

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
BIOMEDICÍNSKÉHO
INŽENÝRSTVÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2019**

**JAN
SOUKUP**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta biomedicínského inženýrství
Katedra přírodovědných oborů**

Vliv světelných podmínek na vnímání barev

Influence of light conditions on color perception

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Optika a optometrie

Autor projektu: Jan Soukup

Vedoucí projektu: Mgr. Jana Urzová, Ph.D.

Kladno 2019



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Soukup** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **465448**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra přírodovědných oborů**
Studijní program: **Biomedicínská a klinická technika**
Studijní obor: **Optika a optometrie**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv světelných podmínek na vnímání barev

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of light conditions on color perception

Pokyny pro vypracování:

Student zpracuje téma vlivu světelných podmínek na vnímání barev a seznámí se s problematikou různých typů osvětlení a s tím souvisejícími veličinami. V teoretické části student zpracuje poznatky týkající se vnímání barev, porovná světelné podmínky a popíše jejich přímý dopad na barevné vidění. V praktické části student provede testování barvocitu za mezopických podmínek na skupině alespoň 20 osob. Naměřené výsledky student statisticky zpracuje a porovná s hodnotami z předešlých měření. Dále student provede měření různých typů osvětlení na akademické půdě FBMI za pomoci spektrometru a výsledky statisticky zpracuje.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ROZSÍVAL, P. a kol., Oční lékařství, ed. 1, Galén, Karolínium, 2006, ISBN 80-7262-404-0
- [2] KUCHYNKA, P., Oční lékařství, ed. 2., Praha: Grada Publishing, 2016, ISBN 978-80-247-5079-8
- [3] ŠIKL, R., Zrakové vnímání, ed. 1, GRADA, 2012, 312 s., ISBN 978-80-247-3029-5

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

Mgr. Jana Urzová, Ph.D.

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.02.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

doc. Ing. Lenka Lhotská, CSc.
podpis vedoucí(ho) katedry

prof. MUDr. Ivan Dylevský, DrSc.
podpis děkana(ky)

Název bakalářské práce: Vliv světelných podmínek na vnímání barev

Abstrakt:

Teoretická část bakalářské práce pojednává o problematice barevného vnímání a světelných podmínkách, které na toto vnímání mají zásadní vliv. Úvod práce se týká anatomie sítnice, popisu jejích vrstev a detailněji je rozebrána vrstva fotoreceptorů. Další část mé práce je věnována vnímání barev a různým teoriím, které s ním souvisí. Nedílnou součástí práce je popis adaptace oka na různé světelné podmínky a podrobnější popis samotných podmínek. Závěrečná část pojednává o fotometrických veličinách, jejich měření a hygieně osvětlení. V praktické části je zpracovaný experiment vlivu osvětlení na vnímání barev. Měření bylo provedeno na 35 probandech při čtyřech různých hodnotách osvětlení od 2 do 320 luxů za pomoci barevného testu. V druhé části je porovnáno spektrum osvětlení na akademické půdě FBMI s přirozeným osvětlením.

Klíčová slova:

Sítnice, fotometrie, barvocit, mezopické vidění

Bachelor's Thesis title: Influence of light conditions on color perception

Abstract:

A theoretic part of bachelor's thesis is about problematic of color perception and light conditions, which have a major influence on this perception. In introduction of this work is written about anatomy of a retina, description of retina layers and detail description of photoreceptors. Following part of work is dedicated to color perception and various theories, which are related to color perception. Inseparable part of work is description of adaptation of the eye for various light conditions and more detailed description of each condition. In final part are described photometric quantities, their measurement and the hygiene of lighting. In practical part was done an experiment of influence of light on color perception. Measuring was made on 35 probands in four various values of light from 2 until 320 luxes with the help of color test. In the second part is compared spectrum of light in university campus of FBMI with natural Sun lighting.

Key words:

Retina, photometry, color vision, mesopic vision

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí mé bakalářské práce Mgr. Janě Urzové, Ph.D. za ochotu při mých dotazech, potřebnou pomoc při nejasnostech a za přínosné rady při zpracování mé práce. Dále bych rád poděkoval mému kamarádovi Jaromírovi Chaloupkovi za asistenci při sbírání dat pro praktickou část bakalářské práce.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „*Vliv světelných podmínek na vnímání barev*“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k projektu.

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).

V Kladně dne

.....

podpis

Obsah

| | |
|------------------------------------------------------|----|
| 1. Úvod | 1 |
| 2. Sítnice | 2 |
| 2.1 Stavba sítnice | 3 |
| 2.2 Fotoreceptory | 4 |
| 2.2.1 Tyčinky | 5 |
| 2.2.2 Čípky..... | 6 |
| 2.3 Optická část sítnice | 7 |
| 3. Vnímání barev | 9 |
| 3.1 Vlastnosti barev..... | 9 |
| 3.1.1 Odstín bravy..... | 9 |
| 3.1.2 Sytost barvy | 10 |
| 3.1.3 Jas barvy | 10 |
| 3.2 Vjem barvy..... | 11 |
| 3.3 Teorie vnímání barev | 11 |
| 3.3.1 Young-Helmholtzova trichromatická teorie | 12 |
| 3.3.2 Heringova teorie protikladného procesu..... | 13 |
| 3.3.3 Dvoustupňová teorie | 13 |
| 3.4 Adaptace oka | 14 |
| 3.4.1 Adaptace na světlo | 14 |
| 3.4.2 Adaptace na tmu | 15 |
| 3.4.3 Purkyňův jev | 16 |
| 3.4.4 Fotopické, mezopické a skotopické vidění | 17 |
| 3.4.5 Fotopické vidění | 18 |
| 3.4.6 Skotopické vidění | 18 |
| 3.4.7 Mezopické vidění..... | 18 |
| 4. Fotometrické veličiny | 19 |
| 4.1 Světelný tok (ϕ)..... | 19 |
| 4.2 Svítivost (I)..... | 19 |

| | |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 4.3 Osvětlení (E) | 21 |
| 4.4 Jas (L) | 21 |
| 4.5 Světlení (M_V) | 22 |
| 4.6 Měření světelně technických veličin | 22 |
| 4.6.1 Měření osvětlenosti | 23 |
| 4.6.2 Luxmetr | 23 |
| 4.6.3 Měření jasu | 25 |
| 4.6.4 Goniofotometr | 26 |
| 5. Hygiena osvětlování | 27 |
| 5.1 Rozdělení osvětlení | 28 |
| 5.1.2 Umělé osvětlení | 28 |
| 5.2 Zásady pro kvalitu osvětlování | 29 |
| 5.2.1 Činitel denní osvětlenosti | 30 |
| 5.2.2 Udržovaná osvětlenost, rovnoměrnost osvětlení | 30 |
| 5.2.3 Barevný tón světla | 30 |
| 5.3 Hygienické normy osvětlování pracoviště | 31 |
| 6. Praktická část | 32 |
| 6.1 Předpokládaný výsledek | 32 |
| 6.2 Metodika měření | 32 |
| 6.2.1 Testovací barevné tabulky | 33 |
| 6.2.2 Světelné podmínky | 35 |
| 6.2.3 Průběh měření | 36 |
| 6.3 Zpracování výsledků | 37 |
| 6.4 Měření spektrometrem | 43 |
| 6.4.1 Princip spektrometru | 43 |
| 6.4.2 Průběh měření, vyhodnocení výsledků | 44 |
| 6.5 Diskuze | 47 |
| 7. Závěr | 49 |
| Seznam použité literatury | 50 |
| Seznam obrázků | 53 |
| Příloha I. | 54 |
| Příloha II. | 55 |

1. Úvod

Lidské oko je pozoruhodný orgán skládající se z několika částí, které tvoří optický systém. Jeho nejpodstatnější schopností je bezpochyby zrakový vjem neboli schopnost vidět, ale neméně důležitou schopností je vnímat a rozeznávat barvy. Oko je schopno rozeznávat barvy v závislosti na jejich vlnové délce. Běžně vnímaná část elektromagnetického spektra, na které je oko citlivé se nazývá viditelné světlo a jeho rozmezí se pohybuje mezi 380 – 760 nm. Toto spektrum obsahuje barvy od fialové s nejkratší vlnovou délkou, přes modrou, zelenou a žlutou až k červené barvě s nejdelší vlnovou délkou.

Barevný vjem je tvořen na sítnici oka za pomoci čípků. Čípky se podle rozdílné spektrální citlivosti a obsahu rozdílného fotopsinu dělí na tři typy. Jsou to čípky specializované na modrou, zelenou a červenou barvu spektra. Kombinací funkce těchto tří typů je správně fungující oko schopno vnímat jakoukoli barvu. Čípky ovšem ke správnému vnímání potřebují na rozdíl od tyčinek mnohem většího osvětlení. [1]

Z hlediska intenzity osvětlení rozlišujeme tři druhy podmínek pro vnímání. Je to skotopické, mezopické a fotopické vidění. Skotopické neboli noční vidění je popisováno jako vidění za tmy, kdy se vjemu účastní tyčinky a subjektivně je vnímaná pouze změna intenzity jasu. Fotopické neboli denní vidění je barevné vidění zajišťované primárně čípkami. Mezopického neboli soumráčního vidění se účastní jak čípky, tak tyčinky a jeho vnímaný jas se pohybuje mezi předešlými hodnotami.

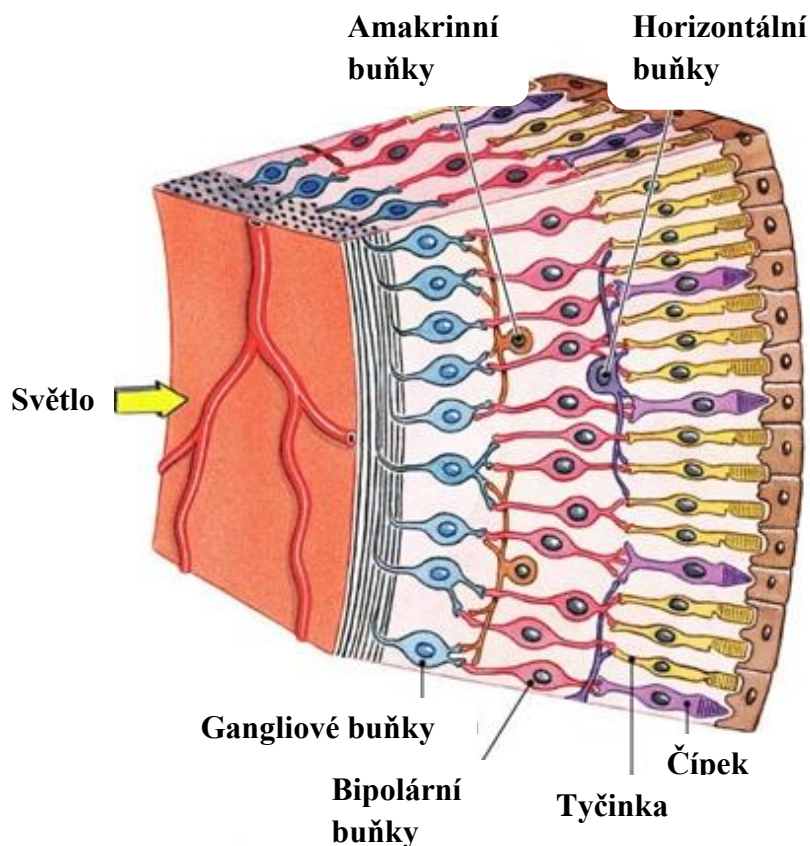
Cílem mé práce je seznámit čtenáře s problematikou hodnocení světelných podmínek a jejich vlivem na vnímání barev. Práce obsahuje popis sítnice z hlediska barevného vidění, rozdělení fotoreceptorů a rozdělení optické části sítnice na makulu, foveu a foveolu. Také popisuje různé teorie vnímání barev. Dále se práce věnuje popisu fotometrických veličin jako je světelný tok, svítivost, jas, osvětlení a jejich měření. Poslední kapitola teoretické části je věnována hygieně osvětlení a platným normám pro osvětlení interiéru.

V praktické části bude proveden experiment pro otestování vlivu množství světla na vnímání změny jasu u základních barev spektra. Testování bude provedeno za pomoci testu s barevnými čtverci. V druhé části bude provedeno měření osvětlení na akademické půdě FBMI pomocí spektrometru a porovnáno s přirozeným slunečním osvětlením.

2. Sítnice

Sítnice (retina) je vnitřní vrstva oční koule (tunica interna oculi) a vzniká invaginací očního váčku. Je složena ze dvou částí. Optická část sítnice (pars optica retinae), která vystýlá zadní segment oka a sahá až k čáře zvané ora serrata retinae, a slepá část sítnice (pars caeca retinae), která pokrývá řasnaté těleso (corpus ciliare) a duhovku (iris). Tato část sítnice neobsahuje fotoreceptory ani nervové buňky. Optickou část sítnice tvoří pigmentový epitel a nervová vrstva. [1,2]

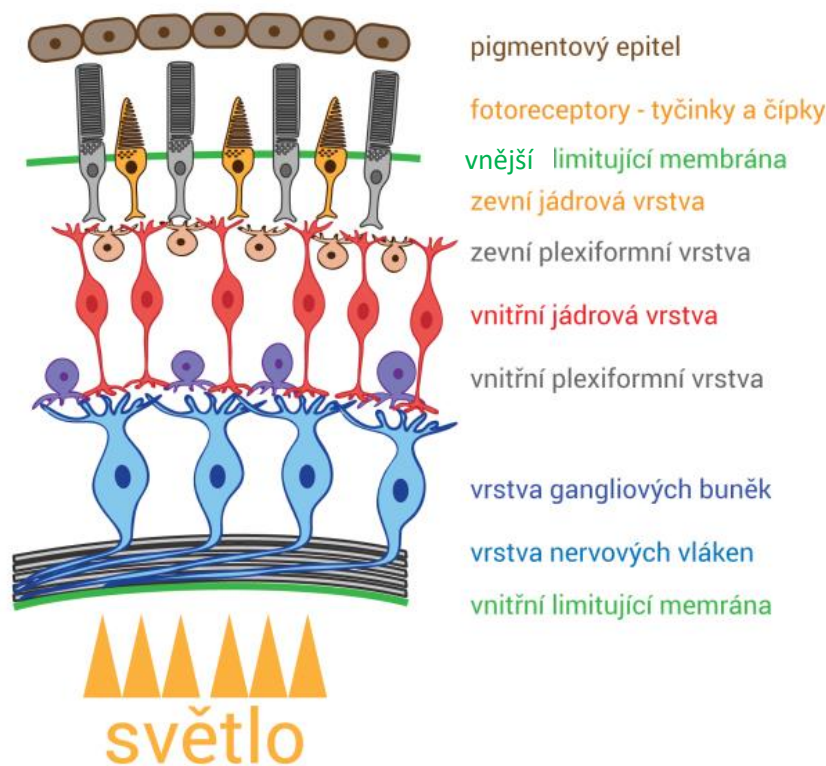
V samotné optické části sítnice jsou světločivé a nervové buňky uspořádány ve třech vrstvách. Nejhlubší vrstvou od nitroočního povrchu sítnice je vrstva světločivých elementů (tyčinek a čípek) naléhající na pigmentový epitel. Světločivé buňky jsou první neurony sítnice. Prostřední vrstva, která se nachází uprostřed tloušťky sítnice, je vrstva bipolárních buněk, které jsou druhými neurony sítnice. Vnitřní vrstva buněk, která se nachází nejbliže povrchu sítnice, jsou gangliové buňky, které představují třetí neurony sítnice. Jejich dlouhé výběžky neboli neurity, se sbíhají po povrchu sítnice a vytváří optický nerv (n. opticus). [1,2]



Obrázek 1: Sítnice [3]

2.1 Stavba sítnice

Díky spojení tří vrstev neuronů ve vrstvách synapsí společně s jejich ohraničujícími membránami vzniká jedenáctivrstevná stavba sítnice. Tyto vrstvy seřazené od nejhlubší k nitroočnímu povrchu jsou: bazální membrána pigmentového epitelu (Bruchova membrána), vrstva pigmentového epitelu (stratum pigmentosum), vrstva tyčinek a čípků - tj. jejich světločivých výběžků, membrana limitans externa – tenká membrána oddělující světločivé výběžky tyčinek a čípků od jejich jádro obsahujících částí, zevní vrstva jader tyčinek a čípků, zevní plexiformní vrstva – tj. nervová vlákna a synapse mezi tyčinkami a čípký z jedné strany a bipolárními buňkami z druhé, vnitřní vrstva jader – tj. jader bipolárních buněk a nervových buněk střední vrstvy sítnice zahrnující ganglion sítnice (ganglion retinae), vnitřní plexiformní vrstva, vrstva gangliových buněk – formující ganglion opticum, vrstva nervových vláken – kterou tvoří neurity gangliových buněk jež se sbíhají po povrchu sítnice do zrakového nervu (n. opticus) a membrana limitans interna – tj. mikroskopická membrána na povrchu sítnice, která vzniká spojením výběžků Müllerových podpůrných buněk. Tyto vrstvy jsou zobrazeny na obrázku 2. [1,2,4]



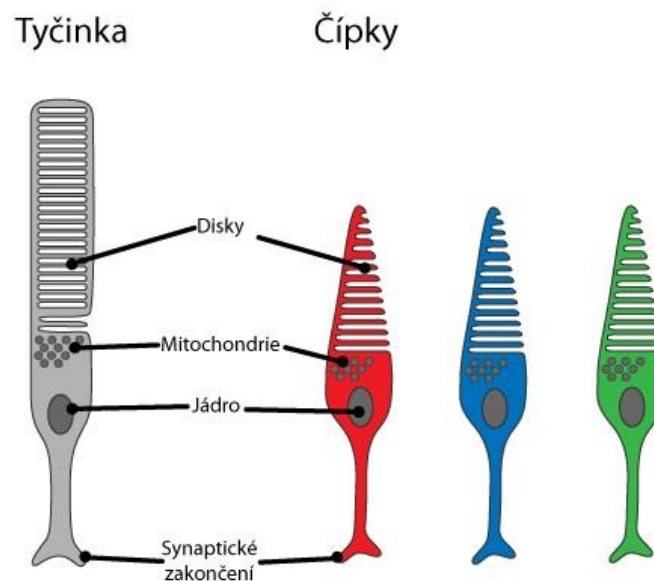
Obrázek 2: Vrstvy sítnice [3]

- 1) **Pigmentový epitel sítnice** je jednovrstevný kubický epitel, jehož cylindrické buňky vstupují mezi světločivé elementy. Hlavní funkce tohoto epitelu je výživa a transport kyslíku právě pro tyčinky a čípky. Další funkcí je světelná izolace, kterou zajišťuje společně s pigmentovou vrstvou cévnatky. Tyto dvě části pohlcují světelné paprsky vstupující do oka a zabraňují tak jejich odražení. Baze cylindrických buněk epitelu spočívají na lamina vitrea cévnatky (choroidea) a tvoří Bruchovu membránu. [1, 2, 3]
- 2) **Vrstva světločivých elementů** se skládá z tyčinek, kterých je v sítnici kolem 120 milionů a čípků, kterých je asi 6 milionů. Tyčinky a čípky jsou primární smyslové buňky (fotoreceptory) neboli modifikované bipolární neurony. V sítnici nejsou rozmístěny rovnoměrně, ale čípky jsou v makule a tyčinky v periférii. [1,2]
- 3) **Membranu limitans externa** tvoří výběžky gliových Müllerových buněk a tyčinky a čípky touto membránou prochází. [2]
- 4) **Zevní jádrovou vrstvu** tvoří samotná jádra tyčinek a čípků. [2]
- 5) **Zevní plexiformní vrstva** obsahuje synapse mezi tyčinkami a čípky a dendrity bipolárních buněk. [2]
- 6) **Vnitřní jádrovou vrstvu** tvoří jádra čtyř typů buněk. Jsou to buňky bipolární, horizontální, amakrinní a Müllerovy. [2]
- 7) **Ve vnitřní plexiformní vrstvě** se nachází synapse axonů bipolárních buněk s dendrity multipolárních neuronů. [2]
- 8) **Vrstva gangliových buněk** je tvořena multipolárními neurony. [2]
- 9) **Vrstvu nervových vláken** tvoří axony multipolárních neuronů a sítnici opouští jako zrakový nerv. [2]
- 10) **Membrana limitans interna** je tvořena, stejně jako je tomu u membrany limitans externy, výběžky Müllerových buněk. [2]

2.2 Fotoreceptory

Fotoreceptory jsou primární smyslové buňky a dělíme je na dva druhy – tyčinky a čípky. Na každém fotoreceptoru můžeme rozlišovat vlastní tyčinku nebo čípek, oblast jádra a oblast synapsí. Sítnice obsahuje asi 140 milionů tyčinek a 5 milionů čípků. Při stárnutí se snižuje hustota tyčinek, ale počet čípků zůstává stejný. Nejvíce čípků najdeme ve foveole, kde se jich nachází asi 10 % ze všech čípků sítnice. Při podráždění fotoreceptorů začíná proces tvorby očního vjemu. [1,2,4]

Tyčinky jsou důležité hlavně pro vnímání rozdílů světla i při velmi nízkém osvětlení, zatímco čípky plní svou funkci za jasného světla. Tyčinky jsou nejcitlivější v modrozelené oblasti při fotonickém vidění, čípky naopak umožňují barevné vidění a zrakovou ostrost. Tyčinky a čípky se mezi sebou liší v několika znacích i vizuálně. Odlišují se tvarem zevních a vnitřních segmentů, umístěním jádra, nebo tvarem synaptických zakončení. Všechny receptory mají však zevní a vnitřní segment. Zevní segment obsahuje zrakový pigment a ve vnitřním probíhají metabolické procesy. Rozdělení a popis fotoreceptorů se nachází na obrázku 3. [4]



Obrázek 3: Fotoreceptory [4]

2.2.1 Tyčinky

Tyčinky jsou výrazně početnější skupinou fotoreceptorů a jsou více než tisíckrát citlivější než čípky. Za optimálních podmínek mohou být podrážděny již jednotlivými fotony. Nejsou citlivé na barvy, ale zajišťují nám adaptaci na tmou a tzv. skotopické vidění. Optimální adaptace proběhne asi za 30 minut nebo déle, jelikož proces adaptace tyčinek je zpravidla mnohem pomalejší než adaptace čípků na barvy. Citlivost tyčinek je posunuta ke kratším vlnovým délkám v porovnání s čípkami. [5]

I když je zraková ostrost nebo rozlišení mnohem lepší u čípků, tyčinky jsou mnohem lepšími pohybovými senzory. Tyčinky převládají v periferním vidění, a proto je periferní vidění mnohem více citlivé na světlo. Díky tomu můžeme v periférii vidět i tlumenější předměty.

