

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2018

Bc. Natálie Kailová

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická

Využití fotoaparátu pro kolorimetrická měření

Bc. Natálie Kailová

Diplomová práce

2018

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Natálie Kailová**
Osobní číslo: **C16590**
Studijní program: **N3441 Polygrafie**
Studijní obor: **Polygrafie**
Název tématu: **Využití fotoaparátu pro kolorimetrická měření**
Zadávající katedra: **Katedra polygrafie a fotofyziky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Z dostupné literatury nastudujte způsoby, jakými lze vyhodnocovat barevnost pomocí digitálního fotoaparátu nebo kamery.
2. Popište požadavky na podmínky záznamu a také způsoby převodu zaznamenaných RGB hodnot na kolorimetrické hodnoty.
3. Na základě nastudované literatury otestujte vybrané metody pro získání kolorimetrických parametrů pomocí digitálního fotoaparátu.
4. Výsledky vyhodnoťte pomocí objektivních nástrojů pro hodnocení věrnosti barevné reprodukce.
5. Získané výsledky přehledně zpracujte ve formě závěrečné práce.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Ondrej Panák

Katedra polygrafie a fotofyziky

Datum zadání bakalářské práce: **29. února 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. července 2016**



prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
-děkan

L.S.



prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. února 2016

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že 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, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 11. 5. 2018

Natálie Kailová

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce Ing. Ondreji Panákovi, Ph.D. za vstřícnost, trpělivost a odborné vedení při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině a partnerovi za podporu ve studiu i v životě.

Diplomová práce vznikla za podpory projektu Modernizace praktické výuky a zkvalitnění praktických dovedností v technicky zaměřených studijních programech, reg. číslo CZ.02.2.67/0.0/0.0/16_016/0002458 operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání. Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá charakterizací fotoaparátu pomocí polynomiální transformace a využitím této charakterizace pro kolorimetrická měření. V teoretické části je popsán proces a zpracování zaznamenaného obrazu. Dále jsou zde teoreticky popsány jednotlivé metody charakterizace fotoaparátu. Experimentální část je zaměřena na charakterizaci pomocí metody polynomiální transformace, a to včetně zjištění optimálních podmínek pro měření. Ve výsledkové části jsou porovnány jak experimentálně získané hodnoty jednotlivých polynomiálních modelů mezi sebou, tak i s daty na které byla aplikována správa barev.

KLÍČOVÁ SLOVA

digitální fotoaparát, kalibrace fotoaparátu, kolorimetrická měření, polynomiální transformace

TITLE

Using digital camera for colorimetric measurements

ANNOTATION

This diploma thesis deals with the characterization of a digital camera by polynomial transformation and utilization of this characterization for colorimetric measurements. The theoretical part describes the process and processing of the recorded image. In addition, there are theoretically described various methods of characterizing the camera. The experimental part is focused on characterization using the polynomial transformation method, including finding optimal conditions for measurement. In the result section, both the experimentally obtained values of the individual polynomial models are compared with each other, as well as with the data for which color management has been applied.

KEYWORDS

digital camera, camera calibration, colorimetric measurements, polynomial transformation

OBSAH

ÚVOD	14
1. TEORETICKÁ ČÁST.....	15
1.1 Fotografie	15
1.2 Digitální zrcadlovka.....	15
1.3 Proces záznamu obrazu	16
1.3.1 Objektivy	16
1.3.2 Snímače	17
1.3.3 A/D převodník	19
1.3.4 Bayerova maska	19
1.4 Zpracování zaznamenaného obrazu.....	19
1.4.1 Bilineární metoda interpolace.....	21
1.4.2 Pokročilá lineární metoda interpolace.....	21
1.4.3 Metoda VNG	22
1.4.4 Metoda Pixel Grouping	22
1.4.5 Metoda AHD	22
1.5 Charakterizace fotoaparátu.....	23
1.5.1 Metoda neuronových sítí.....	23
1.5.2 Polynomiální transformace.....	24
1.5.3 Modely využívající spektrální citlivost fotoaparátu	27
2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	28
2.1 Přístroje a zařízení	28
2.2 Vzorky.....	30
2.3 Experimentální postup	33
2.3.1 Stabilita osvětlení.....	33
2.3.2 Stabilita fotoaparátu	34

2.3.3 Kalibrace fotoaparátu.....	35
2.3.4 Testování polynomických modelů.....	36
2.3.5 Aplikace správy barev.....	38
3. VÝSLEDKY A DISKUZE	39
3.1 Vyhodnocení stability osvětlení	39
3.2 Vyhodnocení stability fotoaparátu.....	41
3.3 Vyhodnocení kalibrace fotoaparátu.....	43
3.4 Polynomické modely s trénovací sadou nastavenou na ColorChecker	47
3.5 Polynomické modely s trénovací sadou nastavenou na Profilační obrazec	54
3.6 Aplikace správy barev	61
3.7 Diskuze	64
4. ZÁVĚR	66
5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	67
6. PŘÍLOHY	72

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1: Camera obscura	15
Obrázek 2: Schéma digitální zrcadlovky v klidovém stavu a při expozici.....	16
Obrázek 3: Ohniskové vzdálenosti a zobrazovací úhly pro snímač 24 mm × 36 mm.....	17
Obrázek 4: Rozdíl získávání dat na CCD a CMOS.....	18
Obrázek 5: Princip činnosti snímače Foveon a CCD nebo CMOS	19
Obrázek 6: Bayerova maska.....	19
Obrázek 7: Schéma zpracování obrazových dat při vzniku digitální fotografie	20
Obrázek 8: Pixely použité pro výpočet zelené barvy červeného pixelu a pro výpočet modré barvy červeného pixelu	21
Obrázek 9: Pixely použité pro výpočet zelené barvy, střed jádra je na červeném pixelu a pro výpočet červené barvy, střed jádra je ve sloupci s červenými pixely a v řadě s modrými.....	21
Obrázek 10: Architektura neuronových sítí pro zpětnou propagaci.....	24
Obrázek 11: Problém změny osvětlení při polynomiální transformaci 4. stupně	26
Obrázek 12: Schéma měřící sestavy citlivosti fotoaparátu	27
Obrázek 13: Kruhový zdroj světla DVR-630DVC a jeho podání barev	29
Obrázek 14: ColorChecker	30
Obrázek 15: Barevné obrazce pro sadu Profilační	32
Obrázek 16: Barevné obrazce pro sadu Testovací.....	32
Obrázek 17: Měření stability osvětlení	33
Obrázek 18: Závislost trichromatické hodnoty Y na čase pro fotokomoru	39
Obrázek 19: Závislost trichromatické hodnoty Y na čase pro laboratoř	40
Obrázek 20: Závislost trichromatické hodnoty Y na čase pro změnu podmínek	41
Obrázek 21: Závislost hodnot RGB na čase pro data z obrazce ColorCheckeru pro vyvážení bílé Sada 1	42
Obrázek 22: Závislost hodnot RGB na čase pro data papír Sada 1	42
Obrázek 23: Závislost hodnot RGB na čase pro data z obrazce ColorCheckeru pro vyvážení bílé po ustálení fotoaparátu	43
Obrázek 24: Závislost RGB na trichromatických hodnotách XYZ pro nastavení K4	44
Obrázek 25: Závislost RGB na trichromatických hodnotách XYZ pro nastavení K9	45
Obrázek 26: Závislost RGB na trichromatických hodnotách XYZ pro nastavení K13.....	45
Obrázek 27: Závislost RGB na trichromatických hodnotách XYZ pro nastavení K21.....	45

Obrázek 28: Graf závislosti linearizovaných hodnot RGB na XYZ pro neutrální políčka Profilačního obrazce	46
Obrázek 29: Graf závislosti linearizovaných hodnot XYZ na RGB pro všechna políčka Profilačního obrazce	46
Obrázek 30: Grafy barvových odchylek ΔE_{00} ColorCheckeru pro různé polynomické modely, trénovací sada nastavena na ColorChecker	48
Obrázek 31: Grafy barvových odchylek ΔE_{00} Profilačních obrazců pro různé polynomické modely, trénovací sada nastavena na ColorChecker	51
Obrázek 32: Graf barvových odchylek ΔE_{00} Profilačních obrazců pro polynomický model D5, trénovací sada nastavena na ColorChecker	52
Obrázek 33: Grafy barvových odchylek ΔE_{00} Testovacích obrazců pro různé polynomické modely, trénovací sada nastavena na ColorChecker	53
Obrázek 34: Graf barvových odchylek ΔE_{00} Testovacích obrazců pro polynomický model D5, trénovací sada nastavena na ColorChecker	54
Obrázek 35: Grafy barvových odchylek ΔE_{00} ColorCheckeru pro různé polynomické modely, trénovací sada nastavena na Profilační obrazec	55
Obrázek 36: Grafy barvových odchylek ΔE_{00} Profilačních obrazců pro různé polynomické modely, trénovací sada nastavena na Profilační obrazec	59
Obrázek 37: Grafy barvových odchylek ΔE_{00} Testovacích obrazců pro různé polynomické modely, trénovací sada nastavena na Profilační obrazec	60
Obrázek 38: Graf barvových odchylek ΔE_{00} ColorCheckeru s upraveným nastavením.....	61
Obrázek 39: Graf barvových odchylek ΔE_{00} Profilačního obrazce s upraveným nastavením	62
Obrázek 40: Graf barvových odchylek ΔE_{00} Testovacího obrazce s upraveným nastavením	62
Obrázek 41: Graf barvových odchylek ΔE_{00} ColorCheckeru s implicitním nastavením	63
Obrázek 42: Graf barvových odchylek ΔE_{00} Profilačního obrazce s implicitním nastavením	63
Obrázek 43: Graf barvových odchylek ΔE_{00} Testovacího obrazce s implicitním nastavením	64

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 : Intenzita osvětlení	29
Tabulka 2: Parametry nastavení fotoaparátu při měření rovnoměrnosti osvětlení	34
Tabulka 3: Nastavení modulu Camera Raw 7.0 pro stabilitu fotoaparátu	35
Tabulka 4: Nastavení modulu Camera Raw 7.0 pro kalibraci fotoaparátu	36
Tabulka 5: Definice použitých polynomických modelů	37
Tabulka 6: Hodnoty koeficientů a , b a hodnota spolehlivosti R^2 pro jednotlivá nastavení	44
Tabulka 7: Hodnoty ΔE_{00} všech obrazců s trénovací sadou nastavenou na ColorChecker	47
Tabulka 8: Hodnoty ΔL všech obrazců s trénovací sadou nastavenou na ColorChecker	49
Tabulka 9: Hodnoty ΔC všech obrazců s trénovací sadou nastavenou na ColorChecker	49
Tabulka 10: Hodnoty ΔH všech obrazců s trénovací sadou nastavenou na ColorChecker	50
Tabulka 11: Hodnoty ΔE_{00} všech obrazců, trénovací sada nastavena na Profilační obrazec ..	56
Tabulka 12: Hodnoty ΔL všech obrazců, trénovací sada nastavena na Profilační obrazec	57
Tabulka 13: Hodnoty ΔC všech obrazců, trénovací sada nastavena na Profilační obrazec	57
Tabulka 14: Hodnoty ΔH všech obrazců, trénovací sada nastavena na Profilační obrazec	58
Tabulka 15: Hodnoty ΔE_{00} , ΔL , ΔC a ΔH pro všechny obrazce s upraveným nastavením	62
Tabulka 16: Hodnoty ΔE_{00} , ΔL , ΔC a ΔH pro všechny obrazce s implicitním nastavením ...	64

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

DSLR	digitální zrcadlovka (<i>Digital Single-Lens Reflex camera</i>)
R	červená (<i>Red</i>)
G	zelená (<i>Green</i>)
B	modrá (<i>Blue</i>)
CCD	druh čipu v digitálních fotoaparátech (<i>Charge-Coupled device</i>)
CMOS	druh čipu v digitálních fotoaparátech (<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>)
RAW	třída souborů obsahujících minimálně zpracovaná data ze snímače fotoaparátu
JPEG	ztrátová komprese pro ukládání fotografií (<i>Joint Photographic Expert Group</i>)
TIFF	typ souboru pro ukládání fotografií (<i>Tag Image File Format</i>)
VNG	metoda interpolace obrazu (<i>Threshold-based variable number of gradients</i>)
AHD	metoda interpolace obrazu (<i>Adaptive Homogeneity-Directed</i>)
CIE XYZ	matematicky definovaný barvový prostor nezávislý na zařízení
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci (<i>International Organization for Standardization</i>)
ANN	umělé neuronové sítě (<i>Artificial Neural Networks</i>)
MPL	vícevrstvý perceptron (<i>Multilayer Perceptron</i>)
BP	zpětná propagace (<i>Back-Propagation</i>)
NCS	barevný model (<i>Natural Colour System</i>)

ÚVOD

Digitální fotoaparát slouží k vytváření digitálních fotografií. Po průchodu světla přes objektiv je obraz zaznamenán na senzor, který umožňuje vytvořit snímek ve formátu RAW, TIFF nebo JPEG. Protože fotoaparát vytváří snímky v prostoru RGB (závislém na zařízení), může se stát, že barvy nebudou k dispozici v jiném barvovém prostoru. Z tohoto důvodu je nutná charakterizace fotoaparátu do prostoru, který je nezávislý na zařízení. Charakterizace definuje vztah mezi prostorem závislým na zařízení a nezávislým na zařízení, kdy tato definice může být na základě matematického modelu, jenž snižuje množství transformací, které je potřebné vykonat při přenášení fotografií z jednoho média na druhé.

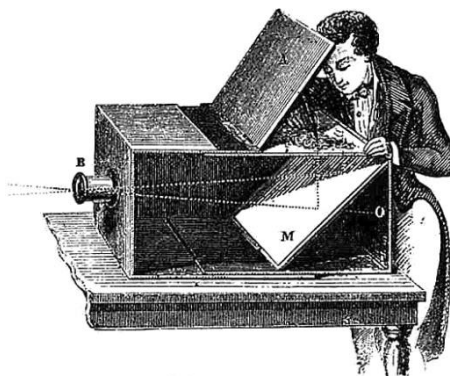
Metody charakterizace lze rozdělit do tří obecných skupin: fyzikální metody, empirické modely (náhledové tabulky) a matematické modely. Mezi matematické modely patří metoda neuronových sítí, polynomiální transformace a modely využívající spektrální citlivost fotoaparátu. Umělé neuronové sítě jsou inspirovány strukturou lidského centrálního nervového systému a tato metoda je náročná jak na vybavení, tak po finanční stránce [1]. Modely využívající spektrální citlivost fotoaparátu pracují na základě zjišťování odezvy senzoru na monochromatickém záření [2]. Polynomiální transformace oproti ostatním metodám vyžaduje nižší počet referenčních cílů, není tak finančně a výpočetně náročná a poskytuje v podstatě stejné výsledky jako ostatní metody [3].

V experimentální části byla testována metoda polynomiální transformace. Pro získání relevantních dat byla nejdříve měřena stabilita osvětlení a z výsledků byly určeny podmínky pro další měření. Poté následovalo stanovení stability fotoaparátu v čase a jeho kalibrace. Poslední fází byla aplikace polynomiální transformace na měřené vzorky. Byly použity tři druhy vzorků: X-Rite ColorChecker a dva vytvořené obrazce. Získané výsledky byly porovnány s metodou, kdy byla aplikována správa barev.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Fotografie

Historie fotografie sahá do 15. století, kdy Leonardo da Vinci popsal konstrukci Camery obscury (*Obr. 1*), která se stala nejdříve pomůckou malířů a později fotografů [4, 5]. Camera obscura je temná komora, do které malým otvorem vstupují světelné paprsky a na protější stěně vytváří převrácený, ostrý a zmenšený obraz skutečnosti. Od 18. století se fotografie postupně vyvíjela (kratší doba expozice, stálejší snímky) a s ní i fotografická chemie a technika. Pojem fotografie je možné přeložit jako kresba světlem [6]. Světlo je základním požadavkem, bez kterého by nebylo možné fotografii vytvořit. Další nezbytnou součástí je fotoaparát.

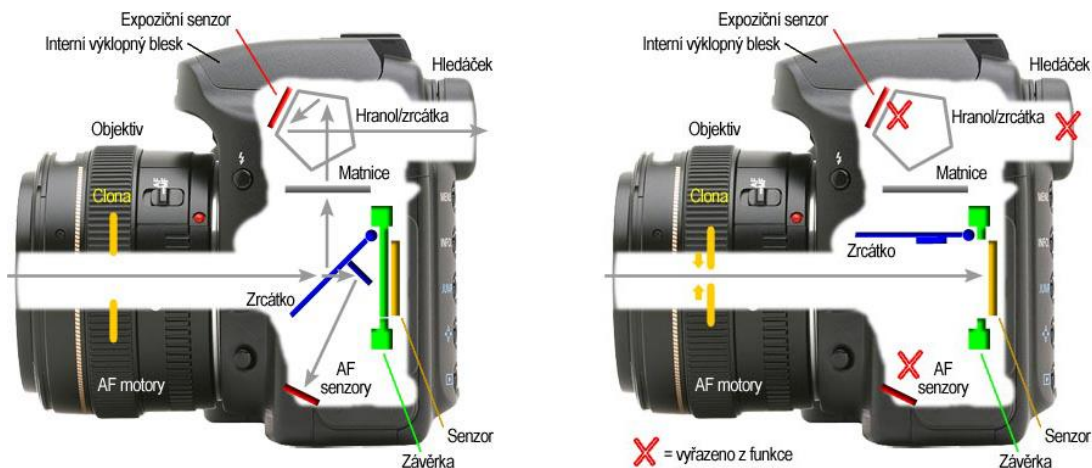


Obrázek 1: Camera obscura [4]

1.2 Digitální zrcadlovka

Digitální zrcadlovka (*DSLR – Digital Single-Lens Reflex camera*) je zařízení, které slouží k vytváření digitálních fotografií [7, 8]. Byla vyvinuta z analogového fotoaparátu a konstrukčně je mu velmi podobná. Největší rozdíl je ten, že světlo procházející objektivem nedopadá na fotografický film, ale na snímač, kde je signál digitalizován a uložen na paměťové médium [6, 9]. Výhodou digitálních zrcadlovek je možnost výměnných objektivů, což umožňuje větší variabilitu fotografování při zachování kvality [6–8]. Mezi další výhody patří to, že pohled do hledáčku je pohledem skrz objektiv. To umožňuje vidět konkrétní výřez scény i s použitou hloubkou ostrosti a zaostřením. Tuto možnost poskytuje optický hranol, který je umístěn v hledáčku a sklopné polopropustné zrcátko, které je v těle fotoaparátu (*Obr. 2*). Světlo prochází objektivem na zrcátko, kde je část propuštěna na zaostřovací senzory a část odražena na hranol. Tam dochází ke dvojnásobnému odrazu světla, aby byl v hledáčku vidět reálný obraz snímané scény. Výhodou je také konstrukce fotoaparátu. Větší rozměry přístroje

umožňují použití většího rozměru snímače a tím lepší kvalitu výsledných fotografií i při použití vyšší citlivosti. Váha, které může být i nevýhodou, zase přispívá k větší stabilitě a eliminaci rozhýbání při fotografování.



Obrázek 2: Schéma digitální zrcadlovky v klidovém stavu (vlevo) a při expozici (vpravo) [10]

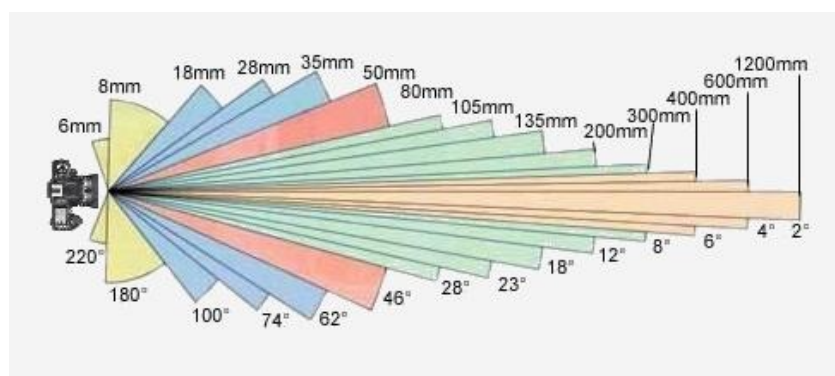
1.3 Proces záznamu obrazu

Proces záznamu obrazu v DSLR má několik fází. Prvním krokem je vytvoření a transformace obrazu pomocí zrcadel a čoček v objektivu [11]. Centrální procesorová jednotka obdrží signál z tlačítka spouště a dojde k uvolnění paměti snímače, případně také k zaostření [12]. Dojde k otevření clony, sklopení polopropustného zrcátka, otevření závěrky a světlo prochází objektivem až na snímač, kde jsou barevné složky signálu separovány pomocí optických filtrů na tři základní barvy a to červenou (*R*), zelenou (*G*) a modrou (*B*) (*Obr. 2*). Dobu, po kterou je závěrka otevřena, určuje expoziční čas [7, 11]. Čím je tato doba delší, tím více světla dopadne na snímač. Dalším krokem je záznam barevných složek pomocí snímače a zpracování elektrických signálů pro jednotlivé barevné složky a pixely (obrazové body). Poslední fází je transformování elektrických signálů na digitální data pomocí analogově digitálního převodníku.

1.3.1 Objektivy

Objektiv je optická soustava složená ze spojných a rozptylných čoček, jejichž středy křivosti leží na společné optické ose [11, 13, 14]. Čočky jsou uspořádány do skupin tak, aby plnily požadavky kladené na objektiv. Uvnitř se nachází kruhová lamelová clona regulující množství světla, které projde objektivem na snímač. Mezi další části patří: zaostřovací kroužek, ovládání stabilizace obrazu a způsobu zaostřování a případně i kroužek změny ohniskové

vzdálenosti [11]. Zaostřování zajišťuje motor ovládaný mikroprocesorem, který získává informace ze zaostřovacích senzorů, které jsou umístěny v těle fotoaparátu pod polopropustným zrcátkem. Objektivy se nejčastěji dělí do tří skupin (širokoúhlé, normální a teleobjektivy) podle ohniskové vzdálenosti, se kterou souvisí i zobrazovací úhel (*Obr. 3*). Objektivy s proměnlivou ohniskovou vzdáleností mají kombinaci optických prvků, která umožňuje měnit základní charakteristiky díky pohyblivosti některých optických členů v objektivu [8, 11]. Oproti objektivům s pevnou ohniskovou vzdáleností, podávají méně kvalitní snímky.



Obrázek 3: Ohniskové vzdálenosti a zobrazovací úhly pro snímač 24 mm × 36 mm (žlutá – superširokoúhlé, modrá – širokoúhlé, červená – normální, zelená – teleobjektivy, oranžová – superteleobjektivy) [11]

Protože se jedná o optickou soustavu, souvisí s objektivy i optické vady [11]. Ty se dělí do tří základních skupin: monochromatické (otvorová vada, zkreslení, astigmatismus, koma a vinětace), barevné (aberrace) a odlesky.

1.3.2 Snímače

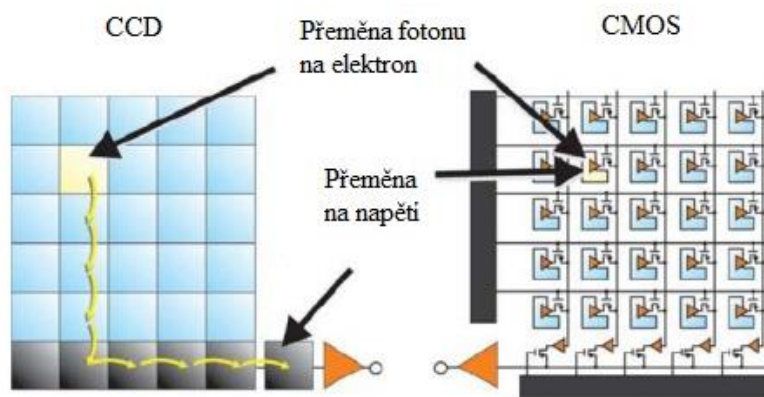
Snímač patří mezi nejdůležitější části digitální zrcadlovky, protože určuje některé její vlastnosti [6, 8]. Je to soustava světlocitlivých buněk, usazených společně s obvody a propojením na mikročipu, který zaznamenává tok světla dopadajícího na snímač [5, 7, 11, 15]. Samotný snímač není schopen rozlišit barvy, ale pouze intenzitu světla. Aby byla výsledná fotografie barevná, je před snímačem umístěna Bayerova maska. Ta způsobí, že každá světlocitlivá buňka, obsahuje informace pouze o jedné barvě. Z toho důvodu je nutné, aby byly dvě další barvy interpolovány. K tomu se využívají sousední pixely. Kvalita výsledného obrazu se liší podle použitých algoritmů. Nejpoužívanějšími druhy snímačů je CCD (*Charge-Coupled device*) a CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) [11].

