



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta biomedicínského inženýrství  
Katedra přírodovědných oborů**

**Vnímání barev při zhoršených světelných podmínkách**

**Color perception in low light conditions**

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Optika a optometrie

Autor bakalářské práce: Hana Šatarová

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Jana Urzová

---

**Kladno, Květen 2017**

Katedra přírodovědných oborů

Akademický rok: 2016/2017

## Zadání bakalářské práce

Student: **Hana Šatarová**  
Obor: Optika a optometrie  
Téma: **Vnímání barev při zhoršených světelných podmínkách**  
Téma anglicky: Color perception in low light conditions

### Zásady pro vypracování:

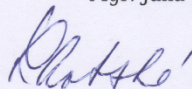
Student zpracuje téma vnímání barev a testování barvocitu a seznámí se s posuzováním světelných podmínek, tj. veličin, které se tohoto tématu týkají. Dále se student seznámí s hygienickými normami kladenými na světelné podmínky při různých činnostech a základními pojmy této problematiky. V praktické části budou provedena testování vnímání barev za různě sníženého jasu na skupině osob. Výsledky testování porovná student s předem formulovanými hypotézami zakládajícími se na publikovaných faktech a statisticky je zpracuje.

### Seznam odborné literatury:

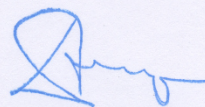
- [1] POLÁŠEK, J. a kol., Technický sborník oční optiky, ed. 1, Oční optika n. p., Praha, 1997, ISBN SIP-41304/03112-301-05-2
- [2] KUCHYNKA, P. a kol., Oční lékařství, ed. 1, Praha: Grada Publishing, 2007, 812 s., ISBN 978-80-247-1163-8
- [3] ROZSÍVAL, P. a kol., Oční lékařství, ed. 1, Galén, Karolínium, 2006, ISBN 80-7262-404-0

Zadání platné do: 11.09.2018

Vedoucí: Mgr. Jana Urzová



.....  
vedoucí katedry / pracoviště



.....  
děkan

V Kladně dne 20.02.2017

## **Název bakalářské práce:** Vnímání barev při zhoršených světelných podmínkách

### **Abstrakt:**

V teoretické části bakalářské práce je zpracováno téma vnímání barev a testování barvocitu. Nejprve je popsána anatomie sítnice a tvorba zrakového vjemu. Teoretická část také zahrnuje popis adaptace na tmu v závislosti na věku, před-adaptaci, příjmu vitamínu A a spektrálním složení osvětlení. Dále se autor zabývá posuzováním světelných podmínek a hygienou osvětlení, na jejímž základě jsou určovány podmínky, které jsou kladeny na osvětlení při různých činnostech. V praktické části byl proveden experiment vnímání barev při světelných podmínkách 0,1, 1, 2, 7, 15, 25, 60, 120 a 400 luxů na padesáti osobách. Testování barevného vidění za zhoršených světelných podmínek proběhlo pomocí vlastního navrženého testu.

### **Klíčová slova:**

Sítnice, zrakový vjem, barevné vidění, adaptace na tmu

## **Bachelor's Thesis title:** Color perception in low light conditions

### **Abstract:**

In the theoretical part of the bachelor thesis is described the theme of color perception and color vision testing. In the first instance, anatomy of the retina and the perception of color are described. The theoretical part also includes a description of age-related adaptation to darkness, pre-adaptation, vitamin A intake, and composition of spectral of illumination. Furthermore, the author describing the assessment of light conditions and the hygienic lighting, which determines the conditions that are necessary for various activities. In the practical part, an experiment of color perception was performed in light conditions of 0.1, 1, 2, 7, 15, 25, 60, 120 and 400 lux on fifty people. This color vision test under the low light conditions was performed using the test designed by the author.

### **Key words:**

Retina, visual perception, color vision, dark adaptation

## **PODĚKOVÁNÍ**

Ráda bych poděkovala vedoucí mé bakalářské práce Mgr. Janě Urzové za cenné rady a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování práce věnovala. Mé poděkování také patří paní doc. Ing. Marii Pospíšilové, CSc za pomoc při zpracování výsledků. Děkuji také svým nejbližším za podporu, kterou mi věnovali jak během studia, tak při psaní této práce.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „*Vnímání barev při zhoršených světelných podmínkách*“ vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

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

V ..... dne .....

.....

podpis

# Obsah

Úvod .....	1
1 Sítnice .....	2
1.1 Stavba sítnice .....	3
1.2 Optická část sítnice .....	5
1.2.1 Žlutá skvrna .....	5
1.2.2 Slepá skvrna .....	7
1.3 Fotoreceptory .....	7
1.3.1 Tyčinky .....	7
1.3.2 Čípky .....	8
2 Tvorba zrakového vjemu .....	10
2.1 Zraková dráha .....	10
2.2 Zrakové korové oblasti .....	11
2.3 Zrakový nerv .....	12
3 Vnímání barev .....	13
3.1 Základní vlastnosti barvy .....	13
3.1.1 Odstín .....	13
3.1.2 Sytost .....	14
3.1.3 Jas .....	14
3.2 Barevný vjem .....	14
3.3 Adaptace na světlo a tmu .....	15
3.3.1 Adaptace na světlo .....	15
3.3.2 Adaptace na tmu .....	16
3.3.2.1 Adaptační křivka .....	16
3.3.2.2 Adaptace a věk .....	17
3.3.2.3 Před-adaptace .....	18

3.3.2.4 Další vlivy na průběh adaptace.....	19
3.4 Vzhled barvy .....	20
3.4.1 Purkyňův jev.....	21
3.4.2 Stevensův efekt.....	21
3.4.3 Huntův efekt .....	22
3.4.4 Bezold-Brückeho efekt.....	22
3.4.5 Abneyho efekt .....	23
3.5 Citlivost na změnu vlnové délky .....	24
3.6 Citlivost na změnu kolorimetrické čistoty.....	24
4 Testování barvocitu .....	26
4.1 Rozlišovací testy.....	26
4.1.1 Pseudoizochromatické (PIC) .....	26
4.1.1.1 Ishiharovy tabulky .....	26
4.1.1.2 AO - HRR (American Optical Hardy-Rand-Rittler Plates).....	27
4.1.1.3 American Optical Company Plates .....	27
4.1.1.4 Dvorine .....	28
4.1.1.5 The tritan Plate (F-2) .....	28
4.1.1.6 Standard Pseudoisochromatic Plates Part 1 a Part 2.....	28
4.2 Seřazovací testy .....	28
4.2.1 Farnsworth-Munsell 100-Hue Test (FM100).....	28
4.2.2 Farnsworth-Munsell Dichotomous D-15 Test.....	29
4.3 Míchací testy .....	30
4.4 Pojmenovávací testy .....	30
5 Fotometrické veličiny .....	31
5.1 Světelný tok .....	31
5.2 Svítivost.....	31
5.3 Osvětlení.....	32



