota jasu pozadí L_B je nižší než hodnota jasu podnětu L_S .

Weberův kontrast nabývá hodnot $< -1; 0 >$ pro negativní kontrast a hodnot $< 0; +\infty >$ pro pozitivní kontrast. Michelsonův kontrast nabývá hodnot $< -1; 0 >$ pro negativní kontrast a $< 0; +1 >$ pro pozitivní kontrast. V případě, kdy je hodnota Weberova nebo Michelsonova kontrast rovna 0, jedná se o situaci, kdy mezi podnětem a pozadím není žádný kontrast. Tato situace je ukázána na *obrázku 10.1*. Na *obrázku 10.2* je možné vidět ukázkou a vyjádření indukčního faktoru jasu pozadí N_{bb} , Weberova C_M a Michelsonova kontrastu C_M pro neutrálně šedé pozadí a pět různě barevných podnětů. Další příklady různého pozadí a podnětů jsou uvedeny v příloze P3 *obrázku P3.1*.

Symbol ∞ je použit ve vyjádření výsledků zobrazených na *obrázcích 10.1, 10.2 a P3.1* pro hodnoty, které přesáhly hodnotu 100. U výsledků Weberova kontrastu C_W se jedná o všechny vzorky s černým pozadím vyjma vzorku, který má černý podnět. Na *obrázku 10.1* je vyobrazeno neutrálně šedé pozadí s hodnotou jasnosti $Y = 19$ a pěti různými podněty. Jak je možné vidět, má-li pozadí a podnět stejnou hodnotu jasnosti, hodnota Weberova C_M i Michelsonova kontrastu C_M je rovna 0.



Obrázek 10.1 – Ukázka indukčního faktoru jasu pozadí a kontrastu pro různé podněty a různá pozadí

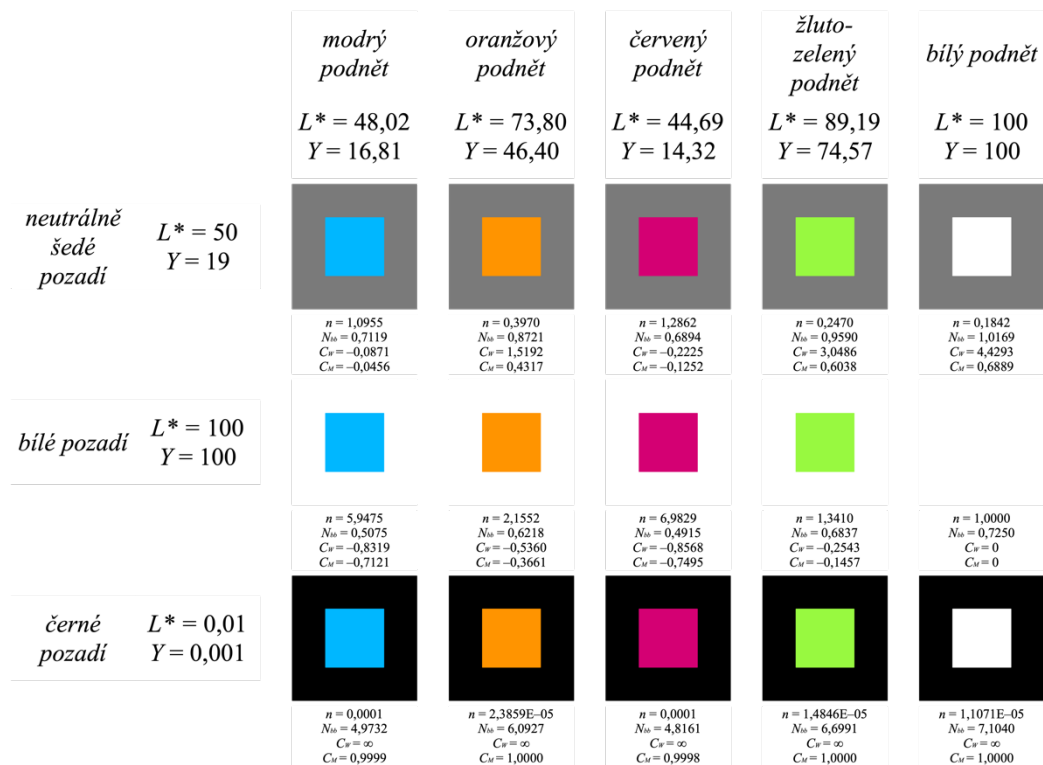
Hodnota indukčního faktoru jasu pozadí je rovna koeficientu 0,725. V situaci, kdy je podnět světlejší než pozadí, hodnoty obou kontrastů jsou kladné, a naopak pro situaci, kdy je podnět tmavší než pozadí, hodnoty obou kontrastů jsou záporné.

Kontrast je definován jako rozdíl vzhledu mezi dvěma částmi pozorované oblasti. Tento kontrast může být hodnocen vzhledem ke vnímání kontrastu jasnosti, světlosti, ale barevnosti.

Na *obrázku 10.2* je zobrazena situace se třemi různými pozadími (neutrálně šedé, bílé a černé pozadí) a čtyřmi různými barevnými podněty (modrý, oranžový, červený a žlutozelený), které vycházejí z barevnosti použitých barevných center. Na *obrázku 10.2* je vidět, že čím má pozadí nižší jasnost, tím se podnět jeví světlejší. Největší kontrast je mezi barevnými podněty a černým pozadím.

V rámci vizuálních experimentů bylo použito pozadí s hodnotou jasnosti 41,92 pro experiment TUL 1 a TUL 2 a 41,95 pro experiment TUL 3. Tyto hodnoty v porovnání s hodnotami pro neutrálně šedou ($Y=19$) jsou vyšší a odpovídají odstínu s označením pale grey.

Při párovém porovnávání dvou barevných povrchů vůči neutrálně šedému pozadí budou vzorky s nižší jasností Y mít vůči tomuto neutrálně šedému pozadí menší kontrast než vzorky s vyšší jasností Y . V rámci vizuálního experimentu TUL 1 byla pro určení vizuálně vnímaného barevného rozdílu použita šedá stupnice pro hodnocení změny odstínu s definovanými stupni šedi podle normy ČSN EN ISO 105A:02. Šedá stupnice je určena pro hodnocení změny odstínu při standardních podmínkách pozorování, kterými jsou simulátor denního osvětlení F7 s úrovní osvětlenosti minimálně 600 lx a neutrálně šedé pozadí označené dle Munsella N5 nebo N7. Při snižování úrovně adaptačního jasu L_A byla šedá stupnice použita v rámci tohoto experimentu i při úrovních, které neodpovídají podmínkám stanoveným výše jmenovanou normou.



Obrázek 10.2 – Ukázka indukčního faktoru jasu pozadí a kontrastu pro různé barevné podněty a různá pozadí

V rámci měření provedeného v laboratoři LCAM pomocí spektorradiometru byly získány hodnoty jasů v $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ i jasností pro všechny stupně šedé stupnice při osmi různých úrovních adaptačních jasů v L_A . Tyto hodnoty jsou uvedeny v *tabulce 5.2*. Nejistota měření je uvedena v *tabulce P3.1* v příloze P3.

Tabulka 10.2 – Hodnoty Weberova kontrastu pro stupně šedé stupnice

L_A ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	Hodnoty kontrastu C_W pro stupně šedé stupnice									
	1	1.5	2	2.5	3	3	3.5	4	4.5	5
371	0,79	0,52	0,33	0,27	0,16	0,16	0,11	0,04	-0,01	-0,02
202	0,98	0,56	0,35	0,28	0,16	0,17	0,12	0,05	-0,01	0,06
32	0,94	0,54	0,34	0,27	0,15	0,17	0,12	0,05	-0,01	0,04
6	0,92	0,54	0,34	0,26	0,16	0,16	0,12	0,06	-0,01	0,04
0,93	0,96	0,56	0,34	0,28	0,17	0,17	0,12	0,06	-0,01	0,05
0,25	0,93	0,53	0,36	0,27	0,17	0,17	0,13	0,05	-0,01	0,01
0,05	0,99	0,57	0,36	0,28	0,17	0,16	0,13	0,05	-0,02	0,00
0,01	0,95	0,51	0,37	0,26	0,16	0,20	0,16	-0,00	-0,03	-0,00

Jak je vidět v *tabulce 10.2*, nedošlo mezi jednotlivými stupni šedé stupnice ke změně kontrastu ve vnímání jednotlivých stupňů mezi první a osmou úrovní vyjma stupně 1, který je stupněm s největší odchylkou $\Delta E^* = 12,97 \pm 0,09$. Tento výsledek poukazuje na to, že změna úrovně neovlivňuje kontrast mezi stupni šedé stupnice jako takové, ale ovlivňuje pouze vnímaný kontrast mezi stupni. U úrovní 6 – 8 někteří z pozorovatelů uváděli, že nejsou schopni mezi stupni 4, 4,5 a 5 rozlišit rozdíl, a proto jako nejmenší ještě rozlišitelný barevný rozdíl udávali hodnotu stupně 3,5, která pro ně byla stejná jako hodnota stupně 4,5 při nejvyšší úrovni adaptačního jasu a hodnotu 4 uváděli pro případ, že mezi posuzovaným barevným párem neviděli barevný rozdíl. Protože se jedná o subjektivní hodnocení, našli se během experimentů i tací pozorovatelé, kteří i na nejnižších úrovních adaptačních jasů byly schopni rozlišit barevný rozdíl na šedé stupnici i u stupňů 4, 4,5 a stupeň 5 uváděli pro případ, že mezi vzorky nevidí žádný barevný rozdíl. Z výsledků také plyne, že kontrast vzrostl u stupně 1, tedy je subjektivně více vnímaný při nižších úrovních adaptačních jasů než při nejvyšší úrovni.

10.3 Hodnocení kvality (predikční schopnosti) modelů barevného vzhledu

K hodnocení predikční schopnosti rovnic, tedy k tomu, jak je vybraná rovnice či model schopen popsat barevný vzhled při různých podmínkách pozorování se dají využívat různé škálovací a hodnotící metriky/indexy. Patří mezi ně například faktor PF/3 nebo index STRESS. [129–135]

Faktor PF/3 (performance faktor) byl navržen v roce Guanem a Luoem. [129, 132, 136, 137] Dalším důležitým indexem je index STRESS. [129, 130]

10.3.1 Index STRESS

Standardizovaná suma residuálních čtverců (index STRESS nebo Kruskalův STRESS) je multidimenzionální škálovací metrika. [130] Index STRESS (10.4) je mimo jiné používán pro hodnocení predikční schopnosti rovnic a modelů pro výpočet barevné odchylky, kdy je porovnávána vizuálně vnímaná barevná odchylka ΔV s naměřenou barevnou odchylkou ΔE . Index STRESS je používám i pro vyjádření pozorovatelské shody (intra–observer variability) a shody mezi pozorovateli (inter–observer variability). [129–135]

$$S_i = 100 \sqrt{\frac{\sum_i^n (\Delta E_i - F_3 \Delta V_i)^2}{\sum_i^n (\Delta E_i^2)}} \quad (10.4)$$

$$F_3 = \frac{\sum_i^n \Delta E_i - F_3 \Delta V_i}{\sum_i^n (\Delta V_i^2)} \quad (10.5)$$

kde ΔE_i je barevná odchylka, ΔV_i je vizuálně vnímaná barevná odchylka.

V případě hodnocení shody pozorovatele (vnitro-pozorovatelské shody) dochází v rovnici pro výpočet indexu STRESS (10.4) a (10.5) pouze k úpravě vstupních dat, kde barevná odchylka ΔE_i je nahrazena vizuálně vnímanou barevnou odchylkou ΔV_i a ΔV_i je označena jako robustní průměrná vizuálně vnímaná barevná odchylka ΔV_{rpi} .

$$S_i = 100 \sqrt{\frac{\sum_i^n (\Delta V_i - F_3 \Delta V_{rpi})^2}{\sum_i^n (\Delta V_i^2)}} \quad (10.6)$$

$$F_3 = \frac{\sum_i^n \Delta V_i - F_3 \Delta V_{rpi}}{\sum_i^n (\Delta V_{rpi}^2)} \quad (10.7)$$

Hodnota indexu STRESS nabývá hodnot od 0 – 100 %, přičemž čím vyšší je hodnota indexu STRESS, tím je predikční schopnost rovnice či modelu pro vyjádření barevné odchylky menší, tedy vizuálně vnímaná barevná odchylka a barevná odchylka se liší. V případě pozorovatelské shody značí vyšší hodnota indexu STRESS menší shodu mezi opakovanými hodnoceními pozorovatele. V případě shody mezi pozorovateli značí vyšší hodnota indexu STRESS menší shodu mezi hodnoceními porovnávaných pozorovatelů vůči robustnímu průměru vypočteného z hodnocení všech pozorovatelů.

Hodnocení, zda existuje rozdíl mezi dvěma hodnotami indexu STRESS (rozdíl mezi dvěma rozptyly) je testován pomocí F-testu. [129] Testová statistika F je vypočtena podle následující rovnice (10.8).

$$F = \frac{S_{in}^2}{S_{im}^2} \quad (10.8)$$

kde S_{in} je index STRESS pro jednu úroveň adaptačního jasu, S_{im} je index STRESS například pro druhou úroveň jasu. Zároveň lze pomocí tohoto testu hodnotit i kvalitu dvou různých rovnic nebo modelů.

Testová statistika je porovnána s F_k kritickou hodnotou, která pochází z Fisher-Snedecorova rozdělení. Jedná se o F_k kritickou hodnotu s kvantilem $(1-\alpha/2)$ a dvěma stupni volnosti $\nu_N = n - 1$ a $\nu_M = m - 1$. Hodnoty Fisher-Snedecorova rozdělení jsou tabelovány.

Nulová hypotéza H_0 je testována pro rovnost indexů (rozptylů)

$$H_0: S_{in}^2 = S_{im}^2,$$

oproti alternativě H_1 , kde mezi indexy (rozptyly) existuje rozdíl

$$H_1: S_{in}^2 \neq S_{im}^2.$$

V případě, že je $F_k \leq F$ je nulová hypotéza zamítnuta, mezi indexy (rozptyly) existuje statisticky významný rozdíl. [129]

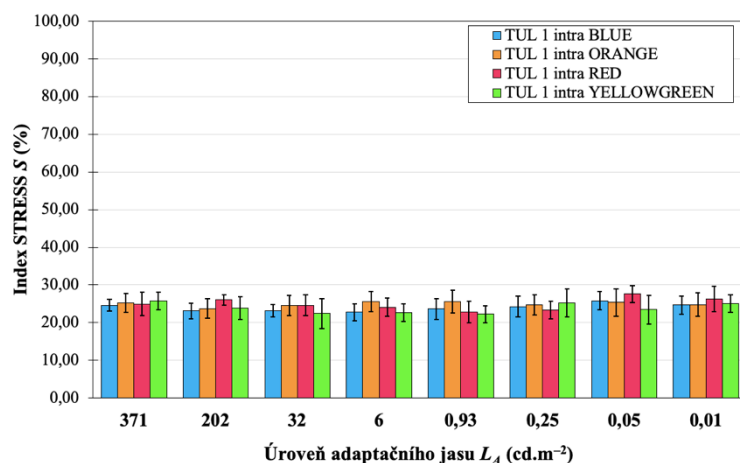
10.4 Vyhodnocení experimentu TUL 1

10.4.1 Pozorovatelská shoda pro experimentu TUL 1

Pozorovatelská shoda (intra-observer variability) vyjadřuje výsledky pro každého pozorovatele. Jedná se o hodnocení jeho opakovaných hodnocení. Jak již bylo zmíněno, každý z pozorovatelů účastníků se vizuálního experimentu TUL 1, hodnotil sadu vzorků 5krát na každé z osmi úrovní adaptačního jasu. Každý z pozorovatelů tedy provedl 2 880 individuálních posudků, dohromady bylo uskutečněno všemi pozorovateli 48 960 posudků. Vzhledem k časové náročnosti vizuálního hodnocení související i s potřebnou adaptací na různé úrovně adaptačního jasu, byl stanoven čas 40 minut jako maximální pro jedno sezení každého pozorovatele. Mezi opakovanými hodnoceními byl dodržen časový rozestup alespoň 24 hodin.

Jak bylo zmíněno výše, každý pozorovatel hodnotil sadu vzorků 5krát na každé úrovni adaptačního jasu. Z těchto 5 opakovaných hodnocení byl vypočten robustní průměr (odečteno 40 % pozorovatelových hodnocení) a robustní průměrná vizuálně vnímaná odchylka, které byly dále použity pro další výpočty (index STRESS, pozorovatelská shoda a shoda mezi pozorovateli).

Na *obrázku 10.3* se nacházejí výsledky pozorovatelské shody pro pozorovatele, kteří se zúčastnili vizuálního experimentu. Pro každého z pozorovatelů byla vypočtena hodnota indexu STRESS podle *rovnice (10.6)*. Z takto stanovených hodnot byl vypočten robustní průměr a hodnota nejistoty pro celou skupinu a pro každé barevné centrum zvlášť.



Obrázek 10.3 – Výsledky pozorovatelské shody (intra) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro pozorovatele z vizuálního experimentu TUL 1 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

Z výsledků získaných hodnocením pozorovatelské shody pomocí indexu STRESS je zřejmé, že průměrná hodnota indexu STRESS je rovna $24,46 \pm 1,28$ %, což znamená, že se pozorovatelé během svých hodnocení shodovali v průměru v 75 % opakovaných hodnocení. Porovnáním všech pozorovatelů mezi sebou v rámci pozorovatelské shody bylo zjištěno, že mezi pozorovatele s nejvyšší pozorovatelskou shodou patří pozorovatel L5 následovaný pozorovateli L15 a L3, naopak mezi pozorovatele s nejnižší pozorovatelskou shodou patří pozorovatel L11 následovaný pozorovateli L10 a L13. Bereme-li v potaz porovnání hodnot indexů STRESS na jednotlivých úrovních adaptačního jasu a zároveň pro všechna barevná centra.

Hodnoty indexu STRESS byly mezi jednotlivými úrovněmi hodnoceny, zda mezi nimi existuje signifikantní rozdíl či nikoliv. K tomuto testu byl použit F-test (10.8). Testováním pomocí tohoto testu bylo zjištěno, že mezi jednotlivými úrovněmi není mezi hodnotami indexu STRESS ani mezi pozorovateli signifikantní rozdíl.

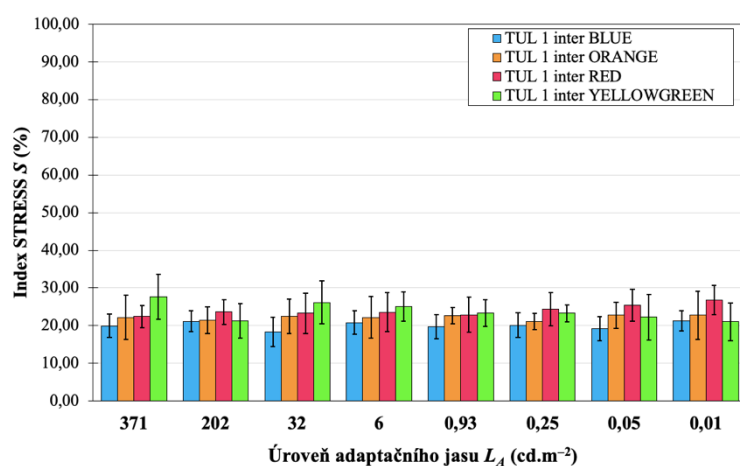
10.4.2 Shoda mezi pozorovateli TUL 1

Hodnocení shody mezi pozorovateli (inter-observer variability) je rovněž jako předchozí hodnocení pozorovatelské shody provedeno pomocí indexu STRESS. Pro každého pozorovatele byl nejprve vypočten robustní průměr z jeho 5 opakovaných hodnocení a ten byl poté následně použit pro výpočet robustního průměru všech pozorovatelů a zároveň pro výpočet robustní průměrné vizuálně vnímané odchylky, která byla použita pro výpočet indexu STRESS jednotlivých pozorovatelů, ale i celé skupiny pozorovatelů. Hodnota robustní průměrné vizuálně vnímané odchylky je poté použita pro vyjádření predikční schopnosti rovnic (kvality).

Stejně jako předchozí hodnocení, je i hodnocení shody mezi pozorovateli provedeno odděleně pro každé barevné centrum.

Všichni pozorovatelé TUL 1

Průměrná hodnota indexu STRESS se u celé skupiny pozorovatelů TUL 1 pohybovala mezi 19,70 – 27,60 jednotkami indexu STRESS. Mezi pozorovatele s nejvyšší shodou patří pozorovatelé L3, L12 a L2, naopak mezi pozorovatele s nejnižší shodou patří pozorovatelé L11, L10 a L4. Výsledky shody mezi pozorovateli pro pozorovatele z vizuálního experimentu TUL 1 se nacházejí na *obrázku 10.4* a jsou doplněny hodnotou nejistot stanovených pro příslušné úrovně adaptačního jasu a příslušná barevná centra.



Obrázek 10.4 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro pozorovatele z vizuálního experimentu TUL 1 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

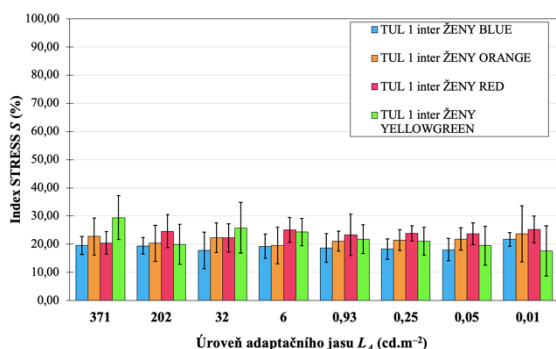
Stejně jako u výsledků pozorovatelské shody, tak i výsledky indexu STRESS byly hodnoceny pomocí F testu. Bylo zjištěno, že mezi výsledky indexu STRESS na jednotlivých úrovních neexistuje signifikantní rozdíl. Na základě toho lze říci, že skupina pozorovatelů je ve svých hodnoceních konzistentní a není nutné žádného z pozorovatelů vyřadit na základě jeho výsledků z dalších hodnocení. Průměrná hodnota indexu STRESS je rovna $22,54 \pm 2,14$ %. Z grafu lze také vyčíst, že se snižující se úrovní adaptačního jasu dochází k nárůstu indexu STRESS pro centrum red, což ukazuje na fakt, že se od sebe liší hodnocení pozorovatelů. Zároveň, jak bylo zjištěno při vyhodnocení testu na barvovit (kapitole 9), tak pozorovatelé v oblasti nízkých adaptačních jasů ztrácejí schopnost rozlišovat barvy.