Při periferním pohledu vnímáme i méně jasný předmět. Pokud se ale zaměříme přímo na něj, tak zmizí, jelikož přesuneme obraz do fovey, kde se nachází čípky a je tak méně citlivá na světlo. V periférii vnímáme lépe díky tyčinkám také pohyb. [5]

Vlastní tyčinka je složená ze zevního a vnitřního segmentu a tyto dvě části jsou spojeny zúženou spojovací částí. Pod tímto zúžením je uloženo bazální tělísko, kolem kterého jsou nahromaděny mitochondrie. Mitochondrie jsou známkou zvýšené produkce energie v této části buňky, která je nezbytná pro proces vidění. Vnitřní segment obsahuje potřebné orgány pro syntézu bílkovin a produkci energie. Pod vnitřním segmentem se nachází zúžená oblast buňky, kde můžeme pozorovat mnoho neurofilament. Kolem jádra je buňky lehce rozšířena a končí terminálním rozšířením. V zevním segmentu se nachází 600 – 1000 plochých diskovitých struktur, ohraničených membránou, které jsou jako mince paralelně uspořádané do sloupce. [1,2]

Diskovité struktury obsahují zrkové barvivo purpur, které se nazývá rhodopsin. Molekuly rhodopsinu mají kruhovitou strukturu a nachází se na zevním povrchu lipidové dvojrstvy membránových disků. Zevní segment je fotosenzitivní. Rhodopsin se po dopadu světla rozkládá na aldehyd vitamínu A (retinal) a protein opsin. Tato reakce se nazývá bělení (bleaching). Rhodopsin po dopadu světelných paprsků mění barvu tak, že zbledne a vyvolá nervový vzruch, který vychází na druhé straně buňky rozšířenou sferulou, která představuje neurit světločivé buňky. Jedná se o první krok ve složitém procesu vidění. [1, 2, 6]

2.2.2 Čípky

Čípky mají podobnou stavbu jako tyčinky, liší se ovšem tvarem zevního segmentu. Jsou kratší, silnější a mají kónický tvar. Jejich tvar se ovšem liší podle lokalizace na sítnici. V centrální jamce (fovea centralis) mohou být stejně dlouhé nebo i delší než tyčinky. Největší koncentrace čípků je ve žluté skvrně (makula), ve které se nachází již zmíněná fovea centralis. Fovea je místo nejostřejšího vidění a odtud směrem do periferie sítnice hustota čípků postupně klesá. Distribuce tyčinek a čípků je znázorněna na obrázku 3. Stejně jako tyčinky obsahují čípky paralelně uspořádané diskovité struktury, ale tyto struktury jsou kontinuální a mají buněčnou membránu, ze které vznikají invaginací. [1, 2, 7]

Světlo absorbující molekula čípků se velmi podobá retinalu a je jedna ze dvou částí rodopsinu. Čípky obsahují stejně jako tyčinky zrakový pigment, ovšem ne pouze jeden typ, ale dokonce tři typy. Jsou nazývány podle vlnové délky jako S (short) pro krátké, M (medium) pro středně dlouhé a L (long) pro dlouhé. Na rozdíl od tyčinek jsou citlivé na modré, zelené a červené světlo. Tato senzitivita molekuly retinalu závisí na specifickém typu proteinu opsinu, na kterém je vázán. Čípkové pigmenty mají vrcholy vlnových délek v modré 430 nm, zelené 530 nm a v oranžové 565 nm barvě. [1, 4, 6, 8]

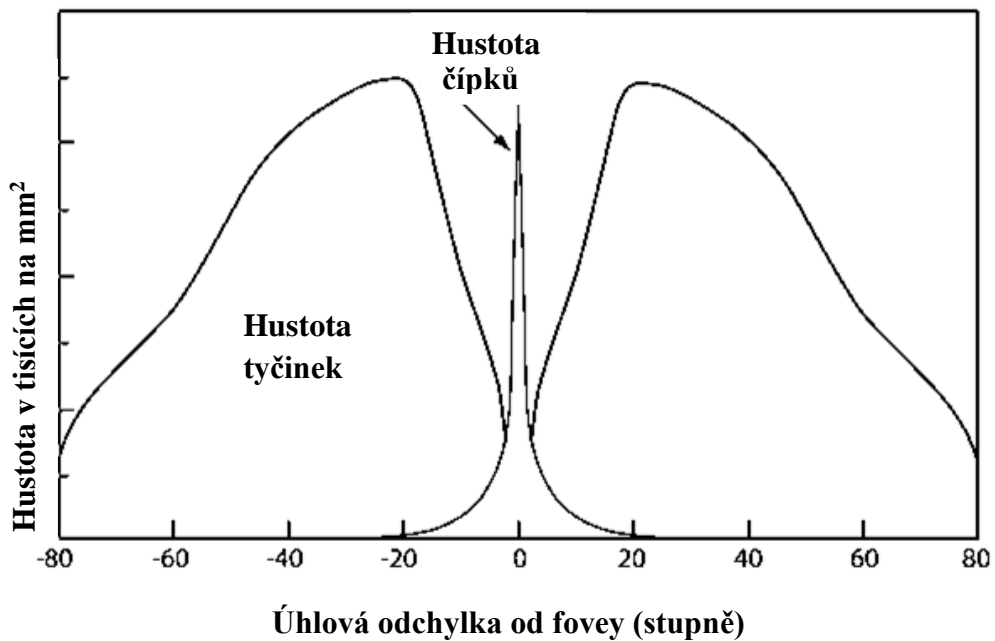
Vnímání barev je schopnost oka rozlišit mezi různými barvami a jejich odstíny. Je to funkce čípků za fotopických podmínek. Mechanismus vnímání barev není stále zcela jasný, ale existuje několik teorií, z nichž dvě jsou nejpravděpodobnější a mají nejvíce zastánců. První z nich a současně nejvíce rozšířená je trichromatická teorie, která se také nazývá podle svých navrhovatelů Thomase Younga a Hermanna von Helmholtze Young-Helmholtzova teorie. Tato teorie zastává názoru, že v sítnici máme tři typy čípků obsahujících tři rozdílné fotopigmenty popsané v předešlém odstavci. Předpokládá se, že u všech třech typů čípků je za vjem odpovědný retinal navázaný se třemi různými opsiny (iodopsiny). Kombinací těchto tří barev je oko schopno vnímat jakoukoli barvu. Pocit barvy je určen pomocí relativní četnosti impulsu z každého ze tří čípkových systémů. [6, 7]

2.3 Optická část sítnice

Optická část sítnice (*pars optica retinae*) je blanka, která leží víceméně volně na pigmentovém epitelu sítnice a je k němu přitisknuta pouze tlakem sklivce z vnitřní strany oka. Toto volné položení platí pro optickou sítnici výhradně až na dvě místa. Prvním je disk optického nervu (*disc nervi optici*) nazývaný také jako slepá skvrna, jelikož se zde nenachází žádné světločivé buňky, a druhým je linie *ora serrata*. [1,3]

Důležitější částí optické části sítnice je však žlutá skvrna (*macula lutea*), která se nachází zevně od disku optického nervu a je nejostřejším místem vidění. Makula má průměr asi 5,5 mm a je složena především z čípků, které jsou v těchto místech protáhlé a podobají se tyčinkám. Nenacházejí se zde žádné větší cévní větve. Díky tomu má makula zažloutlou barvu odlišnou od okolní sítnice a od toho odvozený svůj český ekvivalent. V makule je uprostřed jemná prohlubenina, která se nazývá *fovea centralis* a jejímž středem prochází zorná osa oka. [1,3,6]

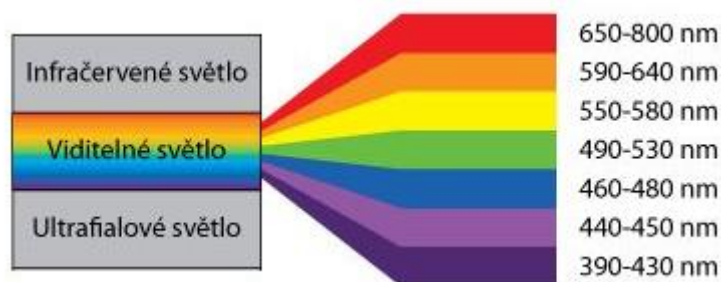
Fovea má průměr asi 1,5 mm a je nejcitlivějším místem sítnice. Na jejím dně je asi 2500 čípků, v centrální části, kde se nenachází žádné tyčinky, je jich kolem 35 000 a v celé jamce dohromady se jich vyskytuje přes 100 000. Kromě vrstvy fotoreceptorů jsou v tomto místě ostatní vrstvy sítnice velice tenké. Centrální část fovey se nazývá foveola a sestává také pouze z čípků a jejich jader, která jsou kryta tenkou membránou limitans interna. Ostatní vrstvy sítnice se v tomto místě nenachází. Na obrázku 3 je hustota a rozložení čípků a tyčinek v sítnici. [1,6]



Obrázek 4: Rozložení tyčinek a čípků v sítnici [5]

3. Vnímání barev

Vnímání barev neboli barvocit je schopnost oka vidět barevné předměty. Světlo, které má své specifické spektrální složení, po dopadu na sítnici vyvolá v mozku subjektivní barevný vjem. Barevné vidění je zprostředkováno díky čípkům za fotopických podmínek. V sítnici se nachází tři typy čípků s rozdílnou citlivostí na červenou, zelenou a modrou složku barvy viditelného světla. Vidíme barevně ve chvíli, kdy se od neprůhledného barevného předmětu odráží světlo a tím se aktivuje visuální proces v oku a mozku. Pokud se budeme bavit o barvě jako takové, jedná se o subjektivní psychofyziologický vjem, který zprostředkovává zrakový orgán, tedy oko. Tento vjem je závislý na podmínkách pozorování a osvětlení. Lidské oko je citlivé na viditelné světlo, což odpovídá v elektromagnetickém spektru vlnové délce 360 – 780 nm. V této části spektra je oko schopné rozeznávat několik barev a jejich skládáním zajistit barevný vjem. Vlnové délky barev viditelného světla vidíme na obrázku 3. [3,9,10,11]



Obrázek 5: Vlnové délky barev viditelného světla [12]

3.1 Vlastnosti barev

3.1.1 Odstín barvy

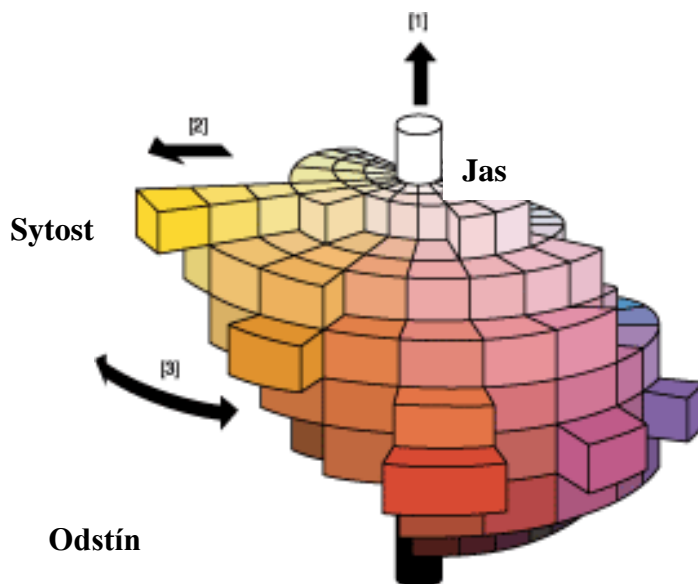
Odstín barvy společně s jasnou a sytostí tvoří základní vlastnosti každé barvy. Pojmy jako modrá, zelená, žlutá popisují především odstín barvy. Odstín je vztažen k vlnovým délkám spektrálních barev. Pro praktickou představu byly barvy seřazeny podle sytosti odstínu kolem Newtonova barevného kruhu. Počínaje červenou a po směru hodinových ručiček dokola až po modrou sledujeme přechod od dlouhých ke kratším vlnovým délkám. Ne všechny odstíny však mohou být reprezentovány spektrálními barvami. Neexistuje žádná vlnová délka světla, která má odstín magenta. Tento odstín může být namíchaný správným poměrem modré a červené. Stejný odstín barvy může být namíchaný různými vlnovými délkami. [13,14]

3.1.2 Sytost barvy

Sytost barvy je druhá velice důležitá vlastnost barvy. Pro příklad růžová barva může mít stejný odstín jako červená, ale je méně sytá. Plně sytá barva je taková, kde není přimíchána žádná bílá. Spektrální barvy mající pouze jednu vlnovou délku jsou plně syté, ale můžeme mít plně sytou barvu magenta, která není spektrální barvou. Pokud budeme chtít sytost barvy kvantifikovat, musíme brát v potaz, že některé spektrální barvy jsou předurčeny k tomu být sytější než jiné. Například monochromatická červená a fialová je vnímána jako sytější než monochromatická žlutá. [13,14]

3.1.3 Jas barvy

Jas barevné plochy závisí na osvětlení této plochy a její odrazivosti (reflektivitě). Čím je osvětlení výkonnější, tím jasnější barva je. Jelikož vnímaný jas není lineárně úměrný reflektivitě, používá se stupnice od 0 do 10 pro reprezentování vnímaného jasu v systémech pro měření barev jako je například Munsellův systém. Při hodnotě jasu 0 vidíme pouze černou barvu, a pokud je hodnota jasu na 10, tak barvu bílou a nezáleží na jejím odstínu. [13,14,15]

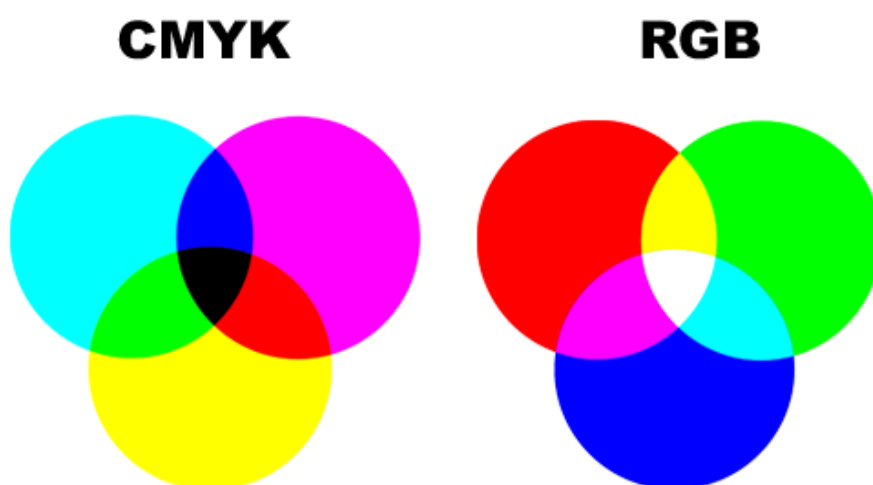


Obrázek 6: Tři základní vlastnosti barvy [16]

3.2 Vjem barvy

Vjem vlastní barvy vzniká v mozku po dopadu světla s určitým spektrálním složením na oko. Jedná se o velice složitý proces, kdy dochází k podráždění sítnice energií ze záření s určitou vlnovou délkou. Tento barevný vjem je ovlivňován i dalšími faktory mimo ty základní. Za kvalitu barevného vjemu neboli počítku může i velikost stimulu, intenzita stimulu, umístění stimulu na sítnici, adaptace sítnice a v neposlední řadě trvání barevného stimulu, které souvisí s adaptací. [17,18]

Lidské oko je nesmírně schopné v rozeznávání i malých rozdílů ve vlnových délkách, a to i v jednotkách nm. Barvu vnímáme díky již zmíněným třem typům čípků pro různé spektrální barvy, a to pro červenou, zelenou a modrou. Podle jejich anglických ekvivalentů se také nazývá jeden z barevných modelů RGB-red, green and blue. Tento model pojednává o aditivním míchání barev. Dalším modelem je CMYK, který popisuje subtraktivní míchání barev. [3,18]



Obrázek 7: Subtraktivní (CMYK) a aditivní (RGB) míchání barev [19]

3.3 Teorie vnímání barev

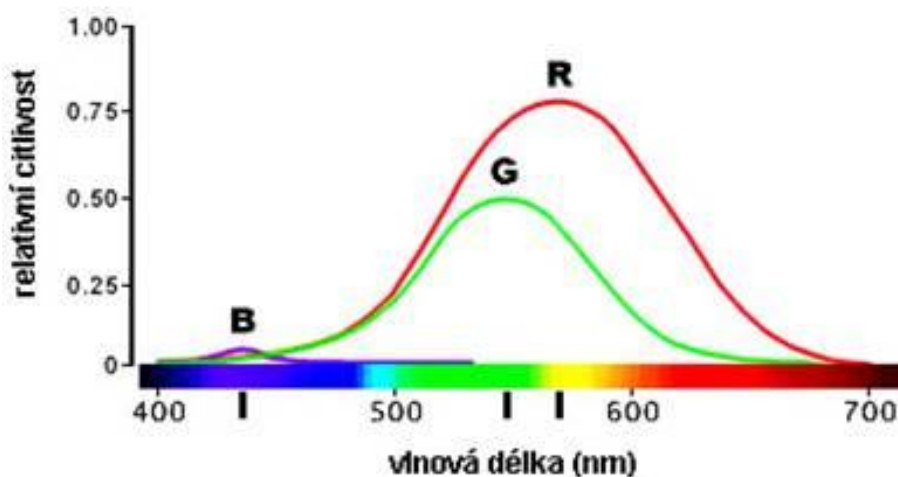
V současnosti se nejvíce využívají dvě hlavní teorie vnímání barev, které vznikaly v minulosti postupně. První z nich a zároveň nejvíce zastávaná je trichromatická teorie neboli Young-Helmholtzova teorie pojmenovaná po svých autorech, kterými jsou Thomas Young a Hermann von Helmholtz. Thomas Young tuto teorii vytvořil již v roce 1807, tedy ještě dlouho před tím, než vědci objevili fotocitlivé buňky – čípky. O šedesát let později v roce 1867 tuto

teorii přepracoval a doplnil Helmholtz do současné podoby, jak ji známe. Druhou teorií je Heringova teorie protikladných barev. S tou přišel německý fyziolog Ewald Hering kolem roku 1878, ale ve své době se nedočkal velkého ohlasu. Na tuto teorii v druhé polovině dvacátých let navázala současná podoba zvaná oponentní teorie barvy. [20,21]

3.3.1 Young-Helmholtzova trichromatická teorie

Ke vnímání barev nám slouží tři typy čípků. Každý z těchto tří typů čípků je citlivý na poměrně široký rozsah vlnových délek, ale největší citlivost má pouze v menším rozsahu. Typy dělíme na délku receptoru podle vlnové délky dané barvy, na kterou jsou nejvíce citlivé. Krátké receptory jsou maximálně citlivé vůči krátkým vlnovým délkám modré barvy, střední receptory vůči středním vlnovým délkám zelené a žluté barvy a dlouhé receptory vůči dlouhým vlnovým délkám červené barvy. Společné fungování těchto tří typů čípků má za následek vnímání barvy. [20,21]

Jinými slovy kombinací působícího světla o určité vlnové délce na tyto tři typy čípků a jejich specifickým poměrem dostáváme vjem určité barvy. Výsledná barva je dána aktivitou receptorů spíše než jedním specifickým receptorem pro danou barvu. Z trichromatické teorie přímo vychází zákon tří primárních barev. Lidské oko je tedy schopno vytvořit vjem jedné barvy za pomoci smíchání tří barev se vzdálenými vlnovými délkami, jelikož se aktivují tři různé typy receptorů a díky tomu získáme podklad pro vjem dané barvy. Trichromatická teorie zároveň vysvětluje různé druhy poruch barevného vnímání, jelikož jde o chybění jednoho či více druhů čípků. Dichromázie je stav, kdy chybí jeden typ receptoru, při monochromázii chybí dva ze tří typů receptorů. [20]



Obrázek 8: Znázornění trichromatické teorie pomocí citlivosti typů čípků [22]