CCD snímač

CCD je druh snímače, který pracuje s elektrickým signálem v podobě vázaného náboje [11]. Výstupem je napěťový signál. Velikost vznikajícího náboje je úměrná intenzitě záření, které dopadá na snímač. Po osvětlení jsou náboje z jednotlivých prvků snímače postupně přenášeny horizontálními a vertikálními posuvnými registry až do výstupního obvodu a jsou převáděny na napěťový signál (*Obr. 4*) [16]. Velikost jednoho prvku na snímači se pohybuje v jednotkách mikrometrů a jednotlivé prvky jsou uspořádány do matice, která má rozměr v řádu milimetrů až centimetrů čtverečných podle druhu fotoaparátu. Mezi nevýhody těchto snímačů patří šum, který vzniká v průběhu vyčítání dat a tepelný šum.

CMOS snímač

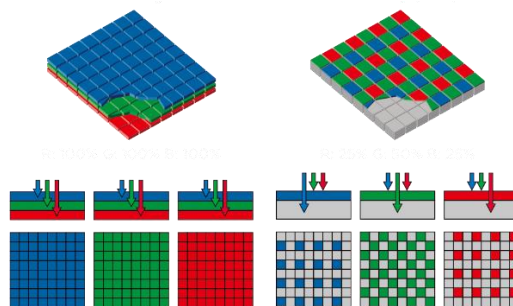
CMOS je druh snímače, který využívá elektronické integrované obvody [11]. Elektrický náboj z fotodiody je předzpracován a poté odveden pomocí sběrnice do zesilovače (*Obr. 4*). Mezi nevýhody patří menší citlivost a větší šum, naopak výhodou je jejich cena, spotřeba energie a možnost částečného zpracování obrazu na snímači.



Obrázek 4: Rozdíl získávání dat na CCD (vlevo) a CMOS (vpravo) [17]

Foveon

Tento druh čipu umožňuje zachycení snímků s vyšším rozlišením při využití průhlednosti křemíkového podkladu [7, 18]. Oproti snímačům CCD a CMOS, které zachycují barvu pixelu pouze přes jednu barvu filtru, Foveon zachycuje všechny tři barvy na každé buňce bez použití filtrů (*Obr. 5*). Toho je dosaženo stohováním tří pixelů na sebe. Tím že pixel nese informaci o všech barvách, dochází k eliminaci procesu interpolace ze sousedních pixelů a nedochází tak ke tvorbě artefaktů v obraze [18]. Další výhodou může být lepší kvalita obrazu, větší ostrost nebo plnohodnotné barevné podání pro každý obrazový prvek [11].



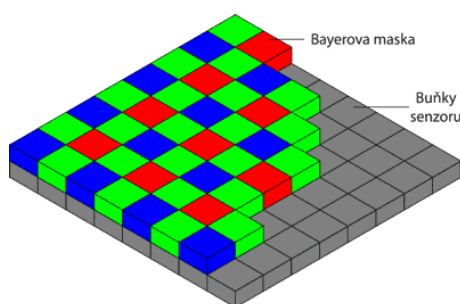
Obrázek 5: Princip činnosti snímače Foveon (vlevo) a CCD nebo CMOS (vpravo) [11]

1.3.3 A/D převodník

Analogově digitální převodník konvertuje analogový signál na číslicový (digitální) [11, 16]. Převod signálu probíhá ve dvou krocích. První krok je vzorkování signálu, které probíhá v pravidelných časových intervalech. Důležitým parametrem je také vzorkovací frekvence. Ta musí být minimálně dvakrát větší než nejvyšší frekvence, která je obsažena v původním signálu. Druhým krokem je kvantování na počet jasových úrovní určených počtem bitů A/D převodníku. V této fázi je každé vzorkovací hodnotě napětí přiřazeno celé číslo v rozmezí daném přesností převodu. U 8bitových převodníků je počet jasových úrovní 256. Nulové hodnotě napětí je přiřazeno číslo 0 a nejvyššímu napětí číslo 255.

1.3.4 Bayerova maska

Bayerova maska je tvořena třemi druhy filtrů, přičemž každý z nich propouští pouze barvu R, G nebo B [5, 7, 11, 18]. Filtry masky jsou uspořádány do pravidelné mřížky, kdy zelených filtrů je dvakrát více než červených a modrých (*Obr. 6*). Toto složení je vytvořené z důvodu, že lidské oko je nejvíce citlivé na zelenou barvu.



Obrázek 6: Bayerova maska [5]

1.4 Zpracování zaznamenaného obrazu

Proces zpracování zaznamenaného obrazu je znázorněn na *Obrázku 7* [11]. Při zpracování obrazu jsou využita data získaná ze senzoru, která jsou zesílena podle zvolené

citlivosti. Čím vyšší citlivost je nastavena, tím více jsou data zesílena a více se projeví šum v obraze. Dalším krokem je vzorkování a kvantování signálu pomocí A/D převodníku pro každý barevný kanál. Informace z tohoto procesu mohou být uloženy ve formátu, který se souhrnně nazývá RAW (každý výrobce má svůj specifický formát). Obsahuje původní data o jednotlivých pixelech (který barevný filtr se nad pixelem nachází) a údaje o podmínkách, za kterých obraz vznikl (expoziční čas, clona atd.). RAW soubor lze přirovnat k filmovému negativu. Data mohou být zpracována v počítači nebo dále ve fotoaparátu. Tato část zpracování obrazu je znázorněna červeně na *Obrázku 7*.



Obrázek 7: Schéma zpracování obrazových dat při vzniku digitální fotografie [15]

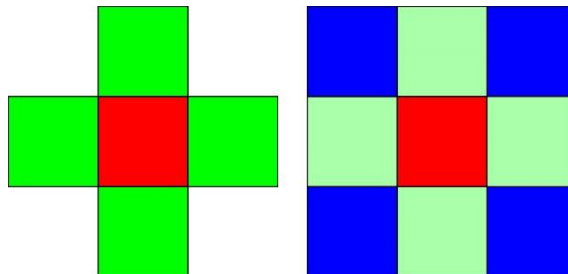
Další fází je Bayerova interpolace, která provádí výpočet hodnot RGB pro každý pixel [15]. Interpolace má největší vliv na kvalitu obrazu, i když nikdy nebude dosaženo původní kvality, protože na buňce snímače chybí vždy dvě hodnoty barev. Mezi základní metody interpolace patří: bilineární metoda, pokročilá lineární metoda, metoda VNG (*Threshold-based variable number of gradients*), metoda pixel grouping a metoda AHD (*Adaptive Homogeneity-Directed*).

Poté následuje úprava vyvážení bílé [7, 11]. V této fázi se odstraňuje barevný tón, který je dán použitým osvětlením [7]. Ve fotoaparátu lze nastavit automatické, přednastavené nebo manuální vyvážení bílé. Při automatickém režimu fotoaparát sám vyhodnotí barvu osvětlení a upraví ji na požadovanou hodnotu. V přednastaveném režimu je možné volit mezi osvětlením žárovkou, zářivkou, bleskem nebo slunečním světlem, popř. fotografováním ve stínu a při zatažené obloze. Při manuálním režimu je nutné vyfotografovat buď bílý povrch nebo 18 % neutrální šedou tabulku. Procesor si uloží informaci a použije ji pro další fotografie. Tento režim se využívá při fotografování za neměnných podmínek osvětlení.

Posledním krokem je zahrnutí parametrů obrazu, mezi které patří: odstín a sytost barev, barvový prostor, kontrast, ostrost obrazu, obrazový formát fotografie atd. [7, 11]. Data získaná z těchto procesů jsou uložena na paměťové médium buď ve formátu JPEG nebo TIFF.

1.4.1 Bilineární metoda interpolace

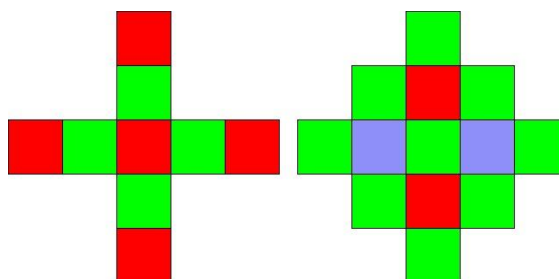
Bilineární metoda je nejjednodušší, nejrychlejší a nejstarší metodou interpolace [15, 19]. Principem této metody je průměrování všech nejbližší políček počítané barvy (*Obr. 8*). Barvy políček jsou dopočítávány odděleně, a proto ve výsledném obraze vznikají výrazné barevné artefakty, postrádá drobné detaily a je velmi měkký. Tato interpolace je vhodná pro obrazy s homogenními barvami. Výhodou metody je také zachování plného rozlišení výsledného obrazu.



Obrázek 8: Pixely použité pro výpočet zelené barvy červeného pixelu (vlevo) a pro výpočet modré barvy červeného pixelu (vpravo) [15]

1.4.2 Pokročilá lineární metoda interpolace

Oproti bilineární interpolaci poskytuje tato metoda obrazy s vyšší ostroستí a částečně také potlačuje barevné artefakty [15, 19]. Nevýhodou metody je vznik zubatých hran, který může nastat při nevhodné orientaci ostré hrany v obraze, jinak poskytuje pokročilá lineární interpolace velmi dobré obrazové výsledky. Využívá 8 konvolučních filtrů o rozměru jádra 5×5 (*Obr. 9*).



Obrázek 9: Pixely použité pro výpočet zelené barvy, střed jádra je na červeném pixelu (vlevo) a pro výpočet červené barvy, střed jádra je ve sloupci s červenými pixely a v řadě s modrými (vpravo) [15]

1.4.3 Metoda VNG

Základem metody je určení váženého gradientu v osmi směrech v matici 5×5 bodů, která má střed v bodě, pro který jsou dopočítávány hodnoty barev [15]. Pro každou množinu vypočtených gradientů je určen práh, podle nějž je vybrána podmnožina gradientů. Nízké gradienty jsou u pixelů, které mají podobnou barevnou hodnotu, zatímco gradienty s vysokou hodnotou se nacházejí v ostrých hranách a jemných detailech. Podmnožina gradientů slouží k určení množiny bodů, které se váženě sečtou a tím jsou získány výsledné hodnoty. Metodu VNG lze rozšířit na výpočet za pomoci 4 barev, kdy jsou hodnoty zelených pixelů v lichých a sudých řádcích považovány za různé barvy. Tato rozšířená metoda částečně potlačuje barevné artefakty v obraze.

1.4.4 Metoda Pixel Grouping

Tato metoda interpolace patří, stejně jako ostatní lineární metody, mezi metody časově nenáročné [15]. Je založena na vlastnostech původního obrazu, kde se vychází z reálné scény. Tato scéna je složena ze skupin pixelů, které jsou propojeny a mají podobnou barvu a jas. Určením těchto skupin pixelů je možné lépe interpretovat barevné informace a tím vytvořit lepší výsledný obraz. Červený a modrý kanál je vytvořen pomocí severovýchodního či severozápadního gradientu všech odpovídajících pixelů a poté pomocí algoritmu, který zlepšuje hrany a zajistí hladké přechody. Zelený kanál je interpolován ze čtyř sousedních pixelů. V konečném výpočtu je na tento pixel kladen trojnásobný důraz.

1.4.5 Metoda AHD

Metoda AHD se snaží řešit problémy vznikající při Bayerově interpolaci [15, 20]. Barevné artefakty vzniklé v důsledku metody interpolace jsou řešeny iterativním nelineárním filtrem, artefakty vzniklé ze špatně zvolených okolních pixelů obrazu jsou řešeny interpolací ve směru úbytku barevných artefaktů. Prvním krokem metody AHD je interpolace v horizontálním a vertikálním směru, kde je v zeleném kanálu problém odhadu hodnot R a G vyřešen lineární kombinací známých pixelů v modrém a červeném kanálu. Tyto kanály jsou naopak rekonstruovány potlačením vysokých frekvencí vzorkovaného signálu použitím interpolovaného zeleného kanálu. V druhém kroku je poté obraz interpolován do konečné podoby. Aby se předešlo vzniku artefaktů, které vznikají špatnou volbu směru interpolace, je vytvořena tzv. mapa homogenity. Ta slouží k analýze a potlačení vzniklých barevných artefaktů porovnáváním vertikálně a horizontálně interpolovaných obrazů. Podobnost pixelů

je určena pomocí vzdáleností jednotlivých složek. Ve třetím kroku, který je volitelný, jsou potlačeny případné zbylé barevné artefakty iterativní metodou.

1.5 Charakterizace fotoaparátu

Různá technická zařízení (monitory, fotoaparáty, skenery, tiskárny) pracují v různých barevných prostorech, a proto barvy v jednom prostoru nemusí být k dispozici v jiném. Barvový prostor, který je charakteristický pro určité zařízení se nazývá prostor závislý na zařízení [5]. Druhým typem je barvový prostor nezávislý na zařízení, který je označován jako univerzální. Při zpracovávání snímků z fotoaparátu je důležité zajistit zachování barevnosti snímků během přenášení na jiné zařízení nebo médium [21]. Tento proces je obtížný, protože snímky jsou v prostoru RGB, který je závislý na zařízení. Dalším problémem je závislost fotografií na konkrétním fotoaparátu a světelných podmínkách použitých při fotografování. Charakterizace fotoaparátu do prostoru nezávislého na zařízení, snižuje množství transformací, které je nutné vykonat při přenášení fotografií.

Charakterizace je matematický model, který je složený ze souboru rovnic nebo definuje oddělený počet bodů, které tvoří tabulku pro mapování [21]. Před samotnou charakterizací je nutné provést kalibraci fotoaparátu [22]. Kalibrace je nastavení zařízení tak, aby bylo zajištěno, že zařízení poskytuje konzistentní a opakovatelná data v průběhu času [21, 22]. Jedním z důvodů kalibrace je, že spektrální citlivost snímačů v různých DSLR se značně liší [22]. Z toho důvodu je pro reprodukci barev nezbytná charakterizace, která definuje mapování mezi RGB signály DSLR a prostorem nezávislým na zařízení. Pokud je znám vztah pro tento převod, je možné snímky převést do prostoru XYZ.

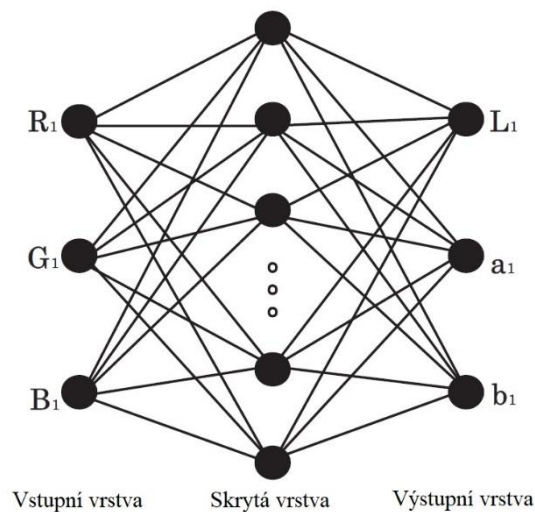
Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) se snaží vyvinout standart pro charakterizaci DSLR [23]. Některé normy již byly vytvořeny, ale jsou pouze pro zkušební laboratoře a výrobce fotoaparátů, protože vyžadují velmi drahé vybavení. Metody pro charakterizaci fotoaparátů lze rozdělit do tří obecných skupin: fyzikální modely, empirické modely (náhledové tabulky) a matematické modely [22]. V praxi se používají pouze matematické a empirické modely [1].

1.5.1 Metoda neuronových sítí

Umělé neuronové sítě (ANN) jsou inspirovány strukturou lidského centrálního nervového systému, který tvoří vysoký počet paralelně pracujících buněk (neuronů), které pracují paralelně, aby se co nejrychleji usnadnilo rozhodování [24]. Tyto neurony jsou spojeny elektrickým stimulem (synapse). Podobně model ANN poskytuje synaptickou aktivitu

prostřednictvím číselné hodnoty, která je podobná procesu učení člověka. ANN je metoda k vytvoření vztahu mezi reakcemi fotoaparátu a hodnotami XYZ [25].

Vícevrstvý perceptron (MPL) je jedním z nejpoužívanějších typů architektur ANN [22, 25]. Z tohoto typu je nejrozšířenějším modelem zpětná propagace (BP). Tato síť je inspirována nervovým systémem lidského mozku. Skládá se z vrstev procesních prvků nazývaných neurony a spojení, které jsou uspořádány ve třech nebo více vrstvách (vstupní vrstva, jedna nebo více skrytých vrstev a výstupní vrstva). Architektura třívrstvého modelu BP je znázorněna na *Obrázku 10*.



Obrázek 10: Architektura neuronových sítí pro zpětnou propagaci [25]

Vstup pro každou jednotku je součet výstupů ze všech jednotek v předchozí vrstvě [22]. Jednotka v první vrstvě přijímá vstup ze vstupního vektoru. Další krok je analogický. Každý řádek na *Obrázku 10* představuje vážené spojení a síť, přičemž pro každé spojení jsou k dispozici optimální hodnoty. Síť se pokouší nalézt optimální hodnoty s nejmenšími rozdíly mezi aktuálním a cílovým výstupním vektorem. Počet jednotek ve vstupních a výstupních vrstvách se určuje podle řešeného problému. Pokud se síť používá k mapování mezi RGB a $L^*a^*b^*$, jsou ve vrstvách vstupů a výstupů tři jednotky.

1.5.2 Polynomiální transformace

Polynomiální transformace se používá pro charakterizaci fotoaparátů a monitorů [22]. Klíčovou vlastností je, jestli může být snadno invertována. Polynomiální transformace tuto možnost poskytuje, kdy se vypočítávají hodnoty XYZ z hodnot RGB a naopak. Empirické modely neumožňují tak snadnou inverzi, a proto se využívá inverzní mapování. Výhodou polynomiální transformace s ohledem na jiné metody je to, že vyžaduje nižší počet referenčních cílů a barevná políčka nemusí být rovnoměrně rozložena [3]. Další výhodou je, že poskytuje

v podstatě stejné výsledky jako ostatní metody, ale má nižší předprocesní a výpočetní náklady [26]. Nastavení digitálního fotoaparátu a stálost světelného prostředí je pro pořizování snímků zásadní, protože jinak nemůže fotoaparát poskytnout opakovatelné a smysluplné údaje [22, 23, 27]. Nejdůležitější je správné osvětlení, které musí být co možná nejjednodušší a rovnoměrné. Osvětlení referenčního cíle se mění v závislosti na poloze [22, 23]. Objektiv fotoaparátu nepřenáší jednotné světlo po celé jeho oblasti, ale obvykle centrální oblast přenáší více světla než okraj. Ke kontrole rovnoměrnosti světla lze využít např. fotometr nebo radiometr. Další důležitou podmínkou je stabilizace osvětlení před vytvořením prvního snímku. Doba stabilizace je minimálně 30 minut. Efektivní charakterizace je možná pouze tehdy, když fotoaparát neprovádí automatické vyvážení bílé barvy. Aby charakterizace měla vypovídající hodnotu, měl by být počet referenčních vzorků minimálně 60, protože pokud je vzorků méně, jsou výsledky nepřesné, a naopak větší počet vzorků nepřináší větší rozdíl ve výsledcích.

Lineární transformace se provádí ve dvou krocích [22, 26–28]. Nejprve se provádí analýza potřebné korekce hodnot pixelů (korekce gama) podle *Rovnice 1*, kde R_i je surová odezva kanálu i , $p(i)$ je exponent pro kanál a C_i je výstupní odezva fotoaparátu pro tento kanál. Linearizace lze dosáhnout určením hodnoty exponentu p tak, že se najde lineární vztah mezi C_i a hodnotami CIE Y pro sadu šedých vzorků ColorCheckeru o známých hodnotách barevnosti při konstantním a identifikovaném osvětlení.

$$C_i = (R_i)^{p(i)} \quad (1)$$

Druhá fáze mapuje linearizované hodnoty RGB na hodnoty CIE XYZ [21, 22]. Příklad mapování je uveden v *Rovnici 2*, kde musí být určeny koeficienty a .

$$\begin{aligned} X &= a_{11}R + a_{12}G + a_{13}B \\ Y &= a_{21}R + a_{22}G + a_{23}B \\ Z &= a_{31}R + a_{32}G + a_{33}B \end{aligned} \quad (2)$$

Pokud fotoaparát vykazuje n odezev, které korespondují s hodnotami XYZ, pak je nutné určit standardní matici \mathbf{A} , která má velikost 3×3 a obsahuje koeficienty a (*Rovnice 3*), kde \mathbf{T} je matice $n \times 3$ známých hodnot XYZ a \mathbf{C} je matice $n \times 3$ známých hodnot RGB [1, 3, 22, 23, 27].

$$\mathbf{T} = \mathbf{C} \mathbf{A} \quad (3)$$

Matici \mathbf{A} lze nalézt přímo pomocí *Rovnice 4*, kde \mathbf{C}^{-1} je inverzní matice \mathbf{C} . Pokud je matice \mathbf{C} čtvercová, má systém rovnic jediné řešení.

$$\mathbf{A} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{T} \quad (4)$$

Lineární transformace je pouze jednou z variant polynomiální transformace [22]. Její nevýhodou je to, že může způsobovat chyby u různých povrchů [1]. Tento problém lze vyřešit rozšířením transformace na polynomiální (nelineární), která při fixní expozici může přinést výrazné zlepšení korekce barev [1, 26]. Polynomiální transformace je vyjádřena *Rovnicí 6*, kde \mathbf{T} je matice $n \times 3$ hodnot XYZ a \mathbf{D} je matice $n \times m$ rozšířených hodnot RGB, kde m může být například 6 pro druhý stupeň polynomu (R, G, B, R², G², B²). Analogicky lze definovat polynomy vyššího stupně. Například pro třetí stupeň je vektor RGB rozšířen na 19 prvků a pro čtvrtý stupeň je rozšířen na 34 prvků. Metoda řešení *Rovnice 5* je stejná, jako při řešení lineární transformace [22].

$$\mathbf{T} = \mathbf{D} \mathbf{A} \quad (5)$$

Matice \mathbf{D} čtvercová není, proto se využívá pro výpočet koeficientů v matici \mathbf{A} pseudo-inverzní matice \mathbf{D}^+ (*Rovnice 6*) [3, 22]. Výpočet pseudo-inverzní matice lze provést pomocí programovacího jazyka např. v programu MATLAB pomocí funkce *pinv*.

$$\mathbf{A} = \mathbf{D}^+ \mathbf{T} \quad (6)$$

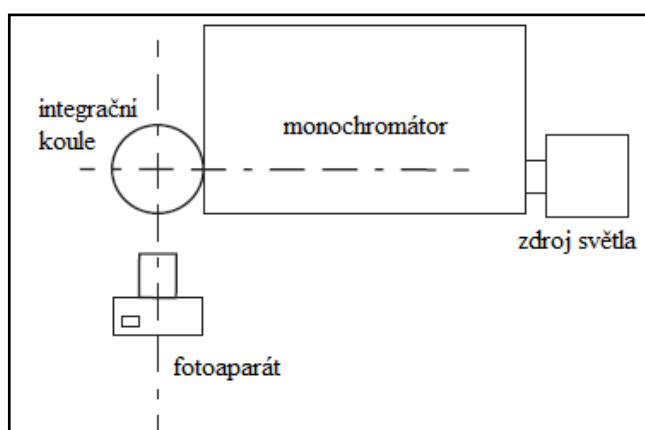
Rozšíření dalšími hodnotami RGB umožňuje dosažení lepších výsledků této techniky a může snížit chybu mapování až o 50 % [1, 3, 21, 23]. To platí pouze v případě stálých podmínek [1]. Pokud např. dojde ke změně expozice nebo osvětlení, pak se musí změnit i korekční matice, a to představuje problém v reálných snímcích. Příklad tohoto problému je znázorněn na *Obrázku 11*. Na *Obrázku 11a* je původní snímek, *Obrázek 11b* znázorňuje snímek korigovaný polynomickým modelem 4. stupně, kde je vidět relativně dobrá korekce barev v porovnání s originálem. Snímek na *Obrázku 11c* byl pořízen za zvýšení intenzity světla o 70 %. Zde je vidět, že některé barvy jsou vykresleny nepřesně (např. azurová a zvýraznění papriky) i přesto, že jsou pod úrovní nasycení senzoru. Optimální polynom by měl být druhého nebo třetího řádu [26].



