



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

Katedra přírodovědných oborů

Porovnání barevného vidění savců a člověka

Comparison of color vision of mammals and human

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Optika a optometrie

Vedoucí práce: Mgr. Jana Urzová

Martin Jíška

Kladno 2017

Z a d á n í b a k a l á ř s k é p r á c e

Student: **Martin Jíška**
Obor: Optika a optometrie
Téma: **Porovnání barevného vidění savců a člověka**
Téma anglicky: Comparison of color vision of mammals and human

Zásady pro vypracování:

Student se seznámí s problematikou barevného vidění a téma zpracuje formou rešerše. Student s pomocí fotoaparátu s barevnými filtry a vhodného grafického programu nasimuluje vnímání barev různými savci (kočka, pes, kuň, vodní živočichové apod.), porovná je s barevným viděním člověka a pokusí se vysvětlit důvody jednotlivých cest evoluce daného barevného vnímání.

Seznam odborné literatury:

- [1] ROZSÍVAL, P. a kol., Oční lékařství, ed. 1, Galén, Karolínium, 2006, ISBN 80-7262-404-0
- [2] SYNEK, S., SKORKOVSKÁ, Š., Fyziologie oka a vidění, ed. 2, Praha: Grada, 2014, ISBN 978-80-247-3992-2
- [3] KUCHYNKA, P. a kol., Oční lékařství, ed. 1, Praha: Grada Publishing, 2007, 812 s., ISBN 978-80-247-1163-8

Zadání platné do: 11.09.2018
Vedoucí: Mgr. Jana Urzová


.....
vedoucí katedry / pracoviště



.....
děkan

V Kladně dne 20.02.2017

Název bakalářské práce: **Porovnání barevného vidění savců a člověka**

Abstrakt

Teoretickou částí práce je rešerše embryologie a stavby sítnice lidského oka, fyziologie vidění především z hlediska barevného vjemu, teorie barevného vidění a barevné modely RGB a CMYK. Další částí je rešerše barevného vjemu živočichů z hlediska evoluce a přehled barevného vidění vybraných živočichů. Bližší zaměření práce je na tři druhy zvířat: kočka domácí a pes domácí, nejběžněji se vyskytující savci v blízkosti člověka, a dále na delfína skákavého, vodního savce.

V praktické části jsou s pomocí barevných fotografických filtrů vytvořené fotografie, které částečně simulují barevné vidění zmíněných zvířat, jejich porovnání s následnou úpravou fotografií v grafickém programu a zpracované výsledky měření propustnosti světla použitých barevných fotografických filtrů, měřených na spektroskopu.

Klíčová slova: stavba sítnice, vnímání barev, vidění savců, simulace zraku zvířat

Name of the Bachelor thesis: **Comparison of colour vision of mammals and humans**

Abstract

The aim of the theoretical part is the research of embryology and structures of human retina, physiology of vision, particularly in terms of colour perception, colour vision theory and colour models RGB and CMYK. The subsequent part includes the research of colour perception of animals in terms of evolution and an overview of colour vision of selected groups of animals. The paper focuses more thoroughly on three animal species most commonly occurring near people: domestic cat, dog and dolphin, representing water mammals.

The practical part is based on photos created by the means of colour photographic filters that partially simulate dichromatic vision of the animals and their comparison with subsequent modification using graphic editor. This part also includes the results of the measurement of light transmission of the employed colour photographic filters, measured on a spectroscope.

Key words: retina construction, colour perception, vision of mammals, simulation of animal vision

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Porovnání barevného vidění savců a člověka* vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně dne

.....

podpis autora

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucí paní Mgr. Janě Urzové za pomoc, ochotu a cenné rady během tvorby této práce.

Dalším člověkem, kterému bych rád poděkoval, je Ing. Ida Skopalová, která mi poskytla k zapůjčení barevné filtry, což byl samý základ celé mojí bakalářské práce, ještě jednou děkuji.

A v neposlední řadě patří veliké poděkování celé mojí rodině a přítelkyni za podporu, důvěru a motivaci během celého studia.

Obsah

Úvod.....	1
1 Lidské oko.....	2
1.1 Embryologie	2
1.1.1 Embryologie sítnice	3
1.2 Stavba sítnice.....	4
1.2.1 Topografie sítnice.....	5
1.2.2 Neuroretina	6
1.3 Fyziologie vidění.....	8
2 Barevné vidění člověka	11
2.1 Teorie barevného vidění	11
2.1.1 Trichromatická teorie.....	11
2.1.2 Teorie oponentního procesu	12
2.2 Barevné modely	13
2.2.1 RGB model.....	13
2.2.2 CMYK model.....	14
3 Barevné vidění zvířat.....	15
3.1 Evoluce barevného vjemu	15
3.2 Rozdílný vjem barev u různých živočišných druhů	16
3.3 Kočka domácí	17
3.3.1 Barevné vidění kočky domácí	17
3.4 Pes domácí.....	18
3.4.1 Barevné vidění psa domácího.....	18
3.5 Delfín skákavý	19
3.5.1 Barevné vidění delfína skákavého.....	20
4 Simulace barevného vidění vybraných savců	22
4.1 Pomůcky pro vytvoření simulace.....	22
4.1.1 Měření spektrální propustnosti barevných filtrů 1.....	23
4.1.2 Měření spektrální propustnosti barevných filtrů 2.....	26
4.2 Simulace barevného vidění kočky domácí	30
4.3 Simulace barevného vidění psa domácího.....	32
4.4 Simulace barevného vidění delfína skákavého	35
5 Porovnání barevných filtrů s následnou úpravou v PC	40
Diskuze.....	43
Závěr.....	45
Seznam zdrojů.....	46
Seznam obrázků.....	50

Úvod

Zakotveným nepravdivým rozšířeným faktem mezi lidmi je, že ostatní savci mohou vidět stejný obraz skutečnosti jako my, nebo naopak že ostatní savci vidí jen obraz černobílý. Díky této mylné představě lidé například kupují hračky pro mazlíčky takových barev, které pro zvířata nejsou barevně atraktivní, a tudíž o ně nejeví takový zájem, jaký očekáváme.

Cílem projektu je popsat stavbu sítnice jednotlivých vybraných savců, na základě toho definovat teorii, jaké barevné spektrum daný živočich může zaznamenat a vytvořit obrázky, které budou simulovat barevné vidění jednotlivých živočichů a budou sloužit jako pomůcka pro všechny, kteří budou chtít zjistit, jak vidí jejich domácí mazlíček. Fotografie budou pořízeny fotoaparátem, který bude mít před objektivem barevné filtry dle barevného vidění zvoleného savce.

Následně budou fotografie pořízené s barevnými filtry porovnány s obrázky, které vzniknou až následnou úpravou originálních fotografií ve vhodném grafickém programu. Jednou z hypotéz, kterou bych chtěl dokázat nebo naopak vyvrátit, je, že fotografie pořízené již s barevnými filtry budou působit věrněji a budou mít lepší výsledek než fotografie až následně upravované v grafickém editoru.

Dalším cílem projektu je pokusit se odhalit důvody evoluce vedoucí k odlišnostem stavby sítnice jednotlivých druhů savců, proč nevidí určité světelné spektrum a proč naopak dokáží rozeznat jiné světelné spektrum než člověk.

Nedílnou součástí této práce bude také porovnání s jinými pracemi souvisejícími s touto tematikou, či přímo obsahující simulace vidění zvířat.

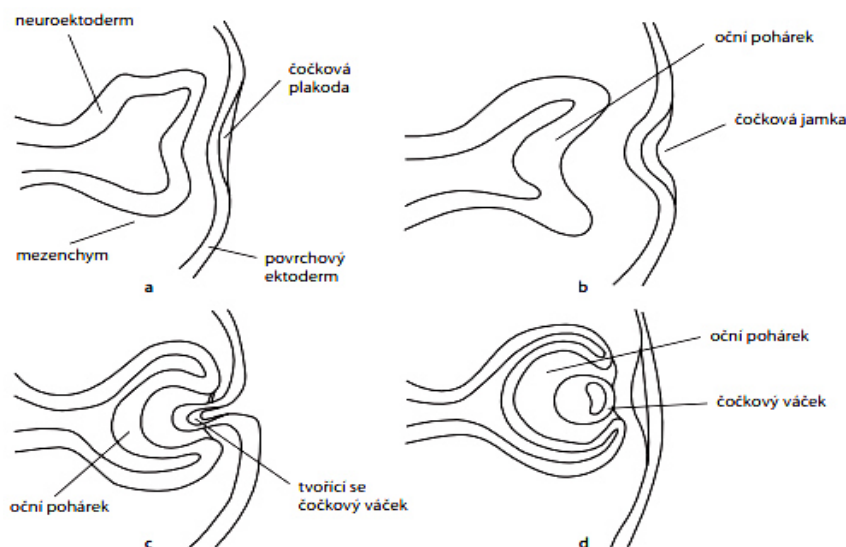
1 Lidské oko

Lidské oko je složitý párový smyslový orgán, který nám umožňuje plně vnímat svět kolem nás a reagovat na něj. Dále nám poskytuje vjem prostoru, díky čemuž se snáze pohybujeme a reagujeme na nebezpečí. Schopnost vidět, tedy mít zdravé oči, je důležitým až stěžejním předpokladem pro plnohodnotný život každého z nás, mnozí si však toto vůbec neuvědomují.

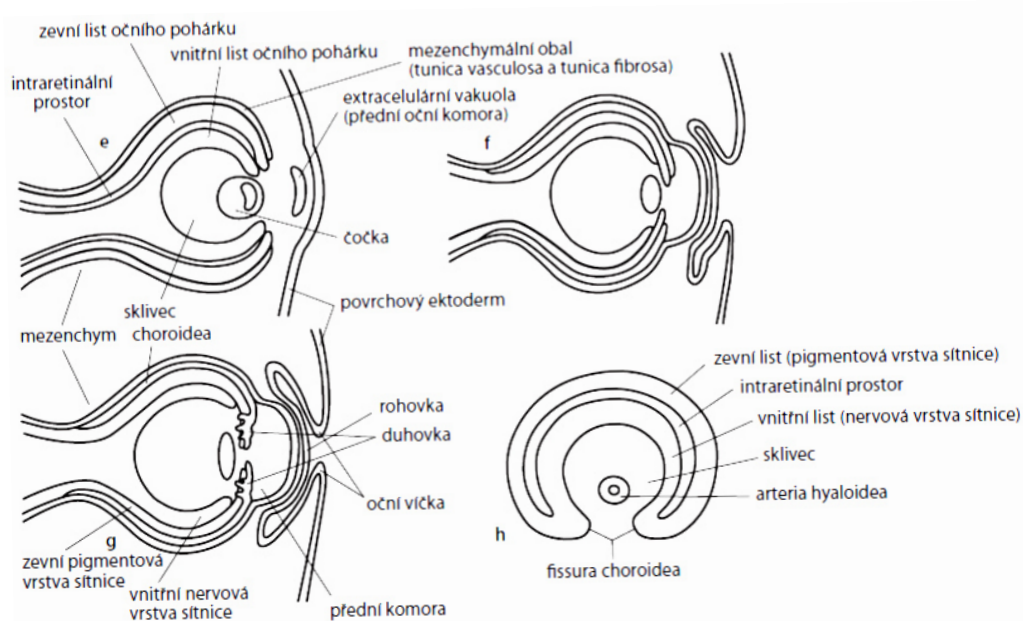
1.1 Embryologie

Zjednodušeně řečeno je embryologie nauka o vývoji zárodku. Zabývá se jeho vznikem, růstem až po konečnou fázi embryonálního vývoje – porod. Během tohoto růstu vysvětluje vývoj jednotlivých orgánů a částí těla, způsoby a příčiny jejich tvorby. Pro potřeby této práce se blíže zaměříme na embryologii oka (viz Obrázek 1, Obrázek 2). [8]

Oko se u člověka začíná vyvíjet ve 4. týdnu těhotenství a základní stavební kameny pro něj jsou neuroektoderm předního mozku, mezenchym a povrchový ektoderm. Postupně se vytváří oční rýhy, následně oční váčky a neposlední řadě vznikají oční pohárky, ve kterých se po uzavření vytváří primitivní *corpus vitreum* neboli slivec. [1]



Obrázek 1: Vývoj oka 1 [1]



Obrázek 2: Vývoj oka 2 [1]

1.1.1 Embryologie sítnice

Sítnice se skládá z listů očního pohárku, jejichž vývoj není dokončen současně. Vnitřní list se vyvíjí v embryonální fázi vývoje, ale jeho dokončení probíhá až po porodu, kdežto vnější list se již během embryonálního vývoje mění v pigmentový epitel. [5]

„Oba listy očního pohárku jsou zpočátku tvořeny cylindrickými buňkami. Buňky zevního listu se postupně snižují, od 5. týdne vývoje produkují melaninová zrna a mění se v jednovrstevný pigmentový epitel (*pars pigmentosa retinae*). Buňky vnitřního listu se proliferací mění ve víceřadý neuroepitel a tvoří *pars nervosa retinae*. Původní buňky mají multipotentní diferenciací potenciál a chovají se jako kmenové buňky sítnice. Jejich produkcí vznikají prekursorů všech buněk v sítnici (s výjimkou pigmentového epitelu), tj. neuroblasty a spongioblasty. Z neuroblastů se diferencují jednak světločivné tyčinky a čípky jako unipolární buňky a jednak bipolární neurony a gangliové buňky. Migrací neuroblastů vzniká typická laminární struktura a axony světločivných buněk se propojují s dendrity bipolárních buněk, které zase vytvářejí synapse s gangliovými buňkami.“ [2]

Jakmile embryo dosáhne velikosti 1,3 cm, začínají se v místě sítnice tvořit gangliové buňky a během vývoje si udržují výraznou početní převahu v makulární

části sítnice, oproti periférii. Na konci pátého měsíce embryonálního vývoje startuje vývoj a formování čípků a tyčinek z primitivní jádrové vrstvy. Tyčinky a čípky, jako světločivné elementy, dozrávají formováním jejich zevní podoby, která se dostává do kontaktu s mikroklky pigmentového epitelu. Tímto spojením vzniká konečná sítnice, avšak spojení není naprosto pevné, pomáhá zde nitrooční tlak, ale i přesto je riziko oddělení obou vrstev, což se nazývá *amotio retinae*. Vývoj fovey nastává od šestého měsíce a do její finální podoby dozrává až po porodu. Zpočátku embryonálního vývoje je vrstvou sítnice pokrytá celá vnitřní plocha bulbu až k limbu, časem se tato plocha zmenšuje směrem k ekvátoru a místo ní se vytváří slepá část sítnice (*pars caeca retinae*), která je již bez světločivných buněk a neuronů. [5]

Oko začíná být vlivem vývoje pigmentového epitelu citlivé na světlo již v 7. měsíci těhotenství. *Fovea centralis* z celého vývoje sítnice dozrává jako poslední a obsahuje největší množství všech buněk oproti periférii, není tomu však nastálo. Těla gangliových buněk začínají tuto oblast postupně opouštět, ale zůstává propojení s bipolárními buňkami a čípky, kterých je zde také největší množství oproti zbytku optické části sítnice. Fovea se nadále diferencuje, formuje a dozrává přibližně až do čtyř let vývoje dítěte. [2]

1.2 Stavba sítnice

Sítnice je v oku jednou z nejdůležitějších struktur, jelikož zpracovává světelný signál a převádí jej na nervový vzruch. Děje se tak díky propojení světločivných elementů a nervových vláken, díky čemuž je sítnice perfektní živý fotoreceptor. Pro vysvětlení principů fungování sítnice je potřeba nejdříve popsat kompletní stavbu této nejdůležitější části oka.