Hodnocení shody mezi pozorovateli bylo provedeno dále odděleně pro ženy a muže účastníci se vizuálního experimentu, dále odděleně pro pozorovatele z Čech a Slovenska

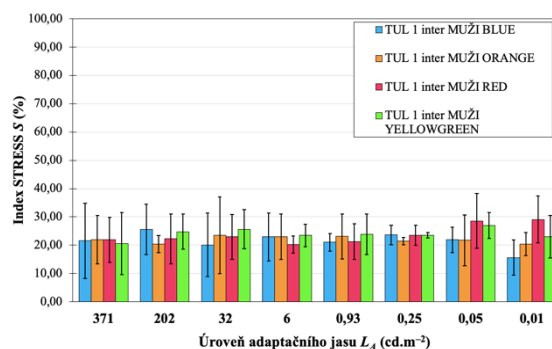
(Evropa) a pro pozorovatele z Japonska a Číny (Asie). Jak už bylo zmíněno výše, hodnocena je shoda mezi pozorovateli i pro skupiny s vynikající a průměrnou rozlišovací schopností podle výsledků FM 100-Hue testu.

Pozorovatelé TUL 1 – ženy a muži

Experimentu TUL 1 je zúčastnilo 11 žen a 6 mužů. Na následujících *obrázcích 10.5 a 10.6* jsou uvedeny výsledky shody mezi pozorovateli pro ženy, respektive muže.



Obrázek 10.5 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro ženy z vizuálního experimentu TUL 1 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

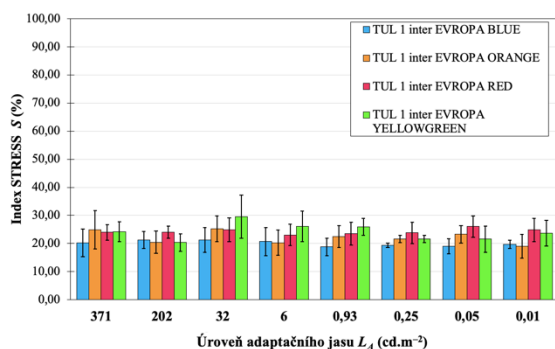


Obrázek 10.6 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro muže z vizuálního experimentu TUL 1 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

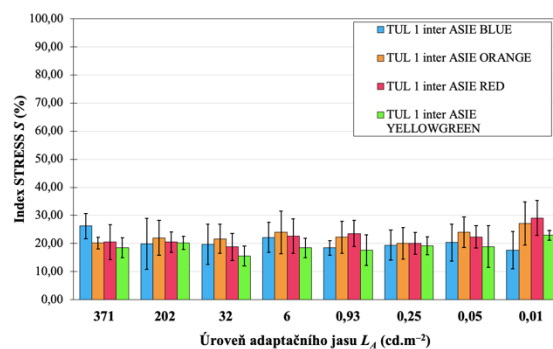
Průměrná hodnota indexu STRESS pro skupinu ženy je rovna $21,71 \pm 2,73$ %, pro skupinu muži $22,81 \pm 2,58$ %. Porovnáme-li hodnocení jednotlivých center, nejvíce se ženy shodovaly při hodnocení centra blue, nejméně naopak u center yellowgreen a red. Muži se nejméně shodovali při hodnocení centra yellowgreen. Výsledky indexu STRESS pro jednotlivá centra a úrovně byly testovány pomocí F-testu. Jeho provedením bylo zjištěno, že mezi skupinami není signifikantní rozdíl v jejich hodnocení. Na základě výsledků lze říci, že hodnocení obou skupin je konzistentní.

Pozorovatelé TUL 1 – Češi a Asiaté

Experimentu TUL 1 je zúčastnilo 10 pozorovatelů z Evropy a 7 pozorovatelů z Asie. Na následujících *obrázcích 10.7 a 10.8* jsou uvedeny výsledky shody mezi pozorovateli pro pozorovatele z Evropy, respektive pozorovatele z Asie.



Obrázek 10.7 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro české pozorovatele z vizuálního experimentu TUL 1 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

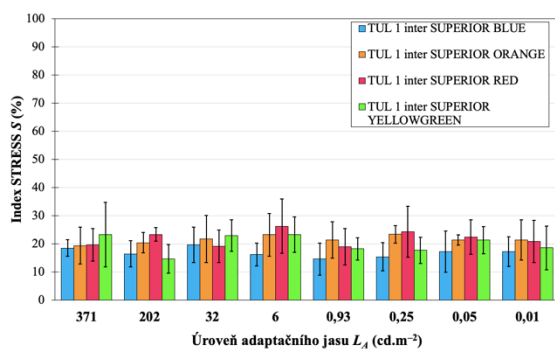


Obrázek 10.8 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro pozorovatele z Japonska a Číny z vizuálního experimentu TUL 1 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

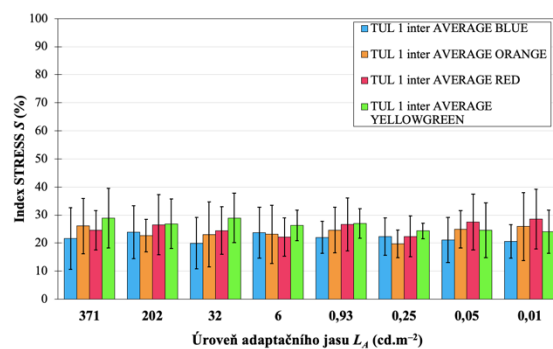
Průměrná hodnota indexu STRESS pro skupinu Evropa je rovna $22,67 \pm 2,73$ %, pro skupinu Asie $21,09 \pm 2,89$ %.

Provedením F-testu nebyl zjištěn signifikantní rozdíl mezi hodnocením výsledků pro evropskou a asijskou skupinu pozorovatelů. Na základě tohoto výsledku lze říci, že národnost pozorovatelů jakož i jejich pohlaví neměla výrazný vliv na jejich hodnocení.

Pozorovatelé TUL 1 – pozorovatelé s vynikající a průměrnou rozlišovací schopností



Obrázek 10.9 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro pozorovatele s vynikající rozlišovací schopností z vizuálního experimentu TUL 1 v závislosti na úrovni adaptačního jasu



Obrázek 10.10 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro pozorovatele s průměrnou rozlišovací schopností z vizuálního experimentu TUL 1 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

Z výsledků testování barvocitu (kapitola 9) bylo zjištěno, že ze skupiny pozorovatelů TUL 1 bylo 7 osob zařazeno na úrovni 202 cd.m^{-2} do skupiny superior a 10 osob do skupiny average, na základě těchto výsledků byly pro tyto dvě skupiny pozorovatelů porovnány výsledky hodnocení.

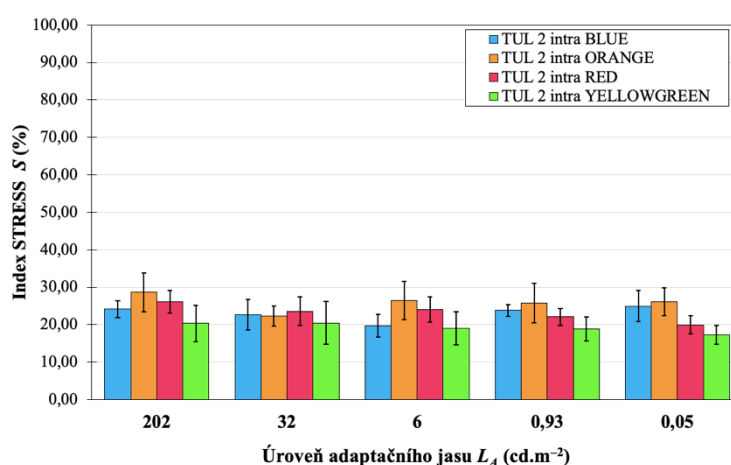
Průměrná hodnota indexu STRESS pro skupinu superior je rovna $20,06 \pm 2,97 \%$, pro skupinu average $24,35 \pm 2,53 \%$.

Z výsledků uvedených na *obrázcích 10.9 a 10.10* je patrné, že i tady existuje rozdíl mezi hodnocením těchto skupin pozorovatelů (v průměru 4 %). Avšak tento rozdíl na základě výsledků provedeného F-testu není signifikantní. Nejvyšší rozdíl mezi skupinami je pro hodnocení center blue a yellowgreen.

10.5 Vyhodnocení experimentu TUL 2

10.5.1 Pozorovatelská shoda pro experiment TUL 2

Každý z pozorovatelů účastníci se vizuálního experimentu TUL 2 hodnotil sadu vzorků 5krát na každé z pěti úrovní adaptačního jasu. Každý z pozorovatelů provedl 1 800 individuálních posudků, dohromady bylo uskutečněno všemi pozorovateli 18 000 individuálních posudků. Vzhledem k časové náročnosti vizuálního hodnocení související i s potřebnou adaptací na různé úrovně adaptačního jasu, byl stanoven čas 40 minut jako maximální pro jedno sezení každého pozorovatele. Mezi opakovanými hodnoceními byl dodržen časový rozestup alespoň 24 hodin. Z 5 opakovaných hodnocení byl pro každého pozorovatele vypočten robustní průměr a robustní průměrná vizuálně vnímaná odchylka a index STRESS.



Obrázek 10.11 – Výsledky pozorovatelské shody (intra) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro pozorovatele z vizuálního experimentu TUL 2 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

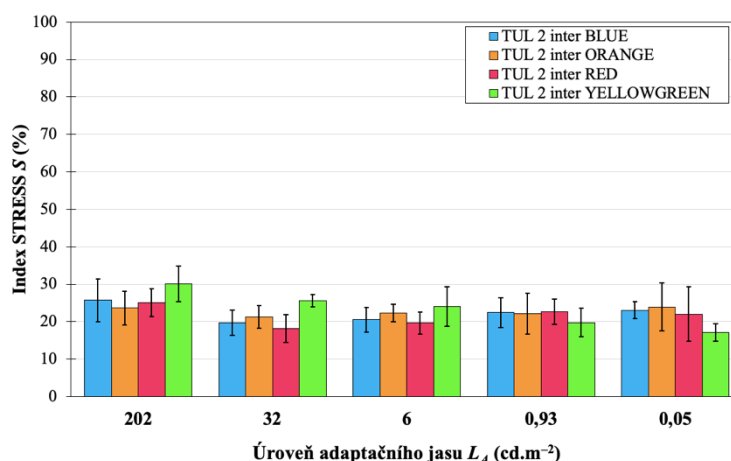
Na *obrázku 10.11* se nacházejí výsledky pozorovatelské shody pro pozorovatele, kteří se zúčastnili vizuálního experimentu TUL 2. Pro každého z pozorovatelů byla vypočtena hodnota indexu STRESS podle *rovnice (10.6)*.

Průměrná hodnota indexu STRESS pozorovatelů TUL 2 z hlediska pozorovatelské shody je rovna $22,84 \pm 3,07$ %.

Pozorovatelé S3 a S5 měli nejlepší pozorovatelskou shodu mezi svými opakovanými hodnoceními. Naopak nejnižší shodu měl pozorovatel S8. Z výsledků pozorovatelské shody lze říci, že mezi pozorovateli je shoda přibližně 77 %.

10.5.2 Shoda mezi pozorovateli TUL 2

Shoda mezi pozorovateli TUL 2 byla vypočtena pro celou skupinu tvořenou 10 pozorovateli a stejně jako v předchozím experimentu i pro muže a ženy, evropské a asijské pozorovatele a v neposlední řadě i pozorovatele superior a average podle výsledků testu na barvicit.



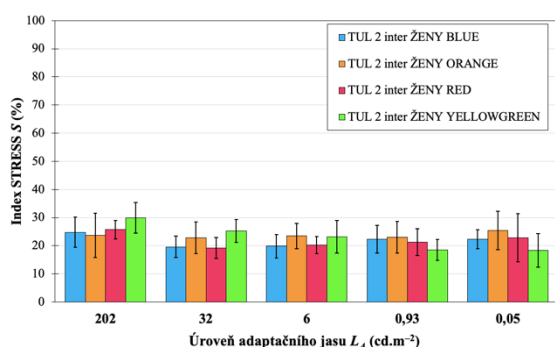
Obrázek 10.12 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro pozorovatele s průměrnou rozlišovací schopností z vizuálního experimentu TUL 2 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

Průměrná hodnota indexu STRESS pozorovatelů TUL 2 z hlediska shody mezi pozorovateli je rovna $22,45 \pm 2,97$ %.

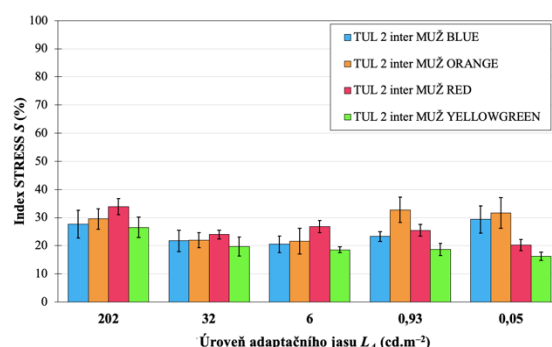
Na základě výsledků hodnocení shody mezi pozorovateli lze říci, že hodnocení skupiny pozorovatelů z experimentu TUL 2 se shoduje a mezi pozorovateli není žádný pozorovatel, který by se se svým hodnocením odlišoval. Hodnocení skupiny pozorovatelů lze tedy hodnotit jako konzistentní.

Pozorovatelé TUL 2 – ženy

Experimentu TUL 2 se zúčastnilo 9 žen a 1 muž.



Obrázek 10.13 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro ženy z vizuálního experimentu TUL 2 v závislosti na úrovni adaptačního jasu



Obrázek 10.14 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro muže z vizuálního experimentu TUL 2 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

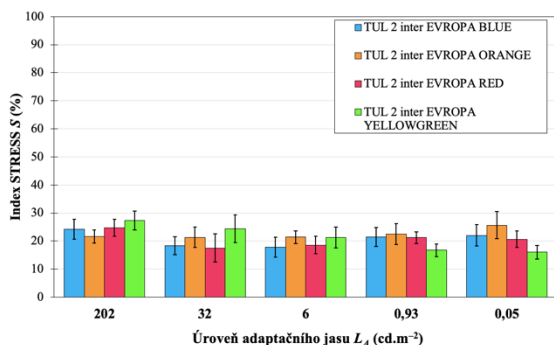
Z výsledků na *obrázku 10.13* je vidět, že se výsledky pro tuto vybranou skupinu neliší od výsledků uvedených na *obrázku 10.12*. Průměrná hodnota indexu STRESS pro ženské pozorovatelky z TUL 2 je z hlediska shody mezi pozorovateli rovna $22,59 \pm 2,86$ %. Tedy, že hodnocení mužského pozorovatele (*obrázek 10.14*) výrazně neovlivnilo výsledky této skupiny.

Průměrná hodnota indexu STRESS pro mužského pozorovatele S6 je rovna $24,52 \pm 5,09$ %. Z výsledků provedeného F-testu nebyl zjištěn signifikantní rozdíl mezi oběma skupinami pozorovatelů.

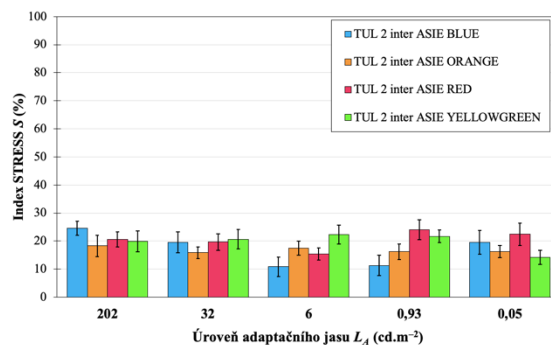
Pozorovatelé TUL 2 – Češi a Asiaté

Experimentu TUL 2 se zúčastnilo 7 pozorovatelů z Čech (Evropa) a 3 pozorovatelé z Číny (Asie). Průměrná hodnota indexu STRESS pro evropské pozorovatele je rovna $21,25 \pm 3,07$ %. Průměrná hodnota indexu STRESS pro asijské pozorovatele je rovna $18,55 \pm 3,83$ %.

Hodnocení asijské skupiny pozorovatelů se od evropské skupiny pozorovatelů liší o přibližně 3 %. Z výsledků provedeného F-testu bylo zjištěno, že rozdíl mezi skupinami není signifikantní. Asijská skupina se více shodovala v hodnocení center blue, orange a yellowgreen. Výsledky pro hodnocení centra red se u obou skupin neliší.



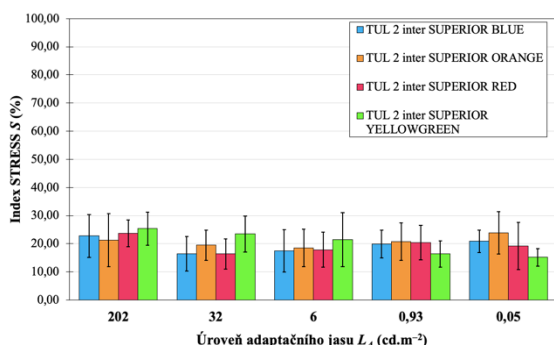
Obrázek 10.15 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro evropské pozorovatele z vizuálního experimentu TUL 2 v závislosti na úrovni adaptačního jasu



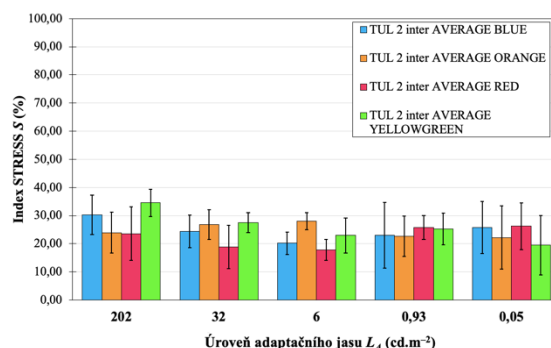
Obrázek 10.16 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro pozorovatele z Asie z vizuálního experimentu TUL 2 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

Pozorovatelé TUL 2 – pozorovatelé s vynikající a průměrnou rozlišovací schopností

Vyhodnocením výsledků testu na barvocit bylo zjištěno, že 6 pozorovatelů na základě výsledků testů má průměrnou rozlišovací schopnost (average) a 4 pozorovatelé mají na základě výsledků testů vynikající rozlišovací schopnost.



Obrázek 10.17 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro pozorovatele s vynikající rozlišovací schopností z vizuálního experimentu TUL 2 v závislosti na úrovni adaptačního jasu



Obrázek 10.18 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro pozorovatele s průměrnou rozlišovací schopností z vizuálního experimentu TUL 2 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

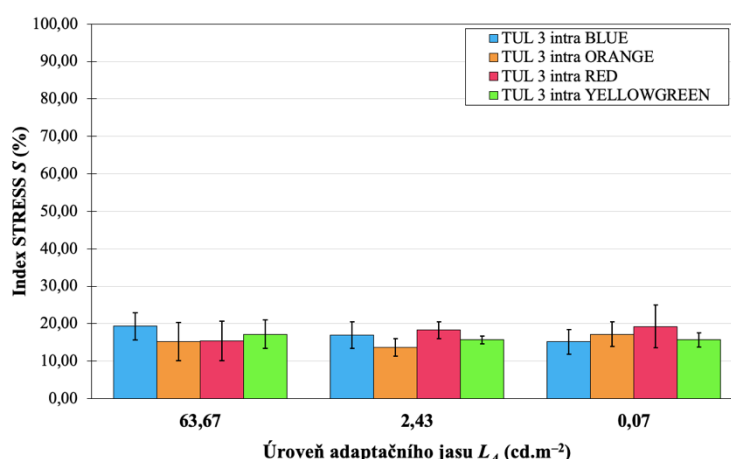
Stejně jako u pozorovatelů TUL 1, i u pozorovatelů TUL 2 je vidět, že skupina superior má nižší hodnoty indexu STRESS než skupina average. Průměrná hodnota indexu STRESS pro superior pozorovatele je rovna $20,06 \pm 2,88$ %. Průměrná hodnota indexu STRESS pro average pozorovatele je rovna $24,47 \pm 3,99$ %. Tento výsledek indexu STRESS tak souvisí s výsledky

testu na barvocit. Výsledky indexu STRESS mezi sebou byly porovnány podle testu pomocí rovnice (10.8) a na základě tohoto testu nebyl zjištěn signifikantní rozdíl mezi výsledky těchto dvou skupin.

10.6 Vyhodnocení experimentu TUL 3

10.6.1 Pozorovatelská shoda pro experiment TUL 3

Pozorovatelská shoda byla hodnocena i pro pozorovatele z experimentu TUL 3. Experimentu se zúčastnilo 6 pozorovatelů, z toho 3 muži a 3 ženy. Každý z pozorovatelů provedl 1 080 individuálních posudků, celkem bylo provedeno 6 480 individuálních posudků. Jeden z mužů měl diagnostikovanou poruchu barvocitu (pozorovatel G6). Výsledky pro tohoto pozorovatele jsou uvedeny na obrázku 10.23.



Obrázek 10.19 – Výsledky pozorovatelské shody (intra) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro pozorovatele z vizuálního experimentu TUL 3 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

Na obrázku 10.19 se nacházejí výsledky pozorovatelské shody těchto pozorovatelů. Z výsledků plyne, že pro všechna centra jsou výsledky srovnatelné. Průměrná hodnota indexu STRESS pro pozorovatele TUL 3 z hlediska pozorovatelské shody je rovna $16,33 \pm 1,82$ %, což je v porovnání s pozorovateli z ostatních experimentů nejvyšší pozorovatelská shoda.