5.4 Jas .....	33
5.5 Světlení .....	34
5.6 Měření fotometrických veličin .....	34
5.6.1 Přesnost měření .....	34
5.6.2 Podmínky měření.....	34
5.6.3 Luxmetr .....	35
5.6.4 Kulový integrátor.....	36
5.6.5 Jasoměr .....	36
5.6.6 Goniofotometr .....	36
6 Hygiena osvětlení .....	37
6.1 Oslnění.....	37
6.2 Veličiny významné pro hygienickou praxi.....	38
6.2.1 Relativní osvětlenost .....	38
6.2.2 Absolutní kontrast jasů .....	38
6.3 Denní a umělé osvětlení .....	39
6.4 Osvětlování vnitřních prostorů .....	39
6.4.1 Osvětlenost pracoviště.....	40
6.5 Hygienické normy kladené na osvětlení na pracovišti .....	41
7 Praktická část.....	42
7.1 Výběr metody a hypotézy.....	42
7.2 Metodika práce .....	43
7.2.1 Testovací tabulky.....	43
7.2.2 Navození světelných podmínek.....	45
7.2.3 Průběh měření.....	46
7.3 Výsledky a jejich zpracování.....	47
7.4 Diskuze .....	55
Závěr.....	57

Seznam použité literatury .....	58
Příloha I. ....	63
Příloha II. ....	65
Příloha III.....	67
Příloha IV. ....	68

# Úvod

Zrak je naším nejdůležitějším smyslem a součástí zrakového vjemu je barevné vnímání. Barva je subjektivní vjem, závisící na vlnové délce světla. Od různých předmětů se odrazí část viditelného spektra, která dopadá na oko a způsobí tak podráždění fotoreceptorů zodpovědných za barevné vidění – čípků. Lidské oko je schopno vnímat světlo o vlnových délkách v rozmezí 360 – 780 nm.

Lidské oko je schopno rozeznávat a vnímat barvy díky tomu, že obsahuje na sítnici tři druhy čípků s různou spektrální citlivostí a třemi odlišnými fotopigmenty, které jsou citlivé na tři základní barvy – červenou, modrou a zelenou. Z těchto barev se skládají barvy ostatní. Za fotopických podmínek je oko nejcitlivější pro žlutozelenou barvu, která odpovídá 555 nm a za skotopických podmínek je oko nejcitlivější na vlnovou délku 505 nm a tedy modrozelenou barvu.

Barevný vjem závisí na množství parametrů. Barva objektu je ovlivněna nejen vlnovou délkou, ale také složením vlnových délek přilehlých objektů nebo jiných částí zorného pole a tím, co bylo vidět dříve, než byl objekt pozorován. Důležitým faktorem je intenzita osvětlení, která má vliv na vnímání barev. Při nedostatku světla přestáváme vnímat barvy od dlouhovlnného spektra ke krátkovlnnému, což nazýváme Purkyňův posun.

Zrak je nejdůležitějším smyslem při vykonávání velké většiny činností a i v tomto směru je důležité osvětlení. Nedostatek osvětlení může mít za následek zrakovou únavu, která se projevuje pálením a bolestí očí, rozmazáním textu, zčervenáním spojivek, nebo bolestí hlavy. Proto bude v práci věnován prostor také popisu hygieně práce a budou stručně vypsány normy kladené na světelné podmínky při různých činnostech.

Cílem bakalářské práce je zpracování tématu problematiky vnímání barev a testování barvocitu. V práci bude popsána stavba sítnice, mechanismy, ke kterým dochází při adaptaci oka a také fotometrické veličiny a jejich měření. Nakonec bude proveden experiment testování barvocitu při různě zhoršených světelných podmínkách. Testování bude probíhat pomocí vytvořeného testu, jehož principem je rozpoznat jeden odlišný čtverec mezi dvaceti čtverci o stejné barvě.

# 1 Sítnice

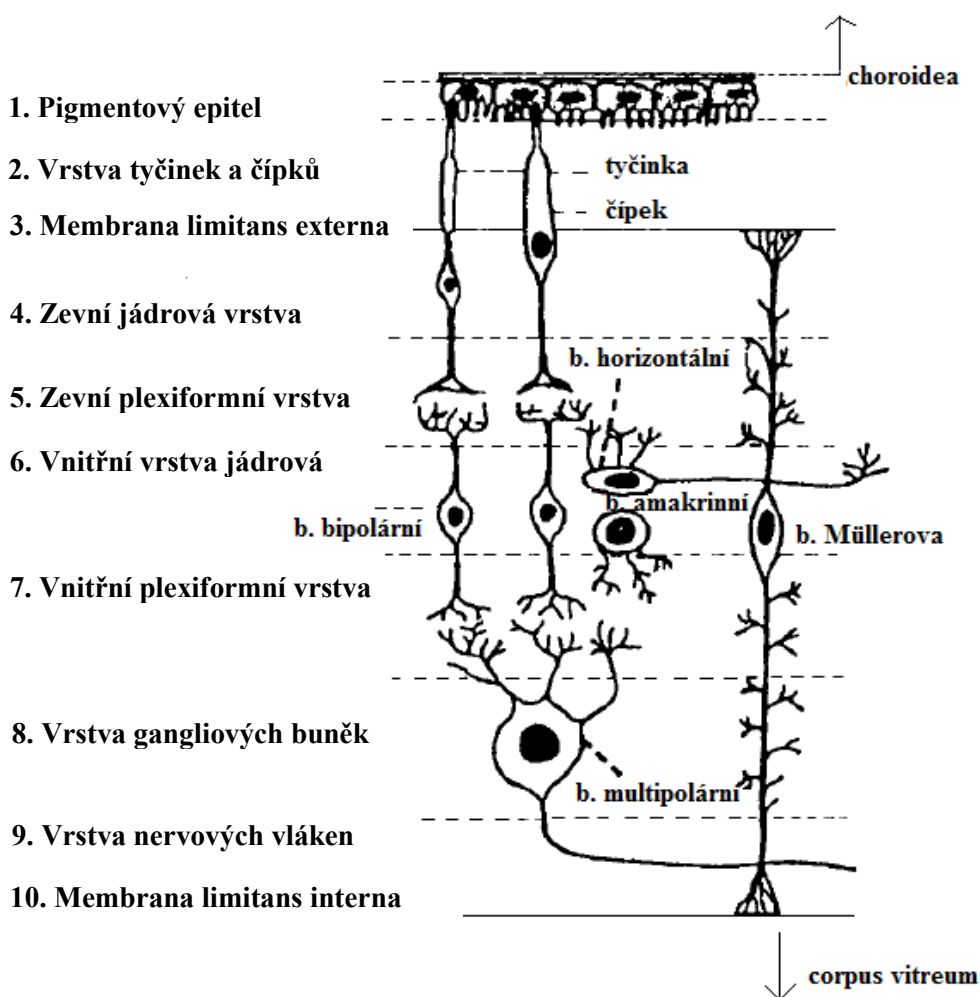
Sítnice (*retina*) je součástí vnitřní vrstvy (*tunica nervosa*) oční koule. Ve stěně oční koule se rozprostírají ještě dvě vrstvy. Zevní vazivová vrstva (*tunica fibrosa*), kterou tvoří bělima (*sclera*) zaujímající 5/6 povrchu a rohovka (*cornea*) tvořící zbylou přední 1/6. Střední vrstvou (*tunica vaskulosa*) ve stěně oční koule je živnatka (*uvea*), tvořena cévnatkou (*choroidea*), řasnatým tělískem (*corpus ciliare*) a duhovkou (*iris*). [1, 2]