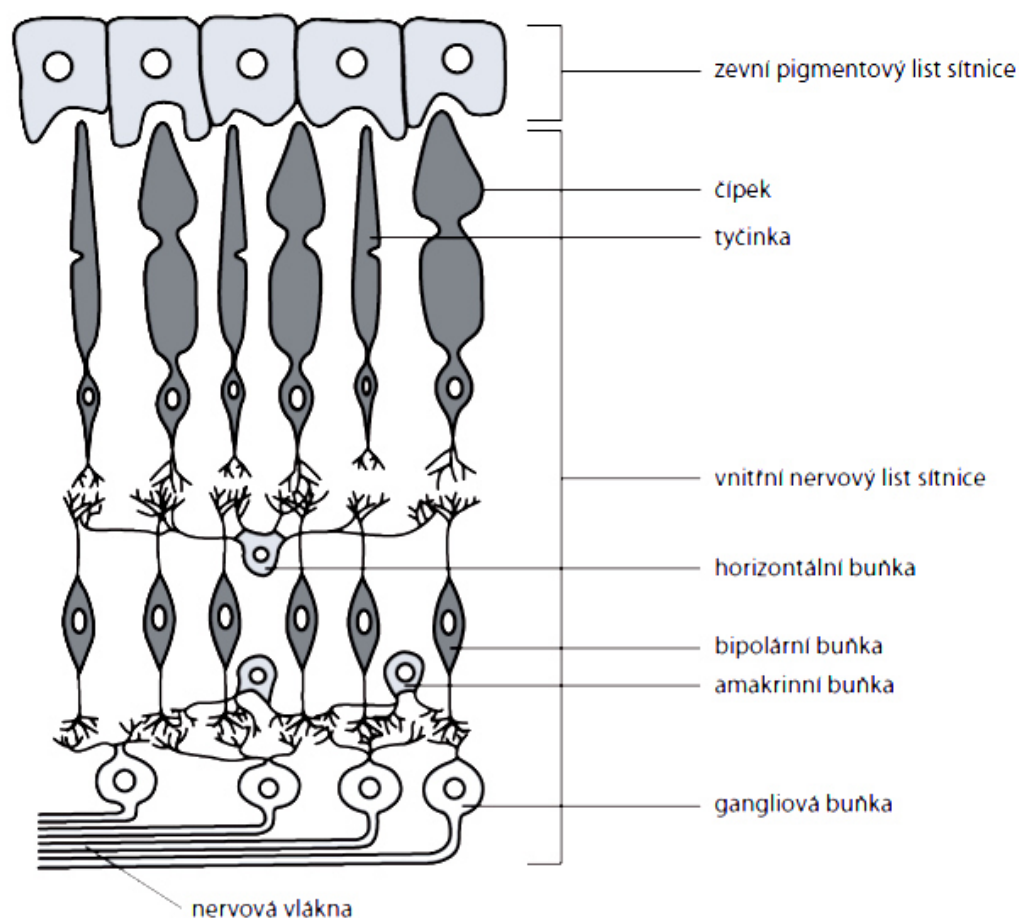
Jak již bylo zmíněno, sítnici můžeme rozdělit na část bez světločivných elementů, zvanou *pars caeca retinae*, nacházející se v přední části bulbu, a část s tyčinkami a čípky, nazývanou *pars optica retinae*, nacházející se v zadní části bulbu. V přední části můžeme nalézt řasnaté tělísko a zadní plochu duhovky. V zadní části jsou umístěny tyčinky, čípky a neurony. Linie oddělující obě části se nazývá *ora serrata*. [2,5]

Zadní část, která má tloušťku zhruba 0,1 až 0,4 mm je v úzkém kontaktu s cévnatkou, ale bez přímého spojení, kromě vstupu zrakového nervu, což je jedna z hlavních příčin možného odchlípení sítnice při úrazech. Posvítíme-li skrz oko, až na sítnici, bude se jevit oranžová až červená, především díky cévnatce v pozadí. Při podrobném zkoumání zjistíme, že se sítnice skládá z 11 samostatných vrstev, lze ji ale také rozdělit na vnější a vnitřní část. Vnější část se skládá z retinálního pigmentového epitelu s Bruchovou membránou, jehož funkce je důležitá zejména z hlediska pohlcování rozptýleného světla, čímž zabraňuje dalším odrazům a tím zkreslení a znehodnocení výsledného obrazu. Vnitřní část sítnice se skládá ze samotných fotoreaktivních receptorů a několika druhů nervových buněk. [1,2,4]

1.2.1 Topografie sítnice

Při celkovém pohledu na vnitřní část sítnice můžeme rozlišit několik základních struktur. Laterálně oproti zadnímu pólu oka se nachází *makula* neboli žlutá skvrna, což je eliptická oblast o průměru přibližně 3 mm, nejdůležitější část sítnice vůbec. V jejím centru se nachází *fovea centralis*, což je místo našeho nejostřejšího vidění a leží také ve vrcholu optické osy. V *makule* se nacházejí pouze čípky, které jsou zde menší než ve zbytku sítnice a také v mnohem větší hustotě. Mediálně od makuly ve vzdálenosti 4 mm můžeme nalézt vstup zrakového nervu, což je bělavá oblast o průměru přibližně 1,5 mm, která neobsahuje žádné světločivné elementy a je nazývána slepou skvrnou. [1,2]

Na následujícím schematickém průřezu sítnicí (viz Obrázek 3) si můžeme prohlédnout všechny základní vrstvy sítnice a jejich pořadí (shora začíná nejvzdálenější vrstva od rohovky). Z obrázku také vyplývá, že světlo, procházející optickou soustavou, oka musí před dopadem na světločivné receptory ještě projít *neuroretinou*, neboli vrstvou sítnice obsahující různé typy nervových buněk a také buňky gangliové.



Obrázek 3: Schematický průřez sítnicí [1]

1.2.2 Neuroretina

Neuroretina se skládá ze smyslových buněk (tyčinky a čípky) a ze dvou druhů neuronů (bipolární buňky a gangliové buňky). [2,5]

Prvním druhem neuronů sítnice jsou bipolární buňky. Zprostředkovávají přenos signálu ze smyslových buněk k buňkám gangliovým. Můžeme je rozdělit na dva typy podle toho, kolik spojení obsahují. Individuální obsahují spojení pouze mezi jednou smyslovou buňkou a jednou gangliovou. Tento typ spojení se nachází především v centru *fovey* a zajišťuje nám největší rozlišovací schopnost. Difúzní typ zajišťuje spojení od více smyslových buněk ke gangliovým buňkám, nachází se většinou v periferních oblastech sítnice. S větším počtem spojení na jednotlivé smyslové buňky klesá rozlišovací schopnost. [3,5]

Dalším druhem neuronů jsou buňky gangliové, které mají za úkol přenos signálu od bipolárních buněk až do mozku – postupně z nich vzniká optický nerv. Počet jejich vrstev klesá od sedmi po jednu směrem z centra *fovey* k periférii. Tímto směrem také klesá rozlišovací schopnost oka. [2,5]

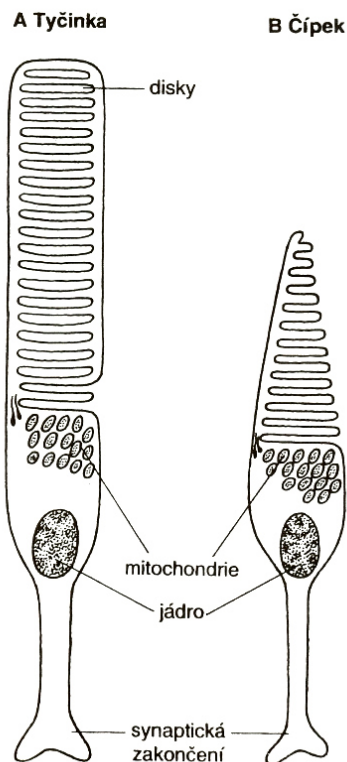
„Smyslových buněk můžeme nalézt v sítnici až 140 miliónů, z nichž drtivou většinu tvoří tyčinky a přibližně 6 miliónů tvoří čípky, gangliových buněk se zde nachází přibližně 1 milión.“ [1]

Tyčinky

Skotopické vidění nám umožňují výhradně tyčinky. Jejich hustota je v rozmezí 30 000 až 160 000 na mm², avšak stárnutím jejich počet klesá téměř o třetinu. Méně jich nalezneme v periférii a v oblasti centra makuly nejsou téměř žádné. Tyčinka se stejně jako sítnice skládá z vnější a vnitřní části. Vnější část obsahuje fotoaktivní barvivo, tzv. zrakový purpur (rhodopsin), který chemickou změnou své konformace zajišťuje transformaci světelných paprsků na nervové vzruchy. Aktivita zrakového purpuru je maximální za šera nebo téměř úplně tmy. Tyčinky jsou specializované pro vnímání světelných rozdílů i za velmi nízkých hladin osvětlení. Vnitřní část tvoří synapse nervových vláken a jádro buňky. [1,5]

Čípky

Receptory sítnice, které nám umožňují barevný vjem. Hustota se pohybuje v rozmezí 150 000 až 6 000 čípků na mm². Nejvyšší hustota jich je v oblasti žluté skvrny, směrem do periférie hustota rapidně klesá a tím se také snižuje rozlišovací schopnost. Existují tři základní typy čípků v lidském oku. Senzitivita jednotlivých druhů je dána specifickým typem proteinu (různé typy opsinu). První typ jsou L-čípky, které obsahují L-opsin a mají absorpční maximum okolo 575 nm, což odpovídá červené barvě viditelného světelného spektra. Druhým typem jsou M-čípky, které obsahují M-opsin a mají absorpční maximum okolo 535 nm, což odpovídá zelené barvě. Třetím typem jsou S-čípky obsahující S-opsin, které mají absorpční maximum okolo 440 nm, což odpovídá modré barvě viditelného světelného spektra. [1,5,6]



Obrázek 4: Schematické znázornění tyčinky a čípku [6]

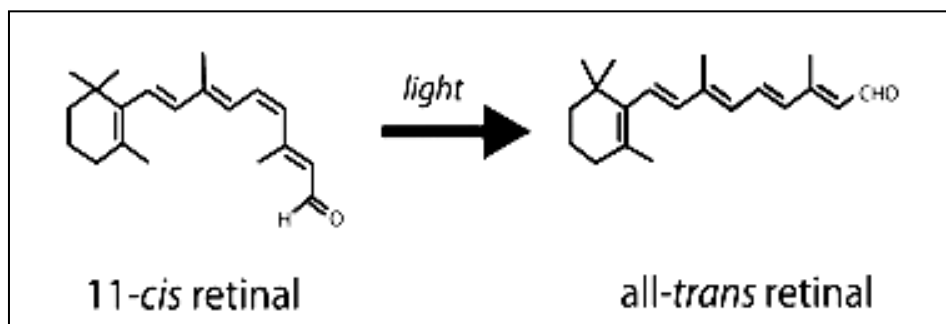
1.3 Fyziologie vidění

Proces správného zpracování světelných paprsků a jejich převod na nervový vzruch je základní předpoklad funkčního zrakového systému a z toho vyplývajícího kompletního barevného vidění a vjemu všeho kolem nás.

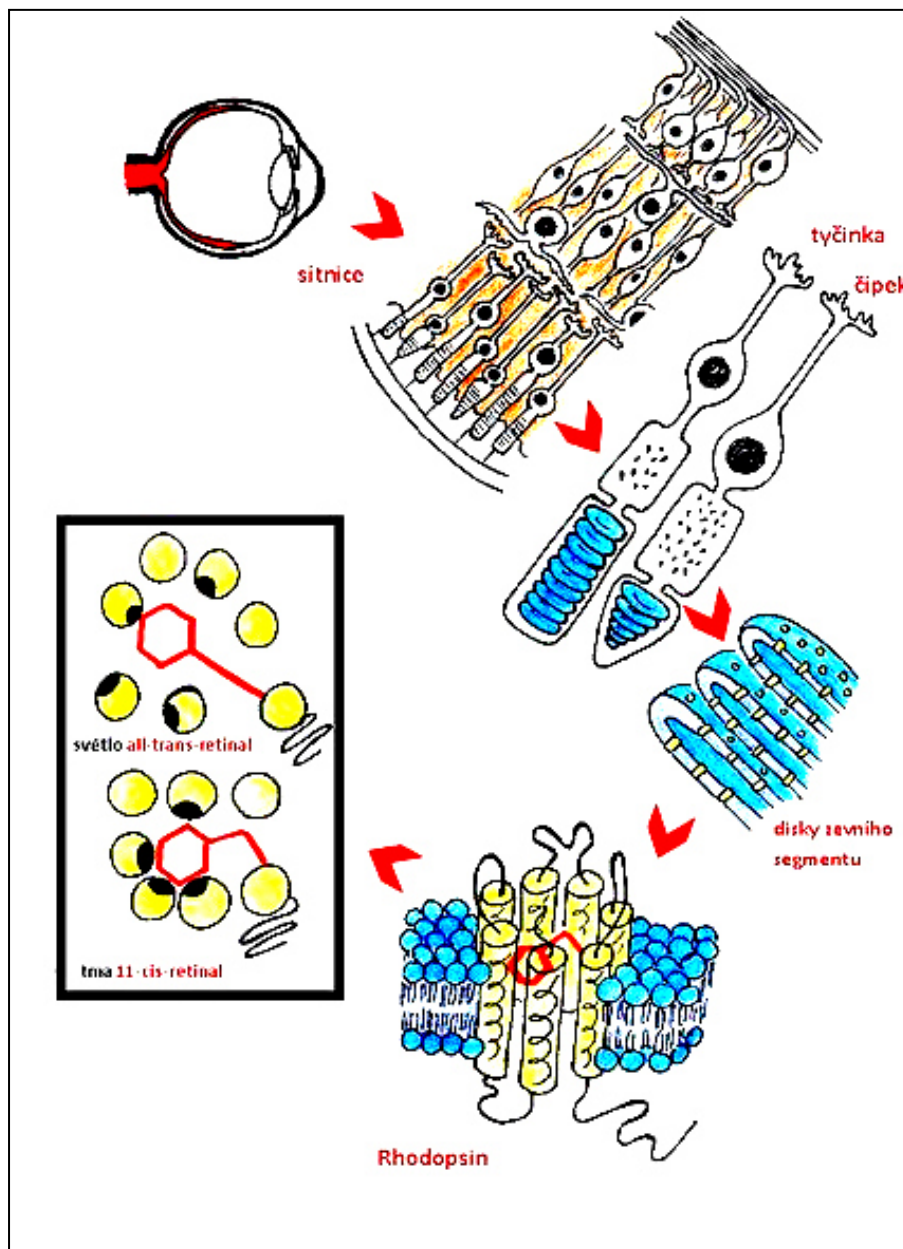
Velmi zkráceně řečeno se děje toto: po dopadu fotonu na fotocitlivou buňku receptoru dochází, v případě že je tento receptor citlivý na danou vlnovou délku, ke konformační změně molekuly barviva (rhodopsin), která vede k prvotní separaci náboje. Vzniklý potenciálový rozdíl je pak přenášen a zpracováván neurony. V konečné fázi v mozku vzniká výsledný zrakový vjem. [10]

Fotoreceptorové buňky oka jsou tyčinky a čípky. Každý typ má zploštělé disky, které obsahují fotoreceptorový pigment. Tento pigment je rhodopsin v tyčinkách a červený, zelený a modrý pigment v čípcích. Rhodopsin je transmembránový protein s prostetickou skupinou 11-cis-retinal. Rhodopsin bez 11-cis-retinalu je opsin. Podstatou biochemického procesu je, že pronikající foton

způsobí izomerizaci 11-cis formy retinalu na all-trans formu retinalu. Tato izomerizace způsobí konformační změny proteinu (rhodopsinu u tyčinek, červeného, zeleného a modrého pigmentu u čípků) a tím ovlivní klidový membránový potenciál buňky. Výsledkem je elektrický signál přenášený pomocí optického nervu do mozku. 11-cis-retinal je odvozen od vitamínu A. Rozštěpením b-karotenu získáme 2 molekuly all-trans-retinolu. V pigmentové epitelální vrstvě sítnice je enzym, který katalyzuje izomerizaci all-trans-retinolu na 11-cis-retinol. Oxidace 11-cis-retinolu na 11-cis-retinal a jeho vazba na opsin probíhá ve vnějším segmentu. Elektrický signál mozku je dán změnou elektrického klidového membránového potenciálu, který činí u fotoreceptorových buněk -30 mV (oproti -70 mV v neuronech) po hyperpolarizaci na -35 mV. Biochemicky je tento klidový pozitivnější potenciál (oproti neuronům) zajišťován pootevřením Na^+ kanálků. Pootevření Na^+ kanálků je způsobeno vazbou cyklického GMP (guanosinmonofosfát) na sodný kanálek. Klesající koncentrace cGMP znamená pokles počtu otevřených kanálků Na^+ a membránový potenciál se stává negativnější (hyperpolarizace). [11]



Obrázek 5: Změna konformace retinalu [12]



Obrázek 6: Schéma biochemie vidění [24]

2 Barevné vidění člověka

Člověk dokáže rozlišit barvy ve viditelném spektru, což je rozmezí vlnových délek 380 až 760 nm. V tomto úseku světelného spektra, dokážeme rozlišit mnoho různých barev, stěžejním příkladem může být duha na obloze, která určitým způsobem charakterizuje barevnou škálu viditelného spektra.