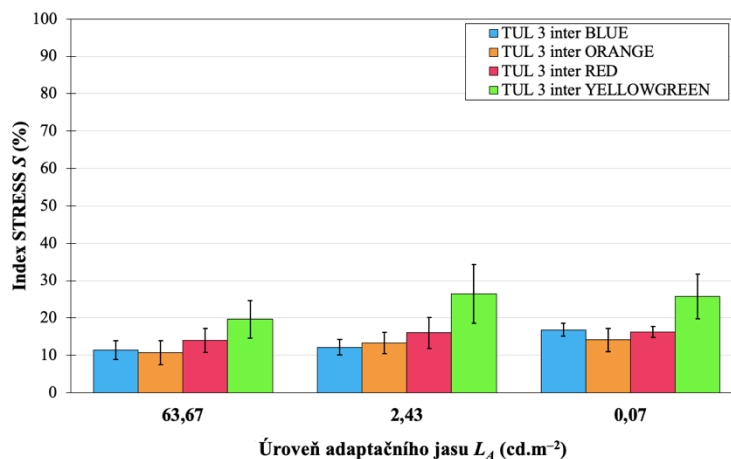
10.6.2 Shoda mezi pozorovateli TUL 3

Stejně jako pro pozorovatele z experimentů TUL 1 a TUL 2 byla i pro pozorovatele z experimentu TUL 3 vypočtena shoda mezi pozorovateli (inter-observer variability). Výsledky této shody se nacházejí na obrázku 10.20. Jak je vidět, výsledky pro centrum yellowgreen se od ostatních center liší. Hodnota indexu STRESS je pro toto centrum přibližně 2x vyšší, což

ukazuje, že se pozorovatelé méně shodovali ve svých hodnoceních (75 %), oproti ostatním centrům, kde byla shoda v hodnoceních (84 – 88 %). Tato odlišnost je částečně způsobena jednak vlivem simulátoru v SPL III, tak i tím, že tyto vzorky jsou částečně fluorescenční. To mohlo pozorovatelům evokovat vyšší odchylky, než vzorky skutečně mají.

Průměrná hodnota indexu STRESS pro pozorovatele TUL 3 je z hlediska shody mezi pozorovateli rovna $16,41 \pm 5,19$ %, což je v porovnání s pozorovateli z ostatních experimentů nejvyšší pozorovatelská shoda.

Výsledky na *obrázku 10.20* odpovídají zároveň výsledkům pro skupinu pozorovatelů superior podle testu na barvocit. Všichni pozorovatelé totiž byly na nejvyšší úrovni adaptačního jasu hodnoceni jako pozorovatelé s vynikající rozlišovací schopností.

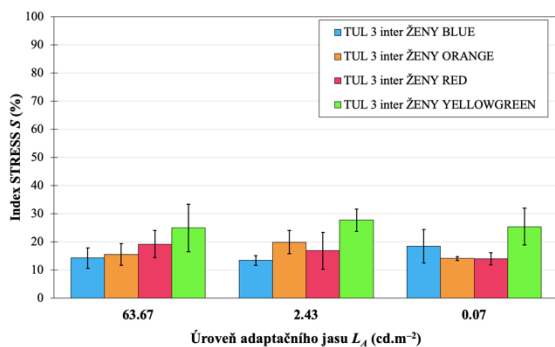


Obrázek 10.20 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro pozorovatele z vizuálního experimentu TUL 3 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

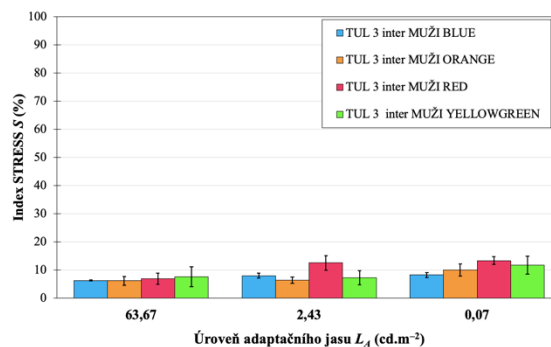
Pozorovatelé TUL 3 – ženy a muži

Jak je uvedeno výše, experimentu se zúčastnili tři ženy a tři muži. Výsledky na *obrázku 10.22* jsou uvedeny pro 2 mužské pozorovatele. Výsledky pro pozorovatele G6 jsou uvedeny na *obrázku 10.23*.

Jak je vidět, výsledky mužů a žen se liší, což bylo potvrzeno i výsledkem F-testu. Mezi výsledky existuje signifikantní rozdíl. Rozdíl je nejvíce patrný na dvou vyšších úrovních. U nejnižší úrovně se jedná o rozdíl u center blue a yellowgreen. Průměrná hodnota indexu STRESS pro ženské pozorovatelky z TUL 3 je z hlediska shody mezi pozorovateli rovna $18,63 \pm 4,96$ %. Průměrná hodnota indexu STRESS pro mužské pozorovatele z TUL 3 je z hlediska shody mezi pozorovateli rovna $8,69 \pm 2,55$ %.



Obrázek 10.21 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro ženy z vizuálního experimentu TUL 3 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

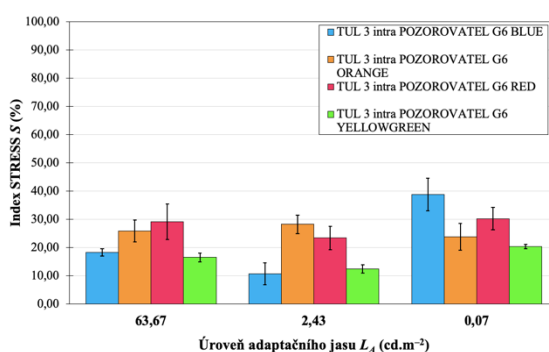


Obrázek 10.22 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro muže z vizuálního experimentu TUL 3 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

Z výsledků je zřejmé, že mužští pozorovatelé se více shodují ve svých hodnoceních než ženské pozorovatelky. U mužských pozorovatelů je viditelná změna v hodnocení u nejnižší úrovně adaptačního jasu ovlivněná ztrátou rozlišovací schopnosti barev související s adaptací.

Pozorovatel TUL 3 s diagnostikovanou vadou barvocitu

Mužský pozorovatel G6 z experimentu TUL 3 byl ještě před provedením testu na barvocit diagnostikován jako osoba s poruchou barvocitu. Jak je vidět na výsledcích, jeho hodnocení je touto poruchou ovlivněno. Oproti ostatním pozorovatelům jsou jeho výsledky téměř 2x horší. Průměrná hodnota indexu STRESS pro mužského pozorovatele G6 je rovna $21,47 \pm 8,89$ %. Ačkoliv je průměr jeho indexu STRESS na stejné úrovni jako u ostatních pozorovatelů, jeho hodnocení bylo především u nízkých úrovních adaptačního jasu ovlivněno jeho poruchou barvocitu. Pozorovatel hodnotil vzorky na základě kontrastu.



Obrázek 10.23 – Výsledky shody mezi pozorovateli (inter) vyjádřené hodnotou indexu STRESS pro pozorovatele s nízkou rozlišovací schopností (pozorovatele s vadou barvocitu) z vizuálního experimentu TUL 3 v závislosti na úrovni adaptačního jasu

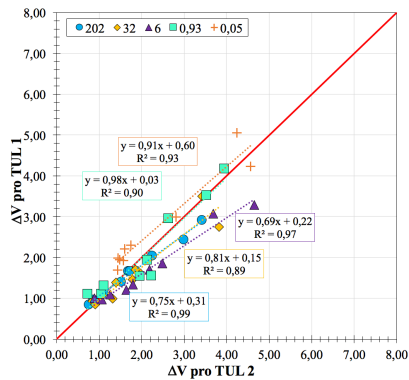
11. Porovnání výsledků z vizuálních experimentů TUL 1 a TUL 2

Pro porovnání výsledků z vizuálních hodnocení bylo nejprve potřeba vypočítat robustní průměr z pěti opakovaných hodnocení každého pozorovatele pro každý jeden barevný pár. Tento robustní průměr byl přepočten na vizuální odchylku a tato odchylka byla porovnána s robustní průměrnou vizuálně vnímanou barevnou odchylkou vypočtenou jako průměr z robustní odchylek celé skupiny pozorovatelů. V této části je provedeno hodnocení výsledků pro experimenty TUL 1 a TUL 2 pomocí robustní průměrné vizuálně vnímané odchylky. Porovnání výsledků je provedeno s využitím regresní analýzy. Porovnání experimentů pomocí standardizované sumy residuálních čtverců (index STRESS) je provedeno samostatně v kapitole 10.

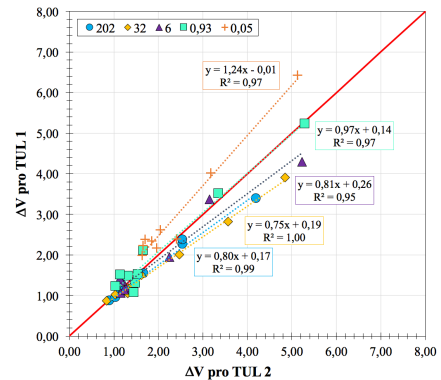
V kapitole o přípravě vizuálního experimentu bylo popsáno, že pro experiment TUL 1 byla zvolena Grey scale metoda hodnocení barevných párů pomocí šedé stupnice pro změnu odstínu. Zároveň bylo popsáno, jak byl experiment proveden a realizován. Výhodou tohoto typu experimentu je, že má pozorovatel k dispozici šedou stupnici po celou dobu experimentu, tedy i při velmi nízkých úrovních adaptačních jasů. Zároveň je to však i nevýhoda v tom, že je do značné míry ovlivněn kontrast mezi jednotlivými stupni šedé stupnice. Někteří z pozorovatelů nebyly schopni při nízkých úrovních adaptačních jasů rozlišit rozdíl mezi stupni 4,5 a 5, někteří z pozorovatelů jej však stále rozpoznali.

Vizuální experiment TUL 2 byl proveden podle metody Memory matching metod. Výhodou této metody oproti předchozí metodě je to, že šedá stupnice pro hodnocení změny odstínu není zatížena změnou úrovně adaptačního jasu. Na druhou stranu, přináší i nevýhody spojené s nutností zapamatování si jednotlivých stupňů. Protože se jedná o subjektivní hodnocení, je možné, že každý pozorovatel může vnímat barevný rozdíl mezi páry odlišně.

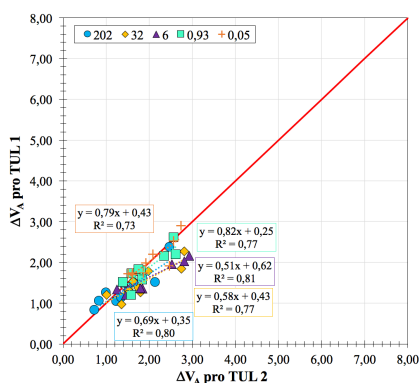
Ačkoliv se tyto experimenty lišily v podstatě jejich provedení, lze jejich výsledky porovnat pomocí vizuálně vnímané barevné odchylky. Porovnání je provedeno pro shodné úrovně adaptačních jasů (202, 32, 6, 0,93 a 0,05 cd.m⁻²). Výsledky porovnání jsou zobrazeny na grafech na *obrázcích 11.1 – 11. 4* pro jednotlivá barevná centra.



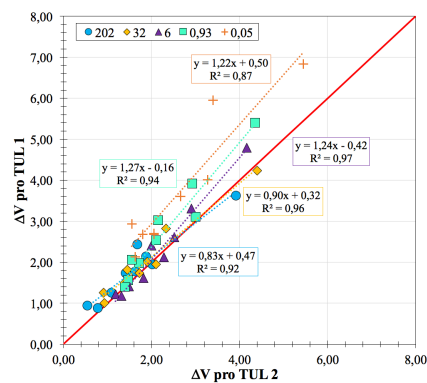
Obrázek 11.1 – Závislost mezi výsledky vizuálně vnímané barevné odchylky vypočtené pro TUL 1 a TUL 2 pro centrum blue



Obrázek 11.2 – Závislost mezi výsledky vizuálně vnímané barevné odchylky vypočtené pro TUL 1 a TUL 2 pro centrum orange



Obrázek 11.3 – Závislost mezi výsledky vizuálně vnímané barevné odchylky vypočtené pro TUL 1 a TUL 2 pro centrum red



Obrázek 11.4 – Závislost mezi výsledky vizuálně vnímané barevné odchylky vypočtené pro TUL 1 a TUL 2 pro centrum yellowgreen

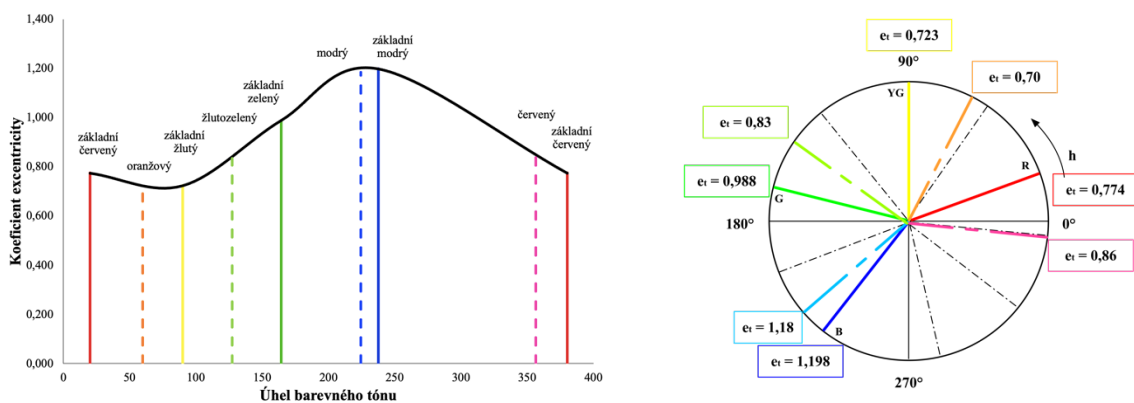
Z porovnání vizuálně vnímaných barevných odchylek pro experimenty TUL 1 a TUL 2 vypočtených pro odpovídající úrovně adaptačních jasů 202, 32, 6, 0,93 a 0,05 cd.m^{-2} bylo zjištěno, že u všech center vyjma centra red, jsou mezi výsledky vysoké korelace mezi hodnoceními i na nízkých úrovních adaptačních jasů. Což značí, že pozorovatelé v obou experimentech hodnotili barevné páry podobně. U centra red je korelace mezi experimenty v průměru o 10 – 20 % nižší než u zbývajících center. Tento trend souvisí se ztrátou rozlišovací schopnosti vlivem snižující se úrovně adaptačních jasů a také menší citlivostí pozorovatelů pro toto barevné centrum. Jak již bylo zmíněno, pozorovatelům se nejlépe hodnotily odchylky ve světlosti a nejméně snadno odchylky v úhlu barevného tónu. Vlivem snižující se úrovně adaptačního jasu docházelo k tomu, že právě odchylky ve světlosti byly stále rozpoznatelné i na nižších úrovních adaptačních jasů, kdežto odchylky v úhlu barevného tónu a u centra red a orange, také odchylky v chroma, byly se snižující se úrovní adaptačního jasu méně barevné, ale i hůře hodnotitelné a pozorovatelé je tudíž hodnotili s menším rozdílem, než ve skutečnosti

měly. U odchylky ve světlosti docházelo k tomu, že vlivem snižující se úrovně adaptačních jasů, se odchylky ve světlosti subjektivně zvyšovaly.

12. Výstupní koreláty modelu CIECAM02

V rámci modelu barevného vzhledu CIECAM02 je možné vypočítat relativní i absolutní koreláty popisující barevný vzhled na různých úrovních adaptačních jasů.

Na *obrázku 12.1* jsou zobrazeny 4 základní odstíny vycházející z definice NCS atlasu/systému a doplněny jsou o průměrnou hodnotu odstínu čtyřech zvolených barevných center použitých při vizuálních experimentech TUL 1, TUL 2 a TUL 3 (barevné přerušované čáry). Čerchované černé čáry označují rozdělení oblasti mezi základními odstíny. Plné barevné čáry poté odpovídají čtyřem základním odstínům. Z tohoto schématu tedy vyplývá, že zvolená barevná centra byla vybrána tak, aby co nejvíce odpovídala základním barevným tónům definovaných pro model CIECAM02.



Obrázek 12.1 – Závislost koeficientu excentricity na úhlu barevného tónu posuzovaného vzorku

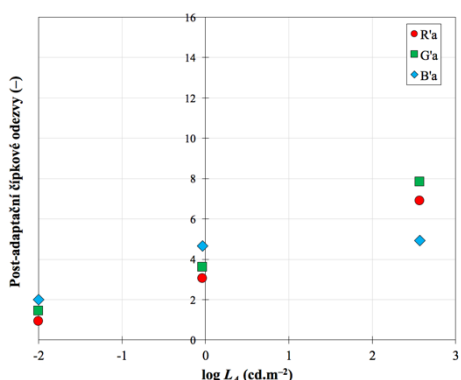
Pro všechny vzorky z barevných center byly na základě vstupních údajů vypočteny koreláty barevného vzhledu CIECAM02 a mezi zvolenými barevnými páry byla vypočtena barevná odchylka. V *tabulce 12.1* jsou vloženy vybrané výsledky modelu CIECAM02 pro 3 z 8 úrovní adaptačního jasů, a to úroveň ve fotopické oblasti (úroveň 1), úrovně v mezopické oblasti (úrovně 5 a 8), přičemž úroveň 8 se nachází blízko hranice mezopické a skotopické oblasti vidění.

V *tabulce 12.1* je možné si všimnout, jak se mění koreláty s ohledem na úroveň adaptačního jasů. Změny v hodnotách jsou vidět u absolutních korelátů (například subjektivní chromatičnost nebo jasnost). Změny se projeví i u hodnot post-adaptačních čípkových odezev $R'_a G'_a B'_a$. Podíváme-li se na pozici vzorků na nejvyšší úrovni adaptačního a na jejich pozici na nejnížší úrovni adaptačního, je vidět, že se vzorku posunují směrem ke středu, tedy ztrácí svoji barevnost, nikoliv však svoji světlost.

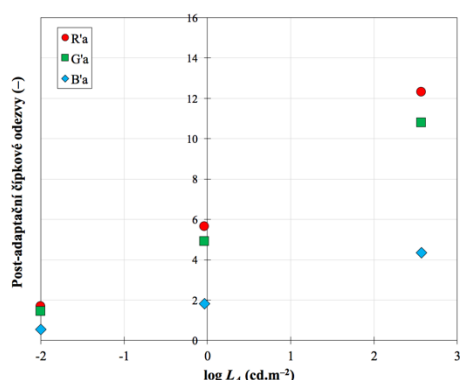
Tabulka 12.1 – Výsledky modelu CIECAM02 pro centrum yellowgreen

	1	5	8
<i>X</i>	47,35	46,11	44,62
<i>Y</i>	73,93	67,07	59,49
<i>Z</i>	17,33	33,26	53,61
<i>X_W</i>	94,27	92,23	92,84
<i>Y_W</i>	100	100	100
<i>Z_W</i>	106,50	129,08	176,88
<i>L_A (cd. m⁻²)</i>	371	0,93	0.01
<i>F_L</i>	1,23	0,17	0.01
<i>D</i>	1,00	0,83	0,82
<i>Y_b</i>	41,92	41,92	41,92
<i>c</i>	0,69	0,69	0,69
<i>N_C, F</i>	1	1	1
<i>n</i>	0,42	0,42	0,42
<i>z</i>	2,13	2,13	2,13
<i>N_{bb}</i>	0,86	0,86	0,86
<i>R'_{aW}</i>	15,55	6,91	2,01
<i>G'_{aW}</i>	15,56	6,95	2,03
<i>B'_{aW}</i>	15,56	7,08	2,13
<i>A_W</i>	40,66	17,97	5,05
<i>R'_a</i>	13,46	5,81	1,64
<i>G'_a</i>	13,94	5,97	1,67
<i>B'_a</i>	7,45	4,07	1.33
<i>A</i>	35,31	15,08	4,07
<i>a</i>	-1,06	-0.33	-0,06
<i>b</i>	1,39	0,40	0,07
<i>h</i>	127,46	129,52	127,38
<i>H</i>	159,26	161,91	159,16
<i>H_C</i>	41Y 59G	38Y 62G	41Y 59G
<i>J</i>	81,27	77,34	72,95
<i>Q</i>	245,75	71,63	13,36
<i>C</i>	78,09	52,64	32,00
<i>M</i>	82,22	33,66	9,54
<i>s</i>	57,84	68,55	84,52
<i>a_M</i>	-50,00	-21.42	-5,79
<i>b_M</i>	65,27	25,97	7,58
<i>J'</i>	88,06	85,30	82,09
<i>M'</i>	46,31	24,98	8,63
<i>a'_M</i>	-28,17	-15,90	-5,24
<i>b'_M</i>	36,76	19,27	6,86

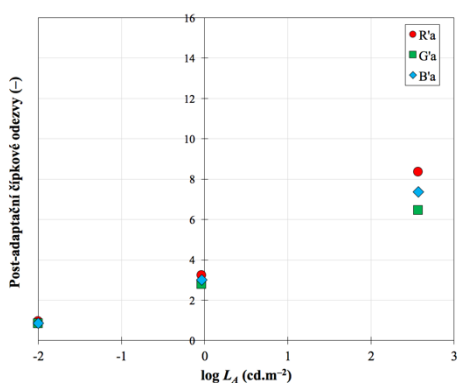
Změna post-adaptačních čípkových odezev pro barevná centra je ukázána na *obrázcích 12.2 – 12.5* na třech úrovních adaptačního jasu ($371, 0,93$ a $0,01 \text{ cd.m}^{-2}$).