Retina se svou zevní plochou dotýká střední vrstvy oční koule a svou vnitřní plochou naléhá na sklivec. Má dvě části, které jsou odlišné stavebně i funkčně. Zadní část tvoří zadní segment oka a nazývá se optická část sítnice (*pars optica retinae*) a přední, slepá část sítnice (*pars caeca retinae*), která je kryta přední stranou řasnatého tělesa a zadním povrchem duhovky. Tato část sítnice neobsahuje žádné fotoreceptory ani nervové buňky. Tyto dvě části jsou od sebe odděleny zubovitou čarou *ora serrata*. Retina dosahuje tloušťky 0,5 mm u papily zrakového nervu, 0,35 mm v místě foveoly a 0,1 mm v oblasti *ora serrata*. [1, 2, 3]

Hlavní úlohou sítnice je detekovat světlo a převádět světelný stimul na neurální signál, který je přenášen zrakovým nervem do zrakového centra v mozku, kde se nakonec vytváří obraz. [4, 5]

## 1.1 Stavba sítnice

Sítnice je složená z deseti vrstev a je zobrazena na obrázku 1. [1]



*Obrázek 1: Stavba sítnice [6]*

**1) Retinální pigmentový epitel (RPE)** - Je složen z jedné vrstvy cylindrických buněk, kterých je 3,5 milionu. Kryje povrch cévnatky a zanořují se do něj zevní segmenty smyslových buněk, tyčinky a čípky. Pigmentový epitel má spolu s pigmentovou vrstvou cévnatky funkci světelné izolační vrstvy. Slouží k tomu, aby dopadající světelné paprsky byly pohlceny, a zabraňuje odrazu těchto paprsků uvnitř oka, dále slouží k výživě a transportu kyslíku do fotoreceptorů, fagocytóze degradovaných zevních segmentů světločivných elementů, regeneraci a syntéze zrakového pigmentu. Sítnice a RPE jsou pevně spojeny v místě *orra serata* a u papily zrakového nervu. [2, 3, 6]

- 2) **Vrstva fotoreceptorů** - Obsahuje tyčinky a čípky. Převádí světelný stimul na elektrochemický signál. Rozložení tyčinek a čípků není rovnoměrné, čípky se nachází v místě nejostřejšího vidění, které je nazvané žlutá skvrna (*macula lutea*) a od periferie žluté skvrny se nachází už jen tyčinky. [3, 7]
- 3) **Membrana limitans externa** - Jemná membrána odděluje výběžky zevních a vnitřních částí fotoreceptorů od jejich jader a vzniká z jemných výběžků podpůrných Müllerových buněk sítnice. [5]
- 4) **Zevní vrstva jádrová** – Je tvořena jádry světločivných buněk. [3]
- 5) **Zevní plexiformní vrstva** - V této vrstvě se rozprostírají axony fotoreceptorů a dochází zde k synapsím tyčinek a čípků s horizontálními a bipolárními buňkami. [6]
- 6) **Vnitřní jádrová vrstva** - Obsahuje jádra nervových buněk sítnice, horizontálních, Müllerových, amakrinních a bipolárních buněk. [3]
- 7) **Vnitřní plexiformní vrstva** - Oblast synapsí axonů buněk amakrinních, bipolárních a dendritů gangliových buněk. [3]
- 8) **Vrstva gangliových buněk** - Tvořena multipolárními neurony. [6]
- 9) **Vrstva nervových vláken** - Vrstva tvořena svazky axonů gangliových buněk. Tyto axony tvoří vrstvu vláken, které opouští retinu jako zrakový nerv. [6]
- 10) **Membrana limitans interna** - Tvoří ji propojené výběžky Müllerových buněk. [5]

Ve vrstvách sítnice lze najít několik typů buněk:

**Bipolární buňky** – Jsou difuzní, pokud se spojí s větším počtem fotoreceptorů, nebo monosympatické, pokud vytváří synapse pouze s jedním čípkem a jednou buňkou gangliovou. [6] Monosympatický typ převažuje v místě zvaném *fovea centralis* a předávají tak impuls přímo do centrální nervové soustavy. [5]

**Asociační buňky** – Mezi asociační buňky se řadí horizontální buňky, které propojují synapse mezi prvním a druhým neuronem sítnice a buňky amakrinní, které je propojují mezi druhým a třetím neuronem. [5] Zprostředkovávají horizontální spojení mezi fotoreceptory, bipolárními a gangliovými buňkami. [1,6]

**Gangliové buňky** – Neurony, jejichž výběžky tvoří druhý neuron sítnice. Axony tvoří svazek nervových vláken, která opouští oční kouli jako zrakový nerv. [6] V makulární oblasti je

4 – 6 vrstev gangliových buněk, ale v periférii je pouze jedna řada. [3] Podle toho, s kolika buňkami tvoří synapse, je můžeme rozdělit na difuzní a monosympatické. [6]

**Neurogliové buňky** – Neurogliové buňky jsou astrocyty, podpůrné Müllerovy buňky a mikroglie. [5] Výběžky podpůrných Müllerových buněk prostupují celou sítnicí [8], slouží jako opora neuronů a spojují se v zevní a vnitřní membránu (*Membrana limitans externa a interna*). [6]