Především čípkům, jako světločivným elementům, můžeme poděkovat za to, že dokážeme vnímat tolik barev okolo nás. Přibližně 6 miliónů čípků v naší sítnici ovšem není stejných (nemají identickou spektrální citlivost), tento počet dávají dohromady tři druhy: S-čípky (modrá barva – 440 nm), M-čípky (zelená barva – 535 nm) a L-čípky (červená barva – 575 nm), seřazeno dle stoupající vlnové délky. Každý druh čípku totiž reaguje na jinou vlnovou délku dopadajícího světla, každý má jinou spektrální citlivost. Tato rozdílná citlivost je dána různým typem fotoaktivního pigmentu. Červené a zelené čípky jsou si navzájem hodně podobné - většina savců je na rozdíl od nás dokonce vůbec nemá takto rozlišené a místo nich má jen jeden typ „žlutých“ čípků (tudíž vidí pouze dichromaticky - podobně jako někteří barvoslepi lidé). Početně se nachází na sítnici nejvíce čípků maximální citlivostí pro červenou barvu (64 %), poté následují čípky s maximální citlivostí na zelenou barvu (32 %) a nejméně se na sítnici nachází čípků s maximální spektrální citlivostí pro modrou barvu (4 %). [13]

2.1 Teorie barevného vidění

Ohledně vzniku a zpracování barevného vjemu lidským okem existuje několik teorií. Žádná však není stoprocentně platná, jelikož bádání a poznání člověka v tomto směru ještě nedošlo konce a také z důvodu, že tento proces je natolik složitý a sofistikovaný a tudíž zatím ne zcela pochopený.

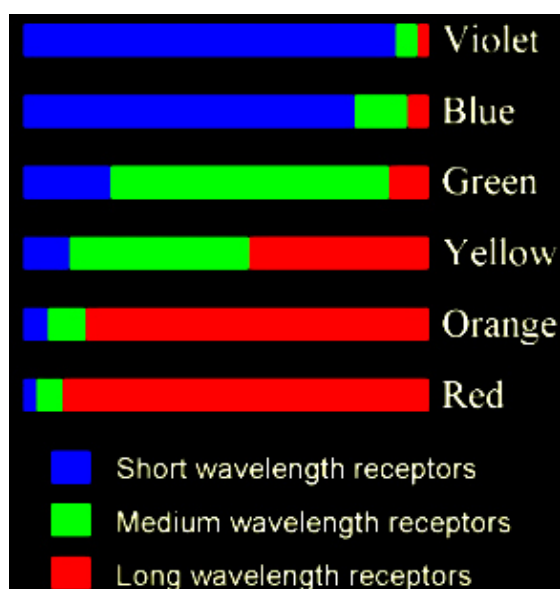
2.1.1 Trichromatická teorie

Podle Thomase Younga existují na sítnici tři typy specializovaných receptorů s citlivostí v oblasti červeného, zeleného a modrého spektra. Hermann von Helmholtz

tuto teorii experimentálně doložil. Navíc ji rozšířil o fakt, že pásma citlivosti receptorů se překrývají a citlivost receptorů pokryje celé viditelné pásmo. [14]

Trichromatická teorie tedy zní: Dopadající světlo v různé míře stimuluje tři receptorové systémy a jejich poměrná aktivace je základem pro výsledný vjem barvy. Například vjem žluté je výsledkem vysoké míry aktivace dvou receptorů reagujících zejména na světlo dlouhých a středních vlnových délek (L čípky a M čípky) a poměrově výrazně nižší míry aktivace receptorů reagujících zejména na světlo krátkých vlnových délek (S čípky) – viz Obrázek 7. [14]

Zjednodušeně řečeno, podle této teorie výsledný barevný vjem vzniká vždy z kombinace reakce různých druhů čípků na sítnici, záleží ovšem na velikosti té dané reakce.



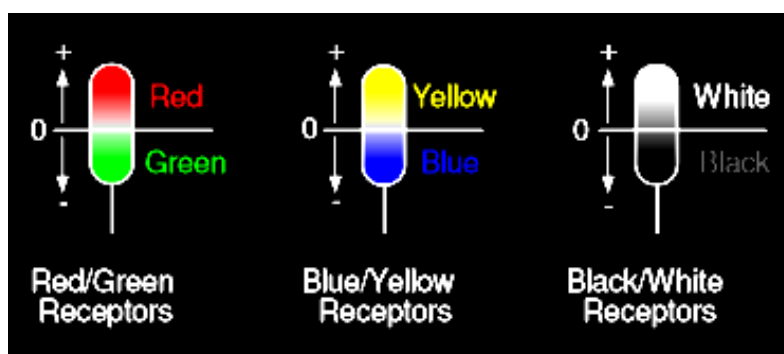
Obrázek 7: Ukázka míry aktivace receptorů [14]

2.1.2 Teorie oponentního procesu

Ewald Hering jako zakladatel této teorie tvrdí, že barevný vjem je zpracováván tak, že existují v receptorech dvě hypotetické látky a při dopadu světelného záření se aktivuje vždy jedna z nich. Zjednodušeně řečeno, jedna se zapne a druhá se vypne. Vypracoval teorii, že tyto látky jsou nejcitlivější na tyto čtyři základní barvy: modrá, zelená, žlutá a červená. Reakce na tyto barvy je v receptorech zastoupena v párech,

dle zmiňované hypotetické látky. Dvojice jsou červená – zelená a dále modrá – žlutá. Ewald Hering nedlouho po zveřejnění této teorie přidal její rozšíření o třetí typ hypotetické látky, která zapíná a vypíná černou a bílou barvu (tyčinky). [16]

Podle něj se může mísit jedině signál z černo-bílého receptoru a může tak vznikat i šedý výsledný vjem, ale signál z barevných receptorů se nemísí. [16]



Obrázek 8: Fotoreceptory dle Heringa [14]

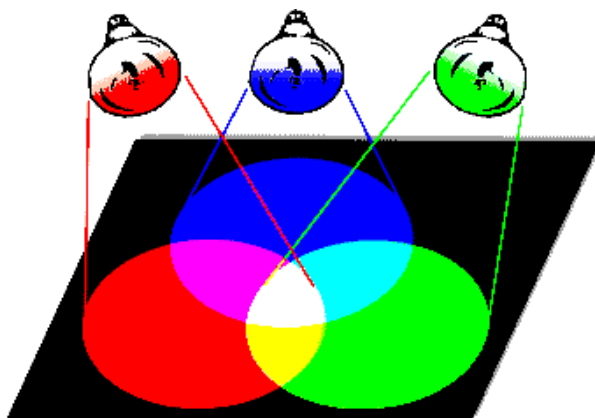
Středová a obvodová část fotoreceptoru reagují odlišně na druh dopadajícího světla. Jsou to antagonisté. Například R-G receptor reaguje buď na červenou nebo na zelenou část spektra. [15]

2.2 Barevné modely

Existují dva základní barevné modely skládání a odčítání barev, každý má své využití v dnešní moderní době. Tyto modely slouží k bližšímu vysvětlení toho, jak vznikají odstíny různých barev.

2.2.1 RGB model

Aditivní model se nazývá RGB, je založen na skládání tří základních barev: červená, zelená a modrá. Tento model využívá většina digitálních zařízení k zobrazování (například monitory, displeje telefonů, televizní obrazovky) a záznamu (digitální fotoaparáty). Zjednodušeně řečeno lze říci, že podstatou tohoto modelu je rozložení původního světelného signálu na tři základní složky. [25]

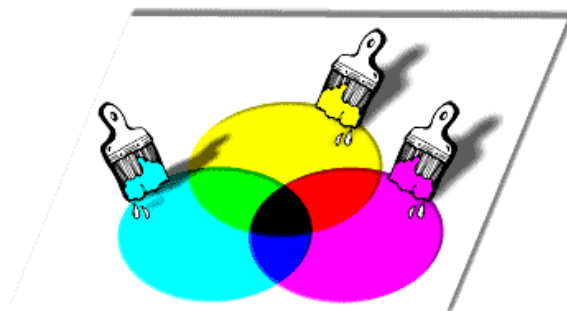


Obrázek 9: RGB model [25]

2.2.2 CMYK model

Subtraktivní (odčítací) model má zkratku CMYK, je založen na odčítání barev z kompletního spektra, tudíž bílé barvy. Bílou barvu zde zastupuje použitý papír (velmi záleží na kvalitě papíru, která ovlivní výslednou kvalitu barev), na kterém se odráží téměř všechno světlo. Barvy tudíž vytvoříme krytím jednotlivých barev spektra na papíře pomocí inkoustů: azurová (C-Cyan), purpurová (M-Magenta) a žlutá (Y-Yellow). Jednotlivé barvy inkoustů jsou doplňkové barvy k základním RGB: azurová k červené (odráží všechny vlnové délky kromě červeného světla), purpurová k zelené (odráží vše kromě zeleného) a žlutá k modré (odráží vše kromě modrého). Do tohoto modelu je z praktických důvodů přidána ještě barva černá (K-black) z důvodu úspory barev při tvoření tmavých odstínů a černé barvy. [25]

Hlavním cílem tohoto modelu je co nejvěrnější převedení digitální podoby barev do hmatatelné podoby. Používá se hlavně v tiskařství v podobě inkoustů. [25]



Obrázek 10: CMYK model [25]

3 Barevné vidění zvířat

Tato část práce je zaměřena na teoretický základ a zmapování evoluce barevného vidění vybraných zvířat a dále na simulaci barevného vjemu okolí daným zvířetem.

Každý zvířecí druh má přizpůsobené smysly přesně svému způsobu života. Během evoluce se konkrétně zrak u každé zvířecí skupiny, u každého řádu i u každého druhu vyvinul jistým způsobem, vedoucím k co nejvyšší šanci na přežití. U některých byl zrak oslaben a u jiných (pro konkrétní druh důležitější smysl) naopak zesílil, u dalších byly například všechny ostatní smysly kompletně oslabeny na úkor perfektního zraku. Úroveň zraku a důležitost mu přikládanou konkrétním živočichem jde ruku v ruce s kvalitou a rozsahem vnímání barev.

3.1 Evoluce barevného vjemu

Schopnost rozeznat určité vlnové délky od ostatních, a tudíž mít schopnost rozeznat v určité míře jednotlivé barvy, se vyvinula jen u některých skupin živočichů. Jsou to savci (zejména primáti), ptáci a hmyz (konkrétně včely, vosy a motýli). Všichni živočichové patřící do těchto skupin potřebují rozeznávat alespoň určité množství barev, ať už pro přežití, shánění potravy či rozmnožování. Například shánění potravy: primáti a ptáci jako všežravci potřebují rozeznat zralý plod od nezralého, hmyz potřebuje poznat správnou květinu a hlavně správnou její část k opylování.

Další nedílnou součástí života je rozmnožování. Všechny tyto skupiny zvířat mají své zástupce, u kterých hraje barva (barevnost, pestrost) partnera při rozmnožování významnou roli. V neposlední řadě se barevný vjem u těchto živočichů vyvinul také z důvodu bezpečnosti, aby poznali, co (ať už plod nebo jiné zvíře) mohou sníst a co bude to poslední k snědku v jejich životě, tudíž čemu by se měli raději vyhnout. [17]

3.2 Rozdílný vjem barev u různých živočišných druhů

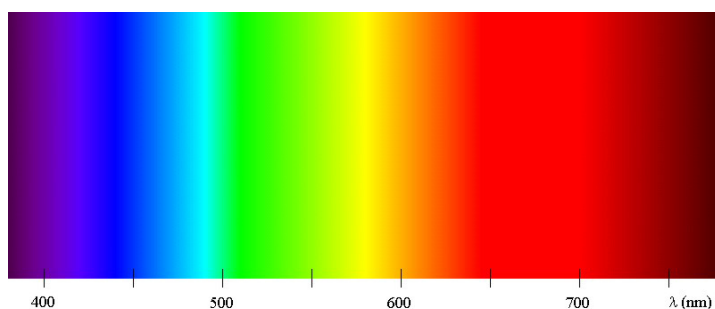
Vnímání barev můžeme celkově u zvířat rozdělit na dva základní principy. Rozhodujícím faktorem v tomto rozdělení je fotosenzitivní protein opsin. Oko první skupiny zvířat (měkkýši, koryši, pavouci a hmyz) také reaguje na určité vlnové délky, ovšem bez přítomnosti zmiňovaného proteinu. Druhá skupina – obratlovci (obojživelníci, plazi, ptáci a savci) již reaguje na světlo různých vlnových délek pomocí přítomného druhu opsinu. [18]

Tabulka 1: Přehled živočichů a vlnových délek světla, na které reagují [18]

Obratlovci	Metoda výzkumu*	Tyčinky [nm]	VS čípky [nm]	S čípky [nm]	M čípky [nm]	L čípky [nm]
Zlatá rybka (<i>Carrassius auratus</i>)	MSP/E	522	356	447	537	623
Žába (<i>Rana catesbeiana</i>)	MSP/ERG	430		431	502	562
Krokodýl (<i>Alligator mississippiensis</i>)	MSP	501		444	535	566
Želva (<i>Pseudemys scripta</i>)	MSP		360	450	518	620
Kur (<i>Gallus gallus</i>)	MSP	506	418	455	507	569
Delfin (<i>Turciops truncatus</i>)	MSP-G	488				524
Veverka (<i>Spermophilus sp.</i>)	ERG	500	436			518

* Metody výzkumu: MSP = mikrospektrofotometrie receptorů; E = elektrofyziologické nahrávání; ERG = elektroretinogram; MSP-G = mikrospektrofotometrie vyjádřená uměle [18]

Pro lepší představu barev ve spektru a jim odpovídajících vlnových délek přikládám přehled barev viditelného spektra (viz Obrázek 11).



Obrázek 11: Barevné spektrum viditelného záření [28]

3.3 Kočka domácí

Kočka domácí patří do kočkovitých šelem, což jsou převážně noční predátoři. To znamená, že jejich zrak je v první řadě přizpůsoben lovu, který probíhá většinou v noci. Kočka má širší zorné pole než člověk – téměř 200 stupňů a tím pádem větší rozsah periferního vidění. K nočnímu vidění jí slouží až osmkrát větší množství tyčinek než u člověka, které jsou navíc mnohem citlivější na světlo. [19]

Lidé naopak mají za fotopických podmínek až dvanáctkrát lepší schopnost detekovat pohyb než kočky i psi. Kočky jsou od přírody krátkozraké, jejich ostrý obraz končí za hranicí necelých 6 metrů. Navíc postrádají svaly, které mění tvar oční čočky, takže nejsou schopny akomodace. [19]

3.3.1 Barevné vidění kočky domácí

Kočka nám samozřejmě není schopna sdělit, jak vidí předložený předmět či obrázek a nepopíše nám všechny barvy, které vidí, proto bylo nutné provést výzkum experimentálně různými vědeckými metodami.