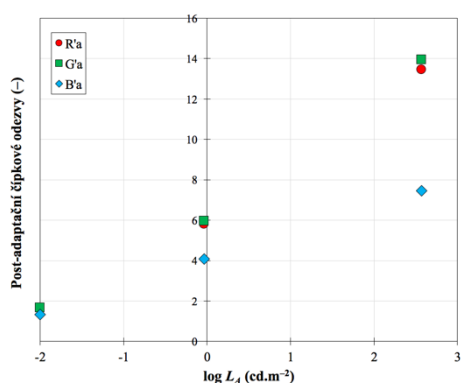
Obrázek 12.2 – Vliv úrovně adaptačního jasu na změnu post-adaptačních čípkových úrovní pro centrum blue



Obrázek 12.3 – Vliv úrovně adaptačního jasu na změnu post-adaptačních čípkových úrovní pro centrum orange



Obrázek 12.4 – Vliv úrovně adaptačního jasu na změnu post-adaptačních čípkových úrovní pro centrum red



Obrázek 12.5 – Vliv úrovně adaptačního jasu na změnu post-adaptačních čípkových úrovní pro centrum yellowgreen

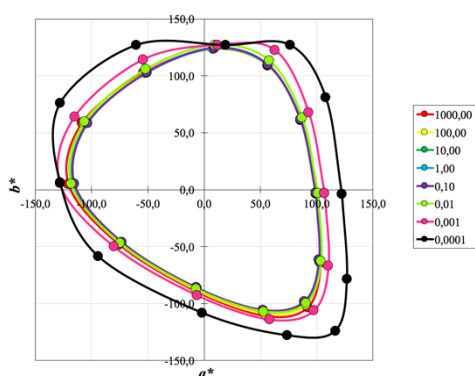
Jak je vidět, post-adaptační čípkové odezvy se liší pro jednotlivá barevná centra. U centra blue na *obrázku 12.2*, u modré post-adaptační čípkové odezvy (B'_a) dochází ke změně mezi nejvyšší a nejnižší úrovní adaptačního jasu pouze o 59 %, což značí, že tento kanál je oproti ostatním dvěma kanálům (86 %, respektive 81 %) méně ovlivněn změnou úrovně adaptačního jasu. Mezi 1. (371 cd.m^{-2}) a 5. úrovní ($0,93 \text{ cd.m}^{-2}$) adaptačního jasu dochází u kanálu R'_a a G'_a ke změně srovnatelné se změnou způsobenou u modrého kanálu mezi 1. a 8. úrovní adaptačního jasu.

U ostatních barevných center se změna post-adaptačních čípkových odezev pohybuje mezi 1. a 5. úrovní okolo 54 – 61 %, mezi úrovní 1. a 8. 81 – 89 %. Výjimku tvoří kanál pro post-adaptační čípkovou odezvu B'_a u centra yellowgreen, kde je změna mezi úrovněmi 1 a 5 pouze

45 %, avšak celková změna mezi úrovněmi 1 a 8 je rovna 82 %. U centra red je změna post-adaptačních čípkových odezev stejná pro všechny tři kanály.

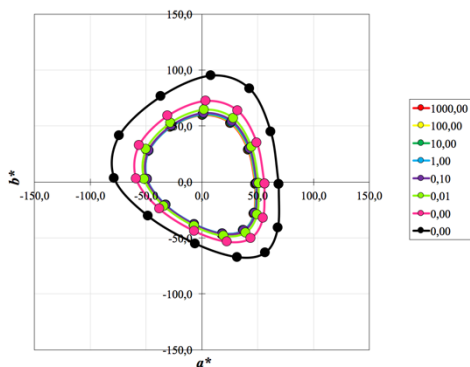
Takováto změna vyplývá z definice samotných post-adaptačních čípkových odezev, které jsou mimo jiné ovlivněny i úrovní adaptačního jasu.

Na obrázku 12.5 a 12.9 jsou vyneseny hodnoty $C=100$ a $C=1$ pro různé úrovně adaptačních jasů na chromatické ploše a^*b^* a chromatické ploše modelu CIECAM02 a_Mb_M . Pro simulaci těchto hodnot jsou vybrány adaptační úrovně 1000, 100, 10, 1, 0,1, 0,01, 0,001 a 0,0001 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$.



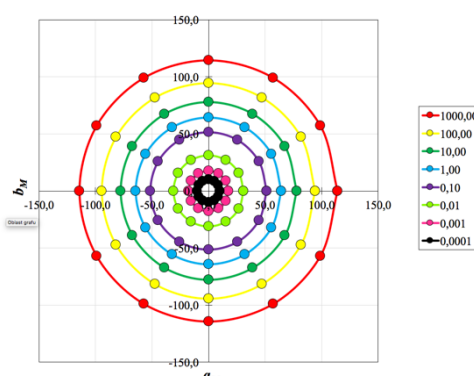
Obrázek 12.5 – Vliv hodnoty chroma a světlosti na hodnotu barevnosti vzorků ($J=100$ a $C=100$) na různých úrovních adaptačních jasů v prostoru

a^*b^*



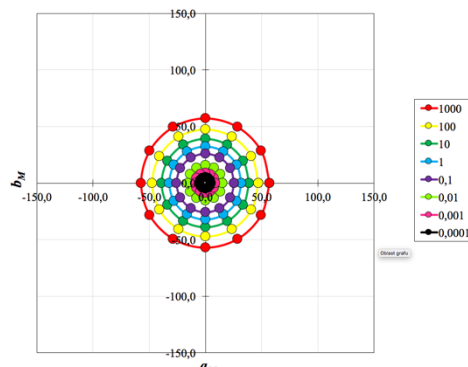
Obrázek 12.7 – Vliv hodnoty chroma a světlosti na hodnotu barevnosti vzorků ($J=50$ a $C=50$) na různých úrovních adaptačních jasů v prostoru

a^*b^*



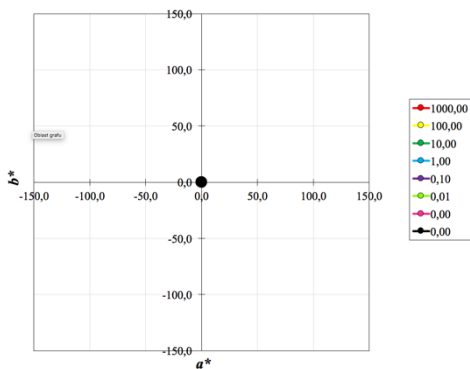
Obrázek 12.6 – Vliv hodnoty chroma a světlosti na hodnotu subjektivní chromatičnosti ($J=100$ a $C=100$) na různých úrovních adaptačních jasů

v prostoru a_Mb_M

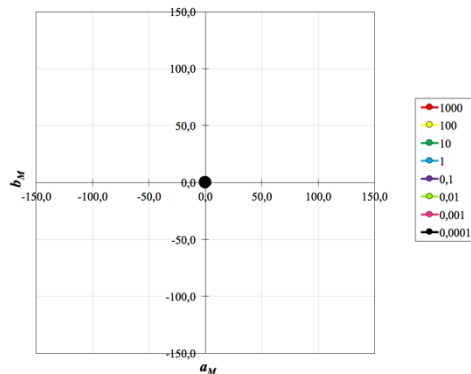


Obrázek 12.8 – Vliv hodnoty chroma a světlosti na hodnotu subjektivní chromatičnosti ($J=50$ a $C=50$) na různých úrovních adaptačních jasů

v prostoru a_Mb_M

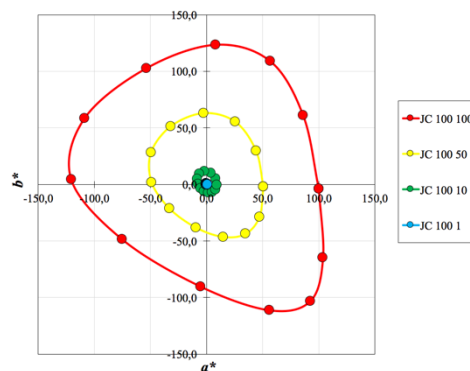


Obrázek 12.9 – Vliv hodnoty chroma a světlosti na hodnotu barevnosti vzorků ($J=1$ a $C=1$) na různých úrovních adaptačních jasů v prostoru a^*b^*

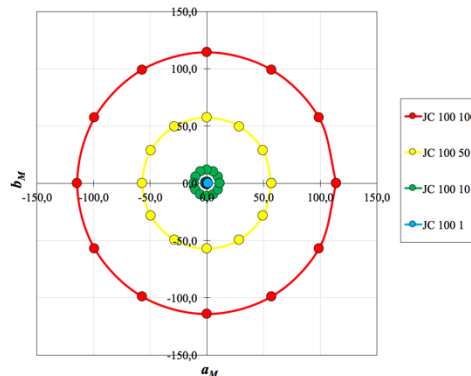


Obrázek 12.10 – Vliv hodnoty chroma a světlosti na hodnotu subjektivní chromatičnosti ($J=1$ a $C=1$) na různých úrovních adaptačních jasů v prostoru $a_M b_M$

Vlivem změny hodnoty chroma a světlosti dochází ke kompresi hodnoty barevných souřadnic v obou prostorech.

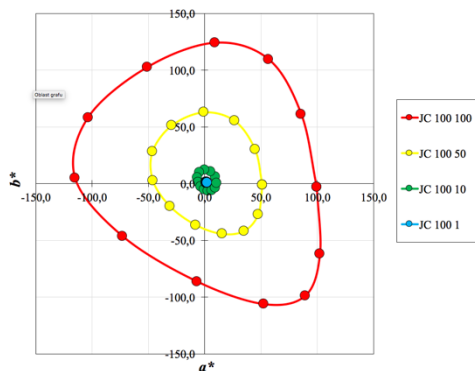


Obrázek 12.11 – Vliv hodnoty chroma a světlosti na hodnotu barevnosti vzorků na fotopické úrovni adaptačních jasů ($1000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$) v prostoru a^*b^*

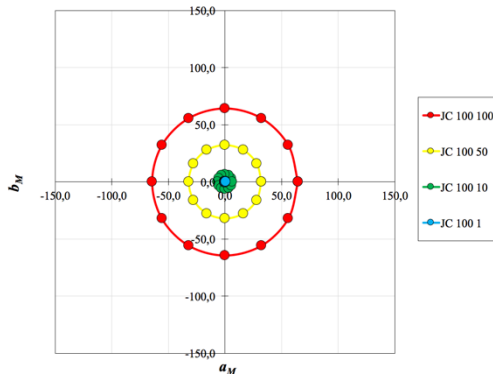


Obrázek 12.12 – Vliv hodnoty chroma a světlosti na hodnotu barevnosti vzorků na fotopické úrovni adaptačních jasů ($1000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$) v prostoru $a_M b_M$

Vlivem změny hodnoty chroma dochází ke kompresi hodnoty barevných souřadnic v obou prostorech. Výraznější změna nastává pro souřadnice $a_M b_M$ z modelu CIECAM02, jak je vidět pro vybrané úrovně adaptačního jasů 1000, 1 a 0,001 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$.

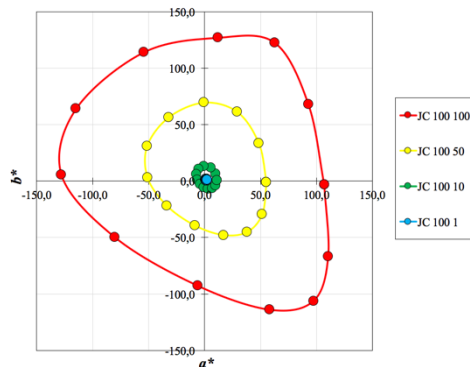


Obrázek 12.13 – Vliv hodnoty chroma a světlosti na hodnotu barevnosti vzorků na mezopické úrovni adaptačních jasů (1 cd. m^{-2})



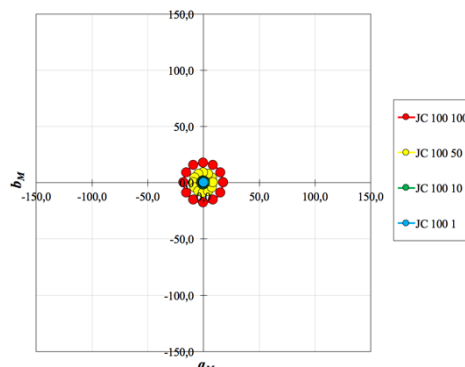
Obrázek 12.14 – Vliv hodnoty chroma a světlosti na hodnotu barevnosti vzorků na mezopické úrovni adaptačních jasů (1 cd. m^{-2})

v prostoru a^*b^*



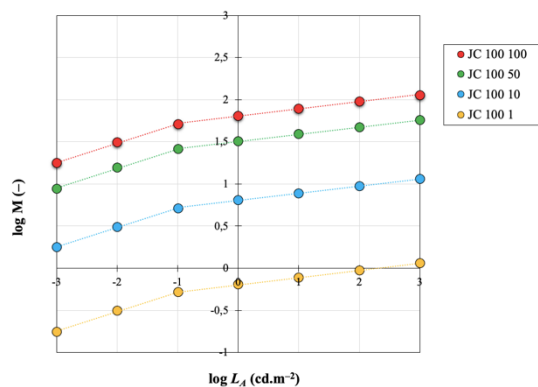
Obrázek 12.15 – Vliv hodnoty chroma a světlosti na hodnotu barevnosti vzorků na skotopické úrovni adaptačních jasů ($0,001 \text{ cd. m}^{-2}$) v prostoru a^*b^*

v prostoru $a_M b_M$

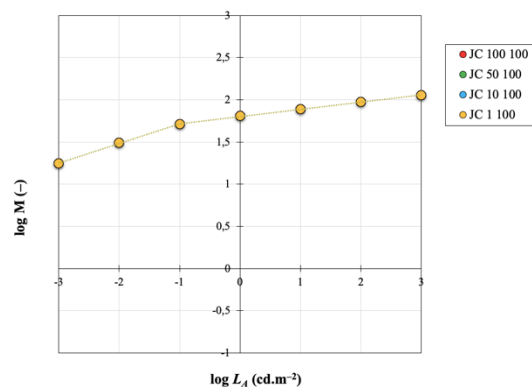


Obrázek 12.16 – Vliv hodnoty chroma a světlosti na hodnotu barevnosti vzorků na skotopické úrovni adaptačních jasů ($0,001 \text{ cd. m}^{-2}$) v prostoru $a_M b_M$

Je tedy patrné, že na změnu barevnosti, v tomto případě hodnot subjektivní chromatičnosti, má největší vliv změna hodnoty chroma a zároveň, jak plyne z definice samotného modelu CIECAM02 i změna úrovně adaptačního jasů (*obrázek 12.17 a 12.18*).



Obrázek 12.17 – Vliv hodnoty chroma na hodnotu subjektivní chromatičnosti na různých úrovních adaptačních jasů



Obrázek 12.18 – Vliv hodnoty světlosti na hodnotu subjektivní chromatičnosti na různých úrovních adaptačních jasů

Vlivem snížení hodnoty chroma dochází ve stejném poměru na různých úrovních adaptačních jasů i ke snížení hodnoty subjektivní chromatičnosti ($C = 100, 50, 10$ a 1), jak je vidět na *obrázku 12.17*. Naopak vlivem snížení hodnoty světlosti ($J = 100, 50, 10$ a 1) není hodnota subjektivní chromatičnosti ovlivněna (*obrázek 12.18*).

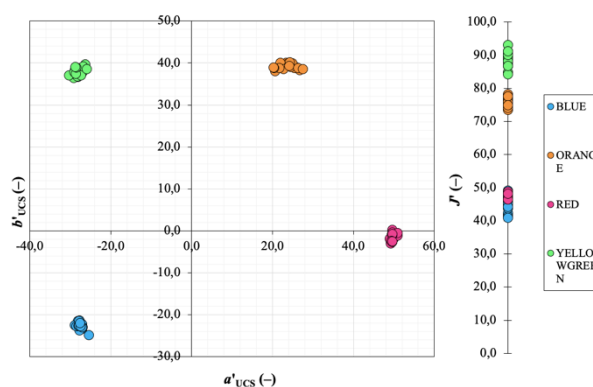
13. Úprava modelu CAM02–UCS

Model CIECAM02 i jeho přibližně rovnoměrná verze umožňují odhady vzhledu s ohledem na různou úroveň adaptačního jasu a podmínek osvětlení a pozorování. Při testování predikční schopnosti těchto modelů bylo zjištěno, že v oblasti mezopických adaptačních jasů dochází ke zhoršení predikční schopnosti modelů oproti hodnotám predikční schopnosti v oblasti fotopických adaptačních jasů. Tento důvod vedl k zamyšlení a návržení úpravy modelu CAM02–UCS s cílem zvýšit predikční schopnost tohoto modelu v mezopické oblasti adaptačních jasů. Model CAM02–UCS byl odvozen pro fotopickou úroveň adaptačního jasu 200 cd. m^{-2} , a jak bylo potvrzeno testováním predikční schopnosti barevná centra blue, orange, red a yellowgreen, v oblastech mezopických adaptačních jasů došlo ke snížení predikční schopnosti nejen modelu CAM02–UCS, ale i modelu CIECAM02.

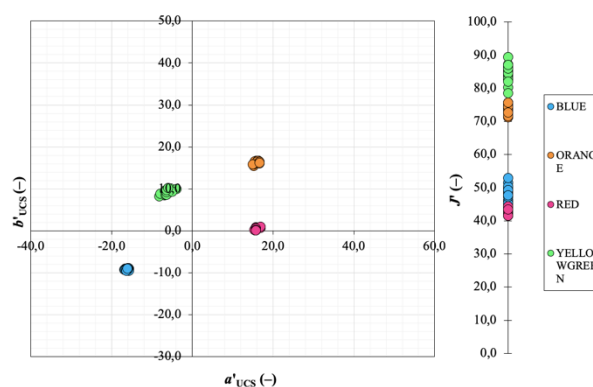
Na základě tohoto zjištění bylo přistoupeno k úpravě funkce subjektivní chromatičnosti pro model CAM02–UCS. Cílem této navrhované úpravy je zvýšení predikční schopnosti modelu CAM02–UCS v oblasti mezopických adaptačních jasů.

13.1 Úprava funkce subjektivní chromatičnosti pro model CAM02–UCS

Jak je uvedeno v teoretické části a potvrzeno v experimentální části, je pro každé barevné centrum nutná různě velká komprese mezi hodnotou subjektivní chromatičnosti v modelu CIECAM02 a CAM02–UCS. Závislost modifikované hodnoty subjektivní chromatičnosti M' pro model CAM02–UCS a subjektivní chromatičnosti M pro model CIECAM02 je uveden na obrázku 2.11 v kapitole 2. Na obrázku 13.1 a 13.2 je zobrazena změna barevnosti v prostoru CAM02–UCS mezi nejvyšší a nejnižší úrovní adaptačního jasu.



Obrázek 13.1 – Pozice barevných center v prostoru CAM02–UCS na úrovni adaptačního jasu 371 cd. m^{-2}



Obrázek 13.2 – Pozice barevných center v prostoru CAM02–UCS na úrovni adaptačního jasu $0,01 \text{ cd. m}^{-2}$

Na *obrázcích* je vidět, že vlivem samotného snížení úrovně adaptačního jasu dochází ke ztrátě barevnosti, respektive snížení hodnoty subjektivní chromatičnosti vlivem Stevens–Huntova jevu. Jak je možné rovněž vidět na grafech na *obrázcích 13.1 a 13.2*, u modifikované světlosti J' v modelu CAM02–UCS nedochází k tak výrazné změně mezi úrovněmi 1 a 8 jako je tomu u M' .

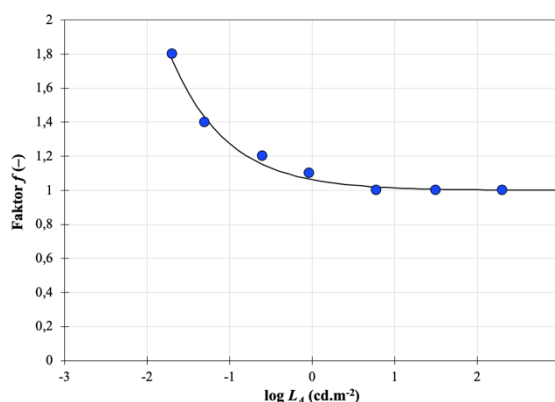
V rámci předchozích testování predikční schopnosti bylo zjištěno, že v oblasti mezopických adaptačních jasů ($-0,01 - 6 \text{ cd.m}^{-2}$) dochází ke snížení predikční schopnosti modelu oproti fotopickým adaptačním jasům.

Prvním krokem v úpravě funkce subjektivní chromatičnosti bylo zavedení korekčního faktoru f při výpočtu subjektivní chromatičnosti v modelu CAM02–UCS. Korekční faktor byl stanoven optimalizací, která vedla ke zvýšení predikční schopnosti modelu v oblastech mezopických adaptačních jasů. V rámci optimalizace bylo zjištěno, že použití korekčního faktoru je potřebné pro úrovně adaptačních jasů nižších než 6 cd.m^{-2} . Použití korekčního faktoru f ve výpočtu subjektivní chromatičnosti je vyjádřeno *rovnicí* (13.1).

$$M'_f = M' \cdot f \quad (13.1)$$

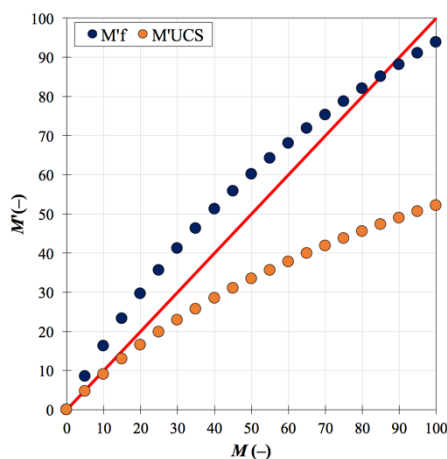
kde M' je hodnota subjektivní chromatičnosti pro model CAM02–UCS, f je korekční faktor.

Pro každou úroveň mezopického adaptačního jasu byla optimalizací stanovena hodnota korekčního faktoru f . Závislost hodnoty korekčního faktoru na úrovni adaptačního jasu je zobrazena na *obrázku 13.3*.