## 1.2 Optická část sítnice

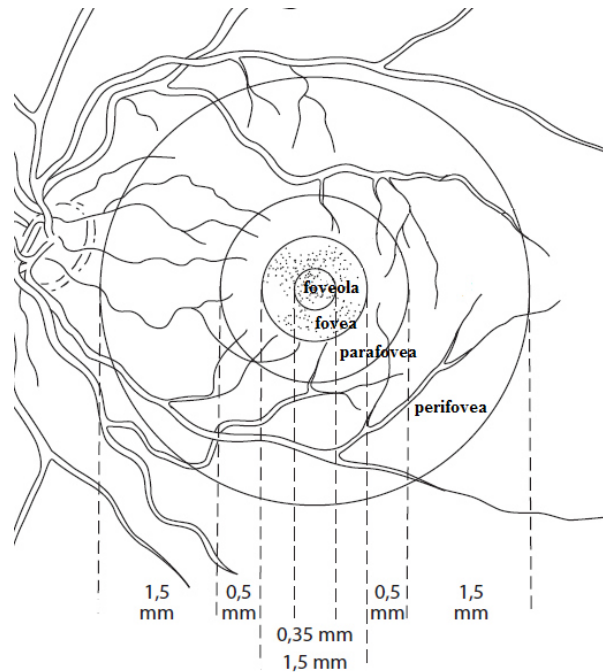
*Pars optica retinae* je tenká blána o tloušťce 0,1 – 0,4 mm. Mezi nejdůležitější útvary na očním pozadí patří žlutá skvrna představující místo nejostřejšího vidění. V oblasti žluté skvrny jsou nejvíce nahromaděny čípky. Ve vzdálenosti asi 4 mm je oblast papily zrakového nervu (*papilla nervi optici*) [2], kde se nenachází žádné fotoreceptory, proto se toto místo nazývá slepá skvrna. [6] Slepá skvrna je umístěna od fovey asi 15° nazálně. [3]

### 1.2.1 Žlutá skvrna

Žlutá skvrna se nachází laterálně od papily zrakového nervu. [2] Ve středu žluté skvrny je prohlubeň *fovea centralis* o průměru asi 1,5 mm a uprostřed *fovea centralis* leží vrchol optické osy oka, foveola, o průměru 0,35 mm. V této oblasti je sítnice nejtenčí a nemá cévy, je tedy avaskulární. Je to místo, kde je soustředěno asi 300 000 čípků na mm<sup>2</sup>. [3] Vnitřní vrstvy sítnice se zde rozestupují do periferie, aby světelné paprsky mohly proniknout přímo do optické osy oka, kde dochází k nejostřejšímu vidění. Tím jak jsou bipolární a gangliové buňky posunuty stranou vzniká jamkovité prohloubení. [5, 6, 8]

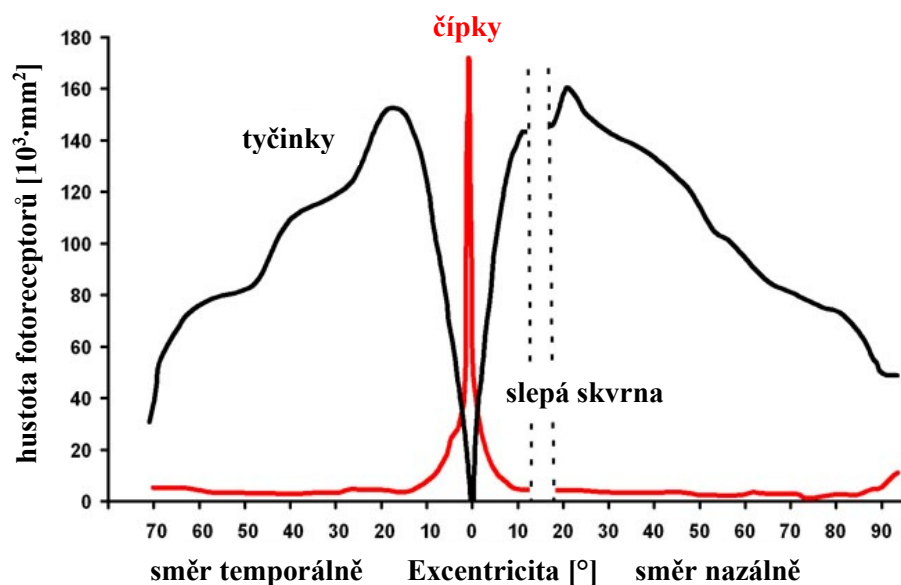
Žlutá skvrna nese název od jejího lehce žlutozeleného zbarvení, které je zapříčiněno pigmentem xantofylem. Tento pigment najdeme ve vnitřních vrstvách sítnice. V oblasti žluté skvrny je ho více, a proto dochází k odlišnému zbarvení. [8]

Foveu obklopuje pás o šířce asi 0,5 mm, tzv. parafovea, kde se rozkládá asi 4 – 6 vrstev gangliových buněk a 7 – 11 vrstev bipolárních buněk. 1,5 mm od parafovey je konec dalšího pásu zvaném perifovea, kde už je vrstva gangliových buněk ztenčena na jednu vrstvu a 6 vrstev bipolárních buněk. Zobrazení foveoly, fovey, parafovey a perifovey lze vidět na obrázku 2. [3]



**Obrázek 2:** Foveola, fovea, parafovea, perifovea [3]

V oblasti fovey jsou převážně čípky, které slouží k vidění za světla a k vnímání barev. [7] Žlutá skvrna je místem nejostřejšího vidění, protože každý čípek má svou vlastní buňku gangliovou a bipolární. Směrem do periferie čípků ubývá a tyčinek přibývá. Ve 4° od centra je však počet tyčinek a čípků skoro stejný. Čím dále postupujeme do periferie, tím více fotoreceptorů náleží jedné gangliové buňce. V důsledku toho klesá rozlišovací schopnost a zvyšuje se adaptace na nízké hladiny osvětlení, protože funkci přebírají tyčinky, které slouží k vidění při nízké intenzitě světla. [9] Na obrázku 3 lze vidět rozložení tyčinek a čípků.