V roce 1970 provedli pánové N. W. Daw a A. L. Pearlman ve Velké Británii experiment, který měl dokázat, že kočky domácí mají víc než jeden druh čípků na

sítnici. Experiment probíhal následovně: kočka měla vždy na výběr ze dvou plastových dvířek. Po zatlačení na jedny z dvířek se dočkala pamlsku a nebo za nimi nebylo nic. Dvířka byla pokaždé nasvícena jinou barvou. V další části experimentu byla dvířka nasvícena stejně ale s jiným jasem. Zajímavé je, že kočky reagovaly vždy na barvu s vyšším jasem, než bylo bílé pozadí. Naučit kočku pravidelně rozeznat různé barvy trvalo zhruba 1 500 cyklů. [22]

Tímto experimentem se podařilo prokázat, že za fotopických podmínek kočka dokáže rozeznat některé barvy. Její sítnice obsahuje čípky reagující na vlnovou délku modré a zelené barvy. Nepodařilo se prokázat přítomnost čípků pro vlnovou délku červené barvy z celého vzorku 434 koček. [22]

Co se týká barevného vidění u kočky domácí, vědci se dlouho domnívali, že kočky mají pouze dichromatické barevné vidění, ale později se zjistilo, že mají trichromatické vidění stejně jako my. Nemají ho ale ve stejném rozsahu. Dokáží rozeznat odstíny modré a zelené, ale červená až růžová pro ně může být matoucí. [20,21]

Jako shrnutí předešlých faktů lze konstatovat, že sítnice kočky domácí obsahuje pouze dva typy receptorů, a to pro modrou a zelenou barvu, tudíž dokáže rozeznat barevné spektrum od 440 nm do 535 nm. Delší vlnové délky již kvalitně nerozezná.

3.4 Pes domácí

Jednou z vědecky podložených teorií je, že se psi vyvinuli ze samostatných dvou populací vlků v Evropě a Asii někdy v době před 14 000 a 6 400 lety. Od té doby bylo vyšlechtěno tolik různých druhů psů dle užití, že se stal pes domácí v současné době druhově jedním z nejrozmanitějších savců na světě. [26]

Pes domácí je jednoznačně nejrozšířenější savec žijící v blízkosti člověka, což byl hlavní důvod bližšího pohledu právě na tento živočišný druh.

3.4.1 Barevné vidění psa domácího

V roce 1989 v USA proběhl výzkumný experiment, který měl potvrdit přítomnost teoreticky dichromatického barevného vidění u psů. Testováni byli tři psi

běžně se vyskytující rasy, mladšího až středního věku. V místnosti, ve které probíhal experiment, měli na výběr z tří osvětlených tlačítek v úrovni čumáku. Jedno tlačítko bylo vždy osvětleno rozdílně a úkolem psů bylo toto tlačítko objevit. Za správné určení obdrželi dávku granulí. Každý pes absolvoval 200 až 400 těchto testů během celého experimentu. Výsledkem experimentu byl jasný důkaz, že psi opravdu mají dva typy čípků, jeden s citlivostí v oblasti 440 nm (modrá barva) a druhý v oblasti 550 nm (zelená barva). [23]

O tři roky později proběhl další experiment. Tentokrát byla zkoumána přímo spektrální senzitivita daného zvířete. Ke stanovení přesné spektrální senzitivity bylo použito ERT (elektroretinogram) se sondami. Měření probíhalo konkrétně na liškách a psech. Danému zvířeti bylo aplikováno mydriaticum a bylo uspáno, aby bylo možné provést kvalitní měření. U psů bylo zjištěno, že jejich sítnice obsahuje dva typy čípků s maximální citlivostí v oblasti 555 nm a 430 až 435 nm. Tímto měřením byla potvrzena předchozí teorie založená na behaviorálním experimentu a dokázáno, že psi mají dichromatické barevné vidění. [27]

3.5 Delfín skákavý

Tursiops truncatus neboli delfín skákavý je největším druhem delfína s délkou až čtyři metry. Je to savec uzpůsobený k životu ve vodě jednak speciálními vzdušnými váčky pro zásobu kyslíku a také svým hydrodynamickým tvarem těla. Pod vodou vydrží i 15 minut, přesto se ale musí pravidelně nadechovat nad hladinou. [29]

Tento druh je z vodních savců nejčastěji chovaný v zajetí, především kvůli své vysoké inteligenci, z toho důvodu na něm bylo provedeno také mnoho vědeckých experimentů, například i zjišťování přítomnosti různých druhů čípků na sítnici, proto jsem si zvolil právě tohoto savce, který navíc žije většinu času pod vodní hladinou a mě osobně zajímalo, jak vypadá svět pod vodní hladinou očima delfína.

Delfín skákavý je výjimečný živočich hlavně díky svému zraku. Jelikož se musí pravidelně nadechovat a příležitostně loví i ptactvo blízko hladiny, jeho zrak je uzpůsobený k vidění ve vodním prostředí a stejně tak i k vidění nad hladinou. Jeho oko je k tomuto dvojímu životu uzpůsobeno tím, že má dvoušterbinovou zornici, bifokální čočku a sítnici, která má dvě oblasti s nejvyšší citlivostí, dalo by se říci dvě

žluté skvrny. Nad hladinou totiž využívá především paprsky z menší štěrbinu zornice, které dopadají na jiné místo na sítnici než světelné paprsky vstupující větší štěrbinou zornice. Pod vodní hladinou se štěrbinu zornice delfína spojí v jednu velikou oválnou zornici, aby maximálně využil omezené množství světla pod hladinou. [30]

3.5.1 Barevné vidění delfína skákavého

V roce 1997 se ve Velké Británii uskutečnil mikrobiologický výzkum, jehož cílem bylo prokázat přítomnost více druhů čípků na sítnici delfína. Vše probíhalo na úrovni mikrobiologie. Nejprve byly odebrány vzorky fotoaktivních proteinů ze sítnice samce a také samice delfína skákavého. Pomocí řady mikrobiologických metod byla ze vzorku získána sekvence DNA daného proteinu, která byla následně naklonována. Tato naklonovaná DNA byla vložena do savčí buňky s názvem COS-7, kde došlo k expresi daného genu. Vzniklé proteiny byly podrobeny mnoha testům s různými látkami za fotopických i skotopických světelných podmínek. [31]

Výsledkem celého experimentu bylo, že sítnice delfína skákavého obsahuje tyčinky s maximální citlivostí přibližně 488 nm a dále obsahuje jeden druh čípků s maximální citlivostí 524 nm. Z těchto informací vyplývá, že delfíní zrak je pravděpodobně monochromatický s maximem citlivosti v oblasti zelené barvy. [31]

Další studie, tentokrát s živými delfíny, proběhla v roce 1999 opět ve Velké Británii. Celý experiment byl prováděn na vzduchu za přirozeného i umělého osvětlení. Delfíni měli pokaždé na výběr ze dvou obrazovek ve tvaru čtverce o délce strany 35 cm. Intervaly mezi jednotlivými vlnovými délkami byly 12 - 53 nm. Principem experimentu bylo, že delfín připlaval před obrazovky a zastavil se pod míčkem, který visel nad vodou v určité vzdálenosti od obrazovek. Na signál píšťalky si vybral jednu obrazovku a dotkl se jí čumákem. V případě správné volby následoval druhý signál píšťalky a delfín dostal odměnu v podobě ryby. [32]

Stěžejní výsledky této studie byly získány dvěma druhy testování. V prvním případě měl testovaný delfín na výběr mezi obrazovkou s vlnovou délkou světla 397 nm a druhou s vlnovou délkou světla 487 nm. Procentuální úspěšnost v tomto testování dosáhla hodnoty 77 %. V druhém případě byly na výběr obrazovky

s vlnovými délkami světla 457 nm a 544 nm. Procentuální úspěšnost zde byla pouze 58 %. [32]

Z této celé studie vyplývá, že delfini mají nejvyšší spektrální citlivost ve vlnových délkách 400 nm a 490 nm. Tímto závěrem se víceméně potvrzuje i předchozí studie založená na expresi genu pro fotoaktivní protein. Delfini jsou tedy s největší pravděpodobností savci pouze s monochromatickým zrakem.

Na Obrázku 12 vidíme vlevo zornici delfina skákavého pod vodní hladinou, vpravo vidíme zornici po reakci na nárůst světla nad vodní hladinou, uprostřed je přechodný stav.



Obrázek 12: Schematicky vyjádřený rozsah tvaru pupily delfina skákavého [38]



Obrázek 13: Náčrt oka delfina skákavého [37]

4 Simulace barevného vidění vybraných savců

V této praktické části mé práce jsem se pokusil vytvořit simulaci možného barevného vidění psa domácího, kočky domácí a delfina skákavého, dle výsledků předchozích studií.

4.1 Pomůcky pro vytvoření simulace

Nejprve jsem se rozhodl vytvořit fotografie s použitím barevných filtrů a také originály fotografií bez filtrů, které jsem následně upravil v grafickém editoru Adobe Photoshop CS5. Pro pořizování fotografií jsem použil fotoaparát – digitální zrcadlovka, značka Nikon D3100, který jsem používal v plně automatickém režimu.

Pro simulaci dichromatického vidění jednotlivých savců bylo potřeba vyfiltrovat určité vlnové délky, které daný živočich nedokáže vnímat. Ve spolupráci s FBMI jsem pořídil skleněné barevné fotografické filtry – červený, zelený a modrý (viz. Obrázek 14). Filtry jsou od firmy TiANYA a jeden filtr stál 200 Kč. Základním předpokladem bylo, že zelený filtr bude propouštět pouze zelenou barvu, modrý modrou barvu a červený červenou barvu. Umístěním kombinace těchto filtrů (modrý + zelený) před objektiv fotoaparátu by měly vzniknout snímky víceméně simulující dichromatické vidění, jelikož dojde k odfiltrování červené složky světla a filtry budou propouštět pouze modrou a zelenou složku viditelného spektra.



Obrázek 14: Barevné fotografické filtry

4.1.1 Měření spektrální propustnosti barevných filtrů 1

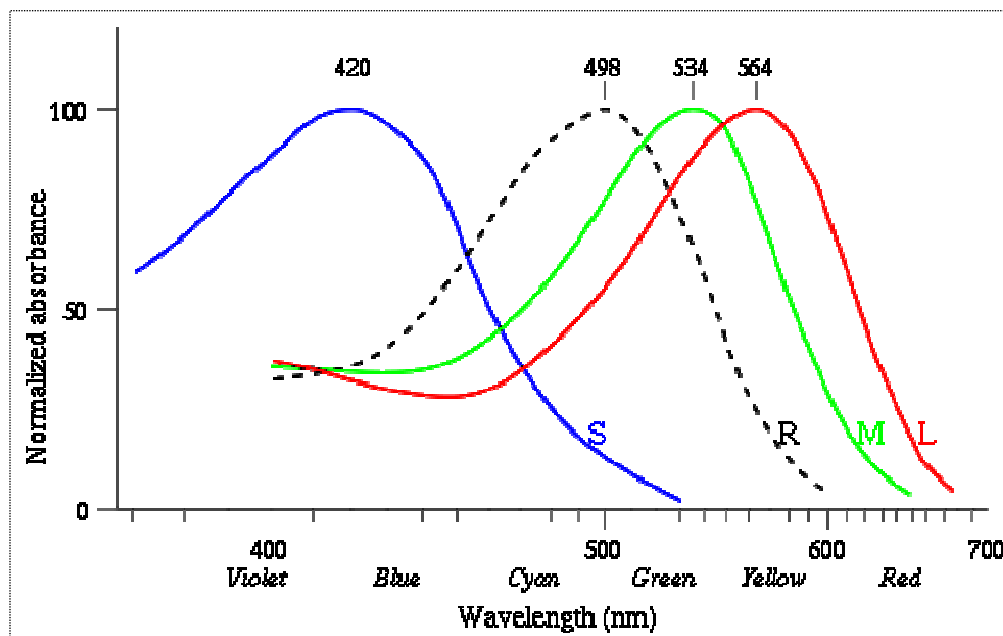
Jelikož výsledné fotografie nespĺnily daná očekávání a i přes kombinaci modrého a zeleného barevného filtru v nich stále bylo možné rozpoznat vlnové délky 600 nm a výše, které odpovídají červenému spektru, rozhodl jsem se změřit spektrální propustnost zakoupených filtrů.

Měření jsem provedl v laboratoři fyzikální optiky v budově Kokos FBMI na spektrometru Ocean Optic 2000 (3 - kanálový vláknový spektrometr) viz Obrázek 15. K měření propustnosti jednotlivých filtrů bylo využito halogenové a deuteriové žárovky jako zdroje referenčního záření. Byly proměřeny jednotlivé filtry a dále všechny kombinace filtrů. Ze získaných hodnot jsem vytvořil následující grafy znázorňující spektrální propustnost jednotlivých filtrů.

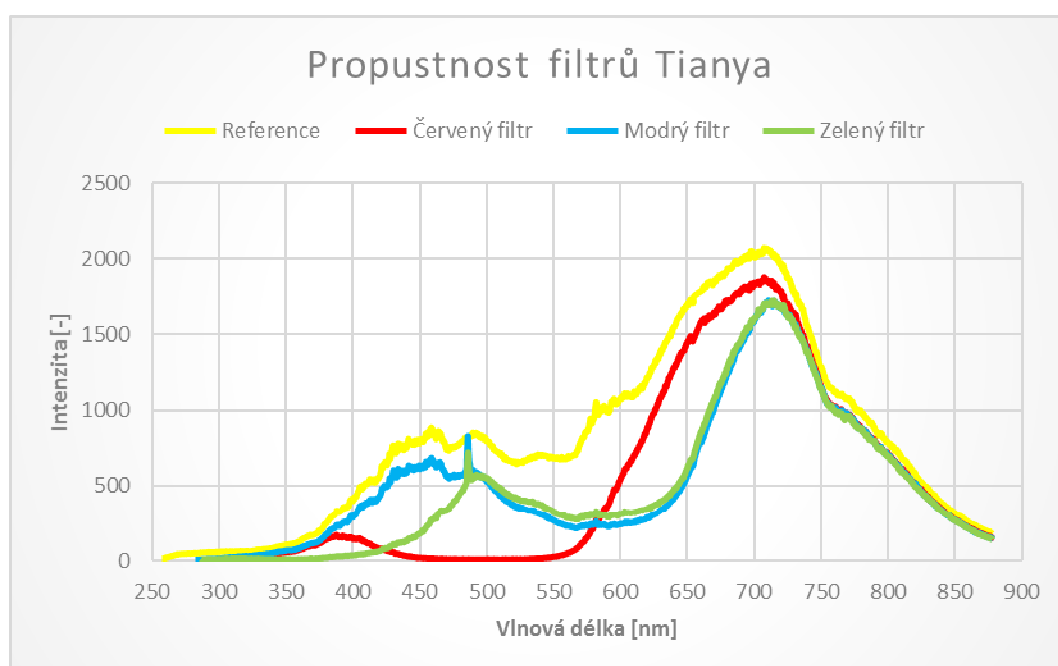


Obrázek 15: Měřicí soustava

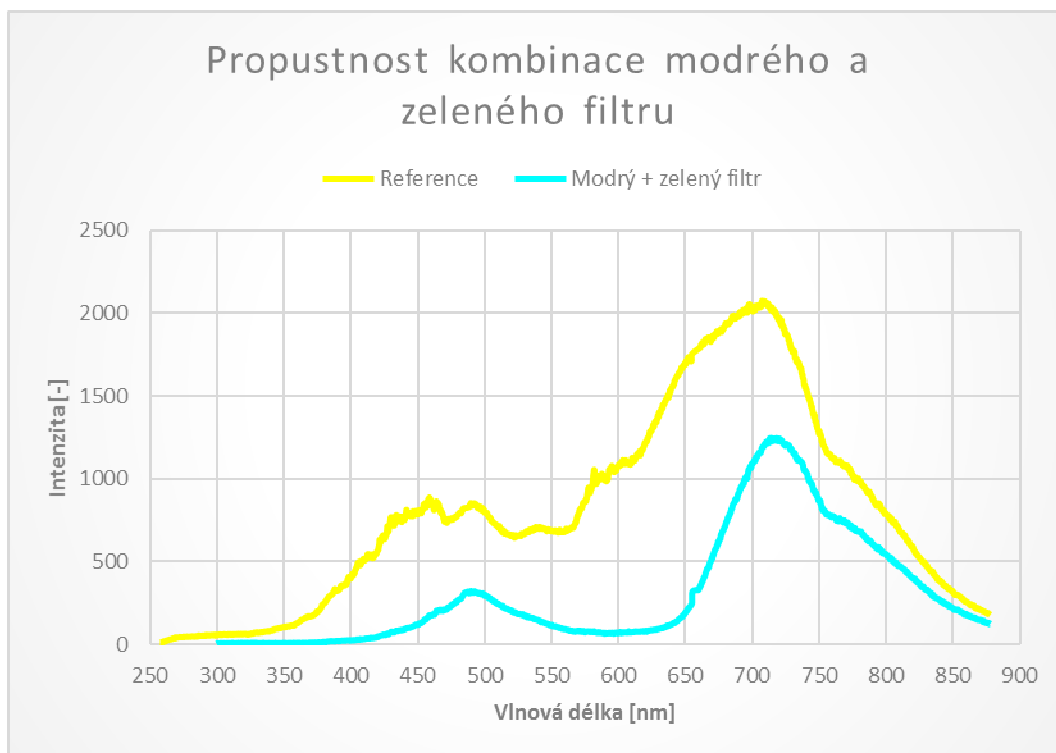
Pro lepší orientaci v problematice uvádím jako první graf spektrální propustnosti jednotlivých druhů čípků v sítnici člověka (závislost absorpance na vlnové délce).