Obrázek 13.3 – Graf zobrazující závislost korekčního faktoru na úrovni adaptačního jasu

Na *obrázku 13.3* je vidět, že v oblastech vyšší adaptačních jasů zůstává hodnota faktoru f konstantní a mění se až v oblasti mezopických adaptačních jasů. Příslušné hodnoty faktoru f jsou odvozeny pro úrovně adaptačních jasů v experimentu TUL 1, neboť byl u tohoto experimentu rozsah adaptačních jasů nejširší. Průběh korekčního faktoru f ukazuje, že se snižujícím se adaptačním jasnem dochází k tomu, že se upravená subjektivní chromatičnost M'_f z modelu UCS blíží nekorigované subjektivní chromatičnosti M z modelu CIECAM02. Na *obrázku 13.4* je zobrazena závislost mezi M' a M bez použití faktoru f (oranžové body) a závislost mezi M'_f a M s použitím faktoru f pro nejnižší úroveň adaptačního jasu (tmavě modré body).



Obrázek 13.4 – Graf zobrazující závislost M' a M'_f na M s použitím faktoru f pro úroveň adaptačního jasu $0,01 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$

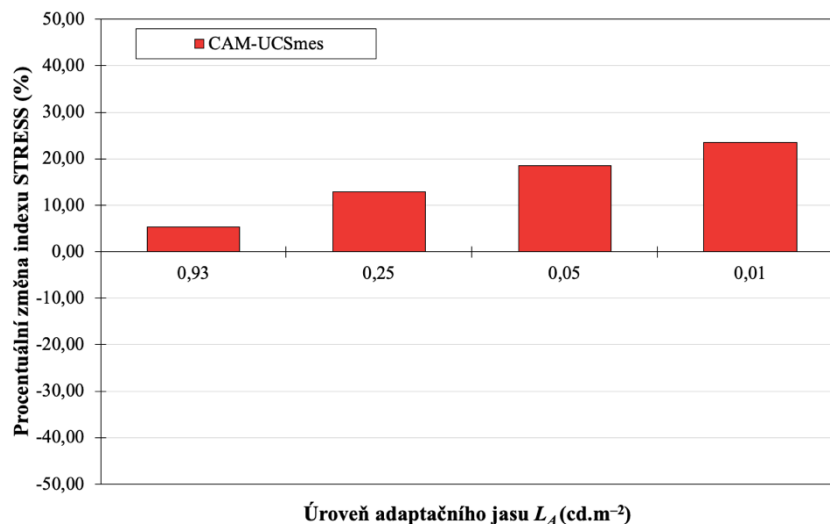
Úprava M'_f měla za následek zvýšení hodnot subjektivní chromatičnosti především u vzorků s vyšší chromatičností oproti vzorkům s nižší chromatičností. Jak je možné vidět použití faktoru f tedy vede k tomu, že hodnota M'_f pro model CAM02–UCS se blíží hodnotě M pro model CIECAM02, tzn. že navrhovaná úprava zvyšuje vnímanou subjektivní chromatičnost na těchto úrovních adaptačních jasů. Znamená to tedy, že v oblastech mezopických adaptačních jasů by měla být pro výpočet funkce subjektivní chromatičnosti použita funkce odpovídající výpočtu subjektivní chromatičnosti v modelu CIECAM02. U nejnižší úrovně adaptačního jasu došlo ke zvýšení predikční schopnosti modelu o 20 %.

Z tohoto důvodu je navržena úprava výpočtu subjektivní chromatičnosti M' ve shodě s koncepcí uvedenou v *rovnících* (1.1), (1.3) a (1.4). Výpočet funkce subjektivní chromatičnosti s návrhovou úpravou je proveden podle rovnice (13.2).

$$M'_{mes} = m \cdot M' + (1 - m) \cdot M \quad (13.2)$$

kde M je subjektivní chromatičnost odpovídající výpočtu v modelu CIECAM02, M' je subjektivní chromatičnost odpovídající výpočtu v modelu CAM02–UCS a m odpovídá hodnotám vypočteným pro úrovně adaptačních jasů pro experiment TUL 1.

Nově vypočtené hodnoty subjektivní chromatičnosti M'_{mes} bylo vloženo do modelu CAM02–UCS. Pro tento model (označení CAM02–UCSmes) byla znovu vypočtena predikční schopnost. Změna predikční schopnosti modelu CAM02–UCSmes je vyjádřena procentuální změnou indexu STRESS, která byla vypočtena mezi indexem STRESS pro CAM02–UCS a CAM02–UCSmes. Procentuální změna indexu STRESS v závislosti na úrovni adaptačního jasu je zobrazena na *obrázku 13.5*, kde kladné hodnoty odpovídají zvýšení predikční schopnosti modelu, zatímco záporné hodnoty odpovídají snížení predikční schopnosti modelu.



Obrázek 13.5 – Graf zobrazující procentuální změnu indexu STRESS v závislosti na úrovni adaptačního jasu

Jak je vidět na *obrázku 13.5*, zavedení koeficientu m při výpočtu funkce subjektivní chromatičnosti v oblasti mezopických adaptačních jasů přineslo zvýšení predikční schopnosti. Nejvyšší změny bylo dosaženo na nejnižší úrovni adaptačního jasu, přibližně 24 % oproti modelu CAM02–UCS. Na úrovni 0,93 cd. m⁻² se zvýšila predikční schopnost modelu přibližně o 5,5 %.

Stejně jako pro experiment TUL 1, bylo stejné hodnocení provedeno i pro experimenty TUL 2 a TUL 3.

U experimentu TUL 2 došlo ke zvýšení predikční schopnosti přibližně o 6 % na úrovni adaptačního jasu $0,93 \text{ cd. m}^{-2}$ a přibližně o 13 % na úrovni adaptačního jasu $0,05 \text{ cd. m}^{-2}$. Pro experiment TUL 3 došlo ke zvýšení predikční schopnosti o 4 % na úrovni adaptačního jasu pro úroveň $2,43 \text{ cd. m}^{-2}$ a o 10 % na úrovni $0,07 \text{ cd. m}^{-2}$.

Jak vyplývá ze získaných výsledků, zvýšení predikční schopnosti bylo dosaženo u všech třech experimentů. Zároveň lze říci, že výsledky procentuálního zlepšení predikční schopnosti pro všechny tři experimenty jsou srovnatelné.

VI. Zhodnocení výsledků a nových poznatků

14. Závěr

V rámci zpracování disertační práce byla provedena literární rešerše týkající se stavu aktuální problematiky v oblasti zabývající se popisem barevného vzhledu při různých úrovních adaptačních jasů. Dále byla zpracována rešerše související s možností přenositelnosti dat mezi spektrofotometry (stanovení nejistot a chyb měření, hodnocení preciznosti a přesnosti měření).

Aktuálnost řešení viditelnosti osob při snížených úrovních jasů a rozlišitelnost například výstražných nebo informačních tabulí při nenadálém výpadku proudu, byly jednou z hlavních motivací pro zpracování této práce.

Experimentální část disertační práce je tvořena třemi hlavními částmi. První část se zabývala hodnocením nejistot a chyb měření, hodnocením preciznosti měření na základě opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření a hodnocením přesnosti měření. V rámci zpracování výsledků nebyl žádný ze spektrofotometrů ani v jedné skupině rozdělené podle typu měřicí geometrie (de:8°, di:8° a 45°:0°) vyřazen z hodnocení z důvodu nízké preciznosti nebo přesnosti měření. Bylo zjištěno, že na základě stanovení chyb měření (kapitola 8), je při použití korekčních faktorů možné v případě, kdy není k dispozici referenční spektrofotometr, použít s využitím těchto korekčních faktorů měření z jiného spektrofotometru. Zároveň je důležité k výsledkům měření přičíst i nejistoty měření těchto výsledků. V případě hodnocení chyb měření bylo zjištěno, že v případě, že se porovnávají dva spektrofotometry s blízkým nastavením, není rozdíl mezi jejich výsledky tak výrazný (korekční faktory nejsou vysoké), jako je tomu u spektrofotometrů, jejichž nastavení se liší (spektrofotometr 1 a 3).

Při hodnocení krátkodobé a dlouhodobé přesnosti a preciznosti měření (z hlediska opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření) bylo zjištěno, že ve většině případů měření je krátkodobé měření více přesné a precizní než dlouhodobé měření, které je více ovlivněno systematickými i náhodnými chybami měření. Velmi důležitá je také kontrola kalibračních standardů, které jsou používány pro kalibraci spektrofotometrů a dodržování podmínek měření.

Druhá část experimentální části se zabývala přípravou, realizací a vyhodnocením vizuálního experimentu, testováním a hodnocením barvocitu pozorovatelů. Příprava vizuálního experimentu spočívala v přípravě barevných center s vysokou chromatičností. Důvod, proč byla zvolena vysoká chromatičnost byl ten, že vzorky s vyšší chromatičností by měly být rozlišitelné i při nižších úrovních adaptačních jasů a usnadnit tak rozpoznání osoby při snížených světelných podmínkách. Z technických důvodů však bylo dosaženo vysoké hodnoty chromatičnosti pouze u center orange, red a yellowgreen. U centra blue se podařilo připravit

vzorky s hodnotou chromatičnosti okolo 39 jednotek, což je oproti centrům orange a red hodnota poloviční. Zvoleno bylo 18 párů pro každé barevné centrum, páry byly rozděleny podle odchylek v měrné světlosti ΔL^* , chroma ΔC^* a úhlu barevného tónu ΔH^* , tzn. 6 párů pro každou ze zmíněných odchylek. V rámci realizace vizuálních experimentů byly připraveny 3 samostatné vizuální experimenty. Experiment TUL 1, který byl založen na metodě Grey Scale, která spočívá v tom, že je šedá stupnice pro hodnocení změny odstínu po celou dobu experimentu k dispozici pozorovatelům při hodnocení barevné odchylky mezi jednotlivými páry. Je tedy ovlivněna změnou úrovně adaptačního jasu. Experiment TUL 2 byl založen na metodě Memory matching method, tedy metodě spočívající v tom, že pozorovatel měl čas na zapamatování si šedé stupnice při konstantní úrovni adaptačního jasu a teprve potom, po doporučené době pro adaptaci hodnotil páry v hlavní skříni experimentu, tedy podle paměti. Experiment TUL 3 byl shodný s experimentem TUL 2, ale byl proveden v rámci pracovní stáže na Universitě v Granadě. Oproti experimentům provedeným na TUL se liší v tom, že byl z technických důvodů použit jiný typ simulátoru D65 a jiné úrovně adaptačních jasů, které však byly zvoleny tak, aby co možná nejvíce odpovídaly úrovním použitým na TUL. Při přípravě byly oba simulátory D65 (pro skřín použítou na TUL a v Granadě) porovnány s ohledem na pozici bodu nepestrosti v CIE kolorimetrickém trojúhelník xy a bylo zjištěno, že lze data získaná pro tyto simulátory porovnávat, a to i z toho důvodu, že náhradní teplota chromatičnosti obou simulátorů se liší o 50 K, což je pod hranicí rozlišitelnosti lidským okem. V rámci přípravy experimentu bylo zjištěno, že jeden z filtrů pro experiment TUL 1 a TUL 2 se liší ve spektrálním průběhu spektrálního činitele odrazu, což vedlo k tomu, že pozice toho filtru byla oproti stejně označeným filtrům posunuta více do zelena. Tento fakt ovlivnil hodnocení na 8. úrovni adaptačních jasů a ve výpočtech byl korigován použitím korekčního faktoru stanoveného pro úroveň 8 a předpokládanou úroveň 8 při použití správného filtru. Rozdíl v hodnotách indexu STRESS byl v řádech setin až jednotek.

Pro experiment TUL 1 bylo připraveno 8 různých úrovní adaptačního jasu v rozsahu $371 - 0,01 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$, což je rozsah, který zahrnuje fotopické a mezopické úrovně adaptačních jasů. Poslední úroveň $0,01 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ je blízká hranici mezi mezopickou a skotopickou oblastí vidění ($0,001 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$,). Experiment TUL 2 byl realizován při 5 různých úrovních adaptačního jasu v rozsahu $202 - 0,05 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ a experiment TUL 3 byl realizován při 3 úrovních adaptačního jasu v rozsahu $63,67 - 0,07 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$.

Prvním krokem při zpracování vizuálního experimentu bylo hodnocení barvocitu, které bylo provedeno pomocí FM-100 Hue testu. Na základě jeho hodnocení na nejvyšší společné

úrovně adaptačního jasu pro experimenty TUL 1 a TUL 2 a nejvyšší úrovně adaptačního jasu pro experiment TUL 3 nebyl žádný z testovaných pozorovatelů vyřazen z dalšího hodnocení z důvodu nízké rozlišitelnosti barev. Pozorovatelé byli na základě vyhodnocení testu rozřazeni do dvou kategorií s vynikající (superior) a (average) průměrnou rozlišovací schopností podle TES skóre. Při vyhodnocení výsledků FM-100 Hue testu bylo zjištěno, že se snižující se úrovní adaptačního jasu dochází ke stírání rozdílu mezi hodnocením pozorovatelů ze skupiny superior a average a při nejnižších úrovních adaptačních jasů je rozdíl mezi těmito skupinami přibližně 3 %. Zároveň bylo zjištěno, že se snižující se úrovní adaptačního jasu dochází k postupné ztrátě rozlišovací schopnosti barev. U některých pozorovatelů se objevil tzv. pseudotritanopický efekt. Ten se projevuje tím, že při snižující se úrovni adaptačního jasu došlo k tzv. oslepnutí krátkovlnných čípků, a pozorovatelé tak hůře rozlišovali modrozelené terčíky FM-100 Hue testu oproti červeným a žlutým terčíkům. Experimentu TUL 3 se účastnil pozorovatel s již dříve diagnostikovanou vadou barvocitu. Tento pozorovatel sice nebyl vyloučen z dalšího hodnocení, ale jeho hodnocení byla vyhodnocena samostatně od zbývajících pozorovatelů. Na základě získaných výsledků bylo zjištěno, že pozorovatelé jsou schopni rozlišovat barvy i při nízkých úrovních adaptačních jasů, avšak s určitými omezeními, které se týkají citlivosti fotoreceptorů a s tím související změny spektrální citlivosti lidského oka. Kdy se snižující se úrovní adaptačních jasů dochází k postupné ztrátě schopnosti rozlišovat červené a oranžové odstíny, ale částečně i modré a zelené.

Při realizaci vizuálních experimentů TUL 1 – TUL 3 bylo celkem provedeno 73 440 individuálních posudků, které byly hodnoceny z hlediska pozorovatelé shody a shody mezi pozorovateli. Na základě výsledků lze říci, že hodnocení vybraných skupin pozorovatelů je konzistentní a shoda mezi nimi je v případě shody mezi pozorovateli vyšší než 70 %. Na základě výsledků indexu STRESS nebyly výsledky pro žádného z pozorovatelů vyřazeny z dalšího testování. Porovnány byly výsledky i pro skupiny pozorovatelů z Evropy a Asie, žen a mužů a podle výsledku FM-100 Hue testu. Bylo zjištěno, že výsledky pozorovatelů ze skupiny superior jsou v průměru lepší než u skupiny average.

Z výsledků vizuálního experimentu bylo zjištěno, že ke změně rozlišovací schopnosti dochází na úrovni $0,93 \text{ cd. m}^{-2}$.

Třetí část experimentální části se zabývala testováním současného modelu barevného vzhladu CIECAM02 a CAM02–UCS. Z výsledků testování predikční schopnosti bylo zjištěno, že na úrovni mezopických adaptačních jasů dochází k výraznému snížení predikční schopnosti těchto modelů oproti fopickým úrovním adaptačních jasů. Vzhledem ke snížení predikční schopnosti modelu CAM02–UCS v této oblasti adaptačních jasů byla navržena a testována

úprava subjektivní chromatičnosti pro mezopické oblasti adaptačních jasů. Při testování modelů bylo zjištěno, že vlivem Stevens–Huntova efektu dochází ke ztrátě barevnosti bez výjimky pro všechna barevná centra. Oproti tomu vlivem klesající úrovně adaptačního jasů nedochází ke snížení světlosti vzorků.

Navržená úprava funkce subjektivní chromatičnosti v mezopické oblasti adaptačních jasů spočívá ve využití koncepce používané při výpočtu funkce spektrální účinnosti lidského oka v mezopické oblasti adaptačních jasů. Testováním této úpravy bylo dosaženo signifikantního zlepšení predikční schopnosti modelu CAM02–UCS v oblasti mezopických adaptačních jasů přibližně o 24 %.

15. Stručný přehled vlastních přínosů autora disertační práce

1. V rámci experimentální části se mi na základě měření sady barevných standardů podařilo dosáhnout zvýšené přenositelnosti dat mezi spektrofotometry, a také zvýšit shodu naměřených dat na jednotlivých spektrofotometrech. K tomuto účelu jsem použila navržený postup testování uvedený v kapitole 8.
2. Pomocí vhodně zvolených a kvalitních simulátorů denního osvětlení se mi podařilo připravit porovnatelné vizuální experimenty v různých skříních. Ze získaných výsledků pro různé skupiny pozorovatelů rozdělených podle pohlaví, národnosti či experimentu bylo zjištěno, že výsledky těchto experimentů jsou mezi sebou porovnatelné.
3. Testování modelu CAM02–UCS na širokém rozsahu adaptačních jasů. Model CAM02–UCS byl odvozen pro fotopickou úroveň adaptačního jasu $200 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Na základě toho lze jako přínos této práce brát to, že model CAM02–UCS je možné použít i na vyšších úrovních adaptačních jasů, než je tato úroveň, ale zároveň použít i na úrovních nižších jasů než je tato úroveň.
4. Z důvodu snížené predikční schopnosti modelu CAM02–UCS v mezopické oblasti adaptačních jasů byla zavedena funkce mezopické subjektivní chromatičnosti. Pomocí této funkce bylo dosaženo významného zlepšení predikční schopnosti testovaného modelu CAM02–UCS (o 24 %) v oblasti mezopických adaptačních jasů.

16. Návrh dalšího možného postupu

V rámci disertační práce byla během vizuálních experimentů testována čtyři barevná centra blue, orange, red a yellowgreen. Pro další testování modelu CIECAM02 i CAM02–UCS by bylo vhodné rozšířit tato barevná centra o alespoň dvojnásobek počtu stávajících barevných center, jejichž úhly barevného tónu by se nacházely v oblasti mezi úhly barevného tónu čtyřech vybraných center v této disertační práci a zároveň k nim zařadit i tři achromatická centra pro sledování citlivosti lidského oka na změnu světlosti jednotlivých center.

Protože model CIECAM02 i model CAM02–UCS jsou navrženy pro predikci barevného vzhledu v případě bezdefektního vnímání pozorovatelů, bylo by vhodné sledovat predikční schopnost těchto modelů v případě, kdy by pozorovatel byla osoba s vadou barvocitu.

Na základě výsledků z experimentů provedených v disertační práci, je dalším možným krokem návrh a testování designu oblečení pro rozlišení osob v nočním dopravním prostoru. Změna designu by se však neměla týkat pouze zvýšení viditelnosti osob, ale také rozpoznatelnosti a rozlišitelnosti informačních tabulí či map v případech nenadálých živelných katastrof a výpadků elektrické a mobilní sítě, ať už jako následek těchto katastrof nebo z jiných důvodů. Protože informační tabule a mapy slouží při výpadku elektrické sítě k jednom z důležitých prvků při orientaci osob v prostoru.