**Obrázek 3:** Graf rozložení fotoreceptorů [10]

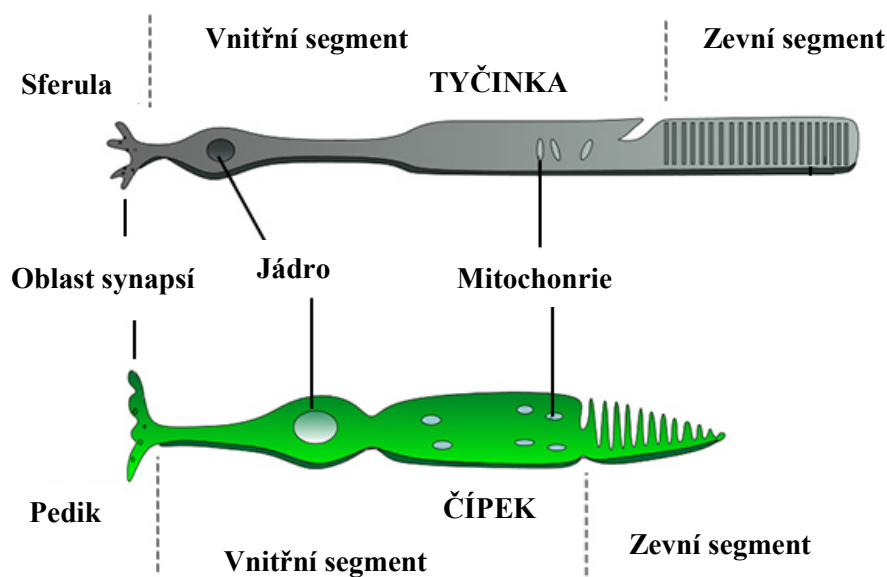


## 1.2.2 Slepá skvrna

Místo, kam se sbíhají všechny nemyelizované axony z gangliových buněk a které postrádá fotoreceptory, se nazývá slepá skvrna (*macula caeca*). [1] Gangliová vlákna odstupují směrem k zadnímu pólu oka z bulbu ve zrakový nerv a až po prostupu sklérou získávají myelinovou pochvu. [2, 7] Slepá skvrna má vzhled bělavě vyklenutého políčka o průměru 1,5 mm a uvnitř bělavého políčka, terče zrakového nervu, je střed prohlouben v *excavatio disci*. [2]

## 1.3 Fotoreceptory

Fotoreceptory jsou primární smyslové buňky a podle vzhledu a funkce rozlišujeme dva typy, tyčinky a čípky. Na sítnici je tyčinek celkově 120 milionů a čípků 6 milionů. Vždy na tyčince nebo čípku můžeme rozlišit oblast jádra, oblast synapsí a vlastní tyčinku nebo čípek. [6] Vlastní tyčinka nebo čípek se skládá ze zevního segmentu, obsahující zrakový pigment a vnitřního segmentu, kde dochází k metabolickým procesům (obrázek 4). [3] Podrážděním fotoreceptorů nastává proces vidění. [6]



Obrázek 4: Tyčinka a čípek [11]

### 1.3.1 Tyčinky

Tyčinky jsou citlivé i na velmi malé množství světla a jsou uzpůsobeny k vidění za šera. Jejich citlivost je až 1000 krát větší než u čípků. [12] Jsou to protáhlé a tenké buňky dosahující velikosti 50 x 3 mikrometru. Jejich tělo dělíme na zevní a vnitřní segment, který je

spojen úzkou spojovací částí, pod kterou se nachází bazální tělísko. Jejich zevní segment má cylindrický tvar. Oblast synapsí je zde menší než u čípků a nazývá se sferula. V oblasti jádra se buňka rozšiřuje a dochází k terminálnímu rozšíření. [6] Jádro je u tyčinek menší než u čípků. [5]

Zevní segment je charakteristický diskovitými strukturami, kterých je asi 600 – 1000. [6] Jsou to oploštěné útvary ohraničeny lipoproteinovou membránou, uspořádané do sloupce. Tato část stále dorůstá a je pohlcována buňkami pigmentového epitelu. Každý den je pohlcováno asi 100 disků, které jsou nahrazovány jinými. Disky tyčinek jsou fagocytovány za světla. V discích je uložen zrakový purpur rhodopsin, který dokáže zachytit fotony. [3] Molekuly rhodopsinu jsou uloženy na zevním povrchu lipidové dvojvrstvy membránových disků. Při dopadu světla na fotosenzitivní zevní segment se rhodopsin rozloží na retinal (aldehyd vitamínu A) a opsin (proteinová část).

Vnitřní segment obsahuje mitochondrie, důležité k získání energie a polyribozomy, nezbytné pro syntézu bílkovin. Mitochondrie se hromadí u bazálního tělíska a proto je zde zvýšená produkce energie. Pod oblastí s mitochondriemi je oblast polyribosomů. Proteinové molekuly mohou být v bazální oblasti začleněny do membrán tvořící diskovité struktury, které se transportují k vrcholu tyčinek. [6]

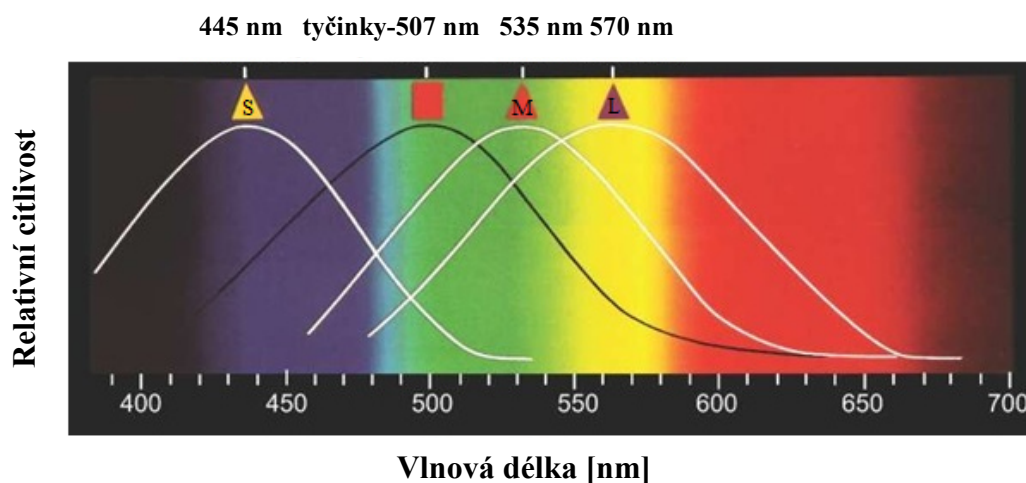
Hustota tyčinek není ve všech místech stejná. V centru nejsou žádné tyčinky. Nejvíce tyčinek je asi  $20^\circ$  od bodu fixace a jejich hustota zde dosahuje 160 000 na  $\text{mm}^2$ . Nazálně a temporálně od fovey je jejich hustota 115 000 na  $\text{mm}^2$ . [3]

### 1.3.2 Čípky

Čípky se liší od tyčinky tvarem zevního segmentu, který je kónický a lahvovitý. [6] Jsou citlivější na světlo vyšší intenzity než tyčinky a zajišťují lepší zrakovou ostrost. Zuzují se směrem od vnitřního k zevnímu segmentu, avšak foveální čípky mají cylindrický tvar a připomínají tak tyčinky. K synapsi čípků s jinými buňkami dochází v oblasti synapsí a tato oblast terminálního zakončení se nazývá pedykl. [3] Čípky také obsahují paralelně uspořádané diskovité struktury, které jsou ale na rozdíl od tyčinek kontinuální s buněčnou membránou a vznikají jako její invaginace. Disky čípků jsou fagocytovány za tmy. Nově vzniklé proteiny na rozdíl od tyčinek nejsou začleňovány do bazálních diskovitých struktur, ale jsou rovnoměrně distribuovány po celém zevním segmentu. Čípky obsahují ve svých membránách iodopsin, který je za ostrého světla zodpovědný za barevné vidění. [6]