Obrázek 11: Problém změny osvětlení při polynomiální transformaci 4. stupně [1]

1.5.3 Modely využívající spektrální citlivost fotoaparátu

Spektrální citlivosti jsou funkce vlnové délky popisující relativní účinnost detekce světla pro obrazové senzory kamer [2]. Znalost spektrálních citlivostí kamer je důležitá pro úkoly, ve kterých se využívá počítačové vidění jako je např. stálost barev, multispektrální zobrazování nebo využití spektrální reflexe. Modely využívající spektrální citlivost fotoaparátu jsou stále více populární, protože jsou rychlé a poměrně levné [29]. V těchto sestavách se využívají buď monochromatické CCD kamery, nebo komerčně dostupné digitální fotoaparáty. Je obtížné získat údaje o spektrální citlivosti fotoaparátů, protože výrobci je tají, a proto je nutné je odhadnout nebo změřit. Většina digitálních fotoaparátů má funkce spektrální citlivosti navržené s určitým omezením, aby vytvářely na pohled hezčí obrazy [2]. Charakteristiky spektrálních citlivostí jsou kompromisem mezi maximalizací kvantové účinnosti a minimalizací šumu. Pro měření se využívá monochromátor, který generuje úzkopásmové světlo a spektrometr skenující požadovaný rozsah vlnových délek, což je časově náročné. Na *Obrázku 12* je znázorněno schéma měření, kde záření ze světelného zdroje prochází přes monochromátor do integrační koule, kde je rovnoměrně rozptýleno a zaznamenáno fotoaparátem [29, 30].



Obrázek 12: Schéma měřicí sestavy citlivosti fotoaparátu [29]

Druhou možností měření je využití referenčních políček a známého osvětlení [2, 30]. Mezi nevýhody této metody patří nedostatečné množství měřených políček, z čehož vyplývá neúplné pokrytí spekter. Další nevýhodou je také nekontrolovatelnost nad odchylkami a chybami systému, a proto nelze poznat nejistotu měření. Ve srovnání s měřením za pomoci referenčních políček je metoda spektrální citlivosti fotoaparátů pomocí monochromátoru a radiometru mnohem přesnější [2, 29, 30]. Nevýhodou tohoto přístupu je časová náročnost, náklady a dostupnost drahých zařízení.

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část byla rozdělena do čtyř dílčích kroků. V prvním kroku byla měřena stabilita osvětlení spektrometrem a ze získaných dat byly určeny podmínky pro další experimenty. Poté se stanovovala stabilita dat z fotoaparátu v čase. V dalším kroku se provedla kalibrace fotoaparátu s různými úpravami snímků, za účelem nalezení optimálního převodu z formátu RAW do formátu TIFF. Nakonec bylo provedeno měření dat pomocí spektrofotometru. Experimentálně získané hodnoty byly využity pro porovnání s hodnotami různého zpracování vytvořených obrazců pomocí polynomického modelu. Snímky získané z posledního kroku měření byly také porovnány s fotografiemi, na které byla aplikována správa barev.

2.1 Přístroje a zařízení

Fotoaparát

Pro měření byla použita digitální zrcadlovka Pentax K10D s objektivem Pentax smc DA 16–45 mm F 4,0 ED AL. Tento fotoaparát má obrazový snímač typu CCD s rozlišením 10,2 Mpx a poměrem stran snímku 3:2.

Spektrometr Black Comet Concave Grating Series

Spektrometr od firmy Stellarnet Inc. umožňuje měření v rozsahu 280–900 nm [31]. Obsahuje konkávní holografickou mřížku s korekcí aberace, která vytváří ploché pole na detektoru CCD, což zajišťuje jednotné rozlišení v celém spektrálním rozsahu. Zobrazování je bez zrcadel, aby rozptýlené světlo bylo co nejnižší. Velikost štěrbiny 100 nm umožňuje měření s 3 nm rozlišením. Pro měření byl využit optický kabel s průměrem účinné části světlovodu 600 mikrometrů s kolimační čočkou od stejného výrobce. Data z měření byla zapisována v programu SpectraWiz, který je dodáván se spektrometrem.

Spektrofotometr UltraScan VIS

Spektrofotometr UltraScan VIS od firmy HunterLab je univerzální spektrofotometr pro měření barev [32]. Umožňuje měřit reflektanci, transmitanci i zákal. Využívá geometrii $d/8^\circ$ s automatickým zařazením nebo vyloučením zrcadlového odrazu. Optický systém má efektivní šířku pásma 10 nm a spektrální data jsou zapisována v 10 nm intervalech. Rozsah vlnových délek je od 360 nm do 780 nm.

Data ze spektrofotometru byla shromažďována v softwaru EasyMatch QC. Tento program umožňuje volbu standardního pozorovatele a standardizovaného zdroje pro výpočet

kolorimetrických parametrů. [33]. Pro potřeby této práce byla využita geometrie se započtením složky přímého odrazu s UVcut filtrem odřezávajícím záření pod 400 nm.

Zdroj světla

Pro měření byl použit kruhový zdroj osvětlení DVR-630DVC (*Obr. 13*) [34]. Tento zdroj obsahuje 630 LED diod s nastavitelnou teplotou chromatičnosti od 3000 K až po 8000 K. Výkon je 40 W, napětí 15 V a 5 A. Výrobce uvádí index podání barev 94 (*Obr. 13*). Na zadní straně má držák na fotoaparát. Intenzita osvětlení při různých vzdálenostech zdroje od předlohy je uvedena v *Tabulce 1*. V případě měření v rámci této práce byla vzdálenost 38 cm. Experimentálně získané spektrum pro osvětlení je uvedeno v *Příloze I* (kap. 6, str. 73).



Obrázek 13: Kruhový zdroj světla DVR-630DVC (vlevo) a jeho podání barev (vpravo) [34]

Tabulka 1 : Intenzita osvětlení

Vzdálenost [m]	Intenzita osvětlení [lux]
0,5	16 000
1	4 800
2	1 200

Software ColorChecker Passport

Program ColorChecker Passport slouží k vytváření vlastních profilů fotoaparátu ze snímků ColorCheckeru ve formátu DNG [35]. Automatická detekce softwaru sama vyhledá políčka cíle.

Software i1 Profiler

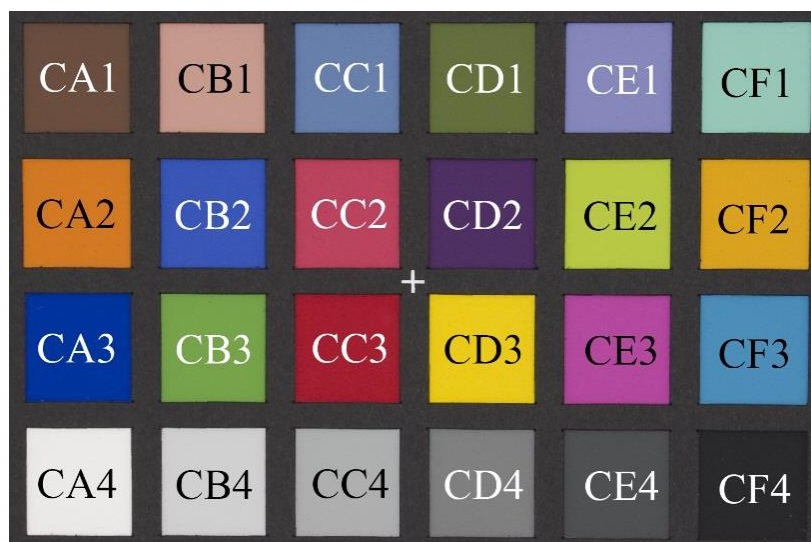
Software i1 Profiler slouží ke kalibraci monitorů, projektorů, skenerů a tiskáren [36]. Pro všechna tato zařízení umožňuje vytvářet ICC profily. Dále slouží k měření přímých barev nebo k verifikaci tiskových norem.

2.2 Vzorky

Jako vzorky byly pro měření využity tři typy obrazců. ColorChecker a dva vlastní vytvořené obrazce s názvem Profilační a Testovací. Velikost vytvořených obrazců byla zvolena s ohledem na měření pod daným zdrojem osvětlení a možnost sledování dynamických změn barevnosti, jak je uvedeno v [37].

ColorChecker

Jako referenční obrazec byl použit X-Rite ColorChecker Passport Photo, který má velikost 125×90 mm a obsahuje tři části: obrazec pro vyvážení bílé, klasický barevný obrazec a obrazec umožňující vylepšení obrazu [35]. Pomocí obrazce pro vyvážení bílé je možné v manuálním režimu fotoaparátu nastavit optimální vyvážení bílé. Klasický barevný obrazec obsahuje 24 barevných polí. Z toho 18 představuje barvy přírodních objektů (modré nebe, zelené listy atd.). Zbylých 6 polí představuje stupně šedi. Na *Obrázku 14* je znázorněn ColorChecker se zvoleným označením jednotlivých políček. V *Příloze II* (kap. 6, str. 74) jsou uvedeny hodnoty XYZ pro 2° pozorovatele a osvětlení D50, které byly čerpány z webových stránek výrobce softwaru pro měření a analýzu barev [38]. *Příloha III* (kap. 6, str. 75) uvádí hodnoty XYZ ze spektrofotometru UltraScan VIS pro 2° pozorovatele a osvětlení D50 naměřené v režimu se složkou přímého odrazu.



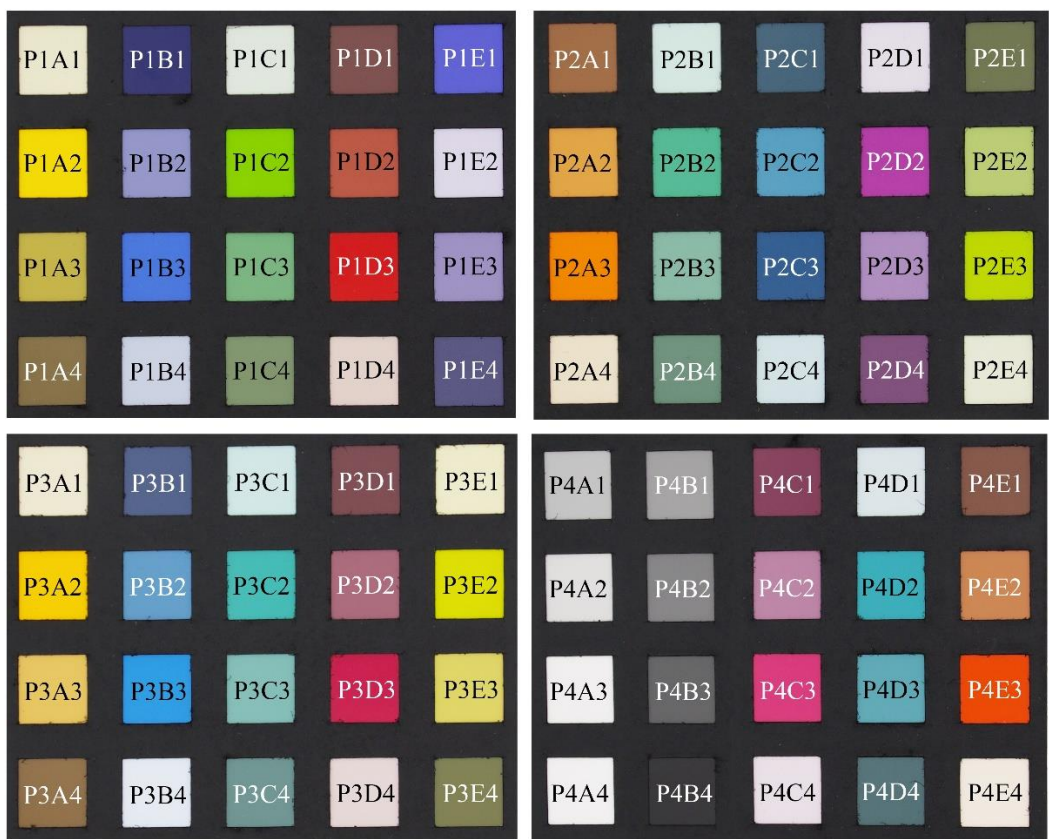
Obrázek 14: ColorChecker

Vlastní barevné obrazce

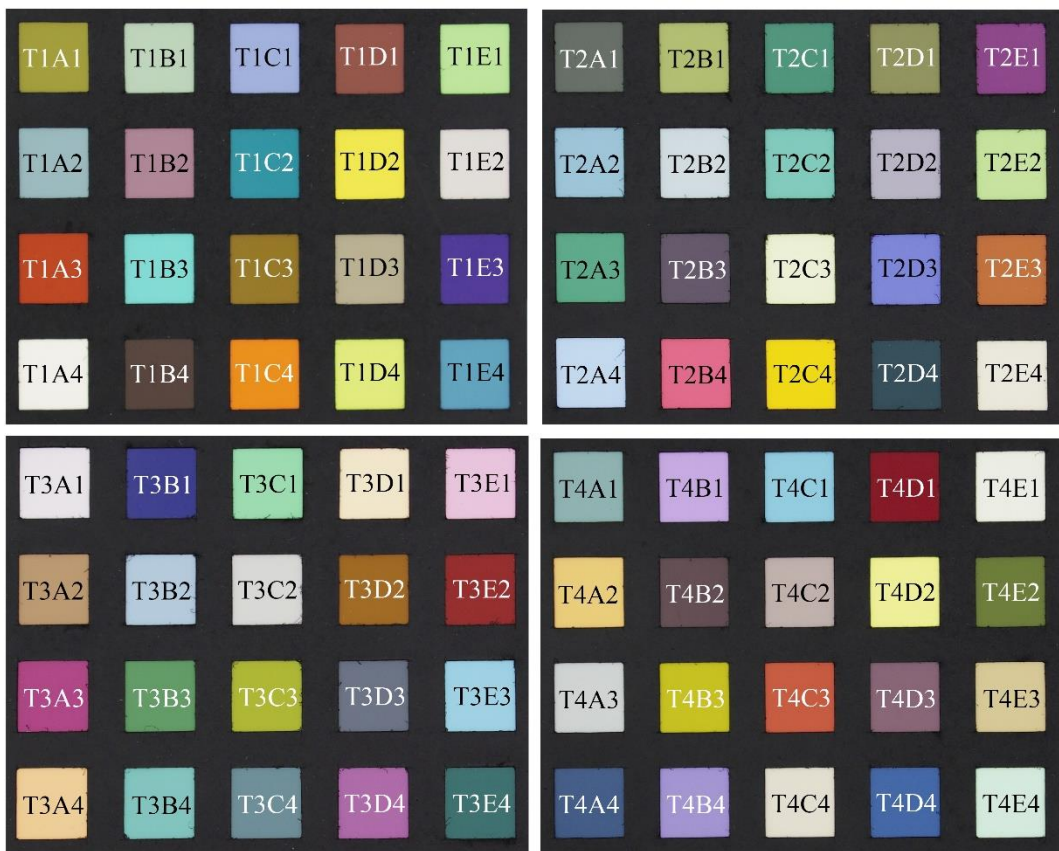
Pro přípravu dvou sad obrazců s označením Profilační a Testovací byl využit vzorník barev NCS Index 1950 od výrobce RAL zakoupený od prodejce NejlevnějšíBarvy.CZ s.r.o., který obsahuje 1 950 standartních NCS (*Natural Colour System*) barev, jež jsou rozděleny do pěti různých skupin: šedá, žlutá (G80Y–Y70R), červená (Y80R–R70B), modrá (R80B–B70G) a zelená (B80G–G70Y) [39]. Vzorník má 216 listů, přičemž na jednom je maximálně 10 barev. Na každém listu je také zobrazena přesná poloha každé barvy v barevném trojúhelníku NCS a barevném cyklu NCS.

Na základě literatury [22, 23] byl zvolen optimální počet barevných políček pro jednu sadu obrazců na 80. Pro profilační obrazce bylo vybráno 72 barev tak, aby bylo zastoupené celé barevné spektrum a bylo přidáno 8 políček ve stupních šedi. Tyto barvy byly rozděleny do čtyř obrazců po 20 polích. Rozdělení bylo provedeno s ohledem na předpokládanou uniformitu osvětlení a využití pro měření malých vzorků. Na *Obrázku 15* jsou zobrazeny profilační obrazce se zvoleným označením jednotlivých políček. Dále byly vytvořeny 4 Testovací obrazce, do kterých bylo náhodně vybráno 80 barev, tak aby byly napříč celým barevným spektrem a neshodovaly se s barvami vybranými pro profilování fotoaparátu. Postup vytvoření obrazců byl následovný.

Na černý papír o plošné hmotnosti 250 g/m^2 byla nalepena oboustranná lepicí páska a na řezacím plotru Mimaki CFL-605RT byl vyřezán podklad a vrchní mřížka s velikostí čtverců $12 \times 12 \text{ mm}$. Ze vzorníku byly vystřiženy čtverce zvolených barev o velikosti $18 \times 18 \text{ mm}$, jenž byly lepeny na podkladový papír těsně vedle sebe. Na barevná políčka byla nalepena vrchní mřížka, která byla ještě přestříkána matným černým sprejem. Celý obrazec byl nakonec oboustrannou lepicí páskou připevněn na lepenku o plošné hmotnosti 630 g/m^2 , aby nedocházelo k jeho kroucení. Na *Obrázku 16* jsou zobrazeny testovací obrazce se zvoleným označením jednotlivých políček. Hodnoty XYZ pro jednotlivá políčka naměřené na spektrofotometru UltraScan VIS pro 2° pozorovatele a osvětlení D50 jsou uvedeny v *Příloze V* a *Příloze VI* (kap. 6, str. 77 a 78).



Obrázek 15: Barevné obrazce pro sadu Profilační



Obrázek 16: Barevné obrazce pro sadu Testovací

2.3 Experimentální postup

2.3.1 Stabilita osvětlení

V prvním kroku byla stanovována stabilita kruhového osvětlení v závislosti na čase. Okolo osvětlení byl umístěn bílý kryt z polypropylenového InkJetového materiálu obráceného dovnitř zadní stranou bez nátěru (bez opticky zjasňujících prostředků) a do prostoru pod osvětlením byl do vzdálenosti 38 cm od zdroje umístěn obrazec ColorCheckeru pro vyvážení bílé barvy. Na něj byla nasměřována měřící čočka spektrometru Black Comet pod úhlem cca 45°, jak je znázorněno na *Obrázku 17*. Experiment byl řízen programem SpectraWiz. Časový interval záznamu byl 5 sekund a integrační čas 1 ms, přičemž jedno měření bylo průměrováno z 5 spekter. Celková doba měření za neměnných podmínek byla 2 hodiny, což poskytlo celkem 1 017 spekter. Dále byl testován vliv změny okolních světelných podmínek na stabilitu. Celkem bylo provedeno 8 měření. První a druhé probíhalo ve fotokomoře, třetí bylo ve fotokomoře s černým krytem, čtvrté a páté v laboratoři s okny, šesté v laboratoři s okny a okolo osvětlení byl černý kryt, sedmé probíhalo s černým krytem a měnily se okolní světelné podmínky (rozsvícení světel, vliv žaluzií, dveří) a osmé bylo bez černého krytu s měnícími se okolními světelnými podmínkami.



Obrázek 17: Měření stability osvětlení

Naměřené hodnoty získaného neupraveného signálu (nekalibrovaný zářivý tok v bezrozměrných jednotkách) byly exportovány do tabulkového editoru MS Excel a dále zpracovávány v programu Matlab. Nejprve byla vytvořena matice dat ze spekter získaných měření. Dále byly načteny hodnoty pro 2° pozorovatele v rozsahu 380–780 nm v 5 nm intervalech. Poté byly vypočteny trichromatické hodnoty XYZ. Posledním krokem byla normalizace trichromatických hodnot tak, aby trichromatická hodnota Y byla blízká hodnotě 100. Nakonec byly vytvořeny grafy závislosti trichromatické hodnoty Y na čase.

2.3.2 Stabilita fotoaparátu

Druhým krokem bylo testování stability fotoaparátu. Podle výsledků měření stability osvětlení uvedených v kapitole 3.1 byly určeny podmínky měření. Experiment probíhal s černým krytem okolo osvětlení, které bylo zapnuto 40 minut před začátek měření, aby se ustálila jeho intenzita. Jako vzorek byl použit obrazec ColorCheckeru pro vyvážení bílé a polypropylenový substrát. Na držák v osvětlení byl upevněn fotoaparát, který byl nastaven dle parametrů uvedených v *Tabulce 2*. Do jeho zdičky byla připevněna kabelová spoušť, kde byl nastaven počet vytvořených snímků 300 a interval mezi fotografováním 7 sekund. Nejdříve bylo provedeno vyvážení bílé fotoaparátu, poté se vytvořil snímek barevného obrazce ColorCheckeru, aby bylo možné vytvořit kalibrační profil fotoaparátu, a nakonec bylo spuštěno měření. Po 35 minutách byly snímky přesunuty do počítače, kde byly dále zpracovány.

Tabulka 2: Parametry nastavení fotoaparátu při měření rovnoměrnosti osvětlení

Režim	Manuální
Expoziční čas	1/250 s
Clona	6,3
Citlivost	200 ISO
Režim snímání	Jednotlivé snímky
Vyvážení bílé	Uživatelské (pomocí ColorCheckeru)
Ostření fotoaparátu	Se zdůrazněním středu
Formát souboru	DNG
Ostření objektivu	Manuální
Ohnisková vzdálenost	45 mm

Po dokončení fotografování bylo nutné vytvořit ICC profil fotoaparátu ze snímku barevného obrazce pomocí softwaru ColorChecker Passport. Barevný profil byl aplikován na všechny fotografie z konkrétního měření v modulu Camera Raw 7.0. Pro jedno měření byly vytvořeny tři typy souborů. Nastavení hodnot v Camera Raw 7.0 je uvedeno v *Tabulce 3*. Údaje, které nejsou v tabulce uvedeny, byly ponechány na přednastavené hodnotě. Pro polypropylenový substrát musela být hodnota expozice snížena, protože docházelo k přexponování snímků. Fotografie byly uloženy v prostoru Adobe RGB. V programu Adobe Photoshop byly fotografie dále zpracovávány. Byla vytvořena akce, která soubory ořízla na velikost měřeného políčka, aplikovala filtr Průměr, zmenšila fotografie na velikost 1 pixel, soubor uložila do požadované složky ve formátu TIFF a následně ho zavřela.

Tabulka 3: Nastavení modulu Camera Raw 7.0 pro stabilitu fotoaparátu

	Sada 1	Sada 2	Sada 3	
Vyvážení bílé	jako snímek	jako snímek	jako snímek	
Expozice	implicitní (0,00)	0,00	0,90 ^a	0,70 ^b
Černé	implicitní (5)	5	5	
Jas	implicitní (+50)	0	0	
Kontrast	implicitní (+25)	0	0	
Křivka reprodukce tónů	implicitní	bodové – lineární	bodové – lineární	
Detaily	implicitní	0	0	

a pro snímky ColorCheckeru

b pro snímky polypropylenového substrátu

Poté byly připravené snímky zpracovány v programu Matlab. Byla vytvořena matice hodnot RGB pro všechny snímky z jednoho měření a matice pro čas měření. Z těchto matic byl vytvořen graf závislosti vývoje hodnot RGB v procentech na čase.

2.3.3 Kalibrace fotoaparátu

Pro potřeby polynomického modelu je potřeba provést linearizaci vstupních dat RGB. Proto byly testovány metody převodu RAW souboru na TIFF v modulu Camera Raw 7.0 tak, aby bylo možné nalézt koeficienty Rovnice 7

$$C_i = a R^{b(i)} \quad (7)$$

kde C_i je hodnota X, Y, nebo Z a R_i je hodnota R, G, resp. B. Pro kalibraci fotoaparátu byl využit snímek barevného obrazce ColorCheckeru z měření stability fotoaparátu. V tomto experimentu se zkoumal vliv nastavení jednotlivých parametrů v modulu Camera RAW 7.0, který je součástí softwaru Adobe Photoshop.

Snímek barevného obrazce ColorCheckeru byl nejdříve otevřen v modulu Camera Raw 7.0, kde byly upraveny hodnoty podle Tabulky 4. Fotografie byly uloženy ve formátu TIFF a dále zpracovány v programu Matlab. Byl vytvořen skript, ve kterém byly načteny hodnoty $L^*a^*b^*$ ColorCheckeru uvedené v Příloze III (kap. 6, str. 75). Pomocí funkce *lab2xyz* (pro zdroj D50) byly převedeny na hodnoty XYZ (Příloha IV, kap. 6, str. 76), ze kterých byly vybrány hodnoty políček CA4, CB4, CC4, CD4, CE4 a CF4 a byly vepsány do nové matice.