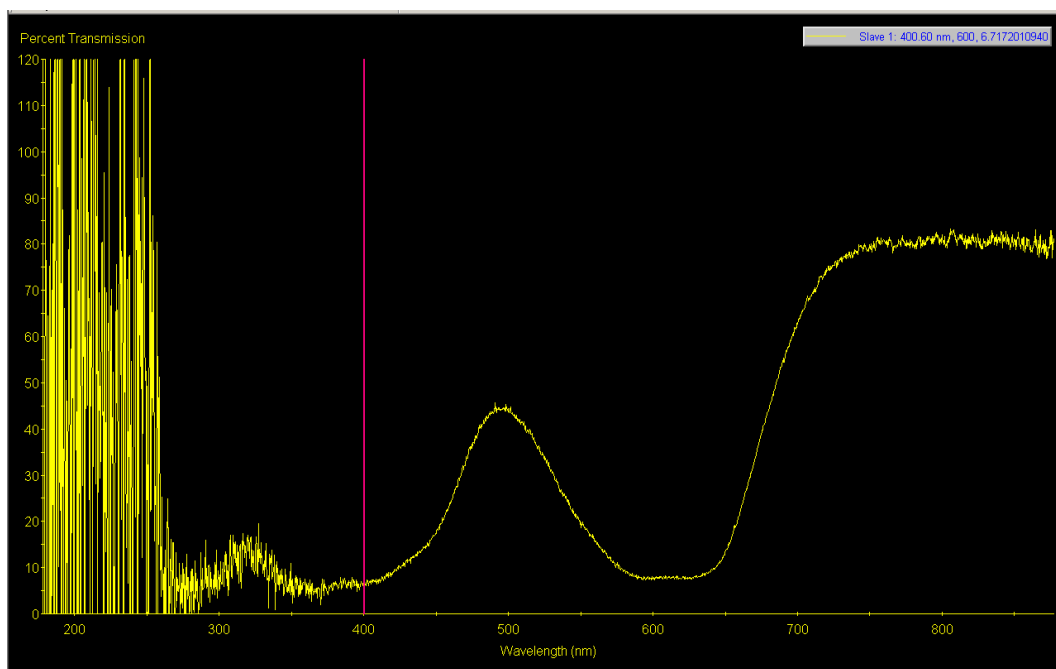
Obrázek 16: Graf spektrální citlivosti jednotlivých druhů čípků sítnice člověka [33]



Obrázek 17: Graf spektrální propustnosti jednotlivých filtrů



Obrázek 18: Graf propustnosti modrého a zeleného filtru umístěných za sebou



Obrázek 19: Graf procentuelní propustnosti modrého a zeleného filtru

Vezmeme-li v úvahu, že filtr danou vlnovou délku propouští, pokud je intenzita prošlého světla alespoň 10 % a zkoumaný rozsah vlnových délek je 400 nm až 750 nm, tak z grafů vyplývají následující charakteristiky jednotlivých barevných fotografických filtrů:

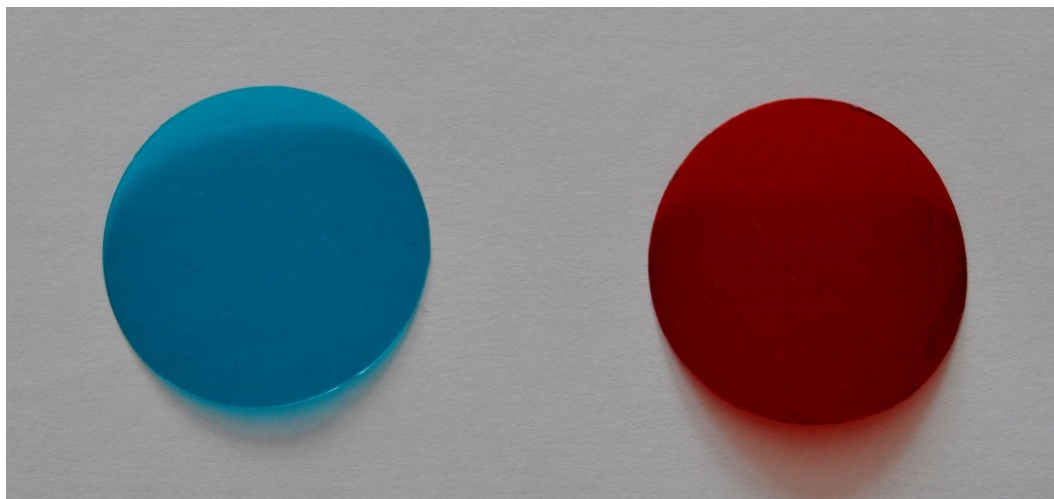
- Modrý filtr v podstatě filtruje pouze vlnové délky od 550 nm do 650 nm, ale to jen ze 70 %, jinak jen lehce snižuje celkovou intenzitu procházejícího záření.
- Zelený filtr filtruje vlnové délky 400 nm až 450 nm a potom stejně jako modrý filtr 550 nm až 650 nm, ovšem opět jen se 70% úspěšností.
- Červeným filtrem prochází přibližně 30 % světla o vlnové délce 400 nm až 450 nm, dále má filtr téměř 100% účinnost až do vlnové délky 575 nm, od které propouští vše.
- Kombinací modrého a zeleného filtru jsem dosáhl pouze 10% propustnosti v oblasti 400 nm až 450 nm dále 550 nm až 650 nm, ovšem od této vlnové délky kombinace těchto filtrů propouští vše. Dále je nutno podotknout, že celková intenzita procházejícího světla je snížena, pravděpodobně z důvodu umístění dvou filtrů za sebou, čímž se snížila propustnost.

Z grafů a z celkového rozboru vyplývá, že zakoupené filtry nesplňují očekávání a nejsou vhodné pro simulaci dichromatického obrazu, jelikož jsou propustné pro více vlnových délek viditelného spektra než je potřeba.

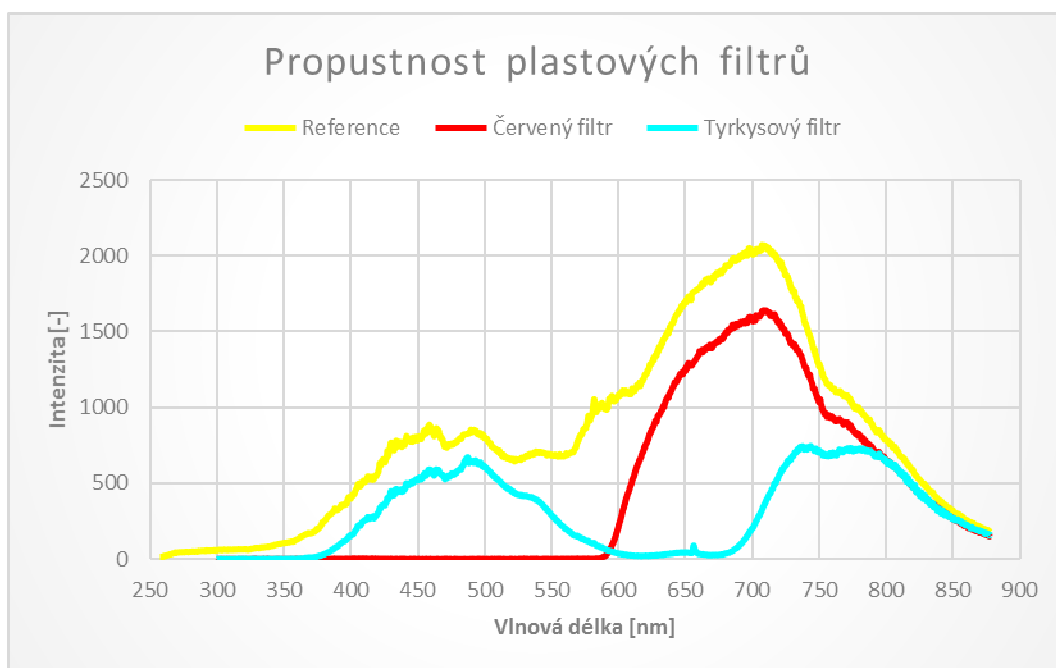
4.1.2 Měření spektrální propustnosti barevných filtrů 2

Pro dokončení praktické části této práce bylo nutné zajistit takové barevné fotografické filtry, které budou plnit svoji předpokládanou funkci. Tyto filtry jsou těžce dostupné a jejich cena se navíc pohybuje v řádech tisíců korun za jeden kus.

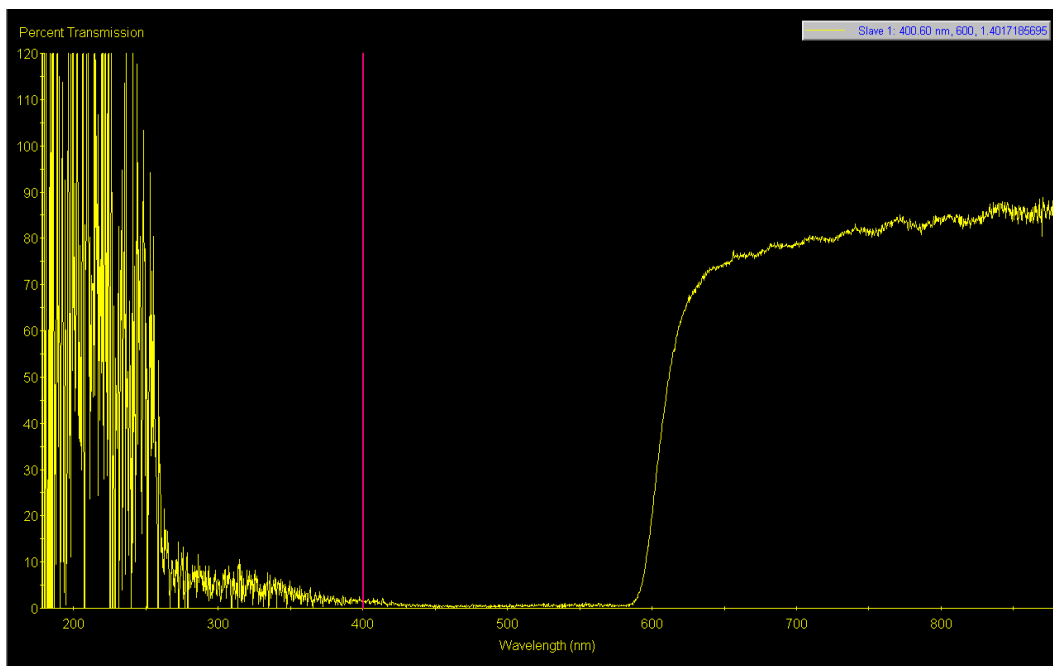
Na propagačním oddělení fakulty mi byla nabídnuta k zapůjčení sada pro zobrazení různých optických jevů – Experimentier Brille, ve které jsou mimo jiné také barevné filtry. Tyto plastové filtry se po subjektivním zhodnocení propustnosti zdály vhodné, proto jsem je podrobil stejnému měření na spektrometru jako předešlé skleněné filtry. Výsledek jsem zpracoval do grafů. První graf zachycuje propustnost filtru z hlediska intenzity a druhý graf vyjadřuje procentuální propustnost jednotlivých vlnových délek.



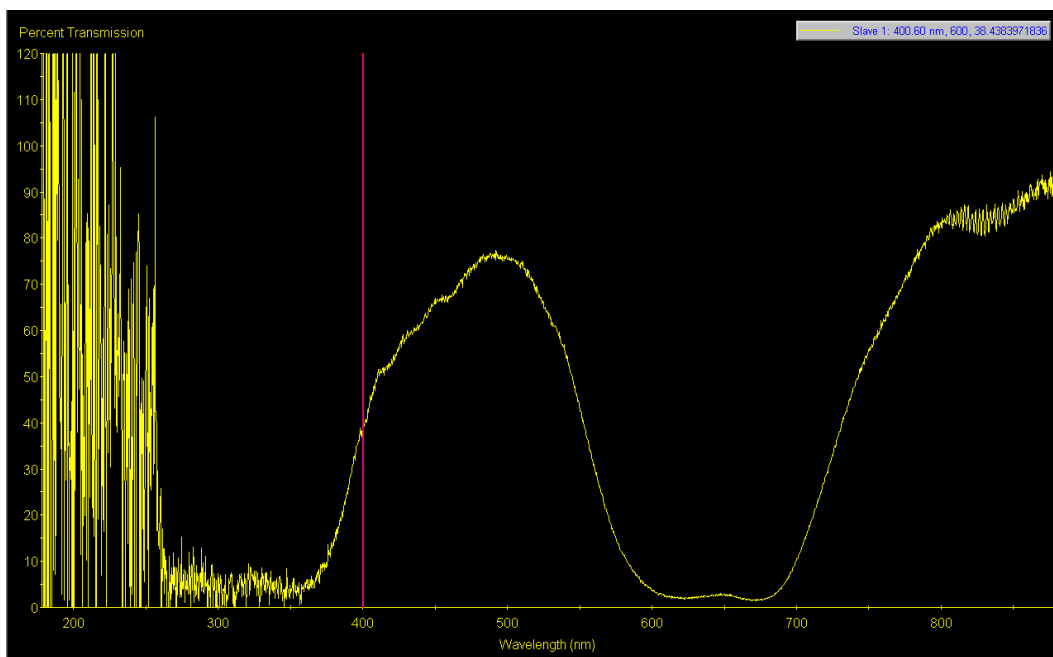
Obrázek 20: Barevné filtry ze sady Experimentier Brille



Obrázek 21: Graf propustnosti červeného a tyrkysového plastového filtru



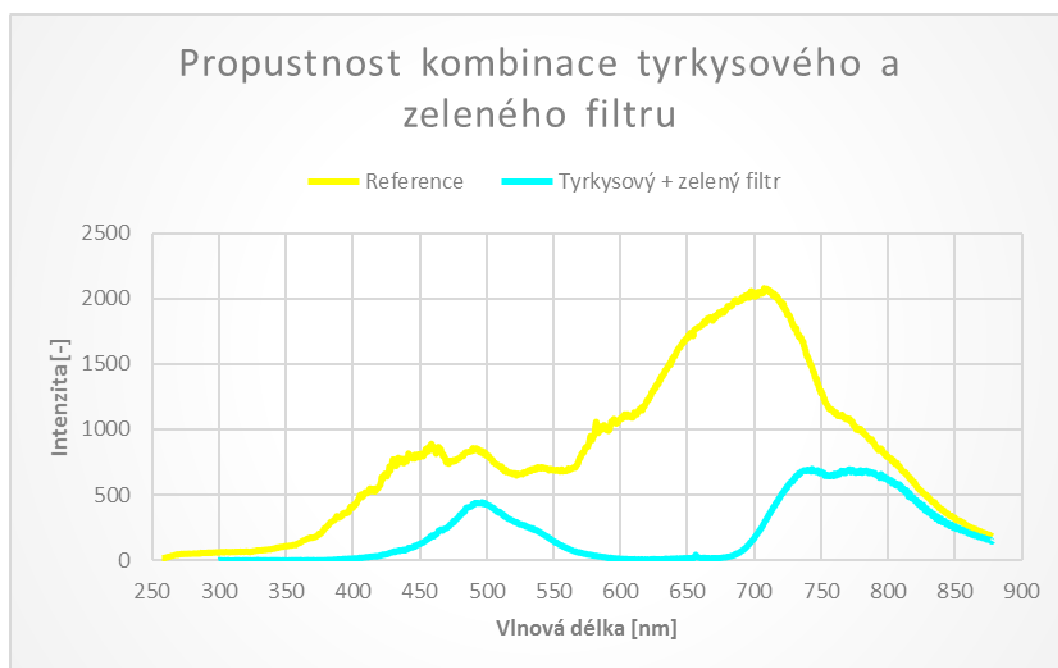
Obrázek 22: Graf procentuelní propustnosti červeného plastového filtru