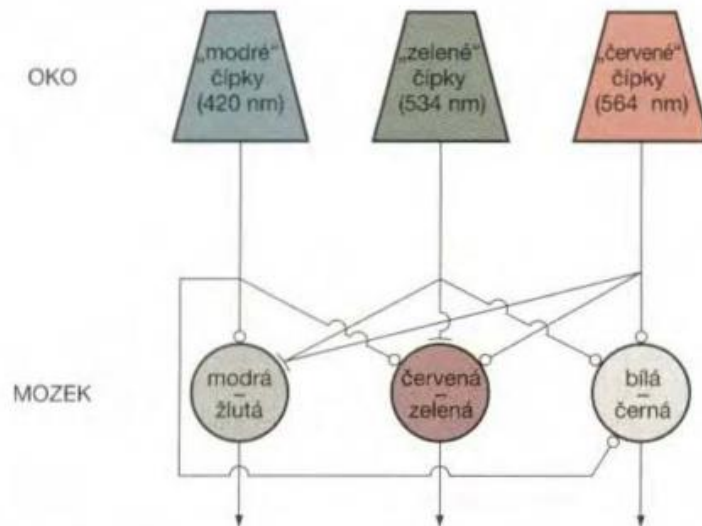
3.3.2 Heringova teorie protikladného procesu

Tato teorie říká, že na vnímání barev používáme dva protikladné páry. Prvním párem je červená a zelená a druhým je žlutá a modrá. Jedním z důvodů, jak se k tomuto tvrzení došlo je, že žádná vnímaná barva není červeno-zelená nebo žluto-modrá. Pokud smícháme červené a zelené světlo, tak výsledný dojem z barvy je spíše žlutý a smícháním žlutého a modrého světla vzniká bílé světlo. Dále tuto teorii podporuje pokus, kdy se proband nejprve po určitou dobu díval na barevné světlo a poté se zadíval na plochu neutrální, kde viděl barvy komplementární k těm, které původně pozoroval. [20]

Hering si byl v teorii jistý tím, že ve zrakové soustavě máme dva typy jednotek, které jsou citlivé na světlo. Jedna z jednotek reaguje na červenou nebo na zelenou a druhá jednotka na modrou nebo žlutou. Každá jednotka reaguje opačně na dvě zmíněné protikladné barvy. Jednotka pro červenou a zelenou barvu, která zvyšuje reakci pro červenou barvu a snižuje reakci pro barvu zelenou, nemůže současně fungovat pro oba případy. Pokud jsou vnímány dvě barvy, které jsou navzájem protikladné, uvidíme bílou barvu. [20]

3.3.3 Dvoustupňová teorie

Obě dvě uvedené teorie jsou schopné vysvětlit určité jevy, které v oku probíhají, ale ani jedna není schopna vysvětlit všechny. Vědci se proto shodli, aby se vytvořila ještě jedna teorie spojující obě předešlé do dvoustupňové teorie. Jedná se o teorii vycházející z poznatků jak trichromatické teorie, jelikož zastává názoru, že v sítnici se nachází opravdu tři druhy čípků citlivé na různé vlnové délky, tak teorie protikladného procesu, kdy ve zrakovém systému by se měly nacházet neurony, které fungují jako jednotky protikladných barev pracující se zrakovou informací ze sítnice. Na obrázku 9 vidíme zjednodušený diagram, jak mohou být propojené receptory s buňkami, které vnímají protikladné barvy. [20]



Obrázek 9: Zjednodušený diagram dvoustupňové teorie [20]

3.4 Adaptace oka

Schopnost lidského oka přizpůsobovat vnímání viditelného světla různé intenzitě osvětlení se nazývá adaptace. Přizpůsobení není vždy okamžité, zpravidla trvá určitou dobu. Tato doba závisí na druhu adaptace. Rozlišujeme dva druhy adaptace, a to adaptace na světlo a adaptace na tmu. Každý z těchto typů má své specifické doby přizpůsobení, kdy adaptace na tmu trvá mnohem déle než adaptace na světlo. [17,23]

3.4.1 Adaptace na světlo

Přizpůsobení oka na světlo trvá obvykle pouze několik vteřin. Lidské oko reaguje na náhlé zvýšení intenzity osvětlení obrannou reakcí, kdy se zúží zornice, aby ochránila oko před oslněním. Pokud se intenzita osvětlení zvýší prudce, chrání se oko dalším mechanismem. Tímto mechanismem je sevření očních víček a zároveň zaclonění očí. Pro plnou adaptaci na světlo ovšem potřebujeme poněkud delší čas než jen pár sekund. Nepříjemné pocity z oslnění odezní zpravidla do jedné minuty, při silnějším světle o něco déle. K úplné adaptaci na světlo dochází asi po čtyřech minutách od oslnění. Než dojde k úplné adaptaci na světlo, má člověk problém s vnímáním kontrastů a odstíny se mu zdají o mnoho jasnější. [23,24]

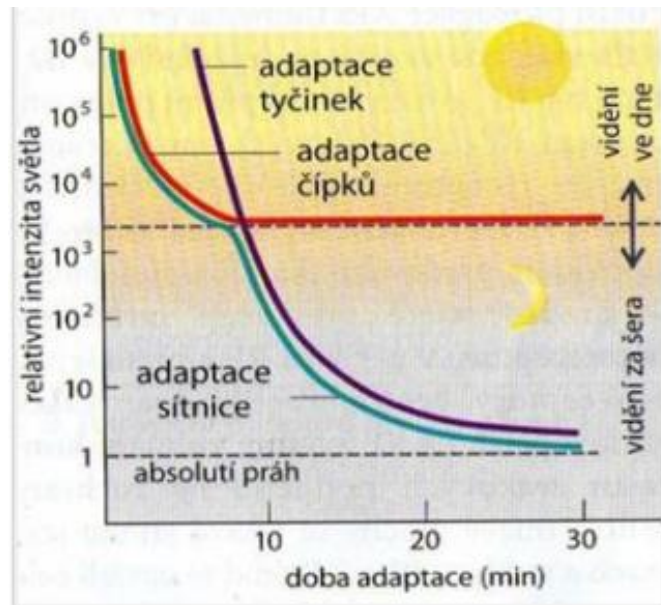
Pokud je v oku přítomna nějaká patologie, jako například chybění nebo paralýza duhovky nebo terapeutická či diagnostická mydriáza, je důležité chránit oko jinými prostředky. Nejlepšími jsou buď tmavé brýle, nebo barevné krycí kontaktní čočky. Výše zmíněné platí pro náhlé a silné zvýšení intenzity osvětlení. V případě, kdy dochází k postupnému a pomalému zvyšování intenzity osvětlení, probíhá proces opačným adaptačním procesem na tmu, který bude popsán následovně. [23]

3.4.2 Adaptace na tmu

Přizpůsobování zraku na šero až tmou má daleko větší význam než adaptace na světlo a zároveň se zde vyskytují i četnější poruchy. Proces adaptace na tmou trvá mnohonásobně déle než opačný proces a závisí velkou měrou na rychlosti, jakou se snižuje intenzita osvětlení. Při pomalém snižování intenzity světla přestává člověk postupně vnímat detaily, barvu předmětů, které pozoruje, později tvar a při ubývajícím osvětlení přestává vnímat předměty úplně. Proti procesu ztráty vnímání jde samotný proces adaptace, při kterém dochází k udržování vnímání. [23,24]

Nastane-li náhlý, prudký pokles intenzity osvětlení, přestáváme vidět prakticky úplně. Adaptace na tento rychlý proces trvá obvykle 40 až 60 minut a je postupná. U některých jedinců se můžeme setkat i s tím, že adaptace trvá poněkud déle. Délka adaptace vždy závisí na konkrétní citlivosti oka a individualitě vnímání. Zároveň se posouvá maximální hodnota spektrální citlivosti oka z vlnové délky 550 nm ke kratším do oblasti kolem 505 nm. Hodnota vlnové délky, ke které se posunula maximální citlivost oka, odpovídá maximální spektrální citlivosti rodopsinu. Tento posun způsobí, že barvy s krátkými vlnovými délkami se za tmy jeví jako světlejší než ty s dlouhými vlnovými délkami. Tento jev se nazývá Purkyňův jev. [17,23]

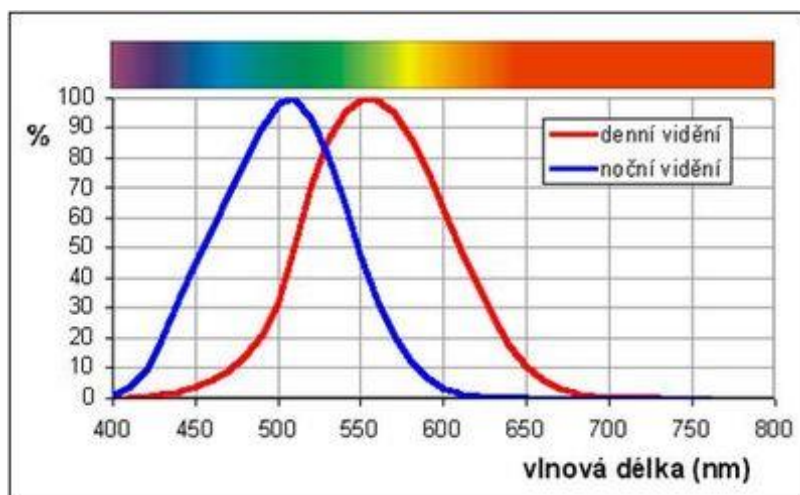
Adaptace na tmou je zpětná resyntéza rozloženého zrakového purpuru rodopsinu v tyčinkách a jodopsinu v čípkách probíhající za tmy. Při fotopických podmínkách ve dne je rodopsin v tyčinkách úplně rozložený, a tudíž nemůže probíhat fotochemický děj. Tyčinky v tomto momentu na světlo nereagují. Jodopsin v čípkách je na rozdíl od rodopsinu rozložený jen částečně a čípky jsou stále schopné reagovat na světlo. Při přechodu ze světla do tmy začíná samotná regenerace zrakového purpuru. Jodopsin se regeneruje mnohem rychleji než rodopsin a jeho koncentrace postupně stoupá a tím stoupá i citlivost čípků. Maximální citlivosti nabývají čípky po pěti až deseti minutách. Po tomto čase začínají mít tyčinky dostatečnou koncentraci rodopsinu a stávají se citlivější než čípky. Plná regenerace rodopsinu trvá zpravidla 45 minut a odpovídá tak rozsahu doby trvání adaptace na tmou. Za tento čas dosahují tyčinky maximální citlivosti. Vliv na adaptaci na tmou má i zornice, která se během tohoto procesu roztáhne na své maximum, aby do oka mohlo procházet co nejvíce světla a tím zvýšit jeho citlivost. [23,24]



Obrázek 10: Průběh adaptace na tmu [25]

3.4.3 Purkyňův jev

Při snižování intenzity světla (tzn. při přechodu z fotopického vidění k vidění skotopickému) se postupně mění citlivost oka k různým barvám. Maximální spektrální citlivost se posouvá ke kratším vlnovým délkám od 550 nm , což odpovídá žlutozelené barvě až k vlnové délce 505 nm , což je barva modrozelená. Jev je způsoben díky maximální spektrální citlivosti tyčinek a čípků. Čípky mají maximum spektrální citlivosti kolem 550 nm a tyčinky okolo 505 nm . Z Purkyňova jevu vyplývá světlostní rozlišení barev za denního světla. Jako nejsvětější se jeví žlutá barva a jako tmavší modrá, či fialová. Z toho lze vyvodit, že žlutou a červenou barvu vidíme nejlépe na světle, kdežto zelenou a modrou za horších světlených podmínek. [23,24,26]



Obrázek 11: Purkyňův jev [27]

3.4.4 Fotopické, mezopické a skotopické vidění

Sítnice má různou citlivost na různé vlnové délky světla. Citlivost závisí především na intenzitě osvětlení, a proto se rozlišují tři oblasti vidění. Jedná se o vidění fotopické neboli denní, vidění mezopické a vidění skotopické neboli noční. Rozdílným viděním se zabývá také tzv. duplicitní teorie vidění. Duplicitní teorie proto, jelikož je rozdíl v čípkovém a tyčinkovém vidění. Teorie je založena na faktu, že pod určitou úrovní jasu se zapojuje jeden systém fotoreceptorů a při vyšších úrovních funguje druhý systém. Tato teorie souvisí i s anatomickým rozmístěním světločivých buněk na sítnici, kdy centrální část sítnice obsahuje převážně čípky. Při nízké intenzitě osvětlení není schopná se uplatnit a je takřka slepá. Proto musí při těchto podmínkách fungovat tyčinky. Z toho vyplývá, že při fotopickém vidění nám obraz předmětu dopadá přímo na centrální část sítnice, a to na žlutou skvrnu, kdežto při skotopickém vidění vidíme kvalitněji periferii sítnice. Pokud vezmeme fakt, že na barvy mohou reagovat pouze čípky, dochází k barevnému vidění pouze za fotopických podmínek, kdežto při skotopických podmínkách je vidění černobílé. V mezopických podmínkách se uplatňuje Purkyňův jev. [24,28,29]

Sítnice člověka má schopnost přizpůsobit se rozličným světelným intenzitám a tím díky přechodům mezi jednotlivými typy vidění udržovat citlivost velkého rozsahu intenzit osvětlení. Plynule dokáže přecházet intenzity osvětlení mezi 0,003 a 80 000 luxy, což je obrovský rozsah. Ovšem hodnota prahového podnětu, který je schopný vyvolat pocit světla je nižší a závisí na schopnosti adaptace na tmu. Za plné adaptace oka byla experimentem zjištěna spodní hranice, při které oko reaguje na světelný podnět na úroveň 54 až 148 fotonů dopadajících na rohovku. Tato hodnota byla zjištěna pro vlnovou délku 510 nm, což téměř odpovídá maximální spektrální citlivosti tyčinek. Této hodnotě odpovídá asi 5 až 15 fotonů, které dopadají až na sítnici a vyvolají fotochemický děj. Nejmenší světelný tok, který je schopný vyvolat zrakový vjem je $3 \cdot 10^{-14}$ lumenů a nazývá se práh vidění. Naproti tomu je práh bolesti, což je nejsilnější světelný tok, který je oko schopno přijmout bez poškození sítnice a rovná se $1,4 \cdot 10^2$ lumenů. [24]

3.4.5 Fotopické vidění

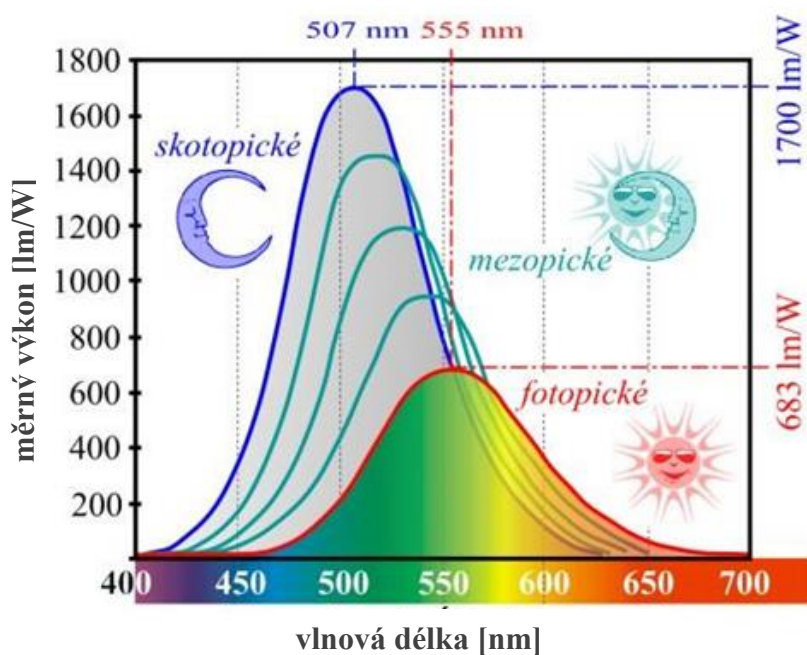
Fotopického vidění neboli vidění za denního světla se účastní primárně čípky a je potřeba dostatečné intenzity osvětlení, vyšší než 10 luxů a jasu většího než 3 cd.m⁻². Za fotopických podmínek je možné vnímat barvy. Nejcitlivějším místem pro vnímání je žlutá skvrna. Při dopadu většího množství světla na sítnici způsobuje rozpad rodopsinu v tyčinkách a v těch nemůže proběhnout fotochemický děj, proto nereagují na světelné podráždění, na které reagují pouze čípky. [24,28,29,30]

3.4.6 Skotopické vidění

Skotopického vidění neboli nočního vidění se na rozdíl od fotopického účastní pouze tyčinky. Jas je při těchto podmínkách menší než 0,01 cd.m⁻² a intenzita osvětlení je menší než 10⁻³ luxů. Na takto nízkou intenzitu osvětlení nedokážou čípky reagovat, a proto nevidíme barvy, pouze rozlišujeme stupně šedé. [24,28,29,30]

3.4.7 Mezopické vidění

Mezopické vidění také nazývané jako vidění za šera či soumravné, má hodnoty intenzity osvětlení i jasu někde mezi předešlými dvěma variantami. V tomto případě fungují jak čípky, tak tyčinky a procentuální rozdělení jejich funkčnosti závisí na intenzitě osvětlení. Pokud bude intenzita vyšší, bude procentuálně zastoupeno při vnímání více čípků než tyčinek a při nižší intenzitě naopak více tyčinek než čípků. [24,28]



Obrázek 12: Postup fotopického, mezopického a skotopického vidění [24]

4. Fotometrické veličiny

Fotometrie jako vědní obor se zaměřuje na měření světla neboli viditelného elektromagnetického záření. Zabývá se světlem z energetického hlediska, posuzuje světelné vlastnosti rozličných světelných zdrojů a zkoumá osvětlení plochy. Kvantifikuje světelné veličiny proto, abychom mohli číselně popsat, jak lidské oko vnímá. Jelikož se citlivost oka váže na definici světla, je citlivost oka ve fotometrických jednotkách zohledněna. Fotometrické veličiny jsou závislé na složení barev ve zkoumaném záření. [31,32,33,34]

4.1 Světelný tok (ϕ)

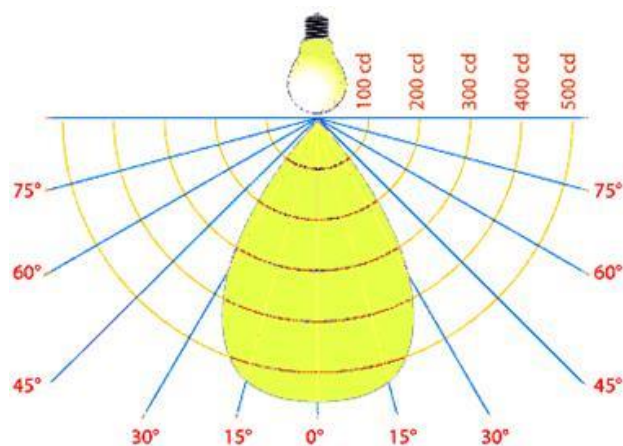
Světelný tok ϕ popisuje přenos světla prostorem a udává se v lumenech (lm). Odpovídá zářivému toku, který se udává ve watech, ale je k němu zahrnuta citlivost oka na barevné světlo. Do světelného toku spadá pouze takové elektromagnetické záření, které je viditelné okem. Světelný tok, který odpovídá $1 lm$ je vyslán bodovým zdrojem mající svítivost $1 cd$ do prostorového úhlu 1 steradiánu. [32,34]

4.2 Svítivost (I)

Svítivost je základní fotometrická veličina, jejíž jednotka kandela (cd) patří mezi základní jednotky soustavy SI. Sice fotometrické veličiny nemají pro fyziku až takový význam, aby měli své místo mezi jednotkami SI, ale jeden zástupce v soustavě být musí pro vyjádření dalších jednotek fotometrických veličin. Jedna kandela odpovídá přibližně svítivosti obyčejné stolní svíčky. Veličina nám udává, kolik světelného toku ϕ vyzáří světelný zdroj do prostorového úhlu ω v daném směru a je dán vztahem (1) [32,33,34]:

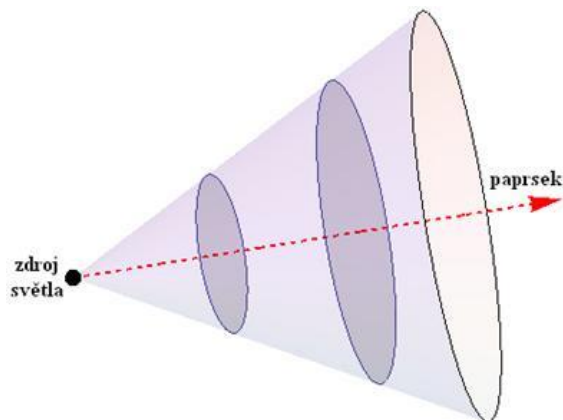
$$I = \frac{\Delta\phi}{\Delta\omega} \quad (1)$$

Svítivost vyjadřuje rozdělení světelný tok do různých směrů, do kterých je zdroj světla schopný vyzařovat. Světelné zdroje zpravidla nevyzařují do všech směrů stejně. Toto můžeme popsat, pokud si představíme svítivost jako soubor vektorů. Vektory vycházejí ze zdroje světla a jejich velikost v určitém směru odpovídá svítivosti v tomto směru. Koncové body vektorů tvoří plochu svítivosti. Řez rovinou, která prochází světelným zdrojem, se nazývá čára svítivosti. Z čar svítivosti se vytvoří diagram svítivosti, který je důležitý pro vyjádření světelného toku pro daný směr. Diagram je znázorněn na obrázku 13. [34]



Obrázek 13: Diagram svítivosti [34]

Svítivost vyjadřuje hustotu světelných paprsků, které jsou závislé na konkrétním směru šíření od zdroje. Hustota paprsků tedy hodnota svítivosti zůstává se změnou vzdálenosti od zdroje stejná. Demonstrace tohoto tvrzení se nachází na obrázku 14. Součinem hustoty paprsků a úhlu, ve kterém byly paprsky vyzářeny, dostaneme světelný tok, který udává celkový počet paprsků jdoucích daným směrem. Příklady svítivosti běžných zdrojů světla jsou uvedeny v tabulce na obrázku 15. [34]