Dále byl načten obrázek ve formátu TIFF, na kterém byla vybrána políčka pro neutrální barvy obrazce. Hodnoty RGB z vybraných oblastí byly zprůměrovány, normalizovány k 1 a vloženy do matice. Byla definována funkce *Power 1* s nastavením metody nelineárních nejmenších čtverců a počáteční hodnoty koeficientu byly nastaveny na souřadnice (1, 1). Poté

byly zjištěny koeficienty a a b a hodnota spolehlivosti R^2 pro jednotlivé barevné kanály podle Rovnice 7. Posledním krokem bylo vytvoření grafu závislosti hodnot XYZ na hodnotách RGB. Tímto způsobem byly zpracovány všechny vytvořené soubory.

Tabulka 4: Nastavení modulu Camera Raw 7.0 pro kalibraci fotoaparátu

	Expozice	Černé	Jas	Kontrast	Křivka reprodukce tónů	Detaily	DNG profil	Proces
K1	0,00	0	+5	+25	lineární	implicitní	vytvořený	2003
K2	0,00	5	+5	+25	lineární	0	vytvořený	2003
K3	1,00	5	0	0	lineární	implicitní	vytvořený	2003
K4	0,90	5	0	0	lineární	implicitní	vytvořený	2003
K5	0,80	5	0	0	lineární	implicitní	vytvořený	2003
K6	0,70	5	0	0	lineární	implicitní	vytvořený	2003
K7	0,60	5	0	0	lineární	implicitní	vytvořený	2003
K8	0,50	5	0	0	lineární	implicitní	vytvořený	2003
K9	0,00	0	0	0	lineární	implicitní	vytvořený	2003
K10	0,00	0	0	+25	lineární	implicitní	vytvořený	2003
K11	0,00	5	0	+25	lineární	implicitní	vytvořený	2003
K12	0,00	5	+5	0	lineární	implicitní	vytvořený	2003
K13	0,00	5	+5	+25	lineární	implicitní	ACR 4.4	2003
K14	0,00	5	+5	+25	střední kontrast	implicitní	ACR 4.4	2003
K15	0,00	5	+5	+25	střední kontrast	implicitní	Adobe	2003
K16	0,00	5	+5	+25	střední kontrast	implicitní	vytvořený	2003
K17	0,00	5	+5	+25	střední kontrast	implicitní	ACR 4.4	2010
K18	0,00	5	+5	+25	střední kontrast	implicitní	Adobe	2010
K19	0,00	5	+5	+25	střední kontrast	implicitní	vytvořený	2010
K20	0,00	0	0	0	lineární	implicitní	ACR 4.4	2012
K21	0,00	0	0	0	lineární	implicitní	Adobe	2012
K22	0,00	0	0	0	lineární	implicitní	vytvořený	2012
K23	0,00	0	0	0	implicitní	0	vytvořený	2003

2.3.4 Testování polynomických modelů

ColorChecker, Profilační obrazce a Testovací obrazce byly nejdříve proměřeny na spektrofotometru UltraScan VIS. Bylo nastaveno měření s přímým odrazem, apertura s velikostí 9,5 mm a spektrální rozsah 360–780 nm. Software EasyMatch QC zaznamenával hodnoty XYZ (pro osvětlení D50 a 2° pozorovatele), které byly uloženy jako textový soubor

a ten byl importován do programu MS Excel. Po naměření byl vytvořen snímek ColorCheckeru a dále snímky jednotlivých barevných obrazců. Jako další byl vytvořen opět snímek ColorCheckeru, poté snímek, na kterém byly všechny Profilační obrazce a snímek na kterém byly všechny Testovací obrazce.

Tvorba polynomického modelu byla provedena zvlášť pro trénovací sadu nastavenou jen na obrazec ColorCheckeru, a zvlášť pro trénovací sadu nastavenou na Profilační obrazec. Trénovací sadou je myšlena sada XYZ a RGB hodnot, ze kterých se stanovovali koeficienty polynomického modelu podle *Rovnice 6* (kap. 1.5.2, str. 26).

Všechny snímky obrazců (ColorChecker, Profilační, Testovací) byly otevřeny v modulu Camera Raw 7.0. Hodnoty byly nastaveny podle *Tabulky 4* (str. 36) úprava K4. Kalibrační profil fotoaparátu byl vytvořen v programu ColorChecker Passport a vyvážení bílé bylo nastaveno podle fotoaparátu (viz *kapitola 3.3*). Výsledné snímky byly uloženy ve formátu TIFF. Poté byly načteny do programu Matlab, kde byly pro každé políčko zprůměrovány hodnoty RGB a načteny pro všechny obrazce příslušné XYZ hodnoty.

Zpracování v programu Matlab lze rozdělit do dvou dílčích kroků: linearizace a aplikace polynomického modelu. Nejprve byla data linearizována podle hodnot neutrálních barev vybrané trénovací sady (obrazec ColorCheckeru nebo Profilační obrazec). Poté byly definovány koeficienty *Rovnice 7* pomocí funkce *Power 1* se stejným nastavením, jak je popsáno v předchozí kapitole. Byly získány koeficienty a a b pro jednotlivé RGB kanály a byla provedena linearizace RGB hodnot všech načtených políček.

Druhým krokem zpracování byla aplikace polynomického modelu. Na základě literatury [22] bylo testováno pět polynomických modelů uvedených v *Tabulce 5*, které se řídí dle obecné *Rovnice 5* (kap. 1.5.2, str. 26).

Tabulka 5: Definice použitých polynomických modelů

D1 ^a	[R G B]
D2 ^a	[R G B 1]
D3 ^a	[R G B RGB 1]
D4 ^b	[R G B RG RB GB R ² G ² B ² 1]
D5 ^c	[R G B RG RB GB R ² G ² B ² RGB R ² G G ² B B ² R R ² B G ² R B ² G R ³ G ³ B ³ 1]

a prvního řádu

b druhého řádu

c třetího řádu

Nalezení matice koeficientů polynomickeho modelu **A** bylo provedeno dle *Rovnice 6* (kap. 1.5.2, str. 26) s využitím funkce *pinv*. Tyto koeficienty byly nalezeny zvlášť pro trénovací sadu nastavenou jen na obrazec ColorCheckeru, a zvlášť pro trénovací sadu nastavenou na obrazec Profilační. Každý model byl pak následně aplikován na všechna nasnímaná políčka (*Rovnice 5*, kap. 1.5.2, str. 26) a vypočtené kolorimetrické parametry byly porovnány se skutečně naměřenými parametry v prostoru CIELAB pomocí barvové odchylky ΔE_{00} a pomocí odchylky v jednotlivých atributech (ΔL , ΔC , ΔH) s využitím funkce *cie00de* jak je definováno v [28] s nastavením váhových funkcí S_L , S_C , S_H na hodnotu 1. Vzorce pro výpočty jednotlivých hodnot jsou uvedeny v *Příloze VII* na straně 79.

Barvové odchylky byly seřazeny od nejmenší po největší a byl vytvořen graf pro jednotlivé obrazce. Celý tento proces byl vždy korigován podle hodnot ColorCheckeru a podle hodnot Profilačního obrazce.

2.3.5 Aplikace správy barev

Snímky charakterizované polynomickeým modelem byly porovnány s charakterizací podle správy barev. Úprava snímků v modulu Camera Raw 7.0 probíhala stejně jako v předchozí kapitole (*Tabulka 4*, metoda K4), a navíc byly vytvořeny snímky s implicitním nastavením. Po uložení do formátu TIFF byla fotografie ColorCheckeru otevřena v programu il Profiler. Zde byl podle snímku vytvořen barvový ICC profil, jenž byl fotografii přiřazen v programu Adobe Photoshop. Dále byl obraz převeden do prostoru $L^*a^*b^*$ pomocí absolutní kolorimetrické metody a byl uložen ve formátu TIFF. Ostatní snímky byly zpracovány stejným způsobem s tím rozdílem, že se již nevytvářel jiný barvový profil, ale přiřazoval se již vytvořený podle ColorCheckeru, protože program il Profiler nemá možnost vytvořit profil z vlastních hodnot, ale pouze z přednastavených.

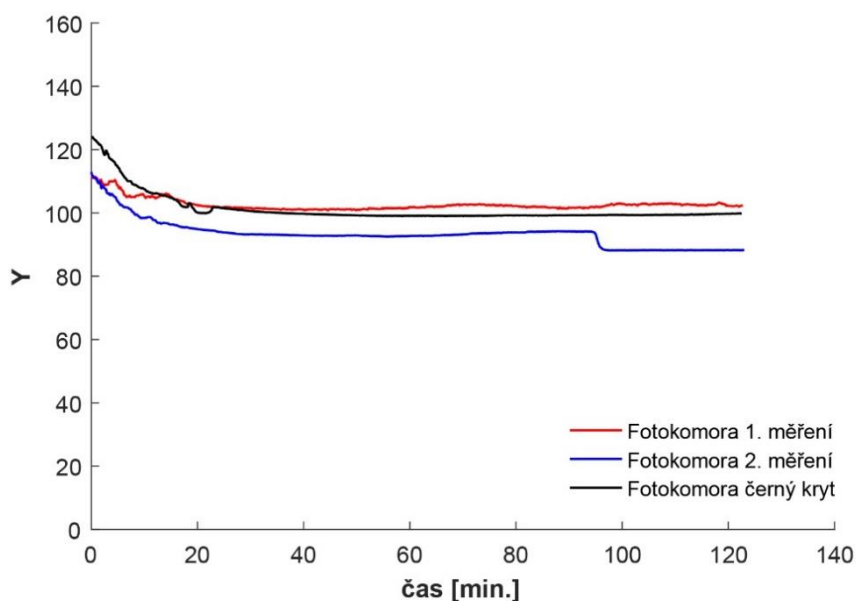
V programu Matlab byl vytvořen skript, ve kterém byly načteny obrázky ve formátu TIFF, na kterých byla vybrána políčka obrazců. Hodnoty $L^*a^*b^*$ z vybraných oblastí byly zprůměrovány a přepočítány. Dále byly načteny všechny naměřené hodnoty XYZ (*Příloha III*, *Příloha V* a *Příloha VI*, kap. 6) pro všechny obrazce a pomocí funkce *xyz2lab* byly přepočítány na hodnoty $L^*a^*b^*$. Vypočtené kolorimetrické parametry byly porovnány se skutečně naměřenými pomocí barvové odchylky ΔE_{00} a pomocí odchylky v jednotlivých atributech (ΔL , ΔC , ΔH) s využitím funkce *cie00de* se stejným nastavením jako v předešlé kapitole.

3. VÝSLEDKY A DISKUZE

Cílem experimentu bylo zjistit který polynom je nejlepší pro charakterizaci fotoaparátu. Dalším z cílů bylo porovnání hodnot polynomického modelu s hodnotami, kdy byla aplikována správa barev. Získané výsledky v jednotlivých krocích byly použity pro navazující zpracování.

3.1 Vyhodnocení stability osvětlení

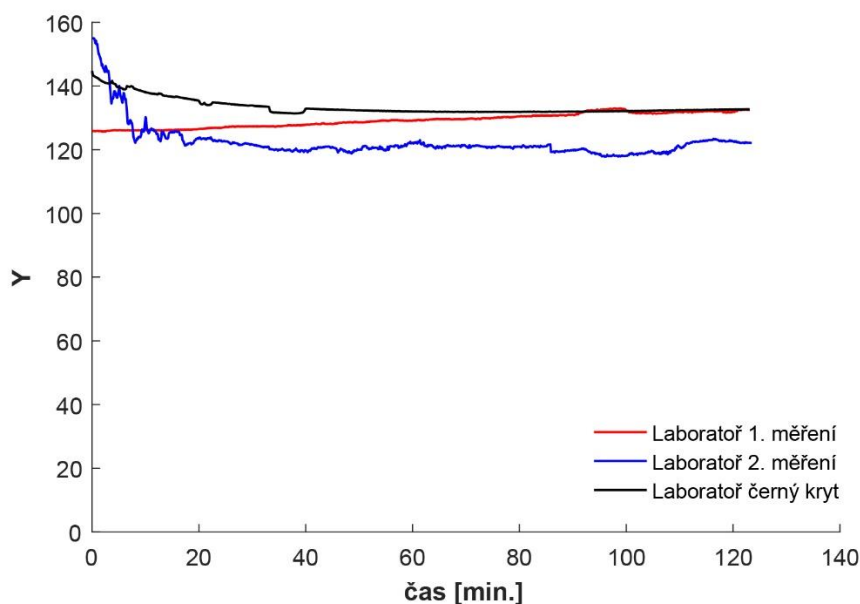
Na *Obrázku 18* je znázorněna závislost trichromatické hodnoty Y na čase pro měření stability osvětlení ve fotokomoře, jak je popsáno v kapitole 2.3.1 na straně 33. První měření bylo s bílým krytem a probíhalo tak, že osvětlení bylo zapnuto předem a podmínky se během měření neměnily. Druhé měření bylo také s bílým krytem a osvětlení bylo zapnuto společně s měřením, což je v grafu znázorněno poklesem v prvních 30 minutách. Poté byly hodnoty stabilní až do 95 minuty, kdy došlo ke snížení intenzity světla, což bylo způsobeno nejpravděpodobněji poklesem v elektrické síti laboratoře. Tento pokles mohl být spojen např. se zapnutím jiného přístroje napojeného na stejnou elektrickou síť. Poslední měření probíhalo s černým krytem okolo osvětlení, které bylo opět zapnuto při začátku měření.



Obrázek 18: Závislost trichromatické hodnoty Y na čase pro fotokomoru

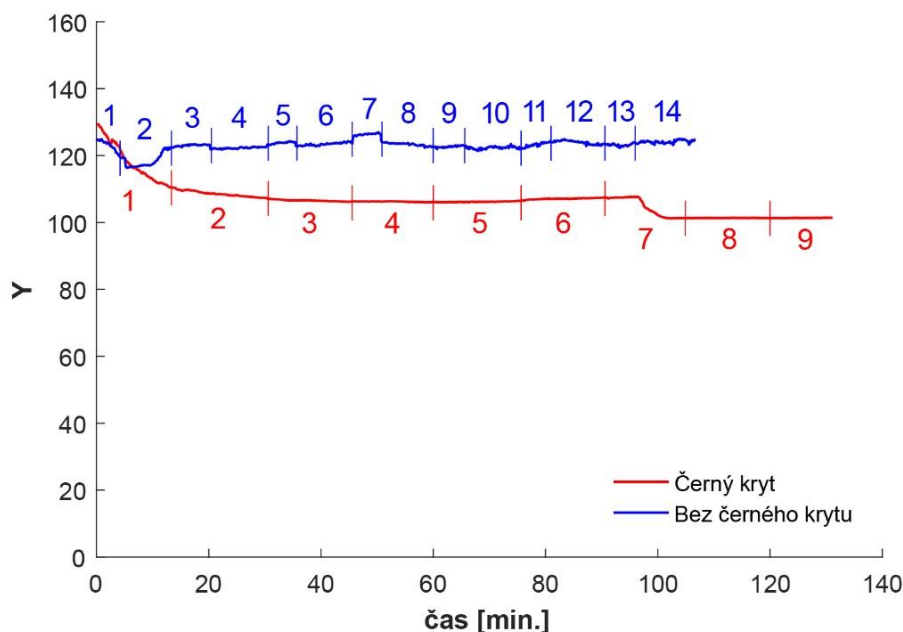
Na *Obrázku 19* jsou znázorněna tři měření v laboratoři, ve které se nacházejí okna. První měření proběhlo s bílým krytem a osvětlení bylo zapnuto ještě před začátkem. Druhé měření bylo také s bílým krytem, ale osvětlení bylo zapnuto ve stejnou chvíli jako samotné měření, a proto je také vidět ustálení po přibližně 30 minutách. Třetí měření bylo s černým krytem

a osvětlení bylo zapnuto při začátku. Šum může být způsoben tím, že v den experimentu probíhala výuka laboratoří nebo tím, že v místnosti, kde probíhalo měření spínala lednička.



Obrázek 19: Závislost trichromatické hodnoty Y na čase pro laboratoř

Poslední experimentální sada dat byla provedena při změně okolních podmínek a se zapnutím osvětlení při startu (*Obr. 20*). První měření bylo s černým krytem a probíhalo v intervalech po 15 minutách v laboratoři s vypnutými zářivkami, zataženými žaluziemi a zavřenými dveřmi. V částech číslo 1, 3, 5, 7 a 9 bylo zapnuto pouze kruhové osvětlení. Část 2, 4 a 6 zaznamenávala vliv zářivek na stropu laboratoře. Nejprve byla zapnuta zářivka blíže k měřicí sestavě, poté dále od měřicí sestavy, a nakonec byly zapnuty obě zářivky současně. Část číslo 8 zaznamenávala vliv žaluzií. Skoková změna intenzity v části 7 je opět pravděpodobně způsobena poklesem energie v elektrické síti laboratoře. Druhé měření probíhalo za stejných podmínek s tím rozdílem že, dveře do laboratoře byly otevřené, osvětlení mělo pouze bílý kryt a v den měření probíhala výuka laboratoří, a proto byl zvýšený pohyb osob. Interval byl střídavě 5 a 10 minut, kdy 10 minut byly původní podmínky (část 2, 4, 6, 8, 10, 12 a 14). V části 1 byl na osvětlení nasazen černý kryt. Doba měření nebyla přesně 5 minut z důvodu zhoršené manipulace s krytem při sundávání. Část 3, 5 a 7 zaznamenávala vliv zářivek. Rozsvícení pobíhalo ve stejném pořadí jako při předchozím měření. Číslo 9 je záznam vlivu žaluzií, číslo 11 vliv pohybu po laboratoři a číslo 13 vliv zavřených dveří. Z měření vyplývá, že největší změnu vykazuje zapnutí zářivek, naopak žaluzie, pohyb ani dveře nemají velký vliv na osvětlení.

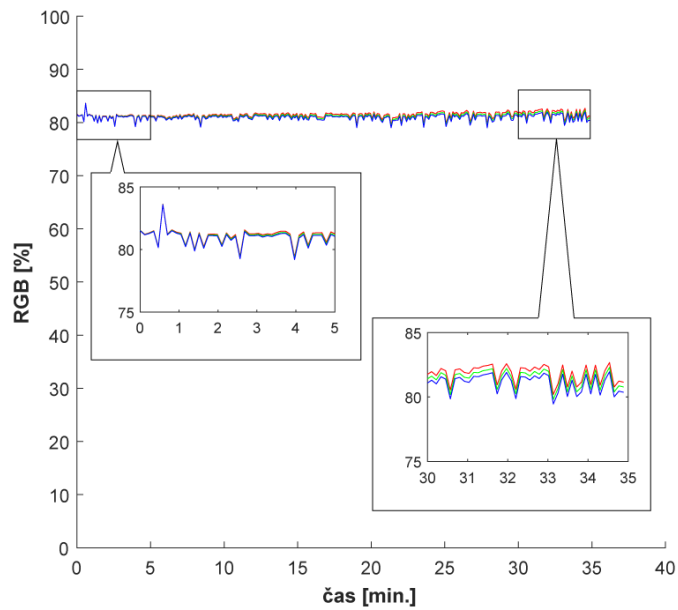


Obrázek 20: Závislost trichromatické hodnoty Y na čase pro změnu podmínek

Z grafů (Obr. 18, 19 a 20) byl určen čas ustálení osvětlení na 40 minut, po této době je osvětlení stabilní. Dále bylo zjištěno, že měřící sestava musí být obalena černým krytem a že nezáleží na umístění sestavy.

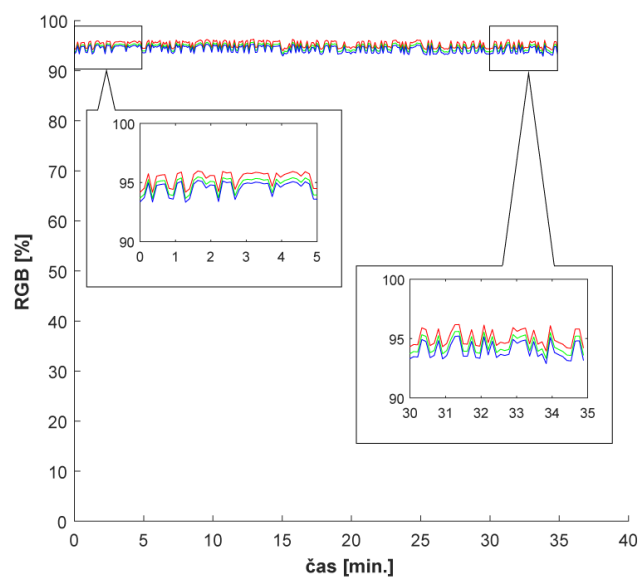
3.2 Vyhodnocení stability fotoaparátu

Experimentálně bylo zkoumáno, zda fotoaparát v průběhu měření poskytuje stabilní výsledky. Na Obrázku 21 je znázorněna závislost hodnot RGB na čase měření pro snímky bílého obrazce ColorCheckeru při nastavení modulu Camera Raw podle Sady 1 (Tabulka 3, kap. 2.3.2, str. 35). Je patrné, že zpočátku jsou hodnoty stabilní, ale po třetí minutě měření dochází k rozchodu jednotlivých kanálů R, G a B. Rozchod hodnot na konci měření byl zhruba 11krát větší než na počátku měření. Při nastavení snímků podle Sady 2 a 3, byl rozchod hodnot na počátku měření zhruba 9krát větší než na konci.



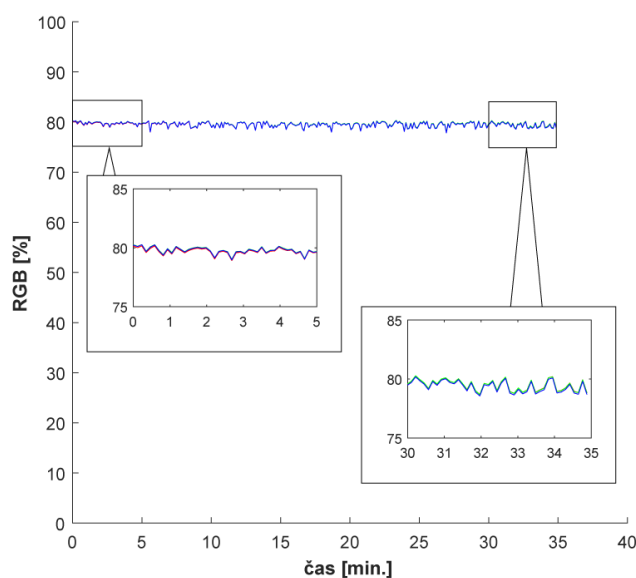
Obrázek 21: Závislost hodnot RGB na čase pro data z obrazce ColorCheckeru pro vyvážení bílé Sada 1

Snímky polypropylenového substrátu byly vyhodnoceny stejným způsobem. Aby zůstaly zachovány stejné podmínky pro měření, fotoaparát se nevypínal a nebylo přenastaveno vyvážení bílé, ale zůstalo nastavené podle snímku ColorCheckeru. Na *Obrázku 22* je znázorněna závislost hodnot RGB na čase měření pro snímky polypropylenového substrátu při nastavení modulu Camera Raw podle Sady 1 (*Tabulka 3*, kap. 2.3.2, str. 35). Hodnoty jednotlivých kanálů R, G a B se rozcházejí již od začátku měření, což je způsobeno nezměněnou hodnotou vyvážení bílé. Rozchod hodnot na konci měření byl zhruba 1,3krát větší než na počátku měření. Při nastavení snímků podle Sady 2 a 3, byl rozchod hodnot stejně velký.



Obrázek 22: Závislost hodnot RGB na čase pro data papír Sada 1

Z naměřených dat bylo zjištěno, že při delším zapnutí fotoaparátu jsou hodnoty stabilnější. Z tohoto důvodu bylo provedeno měření za stejných podmínek s rozdílem, že byl fotoaparát zapnut 40 minut před měřením, stejně jako osvětlení. Graf na *Obrázku 23* zobrazuje data naměřená po ustálení fotoaparátu. Rozchod hodnot jednotlivých kanálů je průměrně 0,08 %. Z toho vyplývá, že je nutné zapnout fotoaparát v dostatečném předstihu, stejně jako osvětlení. Pokud by tato podmínka nebyla dodržena, může být do měření zanesena chyba tím, že fotoaparát neposkytuje opakovatelné informace. Na základě tohoto zjištění, byl postup s předem zapnutým fotoaparátem vybrán jako optimální a použit pro další měření.