Naše vidění je trichromatické a to díky tomu, že máme tři typy čípků: S, M a L. [3] M čípky obsahující pigment, který absorbuje vlnovou délkou přibližně 535 nm, L čípky 570 nm a S čípky 445 nm. [13] Z celkového počtu čípků na sítnici je 64 % S, 32 % M čípků a 4 % L čípků. Čípky nejcitlivější na zelenou a červenou oblast spektra jsou nejvíce nahromaděny ve fovee a čípky absorbující nejvíce modrou oblast spektra jsou umístěny mimo fovee a jsou nejcitlivější ze všech tří druhů čípků. [12] Spektrální citlivost lidského oka je znázorněna na obrázku 5.

S rostoucím věkem je počet čípků stejný. Největší hustota čípků je ve fovee až 200 000 na  $\text{mm}^2$ , od centra jejich hustota excentricky klesá každých  $10^\circ$  o 10 000 na  $\text{mm}^2$  a v periférii jich je nejméně a hustota dosahuje pouze 8000 na  $\text{mm}^2$ . [3] Tloušťka čípků je 2 mikrometry v centru fovey a jejich velikost se zvětšuje směrem k periférii až čtyřikrát. [14]



**Obrázek 5:** Spektrální citlivost lidského oka [15]

## 2 Tvorba zrakového vjemu

Tvorba zrakového vjemu je složitý fyziologický děj, který se skládá z několika na sebe navazujících biofyzikálních a biochemických reakcí. Světelné paprsky nejprve pronikají optickými prostředními oka, což jsou rohovka, komorová voda, čočka a sklivce. Paprskové svazky se spojí na sítnici a dojde k podráždění světločivných buněk. Zraková informace, která vznikla, je převedena zrakovou drahou, složenou ze 4 neuronů, do zrakového centra v mozku. [2, 7, 16]

### 2.1 Zraková dráha

Funkčně nejdůležitější součástí retiny je trojice neuronů zrakové dráhy. Neurity tří neuronů sítnice se sbíhají do optického nervu (*n. opticus*). První neuron tvoří světločivné buňky (zevní a vnitřní segmenty a jejich jádra). [2, 3] Světločivné buňky převádí světelné podněty na nervové vzruchy. [5] Vzruch vzniklý dopadem světla se axonem přenesou na druhý neuron tvořen bipolárními nervovými buňkami. Část bipolárních nervových buněk sbírá informace z čípků (jeden bipolární neuron z jednoho čípku) a druhá část sbírá informace z tyčinek (jeden bipolární neuron z 3 – 5 tyčinek). Soubor bipolárních buněk tvoří *ganglion retinae*. Druhý neuron předává signál na třetí neuron, který tvoří vrstva gangliových buněk a jejich soubor se nazývá *ganglion opticum*. Neurony jsou propojeny horizontálními a amakrinními buňkami. [2, 3, 5] Axony gangliových buněk se sbíhají k papile zrakového nervu a po průchodu bělimou získávají myelinovou pochvu a tvoří tak samotný zrakový nerv. [5] Zraková dráha je zobrazena na obrázku 6.

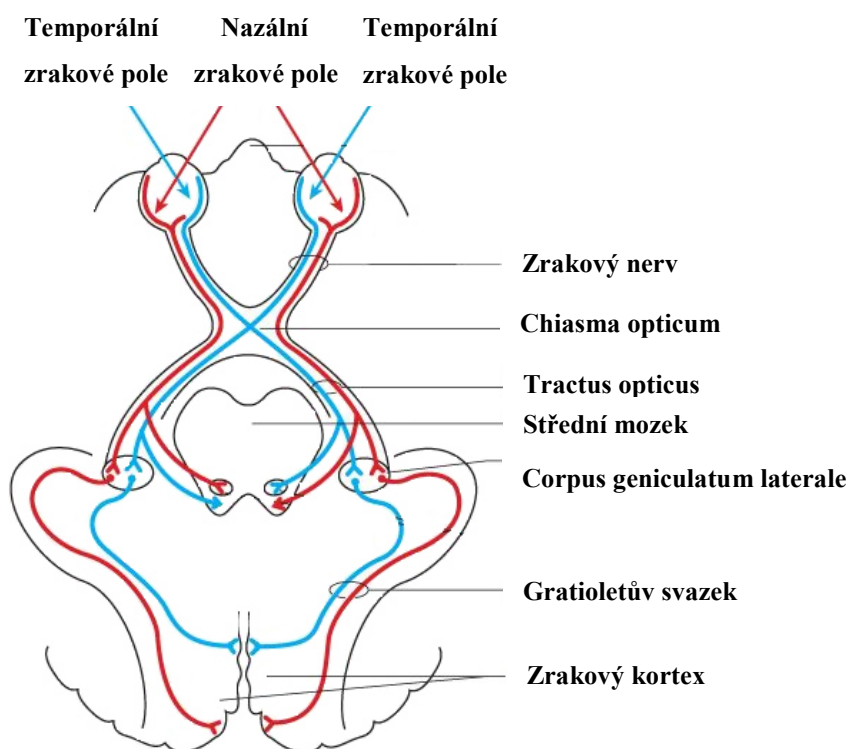
Když oba zrakové nervy projdou *canalis nervi opticus* do dutiny lebeční, dochází k částečnému křížení nervových vláken zrakové dráhy. Toto překřížení se označuje jako *chiasma opticum*. Kříží se asi 62 % vláken vycházejících z nazální části sítnice. Nekříží se 38 % vláken, která vychází z temporální části sítnice. Vlákná vycházející ze žluté skvrny jsou částečně zkřížena, částečně nezkřížena. [5]

Za chiasmatem následuje úsek zvaný *tractus opticus*. V pravostranném *tractus opticus* probíhají nervová vlákna z pravých polovin sítnice a zároveň z levých polovin zorných polí obou očí. V levostranném *tractus opticus* probíhají nervová vlákna z levých polovin sítnice a zároveň pravých polovin zorných polovin obou očí. [2, 3, 7]