Obrázek 14: Konstantní hustota paprsků při šíření ze zdroje světla [34]

| Zdroj světla | Svítivost |
|----------------------------------------|------------|
| LED | 0,005 cd |
| svíčka | 1 cd |
| 100 W žárovka | 135 cd |
| reflektory automobilu (směrem dopředu) | 100000 cd |
| fotografický blesk (maximální hodnota) | 1000000 cd |

Obrázek 15: Svítivost zdrojů světla [34]

4.3 Osvětlení (E)

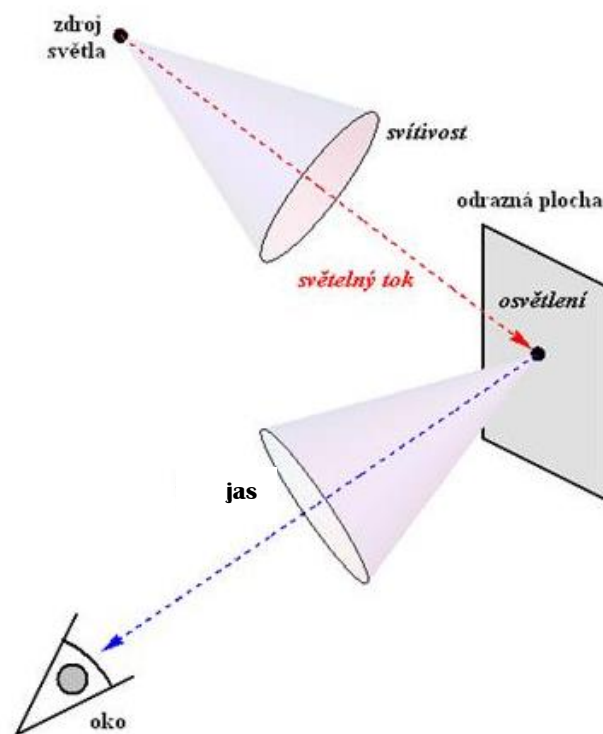
Osvětlení je fotometrická veličina udávaná v jednotkách lux (lx). Závisí na vzdálenosti osvětlené plochy od zdroje světla. Se zvyšující se vzdáleností osvětlení klesá a závisí na úhlu, pod kterým světlo na plochu dopadá. Maximální hodnota osvětlení nastane, pokud paprsky dopadají na plochu kolmo a nulové osvětlení, pokud jsou s plochou dopadu rovnoběžné. Plocha nabývá osvětlení $1 lx$, pokud na $1 m^2$ dopadá rovnoměrný světelný tok $1 lm$. Analogicky k tomu osvětlení $1 lx$ způsobuje světelný zdroj se svítivostí $1 cd$, jestliže dopadá kolmo na plochu vzdálenou $1 m$ od zdroje. Osvětlení lze změřit přístrojem s názvem luxmetr. Jak již jeho název napovídá, měří se s ním počet luxů. Důležité je osvětlení i pro hygienu práce, pro kterou jsou udané normy správného osvětlení pro různé druhy činností. [23,32,34]

4.4 Jas (L)

Jas je fotometrická veličina, jejíž jednotkou je nit (nt), ale v literatuře můžeme také najít jednotku cd/m^2 , která vyplývá z definice jasu. Jedná se o jas roviny ve směru k ní kolmém, při kterém má rovina svítivost $1 cd$ ze vzdálenosti $1 m^2$. Jas můžeme chápat jako určitou sílu světla, které je odražené od plochého matného předmětu nebo je vyzářeno z plochého zdroje a udává svítivost tohoto zdroje světla s plochou o obsahu $1 m^2$. Z tohoto hlediska nás pro používání jasu zajímá pouze svítivost vztahovaná na obsah plochy, nikoli světelný tok. Jas je vyjádřen vzorcem (2). [23,34]

$$L = \frac{\Delta I}{\Delta S \cdot \cos \alpha} \quad (2)$$

Ve vzorci (2) je I svítivost, S velikost plochy a α je úhel mezi daným směrem a normálou plochy a výsledek je udáván v jednotkách cd/m^2 . [34]



Obrázek 16: Vztah fotometrických veličin [34]

4.5 Světlení (M_V)

Jako světlení je označován světelný tok, jenž je emitovaný plochou zdroje světla. Jednotka světlení je $lm.m^{-2}$. Tato veličina je stejně jako jas definovaná pro plošný zdroj světla. Světlení je definováno jako podíl světelného toku, který je vyzařován plochou zdroje do prostoru a obsahu dané plochy. [25,31]

4.6 Měření světelně technických veličin

Měřením světelně technických veličin zjišťujeme a ověřujeme fotometrické parametry využívaných zařízení, jako jsou různé přístroje, světelné zdroje, svítidla, nebo osvětlovací soustavy. Měření se dělí na subjektivní metodu neboli vizuální a na objektivní neboli fyzikální metodu. Při subjektivních měřeních se používá zrak, a proto se nazývá vizuální. Pro měření objektivní se používají fyzikální čidla, například fotoelektrické články. Díky rychlosti a přesnosti měření se v dnešní době využívá především fyzikální metoda měření, a tím se vylučuje potřeba dokonalého zraku pozorovatele. [35]

4.6.1 Měření osvětlenosti

Měření právě osvětlenosti je nejčastěji používaným měřením, pokud jde o využití v praxi. Provádí se ve fotometrických laboratořích, ale i při objektivním měření hladin osvětlenosti v osvětlovacích soustavách. Pro měření osvětlenosti se využívají přístroje, které jsou objektivní. Takovéto přístroje se nazývají Luxmetry a jsou složeny z přijímače s fotočlánkem, systému pro vyhodnocení signálu a digitálního nebo analogového indikátoru. Luxmetr typu Extech LT40 byl také použit v praktické části této práce. [35]

4.6.2 Luxmetr

Luxmetry dělíme do čtyř tříd podle jejich přesnosti. Každá z těchto čtyř tříd má své označení buď číslicemi 1, 2, 3, 4 nebo písmeny L, A, B, C. Těmto třídám odpovídá vždy daná hodnota největší povolené souhrnné chyby. Pro skupinu 1 jsou to 2 %, skupině 2 odpovídá největší povolená chyba 5 %, 3. skupině 10 % a pro skupinu 4 je to až 20 % povolené souhrnné chyby. Třída L a A je využívána jako sekundární etalony nebo pro přesná měření v laboratoři. Třídy B a C zase využíváme pouze k provozním měřením osvětlenosti. Chceme-li využívat přístroje pro měření pouze orientační, postačí nám přístroje s přesností 14-20 %, přístroje používané k běžnému provozu mají přesnost 8-14 % a přesné přístroje, které se využívají v laboratořích mají přesnost okolo 8 %. Všechny tyto zásady pro měření udává norma ČSN. [35, 36, 37]

Při používání luxmetrů se sleduje jedenáct možných chyb různého druhu. Těmito chybami jsou spektrální chyba, která při měření vzniká kvůli světlu jiného spektrálního složení, než je spektrální složení světla použitého pro kalibraci luxmetru. Dalšími chybami mohou být chyba směrová, úhlová, chyba linearit a další. Abychom těmto chybám předešli a vyvarovali se jich, je potřeba luxmetry pravidelně kalibrovat. Také z důvodu změn vlastností fotočlánků a jiných parametrů luxmetrů je potřeba provádět kalibrace. Přístroje pro přesná měření je nutné kalibrovat každé dva roky, pro běžné provozní měření maximálně každé tři roky a přístroje pro orientační měření stačí kalibrovat jednou za pět let. Běžný digitální luxmetr můžeme vidět na obrázku 17 a přesný digitální luxmetr a radiometr na obrázku 18. [35, 36]



Obrázek 17: Běžný provozní digitální luxmetr typu Extech LT40 [38]



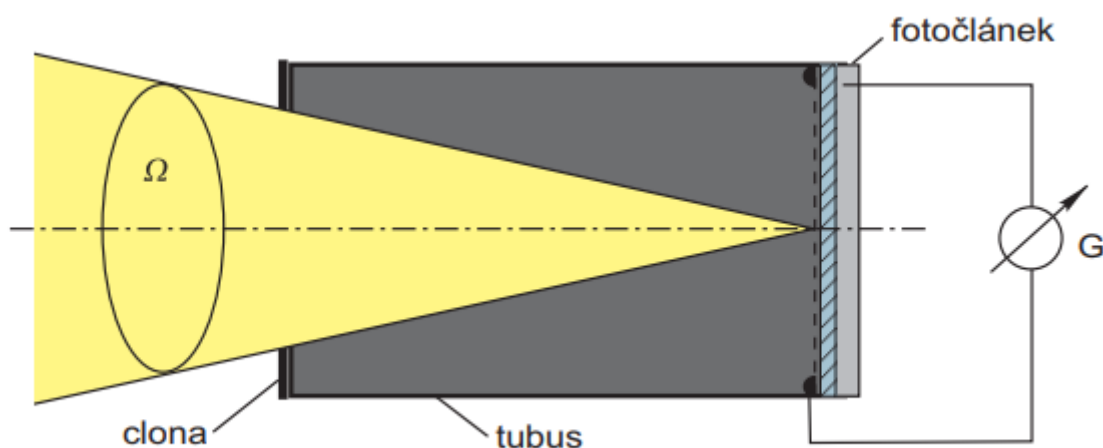
Obrázek 18: Přesný digitální luxmetr a radiometr typu 211 PRC Krochmann [39]

4.6.3 Měření jasu

K měření jasu se využívá přístroj, který se nazývá jasoměr. Jeho principem je přijímač, na který se nasadí černý tubus s clonou, která má kruhový otvor. Tímto způsobem je možné vymežit prostorový úhel Ω , ve kterém z měřené plochy dopadají paprsky na přijímač neboli fotočlánek. Při tomto daném sestavení se za pomoci fotočlánku změří normálová osvětlenost E_N přijímací plochy čidla. Vztah pro vypočítání středního jasu L plochy, která je vymezená prostorovým úhlem Ω na sledovaném povrchu najdeme ve vzorci (3). [35, 36, 40]

$$L = \frac{E_N}{\Omega} \quad (3)$$

Velice důležitým parametrem při měření jasu, na který nesmíme zapomínat, je vzdálenost jasoměru od povrchu, který chceme měřit. Jelikož jasoměrem se zjišťuje střední hodnota jasu dané plochy, jež je vymezena optikou přístroje závisující právě na vzdálenosti od měřeného povrchu. Proto musí měřená plocha zahrnovat pouze hodnocený povrch, jak tomu je například u běžných jasoměrů pro objektivní měření, kde měřená oblast se nachází v zorném poli okuláru a je vyznačena tmavým kroužkem. Princip objektivního jasoměru můžeme vidět na obrázku 19. [35, 39]

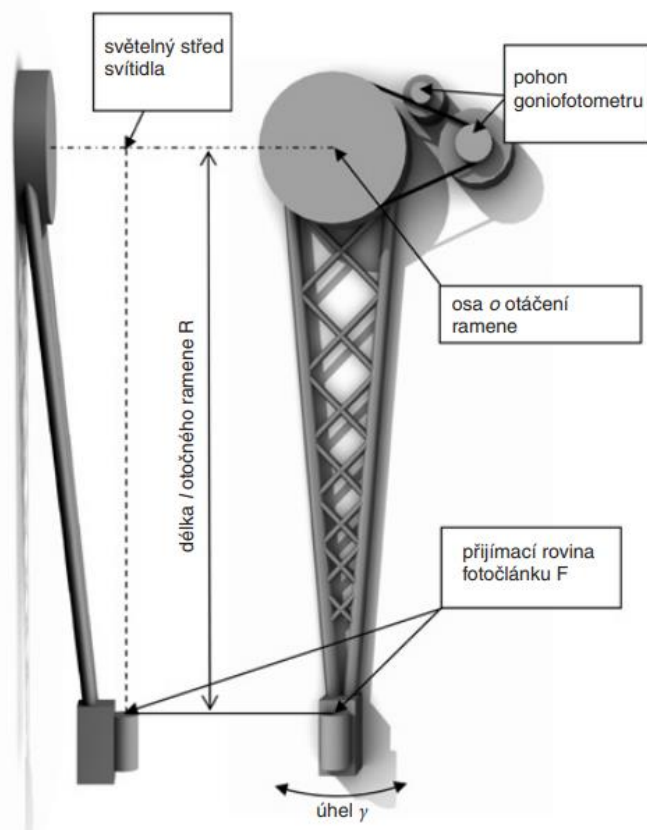


Obrázek 19: Princip objektivního jasoměru [39]

4.6.4 Goniofotometr

Goniofotometr je přístroj pro měření rozložení svítivosti zdroje a je možné s jeho pomocí posoudit vyzařovací úhel. Svítivost zdroje je měřena nepřímo a je nutné ji přepočítat přes osvětlenost, která je přístrojem přímo měřena. Prostorové rozložení svítivosti svítidel, které se zakládá na měření čar svítivosti v různých fotometrických rovinách a jejich rozbor je nejčastější použití těchto přístrojů ve fotometrických laboratořích. [40, 41, 42]

Konstrukce goniofotometru je variabilní pro tři různé sestavení, kdy prvním případem je umístění detektoru, kterým je nejčastěji fotočlánek, na otočnou lavici otáčející se okolo zdroje světla v dané konstantní vzdálenosti. Toto řešení je v dnešní době nejvíce využívané. Druhý typ vychází z opačného principu, jelikož fotočlánek je pevně umístěn a pohyblivým je v tomto případě zdroj světla. Tento princip má jednu nevýhodu, že nelze použít v případě, je-li rozložení svítivosti závislé na poloze zdroje světla. Třetím principem je kombinace předešlých typů doplněná o pohyblivé zrcadlo. Detektor i zdroj světla jsou pevně umístěny a otáčení je zajištěno otočným zrcadlem. Tato konstrukce má svou výhodu, že se dá použít pro všechny zdroje záření, ale je složitá na stavbu. Princip goniofometru vidíme na obrázku 20, kdy můžeme vidět pohled jak z boku, tak zepředu. [40, 42]

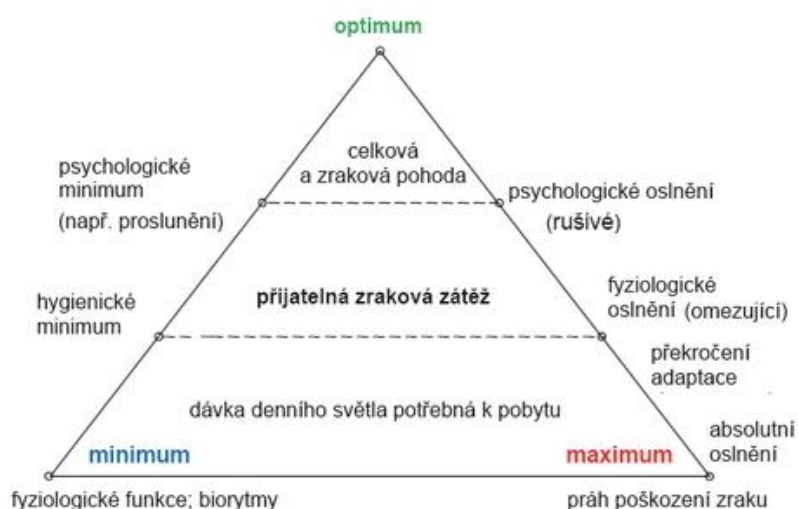


Obrázek 20: Princip goniofotometru (z boku nalevo, zepředu napravo) [41]

5. Hygiena osvětlování

Hygienické obory se snaží souhrnně posuzovat všechny vlivy životního prostředí, které na člověka působí a ovlivňují jeho pocity. Jedná se o dynamický systém, ve kterém se tyto vlivy navzájem ovlivňují. Tato snaha ovšem většinou v praxi není moc reálná. Mezi sledované vlivy patří nepochybně i fyzikální faktory okolního prostředí, kterými jsou například hluk, prach, vibrace nebo elektromagnetické záření. Právě tento faktor nás zajímá nejvíce. O jeho působení na člověka rozhoduje jeho vlnová délka. Optické záření, kam patří UV, světelné a IR záření, můžeme považovat pro hygienu za velmi významné. Na obrázku 21 vidíme schéma zásad hygieny osvětlování. [43]

Zrak jako jeden z našich nejdůležitějších smyslů je bezpochyby nejdůležitějším smyslem pro výkon většiny pracovních činností. Abychom využili náš zrak naplno, potřebujeme mít správné hygienické podmínky, co se osvětlení týče. Dobré předpoklady pro vykonávání dané práce jsou dány stavem zrakového orgánu od oka přes zrakovou dráhu až po mozek, ale také fyzikálními vlastnostmi světelných podmínek. Spektrum viditelného záření jedince je přímo ovlivňováno úrovní osvětlení a individuální citlivostí samotného zraku. Spektrální složení barvy světla je jeho fyzikální podstatou a ovlivňuje barevný vzhled předmětů, které jsou osvětlovány. Barva světla ať už umělého, nebo přírodního, jak si později toto rozdělení vysvětlíme, závisí na jeho teplotě. Za nízkých teplot ve spektru převládá spíše barva červená, u vyšších teplot barva modrá. Díky tomuto se používá místo popisu spektra ukazatel s názvem teplota chromatičnosti a světelný tok, který popisuje světelný výkon daného zdroje. [43, 44]



Obrázek 21: Schéma zásad hygieny osvětlování [43]

5.1 Rozdělení osvětlení

Osvětlení se dělí na tři základní skupiny, kterými jsou:

1. denní osvětlení – využívá Slunce a jeho energii
2. umělé osvětlení – světlo vytvořené člověkem
3. sdružené osvětlení – kombinace obou předešlých. [45]

Pokud uvažujeme použití v praxi, tak se dává přednost dennímu osvětlení z důvodu hygienických podmínek, jelikož z hlediska dlouhodobějšího působení na člověka má lepší psychologické účinky a zároveň umělé osvětlení je energeticky náročné a tudíž neekonomické. [45]

5.1.1 Denní osvětlení

Denní světlo se skládá ze slunečního záření a oblohového světla vznikajícího rozptylem, průchodem a odrazem slunečního záření v zemské atmosféře. Nejvíce charakteristické pro denní světlo je proměnlivost světelných poměrů, jako je spektrální složení, intenzita, rozptyl nebo rozložení světelného toku. Vysoká proměnlivost světelných podmínek je zapříčiněna i aktuálními atmosférickými podmínkami, jako je oblačnost nebo znečištění vzduchu. Dále se na proměnlivosti podílejí i periodické změny díky rotaci Země kolem Slunce. Obecná charakteristika denního osvětlení zahrnuje dva hraniční stavy oblohy. Prvním stavem je úplně zamračená obloha, kdy je jas oblohy rovnoměrný, zrakem nelze určit poloha Slunce a jas plynule přechází od horizontu k zenitu oblohy. Druhým stavem je jasná obloha, kdy je jas slunečního záření i oblohové složky na maximu. Osvětlení na pracovišti denním světlem by mělo být mezi 1,5 % - 5 %, pokud se na pracovišti vyskytují ještě boční a horní osvětlení, nebo jejich kombinace, měla by se hodnota denního osvětlení pohybovat kolem 3 %. [44, 45, 46, 47]

5.1.2 Umělé osvětlení

Umělé zdroje světelného záření jsou takové, které byly cíleně vytvořené člověkem k nahrazení denního osvětlení pro zlepšení zrakové pohody. V dnešní době jsou nejvíce zastoupené a mají největší význam elektrické světelné zdroje. Umělé světlo potřebuje ke svému fungování zdroj energie, jelikož vzniká pomocí transformace jiné energie. [44, 45]

Optické záření může ve světelném zdroji vznikat třemi způsoby. Prvním z nich je inkandescence, při které se pevná látka zahřívá na vysokou teplotu a vyzařuje tak optické záření. Takové těleso označujeme jako teplotní zářič. Většina energie v tomto případě spadá na tepelnou ve formě infračerveného záření a jen malá část na světelnou energii. Teplotními zářiči jsou například vakuové nebo plynové žárovky. Druhým typem vzniku optického záření je elektrický výboj. Takový zdroj vybudí atomy par plynů nebo kovů a ty pak emitují optické záření. Na principu elektrického výboje funguje například zářivka. Třetím typem je luminiscence pevných látek, která vzniká v materiálech schopných měnit energii vstřebovanou na optické záření za nižších teplot. [44, 45, 47]

5.2 Zásady pro kvalitu osvětlování

Největšími nedostatky při snaze správného osvětlování jsou nedostatečné osvětlení pro zrakové vnímání při různých nárocích. Druhým faktorem je oslnění a dlouhodobý nedostatek denního světla. Oslnění nastává v takový moment, kdy je lidské oko vystaveno příliš velkému jasů, než na který je v daný moment adaptováno. Nastává tak nepříznivé působení světla na zrak. Oslnění můžeme podle příčiny rozdělit na absolutní, přechodné a způsobené kontrastem. Absolutní oslnění je způsobeno příliš velkým jasnem světelného zdroje, na které není oko schopno se adaptovat. Hodnota kritického bodu jasů se odvíjí od aktuální adaptace zraku. Přechodné oslnění způsobuje náhlá změna jasů v zorném poli. Pokud je změna větší než 1:10, je narušena zraková pohoda a přesahuje-li změna poměr 1:10², zhorší se samotné vidění. Oslnění způsobené kontrastem nastává v případě, kdy se v zorném poli objeví zároveň dvě a více ploch s velkým rozdílem jasů. V tabulce 1 můžeme vidět příklady doporučeného osvětlení různých typů pracovišť. [44, 45, 46]