Obrázek 23: Závislost hodnot RGB na čase pro data z obrazce ColorCheckeru pro vyvážení bílé po ustálení fotoaparátu

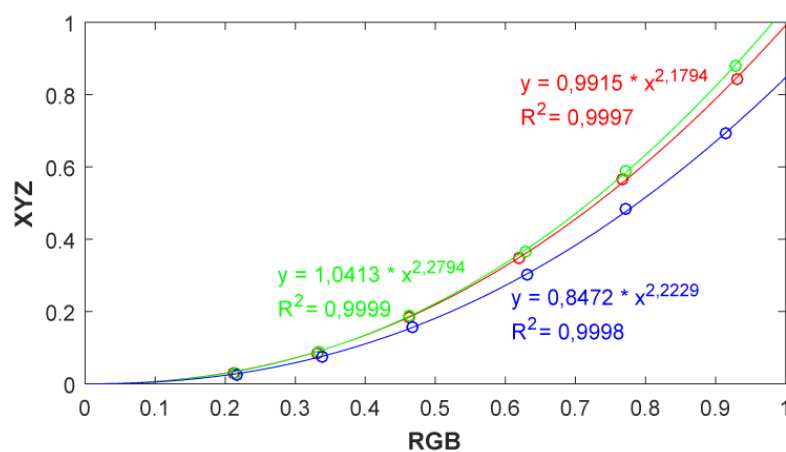
3.3 Vyhodnocení kalibrace fotoaparátu

Kalibrace fotoaparátu probíhala podle postupu uvedeného v kapitole 2.3.3. Pro všechny typy nastavení (*Tabulka 4*, kap. 2.3.3, str. 36) byly zjištěny hodnoty koeficientů a a b a hodnota spolehlivosti R^2 (*Tabulka 6*). Pro ukázkové grafy bylo vybráno nastavení K4, K9, K13 a K21. Na *Obrázku 24* je znázorněna závislost trichromatických hodnot XYZ na hodnotách RGB pro nastavení K4. Toto nastavení parametrů poskytuje dobrou regresi pomocí exponenciální funkce, což potvrzuje hodnota spolehlivosti R^2 . Čím lépe funkce reprezentuje vztah, tím se předpokládá i přesnější linearizace získaných dat. Na *Obrázku 25* je graf pro nastavení K9, na kterém je vidět stejná hodnota spolehlivosti, ale průběh grafu není optimální, protože funkce by se měla blížit k bodu (1, 1). Z hodnot spolehlivosti R^2 v *Tabulce 6* pro měření K3–K9 vyplývá, že všechna tato nastavení poskytují srovnatelné výsledky, ale při nastavení K3 dochází

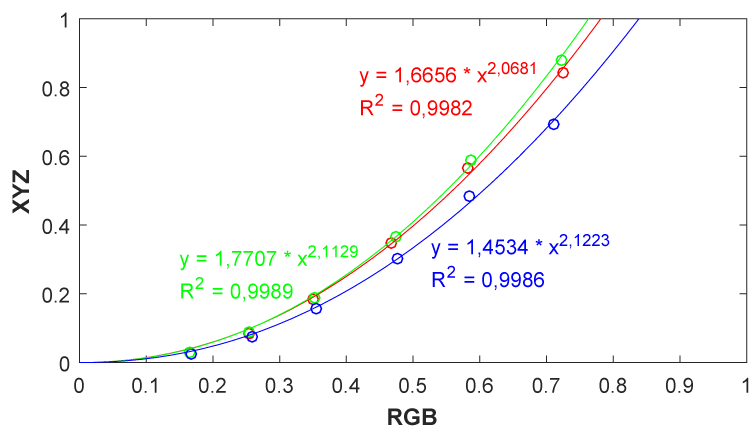
k přeexponování snímků a nastavení K5–K9 poskytuje špatný průběh jednotlivých funkcí ve světlých tónech, protože se neblíží k bodu (1, 1).

Tabulka 6: Hodnoty koeficientů a , b a hodnota spolehlivosti R^2 pro jednotlivá nastavení

	R			G			B		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
K1	1,0743	2,5945	0,9921	1,1377	2,6582	0,9904	0,9126	2,6115	0,9912
K2	1,0669	2,5344	0,9911	1,1297	2,5984	0,9893	0,9058	2,5496	0,9902
K3	0,9255	2,1785	0,9997	0,9707	2,2268	0,9999	0,7899	2,2227	0,9998
K5	1,0628	2,1802	0,9997	1,1181	2,2287	0,9999	0,9105	2,2260	0,9998
K6	1,1390	2,1813	0,9997	1,2001	2,2297	0,9999	0,9766	2,2968	0,9998
K7	1,2171	2,1777	0,9997	1,2844	2,2263	0,9999	1,0455	2,2235	0,9998
K8	1,3029	2,1767	0,9997	1,3771	2,2255	0,9999	1,1216	2,2237	0,9998
K10	1,4626	1,8692	0,9993	1,5494	1,9102	0,9997	1,2636	1,9107	0,9995
K11	1,4508	1,8341	0,9996	1,5371	1,8749	0,9999	1,8098	1,8743	0,9998
K12	1,1343	2,5521	0,9965	1,2037	2,6141	0,9952	0,9700	2,5849	0,9957
K14	1,0644	2,5062	0,9912	1,1231	2,5833	0,9891	0,8995	2,5230	0,9903
K15	1,0652	2,5252	0,9908	1,1264	2,5922	0,9888	0,9029	2,5265	0,9900
K16	1,0597	2,5086	0,9912	1,1165	2,5747	0,9892	0,8953	2,5192	0,9904
K17	1,0637	2,5063	0,9912	1,1223	2,5824	0,9891	0,8989	2,5223	0,9903
K18	1,0648	2,5253	0,9908	1,1259	2,5916	0,9888	0,9026	2,5266	0,9900
K19	1,0607	2,5102	0,9911	1,1179	2,5751	0,9892	0,8968	2,5216	0,9904
K20	1,1086	2,5602	0,9881	1,1707	2,6394	0,9856	0,9277	2,5530	0,9877
K22	1,1048	2,5648	0,9880	1,1654	2,6332	0,9857	0,9241	2,5499	0,9878
K23	1,6861	2,0912	0,9983	1,8164	2,1439	0,9990	1,4984	2,1609	0,9989

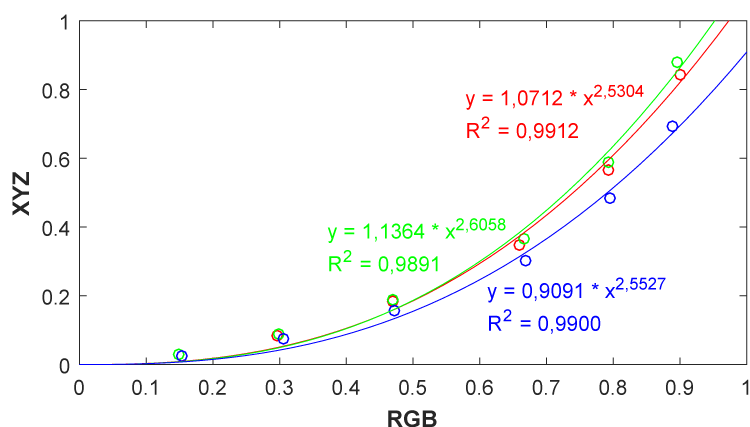


Obrázek 24: Závislost RGB na trichromatických hodnotách XYZ pro nastavení K4

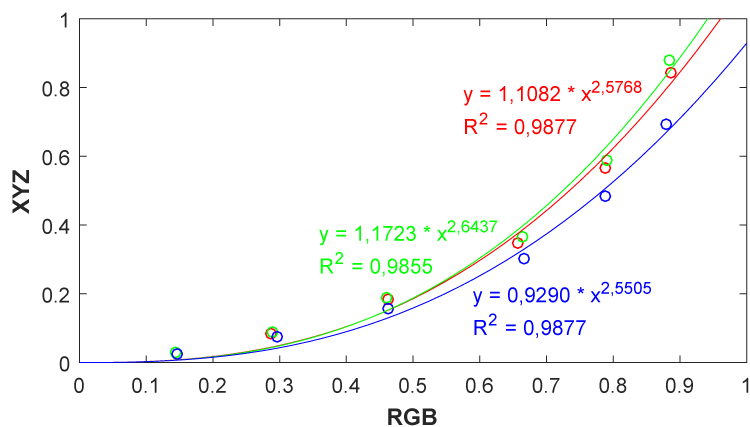


Obrázek 25: Závislost RGB na trichromatických hodnotách XYZ pro nastavení K9

Na *Obrázku 26* je zobrazena závislost hodnot RGB na trichromatických hodnotách XYZ pro nastavení K13, tedy s přednastavenými hodnotami. Hodnota spolehlivosti R^2 nedosahuje tak vysokých hodnot, jako v předešlých případech. *Obrázek 27* znázorňuje graf pro nastavení K21. U tohoto nastavení bylo dosaženo nejnižší hodnoty spolehlivosti R^2 .

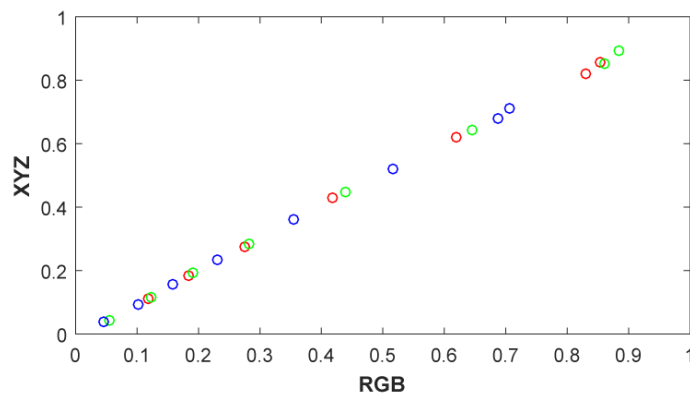


Obrázek 26: Závislost RGB na trichromatických hodnotách XYZ pro nastavení K13

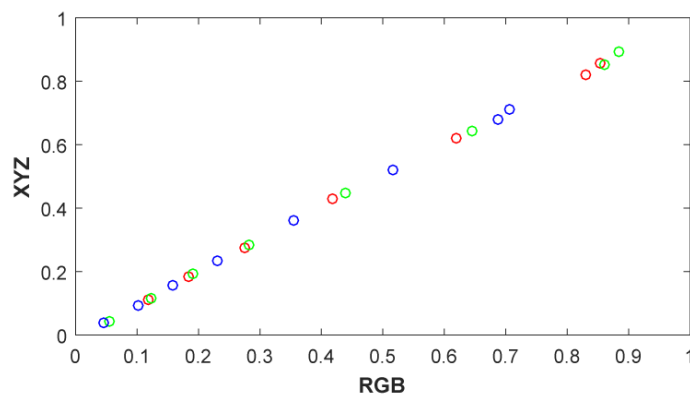


Obrázek 27: Závislost RGB na trichromatických hodnotách XYZ pro nastavení K21

Z hodnot uvedených v *Tabulce 6* vyplývá, že nejhorší výsledky poskytuje nastavení s kalibračním profilem fotoaparátu Adobe (K15, K18 a K21). Kalibrační profil fotoaparátu ACR 4.4 byl vytvořen vývojáři programu Adobe Photoshop. Po otevření snímku v tomto programu se načtou data o fotoaparátu, na kterém byl snímek vytvořen a automaticky se přiřadí tento profil. Toto nastavení by mělo poskytovat stejné výsledky jako nastavení s vytvořeným kalibračním profilem, což bylo potvrzeno, protože rozdíly jsou minimální. Proces 2003, 2010 a 2012 určuje, jaké hodnoty se přednastaví při otevření fotografií. Z výsledků je patrné, že proces 2012, který je nejnovější poskytuje horší výsledky než starší procesy. Jak již bylo uvedeno, nejlepší výsledky poskytuje nastavení K3–K9. Nastavení K4 bylo zvoleno jako nejlepší pro další experimenty, protože poskytuje optimální průběh jednotlivých funkcí a má vysokou hodnotu spolehlivosti R^2 . Převodem z formátu RAW do TIFF s nastavením K4, byla zjištěna závislost trichromatických hodnot XYZ na hodnotách RGB pro neutrální políčka. Z grafů těchto hodnot byly získány koeficienty *Rovnice 7* (str. 35) sloužící k následné linearizaci. Na *Obrázku 28* je zobrazen graf závislosti linearizovaných hodnot neutrálních políček Profilačního obrazce. V dalším kroku byla linearizována zbylá políčka, jak je zobrazeno na *Obrázku 29*.



Obrázek 28: Graf závislosti linearizovaných hodnot RGB na XYZ pro neutrální políčka Profilačního obrazce



Obrázek 29: Graf závislosti linearizovaných hodnot XYZ na RGB pro všechna políčka Profilačního obrazce

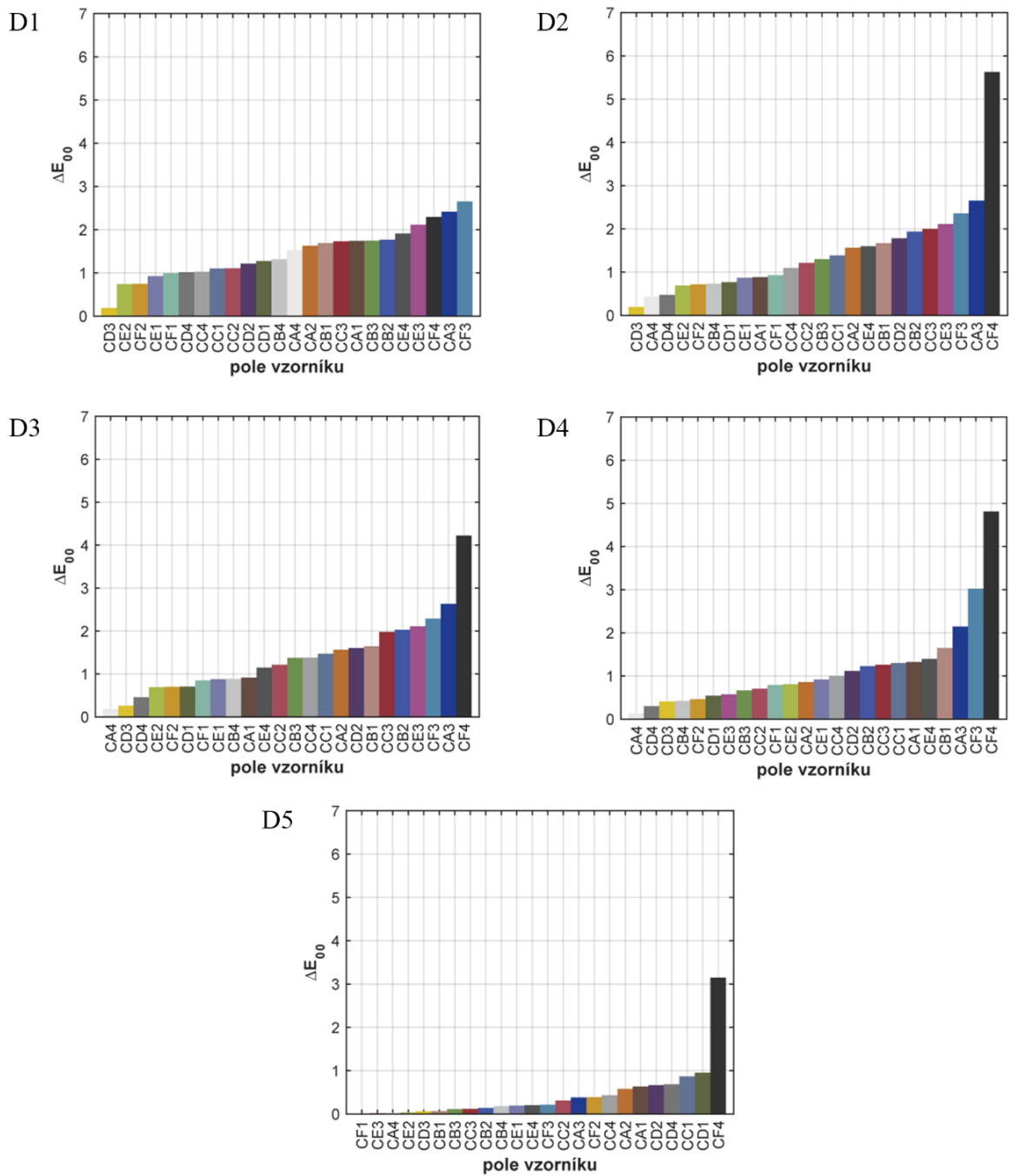
3.4 Polynomické modely s trénovací sadou nastavenou na ColorChecker

Na *Obrázku 30* jsou znázorněny grafy barvových odchylek ΔE_{00} ColorCheckeru pro různé polynomické modely. Z grafů je patrné, že modely D1–D4 mají nejvyšší barvovou odchylku na stejných políčkách konkrétně na tmavě modrých a černých. U modelů D1–D3 mají políčka s vyšší barvovou odchylkou stejnou posloupnost, ale u zbylých modelů se liší. Model D5 má největší barvovou odchylku v černé barvě a na políčkách CC1 (světle modrá) a CD1 (tmavě zelená), která v předchozích modelech mají hodnotu barvové odchylky přibližně ve středu všech hodnot. V *Tabulce 7* jsou uvedeny hodnoty minimální, maximální, střední a průměrné pro barvové odchylky ΔE_{00} všech obrazců.

Tabulka 7: Hodnoty ΔE_{00} všech obrazců s trénovací sadou nastavenou na ColorChecker

ΔE_{00}		D1	D2	D3	D4	D5
Průměr	ColorChecker	1,45	1,46	1,38	1,16	0,43
	Profilační	2,54	2,46	2,46	2,53	5,88
	Testovací	2,25	2,21	2,23	2,29	5,46
Medián	ColorChecker	1,42	1,26	1,29	0,89	0,21
	Profilační	2,34	2,17	2,11	2,37	3,61
	Testovací	1,97	1,88	1,92	2,10	3,84
Minimum	ColorChecker	0,19	0,19	0,18	0,13	0,00
	Profilační	0,80	0,48	0,56	0,35	0,69
	Testovací	0,66	0,57	0,71	0,36	0,64
Maximum	ColorChecker	2,65	5,62	4,22	4,81	3,15
	Profilační	6,66	6,74	6,74	6,78	37,87
	Testovací	6,86	6,04	5,69	5,79	37,98

Při porovnání hodnot ΔC ColorCheckeru pro všechny polynomické modely dosahuje nejnižších hodnot model D5 a nejvyšších model D2. Největší odchylka je v modrých tónech a odstínech šedé. Stejně tomu je i při porovnání hodnot ΔH , kde jsou navíc zelená políčka a políčko CB1 (pleťová barva). Nejmenší hodnoty má opět model D5 a největší model D4. Pro modely D2–D5 dosahují odchylky ΔL přibližně stejných hodnot pro všechna políčka. Nejnižší hodnoty jsou u odstínů šedé. U modelu D5 jsou všechny odchylky pod hodnotou 1. V *Tabulkách 8–10* jsou uvedeny střední, minimální, maximální hodnoty a průměr pro odchylky ΔL , ΔC a ΔH všech obrazců.



Obrázek 30: Grafy barvových odchylek ΔE_{00} ColorCheckeru pro různé polynomicke modely, trénovací sada nastavena na ColorChecker

Tabulka 8: Hodnoty ΔL všech obrazců s trénovací sadou nastavenou na ColorChecker

ΔL		D1	D2	D3	D4	D5
Průměr	ColorChecker	0,79	0,74	0,72	0,58	0,15
	Profilační	1,84	1,92	1,93	1,95	2,88
	Testovací	1,32	1,42	1,43	1,47	3,28
Medián	ColorChecker	0,78	0,73	0,72	0,46	0,07
	Profilační	1,56	1,77	1,78	1,87	2,38
	Testovací	0,94	1,04	1,07	1,09	2,28
Minimum	ColorChecker	0,34	0,50	0,65	0,46	0,04
	Profilační	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00
	Testovací	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Maximum	ColorChecker	1,91	1,80	1,73	2,21	0,58
	Profilační	6,43	6,50	6,50	6,15	11,17
	Testovací	4,86	5,37	5,24	5,13	29,15

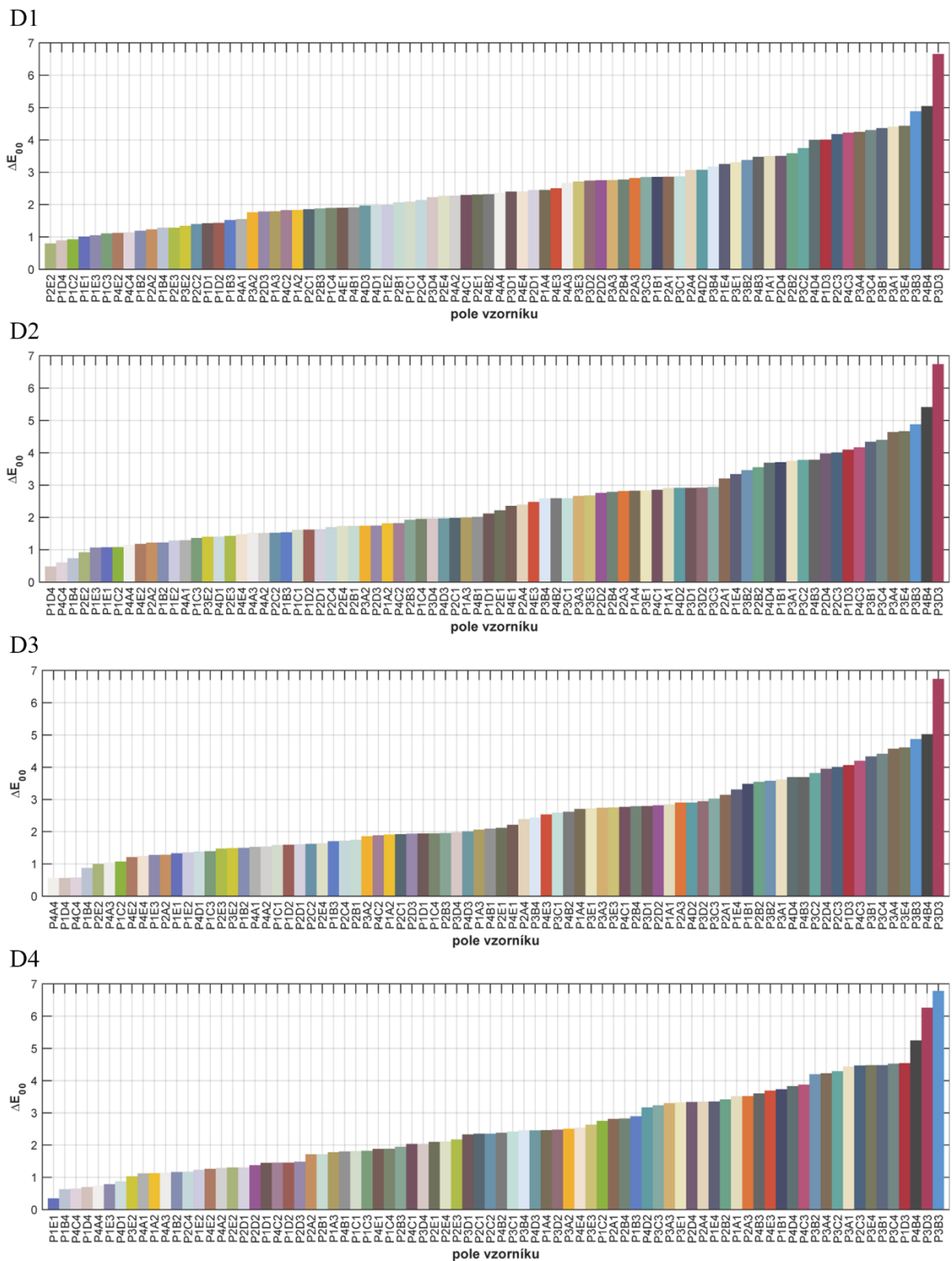
Tabulka 9: Hodnoty ΔC všech obrazců s trénovací sadou nastavenou na ColorChecker