Vlákná *tractus opticus* se v dalším průběhu směrem ke *corpus geniculatum laterale* (CGL) rozdělují na dvě větve. Silnější, *radix lateralis*, tvoří 80 % vláken a míří rovnou

do CGL. Slabší *radix medialis* vede část vláken do *nukleus colliculi superioris* středního mozku (tvorba opticko – motorických reflexů), část vláken vede k *area praetectalis*, kde se nachází centrum pupilárního reflexu, další vlákna končí v hypotalamu a jsou schopny vnímat množství a kvalitu světla. [3, 5, 7]

CGL je primární zrakové centrum v mezimozku. Je složeno ze šesti vrstev. Neurity nervových buněk vycházející z CGL tvoří Gratioletův svazek. Gratioletův svazek končí v buňkách korového zrakového centra v okcipitálním laloku a vzniká zde zrakový vjem. [3, 7]



**Obrázek 6:** Zraková dráha [17]

## 2.2 Zrakové korové oblasti

Zrakové korové oblasti leží na mediální ploše okcipitálního laloku. [2]

### Primární zraková korová oblast

Primární zraková korová oblast (Brodmannova area 17) je uložena v okcipitálním laloku v oblasti *fisura calcarina*. [3] Díky této oblasti lze rozeznávat barvu a tvar. [18] Sem přicházejí vlákna optických radiací z CGL. [3]

### **Zraková asociační korová oblast**

Zahrnuje Brondmannovu areu 18 a 19 a přiléhá z obou stran k primární zrakové korové oblasti. [2, 18] Zraková asociační korová oblast je zodpovědná za komplexní zhodnocení vjemu okolního prostředí. [2]

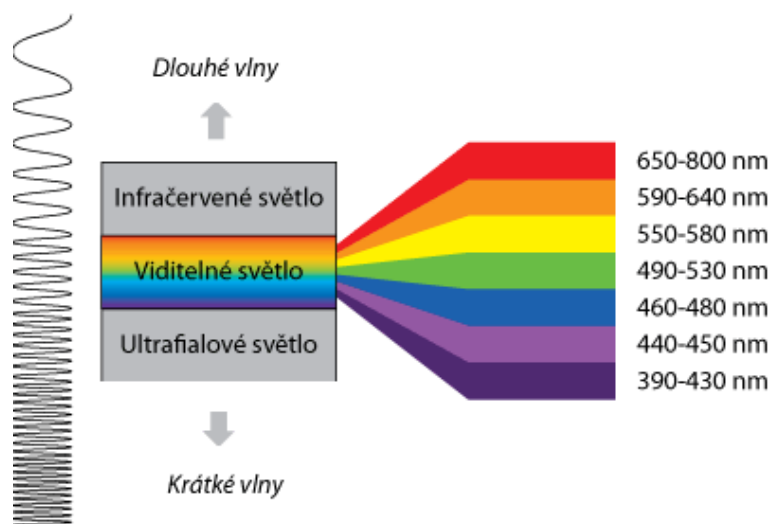
## **2.3 Zrakový nerv**

*Nervus opticus* je druhým hlavovým nervem. Sbíhá se přibližně z jednoho milionu axonů gangliových sítnicových buněk a vystupuje z bulbu v místě zvaném *discus nervi optici*. Svazky jsou spojeny pomocí opěrné struktury z pojivové tkáně. Výstup zrakového nervu má vzhled kruhu o průměru 1,5 mm a je u něj viditelné prohloubení zvané *excavatio disci*. [3] Průměr zrakového nervu se zvětšuje na 3 – 4 mm včetně jeho obalů. Jeho vlákna získávají myelinovou pochvu až po průchodu sklérou, před ní jsou nemyelizovaná. Úseky zrakového nervu se rozdělují na *pars intraocularis*, která představuje ještě nemyelizovaná vlákna, *pars prelaminaris*, nacházející se na povrchu papily zrakového nervu, *pars intralaminaris*, v místě průchodu skrz *lamina cribrosa* a *pars postlaminaris*, která označuje úsek za *lamina cribrosa*. [5] Optický nerv kryje *pia mater*, *arachnoidea* a *dura mater*. [3] Jeho délka dosahuje 50 mm. [7]

## 3 Vnímání barev

Schopnost oka vnímat barvy se nazývá barvocit. [16] Pokud pozorujeme barevný předmět, je to pouze světlo odražené od tohoto předmětu, které aktivuje vizuální proces v oku a mozku. [19] Barva je subjektivní a psychofyzilogický vjem, který je vyvolán po dopadu elektromagnetického záření viditelné části spektra na sítnici. Barevný vjem je závislý na podmínkách pozorování. [20]

Lidské oko je citlivé na rozsah vlnových délek viditelného spektra, kdy se vlnová délka pohybuje v oblasti 400 – 760 nm. [2] Na obrázku 7 lze vidět barevné spektrum seřazené od nejkratších vlnových délek k nejdelším. S rostoucí vlnovou délkou klesá frekvence a s klesající vlnovou délkou frekvence roste.



*Obrázek 7: Viditelné světlo [21]*

### 3.1 Základní vlastnosti barvy

#### 3.1.1 Odstín

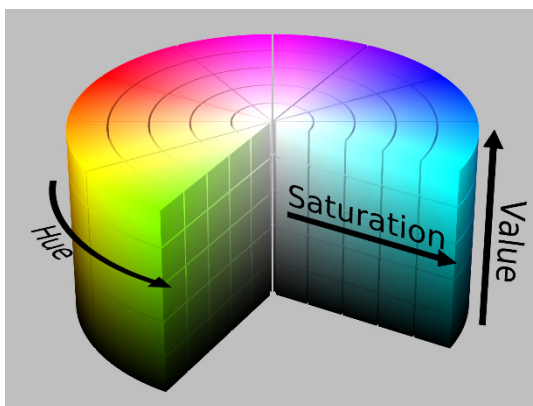
Odstín spolu se sytostí a jasem patří mezi základní vlastnosti barvy. Pojmy jako červená nebo modrá primárně popisují odstín, který se vztahuje k vlnové délce spektrálních barev. [22] Ne všechny odstíny ale mohou být reprezentovány spektrálními barvami. Neexistuje vlnová délka, která má purpurový odstín, je vytvořena smícháním červené a modré. Existuje mnoho různých směsí vlnových délek, které mohou vytvářet stejný odstín. [22]

### 3.1.2 Sytost

Čím méně je ve směsi určité barvy, tím je daná barva více sytá a naopak. [16] Sytost barvy udává její množství v poměru k šedé. Sytost se měří se v procentech od 0 % (šedá) do 100 % (plně sytá barva bez šedé). [23]

### 3.1.3 Jas

Jas je charakterizován intenzitou zrakového vjemu. [24] Jas závisí na intenzitě světelného zdroje, čím je výkonnější, tím je barva více jasná. [16] Pokud je hodnota jasu 0, vidíme pouze černou barvu a pokud je hodnota jasu 10, jde o barvu bílou, bez ohledu na barevný odstín. [25]