Tabulka 1: Doporučené osvětlení různých typů pracovišť [45, 46]

| Druh pracovní činnosti | Intenzita osvětlení – množství světla na 1 m² |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Veřejné venkovní pracoviště | 30 lx |
| Schodiště, eskalátory | 150 lx |
| Laboratoře | 300 lx |
| Přednáškové haly | 500 lx |
| Šperkařství | 1000 lx |
| Hodinářství | 2000 lx |

5.2.1 Činitel denní osvětlenosti

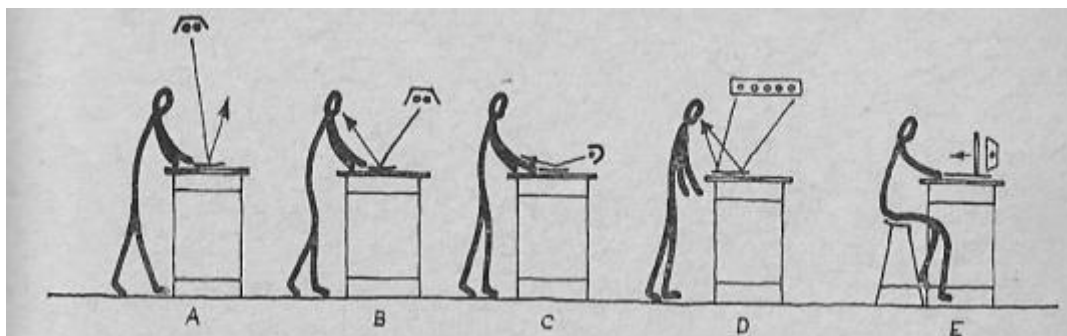
Jelikož je denní světlo velice proměnlivé, jak během dne, tak i v průběhu roku, určujeme množství denního světla za pomoci poměrných hodnot osvětlenosti nazývajících se činitel denní osvětlenosti D uváděný v procentech. Tento činitel dělíme na dva základní typy, průměrný činitel denní osvětlenosti $D_{\text{prům}}$, který vyjadřuje normami daný průměrný denní osvit a minimální činitel denní osvětlenosti D_{min} , který udává minimální denní osvit podle hygienických norem. S délkou pobytu při pracovní činnosti narůstá i požadavek na množství světla. Při hygienicky definovaném trvalém pobytu osob na pracovišti je potřeba, aby byl prostor osvětlován alespoň na úroveň hygienického minima. Hygienické minimum odpovídá $D_{\text{prům}} = 3 \%$ a $D_{\text{min}} = 1,5 \%$. [43, 44, 46]

5.2.2 Udržovaná osvětlenost, rovnoměrnost osvětlení

Za umělého osvětlení a při dostatku denního světla jsou stanoveny doporučené požadavky na množství umělého osvětlení hodnotami podle norem. Tyto hodnoty se nazývají udržovaná osvětlenost a rovnoměrnost v osvětlovaném prostoru. Minimální hodnota udržované osvětlenosti v prostoru, kde osoby trvale pobývají je stanovena na 200 lx a rovnoměrnost v osvětlovaném prostoru je doporučována minimálně 1:3. Hodnoty se mohou ještě zvyšovat, a to v souvislosti s konkrétní zřakovou zátěží a světelnými požadavky na ni. V uzavřených prostorech bez přístupu denního světla a nemožnosti jejich kombinovatelnosti se doporučuje udržovaná osvětlenost alespoň 300 lx. V kancelářích by podle normy měla být hodnota rovna minimálně 500 lx. [44, 46]

5.2.3 Barevný tón světla

Velice důležitý pro zřakovou a psychickou pohodu při práci je i výběr správného barevného tónu světla. Barva světla může být teplá, nebo studená. Teplota barvy se udává v Kelvinech (K) a ideální rozmezí pro správný tón barvy je mezi 4000 a 6000 K . Cílem výběru správného tónu barvy je co nejvíce se přiblížit barvě přirozeného denního světla. Správně vybraný tón světla se pozitivně zrcadlí na kvalitě práce, soustředěnosti, snižování stresu nebo zlepšení psychické pohody. Důležitý je také aspekt odrazivosti světla od jiných materiálů, jako je například pracovní deska stolu nebo nábytek v místnosti. Schéma umístění osvětlení a jeho odrazu vidíme na obrázku 22. [45, 46]



Obrázek 22: Schéma umístění svítidla a odraz od pracovní plochy [45]

5.3 Hygienické normy osvětlování pracoviště

Všechny hygienické požadavky, které se týkají osvětlování pracoviště uvádí § 45 a § 45a nařízení vlády č. 361/2007 Sb., ve kterém najdeme bližší hygienické požadavky na osvětlení pracoviště. Tyto paragrafy stanovují podmínky ochrany zdraví při práci a je možné se v nich dočíst vše podstatné o osvětlování pracoviště jak obecně, tak i konkrétně. [46, 48]

Dále existuje několik hygienických norem ČSN, které se také zabývají světlem a osvětlováním prostorů. Pár norem pro příklad: [46]

- ČSN 36 0020 – Sdružené osvětlení
- ČSN 36 0011-3 – Měření osvětlení prostorů – Část 3: Měření umělého osvětlení vnitřních prostorů
- ČSN EN 12464-1 – Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory [46]

6. Praktická část

Úkolem praktické části této bakalářské práce bylo pomocí barevných tabulek otestovat vnímání barev za snížených světelných podmínek, konkrétně za mezopických podmínek. Abychom mohli výsledky testů mezi sebou porovnat, testování bylo provedeno ve čtyřech různých stupních osvětlení. K měření byly použity testovací tabulky vytvořené bývalou studentkou FBMI oboru optiky a optometrie Hanou Šatarovou. Druhým bodem praktické části bylo změřit spektrum osvětlení na akademické půdě FBMI. Měřeno bylo zářivkové osvětlení v laboratoři, osvětlení přenosné stolní lampy a baterky. Pro porovnání bylo změřeno i přirozené sluneční záření.

6.1 Předpokládaný výsledek

Předpokládaným výsledkem praktické části této bakalářské práce podle kapitoly 3 (Vnímání barev) a podkapitoly 3.1.3 (Jas barvy) bylo, že při zvyšování výkonu osvětlení bude barva jasnější a zároveň bude lépe rozpoznatelný menší procentuální rozdíl barvy s rozdílným jasnem. Jak uvádí stejná podkapitola, jas barevné plochy závisí na osvětlení této plochy, a proto bychom měli rozdíly jasu rozeznat lépe při lepším osvětlení. Musíme brát v potaz také fakt, na který upozorňuje podkapitola 3.1.2 (Sytost barvy), že některé spektrální barvy jsou přeurčeny k tomu být sytější než ostatní, například fialová je vnímána jako sytější než žlutá a s tímto faktem musíme také při vyhodnocování dat počítat. Na základě literatury popsané v podkapitole 3.4.3 (Purkyňův jev) můžeme předpokládat, že nejhůře rozeznatelná změna jasu při nejmenším osvětlení bude u červené barvy kvůli Purkyňovu jevu. Tento jev uvádí, že spektrální citlivost se při snižování intenzity světla posouvá ke kratším vlnovým délkám, tudíž k modré barvě a barva červená a žlutá je hůře rozeznatelná. Naopak při nejmenším osvětlení by měla být lépe rozeznatelná barva modrá a zelená. Při největším osvětlení by měla být lépe rozeznatelná barva právě červená a žlutá.

6.2 Metodika měření

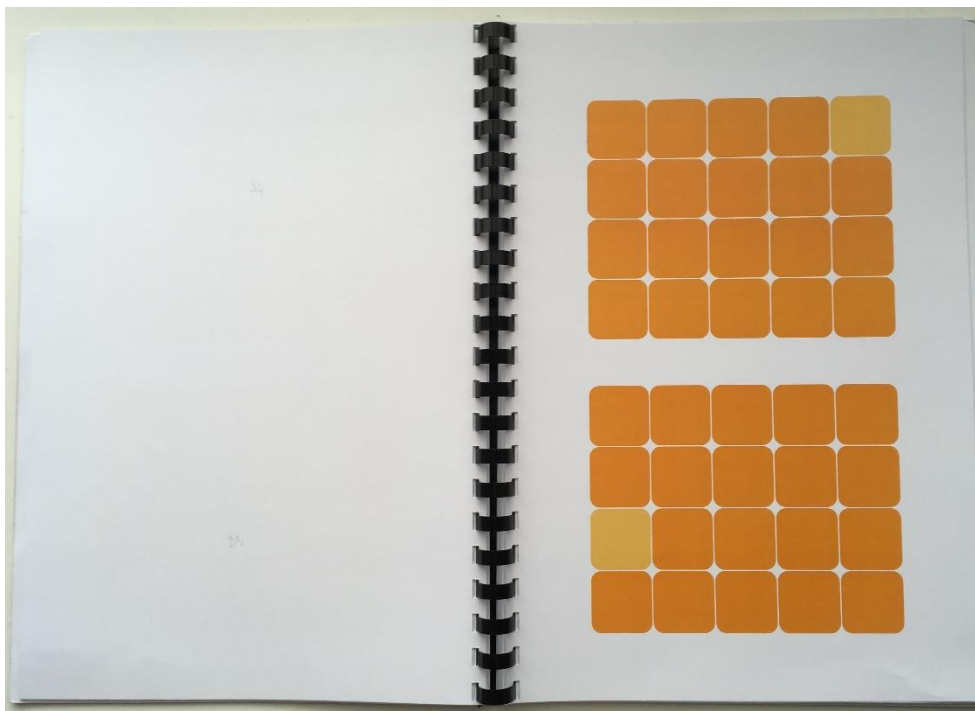
Tato bakalářská práce se zabývá vlivem zhoršených světelných podmínek na vnímání barev a ověření tohoto vlivu. Praktická část je zaměřena detailněji na schopnost lidského oka rozeznat rozdíl mezi procentuální změnou jasu u barev pokrývajících barevné spektrum viditelného světla. Za tímto účelem byly vytvořeny testovací tabulky, které mi byly pro měření k dispozici.

6.2.1 Testovací barevné tabulky

Testovací tabulky za tímto účelem navrhovala v roce 2017 studentka FBMI Hana Šatarová jako součást své bakalářské práce a já měl možnost je letos použít k praktické části své bakalářské práce.

Testovací tabulky jsou složeny z 36 listů svázaných v kroužkové vazbě a šesti listů volně vložených mezi ostatní. Na každém listu se jednostranně nachází dvě sady testovacích čtverců a každá sada se skládá z 20 čtverců. Každý z čtverců má velikost 2,75 x 2,75 cm dané barvy. Testovací tabulky jsou vytvořeny tak, že vždy jeden z 20 čtverců jedné sady se od ostatních liší jasnem. Zbylých 19 čtverců je naprosto totožných. Změna jasu je u každé barvy seřazena vzestupně od první sady čtverců, kde je rozdíl 10 % s krokem po 5 % až k poslední sadě s rozdílem jasu 45 %. [49]

Pro testování bylo zvoleno 6 barev napříč barevným spektrem viditelného světla tak, aby se ověřila citlivost na změnu od nejdelších po nejkratší vlnové délky. Byla proto zvolena červená, oranžová, žlutá, zelená, modrá a fialová jako testovací barvy a purpurová barva, která je pouze pro vysvětlení systému probandovi. Sady purpurových čtverců se nacházejí na volně vložených listech v tabulkách z důvodu, aby nebyla narušena autentičnost samotného měření. Tabulky jsou pro představu zobrazeny na obrázku 23.

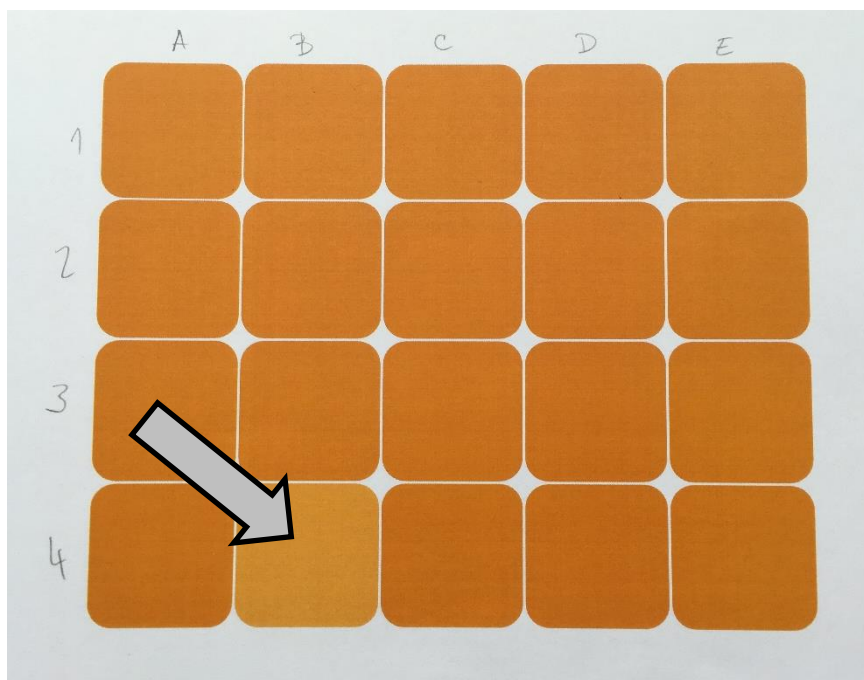


Obrázek 23: Testovací barevné tabulky

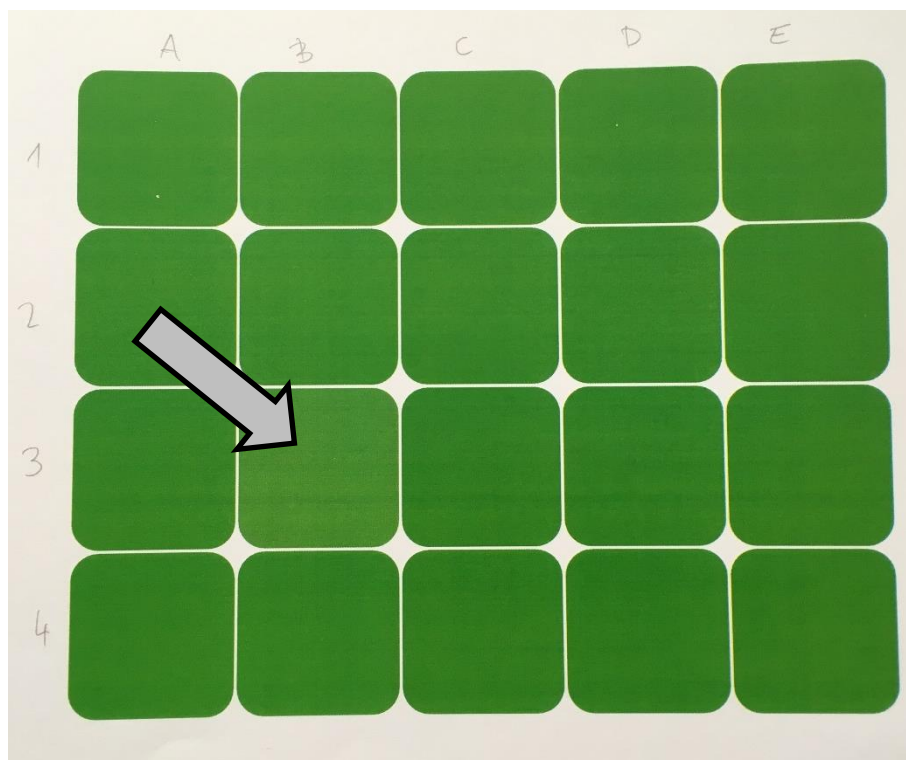
Testovací tabulky byly vytvořeny v programu Barvy v. 4.1 a následně zpracovány ve Wordu od firmy Microsoft. Nejdříve byl pomocí tří složek systému RGB zvolen odstín pro všech 7 barev a jakmile bylo dosaženo požadovaných odstínů, byl v programu Barvy odstín převeden do systému HLS, který barvu popisuje z hlediska odstínu, jasu a sytosti. Ten umožňuje zvyšovat nebo snižovat jas barvy. U základního čtverce byl nastaven jas na polovinu stupnice a dále od této stupnice počítána a převáděna hodnota jasu, který odpovídal požadovaným jasům, tedy 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %, 35 %, 40 % a 45 %. Po tom, co byl na stupnici systému HLS změněn jas, odstín byl převeden zpátky do systému RGB s hodnotami, které odpovídají velikostem složek R, G, B. [49]

Jakmile byly všechny požadované odstíny v programu Barvy hotovy, byl pro stavbu samotných tabulek použit program MS Word. Vložením zaoblených čtverců se vytvořily sady 19 obrazců, kterým se pomocí formátování nastavila výplň obrazce pro barvu základní. Pro odlišný čtverec byla použita data systému RGB z programu Barvy. Vytvořené sady čtverců bylo nutné vytisknout, ale jelikož tiskárny na rozdíl od monitorů fungují v systému CMYK a ne RGB, došlo při tisku k mírnému zkreslení vzhledu barev. Nedošlo však ke změně jasu, ten zůstal konstantní, což je pro naši práci zásadní. Jak se od sebe tyto dva systémy liší je popsáno v podkapitole 3.2 (Vjem barvy). [49]

Pro představu se na obrázku 24 a 25 nachází sada čtverců oranžové a zelené barvy se čtvercem o rozdílu jasu 25 % označeným šipkou.



Obrázek 24: Sada oranžových čtverců s rozdílem jasu 25 %



Obrázek 25: Sada zelených čtverců s rozdílem jasu 25 %

6.2.2 Světelné podmínky

Měření probíhalo na půdě fakulty biomedicínského inženýrství ČVUT v Kladně. Kvůli náročnosti na konstantní světelné podmínky bylo nutné zvolit místnost, kde měření nebude ovlivňováno denním osvětlením. Z tohoto důvodu jsem ke svému měření zvolil přednáškový sál C1, kde je pomocí ovládacího panelu možno absolutně zatemnit místnost a následně pomocí ovládání intenzity světel nastavit požadované osvětlení kombinací různých zdrojů světla. K měření osvětlení jsem používal přenosný Luxmetr značky EXTECH typu LT40 zapůjčený od fakulty k tomuto účelu. Luxmetr můžete vidět na obrázku 26. Osvětlení místnosti bylo možno nastavit v několika kombinacích a intenzitách světla. Mohly být zapnuty tři typy světel a to reflektory, které jsou umístěny nad lavicí kantorů vepředu, dále přední světla, která jsou umístěna na stěně za promítacími plátny a osvětlují stěnu a strop, nebo zářivky, které pokrývají v síťovém uspořádání celý strop přednáškového sálu. Reflektory a zářivky bylo možné zapnout buď na 50 % nebo na 100 %, tato možnost nebyla u předních světel možná, ale to ve výsledku nevadilo, jelikož tento zdroj nebyl pro měření použit.

Za pomoci luxmetru a kombinace osvětlení byla vyzkoušena různá umístění v přednáškovém sále a vybrána čtyři taková, která reprezentovala rozsah od skotopického přes námi nejvíce potřebné mezopické až k ftopickému vidění. Rozsah osvětlení pro měření byl od 2 lx do 320 lx a byly použity dva typy světel. Jednak reflektory, které byly podle potřeby

zapnuty na 50 % nebo na 100 % a druhým typem byly zářivky, které byly využity pouze na 50 %. Měření probíhalo na třech různých místech v přednáškovém sále, v první lavici uprostřed, v lavici kantorů v řadě u dveří a dvě měření v prostřední řadě lavic kantorů blíže k oknu. Kvůli rušení osvětlení a možnému zkreslení byl na měření odpojován monitor počítače.



Obrázek 26: Luxmetr EXTECH LT40

6.2.3 Průběh měření

Dříve než bylo provedeno samotné měření, bylo potřeba ověřit, zda proband nemá poruchu barvocitu, která by mohla ovlivnit výsledky experimentu. Testování barvocitu bylo prováděno za pomoci Ishihara color testu, který byl zapůjčen fakultou pro tato měření. Testování na barvocit probíhalo 3-5 minut i s instruktáží probanda a bylo prováděno ve čtecí vzdálenosti 40 cm. Porucha barvocitu se prokázala u jednoho probanda z 36 testovaných, a proto musel být z experimentu vyřazen.

Dále již probíhalo samotné měření, které začínalo vždy instruktáží probanda. Důležitá pro tento experiment byla doba adaptace na světelné podmínky nastavené pro měření. Jelikož z podkapitoly 3.4 (Adaptace oka) víme, že plná adaptace na tmu obvykle trvá 40 až 60 minut a na světlo pouhých pár vteřin, bylo kvůli úspoře času rozhodnuto, že instruktáž probandů bude probíhat již za nejnižšího osvětlení. Při příchodu probanda byly v místnosti zapnuty reflektory na 50 % a proband byl umístěn na první bod pro měření a zde mu byly vysvětleny podrobnosti následného měření. Adaptace na dané světelné podmínky trvala přibližně 30 minut z důvodu delší doby následného měření, které zabralo také asi 25 až 30 minut.