ΔC		D1	D2	D3	D4	D5
Průměr	ColorChecker	0,49	0,63	0,54	0,55	0,25
	Profilační	0,86	0,78	0,76	0,76	2,92
	Testovací	0,98	0,94	0,95	0,87	2,45
Medián	ColorChecker	0,32	0,35	0,31	0,39	0,09
	Profilační	0,75	0,70	0,72	0,66	1,41
	Testovací	0,82	0,80	0,80	0,80	1,64
Minimum	ColorChecker	0,04	0,04	0,02	0,04	0,02
	Profilační	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
	Testovací	0,02	0,01	0,00	0,00	0,04
Maximum	ColorChecker	2,00	5,01	3,39	3,49	2,13
	Profilační	2,44	2,17	2,14	2,13	23,58
	Testovací	5,05	3,55	3,66	3,63	17,96

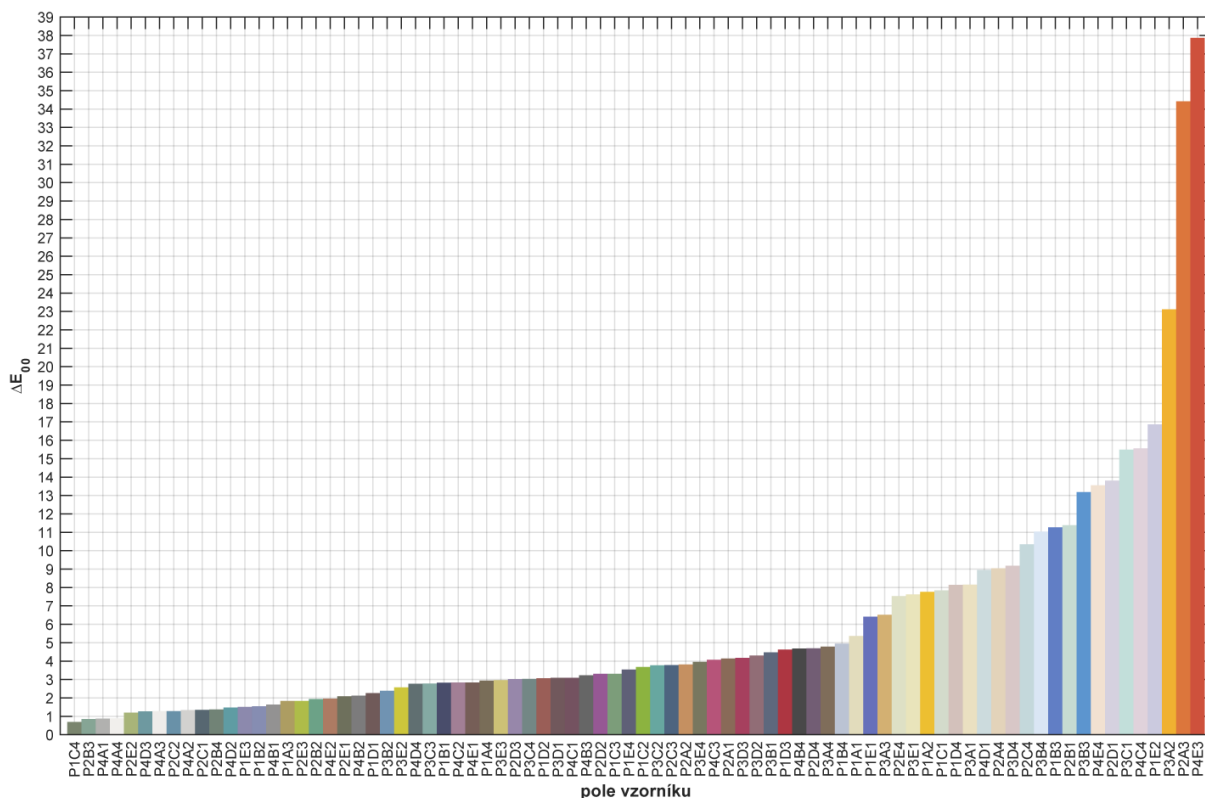
Tabulka 10: Hodnoty ΔH všech obrazců s trénovací sadou nastavenou na ColorChecker

ΔH		D1	D2	D3	D4	D5
Průměr	ColorChecker	0,89	0,77	0,75	0,59	0,28
	Profilační	0,99	0,79	0,78	0,80	3,06
	Testovací	1,04	0,96	0,98	0,97	2,47
Medián	ColorChecker	0,80	0,67	0,66	0,28	0,15
	Profilační	0,70	0,56	0,62	0,48	0,92
	Testovací	0,76	0,80	0,83	0,69	1,01
Minimum	ColorChecker	0,08	0,03	0,09	0,00	0,00
	Profilační	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
	Testovací	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Maximum	ColorChecker	2,26	2,53	2,52	3,28	2,29
	Profilační	3,86	3,14	3,01	4,00	29,71
	Testovací	3,45	2,82	2,89	4,19	18,41

Na *Obrázku 31* a *Obrázku 32* jsou znázorněny grafy barvových odchylek ΔE_{00} Profilačních obrazců pro různé polynomické modely. Modely D1–D4 mají nejvýznamnější barvovou odchylku na černém, vínovém a modrém políčku. Model D5 má tyto odchylky ve světlých tónech a poté v červené a oranžové barvě. Tyto barvy dosahují také velmi vysokých hodnot odchylek (maximum 37,87). Při porovnání hodnot chromy a odstínu pro všechny modely dosahují nejvýraznějších hodnot světlá a pestrá políčka. Hodnoty ΔL mají podobný průběh jako barvová odchylka.



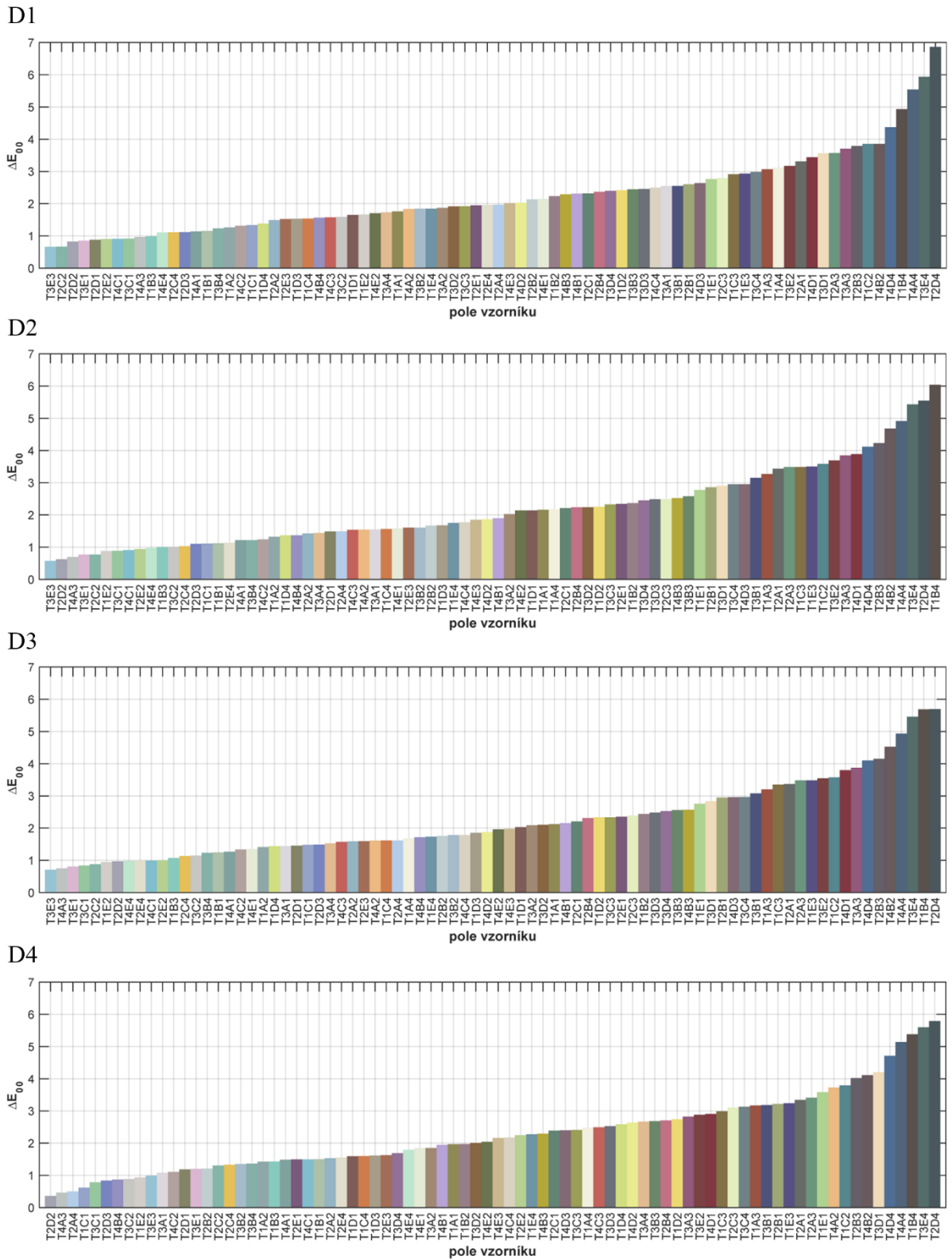
Obrázek 31: Grafy barvových odchylek ΔE_{00} Profiláčních obrazců pro různé polynomické modely, trénovací sada nastavena na ColorChecker



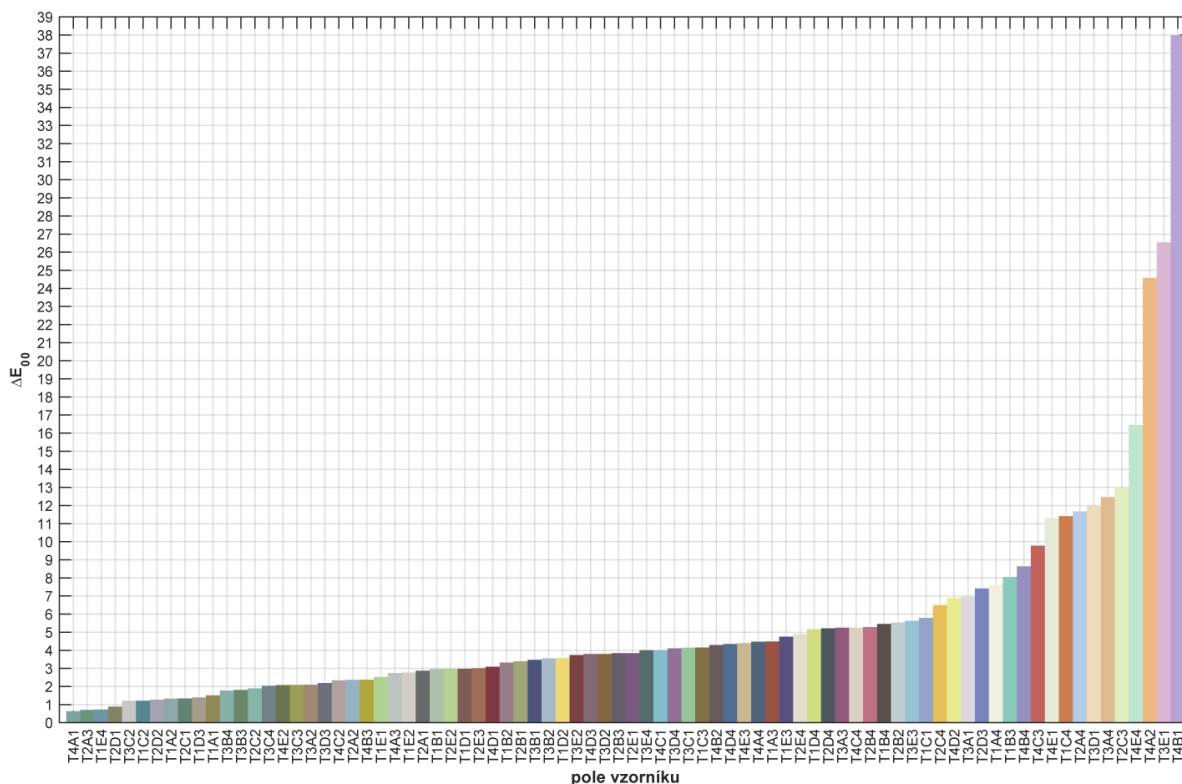
Obrázek 32: Graf barvových odchylek ΔE_{00} Profilačních obrazců pro polynomický model D5, trénovací sada nastavena na ColorChecker

Na *Obrázku 33* a *34* jsou znázorněny grafy barvových odchylek ΔE_{00} Testovacích obrazců pro různé polynomické modely. Modely D1–D4 mají nejvýznačnější barvovou odchylku v tmavě modrých a tmavě zelených barvách. Naopak nejmenší odchylka je ve světle modrých a světle zelených tónech. Model D5 má nejvyšší barvové odchylky ve světlých pestrých barvách. Stejně jako u předchozího obrazce barvové odchylky dosahují velmi vysokých hodnot (maximum 37,98).

Při porovnání hodnot ΔC pro modely D1–D4 mají největší hodnotu tmavě zelená, tmavě modrá a hnědá políčka. Nejvýznamnější hodnoty rozdílu odstínu pro stejné modely dosahují světle zelená a světle žlutá políčka. U modelu D5 mají největší hodnotu pro všechny atributy stejná políčka jako u barvové odchylky.



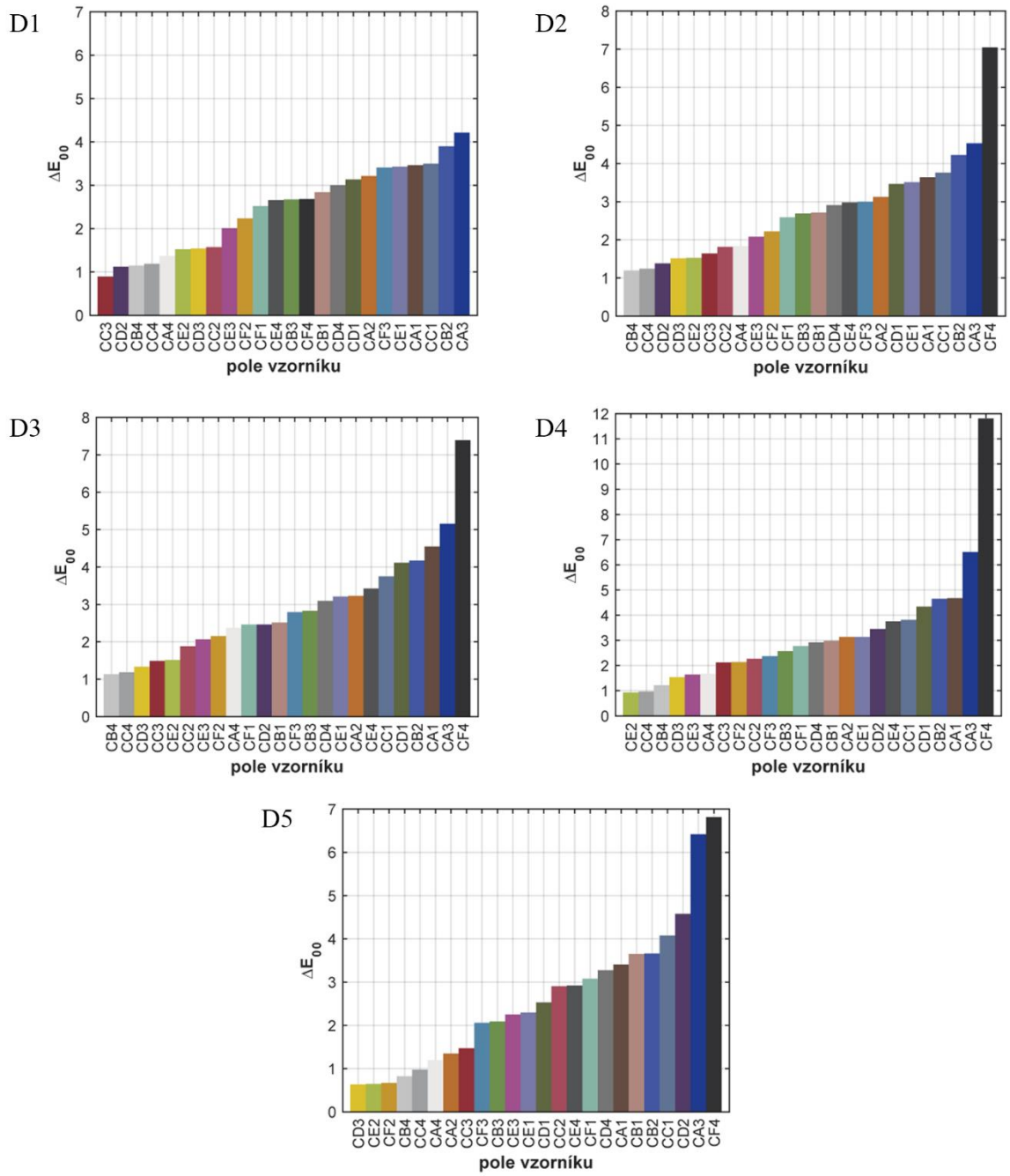
Obrázek 33: Grafy barvových odchylek ΔE_{00} Testovacích obrazců pro různé polynommické modely, trénovací sada nastavena na ColorChecker



Obrázek 34: Graf barvových odchylek ΔE_{00} Testovacích obrazců pro polynomický model D5, trénovací sada nastavena na ColorChecker

3.5 Polynomické modely s trénovací sadou nastavenou na Profilační obrazec

Druhý způsob získání koeficientů polynomických modelů byl podle trénovací sady nastavené na obrazec Profilační. Na *Obrázku 35* jsou znázorněny grafy barvových odchylek ΔE_{00} ColorCheckeru pro jednotlivé polynomické modely. Nejvýznačnějších hodnot dosahuje barvová odchylka na černém políčku a tmavě modrých barvách pro všechny modely. Při porovnání s modely získanými s trénovací sadou nastavenou na ColorChecker dosahují barvové odchylky vyšších hodnot a u modelů D2–D5 má nejvyšší hodnotu černé políčko. Zvýšení hodnot může být způsobeno rozdílným povrchem políček obrazců. V *Tabulce 11* jsou uvedeny hodnoty minimální, maximální, střední a průměrné pro barvové odchylky ΔE_{00} všech obrazců.



Obrázek 35: Grafy barvových odchylek ΔE_{00} ColorCheckeru pro různé polynomické modely, trénovací sada nastavena na Profilační obrazec

Tabulka 11: Hodnoty ΔE_{00} všech obrazců, trénovací sada nastavena na Profilační obrazec

ΔE_{00}		D1	D2	D3	D4	D5
Průměr	ColorChecker	2,47	2,77	2,93	3,22	2,66
	Profilační	1,49	1,40	1,36	1,09	0,97
	Testovací	1,51	1,45	1,37	1,28	1,73
Medián	ColorChecker	2,66	2,70	2,65	2,85	2,41
	Profilační	1,25	1,18	1,26	0,90	0,87
	Testovací	1,28	1,30	1,19	1,15	1,24
Minimum	ColorChecker	0,89	1,19	1,13	0,93	0,63
	Profilační	0,43	0,42	0,44	0,13	0,22
	Testovací	0,25	0,20	0,19	0,21	0,42
Maximum	ColorChecker	4,21	7,04	7,39	11,81	6,81
	Profilační	4,69	4,70	4,47	3,30	3,32
	Testovací	5,84	3,89	3,86	3,74	6,32

Při porovnání hodnot ΔC ColorCheckeru dosahuje nejmenších hodnot model D1 a největších D4. Nejpodstatnější odchylka je v modrých tónech a černé barvě. Při porovnání hodnot ΔH je nejvýraznější odchylka v černé, bílé a tmavých barvách. Odchytky ΔL mají přibližně stejný průběh hodnot jako barvové odchylky, pouze černé políčko nedosahuje tak vysokých hodnot. V *Tabulkách 12–14* jsou uvedeny střední, minimální, maximální hodnoty a průměr pro odchylky ΔL , ΔC a ΔH všech obrazců.

Tabulka 12: Hodnoty ΔL všech obrazců, trénovací sada nastavena na Profilační obrazec

ΔL		D1	D2	D3	D4	D5
Průměr	ColorChecker	2,02	2,16	2,44	2,56	1,85
	Profilační	0,84	0,83	0,81	0,75	0,66
	Testovací	0,81	0,80	0,68	0,71	1,14
Medián	ColorChecker	1,95	1,99	2,23	2,42	1,96
	Profilační	0,70	0,71	0,64	0,55	0,51
	Testovací	0,79	0,80	0,60	0,67	0,76
Minimum	ColorChecker	0,34	0,50	0,65	0,46	0,04
	Profilační	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00
	Testovací	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Maximum	ColorChecker	3,79	4,13	5,55	6,13	4,89
	Profilační	4,34	4,24	4,06	3,27	2,53
	Testovací	2,82	2,55	2,40	2,98	4,88

Tabulka 13: Hodnoty ΔC všech obrazců, trénovací sada nastavena na Profilační obrazec

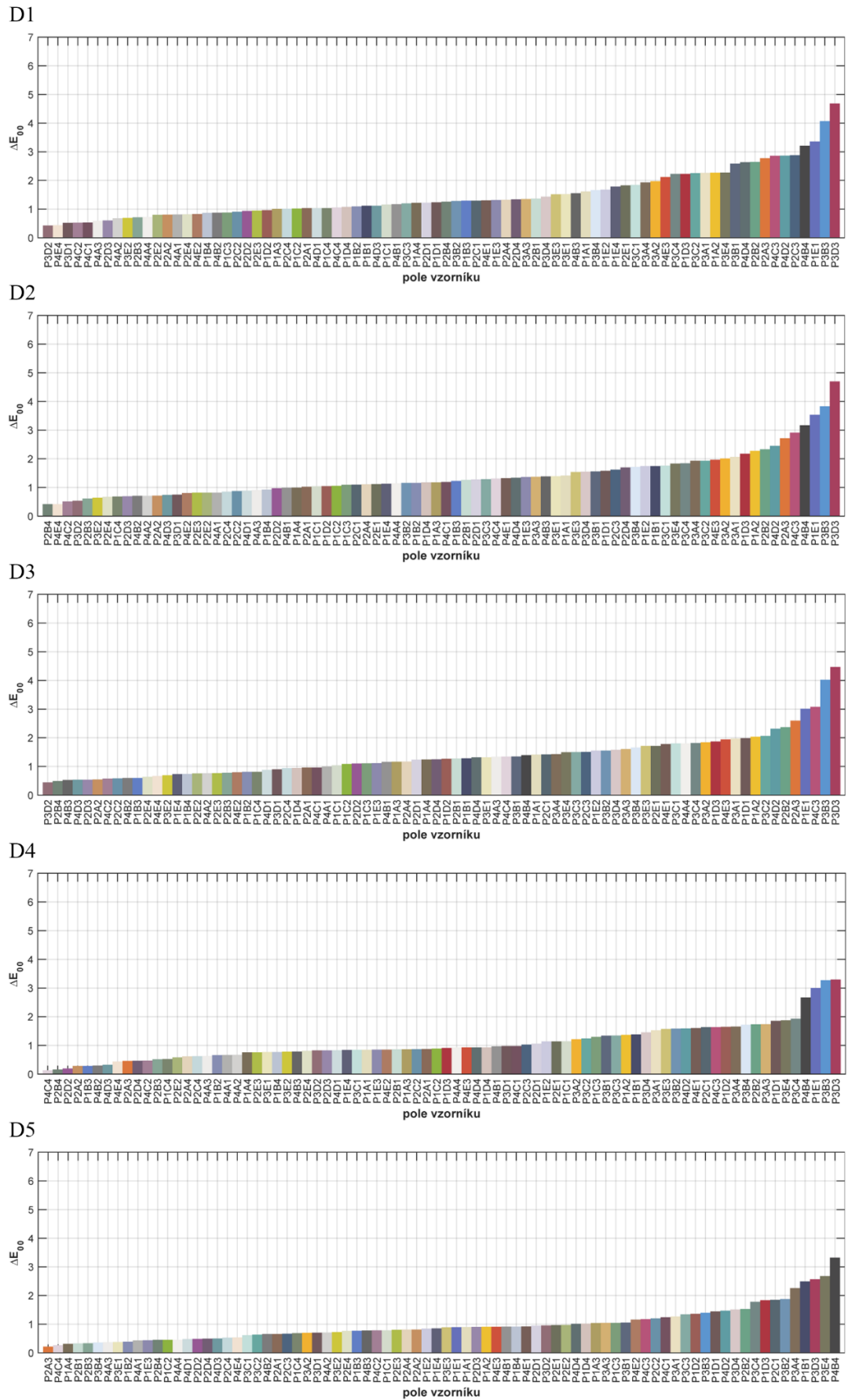
ΔC		D1	D2	D3	D4	D5
Průměr	ColorChecker	0,53	0,78	0,76	1,34	0,97
	Profilační	0,64	0,62	0,57	0,37	0,36
	Testovací	0,78	0,73	0,67	0,52	0,74
Medián	ColorChecker	0,40	0,38	0,45	0,86	0,59
	Profilační	0,57	0,53	0,45	0,29	0,28
	Testovací	0,60	0,56	0,52	0,38	0,46
Minimum	ColorChecker	0,04	0,04	0,02	0,04	0,02
	Profilační	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
	Testovací	0,02	0,01	0,00	0,00	0,04
Maximum	ColorChecker	2,52	5,63	4,83	9,17	4,95
	Profilační	2,35	1,98	1,89	2,17	1,72
	Testovací	4,87	3,29	3,20	2,47	4,39