VII. Seznam použité literatury

- [1] Benjamin, W. J., & Borish, I. M. (2006). *Borish's clinical refraction*. St. Louis Mo., US: Butterworth Heinemann/Elsevier.
- [2] Gross, H., Blechinger, F., & Aichtner, B. (2015). Human eye. *Handbook of Optical Systems*, 1-87. doi:10.1002/9783527699247.ch1
- [3] Kuchynka, P. (2016). *Oční lékařství*. Praha, CZ: Grada Publishing.
- [4] Rozsival, P. (2017). *Oční Lékařství*. Praha, CZ: Galén.
- [5] Maňák, V. (1977). *Zrak*. Brno, CZ: Vlnařský průmysl.
- [6] Šikl, R. (2013). *Zrakové vnímání*. Praha, CZ: Grada.
- [7] Malacara, D. (2011). *Color vision and colorimetry: Theory and applications*. Bellingham, US: SPIE.
- [8] Pechova, M. (2012). *Vnímání barev, jeho testování a měření barev* (Bachelor's thesis, Czech Technical University, 2012) (pp. 1-134). Prague: CTU.
- [9] Pechova, M. (2015). *Vliv intenzity osvětlení na rozlišování malých barevných rozdílů* (Master's thesis, Technical University of Liberec, 2015) (pp. 1-120). Liberec: TUL.
- [10] Joukal, M. (2017). Anatomy of the Human Visual Pathway. In K. Skorkovska (Ed.), *Homonymous Visual Field Defects* (pp. 1-16). doi: 10.1007/978-3-319-52284-5
- [11] Retina [Image] (2018). Retrieved from https://www.brainkart.com/article/Retina_26069/
- [12] Ding, S., Kumar, S., & Mok, P. (2017). Cellular reparative mechanisms of mesenchymal stem cells for retinal diseases. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(8), 1-19. doi:10.3390/ijms18081406
- [13] Kolb, H., Fernandez, E., & Nelson, R. (2007). *Webvision: The organization of the Retina and visual system*. Retrieved from <https://webvision.med.utah.edu>
- [14] Solomon, S. G. (2021). Retinal ganglion cells and the magnocellular, parvocellular, and koniocellular subcortical visual pathways from the eye to the brain. *Handbook of Clinical Neurology*, 31-50. doi:10.1016/b978-0-12-821377-3.00018-0
- [15] Visual Pathway [Image] (2018). Retrieved from https://www.brainkart.com/article/Visual-Pathway_26113/
- [16] Visual cortex. (2021). Retrieved from https://www.seevividly.com/info/Physiology_of_Vision/The_Brain/Visual_System/Visual_Cortex
- [17] Huff, T., Mahabadi, N., & Tadi, P. (2021). Neuroanatomy, Visual Cortex. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK482504/>

- [18] Javed, K., Reddy, V., & Lui, F. (2021). Neuroanatomy, Cerebral Cortex. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK537247/>
- [19] Cones and Rods [Image] (2018). Retrived from <https://www.blueconemonochromacy.org/how-the-eye-functions/>
- [20] Tarttelin, E. E., Bellingham, J., Hankins, M. W., Foster, R. G., & Lucas, R. J. (2003). Neuropsin (OPN5): A novel opsin identified in mammalian neural tissue1. *FEBS Letters*, 554(3), 410–416. [https://doi.org/10.1016/s0014-5793\(03\)01212-2](https://doi.org/10.1016/s0014-5793(03)01212-2)
- [21] Neitz, J., & Neitz, M. (2011). The genetics of normal and Defective Color Vision. *Vision Research*, 51(7), 633-651. doi:10.1016/j.visres.2010.12.002
- [22] Neitz, M., Patterson, S. S., & Neitz, J. (2019). Photopigment genes, cones, and color update: Disrupting the splicing code causes a diverse array of vision disorders. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 30, 60-66. doi:10.1016/j.cobeha.2019.05.004
- [23] Sharpe, L. T., Stockman, A., Jägle, H., & Nathans, J. (1999). Opsin genes, cone photopigments, color vision, and color blindness. In L. T. Sharpe & K. R. Gegenfurtner (Eds.), *Color vision: From genes to perception* (pp. 3-52). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [24] Stockman, A., & Sharpe, L. T. (1999). Cones spectral sensitivities and color matching. In L. T. Sharpe & K. R. Gegenfurtner (Eds.), *Color vision: From genes to perception* (pp. 53-87). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [25] O'Leary, B., Duke, B., Eilers, J. E., & Abrahamson, E. W. (1973). Isomerisation of the visual chromophore all-trans to 11-CIS retinal. *Nature*, 246(5429), 166-167. doi:10.1038/246166a0
- [26] Kono, M., Goletz, P. W., & Crouch, R. K. (2008). 11-cis- and all-trans-retinols can activate rod opsin: Rational design of the visual cycle. *Biochemistry*, 47(28), 7567-7571. doi:10.1021/bi800357b
- [27] Stockman, A., Sharpe, L. T., & Fach, C. (1999). The spectral sensitivity of the human short-wavelength sensitive cones derived from thresholds and color matches. *Vision Research*, 39(17), 2901-2927. doi:10.1016/s0042-6989(98)00225-9
- [28] Stockman, A., & Sharpe, L. T. (2000). The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision Research*, 40(13), 1711-1737. doi:10.1016/s0042-6989(00)00021-3
- [29] Stockman, A., & Sharpe, L. T. (2000). Tritanopic color matches and the middle- and long-wavelength-sensitive cone spectral sensitivities. *Vision Research*, 40(13), 1739-1750. doi:10.1016/s0042-6989(00)00020-1

- [30] Absorbance [Image] (2018). Retrived from <https://curiosity.gr/index.php/2017/09/06/the-retina-construction-and-function/>
- [31] Hábel, J. (1995). *Světelná technika a osvětlování*. Praha, CZ: FCC.
- [32] Stockman, A., & Sharpe, L. T. (2006). Into the Twilight Zone: The complexities of mesopic vision and luminous efficiency. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 26(3), 225-239. doi:10.1111/j.1475-1313.2006.00325.x
- [33] International Commission on Illumination (2010). *Recommended system for mesopic photometry based on visual performance* (CIE 191:2010). Retrieved from <https://cie.co.at/publications/recommended-system-mesopic-photometry-based-visual-performance>
- [34] Halonen, L. & Puolakka, M. (2011). CIE and Mesopic Photometry. In *Proceedings of the 27th Session of the CIE, 9-16 July 2011, Sun City, South Africa*. (pp. 3-9). Vienna: CIE.
- [35] Hábel, J., Dvořáček, K., Žák, P., & Dvořáček, V. (2013). 3. Světelnětechnické veličiny. In J. Hábel (Author), *Světlo a osvětlování* (pp. 57-88). Praha, CZ: FCC Public.
- [36] Raphael, S., & MacLeod, D. I. (2011). Mesopic luminance assessed with minimum motion photometry. *Journal of Vision*, 11(9), 1-21. doi:10.1167/11.9.14
- [37] Zele, A. J., & Cao, D. (2014). Vision under mesopic and scotopic illumination. *Frontiers in Psychology*, 5, 1594, 1-15. doi:10.3389/fpsyg.2014.01594
- [38] Shin, J. C., Yaguchi, H., & Shioiri, S. (2004). Change of color appearance in photopic, mesopic and Scotopic Vision. *Optical Review*, 11(4), 265-271. doi:10.1007/s10043-004-0265-2
- [39] Freiding, A., Eloholma, M., Ketomäki, J., Halonen, L., Walkey, H., Goodman, T., & Bodrogi, P. (2007). Mesopic Visual Efficiency I: Detection Threshold Measurements. *Lighting Research & Technology*, 39(4), 319-334. doi:10.1177/1477153507080917
- [40] Walkey, H., Orreveteläinen, P., Barbur, J., Halonen, L., Goodman, T., Alferdinck, J., & Szalmás, A. (2007). Mesopic Visual Efficiency II: Reaction time experiments. *Lighting Research & Technology*, 39(4), 335-354. doi:10.1177/1477153507080920
- [41] Várady, G., Freiding, A., Eloholma, M., Halonen, L., Walkey, H., Goodman, T., & Alferdinck, J. (2007). Mesopic Visual Efficiency III: Discrimination threshold measurements. *Lighting Research & Technology*, 39(4), 355-364. doi:10.1177/1477153507080922
- [42] Goodman, T., Forbes, A., Walkey, H., Eloholma, M., Halonen, L., Alferdinck, J., & Szalmás, A. (2007). Mesopic Visual Efficiency IV: A model with relevance to

- nighttime driving and other applications. *Lighting Research & Technology*, 39(4), 365-392. doi:10.1177/1477153507080930
- [43] Maksimainen, M., Kurkela, M., Bhusal, P., & Hyypä, H. (2019). Calculation of mesopic luminance using per pixel S/P ratios measured with digital imaging. *LEUKOS*, 15(4), 309-317. doi:10.1080/15502724.2018.1557526
- [44] Eloholma, M., Viikari, M., Halonen, L., Walkey, H., Goodman, T., Alferdinck, J., & Várady, G. (2005). Mesopic models—from brightness matching to visual performance in night-time driving: A Review. *Lighting Research & Technology*, 37(2), 155-173. doi:10.1191/1365782805li135oa
- [45] Viikari, M., Ekrias, A., Eloholma, M., & Halonen, L. (2008). Modeling spectral sensitivity at low light levels based on mesopic visual performance. *Clinical Ophthalmology*, 2(1), 173-185. doi:10.2147/opth.s2414
- [46] Guo, Z., Shih, T., Lu, Y., Gao, Y., Zhu, L., Chen, G., & Chen, Z. (2013). Studies of scotopic/photopic ratios for color-tunable white light-emitting diodes. *IEEE Photonics Journal*, 5(4), 309-317. doi:10.1109/jphot.2013.2273736
- [47] Rea, M. S., Bullough, J. D., Freyssinier-Nova, J. P., & Bierman, A. (2004). A proposed unified system of photometry. *Lighting Research & Technology*, 36(2), 85-111. doi:10.1191/1365782804li114oa
- [48] Wade, N. J., Brozek, J., & Hoskovec, J. (2013). *Purkinjes vision: The dawning of neuroscience*. Hove, England: Psychology.
- [49] Fairchild, M. D. (2013). *Color appearance models*. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons.
- [50] Hunt, R.W.G., & Pointer, M. R. (2011). *Measuring colour*. Chichester, England: John Wiley and Sons.
- [51] Anstis, S. (2002). The Purkinje rod-cone shift as a function of luminance and retinal eccentricity. *Vision Research*, 42(22), 2485-2491. doi:10.1016/s0042-6989(02)00267-5
- [52] Kalloniatis, M., & Luu, C. (2007, July 9). Light and dark adaptation. Retrieved January 1, 2022, from <https://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-psychophysics-of-vision/light-and-dark-adaptation/>
- [53] Webster, M. A., & Wilson, J. (2000). Interactions between chromatic adaptation and contrast adaptation in color appearance. *Vision Research*, 40(28), 3801-3816. doi:10.1016/s0042-6989(00)00238-8

- [54] Colorblind guide – All you need to know about color blindness. (2021). Retrieved from <https://www.colorblindguide.com/post/colorblind-people-population-live-counter>
- [55] Simunovic, M. P. (2009). Colour vision deficiency. *Eye*, 24(5), 747-755. doi:10.1038/eye.2009.251
- [56] Simunovic, M. P. (2016). Acquired color vision deficiency. *Survey of Ophthalmology*, 61(2), 132-155. doi:10.1016/j.survophthal.2015.11.004
- [57] Deeb, S. S. (2004). Molecular genetics of colour vision deficiencies. *Clinical and Experimental Optometry*, 87(4-5), 224-229. doi:10.1111/j.1444-0938.2004.tb05052.x
- [58] Hasrod, N., & Rubin, A. (2016). Defects of colour vision: A review of congenital and acquired colour vision deficiencies. *African Vision and Eye Health*, 75(1), 1-6. doi:10.4102/aveh.v75i1.365
- [59] Michaelides, M. (2004). The cone dysfunction syndromes. *British Journal of Ophthalmology*, 88(2), 291-297. doi:10.1136/bjo.2003.027102
- [60] Online Mendelian Inheritance in Man®. (2022). Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/omim/>
- [61] Traboulsi, E. I. (2012). Cone dysfunction syndromes, cone dystrophies, and cone-rod degenerations. *Genetic Diseases of the Eye*, 410-420. doi:10.1093/med/9780195326147.003.0026
- [62] Pokorny, J., Mollon, J. D., & Knoblauch, K. (2003). *Normal and Defective Colour Vision*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- [63] Judd, D. B. (1949). The Color Perceptions of Deuteranopic and Protanopic Observers. *Journal of the Optical Society of America* 39(3), 252-256. doi: 10.1364/JOSA.39.000252
- [64] Vingrys, A. J., Atchison, D. A., & Bowman, K. J. (1992). The use of colour difference vectors in diagnosing congenital colour vision deficiencies with the Farnsworth—munsell 100-hue test. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 12(1), 38-45. doi:10.1111/j.1475-1313.1992.tb00252.x
- [65] Vingrys, A.J. & King-Smith, P.E. (1988). A Quantitative Scoring Technique For Panel Tests of Color Vision. *Invest Ophthalmology & Visual Science*, 29, 50-63. PMID: 3257208.
- [66] National Research Council (US) Committee on Vision. (1981). *Procedures for Testing Color Vision: Report of Working Group 41*. National Academies Press (US). doi: 10.17226/746

- [67] Birch, J. (1989). Use of the Farnsworth—Munsell 100-Hue test in the examination of congenital colour vision defects. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 9(2), 156-162. doi:10.1111/j.1475-1313.1989.tb00836.x
- [68] Jordinson, F., & Minshall, T. (1959). Tests for colour vision. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 75(12), 585-593. doi:10.1111/j.1478-4408.1959.tb02307.x
- [69] Schanda, J. (2007). *Colorimetry: Understanding the CIE system*. Vienna, A: CIE.
- [70] Luo, M. R., & Li, C. (2013). CIECAM02 and Its Recent Developments. In C. Fernandez-Maloigne (Ed.), *Advanced Color Image Processing and Analysis* (pp. 19-58). New York, NY: Springer New York.
- [71] Hunt, R.W.G. (2006). *The reproduction of colour*. Chichester, England: John Wiley & Sons.
- [72] Nayatani, Y. (2006). Development of chromatic adaptation transforms and concept for their classification. *Color Research & Application*, 31(3), 205-217. doi:10.1002/col.20210
- [73] Nayatani, Y., Takahama, K., Sobagaki, H., & Hashimoto, K. (1990). Color-appearance model and chromatic-adaptation transform. *Color Research & Application*, 15(4), 210-221. doi:10.1002/col.5080150407
- [74] Li, X. Z., Liu, Y., Liu, J. J., Li, X. L., & Xu, A. (2014). Chromatic adaptation and chromatic adaptation transform issues in color appearance model. *Advanced Materials Research*, 852, 648-652. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.852.648
- [75] Xiao, K., Fu, C., Mylonas, D., Karatzas, D., & Wuerger, S. (2011). Unique Hue data for colour appearance models. part II: Chromatic adaptation transform. *Color Research & Application*, 38(1), 22-29. doi:10.1002/col.20725
- [76] Gao, C., Wang, Z., Xu, Y., Melgosa, M., Xiao, K., Brill, M. H., & Li, C. (2020). The von Kries chromatic adaptation transform and its generalization. *Chinese Optics Letters*, 18(3), 033301-033306. doi:10.3788/col202018.033301
- [77] Bianco, S., & Schettini, R. (2010). Two new von Kries based chromatic adaptation transforms found by numerical optimization. *Color Research & Application*, 35(3), 184-192. doi:10.1002/col.20573
- [78] Luo, M. R. (2000). A review of chromatic adaptation transforms. *Review of Progress in Coloration and Related Topics*, 30(1), 77-92. doi:10.1111/j.1478-4408.2000.tb03784.x
- [79] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (2022). *Mezinárodní elektrotechnický slovník (IEV), Část 845: Osvětlení (ČSN IEC 60050-845)*. Retrived <https://shop.normy.biz/detail/514109>

- [80] Kruschwitz, J. D. (n.d.). Von Kries Transformation and CIE CAT02. *Field Guide to Colorimetry and Fundamental Color Modeling*. doi:10.1117/3.2500912.ch54
- [81] Hunt, R. W. (1997). Reversing the Bradford chromatic adaptation transform. *Color Research & Application*, 22(5), 355-356. doi:10.1002/(sici)1520-6378(199710)22:53.0.co;2-9
- [82] Tooms, M. S. (2015). The Bradford Colour Adaptation Transform. *Colour Reproduction in Electronic Imaging Systems: Photography, Television, Cinematography*, 645-647. doi:10.1002/9781119021780.app3
- [83] Fairchild, M. D. (2001). A revision of CIECAM97s for practical applications. *Color Research & Application*, 26(6), 418-427. doi:10.1002/col.1061
- [84] Li, C. J., Luo, M. R., & Hunt, R. W. (2000). A revision of the CIECAM97s model. *Color Research & Application*, 25(4), 260-266. doi:10.1002/1520-6378(200008)25:43.0.co;2-9
- [85] Hunt, R. W., Li, C. J., Juan, L. Y., & Luo, M. R. (2002). Further improvements to CIECAM97s. *Color Research & Application*, 27(3), 164-170. doi:10.1002/col.10047
- [86] Luo, M. R., & Hunt, R. W. (1998). The structure of the CIE 1997 colour appearance model (CIECAM97s). *Color Research & Application*, 23(3), 138-146. doi:10.1002/(sici)1520-6378(199806)23:33.0.co;2-r
- [87] Li, C., Luo, M. R., Rigg, B., & Hunt, R. W. G. (2001). CMC 2000 Chromatic Adaptation Transform: CMCCAT2000. *Color Research & Application*, 27(1), 49-58. doi:10.1002/col.10005
- [88] Li, C., Li, Z., Wang, Z., Xu, Y., Luo, M. R., Cui, G., & Pointer, M. (2016). A revision of CIECAM02 and its CAT and UCS. *Color and Imaging Conference*, 24(1), 208-212. doi:10.2352/issn.2169-2629.2017.32.208
- [89] Moroney, N., Fairchild, M., Hunt, R. & Li, C. (2002). The CIECAM02 Color Appearance Model. *10th IS&T/SID Color Imaging Conference 2002*. 23-27.
- [90] International Commission on Illumination (2018). *Colorimetry, 4th edition* (CIE 015:2018). Retrieved from <https://cie.co.at/publications/colorimetry-4th-edition>
- [91] Li, C. J., & Luo, M. R. (2005). Testing the robustness of CIECAM02. *Color Research & Application*, 30(2), 99-106. doi:10.1002/col.20087
- [92] Li, C., Luo, M.R., Hunt, R.W., Moroney, N., Fairchild, M.D., & Newman, T. (2002). The Performance of CIECAM02. *10th IS&T/SID Color Imaging Conference 2002*. 28-32.

- [93] Brill, M. H., & Süssstrunk, S. (2008). Repairing gamut problems in CIECAM02: A progress report. *Color Research & Application*, 33(5), 424-426. doi:10.1002/col.20432
- [94] Jiang, J., Wang, Z., Luo, M. R., Melgosa, M., Brill, M. H., & Li, C. (2014). Optimum solution of the CIECAM02 yellow-blue and purple problems. *Color Research & Application*, 40(5), 491-503. doi:10.1002/col.21921
- [95] Hunt, R.W. (1994). An Improved Predictor of Colourfulness in a Model of Colour Vision. *Color Research and Application*, 19(1), 23-26. doi: 10.1111/j.1520-6378.1994.tb00056.x
- [96] Hunt, R. W. (1991). Revised colour-appearance model for related and unrelated colours. *Color Research & Application*, 16(3), 146-165. doi:10.1002/col.5080160306
- [97] Li, C., Perales, E., Luo, M. R., & Martínez-Verdú, F. (2011). Mathematical approach for predicting non-negative tristimulus values using the CAT02 chromatic adaptation transform. *Color Research & Application*, 37(4), 255-260. doi:10.1002/col.20694
- [98] Li, C., Li, Z., Wang, Z., Xu, Y., Luo, M. R., Cui, G., & Pointer, M. (2017). Comprehensive color solutions: CAM16, CAT16, and CAM16-UCS. *Color Research & Application*, 42(6), 703-718. doi:10.1002/col.22131
- [99] Luo, M. R., Cui, G., & Li, C. (2006). Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model. *Color Research & Application*, 31(4), 320-330. doi:10.1002/col.20227
- [100] Xiao, K., Wuerger, S., Fu, C., & Karatzas, D. (2010). Unique Hue data for colour appearance models. part I: Loci of unique hues and Hue Uniformity. *Color Research & Application*, 36(5), 316-323. doi:10.1002/col.20637
- [101] Xiao, K., Pointer, M., Cui, G., Chauhan, T., & Wuerger, S. (2014). Unique Hue data for colour appearance models. part III: Comparison with NCS Unique Hues. *Color Research & Application*, 40(3), 256-263. doi:10.1002/col.21898
- [102] International Organization for Standardization (1990). *Měření barev* (ČSN ISO 01 1718). Retrieved from <https://shop.normy.biz/detail/24083>
- [103] Vik, M. (2017). *Colorimetry in textile industry*. Liberec, Czech Republic: VÚTS, a.s.
- [104] Svobodová, J. (2006). *Lecture: Úvod do současných metod vyhodnocování měření* [Document]. Masaryk University: https://is.muni.cz/el/ped/podzim2009/FY2B_P_FM3/
- [105] Trojan, M. (2008). *Standardní nejistoty měření* (Bachelor's thesis, Brno University of Technology). Retrieved from https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7735

- [106] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (2010). *Terminologie z oblasti metrologie (2. vydání)*. Retrieved from https://www.unmz.cz/files/Sborn%C3%ADky%20TH/Terminologie%20v%20oblasti%20metrologie_DEF.pdf
- [107] Český institut pro akreditaci (2022). *Vyhodnocení nejistoty měření při kalibraci (EA-4/02 M:2022)*. Retrieved from https://www.cai.cz/wp-content/uploads/2022/04/01_08-P001-EA-04_02-M_2022_20220425opr.pdf
- [108] Joint Committee for Guides in Metrology (2008). *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections)*. Retrieved from https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6
- [109] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (2012). *Pokyn pro vyjadřování nejistoty (GUM) (Mezinárodní dokument JCGM 100:2008 (GUM 1995 s drobnými opravami))*. Retrieved from <https://www.unmz.cz/files/Sborn%C3%ADky%20TH/GUM%20-%20celek%20-DEF.pdf>
- [110] Gardner, J.L. (2006). *Uncertainties in surface colour measurements (Measurement Good Practice Guide No. 95)*. Retrieved from https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg95_colour
- [111] Early, E. A., & Nadal, M. E. (2004). Uncertainty analysis for reflectance colorimetry. *Color Research & Application*, 29(3), 205-216. doi:10.1002/col.20006
- [112] American Society for Testing and Materials (2022). *Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method (ASTM E691-21)*. Retrieved from <https://www.astm.org/e0691-21.html>
- [113] American Society for Testing and Materials (2020). *Standard Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods (ASTM E177-20)*. Retrieved from <https://www.astm.org/e0177-20.html>
- [114] American Society for Testing and Materials (2022). *Standard Terminology Relating to Quality and Statistics (ASTM E456-13a(2022))*. Retrieved from <https://www.astm.org/e0456-13ar22.html>
- [115] International Organization for Standardization (2018). *Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření – Část 1: Obecné zásady a definice (ČSN ISO 5725-1)*. Retrieved from <https://shop.normy.biz/detail/505451>