Při instruování probandům jim bylo sděleno, že jejich úkolem je najít jeden čtverec, který se liší jase, tudíž je světlejší než ostatní. Na zkušebních purpurových tabulkách jim byl vysvětlen princip. Vždy začínali od nejmenší změny jasu 10 % za nejhorších světelných podmínek, v našem případě to bylo osvětlení 2 luxů. Postup byl zvolen od nejmenší změny jasu čtverců, aby si nepamatovali odpovědi a mohli tak vždy dosáhnout nejlepšího možného rozdílu jasu. Od nejhoršího osvětlení bylo postupováno z důvodu adaptace, jelikož při zvyšování osvětlení je adaptace rychlá a nemusí se mezi změnami čekat. Vzdálenost testových tabulek a probanda byla určena na tzv. čtecí vzdálenost 40 cm. Testovací tabulky byly položeny na stole a probandi byli poučeni, že s tabulkami nesmí nijak manipulovat, aby byla zachována věrohodnost testování. Pro lepší orientaci jak probanda, tak zadávajícího byly tabulky vybaveny o souřadnice 1 až 4 svisle a A až E vodorovně a proband jimi specifikoval umístění čtverce. Testovaným bylo řečeno, že pokud odpoví špatně, nebo nebudou vědět a dojde jim vymezený čas, který byl na každou sadu čtverců 10 sekund, přesunou se k další sadě čtverců, kde by mělo být o něco lehčí změnu jasu poznat. V případě, že správně poznali čtverec s odlišným jase, nalistovali si další barvu a postup se opakoval u všech šesti barev totožně. Dále se proband přesunul na druhé místo s osvětlením 50 luxů a měření se opakovalo stejným způsobem a takto i na zbylých dvou stanovištích.

Testováno bylo 35 probandů z toho 17 žen a 18 mužů ve věku 18 až 56 let. Většina probandů až na výjimky jsou studenty FBMI v Kladně. Věkový průměr všech probandů byl 24 let a nejvíce zastoupený věk mezi probandy byl 22 let. Výsledky měření byly zaznamenávány do tabulky a poté statisticky zpracovány. Zápisová tabulka je k nahlédnutí v příloze I.

6.3 Zpracování výsledků

Výsledky praktické části byly zpracovány v programu Microsoft Excel, kde byly vytvořeny i veškeré tabulky a grafy pro interpretaci výsledků experimentu. Hodnoty změn vnímání jasu pro jednotlivé barvy a osvětlení byly zaneseny do tabulky, ve které jsou rozděleny na záznamy mužů (vpravo) a žen (vlevo). Hodnoty jsou uváděny v procentech. V tabulce 2 můžeme vidět příklad záznamů pro osvětlení 2 luxů. Tabulky pro zbylá osvětlení se nachází v příloze II.

Tabulka 2: Vnímání jas pro 2 luxy v % (vlevo ženy, vpravo muži)

| Č | O | Ž | Z | M | F | Č | O | Ž | Z | M | F |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 30 | 15 | 10 | 25 | 30 | 10 | 35 | 20 | 25 | 30 | 20 | 10 |
| 30 | 20 | 20 | 25 | 20 | 10 | 25 | 10 | 15 | 25 | 15 | 15 |
| 25 | 15 | 20 | 25 | 20 | 10 | 25 | 10 | 20 | 20 | 10 | 10 |
| 20 | 10 | 15 | 25 | 20 | 10 | 20 | 10 | 20 | 20 | 20 | 10 |
| 35 | 15 | 20 | 25 | 20 | 10 | 10 | 10 | 15 | 20 | 20 | 10 |
| 20 | 15 | 15 | 25 | 20 | 10 | 25 | 10 | 25 | 20 | 20 | 10 |
| 25 | 10 | 20 | 15 | 15 | 15 | 10 | 15 | 25 | 25 | 30 | 15 |
| 30 | 10 | 20 | 10 | 25 | 10 | 30 | 15 | 25 | 25 | 25 | 10 |
| 15 | 10 | 20 | 15 | 20 | 10 | 25 | 15 | 15 | 10 | 35 | 10 |
| 25 | 15 | 25 | 20 | 20 | 10 | 20 | 15 | 20 | 25 | 20 | 10 |
| 30 | 10 | 20 | 10 | 20 | 10 | 20 | 10 | 15 | 15 | 10 | 10 |
| 25 | 15 | 15 | 20 | 20 | 10 | 25 | 15 | 15 | 20 | 25 | 10 |
| 25 | 10 | 15 | 20 | 25 | 10 | 30 | 15 | 20 | 20 | 15 | 10 |
| 30 | 20 | 20 | 30 | 25 | 10 | 30 | 15 | 25 | 25 | 15 | 10 |
| 25 | 15 | 15 | 20 | 25 | 10 | 30 | 10 | 15 | 30 | 10 | 10 |
| 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 10 | 15 | 15 | 20 | 25 | 15 | 15 |
| 30 | 10 | 20 | 15 | 15 | 15 | 25 | 20 | 25 | 25 | 20 | 10 |
| | | | | | | 20 | 15 | 25 | 15 | 20 | 10 |

Hodnoty nejčastějších odpovědí jsou zaneseny v tabulce 3, kde je souhrn nejvíce zastoupených změn v procentech společně od mužů i žen. Při osvětlení 2 luxy byla změna jasu nejméně znatelná pro červenou a zelenou barvu. Pro červenou a zelenou barvu byla rozeznatelná změna u většiny probandů až při 25 % rozdílu jasu světlejšího čtverce. O něco lépe na tom byla barva žlutá a modrá, kde byl rozdíl převážně znatelný při 20 % rozdílného jasu. Pro oranžovou barvu tomu bylo při 15 % a nejlépe rozeznat šla barva fialová, kterou probandi rozpoznali už při počátečních 10 %.

Při zvýšení osvětlení na 50 luxů nedošlo u červené barvy k žádnému výraznému posunu a probandi rozeznávali rozdíl 25 % jako při nižším osvětlení. Rozdíl u zelené barvy byl poněkud znatelnější a při lepším osvětlení se probandům dařilo rozeznat změnu jasu při 20 %. U modré barvy jsme stejně jako u červené nezaznamenali žádnou změnu a byla rozlišována při 20 %. O 5 % se zlepšila rozeznatelnost u barvy žluté, která si polepšila na 15 % a za ní následuje změna i u oranžové barvy, kterou tentokrát rozlišili probandi již při 10 %, stejně tak fialovou.

Podíváme-li se na další změnu osvětlení tentokrát na 180 luxů, což je více než trojnásobek předešlé hodnoty, můžeme vidět, že u červené barvy není opět žádná změna k lepšímu rozlišení rozdílu jasu a hodnota je stále 25 %. Při tomto osvětlení zůstaly všechny předešlé nejčastější hodnoty rozeznání procentuální změny jasu na stejné hranici, jako u osvětlení horšího. Drobné změny pozorujeme mezi průměrnými hodnotami, ale tomu bude věnována další část vyhodnocování výsledků.

Dalším zvýšením osvětlení bylo dosaženo největšího rozdílu u zelené barvy, kde z předešlých 20 % probandi rozeznali změnu jasu již při 10 %. Posun k nižší procentuální hodnotě nastal i u modré barvy, kde probandi za maximálního osvětlení poznali změnu 15 %.

Tabulka 3: Nejčastější hodnoty průměrně vnímané změny jasu (%)

| Osvětlení (lx) | Barva | | | | | |
|----------------|---------|----------|-------|--------|-------|---------|
| | červená | oranžová | žlutá | zelená | modrá | fialová |
| 2 | 25 | 15 | 20 | 25 | 20 | 10 |
| 50 | 25 | 10 | 15 | 20 | 20 | 10 |
| 180 | 25 | 10 | 15 | 20 | 20 | 10 |
| 320 | 25 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 |

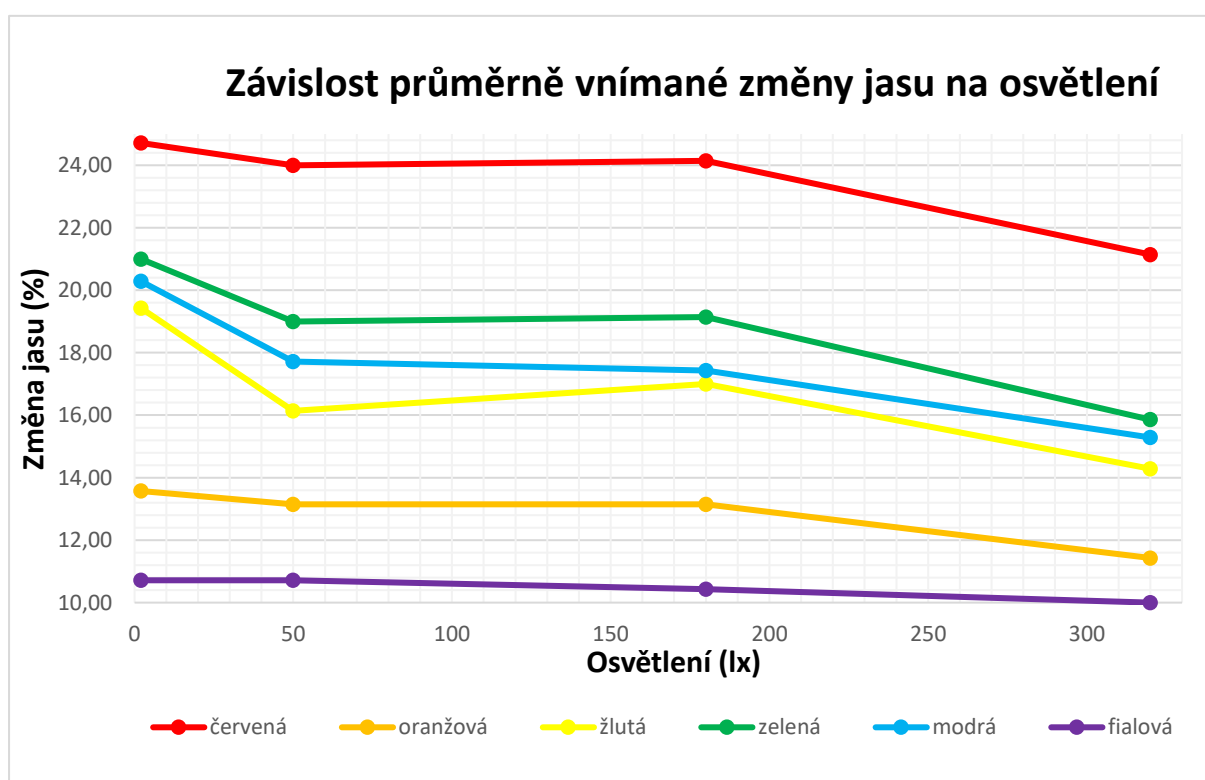
V předešlé tabulce šlo o nejčastější hodnoty, které byli probandy zaznamenány, ale nesmíme opomenout tabulku s průměrem všech odpovědí pro danou barvu a osvětlení. V tabulce 4 jsou tato data zanesena a můžeme vidět, že nejhůře byla změna jasu vnímána pro červenou barvu při osvětlení 2 luxy, kde tato hodnota dosahovala 24,71 %. Druhá barva, která byla vnímána až při větších rozdílech je barva zelená, kterou probandi v průměru rozeznali při 21,0% změně. Dále se hůře rozlišovala změna jasu u barvy modré při průměrné změně jasu 20,29 % a barvy žluté za změny jasu 19,43 %. Nejsnáze se dal rozdíl jasů poznat u barvy oranžové, kde probandům stačilo 13,57 % a nejlépe rozdíl pozorovali probandi u fialové barvy, kdy již při osvětlení 2 luxy rozpoznali změnu při 10,71 %.

Mezi průměrnými hodnotami změny jasu jsou vidět drobné výkyvy oproti předpokládanému jevu, kdy při osvětlení 180 luxů lehce průměr vzrostl u barvy červené, žluté a zelené, což bylo pravděpodobně způsobeno jiným druhem a umístěním osvětlení při testování. Pro toto osvětlení byly použity zářivky na 50 % svého výkonu, jenže tyto zářivky jsou umístěny v takovém úhlu oproti testovacím tabulkám, že se i matný papír, na kterém jsou sady čtverců natištěny, drobně leskl a zrková pohoda tak byla lehce narušena. Rozeznávací schopnost rozdílu jasů tak byla tímto osvětlením ztížena.

Tabulka 4: Průměrně vnímané změny jasu (%)

| Osvětlení (lx) | Barva | | | | | |
|----------------|---------|----------|-------|--------|-------|---------|
| | červená | oranžová | žlutá | zelená | modrá | fialová |
| 2 | 24,71 | 13,57 | 19,43 | 21,00 | 20,29 | 10,71 |
| 50 | 24,00 | 13,14 | 16,14 | 19,00 | 17,71 | 10,71 |
| 180 | 24,14 | 13,14 | 17,00 | 19,14 | 17,43 | 10,43 |
| 320 | 21,14 | 11,43 | 14,29 | 15,86 | 15,29 | 10,00 |

Na následujícím obrázku je znázorněn graf závislosti průměrně vnímané změny jasu na osvětlení, ze kterého lze vyčíst, že největší rozdíl mezi hodnotou vnímaného rozdílu jasu pro 2 luxy a pro 320 luxů zaznamenala zelená a žlutá barva, kdy tento rozdíl činí shodně 5,14 %. Druhý největší rozdíl mezi minimálním a maximálním osvětlením je 5 % a to pro barvu modrou. Pro červenou je procentuální hodnota změny 3,57 %, pro barvu oranžovou 2,14 % a nejmenší rozdíl najdeme u barvy fialové, kde je to pouhých 0,71 %. Graf jen názorně potvrzuje naši předešlou dedukci, kdy při osvětlení 180 luxů lze pozorovat mírný nárůst křivky, ale poté všechny křivky opět klesají. Graficky také vidíme, že nejméně znatelný rozdíl jasu byl vnímán u červené barvy, a naopak u barvy fialové byl vnímán nejlépe. Graf je vyobrazen na obrázku 27.



Obrázek 27: Graf závislosti průměrně vnímané změny jasu na osvětlení

Pro ucelenou představu je neméně důležité uvést směrodatné odchylky pro všechna osvětlení, tyto údaje jsou uvedené v tabulce 5. Největší směrodatnou odchylku má červená barva při osvětlení 320 luxů. V tomto bodě nabývá směrodatná odchylka hodnoty 6,31. Největší směrodatné odchylky najdeme v našem případě vždy u červené barvy ať jde o kterákoli ze čtyř osvětlení. Z ostatních barev má nejvíce zelená při osvětlení 50 luxů 5,79 a hned poté modrá při osvětlení 2 luxů a to 5,55. Směrodatné odchylky nejsou přímo úměrné vzrůstajícímu osvětlení a závisí na variabilitě viděných rozdílů jasu mezi probandy. Nejnížší směrodatná odchylka se nachází u fialové barvy při 320 luxech, kdy každý z probandů rozpoznal rozdíl 10 % v jasu, a tak je tu odchylka 0. Fialová je taky jediná barva, kde směrodatná odchylka konstantně klesá s rostoucím osvětlením. U ostatních barev je odchylka nestálá. Pro ucelený přehled v tabulce 6 najdeme průměry vnímaných rozdílů jasu v procentech a jejich směrodatné odchylky.

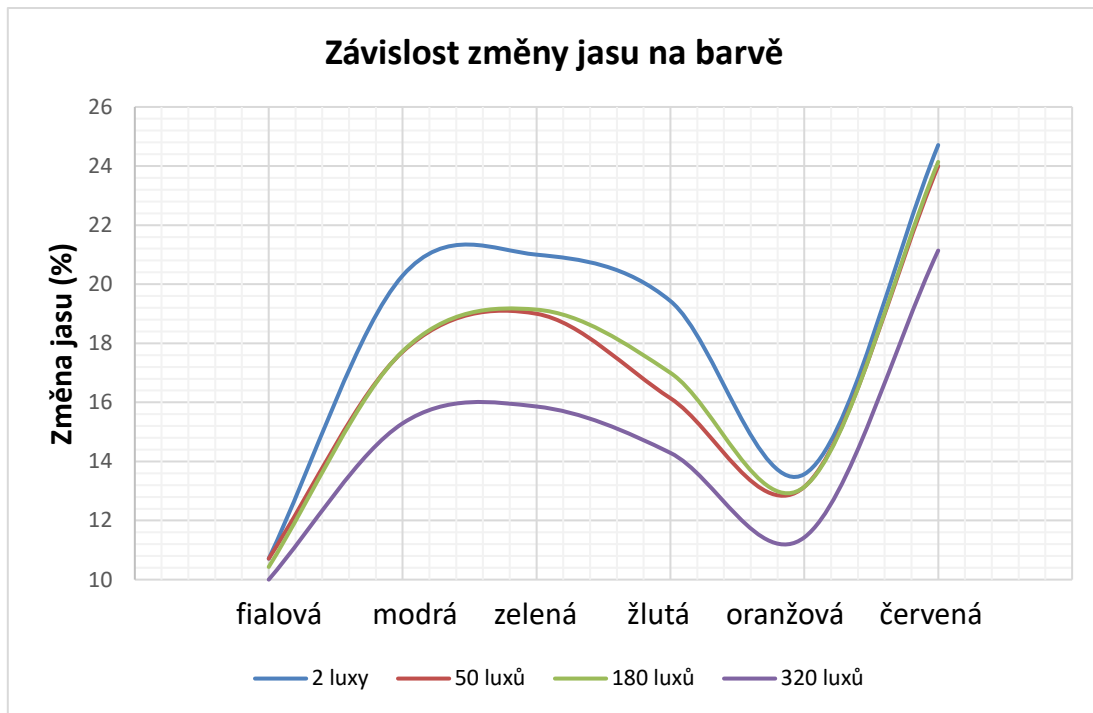
Tabulka 5: Směrodatná odchylka pro všechny barvy a osvětlení

| Osvětlení (lx) | Barva | | | | | |
|----------------|---------|----------|-------|--------|-------|---------|
| | červená | oranžová | žlutá | zelená | modrá | fialová |
| 2 | 6,06 | 3,34 | 4,16 | 5,53 | 5,55 | 1,78 |
| 50 | 6,04 | 3,66 | 4,39 | 5,79 | 4,43 | 1,78 |
| 180 | 6,12 | 3,66 | 4,06 | 4,29 | 5,61 | 1,42 |
| 320 | 6,31 | 2,29 | 4,05 | 5,21 | 4,01 | 0,00 |

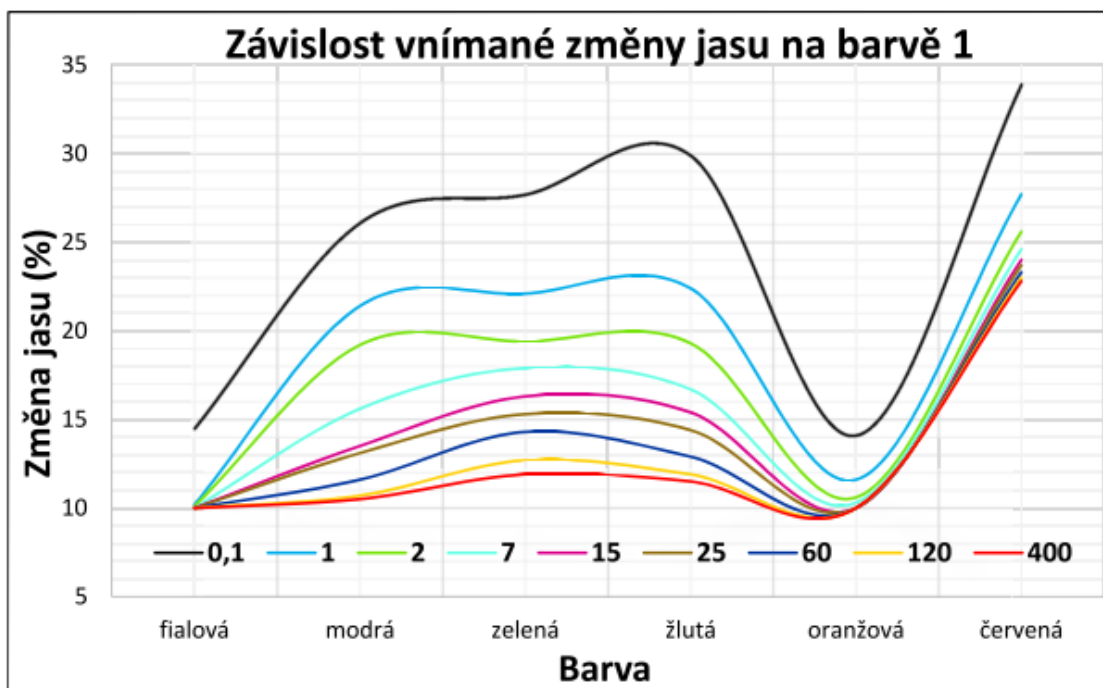
Tabulka 6: Průměry a směrodatné odchylky pro všechny barvy a osvětlení

| Osvětlení (lx) | Barva | | | | | |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | červená | oranžová | žlutá | zelená | modrá | fialová |
| 2 | 24,71±6,06 | 13,57±3,34 | 19,43±4,16 | 21,00±5,53 | 20,29±5,55 | 10,71±1,78 |
| 50 | 24,00±6,04 | 13,14±3,66 | 16,14±4,39 | 19,00±5,79 | 17,71±4,43 | 10,71±1,78 |
| 180 | 24,14±6,12 | 13,14±3,66 | 17,00±4,06 | 19,14±4,29 | 17,43±5,61 | 10,43±1,42 |
| 320 | 21,14±6,31 | 11,43±2,29 | 14,29±4,05 | 15,86±5,21 | 15,29±4,01 | 10,00±0,00 |

Pro přehled dosažených výsledků následuje graf na obrázku 28, který nám znázorňuje závislost změny jasu na konkrétní barvě. Díky tomuto grafu je výsledek praktické části přehlednější. Graf ukazuje, že nejmenší vnímaná změna jasu se nachází u fialové a oranžové barvy, kdežto největší vnímaná změna je zřetelně u barvy červené. Z grafu také vyplývá, že při nejnižším osvětlení je rozpoznání jasu nejtěžší, na což nás odkazuje modrá křivka vyjadřující míru osvětlení 2 luxy. Naopak žlutá křivka znázorňuje míru osvětlení 320 luxů a je blíže k nule. Z toho vyplývá, že sice s drobnou odchylkou kvůli odrazu osvětlení, ale s rostoucím osvětlením se zlepšuje citlivost oka na změnu jasu.