Tabulka 14: Hodnoty ΔH všech obrazců, trénovací sada nastavena na Profilační obrazec

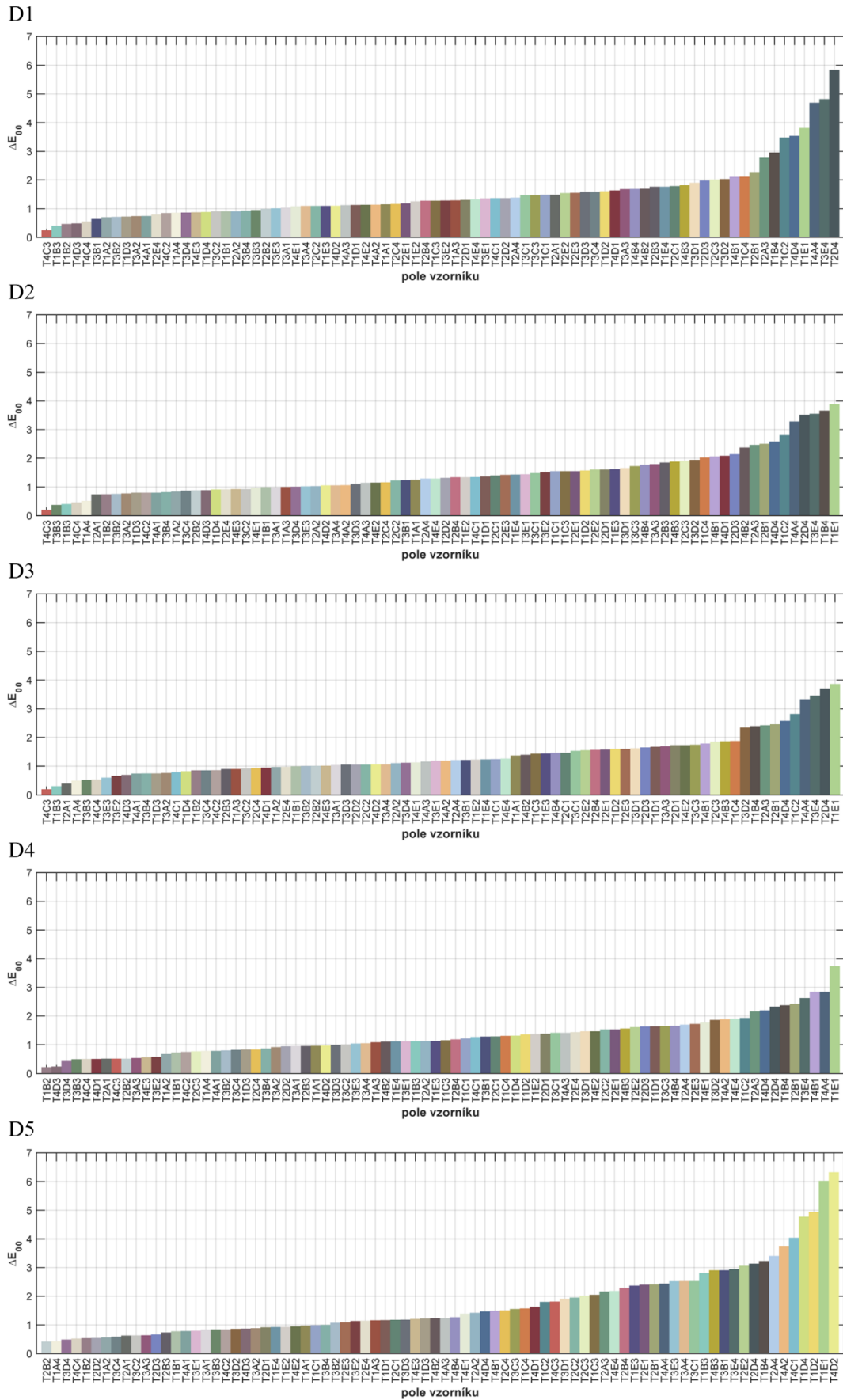
ΔH		D1	D2	D3	D4	D5
Průměr	ColorChecker	1,11	1,05	0,92	0,85	1,00
	Profilační	0,75	0,62	0,61	0,46	0,41
	Testovací	0,71	0,72	0,73	0,67	0,71
Medián	ColorChecker	1,05	0,95	0,92	0,51	0,84
	Profilační	0,51	0,42	0,39	0,45	0,30
	Testovací	0,51	0,57	0,60	0,50	0,57
Minimum	ColorChecker	0,08	0,03	0,09	0,00	0,00
	Profilační	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
	Testovací	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Maximum	ColorChecker	2,82	3,13	2,22	4,21	4,37
	Profilační	3,63	3,40	3,10	1,92	1,70
	Testovací	3,73	2,37	2,72	2,24	2,27

Obrázek 36 zobrazuje grafy barvových odchylek ΔE_{00} Profilačních obrazců pro různé polynomicke modely. Největších barvových odchylek je dosaženo u černé, vínové a modré barvy stejně jako při modelování na trénovací sadu ColorCheckeru. Model D5 má opět nejvyšší barvové odchylky jiných barevných políček než ostatní modely. Jelikož byl pro linearizaci použit Profilační obrazec, nedosahují barvové odchylky tak extrémních hodnot jako v předchozím případě.

Hodnoty chromy dosahují nízkých hodnot (maximum 2,17). Nejvýraznější jsou u zelených barev. Při porovnání hodnot ΔH i ΔL je největší odchylka u sytých barev. Nejmenší hodnoty má model D5.



Obrázek 36: Grafy barvových odchylek ΔE_{00} Profilačních obrazců pro různé polynomické modely, trénovací sada nastavena na Profilační obrazec



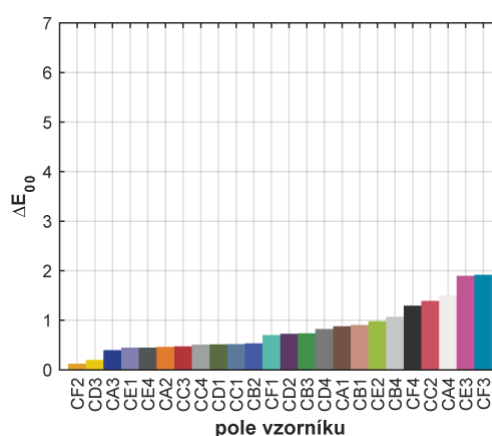
Obrázek 37: Grafy barvových odchylek ΔE_{00} Testovacích obrazců pro různé polynommické modely, trénovací sada nastavena na Profilační obrazec

Na *Obrázku 37* se nachází grafy barvových odchylek ΔE_{00} Testovacích obrazců pro využití polynomické modely. Stejně jako při předchozím způsobu linearizace dat je nejvyšší barvová odchylka v tmavě zelených a tmavě modrých tónech pro modely D1–D4. Rozdíl oproti modelování na trénovací sadu ColorCheckeru je ten, že vysoké hodnoty dosahuje i světle zelené políčko (T1E1). Model D5 má nejvýraznější barvové odchylky ve světle zelených a světle oranžových barvách. Průměrná hodnota pro všechny polynomické modely dosahuje nižších hodnot než při modelování na trénovací sadu ColorCheckeru. Hodnoty chromy a odstínu jsou nejzásadnější u zelených barev. Při porovnání hodnot ΔL je největší odchylka světle zelených políček. Nejvyšší hodnoty má model D5.

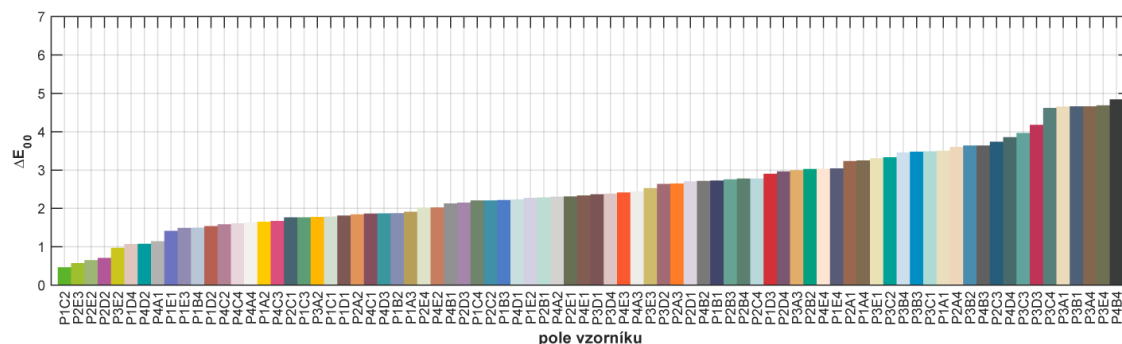
3.6 Aplikace správy barev

Posledním krokem experimentu byla aplikace správy barev. Na *Obrázku 38–40* jsou znázorněny grafy barvových odchylek ΔE_{00} všech obrazců s nastavením K4 (*Tabulka 4*, str. 36). Oproti předchozím metodám zpracování dosahují barvové odchylky nejnižších hodnot. U Profilačního a Testovacího obrazce jsou největší odchylky v tmavě zelených a hnědých tónech. V *Tabulce 15* jsou uvedeny hodnoty minimální, maximální, střední a průměrné pro všechny parametry jednotlivých obrazců.

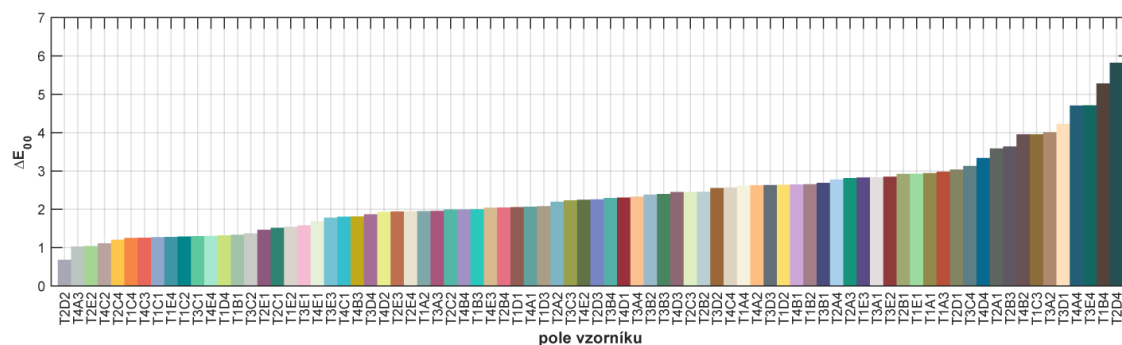
Odchylka chromy pro ColorChecker nepřesahuje hodnotu 1. U Profilačního obrazce bylo dosaženo nejvyšší hodnoty u tmavě zelených barev. Pro Testovací obrazec jsou nejvýraznější hodnoty u světle zelených a pestrých políček. Odchylky v odstínu jsou u ColorCheckeru největší v černém, bílém a azurovém políčku. Pro Profilační a Testovací obrazec jsou na světlých políčkách. Hodnota ΔL je nevyšší v tmavých a sytých tónech.



Obrázek 38: Graf barvových odchylek ΔE_{00} ColorCheckeru s upraveným nastavením



Obrázek 39: Graf barvových odchylek ΔE_{00} Profilačního obrazce s upraveným nastavením



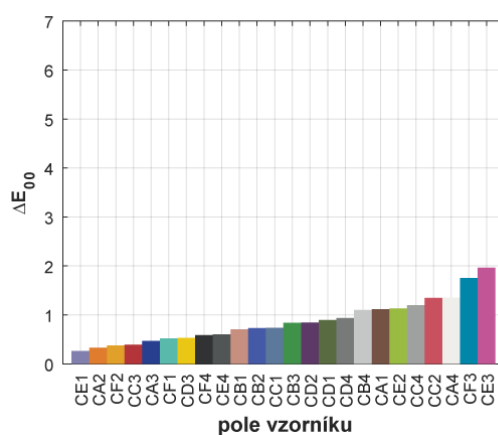
Obrázek 40: Graf barvových odchylek ΔE_{00} Testovacího obrazce s upraveným nastavením

Tabulka 15: Hodnoty ΔE_{00} , ΔL , ΔC a ΔH pro všechny obrazce s upraveným nastavením

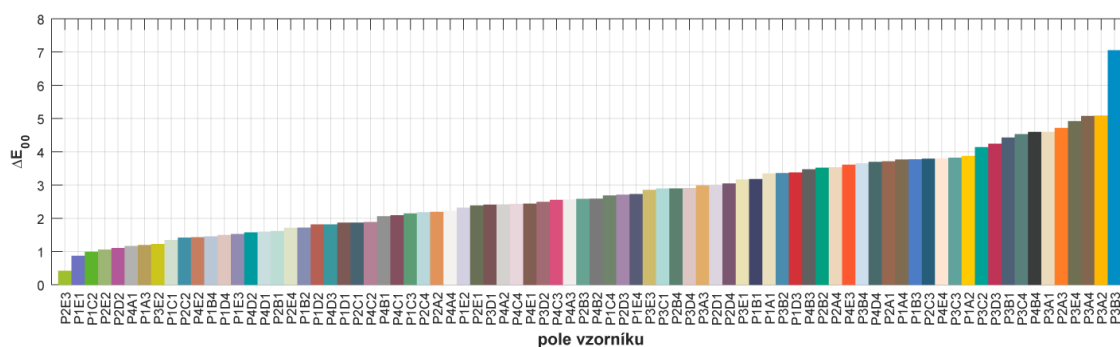
		ΔE_{00}	ΔL	ΔC	ΔH
Průměr	ColorChecker	0,81	0,38	0,41	0,44
	Profilační	2,52	1,79	0,84	1,03
	Testovací	2,38	1,36	0,94	1,11
Medián	ColorChecker	0,71	0,25	0,39	0,34
	Profilační	2,35	1,62	0,73	0,84
	Testovací	2,25	1,09	0,75	0,80
Minimum	ColorChecker	0,12	0,01	0,03	0,05
	Profilační	0,47	0,01	0,05	0,00
	Testovací	0,68	0,03	0,01	0,00
Maximum	ColorChecker	1,92	1,80	0,96	1,31
	Profilační	4,84	4,76	2,26	4,10
	Testovací	5,82	5,05	2,55	4,12

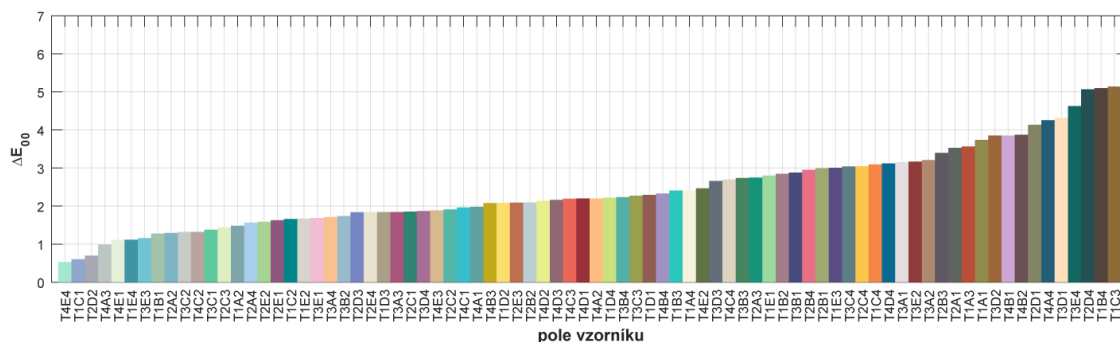
Na *Obrázku 41–43* jsou znázorněny barvé odchyly ΔE_{00} všech obrazců s implicitním nastavením převodu z RAW do TIFF (metoda K13, *Tabulka 4*, str. 36). V porovnání s předchozím nastavením dosahují barvé odchyly vyšších hodnot. V případě Profilačního obrazce dosahují největších hodnot pestré barvy a u Testovacího obrazce jsou to tmavé barvy. Nejnižších hodnot u Testovacího obrazce dosahují světle modré barvy. V *Tabulce 16* jsou uvedeny minimální, maximální, střední a průměrné hodnoty pro všechny parametry jednotlivých obrazců.

Hodnoty ΔC pro ColorChecker jsou nejvýraznější v odstínech šedé. U Profilačního a Testovacího obrazce na sytých barvách, především pak na žluté a zelené. Odchyly v odstínu jsou u Profilačního obrazce největší u sytých políček a u Testovacího obrazce ve světlých a hnědých odstínech. Hodnota ΔL je nejzásadnější v tmavých a sytých tónech stejně jako v předchozím případě.



Obrázek 41: Graf barvových odchylek ΔE_{00} ColorCheckeru s implicitním nastavením





Obrázek 43: Graf barvových odchylek ΔE_{00} Testovacího obrazce s implicitním nastavením

Tabulka 16: Hodnoty ΔE_{00} , ΔL , ΔC a ΔH pro všechny obrazce s implicitním nastavením

		ΔE_{00}	ΔL	ΔC	ΔH
Průměr	ColorChecker	0,86	0,38	0,39	0,51
	Profilační	2,76	1,89	0,98	1,25
	Testovací	2,43	1,39	0,97	1,16
Medián	ColorChecker	0,79	0,22	0,28	0,55
	Profilační	2,59	1,66	0,83	0,93
	Testovací	2,20	1,12	0,73	0,97
Minimum	ColorChecker	0,26	0,00	0,04	0,02
	Profilační	0,42	0,05	0,00	0,02
	Testovací	0,53	0,02	0,06	0,01
Maximum	ColorChecker	1,97	1,84	1,18	1,15
	Profilační	7,05	4,50	2,77	5,13
	Testovací	5,14	4,85	3,13	4,10

3.7 Diskuze

Při porovnání snímání jednotlivých obrazců zvlášť a všech čtyřech na jeden snímek byly nalezeny obdobné hodnoty. Hodnoty odchylek ΔL , ΔC a ΔH dosahují v obou případech stejných hodnot. Nejvyšší hodnoty ΔE_{00} byly zjištěny u světlých políček Profilačního i Testovacího obrazce, které jsou rozmístěny rovnoměrně po celém obrazci. Z toho vyplývá, že na výsledky nemá vliv, zda jsou snímky nasnímány zvlášť nebo najednou.

Ze získaných výsledků s trénovací sadou nastavenou na ColorChecker je patrné, že na snímcích ColorCheckeru se zvyšujícím stupněm polynomu (D1–D4, *Tabulka 5*, str. 37) dochází k postupnému snižování průměrné barvové odchylky. U snímků Profilačního a Testovacího obrazce není tento trend patrný. Při použití polynomu 3. řádu (D5, *Tabulka 5*,

str. 37) vznikají extrémní rozdíly v hodnotách políček, která při jiném modelu dosahují průměrných hodnot, zde dosahují hodnot vysokých. Nejvhodnějším modelem pro trénovací sadu nastavenou na ColorChecker je polynom prvního nebo druhého řádu.

Při trénovací sadě nastavené na Profilační obrazec dochází se zvyšujícím se stupněm polynomu (D1–D4, *Tabulka 5*, str. 37) k postupnému navýšení průměrné barvové odchylky na snímcích ColorCheckeru. Na snímcích Profilačního a Testovacího obrazce průměrná barvová odchylka u těchto polynomů postupně klesá. Při použití polynomu 3. řádu (D5, *Tabulka 5*, str. 37) opět vznikají extrémní rozdíly v hodnotách políček, která při jiném modelu dosahují průměrných hodnot, zde dosahují hodnot vysokých. Nejvhodnějším modelem pro trénovací sadu nastavenou na Profilační obrazec je polynom druhého řádu.

U aplikace správy barev nedosahují barvové odchylky tak vysokých hodnot jako u polynomických modelů. U obrazce ColorCheckeru je při aplikaci správy barev maximální hodnota barvové odchylky 1,97, kdežto u polynomického modelu druhého řádu je tato hodnota 11,81. Pro Profilační a Testovací obrazce je u správy barev s upraveným nastavením maximum 5,82 a u polynomického modelu druhého řádu je maximum 3,74. Průměrné hodnoty obou metod dosahují srovnatelných hodnot. Při porovnání polynomického modelu druhého řádu s aplikací správy barev je patrné, že správa barev poskytuje obdobné výsledky a při porovnání s ostatními polynomickými modely poskytuje lepší výsledky.

Jedním z důvodů rozdílů odchylek jednotlivých metod může být rozdílný povrch měřených obrazců. Dále může být rozdíl dán použitou trénovací sadou pro linearizaci dat. Při použití trénovací sady nastavené na ColorChecker jsou hodnoty pro ColorChecker nižší než u Profilačního a Testovacího obrazce. Pro tyto dva obrazce jsou hodnoty podobné. Naopak při použití trénovací sady nastavené na Profilační obrazec jsou hodnoty pro ColorChecker vyšší než u Profilačního a Testovacího obrazce a pro tyto obrazce jsou hodnoty opět podobné. Pro tuto práci byla zvolena fixní geometrie měření. Do budoucna by bylo zajímavé srovnat výsledky i s jinou geometrií než fixní.

4. ZÁVĚR

Diplomová práce pojednává o vyhodnocování barevnosti pomocí digitálního fotoaparátu. Cílem práce bylo teoreticky shrnout metody, jakými lze tuto barevnost vyhodnocovat. Na základě prostudované literatury byla otestována polynomiální transformace dle vlastního výpočtu a charakterizace s použitím ICC správy barev.

V experimentální části byly optimalizovány podmínky pro měření, konkrétně byla zkoumána stabilita osvětlení, stabilita digitálního fotoaparátu a optimální nastavení pro kalibraci fotoaparátu. Pro tvorbu polynomických modelů byl využit jako trénovací sada zvlášť ColorChecker a zvlášť vlastní Profilační obrazec. Navíc byl vytvořen i Testovací obrazec pro další kontrolu predikce barevnosti. Profilační a Testovací obrazec byl vytvořen ze vzorníku barev NCS systému. Získané fotografie obrazců byly zpracovány v programu Matlab, kde byla získána data pro vyhodnocení. Získané výsledky polynomiální transformace byly porovnávány s daty naměřenými spektrofotometrem a s aplikací správy barev.

Z výsledků experimentálního měření stability osvětlení bylo zjištěno, že je nutné zapnout osvětlení 40 minut před samotným měřením. Aby fotoaparát poskytoval stabilní data, musí se fotoaparát také zapnout 40 minut před vytvořením prvního snímku. Pro kalibraci fotoaparátu bylo testováno různé nastavení předzpracování snímku v modulu Camera Raw 7.0. Všechny zjištěné informace byly využity pro testování polynomického modelu. Při testování polynomických modelů vychází nejnižší barvové odchylky trénovací sady, podle které byl i model vytvořen. Ze získaných výsledků s trénovací sadou nastavenou na ColorChecker je nejvhodnějším modelem polynom prvního nebo druhého řádu. Nejvhodnějším modelem pro trénovací sadu nastavenou na Profilační obrazec je polynom druhého řádu. U aplikace správy barev nedosahují barvové odchylky tak vysokých hodnot jako u polynomických modelů, a proto je lepší využít tuto metodu.