- [116] Hiltunen, J. (2002). *Accurate color measurement* (Master's thesis, Joensuu yliopisto, 2002) (pp. 1-88). Joensuu: University of Joensuu.
- [117] Chung, Y. (2003). *Color measurement correction model for Improving inter-instrumental agreement* (Doctoral dissertation, Hong Kong Polytechnic University, 2003). (pp. 1-164). Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University.
- [118] Berns, R. S., & Petersen, K. H. (1988). Empirical modeling of systematic spectrophotometric errors. *Color Research & Application*, 13(4), 243-256. doi:10.1002/col.5080130409
- [119] International Organization for Standardization (2022). *Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření – Část 2: Základní metoda pro stanovení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti normalizované metody měření* (ČSN ISO 5725-2). Retrieved from <https://shop.normy.biz/detail/514274>
- [120] Wilrich, P. (2011). Critical values of Mandel's H and K, the Grubbs and the Cochran test statistic. *AStA Advances in Statistical Analysis*, 97(1), 1-10. doi:10.1007/s10182-011-0185-y
- [121] Flores, M., Tarrío-Saavedra, J., Fernández-Casal, R., & Naya, S. (2018). Functional extensions of Mandel's h and k statistics for outlier detection in interlaboratory studies. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 176, 134-148. doi:10.1016/j.chemolab.2018.03.016
- [122] Sanderson, K. (2015). A Comparative Study of Handheld Reflectance Spectrophotometers. *Topics in Photographic Preservation*, 16(1), 47-62.
- [123] Chung, Y. S., Xin, J. H., & Sin, K. M. (2004). Improvement of inter-instrumental agreement for Reflectance Spectrophotometers. *Coloration Technology*, 120(6), 284-292. doi:10.1111/j.1478-4408.2004.tb00232.x
- [124] Rich, D. C., & Martin, D. (1999). Improved model for improving the inter-instrument agreement of spectrophotometers. *Analytica Chimica Acta*, 380(2-3), 263-276. doi:10.1016/s0003-2670(98)00549-2
- [125] Perales, E., Yamanoi, Y., Dietz, C., Martinez-Verdu, F. M., Huraibat, K., & Mico-Vicent, B. (2019). Review of instrumental inter-agreement study of spectral and colorimetric data of commercial multiangle spectrophotometers. *Color Research & Application*, 44(2), 168-175. doi:10.1002/col.22320
- [126] Wan, X., & Huang, X. (2008). Implementation of the mathematical model for improving the inter-instrument agreement of Spectrophotometers. *2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering*. doi:10.1109/csse.2008.1418

- [127] International Organization for Standardization (1993). *Textilie. Zkouška stálobarevnosti. Část A02: Šedá stupnice pro hodnocení změny odstínu* (ISO 105-A02:1993). Retrieved from <https://shop.normy.biz/detail/17367>
- [128] Luo, M. R. (2016). *Encyclopedia of color science and technology*. New York, US: Springer Science+Business Media.
- [129] García, P. A., Huertas, R., Melgosa, M., & Cui, G. (2007). Measurement of the relationship between perceived and computed color differences. *Journal of the Optical Society of America A*, 24(7), 1823-1829. doi:10.1364/josaa.24.001823
- [130] Melgosa, M., García, P. A., Gómez-Robledo, L., Shamey, R., Hinks, D., Cui, G., & Luo, M. R. (2011). Notes on the application of The Standardized Residual Sum of Squares index for the assessment of intra- and inter-observer variability in color-difference experiments. *Journal of the Optical Society of America A*, 28(5), 949-953. doi:10.1364/josaa.28.000949
- [131] Melgosa, M., Huertas, R., & Berns, R. S. (2008). Performance of recent advanced color-difference formulas using the Standardized Residual Sum of Squares index. *Journal of the Optical Society of America A*, 25(7), 1828. doi:10.1364/josaa.25.001828
- [132] Guan, S., & Luo, M. R. (1999). Investigation of parametric effects using small colour differences. *Color Research & Application*, 24(5), 331-343. doi:10.1002/(sici)1520-6378(199910)24:53.0.co;2-9
- [133] Xin, J. H., Lam, C. C., & Luo, M. R. (2001). Investigation of parametric effects using medium colour-difference pairs. *Color Research & Application*, 26(5), 376-383. doi:10.1002/col.1053
- [134] Guan, S., & Luo, M. R. (1999). Investigation of parametric effects using large colour differences. *Color Research & Application*, 24(5), 356-368. doi:10.1002/(sici)1520-6378(199910)24:53.0.co;2-n
- [135] Guan, S., & Luo, M. R. (1999). A colour-difference formula for assessing large colour differences. *Color Research & Application*, 24(5), 344-355. doi:10.1002/(sici)1520-6378(199910)24:53.0.co;2-x
- [136] Luo, M. R., & Rigg, B. (1987). BFD (*l:c*) colour-difference formula part 1 – development of the formula. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 103(2), 86-94. doi:10.1111/j.1478-4408.1987.tb01099.x
- [137] Luo, M. R., & Rigg, B. (1987). BFD (*l:c*) colour-difference formula part 2 - Performance of the formula. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 103(3), 126-132. doi:10.1111/j.1478-4408.1987.tb01102.x

VIII. Seznam vlastních publikací autora

17.1 Publikace se vztahem ke studované problematice

- [1] Pechová, M., Vik, M., & Viková, M. (2022). Color Difference Evaluation in Photopic, Mesopic and Scotopic Vision. In *Advances in Science and Technology. 20th AUTEX World Textile Conference - Unfolding the future, 113*, 99-110. doi.org/10.4028/p-e521q1

17.2 Ostatní publikace v odborných časopisech

- [2] Vik, M., Pechová, M., Viková, M., Viková, M. & Periyasami, A. P. (2016). Vliv světelných zdrojů na hodnocení bílé barvy – 1. část. *Světlo, 19(2)*, 56-61. Retrieved from <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/cislo-2-rocnik-2016--1094>
- [3] Vik, M., Viková, M., Pechová, M., Viková, M. & Periyasami, A. P. (2016). Vliv světelných zdrojů na hodnocení bílé barvy – 2. část. *Světlo, 19(4)*, 41-46. Retrieved from <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/cislo-4-rocnik-2016--1117>
- [4] Vik, M., Kolčavová Sirková, B., Viková, M., Duchoňová, L., & Pechová, M. (2016). Measuring Techniques for Retroreflectivity Levels of Small Signs. *Defect and Diffusion Forum, 368*, 193-197. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.368.193>
- [5] Vik, M., Viková, M., Kolčavová Sirková, B., Pechová, M. & Duchoňová, L. (2017). Měření retroreflexe a kolorimetrických parametrů materiálů s vysokou viditelností. *Světlo, 20(5)*, 40-44. Retrieved from <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/cislo-5-rocnik-2017--1143>
- [6] Viková, M., & Pechová, M. (2020). Study of adaptive thermochromic camouflage for Combat Uniform. *Textile Research Journal, 90(17-18)*, 2070-2084. doi:10.1177/0040517520910217
- [7] Pechová, M., Vik, M., & Viková, M. (2022). Color Difference Evaluation in Photopic, Mesopic and Scotopic Vision. In *Advances in Science and Technology. 20th AUTEX World Textile Conference - Unfolding the future, 113*, 99-110. doi.org/10.4028/p-e521q1

17.3 Příspěvky ve sbornících se vztahem ke studované problematice

- [8] Vik, M., Viková, M. & Pechová M. (2015). Color discrimination on the border of photopic/mesopic vision. *21st International Conference Světlo Light 2015, 1*, 97-100. doi: 10.13140/RG.2.1.2914.3521.

- [9] Pechová, M., Vik, M. & Viková, M. (2015). Evaluation of color samples at mesopic luminance levels. *Workshop for Ph.D. students of Faculty of Textile Engineering and Faculty of Mechanical Engineering TUL*, 134-139. doi: 10.13140/RG.2.1.2728.1368
- [10] Pechová, M., Kašparová, M., Vik, M., Viková, M. & Štefl, J. (2016). Influence of luminance levels of illumination D65 on evaluation of high chromatic colour. *Proceedings of the 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance*, 269-277.
Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/309788475_Influence_of_luminance_levels_of_illumination_d65_on_evaluation_of_high_chromatic_colour
- [11] Kašparová, M., Pechová, M., Viková, M., Vik, M., Štefl, J. & Ulmanová, M. (2016). Visual evaluation samples with high chromaticity under the two types of daylight simulators. *Proceedings of the 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance*, 278-286.
Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/309788536_Visual_evaluation_samples_with_high_chromaticity_under_the_two_types_of_daylight_simulators
- [12] Pechová, M., Vik, M., Viková, M. & Čandová, J. (2017). The influence of two daylight simulators on the visual assessment of blue samples under different luminance levels. *Fibre-grade polymers, chemical fibres and special textiles: 9th Central European Conference:book of abstracts*, 89-93.
- [13] Pechová, M., Vik, M. & Viková, M. (2018). Visibility of selected samples at low luminance. *Book of Extended Abstracts, 22nd International Conference STRUTEX*, 56-60.
Retrieved from http://strutex.ft.tul.cz/2018/Phd/BookOfExtendedAbstracts_STRUTEX_2018_International_PhD_student_day.pdf
- [14] Vik, M., Glombikova, V., Viková, M., Havelka, A., Adamcová, J. & Pechová, M. (2019). Pedestrians visibility at night: Effects of pedestrian clothing, balancing safety and culture. *47th Textile Research Symposium 2019*, 128-129. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/337825130_Pedestrians_visibility_at_night_effects_of_pedestrian_clothing_balancing_safety_and_culture
- [15] Pechová, M., Vik, M. & Viková, M. (2019). The effect of luminance level on color difference evaluation. *Proceedings of the 23rd International Conference Light – Světlo 2019, 1*, 55-58.
- [16] Pechová, M., Vik, M. & Viková, M. (2021). Color difference evaluation in photopic, mesopic and scotopic vision. *20th World Textile Conference (AUTEX 2021), 1*, ID 279.

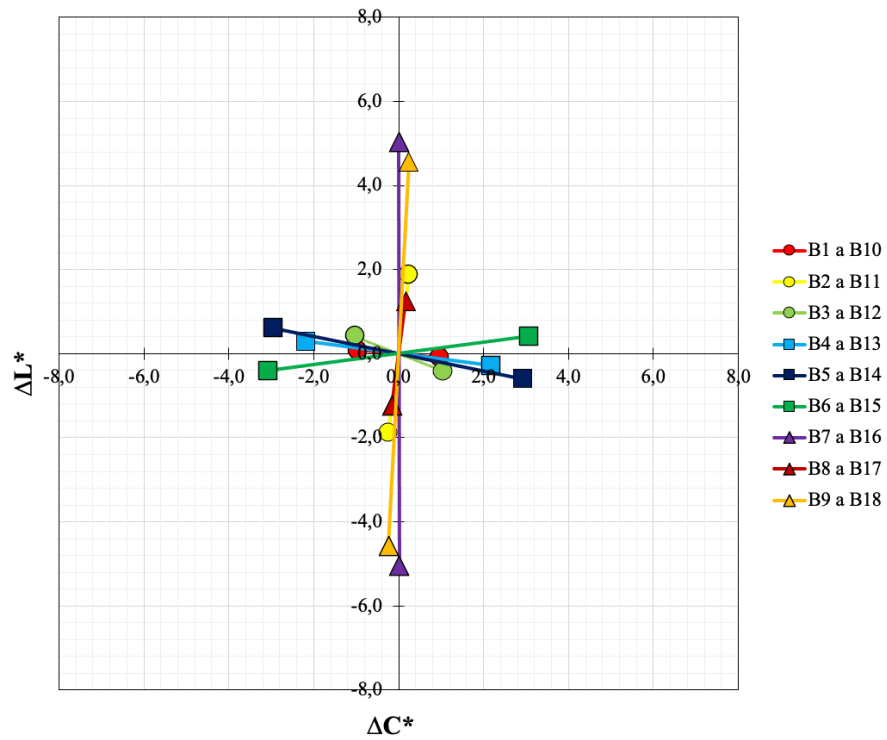
17.4 Ostatní příspěvky ve sbornících

- [17] Vik, M., Viková, M., Sušická, D., Držková, M., Šašková, J., Panák, O., ...Petruf, K. (2017). Evaluation of whiteness in case of highly tinted white materials. *Asia and Africa Science Platform Program Seminar Series 10*, 62–69. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/315613924_Evaluation_of_whiteness_in_case_of_highly_tinted_white_materials/related
- [18] Viková, M., Periyasami, A. P., Pechová, M., Čandová, J., Šašková, J. & Vik, M. (2017). Colorchangeable sensorial fibres, fastness and dynamic properties. *Asia and Africa Science Platform Program Seminar Series 10*, 90–95. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/315613836_Colorchangeable_sensorial_fibres_fastness_and_dynamic_properties
- [19] Vik, M., Viková, M., Pechová, M., Čandová, J. & Šašková, J. (2018). Textile application of new whiteness formula based on CIECAM02. *18th World Textile Conference (AUTEX 2018)*, 1, 578-581.
- [20] Viková, M., Pechová, M., Ctiborová, M. & Vik, M. (2018). Color and fastness properties of the thermochromic inks used as SMART camouflage system. *18th World Textile Conference (AUTEX 2018)*, 1, 880-883.
- [21] Viková, M., Solanki, U. B., Vik, M. & Pechová, M. (2021). New method for prediction of photochromic textiles fatigue behavior. *20th World Textile Conference (AUTEX 2021)*, 1, ID 31.

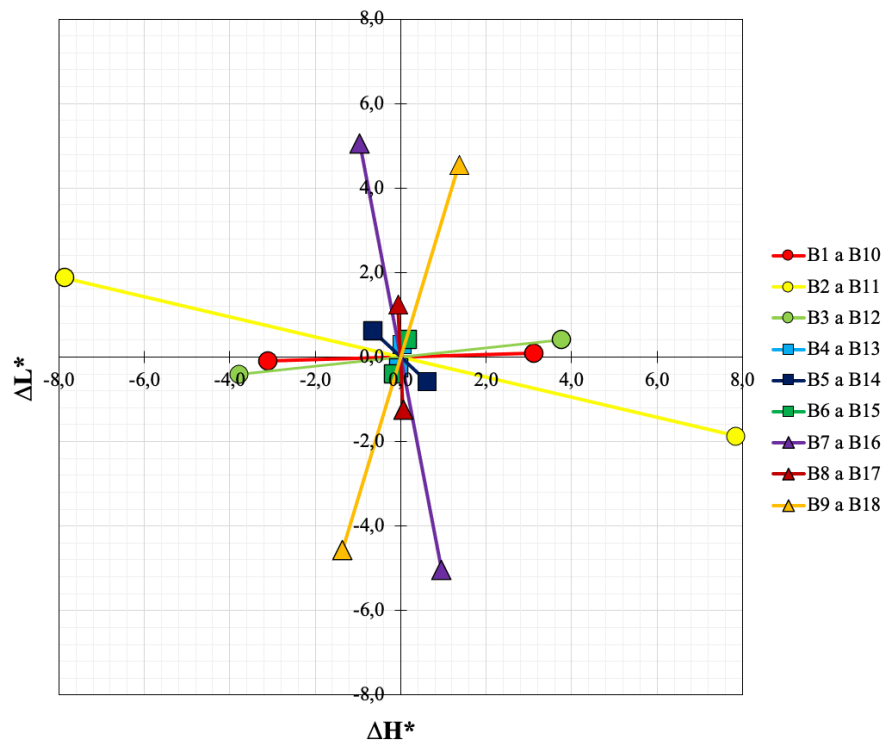
IX. Přílohy

Příloha P1	I
Příloha P2	VIII
Příloha P3	XI

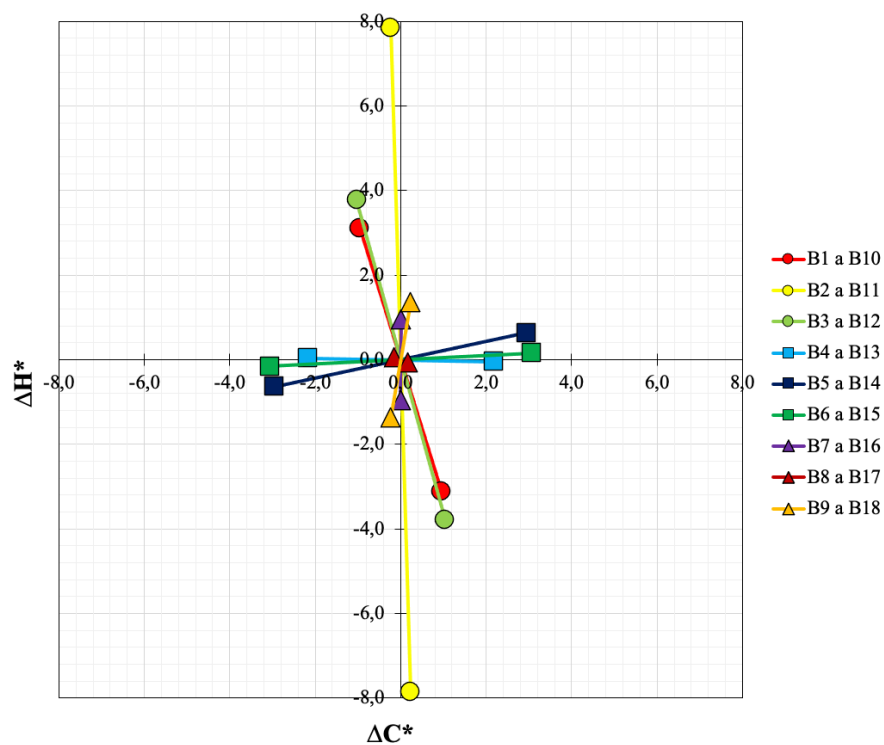
Příloha P1



Obrázek P1.1 – Pozice barevných párů centra blue vyjádřená odchylkami ΔL^* a ΔC^*



Obrázek P1.2 – Pozice barevných párů centra blue vyjádřená odchylkami ΔL^* a ΔH^*



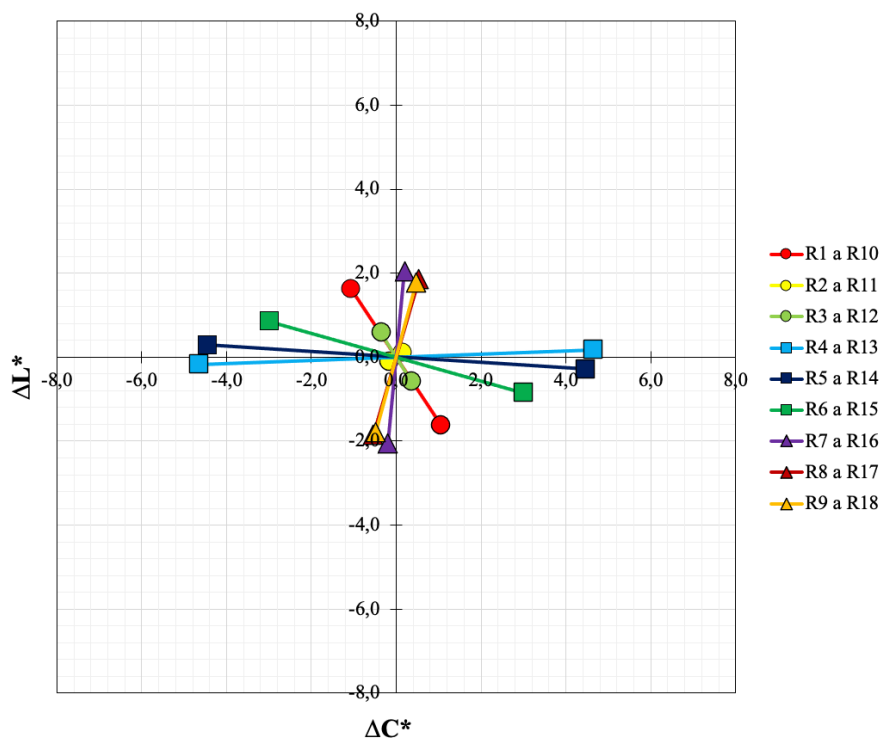
Obrázek P1.3 – Pozice barevných párů centra blue vyjádřená odchylkami ΔH^* a ΔC^*

Tabulka P1.1 – Třídění barevných párů – centrum blue

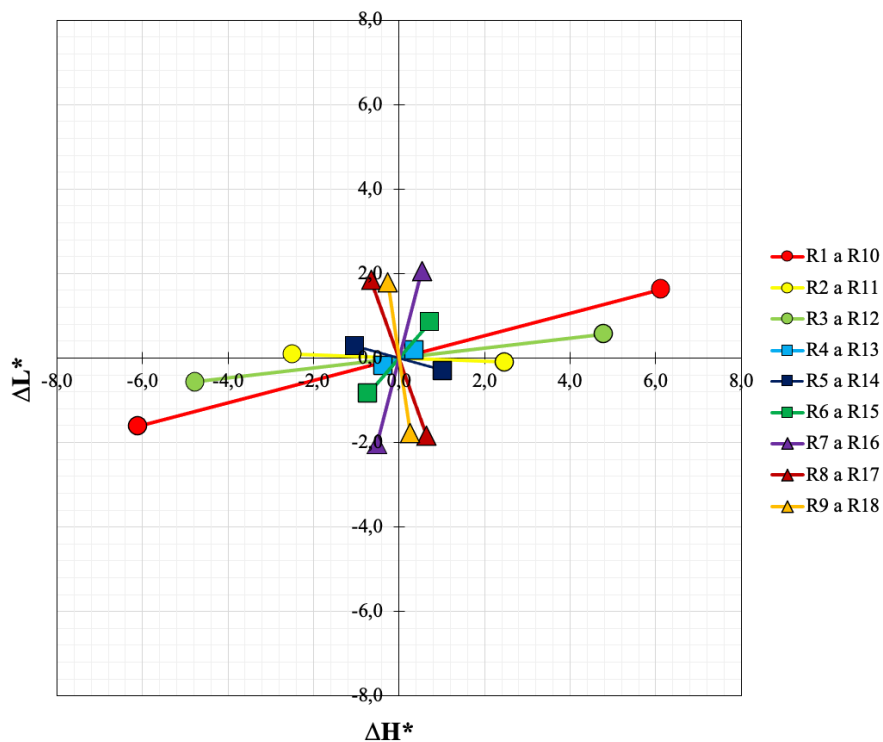
Pár	Odchylka				Pár	Odchylka				Odchylka (%)		
	ΔH^*	ΔC^*	ΔL^*	ΔE^*		ΔH^*	ΔC^*	ΔL^*	ΔE^*	ΔH^*	ΔC^*	ΔL^*
B1	3,11	-0,95	0,09	3,26	B10	-3,11	0,95	-0,09	3,26	91	9	0
B2	-7,85	0,24	1,87	8,08	B11	7,85	-0,24	-1,87	8,08	95	0	5
B3	3,77	-1,03	0,41	3,93	B12	-3,77	1,03	-0,41	3,93	92	7	1
B4	-0,04	2,17	-0,28	2,19	B13	0,04	-2,17	0,28	2,19	0	98	2
B5	-0,64	-2,95	0,60	3,07	B14	0,64	2,95	-0,60	3,07	4	92	4
B6	0,16	3,08	0,41	3,11	B15	-0,16	-3,08	-0,41	3,11	0	98	2
B7	0,96	0,00	-5,04	5,13	B16	-0,96	0,00	5,04	5,13	3	0	97
B8	0,06	-0,16	-1,25	1,26	B17	-0,06	0,16	1,25	1,26	0	2	98
B9	-1,36	-0,24	-4,56	4,77	B18	1,36	0,24	4,56	4,77	8	0	92