Obrázek 28: Graf závislosti změny jasu na barvě



Obrázek 29: Graf závislosti vnímané změny jasu na barvě 1 [49]

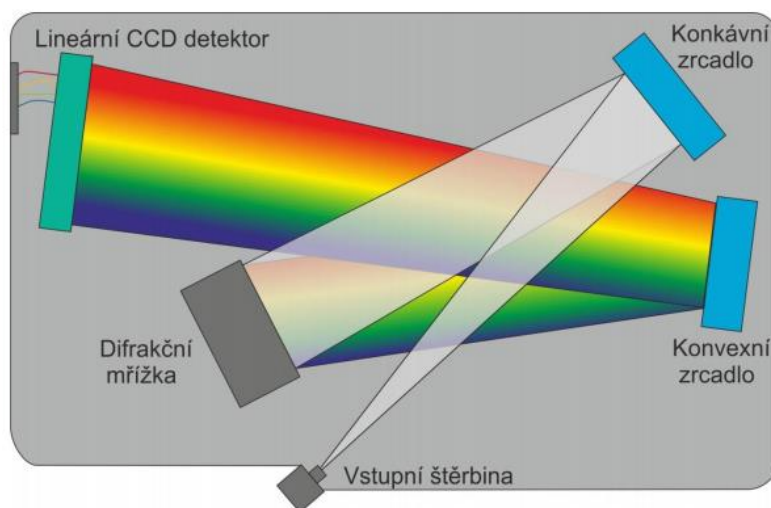
Na obrázku 29 vidíme na porovnání graf závislosti vnímané změny jasu na barvě z uvedeného zdroje. Důležité hodnoty pro porovnání s výsledky z této praktické části jsou 2 luxy, 60 luxů, 120 luxů a 400 luxů. I když se tyto hodnoty liší od našich, je možné je brát jako přibližné hodnoty pro porovnání. Z grafů je patrné, že výsledky obou prací vycházejí téměř totožně, kdy křivka na obou grafech má podobný průběh.

6.4 Měření spektrometrem

Druhou částí experimentu bylo pomocí spektrometru změřit různé typy osvětlení na akademické půdě FBMI. Měření byly tři typy osvětlení, a to zářivky, které osvětlují místnost, přenosná stolní lampa a ruční baterka. Pro porovnání bylo změřeno i přirozené sluneční světlo. Měření bylo prováděno vláknovým optickým spektrometrem typu UV-VIS USB2000+ od firmy Ocean optics vypůjčeného fakultou k tomuto účelu. Jelikož je spektrometr pevně připojen ke stolnímu počítači, nebylo možné s ním manipulovat a přenášet do jiných místností. Z tohoto důvodu bylo pro experiment vybráno pár přenosných zdrojů osvětlení a osvětlení místnosti, ve které se spektrometr nachází.

6.4.1 Princip spektrometru

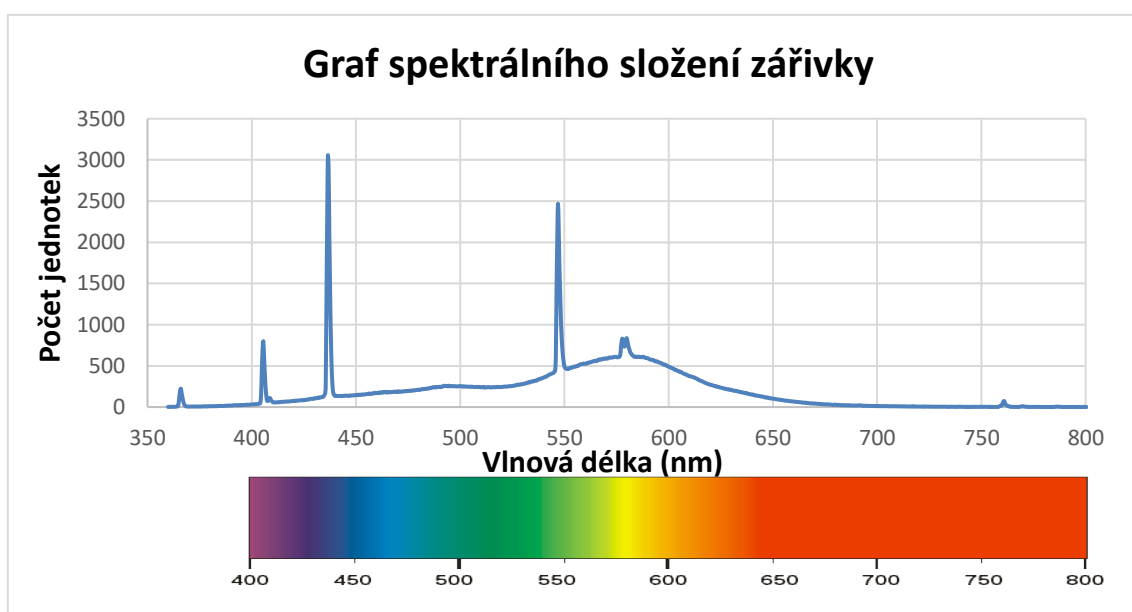
Pro měření optického spektra světla se používají optické spektrometry, které se mezi sebou mohou lišit stylem záznamu vlnové délky, vnitřním uspořádáním optických součástí, citlivostí, rozlišením nebo velikostí. Ovšem všechny optické spektrometry fungují na stejném principu. Základní princip těchto přístrojů spočívá v rozložení přiváděného světla na části podle jejich vlnové délky a přeložení těchto signálů do požadované podoby. Sestavu základního spektrometru vidíme na obrázku 30. Nejdříve se přivede světlo do spektrometru vstupní štěrbinou, dále se světlo odráží od konkávního zrcadla a dopadá na difrakční mřížku, kde se prostorově rozloží na jednotlivé vlnové délky. Takto rozložené vlnové délky snímá CCD detektor, který je umístěný před difrakční mřížkou v dráze odraženého rozloženého světla. Vlnová délka záření se určuje podle polohy snímaného záření na detektoru. Nejdůležitější součásti všech spektrometrů jsou vstupní štěrba, difrakční mřížka a detektor, další součásti má každý typ spektrometru jiné. [50]



Obrázek 30: Princip spektrometru [50]

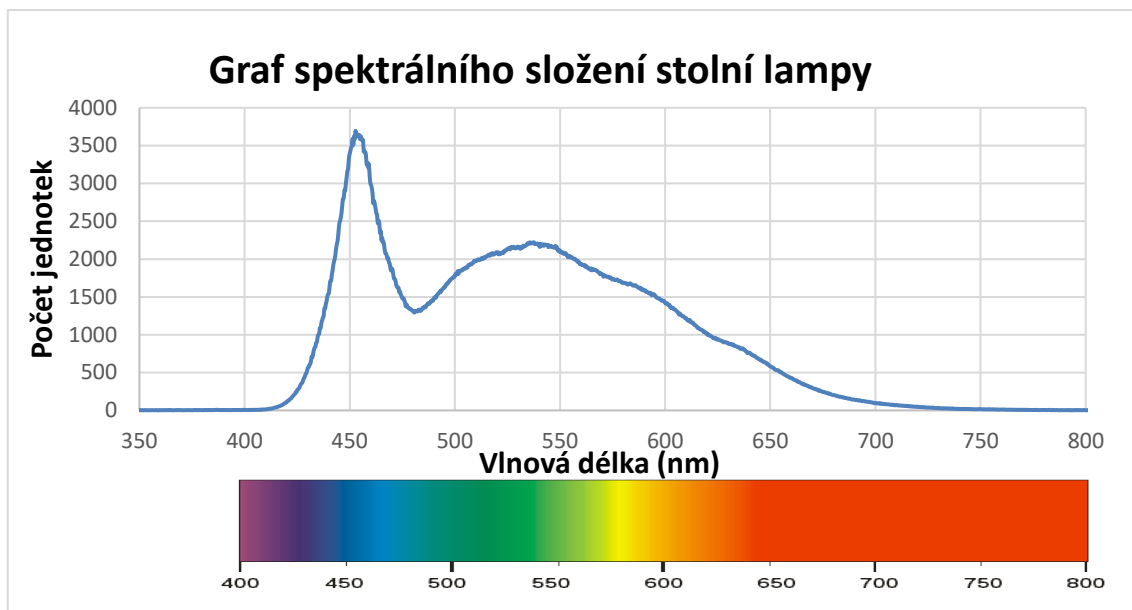
6.4.2 Průběh měření, vyhodnocení výsledků

Prvním použitým zdrojem světla byly zářivky, které mají spíše studený charakter světla a jsou použity ve většině místností na fakultě. Jejich spektrální rozložení je uvedeno na obrázku 31. Na grafu je znázorněno spektrum od fialové k červené barvě. Nejvíce zastoupená je zde oblast žlutozeleného až žlutého spektra s přesahem spíše do kratších vlnových délek. Na grafu se nachází několik píků, kdy nejvyšší se nachází v oblasti modrofialové barvy o vlnové délce kolem 440 nm . Druhým nejvyšším bodem je pík v oblasti zelenožluté barvy s vlnovou délkou okolo 550 nm . Na grafu se nachází ještě dva menší, téměř totožné píky v oblasti fialové a žluté barvy s vlnovou délkou 400 nm a 580 nm .



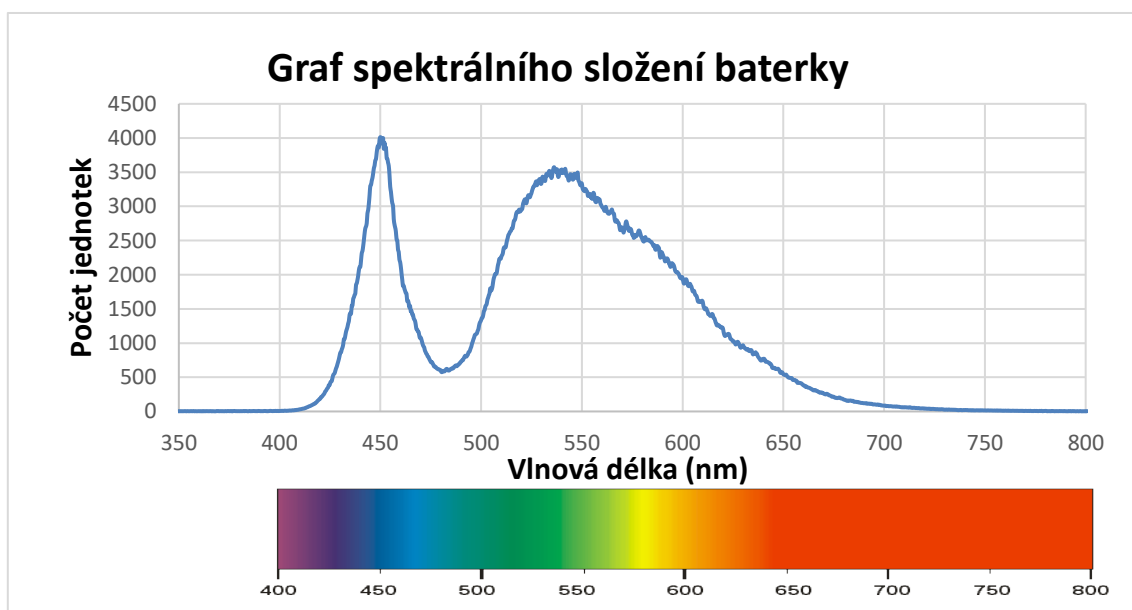
Obrázek 31: Graf spektrálního složení zářivky

Jako druhý zdroj pro zkoumání spektra byla použita stolní lampa. Po změření spektra a vyvedení dat do grafu, který vidíme na obrázku 32, vidíme nejvyšší pík v oblasti modrého světla lehce zasahující do modrofialové oblasti s vlnovou délkou 455 nm . Toto je jediný pík na grafu, jelikož zbytek viditelného spektra je pokryt rovnoměrněji bez větších výkyvů. Větší hodnoty jsou na grafu uvedeny u zelenožluté barvy s vlnovou délkou kolem 530 až 550 nm . Na grafu můžeme vidět větší zastoupení barev napříč celým barevným spektrem než u zářivkového osvětlení.



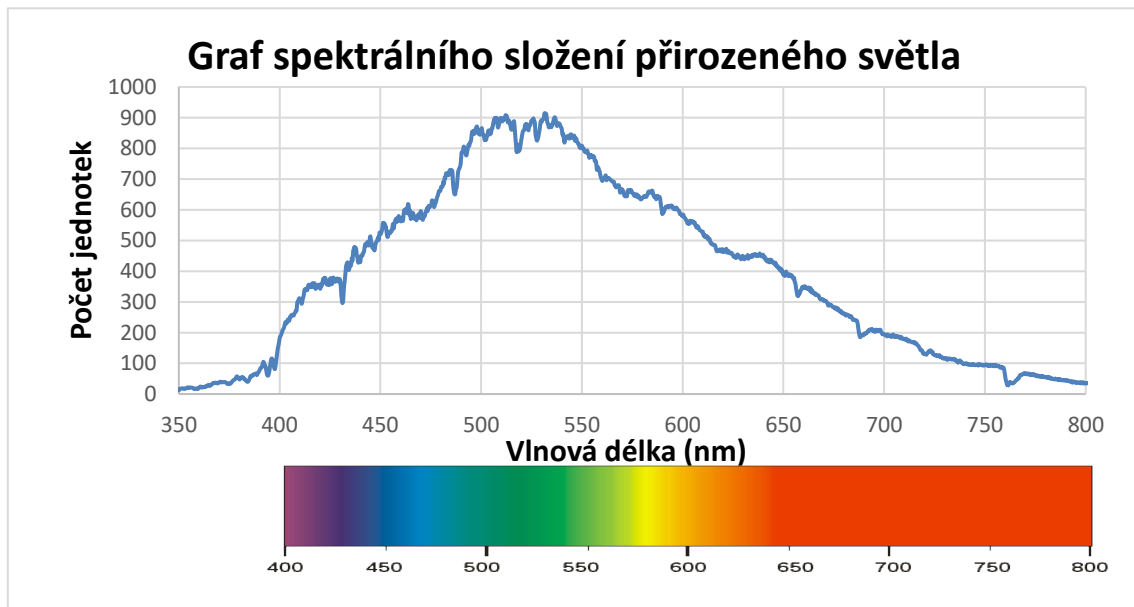
Obrázek 32: Graf spektrálního složení stolní lampy

Dalším použitým zdrojem pro měření spektra byla ruční svítilna s led osvětlením. Graf spektra můžeme vidět na obrázku 33. Křivkou se barevné spektrum intenzitou i zastoupenými barvami podobá osvětlení stolní lampy. Opět můžeme vidět nejvyšší pík v oblasti modré až modrofialové barvy o vlnové délce 450 nm , které se ovšem téměř vyrovnává druhá nejvyšší hodnota v zelenožluté oblasti s vlnovou délkou 540 nm . Hodnota v zelenožluté oblasti však není tolik strmá jako u barvy modrofialové a spíše pokrývá větší rozmezí od modrozelené barvy, kde pomalu vzrůstá až po barvu červenou, u které postupně klesá opět k nule.



Obrázek 33: Graf spektrálního složení baterky

Na obrázku 34 můžeme vidět graf spektrálního složení přirozeného světla při mírně oblačné obloze. Na grafu vidíme zastoupení všech barev barevného spektra od vlnových délek 400 nm po 750 nm s postupným nárůstem k maximální intenzitě pro zelenožluté spektrum a následným klesáním k červené barvě. Sluneční osvětlení obsahuje také UV složku blízkého ultrafialového záření o vlnových délkách 200 až 400 nm, která nás ovšem pro tento experiment nezajímala, a proto není do grafu zaznamenána. Na rozdíl od měřených umělých zdrojů můžeme na grafu vidět konstantnější pokrytí všech vlnových délek barevného spektra viditelného světla a nevidíme žádné výrazné píky, které by se vymykaly ostatním hodnotám. Toto je hlavní rozdíl mezi osvětlením umělým a přirozeným. Dalším faktorem, kterým se odlišuje tento graf od ostatních uvedených, je větší zastoupení červené barvy, které je u předešlých grafů téměř nulové.



Obrázek 34: Graf spektrálního složení přirozeného světla

6.5 Diskuze

V praktické části této bakalářské práce bylo ověřována úroveň vnímané změny jasu v procentech za snížených světelných podmínek. K tomuto účelu byly vytvořeny testovací tabulky obsahující 6 barev napříč spektrem. Použité barvy byly červená, oranžová, žlutá, zelená, modrá a fialová. Probandi měli za úkol mezi 20 čtverci stejné barvy najít jeden, který se procentuálně lišil úrovní jasu, a to za různých světelných podmínek od nejmenšího osvětlení k největšímu. Testování probíhalo v zatemněné místnosti za konstantních podmínek bez vlivu okolních rušivých faktorů a osvětlení bylo uzpůsobováno pomocí ovládacího panelu.

Předpokladem byly poznatky z předešlé teoretické části, kde bylo podle podkapitoly 3.1.3 (Jas barvy) předpokládáno, že při zvyšování osvětlení bude barva jasnější a lépe půjde rozeznat menší procentuální rozdíl jasu. Stejná podkapitola uvádí, že jas barevné plochy závisí na osvětlení této plochy, a tedy s vyšším osvětlením by hypoteticky měl být rozdíl jasu lépe rozeznán. Další předpokládaný výsledek experimentu byl zahrnut v podkapitole 3.4.3 (Purkyňův jev), podle které víme, že podle Purkyňova jevu by měla být při nejhorším osvětlení nejméně rozeznatelná barva červená.

První předpoklad, že se zvyšujícím se osvětlením bude rozdíl jasu lépe rozeznatelný, se potvrdil, jelikož v tabulce 4 a zároveň na obrázku 27 je jasně patrný rozdíl hodnot při osvětlení 2 luxy a 320 luxů, což bylo testované minimum a maximum. Pro každou z barev průměrná hodnota vnímaného jasu klesla o určitou procentuální hodnotu. Pro červenou barvu byl rozdíl mezi počátečním a koncovým bodem osvětlení 3,57 %, pro oranžovou byl rozdíl o něco méně patrnější. Oranžová barva zaznamenala pokles o 2,14 %. Žlutá barva tento předpoklad stejně jako ostatní barvy potvrzuje hodnotou 5,14 % a stejným procentuálním rozdílem se snížil vnímaný jas pro zelenou barvu. Pro modrou barvu byl rozdíl 5 % a pro fialovou byl tento pokles nejmenší, ale i tak hypotézu potvrdila s hodnotou 0,71 %.

Pokud ale vezmeme celý průběh průměrně vnímané změny jasu jak v tabulce 4, tak na obrázku 27, vidíme při osvětlení 180 luxů u tří barev mírný nárůst průměrných hodnot. Konkrétně tomu tak je u červené, žluté a zelené barvy. Tyto tři barvy nejvíce ovlivnila změna typu a umístění osvětlení, kdy se nejednalo o reflektory mířené shora na testovací tabulky, ale o zářivky nacházející se po celé ploše stropu v testovací místnosti. Některé z nich byly umístěné v takovém úhlu, který osvětlení od testovacích tabulek odrazil a znesnadňoval tak rozeznávací schopnost probandů. Proto v tomto případě bylo více osvětlení spíše na škodu než pro užitek.

Ostatní tři barvy oranžovou, modrou a fialovou ovlivnila tato skutečnost jen minimálně nebo vůbec.

Druhý předpoklad byl také potvrzen, jelikož jak je patrné z obrázku 27 a 28, červená barva byla při nejmenším osvětlení 2 luxy nejhůře rozeznatelná. Průměrně vnímaná změna jasu u červené barvy byla pro 2 luxy 24,71 %, což potvrzuje Purkyňův jev. I u této hypotézy můžeme vidět menší nepravdu, kdy červená sice byla při nejmenším osvětlení nejhůře rozeznatelná, ale bylo tomu tak po celý průběh měření pro všechny úrovně osvětlení, kdy by bylo spíše lepší říct, že vnímaný rozdíl jasu je u červené barvy celkově horší než u všech ostatních barev. Naopak nejnáze poznatelný rozdíl již od nízké hladiny osvětlení lze pozorovat na obrázku 28 u oranžové a fialové barvy. U těchto barev nezáleží podle experimentu příliš na změně osvětlení, jelikož již při nízkém osvětlení jsou rozeznatelné i nejmenší změny v jasu 10 % a 15 %.

Z tabulky 5 a 6 lze vyčíst průměrná hodnota a směrodatná odchylka vnímaného rozdílu. Největší směrodatnou odchylku zaznamenala barva červená při maximálním osvětlení. Hodnota směrodatné odchylky byla 6,31 od průměru 21,14 %. Tento fakt vypovídá o tom, jak se lišily odpovědi probandů od vypočítaného průměru všech odpovědí. Nejvíce se odpovědi lišily pro červenou barvu při všech hodnotách osvětlení od nejmenšího po největší, kdy směrodatná odchylka pro tuto barvu byla vždy vyšší než 6,0. Nejnižší hodnotu směrodatné odchylky z tabulky 6 vyplývá pro fialovou barvu, která při osvětlení 320 luxů měla průměr 10,00 % se směrodatnou odchylkou 0,0. Toto svědčí o tom, že všichni probandi při maximálním osvětlení určili rozdíl jasu pro fialovou barvu 10 %.