5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FINLAYSON, Graham D., Michal MACKIEWICZ a Anya HURLBERT. Color Correction Using Root-Polynomial Regression. *IEEE Transactions on Image Processing* [online]. 2015, **24**(5), 1460-1470 [cit. 2017-04-19]. ISSN 1057-7149. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7047834/>
- [2] JIANG, Jun, Dengyu LIU, Jinwei GU a Sabine SUSSTRUNK. What is the space of spectral sensitivity functions for digital color cameras?. *2013 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*[online]. IEEE, 2013, 2013, , 168-179 [cit. 2018-02-27]. ISBN 978-1-4673-5054-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6475015>
- [3] BIANCO, Simone, Raimondo SCHETTINI a Leonardo VANNESCHI. Empirical modeling for colorimetric characterization of digital cameras. *2009 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*[online]. IEEE, 2009, 2009, , 3469-3472 [cit. 2018-02-28]. ISBN 978-1-4244-5653-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5413828/>
- [4] BAATZ, Willfried. *Fotografie*. Praha: Computer Press, 2004. Malá encyklopedie (Computer Press). ISBN 80-251-0210-6.
- [5] DANNHOFEROVÁ, Jana. *Velká kniha barev: kompletní průvodce pro grafiky, fotografie a designéry*. Brno: Computer Press, 2012. ISBN 978-80-251-3785-7.
- [6] LINDNER, Petr, Miroslav MYŠKA a Tomáš TŮMA. *Velká kniha digitální fotografie*. 3., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2008. ISBN 978-80-251-2005-7.
- [7] FREEMAN, Michael. *DSLR: naučte se fotografovat digitální zrcadlovkou*. Brno: Zoner Press, 2007. Encyklopedie – grafika a fotografie. ISBN 978-80-86815-79-4.
- [8] TŮMA, Tomáš. *Fotografujeme digitálně*. Brno: Computer Press, 2004. Digifoto. ISBN 80-251-0153-3.
- [9] STONE, M. David a Ron GLADIS. *Digitální fotografie*. Brno: Computer Press, 2003. Jak je to snadné!. ISBN 80-251-0067-7.

- [10] Uvnitř DSLR – Konstrukce, hledáček, senzor. *Fotoroman* [online]. [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://www.fotoroman.cz/tech2/dslr1.htm>
- [11] KAPLANOVÁ, Marie. *Moderní polygrafie*. Praha: Svaz polygrafických podnikatelů, 2009. ISBN 978-80-254-4230-2.
- [12] MILBURN, Ken. *Digitální fotografie: profesionální techniky*. Brno: CP Books, 2005. ISBN 80-251-0642-X.
- [13] DOHNAL, Miroslav. *Fyzikální základy reprodukce obrazu*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003. ISBN 80-719-4567-6.
- [14] MALÝ, Petr. *Optika*. Praha: Karolinum, 2008. ISBN 978-80-246-1342-0.
- [15] ZDRAŽIL, Vít. *Zpracování digitální fotografie* [online]. Brno, 2007 [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=115601. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [16] DRŽKOVÁ, Markéta a Miroslav FRIBERT. *Automatizace a řízení tisku*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2012. ISBN 978-80-7395-446-8.
- [17] SECURITY CAMERA – CCD VS CMOS IMAGE SENSOR. In: *Unifore* [online]. 2015 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <https://www.unifore.net/analog-surveillance/security-camera-ccd-vs-cmos-image-sensor.html>
- [18] HALAZONETIS, Demetrios J. What is the Foveon chip? *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* [online]. 2004, **125**(3), 390- [cit. 2018- 01–02]. ISSN 08895406. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0889540603009521>
- [19] MALVAR, H.S., LI-WEI HE a R. CUTLER. High-quality linear interpolation for demosaicing of Bayer-patterned color images. *2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing* [online]. IEEE, 2004, , iii-485-8 [cit. 2018-04-06]. ISBN 0-7803-8484-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1326587/>

- [20] HIRAKAWA, K. a T.W. PARKS. Adaptive homogeneity-directed demosaicing algorithm. *IEEE Transactions on Image Processing* [online]. 2005, **14**(3), 360 - 369 [cit. 2018-04-07]. ISBN 10.1109/TIP.2004.838691. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1395991/>
- [21] JOHNSON, Tony. Methods for characterizing colour scanners and digital cameras. *Displays* [online]. 1996, **16**(4), 183-191 [cit. 2017-04-20]. ISSN 01419382. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0141938296010128>
- [22] CHEUNG, Vien, Stephen WESTLAND, David CONNAH a Caterina RIPAMONTI. A comparative study of the characterisation of colour cameras by means of neural networks and polynomial transforms. *Coloration Technology* [online]. 2004, **120**(1), 19-25 [cit. 2017-03-10]. ISSN 1472-3581. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1478-4408.2004.tb00201.x>
- [23] HONG, Guowei, Peter. A. RHODES a M. Ronnier. LUO. A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modeling. *Color research and application* [online]. 2001, **26**(1), 76-84. [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1520-6378\(200102\)26:1%3C76::AID-COL8%3E3.0.CO;2-3](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1520-6378(200102)26:1%3C76::AID-COL8%3E3.0.CO;2-3)
- [24] CASCARDI, Alessio, Francesco MICELLI a Maria Antonietta AIELLO. An Artificial Neural Networks model for the prediction of the compressive strength of FRP-confined concrete circular columns. *Engineering Structures* [online]. 2017, **140**, 199-208 [cit. 2017-04-20]. ISSN 01410296. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029617305461>
- [25] YOU, Haihui, Zengyi MA, Yijun TANG, Yuelan WANG, Jianhua YAN, Mingjiang NI, Kefa CEN a Qunxing HUANG. Comparison of ANN (MLP), ANFIS, SVM, and RF models for the online classification of heating value of burning municipal solid waste in circulating fluidized bed incinerators. *Waste Management* [online]. 2017, **68**, 186-197 [cit. 2017-04-19]. ISSN 0956053x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X17301903>

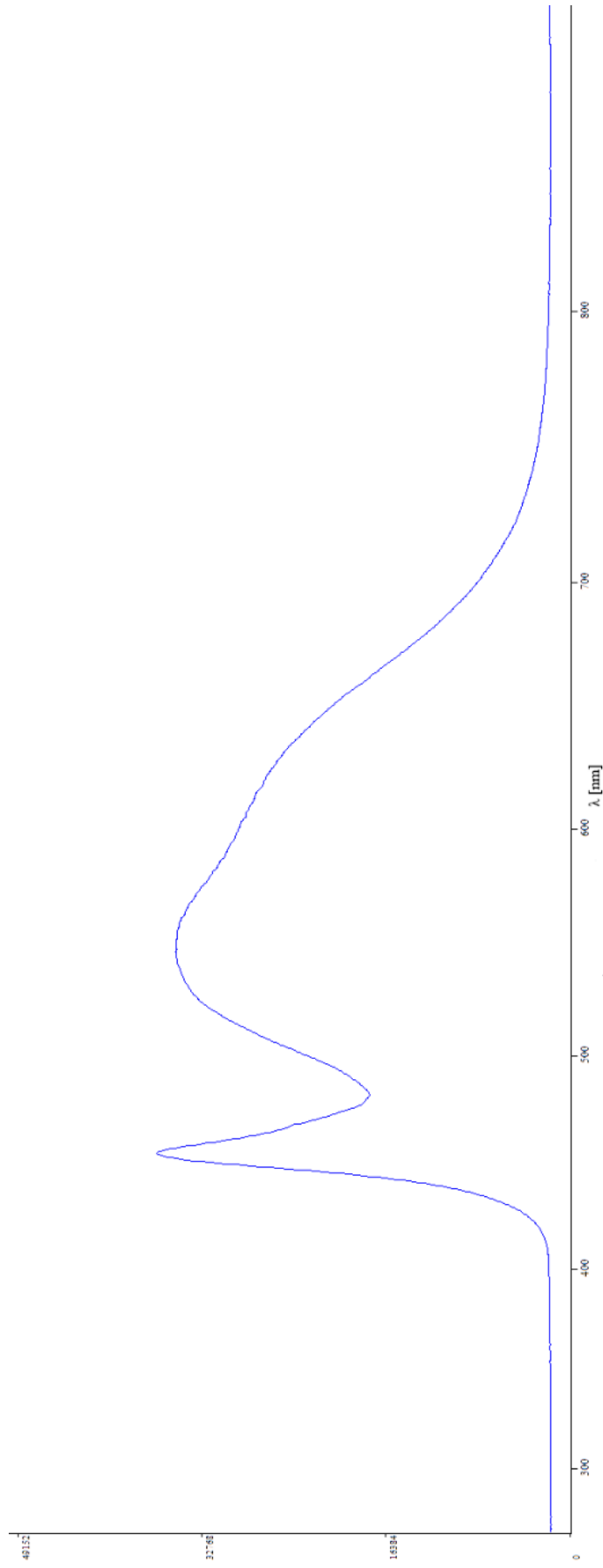
- [26] MOLADA-TEBAR, Adolfo, José Luis LERMA a Ángel MARQUÉS-MATEU. *Camera characterization for improving color archaeological documentation* [online]. 2018, **43**(1), 47-57 [cit. 2018-03-02]. ISSN 03612317. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/col.22152>
- [27] VALOUS, Nektarios A., Fernando MENDOZA, Da-Wen SUN a Paul ALLEN. Colour calibration of a laboratory computer vision system for quality evaluation of pre-sliced hams. *Meat Science* [online]. 2009, **81**(1), 132-141 [cit. 2018-02-28]. ISSN 03091740. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0309174008002325>
- [28] WESTLAND, Stephen., Caterina. RIPAMONTI a Vien CHEUNG. *Computational colour science using MATLAB*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012. ISBN 978-0-470-66569-5.
- [29] SOLE, Aditya, Ivar FARUP a Shoji TOMINAGA. Image based reflectance measurement based on camera spectral sensitivities. *Electronic Imaging* [online]. Society for Imaging Science and Technology, 2016 [cit. 2018-04-21]. ISBN 10.2352/ISSN.2470-1173.2016.9.MMRMA-360. Dostupné z: <http://www.ingentaconnect.com/content/10.2352/ISSN.2470-1173.2016.9.MMRMA-360>
- [30] DARRODI, Maryam Mohammadzadeh, Graham FINLAYSON, Teresa GOODMAN a Michal MACKIEWICZ. *Reference data set for camera spectral sensitivity estimation* [online]. 2015, (32), 381-391 [cit. 2018-04-21]. ISBN 10.1364/JOSAA.32.000381. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josaa-32-3-381>
- [31] BLACK-Comet UV-VIS Spectrometer with Research Grade Concave Grating Optics. *StellarNet Inc* [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <https://www.stellarnet.us/spectrometers/black-comet-uv-vis-concave-grating-spectrometers/>
- [32] UltraScan VIS Spectrophotometer. *HunterLab* [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://www.hunterlab.com/ultrascan-vis-spectrophotometer.html>
- [33] EasyMatch QC. *HunterLab* [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://www.hunterlab.com/easymatch-qc.html>

- [34] falconeyes.com, *DVR-630D/630DVC*, [online], [cit 2018-03-02], dostupné z: <http://www.falconeyes.com.hk/Product.aspx?id=1512>
- [35] xritephoto.com, *ColorChecker Targets*, [online], [cit 2018-03-02] dostupné z: http://xritephoto.com/ph_product_overview.aspx?id=1257&catid=28
- [36] X-Rite i1Publish Upgrade (jen software). *X-rite* [online]. 2008 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://www.xrite.cz/x-rite-i1publish-upgrade-a-jen-software.html>
- [37] KAILOVÁ, Natálie. *Sledování barevné změny termochromních vzorků pomocí fotoaparátu*. Pardubice, 2016. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Ondřej Panák.
- [38] ColorChecker24_After_Nov2014.txt. *BabelColor: THE COLORCHECKER PAGES (2/3)* [online]. 2015 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: http://www.babelcolor.com/colorchecker-2.htm#CCP2_data
- [39] *NCS INDEX 1950 Original* [online]. 2007 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://www.industry-plaza.com/medias/8/3/1/003072138.pdf>

6. PŘÍLOHY

Příloha I: Experimentálně získané spektrum osvětlení	73
Příloha II: Hodnoty $L^*a^*b^*$ ColorCheckeru poskytované výrobcem pro 2° pozorovatele a osvětlení D50	74
Příloha III: Naměřené hodnoty XYZ ColorCheckeru, 2° pozorovatel, osvětlení D50	75
Příloha IV: Přepočítané hodnoty $L^*a^*b^*$ ColorCheckeru, 2° pozorovatel, osvětlení D50	76
Příloha V: Naměřené hodnoty XYZ Profilačního obrazce, 2° pozorovatel, osvětlení D50....	77
Příloha VI: Naměřené hodnoty XYZ Testovacího obrazce, 2° pozorovatel, osvětlení D50 ..	78
Příloha VII: Výpočet barvové odchylky ΔE_{00} a odchylek atributů $\Delta L'$, $\Delta C'$, $\Delta H'$	79

Příloha I: Experimentálně získané spektrum osvětlení



Příloha II: Hodnoty $L^* a^* b^*$ ColorCheckeru poskytované výrobcem pro 2° pozorovatele a osvětlení D50 [38]

	L^*	a^*	b^*		L^*	a^*	b^*
CA1	37,54	14,37	14,92	CD1	43,46	-12,74	22,72
CA2	62,73	35,83	56,50	CD2	30,10	22,54	-20,87
CA3	28,37	15,42	-49,80	CD3	81,80	2,67	80,41
CA4	95,19	-1,03	2,93	CD4	50,76	-0,13	0,14
CB1	64,66	19,27	17,50	CE1	54,94	9,61	-24,79
CB2	39,43	10,75	-45,17	CE2	71,77	-24,13	58,19
CB3	54,38	-39,72	32,27	CE3	50,63	51,28	-14,12
CB4	81,29	-0,57	0,44	CE4	35,63	-0,46	-0,48
CC1	49,32	-3,82	-22,54	CF1	70,48	-32,26	-0,37
CC2	50,57	48,64	16,67	CF2	71,51	18,24	67,37
CC3	42,43	51,05	28,62	CF3	49,57	-29,71	-28,32
CC4	66,89	-0,75	-0,06	CF4	20,64	0,07	-0,46

Příloha III: Naměřené hodnoty XYZ ColorCheckeru, 2° pozorovatel, osvětlení D50

	X	Y	Z		X	Y	Z
CA1	11,73	10,33	5,16	CD1	10,66	13,02	5,35
CA2	40,34	30,99	4,90	CD2	8,29	6,22	10,18
CA3	6,80	5,69	20,41	CD3	57,68	59,08	7,16
CA4	82,21	85,58	67,99	CD4	18,18	18,96	15,64
CB1	38,23	33,63	18,57	CE1	23,75	22,60	32,32
CB2	12,08	11,00	28,77	CE2	33,82	42,93	9,17
CB3	14,36	22,31	7,89	CE3	31,35	20,34	23,10
CB4	54,31	56,60	46,81	CE4	8,43	8,86	7,52
CC1	16,53	17,78	25,40	CF1	29,07	39,86	34,00
CC2	30,26	19,54	9,79	CF2	46,66	42,12	6,10
CC3	21,56	12,81	3,85	CF3	13,48	18,72	30,04
CC4	34,06	35,56	29,53	CF4	3,01	3,16	2,74

Příloha IV: Přepočítané hodnoty $L^*a^*b^*$ ColorCheckeru, 2° pozorovatel, osvětlení D50

	L^*	a^*	b^*		L^*	a^*	b^*
CA1	38,43	13,18	14,44	CD1	42,79	-13,41	21,00
CA2	62,50	35,65	57,30	CD2	29,96	22,60	-20,35
CA3	28,62	14,29	-48,65	CD3	81,34	1,80	79,25
CA4	94,13	-0,53	2,34	CD4	50,64	-0,50	-0,02
CB1	64,67	19,66	17,40	CE1	54,66	8,91	-24,55
CB2	39,58	10,65	-44,97	CE2	71,51	-24,52	54,69
CB3	54,35	-38,19	29,82	CE3	52,22	49,81	-13,25
CB4	79,95	-0,62	-0,17	CE4	35,71	-0,96	-0,87
CC1	49,23	-3,36	-22,61	CF1	69,37	-32,66	-1,67
CC2	51,31	49,68	17,76	CF2	70,95	17,80	65,96
CC3	42,48	51,47	28,80	CF3	50,36	-26,49	-28,43
CC4	66,18	-0,74	-0,34	CF4	20,67	-0,62	-1,07

Příloha V: Naměřené hodnoty XYZ Profilačního obrazce, 2° pozorovatel, osvětlení D50

	X	Y	Z		X	Y	Z
P1A1	71,05	73,87	44,19	P3A1	71,04	72,52	43,13
P1A2	70,91	66,89	6,73	P3A2	67,50	59,00	5,69
P1A3	35,69	36,15	11,13	P3A3	50,80	47,40	15,06
P1A4	15,90	15,61	7,38	P3A4	15,85	14,86	7,05
P1B1	6,66	6,36	10,69	P3B1	10,29	11,06	14,09
P1B2	27,15	27,19	35,18	P3B2	19,06	22,86	32,57
P1B3	19,15	19,62	42,47	P3B3	16,70	21,87	42,44
P1B4	52,54	55,49	54,16	P3B4	67,21	71,78	68,16
P1C1	65,40	71,20	52,11	P3C1	55,10	63,87	55,19
P1C2	22,63	35,41	6,23	P3C2	15,42	25,95	25,18
P1C3	20,15	27,60	16,19	P3C3	23,98	30,94	27,56
P1C4	17,81	20,83	12,63	P3C4	15,35	18,77	16,45
P1D1	14,14	12,28	7,77	P3D1	13,41	11,41	7,75
P1D2	26,23	19,34	8,03	P3D2	23,67	19,41	14,04
P1D3	30,06	16,82	3,91	P3D3	25,30	14,57	7,71
P1D4	60,94	59,64	42,72	P3D4	60,42	59,25	45,35
P1E1	20,81	18,96	39,52	P3E1	71,42	75,13	41,56
P1E2	63,57	64,25	60,94	P3E2	48,14	54,00	7,14
P1E3	28,64	27,44	34,15	P3E3	48,50	50,88	16,40
P1E4	10,81	10,73	13,89	P3E4	14,26	15,49	7,90
P2A1	19,97	17,13	7,27	P4A1	43,03	44,72	36,22
P2A2	45,57	38,42	11,25	P4A2	62,15	64,49	51,85
P2A3	54,07	38,20	4,84	P4A3	82,06	85,08	67,95
P2A4	70,19	70,11	43,05	P4A4	85,86	89,12	71,00
P2B1	58,84	66,71	54,20	P4B1	27,43	28,45	23,32
P2B2	14,73	25,43	18,94	P4B2	18,48	19,14	15,68
P2B3	24,00	30,94	24,16	P4B3	11,15	11,59	9,51
P2B4	15,17	18,69	13,76	P4B4	4,19	4,36	3,65
P2C1	9,95	11,55	12,81	P4C1	14,67	11,39	9,01
P2C2	18,60	23,53	30,89	P4C2	32,49	27,42	24,35
P2C3	7,82	9,45	14,99	P4C3	36,54	22,45	15,86
P2C4	57,55	64,24	58,43	P4C4	71,38	70,27	58,67
P2D1	67,41	67,98	60,20	P4D1	63,77	69,53	60,51
P2D2	27,43	18,59	23,68	P4D2	15,33	24,57	27,90
P2D3	30,99	27,79	31,64	P4D3	18,48	25,04	27,17
P2D4	14,61	12,09	12,91	P4D4	10,50	12,64	11,97
P2E1	13,61	15,11	8,22	P4E1	15,18	13,30	7,30
P2E2	35,40	42,31	17,54	P4E2	34,62	28,34	11,19
P2E3	35,44	45,02	7,56	P4E3	46,67	28,97	4,41
P2E4	68,87	73,86	48,45	P4E4	82,28	81,74	55,10

Příloha VI: Naměřené hodnoty XYZ Testovacího obrazce, 2° pozorovatel, osvětlení D50

	X	Y	Z		X	Y	Z
T1A1	23,26	24,99	7,87	T3A1	72,16	73,49	61,46
T1A2	29,86	34,91	32,67	T3A2	30,38	28,31	14,04
T1A3	24,37	16,43	4,24	T3A3	23,45	16,32	15,62
T1A4	84,54	88,47	62,25	T3A4	65,57	60,47	26,45
T1B1	42,13	49,05	34,02	T3B1	8,44	7,82	15,06
T1B2	27,20	24,18	19,72	T3B2	41,39	46,07	47,53
T1B3	30,49	45,02	41,64	T3B3	13,44	18,87	10,86
T1B4	6,74	6,32	3,99	T3B4	26,00	35,39	32,16
T1C1	35,16	36,94	46,17	T3C1	32,12	46,11	30,36
T1C2	11,23	17,76	20,30	T3C2	55,93	58,50	46,23
T1C3	17,81	16,88	4,72	T3C3	28,47	32,46	8,78
T1C4	50,17	37,85	7,81	T3C4	15,98	18,84	18,77
T1D1	17,57	14,41	7,62	T3D1	79,16	77,99	44,35
T1D2	72,40	74,92	19,54	T3D2	20,02	17,16	4,62
T1D3	34,19	34,96	20,82	T3D3	14,24	15,15	15,22
T1D4	57,40	68,54	22,33	T3D4	27,17	21,60	24,26
T1E1	46,51	59,76	31,75	T3E1	67,60	59,93	52,28
T1E2	63,96	65,77	50,23	T3E2	14,40	9,58	3,96
T1E3	10,45	8,61	17,46	T3E3	38,02	47,28	52,72
T1E4	18,93	24,52	29,98	T3E4	7,26	10,60	10,15
T2A1	11,56	12,60	9,65	T4A1	24,02	30,57	28,26
T2A2	34,44	40,54	44,30	T4A2	70,13	62,25	22,08
T2A3	14,37	22,21	17,00	T4A3	51,15	54,76	45,19
T2A4	53,23	58,73	66,32	T4A4	7,74	9,69	14,26
T2B1	32,64	36,89	15,81	T4B1	50,98	44,93	53,52
T2B2	54,68	59,50	52,61	T4B2	10,67	9,64	7,37
T2B3	10,40	10,12	9,87	T4B3	38,55	40,63	5,32
T2B4	44,41	30,78	19,35	T4B4	34,21	31,64	42,65
T2C1	12,42	18,06	14,06	T4C1	30,35	41,67	48,71
T2C2	27,23	37,70	31,71	T4C2	40,15	39,05	28,60
T2C3	72,51	80,86	47,20	T4C3	42,04	28,27	9,43
T2C4	65,18	62,68	12,06	T4C4	64,64	66,23	45,58
T2D1	20,52	22,27	11,50	T4D1	15,69	9,55	3,91
T2D2	38,48	39,08	36,72	T4D2	72,38	81,16	28,28
T2D3	25,19	24,45	41,77	T4D3	19,36	16,81	13,78
T2D4	5,06	6,56	6,90	T4D4	9,65	11,99	21,51
T2E1	18,17	13,92	16,20	T4E1	77,65	84,08	59,16
T2E2	46,15	57,40	27,68	T4E2	12,41	15,20	6,09
T2E3	29,73	23,41	7,86	T4E3	51,86	51,56	24,81
T2E4	73,26	76,35	52,68	T4E4	56,51	70,06	53,44

Příloha VII: Výpočet barvé odchytky ΔE_{00} a odchylek atributů $\Delta L'$, $\Delta C'$, $\Delta H'$ [28]

Výpočet barvé odchytky ΔE_{00} je dán *Rovnicí 8*.

$$\Delta E_{00} = \left[\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H} \right) \right]^{1/2} \quad (8)$$

kde $S_L = 1 + 0,015(L' - 50)^2 / (20 + (L' - 50)^2)^{0,5}$

$$S_C = 1 + 0,045 C'$$

$$S_H = 1 + 0,015 T C'$$

Odchytky atributů $\Delta L'$, $\Delta C'$ a $\Delta H'$ jsou dány vztahy:

$$\Delta L' = L'_T - L'_S$$

$$\Delta C' = C'_T - C'_S$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_T C'_S} \sin(\Delta h' / 2)$$

kde index T je hodnota zkušební vzorku a index S je hodnota referenčního vzorku a kde:

$$\Delta h' = h'_T - h'_S$$

$$L' = L^*$$

$$a' = (1 + G)a^*$$

$$b' = b^*$$

$$C' = \sqrt{a'^2 + b'^2}$$

$$h' = \tan^{-1} \left(\frac{b'}{a'} \right).$$

Hodnoty G a T jsou vypočítány pomocí:

$$G = 0,5 - 0,5 \sqrt{\frac{C_{ab}^{*7}}{(C_{ab}^{*7} + 25^7)}}$$

$$T = 1 - 0,17 \cos(h' - 30) + 0,24 \cos(2h') + 0,32 \cos(3h' + 6) - 0,20 \cos(4h' - 63).$$

Rotální koeficient R_T je dán vztahem:

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta) R_C$$

kde $R_C = 2\sqrt{C'^7 / (C'^7 + 25^7)}$

a $\Delta\theta = 30 \exp \left\{ -((h' - 275)/25)^2 \right\}$.