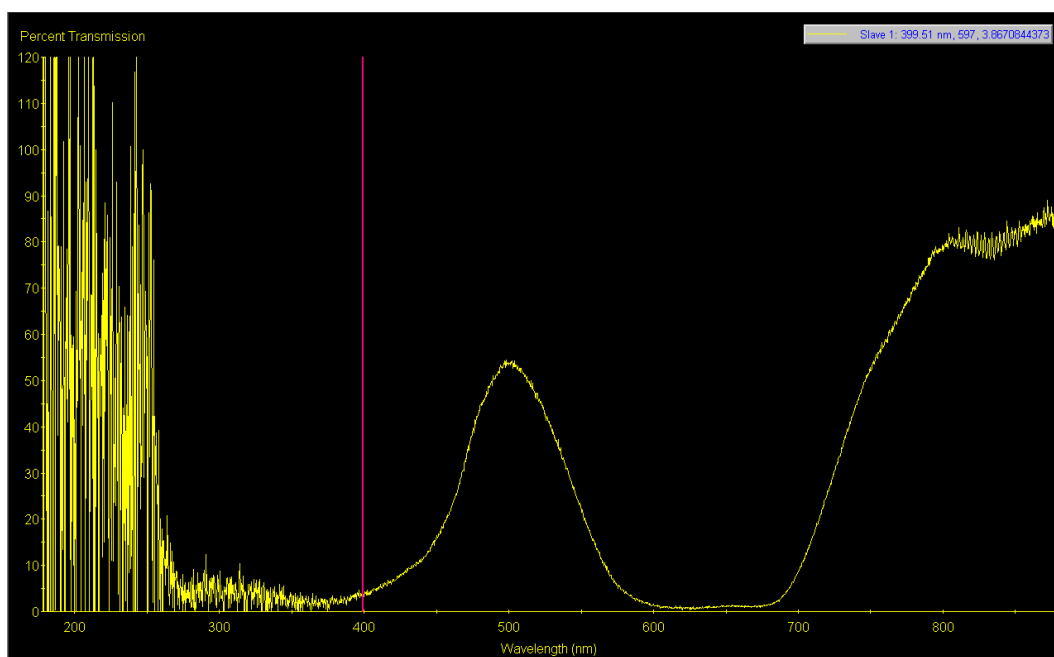
Obrázek 23: Graf procentuelní propustnosti tyrkysového plastového filtru

Z výše uvedených grafů vyplývá, že tyrkysový filtr nepropouští světlo v rozmezí vlnových délek 600 nm až po 700 nm a dále od 700 nm do 750 nm propouští jen 60 %. Filtr tudíž filtruje žluté spektrum viditelné části světla, oranžové spektrum a převážnou většinu červeného spektra, z čehož vyplývá, že jej lze využít pro simulaci barevného vidění vybraných savců, kteří mají jen dva typy čípků a nejsou schopni vnímat červené spektrum viditelné části světla.

K provedení další části praktické části bylo potřeba změřit spektrální propustnost u kombinace filtrů zeleného a tyrkysového, čímž bychom teoreticky dostali vhodný filtr k simulaci vidění delfína skákavého.



Obrázek 24: Graf procentuelní propustnosti tyrkysového a zeleného plastového filtru



Obrázek 25: Graf procentuelní propustnosti tyrkysového a zeleného plastového filtru

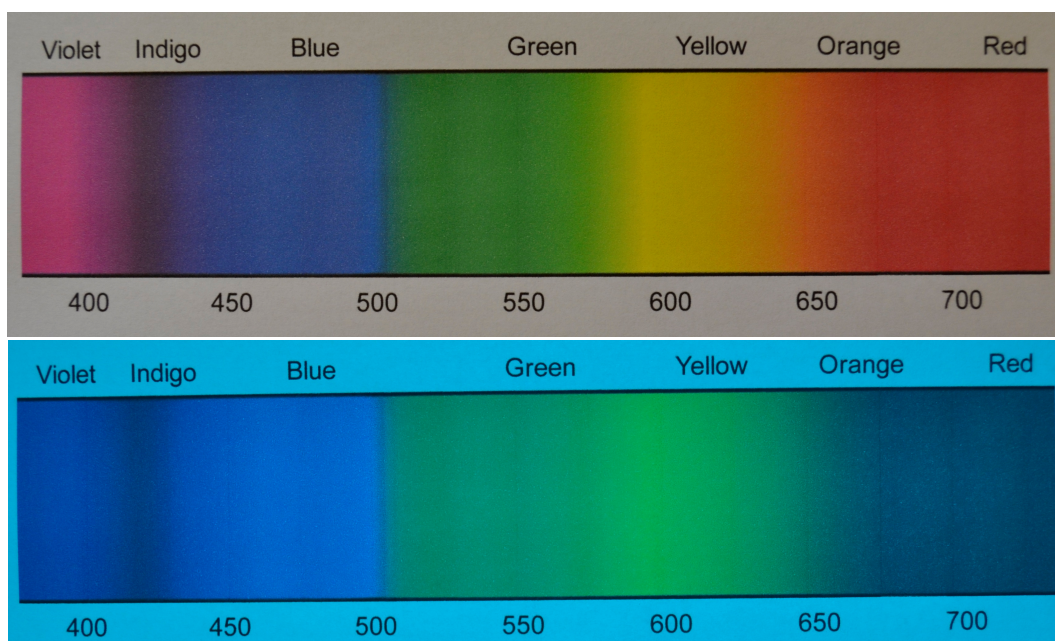
Kombinací plastového tyrkysového a skleněného zeleného filtru nám vznikne téměř ideální filtr pro simulaci zraku delfína skákavého, jelikož tato kombinace filtrů propouští pouze vlnové délky světla o vlnové délce zhruba 490 nm (viz předešlé grafy), což odpovídá spektrální citlivosti jediným čípkům přítomným na sítnici delfína skákavého. Ovšem z Obrázku č. 24 a především z Obrázku č. 25 také vyplývá, že je přibližně o 40 % snížena intenzita procházejícího záření, což je způsobeno více vrstvami, kterými musí záření projít, jelikož jsme umístili dva filtry za sebou.

4.2 Simulace barevného vidění kočky domácí

Dle provedených experimentů zmíněných v kapitole 3.3.1 jsme zjistili, že sítnice kočky obsahuje pravděpodobně jen dva typy receptorů a to pro modrou a zelenou barvu. Použitím tyrkysového filtru, který se skládá z modrého a zeleného filtru a tudíž propouští jen vlnové délky odpovídající modrému a zelenému světlu, se podařilo získat fotografie simulující teoretické dichromatické vidění kočky domácí.



Obrázek 26: Teoretické dichromatické vidění kočky domácí



Obrázek 27: Teoretické dichromatické vidění kočky domácí [34]



Obrázek 28: Porovnání barevného vidění člověka (nahore) a kočky domácí (dole)

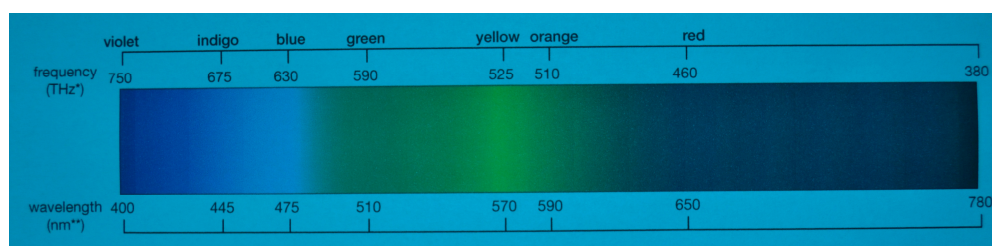
Samořejmě je nutno uvést, že se jedná pouze o simulaci dichromatického vidění. Nebyl zde brán ohled na další odlišnosti zraku kočky od člověka, jako například jiná šířka zorného pole ve vertikálním i horizontálním směru, jiná vzdálenost blízkého bodu atd.

4.3 Simulace barevného vidění psa domácího

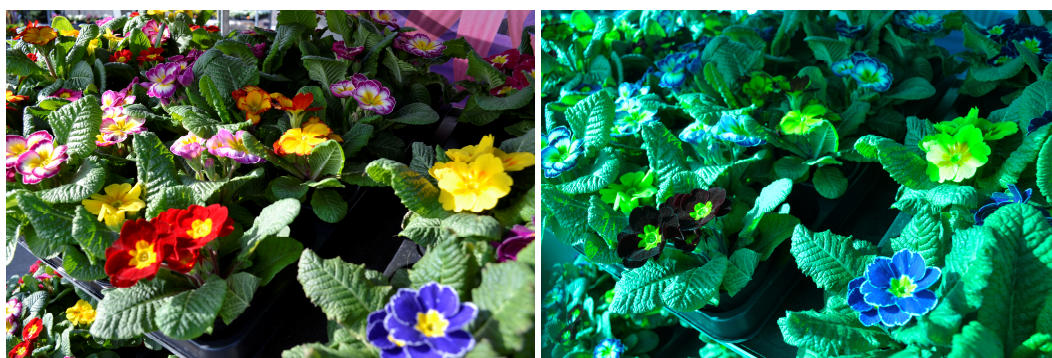
U psa domácího byla dvěma druhy experimentů (viz kapitola 3.4.1) také zjištěna přítomnost dvou druhů čípků na sítnici a to konkrétně pro modrou a zelenou barvu. Můžeme tedy říct, že i pes domácí má dichromatické vidění podobně jako kočka a můžeme tudíž využít stejnou metodu jako u kočky domácí. Opět použijeme tyrkysový filtr před objektivem a pořídíme fotografie simulující dichromatické vidění.



Obrázek 29: Teoretické dichromatické vidění psa domácího



Obrázek 30: Teoretické dichromatické vidění psa domácího [35]

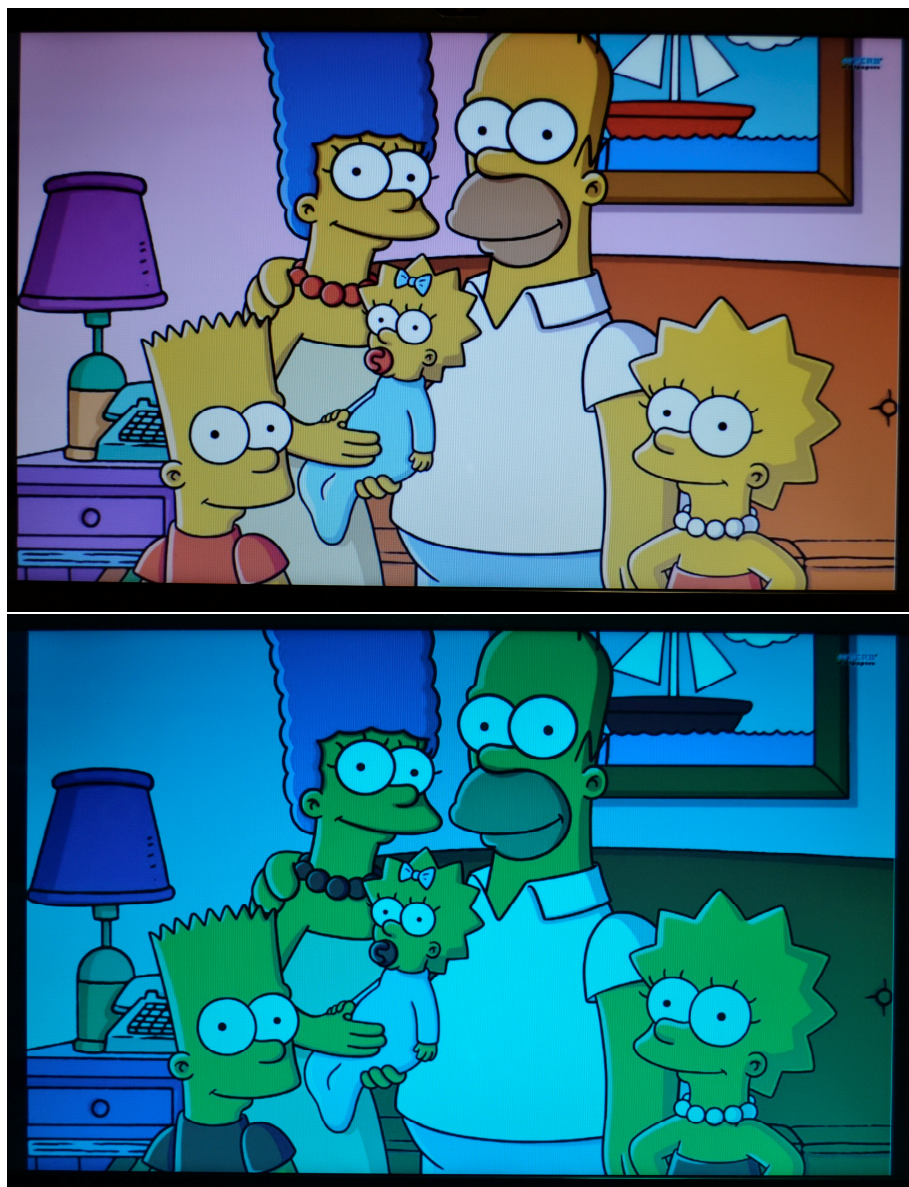


Obrázek 31: Porovnání barevného vidění člověka (vlevo) a psa domácího (vpravo)



Obrázek 32: Porovnání barevného vidění člověka (nahore) a psa domácího (dole)

Pro většinu snímků jsem použil jako objekty živé právě kvetoucí rostliny, nejlépe s červenými květy, jelikož jsem chtěl zachytit přírodní barvy, aby simulace byla co nejvěrnější. Následně jsem zachytil i umělé barvy a barvy vytištěné, aby spektrum simulací bylo co nejširší. Pro simulaci vidění televizní obrazovky jsem použil opět co nejbarevnější obrázek, aby byly dobře viditelné rozdíly mezi dichromatických a trichromatickým viděním.



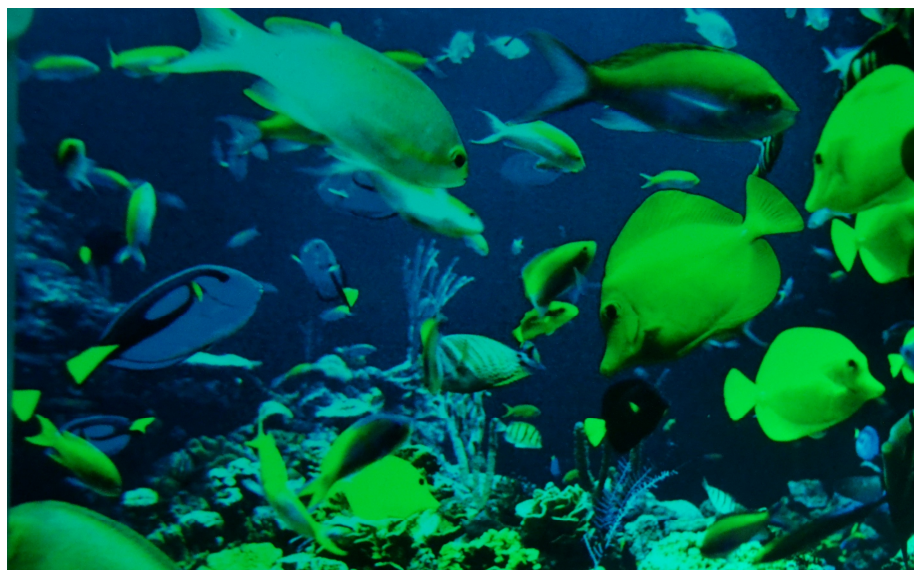
Obrázek 33: Jak vidí obraz v televizi člověk (nahore), jak teoreticky vidí obraz v televizi pes domácí (dole) [36]

4.4 Simulace barevného vidění delfína skákavého

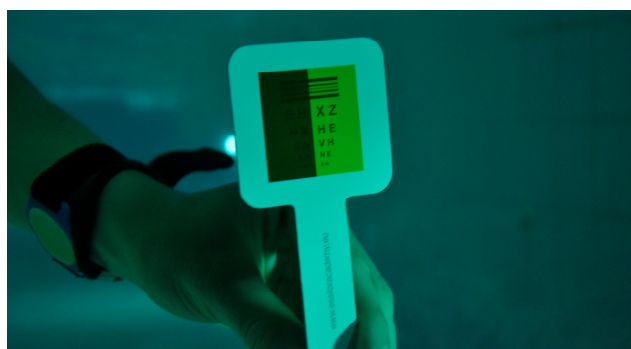
Delfín skákavý dle kapitoly 3.5.1 vidí pouze monochromaticky a to s maximální citlivostí jednoho druhu čípků v oblasti vlnových délek přibližně 524 nm. Přibližné propustnosti pro takové vlnové délky dosáhneme s použitím kombinace filtrů tyrkysového plastového a zeleného skleněného, které opět umístíme před objektiv fotoaparátu.