V druhém bodě praktické části bylo provedeno porovnání spektrálního složení různých umělých zdrojů světla na půdě FBMI s přirozeným slunečním světlem. Spektrum slunečního záření bylo pomocí spektrometru měřeno za mírně oblačného počasí a při vyhodnocování byla vynechána UV složka spektra, která pro naše porovnání nebyla důležitá. Z porovnání nám vyplývá, že umělé zdroje nejsou schopné komplexně nahradit sluneční světlo a svým spektrálním složením pokrýt celé barevné spektrum viditelného světla. Každý z umělých zdrojů měl jeden či více píků s maximálním zastoupením jedné barvy nebo přechodu mezi barvami. Tyto píky se vymykaly konstantnosti rozložení ostatních barev ve viditelném spektru. Z tohoto experimentu vyplývá fakt, že umělé zdroje použité na fakultě jsou zvolené správně, ale přirozené sluneční světlo nahradit nedokáží, a proto by studenti měli tohoto světla při studiu využívat co nejvíce, pokud je to možné, protože má zásadní vliv na zrakovou pohodu.

7. Závěr

Svou práci jsem věnoval především rešerši na téma světelných podmínek a jejich vlivu na barevné vnímání, které s nimi nezpochybnitelně souvisí. Na začátku své práce jsem v této souvislosti nejdříve popsal sítnici, její vrstvy a více se věnoval fotoreceptorové vrstvě a čípkům, které jsou alfou a omegou při vjemu barvy. V následující části jsem popsal, jak je samotný vjem barvy tvořený a čím vším je ovlivňován. Uvedl jsem, jaké typy vidění v závislosti na intenzitě osvětlení existují a při kterém jsou barvy vnímány nejlépe. Z tohoto vyplývá zjednodušený závěr, že pokud máme k dispozici dostatek světla, barvy vnímáme velice dobře a se snižujícím se osvětlením se snižuje i naše schopnost vnímat rozlišné barvy. V další části mé práce jsem definoval fotometrické veličiny, jejich vzájemné korelace a možnosti jejich měření. V poslední části teoretické části jsem popsal hygienu osvětlení a platné normy pro osvětlování vnitřních prostorů.

Praktickou část bakalářské práce jsem věnoval testování vnímané změny jasu barvy na skupině probandů, na kterých jsem chtěl ověřit hypotézy týkající se tématu vnímání barev uvedené v literatuře. Cílem experimentu bylo zjistit, jak velkou změnu jasu je člověk schopen při různých světelných podmínkách rozeznat. První předpoklad, který dle literatury udává fakt, že při zvyšujícím se osvětlení roste citlivost oka na změnu jasu barvy, jsem experimentem potvrdil. Výjimkou bylo měnící se umístění a typ osvětlení, kdy kvůli odrazu byla v jednom případě citlivost rozpoznání rozdílu jasu mírně ovlivněna. Druhý předpoklad odkazující na Purkyňův jev, který udává, že při nižším osvětlení by měla být nejhůře rozpoznatelná červená barva, jsem potvrdil a prokázal. Druhý bod praktické části jsem věnoval porovnání spektrálního složení umělého osvětlení v prostorách fakulty s přirozeným osvětlením místnosti skrz okna. Z výsledků srovnání vyplývá fakt, že sluneční světlo nelze umělými zdroji nahradit, a proto je důležité, abychom přirozené osvětlení používali v případech, kdy je to možné, co nejhojněji. Je důležité si říci, že přirozené světlo je velice důležité pro zrakovou i psychickou pohodu při studiu i mimo něj.

Seznam použité literatury

- [1] ČIHÁK, Radomír. *Anatomie*. Třetí, upravené a doplněné vydání. Ilustroval Ivan HELEKAL, ilustroval Jan KACVINSKÝ, ilustroval Stanislav MACHÁČEK. Praha: Grada, 2016. ISBN 9788024756363
- [2] KONRÁDOVÁ, Václava. *Funkční histologie*. 2. vyd. Jinočany: H & H, 2000. ISBN 80-86022-80-3.
- [3] SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. *Fyziologie oka a vidění*. 2., dopl. a přeprac. vyd. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3992-2.
- [4] KUČHYNKA, Pavel. *Oční lékařství*. 2., přepracované a doplněné vydání. Praha: Grada Publishing, 2016. ISBN 978-80-247-5079-8.
- [5] Rods and cones [online]. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/rodcone.html#c3>
- [6] KHURANA, A. K., 2007. *Comprehersive ophthalmology: Fourth edition*. 4. Rohtak - 124001, India: NEW AGE INTERNATIONAL (P) LIMITED, PUBLISHERS. ISBN 978-81-224-2480-5.
- [7] Katalog metod v biofyzice [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://el.lf1.cuni.cz/p2kvdbio5po/>
- [8] KARDONG, Kenneth V., c2012. *Vertebrates: comparative anatomy, function, evolution*. 6th ed. New York: McGraw-Hill. ISBN 978-0-07-352423-8.
- [9] Kalorimetrie [online]. [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/kolorimetrie.pdf>
- [10] The perception of colour [online]. [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/color/The-perception-of-colour>
- [11] French, Amanda & Rose, Kathryn & Cornell, Elaine & Thompson, Kathryn. (2008). The Evolution of Colour Vision Testing. *Australian Orthoptic Journal*. 40. 7-15. [online]. [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/225307996_The_Evolution_of_Colour_Vision_Testing
- [12] Rozklad světla [online]. [cit. 2018-12-22]. Dostupné z: http://www.oskole.sk/?id_cat=3&clanok=14674
- [13] Hue, saturation, brightness [online]. [cit. 2018-12-22]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- [14] CAMGÖZ, Nilgün, Cengiz YENER a Dilek GÜVENÇ, 2002. Effects of hue, saturation, and brightness on preference. *Color Research & Application* [online]. **27**(3), 199-207 [cit. 2018-12-22]. DOI: 10.1002/col.10051. ISSN 03612317. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/col.10051>
- [15] Munsellův systém barev [online]. [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: http://geo3.fsv.cvut.cz/vyuka/kapr/sp/2008_2009/pospisilova_rousarova/mun.html
- [16] Tři základní barvy [online]. [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: https://manuals.konicaminolta.eu/bizhub-PRESS-C71cf/CS/contents/id13-_102401683.html
- [17] AUTRATA, Rudolf, 2002. *Nauka o zraku*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví. ISBN 80-7013-362-7.
- [18] CHARLES LUU, Michael Kalloniatis. Dark adaptation [online]. 2007 [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: <https://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-gabac-receptors/color-perception/>
- [19] The Difference Between RGB and CMYK Colors in Digital and Print Design [online]. [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: <https://www.printprint.ca/blog/difference-rgb-cmyk-colors>

- [20] ATKINSON, Rita L., 2003. *Psychologie*. Praha: Portál. ISBN 80-7178-640-3.
- [21] Eysenck, Michael & Keane, Mark. Kognitivní psychologie. Přeložila Toulavá Hana 8. 1. 2011 [online]. [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Mark_Keane/publication/47041539_Kognitivni_psychologie/links/09e4150a4d1ef0c663000000/Kognitivni-psychologie.pdf
- [22] Jaroslav Reichl. Fotometrické veličiny [online]. [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/index.php/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>
- [23] POLÁŠEK, Jaroslav. Technický sborník oční optiky. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1974.
- [24] Peter Begeni. Astronomické oko [online]. Hurbanovo: Slovenská ústredná hviezdáreň, 2015 [cit. 2019-01-05]. ISBN 978-80-8522-83-1. Dostupné z: <http://astro.begi.sk/publ/oko/oko.pdf>
- [25] HANULÍKOVÁ, Garbiela. Zraková ostrost a citlivost – vliv fyzikálních parametrů prostředí, Diplomová práce [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/gpxge/Diplomova_prace.pdf
- [26] DANNHOFFEROVÁ, Jana, 2012. *Velká kniha barev: kompletní průvodce pro grafiky, fotografy a designéry*. Brno: Computer Press. ISBN 978-80-251-3785-7.
- [27] Purkyňův efekt [online]. [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: https://wikisofia.cz/wiki/Purky%C5%88%C5%AFv_efekt
- [28] CHLOUPKOVÁ, Tereza. Fyziologické principy procesu vidění – tvorba a vnímání obrazu, Diplomová práce [online]. Brno, 2007 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/xxypw/Diplomova_prace.pdf
- [29] Katalog metod v biofyzice [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://el.lf1.cuni.cz/p2kvdbio5po/>
- [30] SKORKOVSKÁ, Karolína. Perimetrie [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=lsiNBwAAQBAJ&pg=PA15&dq=fotopick%C3%A9+vid%C4%9Bn%C3%AD&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjxvKXli9ffAhUMEVAKHevGBKo4ChDoAQgsMAE#v=onepage&q&f=false>
- [31] MALÝ, Petr, 2013. *Optika*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Karolinum. ISBN 9788024622460.
- [32] BENEŠ, Jirí, Jaroslava KYMPLOVÁ a František VÍTEK, 2015. *Základy fyziky pro lékařské a zdravotnické obory: pro studium i praxi*. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-4712-5.
- [33] DARULA, Stanislav, KITTLER, Richard, KOCIFAJ, Miroslav, MOHELNÍKOVÁ, Jitka, VAJKAY, František, 2009. Osvětlování světlovody [online]. [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=qd_j_VI53MsC&printsec=frontcover&dq=osv%C4%9Btlov%C3%A1n%C3%AD+sv%C4%9Btlovody&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjSgoP4i9zfAhXDN30KHRRReBCgQ6AEIKTAA#v=onepage&q=osv%C4%9Btlov%C3%A1n%C3%AD%20sv%C4%9Btlovody&f=false
- [34] REICHL Jaroslav. Fotometrické veličiny [online]. [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/index.php/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>
- [35] Světlo [online]. [cit. 2019-05-07]. 3/2009 Dostupné z: <http://odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-4--15601>
- [36] KALUS, René, 2004. *Trivium z optiky*. Ostrava: Ostravská univerzita. ISBN 80-7042-999-2.

- [37] FOLEY J. Ryan, PAPPENKOVA S. Mariana, SWIFT J. Brandon, FILIPPENKO V. Alexej, LI Weidong, MAZZALI A. Paolo, CHORNOCK Ryan, DOUGLAS C. Leonard, and VAN DYK D. Schuyler, 2003. *Optical Photometry and Spectroscopy*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific. [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/378242/pdf>
- [38] Extech [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://www.extech.com/display/?id=14538>
- [39] Základy světelné techniky [online]. [cit. 2019-05-07]. 3/2009 Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39195.pdf>
- [40] ČERNÁ Ladislava. Fotometrie, radiometrie a spektriskopie [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://pasan.feld.cvut.cz/dokumenty/fotometrie.pdf>
- [41] Modernizace goniofotometru [online]. [cit. 2019-05-07]. 3/2009 Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/modernizace-goniofotometru--15660>
- [42] HABEL, Jiří. *Světelná technika a osvětlování*. Praha: FCC Public, 1995. ISBN 80-901985-0-3.
- [43] Vliv světla na naše zdraví aneb hygiena osvětlování [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/vliv-svetla-na-nase-zdravi-aneb-hygiena-osvetlovani--1294>
- [44] Vybrané kapitoly z pracovního lékařství – díl 3. [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.ipvz.cz/seznam-souboru/2357-vybrane-kapitoly-z-pracovniho-lekarstvi-dil-3.pdf>
- [45] Optimalizace osvětlení vnitřních prostorů [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16816/%C5%BE%C3%A1kov%C3%A1_2011_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [46] Osvětlení pracoviště ve vztahu k BOZP. Hygienické normy, doporučená intenzita, projektování. [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.dokumentacebozp.cz/aktuality/osvetleni-pracoviste/>
- [47] BENYA, JAMES R., 2001. Lighting for schools. National Clearinghouse for Educational Facilities, Washington, DC. [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED459598.pdf>
- [48] Zákony pro lidi. [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-361#cast3>
- [49] Satarová Hana. Vnímání barev při zhoršených světelných podmínkách. [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/74859/FBMI-BP-2017-Satarova-Hana-prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [50] Metoda pro zvýšení přesnosti měření optického frekvenčního spektra laditelnými optickými filtry. [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=126811

Seznam obrázků

1. Sítnice [3]
2. Vrstvy sítnice [2]
3. Fotoreceptory [4]
4. Rozložení tyčinek a čípků v sítnici [5]
5. Vlnové délky barev viditelného světla [12]
6. Tři základní vlastnosti barvy [16]
7. Subtraktivní (CMYK) a aditivní (RGB) míchání barev [19]
8. Znázornění trichromatické teorie pomocí citlivosti typů čípků [22]
9. Zjednodušený diagram dvoustupňové teorie [20]
10. Průběh adaptace na tmu [25]
11. Purkyňův jev [27]
12. Postup fotopického, mezopického a skotopického vidění [24]
13. Diagram svítivosti [34]
14. Konstantní hustota paprsků při šíření ze zdroje světla [34]
15. Svítivost zdrojů světla [34]
16. Vztah fotometrických veličin [34]
17. Běžný provozní digitální luxmetr typu Extech LT40 [38]
18. Přesný digitální luxmetr a radiometr typu 211 PRC Krochmann [39]
19. Princip objektivního jasoměru [39]
20. Princip goniofotometru (z boku nalevo, zepředu napravo) [41]
21. Schéma zásad hygieny osvětlování [43]
22. Schéma umístění svítidla a odraz od pracovní plochy [45]
23. Testovací barevné tabulky
24. Sada oranžových čtverců s rozdílem jasu 25 %
25. Sada zelených čtverců s rozdílem jasu 25 %
26. Luxmetr EXTELCH LT40
27. Graf závislosti průměrně vnímané změny jasu na osvětlení
28. Graf závislosti změny jasu na barvě
29. Graf závislosti vnímané změny jasu na barvě 1 [49]
30. Princip spektrometru [50]
31. Graf spektrálního složení zářivky
32. Graf spektrálního složení stolní lampy
33. Graf spektrálního složení baterky
34. Graf spektrálního složení přirozeného světla

Příloha I.

Záznamová tabulka hodnot:

Pohlaví: muž/žena

Rok narození:

| | červená | oranžová | žlutá | zelená | modrá | fialová |
|--------|---------|----------|-------|--------|-------|---------|
| 2 lx | | | | | | |
| 50 lx | | | | | | |
| 180 lx | | | | | | |
| 320 lx | | | | | | |

Pohlaví: muž/žena

Rok narození:

| | červená | oranžová | žlutá | zelená | modrá | fialová |
|--------|---------|----------|-------|--------|-------|---------|
| 2 lx | | | | | | |
| 50 lx | | | | | | |
| 180 lx | | | | | | |
| 320 lx | | | | | | |

Pohlaví: muž/žena

Rok narození:

| | červená | oranžová | žlutá | zelená | modrá | fialová |
|--------|---------|----------|-------|--------|-------|---------|
| 2 lx | | | | | | |
| 50 lx | | | | | | |
| 180 lx | | | | | | |
| 320 lx | | | | | | |

Příloha II.

Tabulka 7: Vnímaný jas pro 50 luxů v % (vlevo ženy, vpravo muži)

| Č | O | Ž | Z | M | F | Č | O | Ž | Z | M | F |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 30 | 15 | 15 | 30 | 20 | 10 | 30 | 10 | 10 | 20 | 15 | 10 |
| 25 | 15 | 20 | 20 | 20 | 10 | 25 | 15 | 25 | 15 | 15 | 10 |
| 25 | 10 | 15 | 25 | 20 | 10 | 30 | 15 | 15 | 20 | 20 | 10 |
| 25 | 15 | 15 | 20 | 15 | 10 | 25 | 20 | 15 | 15 | 25 | 10 |
| 15 | 10 | 15 | 20 | 20 | 10 | 20 | 10 | 15 | 15 | 20 | 10 |
| 15 | 15 | 10 | 20 | 10 | 10 | 20 | 10 | 10 | 15 | 10 | 10 |
| 20 | 10 | 15 | 10 | 20 | 15 | 30 | 15 | 25 | 25 | 20 | 15 |
| 30 | 10 | 15 | 10 | 20 | 10 | 25 | 10 | 10 | 10 | 20 | 10 |
| 25 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 25 | 10 | 20 | 20 | 20 | 10 |
| 20 | 15 | 20 | 20 | 10 | 10 | 20 | 10 | 25 | 25 | 30 | 10 |
| 20 | 10 | 20 | 25 | 15 | 10 | 25 | 10 | 15 | 15 | 20 | 10 |
| 35 | 20 | 20 | 20 | 15 | 10 | 30 | 10 | 10 | 15 | 10 | 10 |
| 15 | 10 | 15 | 20 | 15 | 10 | 25 | 10 | 10 | 20 | 20 | 10 |
| 30 | 15 | 15 | 25 | 20 | 10 | 15 | 10 | 15 | 20 | 15 | 10 |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 10 | 35 | 20 | 20 | 30 | 15 | 10 |
| 25 | 20 | 20 | 15 | 20 | 15 | 30 | 15 | 15 | 25 | 25 | 15 |
| 15 | 15 | 20 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 20 | 15 | 15 | 10 |
| | | | | | | 30 | 20 | 10 | 30 | 20 | 15 |

Tabulka 8: Vnímaný jas pro 180 luxů v % (vlevo ženy, vpravo muži)

| Č | O | Ž | Z | M | F | Č | O | Ž | Z | M | F |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 20 | 10 | 20 | 25 | 20 | 10 | 15 | 10 | 15 | 20 | 10 | 10 |
| 20 | 10 | 15 | 15 | 20 | 10 | 25 | 10 | 20 | 15 | 15 | 10 |
| 15 | 10 | 25 | 20 | 10 | 10 | 35 | 20 | 15 | 20 | 15 | 10 |
| 25 | 10 | 15 | 20 | 20 | 10 | 25 | 20 | 20 | 15 | 20 | 10 |
| 30 | 15 | 10 | 25 | 20 | 10 | 15 | 10 | 15 | 15 | 20 | 10 |
| 25 | 15 | 15 | 20 | 20 | 10 | 25 | 10 | 10 | 20 | 10 | 10 |
| 25 | 15 | 20 | 25 | 25 | 10 | 25 | 15 | 25 | 25 | 10 | 10 |
| 40 | 15 | 20 | 15 | 20 | 15 | 30 | 10 | 20 | 10 | 20 | 10 |
| 20 | 10 | 15 | 20 | 15 | 10 | 25 | 10 | 15 | 15 | 30 | 10 |
| 30 | 20 | 15 | 20 | 15 | 10 | 30 | 15 | 15 | 25 | 30 | 10 |
| 20 | 10 | 15 | 25 | 15 | 10 | 20 | 10 | 10 | 20 | 10 | 10 |
| 35 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 20 | 15 | 15 | 20 | 20 | 10 |
| 15 | 10 | 15 | 15 | 10 | 10 | 25 | 10 | 10 | 20 | 25 | 10 |
| 30 | 15 | 20 | 10 | 10 | 10 | 25 | 10 | 15 | 15 | 15 | 10 |
| 25 | 15 | 20 | 25 | 20 | 10 | 20 | 20 | 20 | 25 | 15 | 10 |
| 15 | 10 | 15 | 15 | 15 | 15 | 20 | 15 | 20 | 15 | 20 | 10 |
| 20 | 15 | 20 | 20 | 20 | 10 | 30 | 15 | 25 | 20 | 15 | 15 |
| | | | | | | 25 | 10 | 15 | 20 | 25 | 10 |

Tabulka 9: Vnímaný jas pro 320 luxů v % (vlevo ženy, vpravo muži)

| Č | O | Ž | Z | M | F | Č | O | Ž | Z | M | F |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 20 | 10 | 10 | 25 | 20 | 10 | 15 | 10 | 15 | 15 | 15 | 10 |
| 15 | 10 | 10 | 15 | 15 | 10 | 20 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 |
| 35 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 25 | 10 | 15 | 15 | 15 | 10 |
| 25 | 10 | 15 | 20 | 15 | 10 | 20 | 15 | 15 | 10 | 20 | 10 |
| 15 | 15 | 10 | 25 | 10 | 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 15 | 10 |
| 25 | 10 | 15 | 20 | 10 | 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 25 | 15 | 15 | 10 | 20 | 10 | 25 | 10 | 15 | 20 | 15 | 10 |
| 15 | 10 | 25 | 10 | 20 | 10 | 25 | 10 | 15 | 10 | 20 | 10 |
| 25 | 10 | 10 | 20 | 15 | 10 | 25 | 10 | 15 | 20 | 15 | 10 |
| 15 | 15 | 15 | 10 | 10 | 10 | 30 | 15 | 25 | 20 | 20 | 10 |
| 15 | 10 | 15 | 20 | 15 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 30 | 10 | 20 | 20 | 10 | 10 | 30 | 15 | 10 | 20 | 20 | 10 |
| 15 | 10 | 10 | 15 | 10 | 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 15 | 10 |
| 10 | 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 25 | 10 | 15 | 20 | 10 | 10 |
| 25 | 10 | 10 | 20 | 15 | 10 | 30 | 15 | 15 | 10 | 15 | 10 |
| 20 | 15 | 15 | 25 | 15 | 10 | 25 | 10 | 15 | 20 | 15 | 10 |
| 25 | 10 | 20 | 15 | 20 | 10 | 20 | 15 | 20 | 15 | 20 | 10 |
| | | | | | | 15 | 15 | 10 | 20 | 25 | 10 |