Tabulka P1.2 – Třídění barevných párů – centrum orange

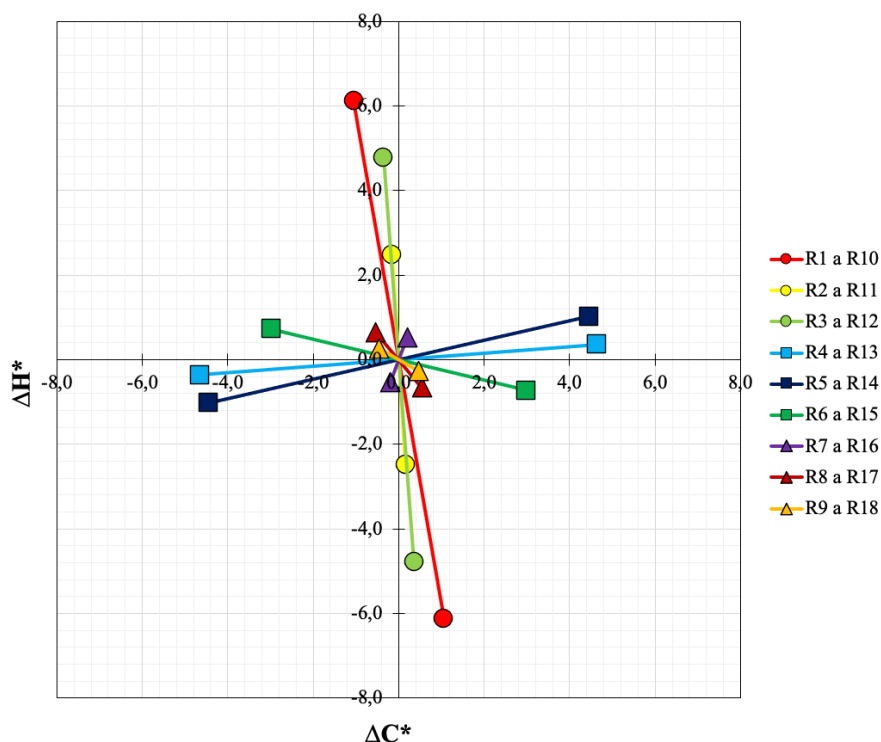
Pár	Odchylka				Pár	Odchylka				Odchylka (%)		
	ΔH^*	ΔC^*	ΔL^*	ΔE^*		ΔH^*	ΔC^*	ΔL^*	ΔE^*	ΔH^*	ΔC^*	ΔL^*
O1	-4,69	-0,45	-0,15	4,71	O10	4,69	0,45	0,15	4,71	99	1	0
O2	-5,90	-0,83	-1,39	6,11	O11	5,90	0,83	1,39	6,11	93	2	5
O3	5,78	-0,70	-0,82	5,88	O12	-5,78	0,70	0,82	5,88	97	1	2
O4	0,07	3,06	-0,04	3,06	O13	-0,07	-3,06	0,04	3,06	0	100	0
O5	0,24	2,95	-0,06	2,96	O14	-0,24	-2,95	0,06	2,96	1	99	0
O6	-0,03	5,36	1,21	5,50	O15	0,03	-5,36	-1,21	5,50	0	95	5
O7	-0,55	1,18	-4,56	4,74	O16	0,55	-1,18	4,56	4,74	1	6	92
O8	0,26	0,11	-3,20	3,21	O17	-0,26	-0,11	3,20	3,21	1	0	99
O9	-1,00	0,38	-3,60	3,76	O18	1,00	-0,38	3,60	3,76	7	1	92



Obrázek P1.4 – Pozice barevných párů centra red vyjádřená odchylkami ΔL^* a ΔC^*



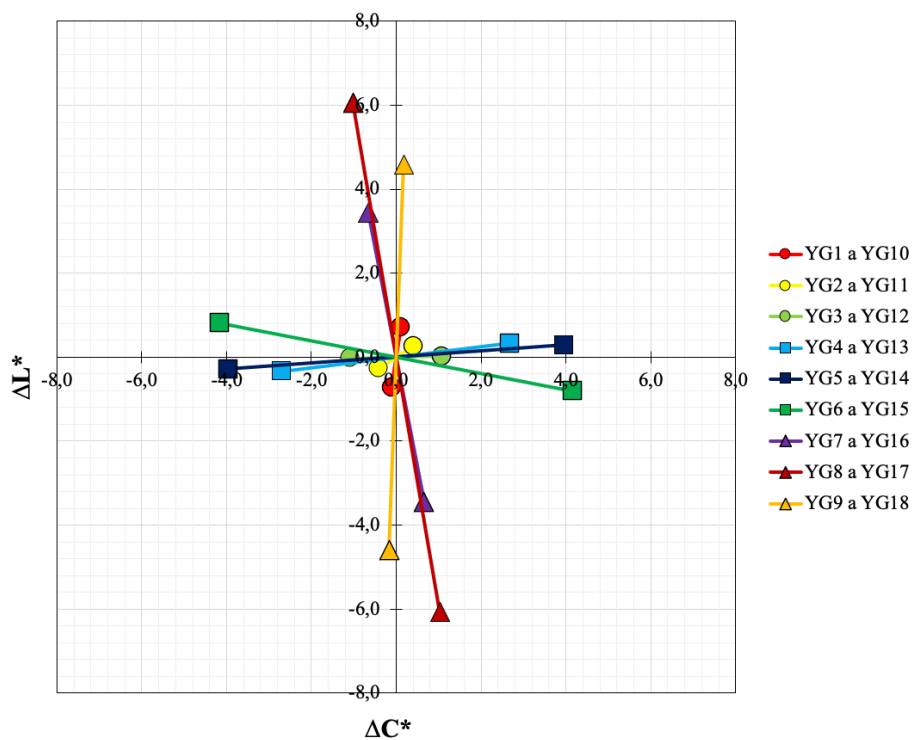
Obrázek P1.5 – Pozice barevných párů centra red vyjádřená odchylkami ΔL^* a ΔH^*



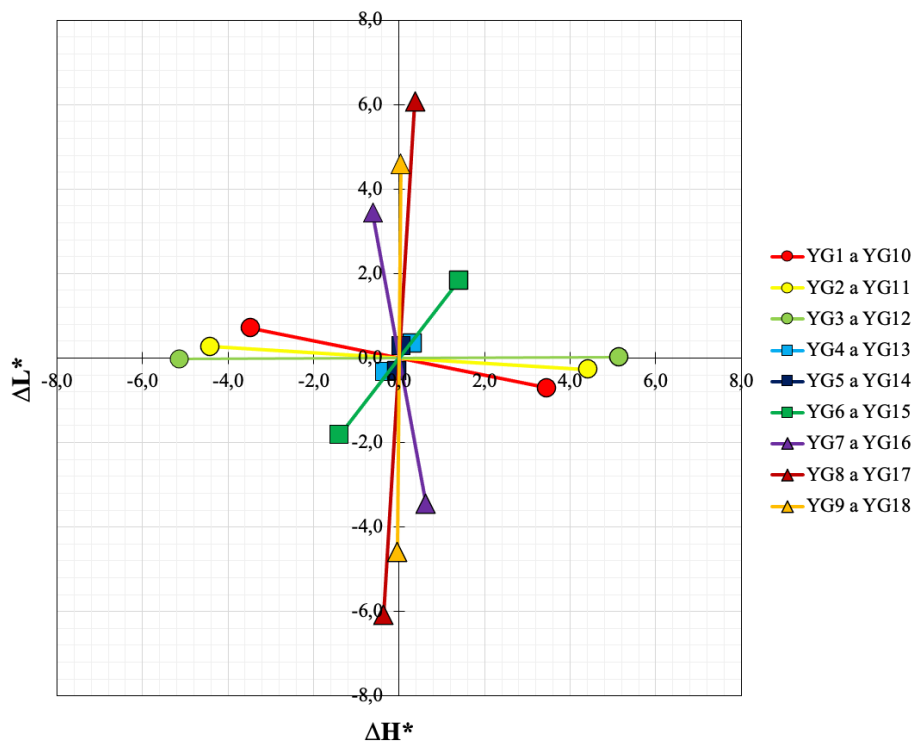
Obrázek P1.6 – Pozice barevných párů centra red vyjádřená odchylkami ΔH^* a ΔC^*

Tabulka P1.3 – Třídění barevných párů – centrum red

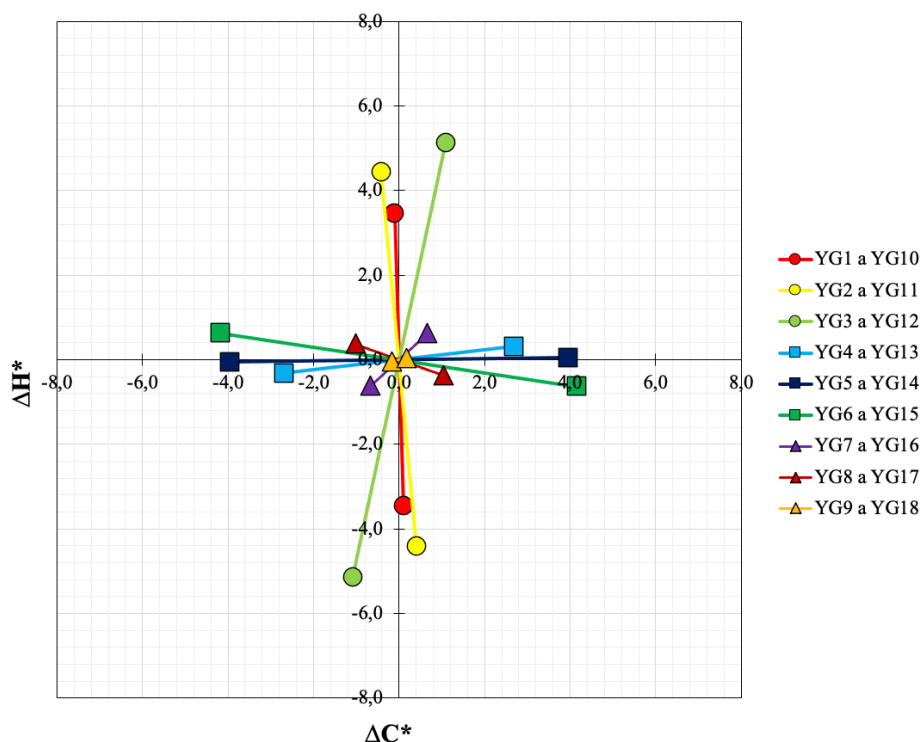
Pár	Odchylka				Pár	Odchylka				Odchylka (%)		
	ΔH^*	ΔC^*	ΔL^*	ΔE^*		ΔH^*	ΔC^*	ΔL^*	ΔE^*	ΔH^*	ΔC^*	ΔL^*
R1	-6,12	1,06	-1,62	6,42	R10	6,12	-1,06	1,62	6,42	91	3	6
R2	2,48	-0,16	-0,09	2,49	R11	-2,48	0,16	0,09	2,49	100	0	0
R3	4,77	-0,35	0,57	4,82	R12	-4,77	0,35	-0,57	4,82	98	1	1
R4	-0,36	-4,65	-0,18	4,67	R13	0,36	4,65	0,18	4,67	1	99	0
R5	1,02	4,46	-0,29	4,59	R14	-1,02	-4,46	0,29	4,59	5	95	0
R6	-0,72	2,99	-0,85	3,19	R15	0,72	-2,99	0,85	3,19	5	88	7
R7	0,53	0,20	2,05	2,13	R16	-0,53	-0,20	-2,05	2,13	6	1	93
R8	-0,65	0,54	1,85	2,04	R17	0,65	-0,54	-1,85	2,04	10	7	83
R9	-0,27	0,47	1,78	1,86	R18	0,27	-0,47	-1,78	1,86	2	6	92



Obrázek P1.7 – Pozice barevných párů centra yellowgreen vyjádřená odchylkami ΔL^* a ΔC^*



Obrázek P1.8 – Pozice barevných párů centra yellowgreen vyjádřená odchylkami ΔL^* a ΔH^*



Obrázek P1.9 – Pozice barevných párů centra yellowgreen vyjádřena odchylkami ΔH^* a ΔC^*

Tabulka P1.4 – Třídění barevných párů – centrum yellowgreen

Pár	Odchylka				Pár	Odchylka				Odchylka (%)		
	ΔH^*	ΔC^*	ΔL^*	ΔE^*		ΔH^*	ΔC^*	ΔL^*	ΔE^*	ΔH^*	ΔC^*	ΔL^*
YG1	-3,46	0,11	0,71	3,54	YG10	3,46	-0,11	-0,71	3,54	96	0	4
YG2	-4,42	0,41	0,27	4,44	YG11	4,42	-0,41	-0,27	4,44	99	1	0
YG3	5,14	1,09	0,02	5,25	YG12	-5,14	-1,09	-0,02	5,25	96	4	0
YG4	0,32	2,69	0,33	2,73	YG13	-0,32	-2,69	-0,33	2,73	1	97	2
YG5	-0,05	-3,96	-0,29	3,97	YG14	0,05	3,96	0,29	3,97	0	99	1
YG6	0,63	-4,16	0,81	4,28	YG15	-0,63	4,16	-0,81	4,28	2	94	4
YG7	0,62	0,66	-3,44	3,56	YG16	-0,62	-0,66	3,44	3,56	3	3	94
YG8	0,37	-1,02	6,07	6,17	YG17	-0,37	1,02	-6,07	6,17	0	3	97
YG9	-0,04	-0,17	-4,59	4,59	YG18	0,04	0,17	4,59	4,59	0	0	100

Příloha P2

Tabulka P2.1a – Výsledky TES skóre pro pozorovatele účastníci se vizuálního experimentu TUL 1

Pozorovatel		L1		L2		L3		L4		L5		L6	
Úroveň		TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení
1	371	24	A	0	S	4	S	12	S	8	S	20	A
2	202	36	A	12	S	12	S	28	A	8	S	32	A
3	32	32	A	12	S	24	A	44	A	24	A	80	A
4	6	48	A	20	A	28	A	188	L	32	A	148	L
5	0,93	196	L	116	L	224	L	332	L	72	A	240	L
6	0,25	340	L	256	L	256	L	740	L	140	L	324	L
7	0,05	460	L	316	L	516	L	804	L	536	L	484	L
8	0,01	752	L	472	L	756	L	852	L	720	L	756	L

Tabulka P2.1b – Výsledky TES skóre pro pozorovatele účastníci se vizuálního experimentu TUL 1

Pozorovatel		L7		L8		L9		L10		L11		L12	
Úroveň		TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení	Úroveň	TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES
1	371	12	S	8	S	24	1	371	12	S	8	S	24
2	202	16	S	8	S	36	2	202	16	S	8	S	36
3	32	32	A	28	A	40	3	32	32	A	28	A	40
4	6	28	A	28	A	56	4	6	28	A	28	A	56
5	0,93	116	L	64	A	104	5	0,93	116	L	64	A	104
6	0,25	236	L	216	L	212	6	0,25	236	L	216	L	212
7	0,05	496	L	540	L	308	7	0,05	496	L	540	L	308
8	0,01	516	L	648	L	560	8	0,02	516	L	648	L	560

Tabulka P2.1c – Výsledky TES skóre pro pozorovatele účastníci se vizuálního experimentu TUL 1

Pozorovatel		L13		L14		L15		L16		L17	
Úroveň		TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení
1	371	8	S	12	S	12	S	68	A	12	S
2	202	20	A	32	A	16	S	92	A	16	S
3	32	20	A	36	A	16	S	148	L	16	S
4	6	40	A	44	A	44	A	172	L	20	A
5	0,93	88	A	108	L	100	A	172	L	68	A
6	0,25	204	L	136	L	100	A	324	L	144	L
7	0,05	492	L	264	L	300	L	388	L	208	L
8	0,01	716	L	532	L	452	L	404	L	316	L

Tabulka P2.2a – Výsledky TES skóre pro pozorovatele účastníci se vizuálního experimentu TUL 2

Pozorovatel		S1		S2		S3		S4		S5		S6	
Úroveň		TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení
2	202	12	S	16	S	12	S	28	A	8	S	40	A
3	32	16	S	32	A	24	A	44	A	24	A	48	A
4	6	48	A	28	A	28	A	188	L	32	A	116	L
5	0,93	116	L	116	L	224	L	332	L	72	A	212	L
7	0,05	660	L	496	L	516	L	804	L	536	L	600	L

Tabulka P2.2b – Výsledky TES skóre pro pozorovatele účastníci se vizuálního experimentu TUL 2

Pozorovatel		S7		S8		S9		S10	
Úroveň		TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení
2	202	20	A	20	A	0	S	4	S
3	32	20	A	20	A	12	S	20	A
4	6	28	A	84	A	40	A	32	A
5	0,93	92	A	116	L	100	A	98	A
7	0,05	576	L	552	L	328	L	448	L

Tabulka P2.3 – Výsledky TES skóre pro pozorovatele účastníci se vizuálního experimentu TUL 3

Pozorovatel		G1		G2		G3		G4		G5		G6	
Úroveň		TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení	TES	Zařazení
1G	63,67	16	S	16	S	12	S	16	S	4	S	132	L
2G	2,43	48	A	16	S	64	A	80	A	56	A	164	L
3G	0,07	248	L	292	L	596	L	420	L	364	L	892	L

Příloha P3

	<i>černý podnět</i>	<i>bílý podnět</i>	<i>světle šedý podnět</i>	<i>neutrálně šedý podnět</i>	<i>tmavě šedý podnět</i>
	$L^* = 0,01$ $Y = 0,001$	$L^* = 100$ $Y = 100$	$L^* = 80$ $Y = 57$	$L^* = 50$ $Y = 19$	$L^* = 20$ $Y = 3$
<i>černé pozadí</i>	$L^* = 0,01$ $Y = 0,001$				
	$n = 1,0000$ $N_{95} = 0,7250$ $C_M = 0$ $C_M = 0$	$n = 1,1071E-05$ $N_{95} = 7,1040$ $C_M = \infty$ $C_M = 1,0000$	$n = 1,9531E-05$ $N_{95} = 6,3415$ $C_M = \infty$ $C_M = 1,0000$	$n = 6,0105E-05$ $N_{95} = 5,0647$ $C_M = \infty$ $C_M = 0,9999$	$n = 3,7037E-04$ $N_{95} = 3,5206$ $C_M = \infty$ $C_M = 0,9993$
<i>bílé pozadí</i>	$L^* = 100$ $Y = 100$				
	$n = \infty$ $N_{95} = 0,0740$ $C_M = -1,0000$ $C_M = -1,0000$	$n = 1,0000$ $N_{95} = 0,7250$ $C_M = 0$ $C_M = 0$	$n = 1,7643$ $N_{95} = 0,6472$ $C_M = -0,4332$ $C_M = -0,2765$	$n = 5,4293$ $N_{95} = 0,5169$ $C_M = -0,8158$ $C_M = -0,6889$	$n = 33,4554$ $N_{95} = 0,3593$ $C_M = -0,9701$ $C_M = -0,9420$
<i>světle šedé pozadí</i>	$L^* = 80$ $Y = 57$				
	$n = \infty$ $N_{95} = 0,0829$ $C_M = -1,0000$ $C_M = -1,0000$	$n = 0,5668$ $N_{95} = 0,8122$ $C_M = 0,7643$ $C_M = 0,2765$	$n = 1,0000$ $N_{95} = 0,7250$ $C_M = 0$ $C_M = 0$	$n = 3,0774$ $N_{95} = 0,5790$ $C_M = -0,6750$ $C_M = -0,5095$	$n = 18,9630$ $N_{95} = 0,4025$ $C_M = -0,9473$ $C_M = -0,8998$
<i>neutrálně šedé pozadí</i>	$L^* = 50$ $Y = 19$				
	$n = \infty$ $N_{95} = 0,1038$ $C_M = -0,9999$ $C_M = -0,9999$	$n = 0,1842$ $N_{95} = 1,0169$ $C_M = 4,4293$ $C_M = 0,6889$	$n = 0,3250$ $N_{95} = 0,9078$ $C_M = 2,0774$ $C_M = 0,5095$	$n = 1,0000$ $N_{95} = 0,7250$ $C_M = 0$ $C_M = 0$	$n = 6,1620$ $N_{95} = 0,5040$ $C_M = -0,8377$ $C_M = -0,7207$
<i>tmavě šedé pozadí</i>	$L^* = 20$ $Y = 3$				
	$n = \infty$ $N_{95} = 0,1493$ $C_M = -0,9996$ $C_M = -0,9993$	$n = 0,0299$ $N_{95} = 1,4630$ $C_M = 32,4554$ $C_M = 0,9420$	$n = 0,0527$ $N_{95} = 1,3059$ $C_M = 17,9630$ $C_M = 0,8998$	$n = 0,1623$ $N_{95} = 1,0430$ $C_M = 5,1620$ $C_M = 0,7207$	$n = 1,0000$ $N_{95} = 0,7250$ $C_M = 0$ $C_M = 0$

Obrázek P3.1 – Indukční faktor a kontrast pro různé podněty a pozadí

Tabulka P3.1 – Hodnoty nejistot pro Weberův kontrast pro stupně šedé stupnice

L_A ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	Hodnoty kontrastu C_W pro stupně šedé stupnice									
	1	1.5	2	2.5	3	3	3.5	4	4.5	5
371	0,04	0,04	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
202	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
0,25	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0,05	0,03	0,02	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02
0,01	0,07	0,07	0,15	0,06	0,09	0,08	0,11	0,06	0,06	0,04