Delfín je ovšem vodní savec a pro získání fotografií simulujících věrněji monochromatické vidění tohoto savce bylo nutné vydat se s fotoaparátem pod vodní hladinu.

Pro tyto účely byl zakoupen vodotěsný kryt velikostně odpovídající danému fotoaparátu. Kvůli simulaci světa pod vodní hladinou byly pořízeny obrázky z okolí korálových útesů, které byly vytisknuty a následně zalaminovány, aby se daly ponořit pod hladinu a neztratily svou kvalitu. Fotografie byly nakonec pořízeny v Kladenském Aquaparku, osvětlení nebylo ideální, jelikož v místě focení byl jen jeden bodový zdroj světla a to pod hladinou, ale byl dostačující. Pořízení fotografií probíhalo zhruba 10 až 20 cm pod vodní hladinou.



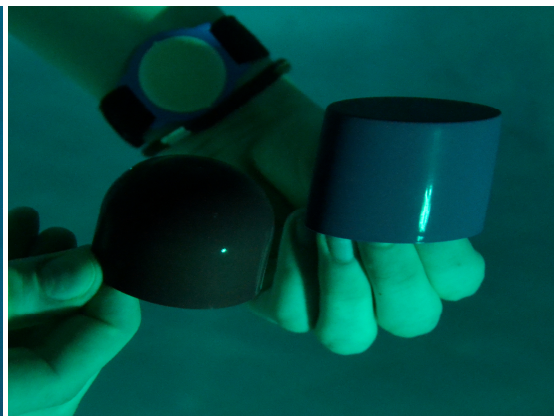
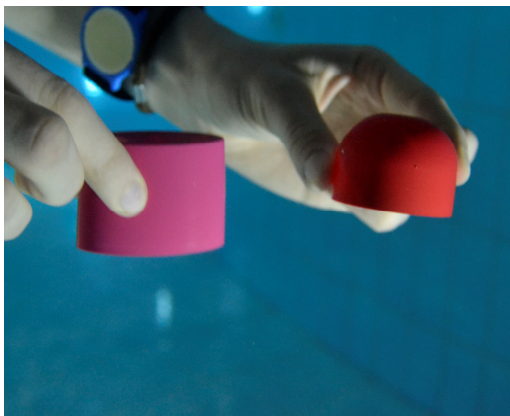
Obrázek 35: Teoretické monochromatické vidění delfína skákavého



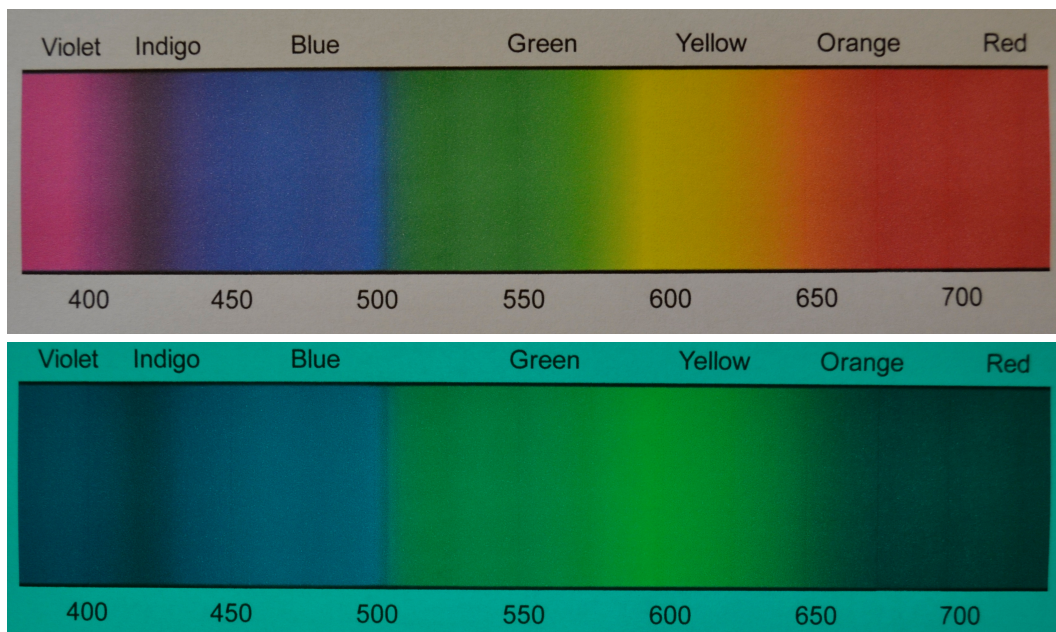
Obrázek 34: Teoretické monochromatické vidění delfína skákavého



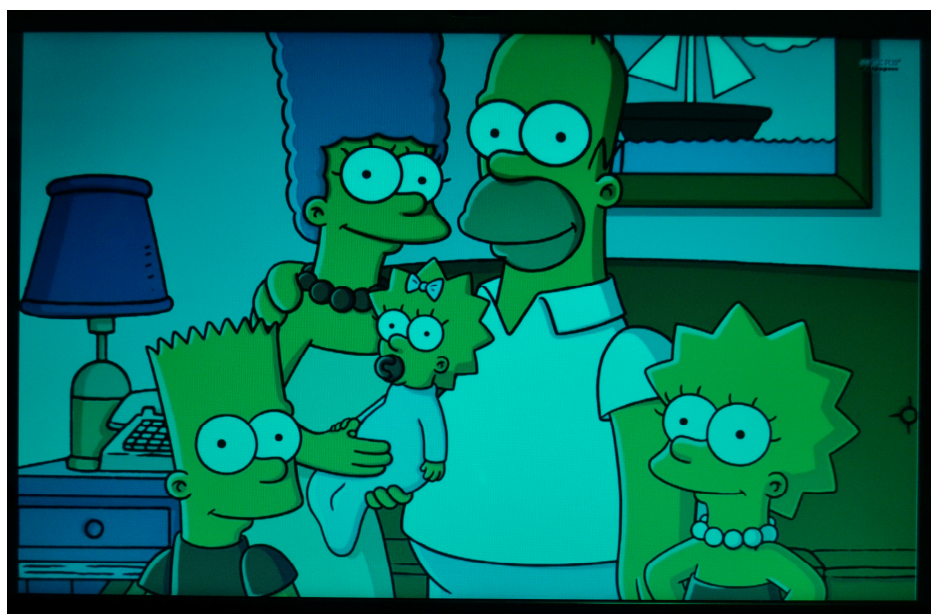
Obrázek 36: Porovnání barevného vidění člověka (nahore) a delfína skákavého (dole)



Obrázek 37: Porovnání barevného vidění člověka (vlevo) a delfína skákavého (vpravo)



Obrázek 38: Porovnání barevného vidění člověka (nahore) a delfina skákavého nad hladinou (dole) [34]



Obrázek 39: Teoretický obraz viděný delfínem při pohledu na televizní obrazovku nad hladinou [36]

Pro názornost byl použit i převážně červený předmět (hrneček), který delfín nevidí jako červený, jelikož nemá čípky, které by reagovaly na tuto vlnovou délku, ale vidí jej jako téměř černý.



Obrázek 40: Porovnání barevného vidění člověka (nahore) a delfína skákavého (dole)

Pořizování fotografií probíhalo v maximální hloubce 20 cm z důvodu, že vodní prostředí má schopnost filtrace vlnových délek s rostoucí hloubkou s tím, že nejdříve se vyfiltrují delší vlnové délky směrem od červené a postupně až k modré barvě, která proniká nejhluběji pod hladinu, a proto také každá větší vodní masa vypadá, že je modré barvy.

5 Porovnání barevných filtrů s následnou úpravou v PC

Originální fotografie bez filtrů před objektivem byly následně upraveny v grafickém editoru Adobe Photoshop CS5. K úpravě byla použita přímo funkce vložení tyrkysového filtru, jelikož byl při fotografování použit také tyrkysový filtr. Díky tomu jsme získali ideální možnost porovnat výsledky obou cest vedoucích k získání simulace dichromatického barevného vidění.

Postup aplikace barevného filtru v tomto grafickém programu je následující: Image – Adjustments – Photo Filter ... - zde se z nabídky vybere Cyan (v překladu tyrkysový filtr) a v dolní se části se kurzor hustoty přemístí na 100 % hodnotu.



Obrázek 41: Originál fotografie (nahore), fotografie s přidáním filtrem (dole)

Výsledek ovšem nebyl nijak oslňující, což byl náš předpoklad. Jak si můžeme všimnout, přidaný tyrkysový filtr i nadále propouští odhadem víc než 50 % světla červené vlnové délky a tudíž nevzniká obraz, jaký potřebujeme.



Obrázek 42: Fotografie upravená v grafické editoru (nahore), fotografie pořízená s tyrkysovým filtrem (dole)

Dle Obrázku 42 je vidět jasně rozpoznatelný rozdíl mezi obrázky simulací dichromatického vidění získaných dvěma různými cestami. Fotografie pořízené s barevným filtrem jsou kvalitnější a použitelnější pro další potřeby předvedení teoretického dichromatického vidění a podobně, jelikož i s použitím neprofesionálního barevného fotografického filtru došlo k více než 90% filtraci světla červené vlnové délky.



Obrázek 43: Originál fotografie (nahore), fotografie upravená v grafickém editoru (dole vlevo), foto pořízené s tyrkysovým filtrem (dole vpravo)

Diskuze

Jedním ze stěžejních faktů, na kterých staví tato bakalářská práce, je detailně probádaná sítnice člověka, její stavba, základní prvky i jejich propojenost. Tato fakta jsou výsledkem vědeckého bádání člověka. Proto, když vědci na mikroskopickém snímku sítnice zjistili, že obsahuje čípky reagující na červenou barvu a následně libovolnému zdravému člověku podali do ruky červený míček a zeptali se ho, jakou má barvu, samozřejmě odpověděl, že červenou. Existuje zde tedy kvalitní zpětná vazba.

Namísto toho experimenty se zvířaty, ať už behaviorální či mikroskopická zkoumání, tuto zpětnou vazbu nemají, jelikož zvíře jednoduše nedokáže sdělit člověku co vidí. Veškeré výsledky výše uvedených studií, experimentů a pokusů se zvířaty jsou proto pouze teoretické. Nikdo nemůže s naprostou jistotou říci, že pes domácí vidí pouze v dichromatickém barevném spektru, protože pes nám neřekne, co ve skutečnosti vidí. Je to pouze náš předpoklad, ovšem doložený výsledky různých vědeckých metod, studií a zjištěných faktů.

Tímto bych chtěl říci, že i přes veškeré úsilí, které jsem do práce vložil a přesto, že jsem využil dostupných vědeckých poznatků, nemohu s jistotou říci, že jsou výsledky mého bádání skutečným obrazem reality, jelikož jednoduše zde zatím neexistuje kvalitní zpětná vazba ze strany zvířat. Vše je pouhá teoretická simulace, ale pro představu a nastínění kvality zraku vybraných zvířat z hlediska barevného vidění jsou výše uvedené fotografie dostačující.

Další otázkou také zůstává, jaký výsledek bychom dostali v případě pořízení špičkových fotografických barevných filtrů, jejichž cena se pohybuje v řádech desetitisíců korun, které by měly stoprocentní filtrační účinek na vybrané vlnové délky. Ovšem použité filtry pro účely této práce byly účinné z více než 90 %, což je dostačující pro dosažení kvalitního výsledku.

Ve druhé části diskuze k této práci bych se chtěl věnovat otázce: Proč daný savec vidí širší spektrum barev a jiný savec naopak užší spektrum barev? Odpověď ale není ani z daleka tak jednoduchá a jednoznačná, neboť, jak již bylo zmíněno,

ještě stále neumíme kvalitně rozklíčovat řeč zvířat a tudíž neznáme všechny potřebné odpovědi.

Kočka domácí i pes domácí jsou si ohledně barevného vidění velice podobní. Oba druhy vidí obraz reálného světa pouze v dichromatickém barevném spektru a obě tato zvířata patří mezi šelmy. Šelmy obecně mají široké zorné pole a vynikající zrak za tmy, jelikož ve většině případů loví hlavně v noci (což se týká zejména kočky domácí). Jejich kořist tvoří převážně hlodavci a menší savci, kteří jsou zbarveni do hnědé až šedé barvy. Pro pohyb v lese potřebují šelmy každopádně čípky reagující na zelenou barvu světelného spektra a pro potřeby žízně a hygieny potřebují čípky reagující na modrou barvu světelného spektra, aby vyhledaly vodu. Kombinací těchto dvou světelných spekter mohou rozeznat všechny barevné odstíny, které potřebují pro přežití a lov. Další evoluce v tomto směru u těchto druhů již proto nebyla nutná.

Barevné spektrum delfína skákavého je oproti předchozím dvěma druhům ještě užší. Nabízí se prosté vysvětlení, které spočívá v prostředí, v jakém se delfin většinu života pohybuje. Delfin plave převážně v hloubkách, kam již neproniká celé viditelné světelné spektrum světla, jelikož se filtruje ve vodním prostředí. Do takové hloubky proniká totiž převážně jen světlo o vlnových délkách 550 nm a kratších, proto se prostředí vody zdá modré barvy, i když je voda čirá. To je nejspíš hlavním důvodem, proč sítnice delfína obsahuje pouze čípky reagující jen na viditelné záření o vlnové délce zhruba 524 nm.

V poslední části diskuze k této práci bych rád porovnal vytvořené simulace vidění s jinou předchozí podobnou prací. Simulaci barevného vidění kočky se pokusil ztvárnit umělec Nickolay Lamm [39]. Ve svém díle se pokusil zachytit všechny rozdíly mezi zrakem kočky a člověka (barvocit, noční vidění, zorné pole, zrakovou ostrost). V případě, že porovnáme simulace pouze z hlediska barevného vidění, obě práce docházejí přibližně ke stejnému výsledku. Ovšem nesmíme zohlednit místa s azurovou barvou na simulacích v této práci, jelikož vznikla z bílých míst po předložení azurového filtru a z důvodu vyšší věrohodnosti již fotografie nebyly dále upravovány.

Závěr

V rešeršní části práce se čtenář mohl postupně seznámit s embryonálním vývojem lidského oka, podrobnou stavbou oka, především z pohledu sítnice, podstatou barevného vjemu a barevného vnímání člověka. Dále teoriemi, které toto barevné vnímání vysvětlují. V následující části rešerše dané problematiky je přehled teoretického barevného vidění vybraných zvířecích skupin, kde se autor blíže zaměřuje na nejběžněji se vyskytující savce v blízkosti člověka – kočka domácí a pes domácí. A z vodních savců, kteří se nejčastěji chovají v zajetí, se autor zaměřil na delfína skákavého. Byly shrnuty poznatky z různých zahraničních experimentů prokazující dichromatické barevné vidění u kočky domácí a psa domácího a monochromatické vidění u delfína. V části práce týkající se konkrétně psa domácího a kočky domácí byla potvrzena hypotéza, že tito savci nejsou barvoslepi, ale dokáží vnímat barvy dokonce až na dichromatické úrovni.

V praktické části byly vytvořeny fotografie, teoreticky simulující dichromatické a monochromatické vidění. Fotografie byly vytvořeny na základě teorie nepropustnosti červené části světelného spektra při použití modrého a zeleného filtru, ale současně při propustnosti zelené a modré části světelného spektra. Výsledné fotografie byly porovnány s fotografiemi až následně upravenými v grafickém editoru, výsledkem byla mnohem větší účinnost u filtrů použitých již v průběhu fotografování, čímž se potvrdila i autorova druhá hypotéza.

Nedílnou součástí praktické části bylo také provedené měření zakoupených barevných fotografických filtrů, jehož výsledkem jsou grafy spektrální propustnosti světla, které dokazují, že skleněné barevné filtry od firmy TiANYA nerespektují plně princip barevných filtrů, čímž je myšleno propouštět jen danou barvu (rozsah vlnových délek) a zbytek spektra odfiltrovat, a plastové filtry ze sady Experimentier Brille naopak ano.

Při pořizování fotografií pod vodní hladinou jsem získal spoustu zkušeností ohledně této problematiky. V první řadě jsem se zorientoval v aktuální nabídce vodotěsných filtrů, velikostech fotoaparátů a objektivů. Dále samotné pořizování fotografií pod vodní hladinou bylo pro mne skvělým zážitkem.

Seznam zdrojů

1. KUCHYNKA, Pavel. Oční lékařství. Praha: Grada, 2007. ISBN 978-80-247-1163-8.
2. ROZSÍVAL, Pavel. Oční lékařství. Praha: Galén, c2006. ISBN 80-7262-404-0.
3. HORNOVÁ, Jara. Oční propedeutika. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-4087-4.
4. SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. Fyziologie oka a vidění. 2., doplněné a přepracované vydání. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3992-2.
5. KVAPILÍKOVÁ, Květa. Anatomie a embryologie oka. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2000. ISBN 80-7013-313-9.
6. NOVOTNÝ, Ivan a Michal HRUŠKA. Biologie člověka. 3., rozš. a upr. vyd. Praha: Fortuna, 2002. ISBN 80-7168-819-3.
7. Česká Oční Optika [online]. 2010, 51(2) [cit. 2016-11-13]. ISSN 1211-233X. Dostupné z: http://www.4oci.cz/dokumenty/pdf/4oci_2010_02.pdf
8. Lekarske.slovniky.cz. Velký lékařský slovník [online]. Praha: Maxdorf, s.r.o., ©1998-2016 [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <http://lekarske.slovniky.cz/pojem/embryologie>
9. Videni.cz [online]. Bratislava: SWAMI s.r.o., ©2009-2014 [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <http://www.videni.cz/kontakt-a-spoluprace>
10. MALÝ, Petr. Optika. Praha: Karolinum, 2008. ISBN 978-80-246-1342-0.
11. Canov.jergym.cz [online]. Liberec: Michael Canov, 2016 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <http://canov.jergym.cz/orbital/vesmir/b.html>
12. PHOTOBIOLOGICAL SCIENCES ONLINE [online]. USA: John Lee, Kendric C. Smith, 2002 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <http://photobiology.info/Crouch.html>
13. Paladix foto-on-line [online]. Paladix foto-on-line, 2003 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <https://www.paladix.cz/clanky/barevne-videni-druhy-pohled.html>

14. Vnímání barev. In: Psychologický ústav akademie věd České republiky [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: http://psu-brno.avcr.cz/miranda2/export/sitesavcr/data.avcr.cz/humansci/psu-brno/people-contacts/cv/sikl/Vyuka/05_06_Barva_2013.pdf
15. Česká oční optika [online]. 2010, 2010(4) [cit. 2016-12-11]. ISSN 1211-233X. Dostupné z: http://www.4oci.cz/dokumenty/pdf/4oci_2010_04.pdf
16. Veronika.sovova.sweb.cz [online]. Veronika Sovová [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://veronika.sovova.sweb.cz/interest/vidimbar.htm>
17. OSORIO, D. a M. VOROBYEV. A review of the evolution of animal colour vision and visual communication signals. *Vision Research* [online]. Elsevier, 2008, 2008(48/20), 2042-2051 [cit. 2016-12-17]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042698908003222>
18. KELBER, Almut, Misha VOROBYEV a Daniel OSORIO. Animal colour vision — behavioural tests and physiological concepts. *Biological Reviews* [online]. Cambridge Philosophical Society, 2003, 78(1), 81-118 [cit. 2016-12-17]. DOI: 10.1017/S1464793102005985. ISSN 1469-185X. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1017/S1464793102005985/abstract>
19. GHOSE, Tia. Feline Vision: How Cats See the World. *Live Science* [online]. 2013 [cit. 2016-12-17]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/40459-what-do-cats-see.html>
20. SPECTOR, Dina. How Cats See The World Compared To Humans. *Business Insider* [online]. United States, 2013 [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://www.businessinsider.com/pictures-of-how-cats-see-the-world-2013-10>
21. DRAKE, Nadia. This Is How Cats See the World. *Wired* [online]. New York, 2013 [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <https://www.wired.com/2013/10/cats-eye-view/>
22. DAW, N.W a A.L PEARLMAN. Cat colour vision: evidence for more than one cone process. *Wiley online library* [online]. Great Britain, 1970, 1970, 125-137 [cit. 2016-12-18]. DOI: 10.1113/jphysiol.1970.sp009270. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1113/jphysiol.1970.sp009270/epdf>

23. NEITZ, Jay, Timothy GEIST a Gerald H. JACOBS. Color vision in the dog. Visual Neuroscience [online]. Cambridge University Press, 2009, 1989(3/2), 119-125 [cit. 2016-12-30]. DOI: 10.1017/S0952523800004430. Dostupné z: <https://www.cambridge.org/core/journals/visual-neuroscience/article/div-class=titlecolor-vision-in-the-dogdiv/5A30E35A384D10B6A2B46B01C896D3D5>
24. MACHOVÁ, Vanda. Struktura rhodopsinu. In: WikiSkripta [online]. 2010 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/Soubor:Struktura_rhodopsinu.jpg
25. Vše o světle - 5. barevné modely. FotoRoman [online]. 2012 [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: http://fotoroman.cz/tech2/svetlo05color_model.htm
26. New Scientist: Domestic dogs may have evolved separately in Europe and Asia [online]. 2016 [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: <https://www.newscientist.com/article/2091836-domestic-dogs-may-have-evolved-separately-in-europe-and-asia/>
27. H. JACOBS, Gerald, Jess F. DEEGAN, Michael A. CROGNALÉ a John A. FENWICK. Photopigments of dogs and foxes and their implications for canid vision. In: Visual Neuroscience [online]. Cambridge University Press 1993, 2009, s. 173-180 [cit. 2017-01-09]. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0952523800003291>. Dostupné z: <https://www.cambridge.org/core/journals/visual-neuroscience/article/div-class=titlephotopigments-of-dogs-and-foxes-and-their-implications-for-canid-visiondiv/9C0043A35B2D652857BFE40779F23070>
28. Chemistry@ davidson [online]. USA, 2016 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <http://www.chm.davidson.edu/vce/coordchem/color.html>
29. VORÁČKOVÁ, Šárka. Inteligentní a obětavý zachránce: Delfín skákavý. In: Živočich [online]. Dobrá Voda u Českých Budějovic, 2012 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.zivocich.com/clanky/seznamte-se-s-zivocichem/d:inteligentni-a-obetavy-zachrance-delfin-skakavy>

30. Bottlenose Dolphin {Tursiops truncatus) Double-Slit Pupil Asymmetries Enhance Vision. RIVAMONTE, Lorenzo A. Aquatic Mammals. Engineerins Division, U.S. Army TMDE Activity. Redstone Arsenal. AL 35898-5. USA, 2009, s. 269-280. ISBN 1578/AM.35.2.2009.269.
31. The visual pigments of the bottlenose dolphin (Tursiops truncatus). FASICK, Jeffrey I., Thomas W. CRONIN, David M. HUNT a Phyllis R. ROBINSON. Visual Neuroscience. USA: Cambridge University Press 0952-5238098, 1998, s. 643-651.
32. GRIEBEL, Ulrike a Axel SCHMID. SPECTRAL SENSITIVITY AND COLOR VISION IN THE BOTTLENOSE DOLPHIN (TURSIOPS TRUNCATUS). Mar. Fresh. Behav. Physiol [online]. Taylor & Francis, 2002, 35(3), 129-137 [cit. 2017-03-26]. DOI: 10.1080/1023624021000014716. ISSN 1023-6244.
33. KUBÁČ, Petr. Barvoslepí roboti. In: Nekorektní blog Petra Kubáče [online]. 2011 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://petr-kubac.blog.cz/rubrika/roboti/6>
34. Infrared light spectrum wavelength. In: Keywordsuggest [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://keywordsuggest.org/gallery/151744.html>
35. WEBSTER, Amanda. Imaging systems. In: ISSUU [online]. 2013 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: https://issuu.com/rit_imagingsystems/docs/a_webster_finalbook
36. Simpsonovi. In: Webspiders.717.cz [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://webspiders.717.cz/serialy/serialy/simpsonovi>
37. LEMUR, Ju. LOOK IN THESE EYES AND SAY IF YOU'RE AFFRAID. In: Wegoro [online]. 2015 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://wegoro.com/look-in-these-eyes-and-say-if-you-are-affraid/>
38. KORYOS. The Functions of Different Pupil Shapes. In: Koryos writes [online]. 2014 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.koryoswrites.com/nonfiction/the-functions-of-different-pupil-shapes/>
39. LAMM, Nickolay. What Do Cats See? In: NICKOLAY LAMM ARTIST AND RESEARCHER [online]. USA: WordPress., 2013 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://nickolaylamm.com/art-for-clients/what-do-cats-see>

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: VÝVOJ OKA 1 [1]	2
OBRÁZEK 2: VÝVOJ OKA 2 [1]	3
OBRÁZEK 3: SCHEMATICKÝ PRŮŘEZ SÍTNICÍ [1]	6
OBRÁZEK 4: SCHEMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ TYČINKY A ČÍPKU [6].....	8
OBRÁZEK 5: ZMĚNA KONFORMACE RETINALU [12].....	9
OBRÁZEK 6: SCHÉMA BIOCHEMIE VIDĚNÍ [24]	10
OBRÁZEK 7: UKÁZKA MÍRY AKTIVACE RECEPTORŮ [14]	12
OBRÁZEK 8: FOTORECEPTORY DLE HERINGA [14].....	13
OBRÁZEK 9: RGB MODEL [25].....	14
OBRÁZEK 10: CMYK MODEL [25].....	14
OBRÁZEK 11: BAREVNÉ SPEKTRUM VIDITELNÉHO ZÁŘENÍ [28]	17
OBRÁZEK 12: SCHEMATICKY VYJÁDŘENÝ ROZSAH TVARU PUPILY DELFIÁNA SKÁKAVÉHO [38].....	21
OBRÁZEK 13: NÁČTRT OKA DELFIÁNA SKÁKAVÉHO [37]	21
OBRÁZEK 14: BAREVNÉ FOTOGRAFICKÉ FILTRY.....	22
OBRÁZEK 15: MĚŘÍCÍ SOUSTAVA	23
OBRÁZEK 16: GRAF SPEKTRÁLNÍ CITLIVOSTI JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ ČÍPKŮ SÍTNICE ČLOVĚKA [33]	24
OBRÁZEK 17: GRAF SPEKTRÁLNÍ PROPUSTNOSTI JEDNOTLIVÝCH FILTRŮ	24
OBRÁZEK 18: GRAF PROPUSTNOSTI MODRÉHO A ZELENÉHO FILTRU UMÍSTĚNÝCH ZA SEBOU	25
OBRÁZEK 19: GRAF PROCENTUELNÍ PROPUSTNOSTI MODRÉHO A ZELENÉHO FILTRU	25
OBRÁZEK 20: BAREVNÉ FILTRY ZE SADY EXPERIMENTIER BRILLE.....	27
OBRÁZEK 21: GRAF PROPUSTNOSTI ČERVENÉHO A TYRKYSOVÉHO PLASTOVÉHO FILTRU.....	27
OBRÁZEK 22: GRAF PROCENTUELNÍ PROPUSTNOSTI ČERVENÉHO PLASTOVÉHO FILTRU.....	28

OBRÁZEK 23: GRAF PROCENTUENÍ PROPUSTNOSTI TYRKYSOVÉHO PLASTOVÉHO FILTRU	28
OBRÁZEK 24: GRAF PROCENTUENÍ PROPUSTNOSTI TYRKYSOVÉHO A ZELENÉHO PLASTOVÉHO FILTRU	29
OBRÁZEK 25: GRAF PROCENTUENÍ PROPUSTNOSTI TYRKYSOVÉHO A ZELENÉHO PLASTOVÉHO FILTRU	30
OBRÁZEK 26: TEORETICKÉ DICHROMATICKÉ VIDĚNÍ KOČKY DOMÁCÍ.....	31
OBRÁZEK 27: TEORETICKÉ DICHROMATICKÉ VIDĚNÍ KOČKY DOMÁCÍ [34].....	31
OBRÁZEK 28: POROVNÁNÍ BAREVNÉHO VIDĚNÍ ČLOVĚKA (NAHOŘE) A KOČKY DOMÁCÍ (DOLE).....	32
OBRÁZEK 29: TEORETICKÉ DICHROMATICKÉ VIDĚNÍ PSA DOMÁCÍHO.....	33
OBRÁZEK 30: TEORETICKÉ DICHROMATICKÉ VIDĚNÍ PSA DOMÁCÍHO [35].....	33
OBRÁZEK 31: POROVNÁNÍ BAREVNÉHO VIDĚNÍ ČLOVĚKA (VLEVO) A PSA DOMÁCÍHO (VPRAVO).....	33
OBRÁZEK 32: POROVNÁNÍ BAREVNÉHO VIDĚNÍ ČLOVĚKA (NAHOŘE) A PSA DOMÁCÍHO (DOLE).....	34
OBRÁZEK 33: JAK VIDÍ OBRAZ V TELEVIZI ČLOVĚK (NAHOŘE), JAK TEORETICKY VIDÍ OBRAZ V TELEVIZI PES DOMÁCÍ (DOLE) [36].....	35
OBRÁZEK 34: TEORETICKÉ MONOCHROMATICKÉ VIDĚNÍ DELFÍNA SKÁKAVÉHO.....	36
OBRÁZEK 35: TEORETICKÉ MONOCHROMATICKÉ VIDĚNÍ DELFÍNA SKÁKAVÉHO.....	36
OBRÁZEK 36: POROVNÁNÍ BAREVNÉHO VIDĚNÍ ČLOVĚKA (NAHOŘE) A DELFÍNA SKÁKAVÉHO (DOLE).....	37
OBRÁZEK 37: POROVNÁNÍ BAREVNÉHO VIDĚNÍ ČLOVĚKA (VLEVO) A DELFÍNA SKÁKAVÉHO (VPRAVO).....	37
OBRÁZEK 38: POROVNÁNÍ BAREVNÉHO VIDĚNÍ ČLOVĚKA (NAHOŘE) A DELFÍNA SKÁKAVÉHO NAD HLADINOU (DOLE) [34].....	38

OBRÁZEK 39: TEORETICKÝ OBRAZ VIDĚNÝ DELFÍNEM PŘI POHLEDU NA TELEVIZNÍ OBRAZOVKU NAD HLADINOU [36].....	38
OBRÁZEK 40: POROVNÁNÍ BAREVNÉHO VIDĚNÍ ČLOVĚKA (NAHOŘE) A DELFÍNA SKÁKAVÉHO (DOLE).....	39
OBRÁZEK 41: ORIGINÁL FOTOGRAFIE (NAHOŘE), FOTOGRAFIE S PŘIDANÝM FILTREM (DOLE).....	40
OBRÁZEK 42: FOTOGRAFIE UPRAVENÁ V GRAFICKÉ EDITORU (NAHOŘE), FOTOGRAFIE POŘÍZENÁ S TYRKYSOVÝM FILTREM (DOLE)	41
OBRÁZEK 43: ORIGINÁL FOTOGRAFIE (NAHOŘE), FOTOGRAFIE UPRAVENÁ V GRAFICKÉM EDITORU (DOLE VLEVO), FOTO POŘÍZENÉ S TYRKYSOVÝM FILTREM (DOLE VPRAVO)	42