*Obrázek 8: Základní vlastnosti barvy, (hue – odstín, saturation – sytost, value – jas) [23]*

## 3.2 Barevný vjem

Vznik barevného vjemu je složitý proces. Barevný vjem vzniká v mozku, pokud na oko dopadá světlo o určitém spektrálním složení. Barevné vidění vzniká, pokud dojde k podráždění sítnice zářivou energií s určitou vlnovou délkou. [7]

Jak už bylo výše zmíněno, barevné vidění je umožněno díky třem typům čípků, které obsahují odlišné pigmenty. Díky těmto třem fotoreceptorů a jejich různé citlivosti pro tři základní barvy je naše vidění trichromatické. Z těchto tří barev lze sestavit jakoukoliv barvu. Každý z pigmentů je citlivý na různou vlnovou délku světla. Schopnost lidského oka je tak dokonalá, že je schopno rozeznat i hodnotu rozdílu 1 nm ve vlnové délce. [2] Podle zdroje [26] je člověk schopný rozeznat 200 různých odstínů, 26 stupňů sytosti a 500 rozdílných úrovní jasu.

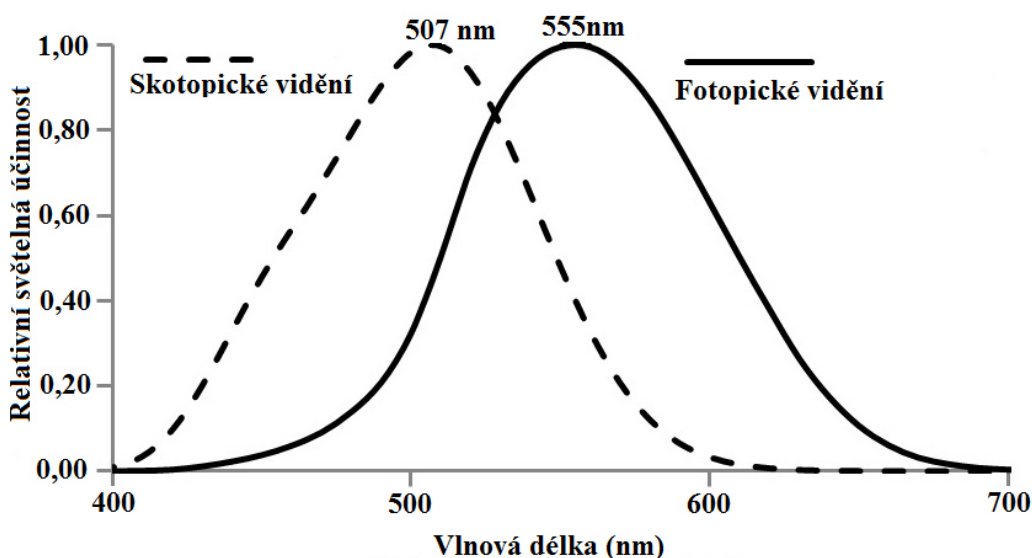


Lidské oko nejlépe vnímá barvy žlutou skvrnu. Schopnost vnímat barvy se snižuje směrem do periferie postupně pro barvu zelenou, červenou a modrou. Pokud světlené paprsky dopadnou na žlutou skvrnu, jedná se centrální vidění a pokud dopadnou mimo, jde o periferní vidění. [7]

### 3.3 Adaptace na světlo a tmu

Schopnost oka přizpůsobit se různým hladinám osvětlení se nazývá adaptace. Rozlišuje se adaptace na světlo a adaptace na tmu. [7] Pokud je citlivost lidského oka testována na různé složky světelného spektra, získáme při fotopických a při skotopických podmínkách dvě odlišné křivky. Křivky spektrální citlivosti pro určité osvětlení jsou zobrazeny na obrázku 9. Na obrázku lze vidět, že u skotopických podmínek se křivka spektrální citlivosti posouvá ke kratším vlnovým délkám. [2]

Lidské oko může plynule reagovat na intenzitu osvětlení od 0,003 do 80 000 luxů. Nejmenší světelný tok vyvolávající zrakový vjem je přibližně  $3 \times 10^{-14}$  lumen. Největší světelný tok, který je oko schopno přijmout je  $1,4 \times 10^2$  lumen. [27]



Obrázek 9: Křivky spektrální citlivosti [28]

#### 3.3.1 Adaptace na světlo

Při adaptaci na světlo, tedy za fotopických podmínek fungují pouze čípky. [2] Čípky reagují až na světlo vyšší intenzity, v tzv. fotopickém pásmu. [2] Fotopické vidění nastává při adaptaci oka na jas větší než  $1 - 3 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Aby proběhla adaptace na světlo, je nutné rozložení

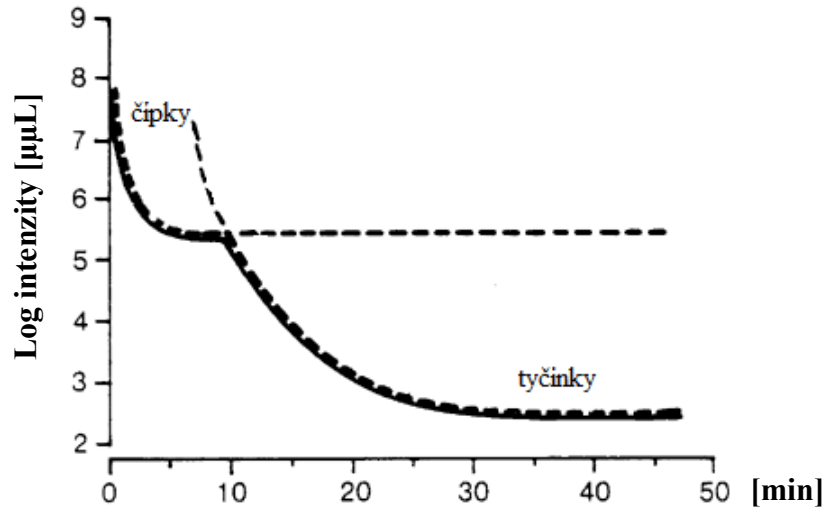
rodopsinu v tyčinkách, které se stanou necitlivými na světlo a částečné rozložení jodopsinu v čípkách. Adaptace na světlo je rychlejší než adaptace na tmu. K odeznění nepříjemných pocitů dojde do jedné minuty a k plné adaptaci na světlo dojde za 4 minuty. Během této doby se nám všechny odstíny zdají jasnější a během této doby se kontrast srovná na běžnou úroveň. [27] Ve fotopickém pásmu je oko schopno vnímat barvy a má lepší ostrost vidění než tyčinky. [5] Fotopická citlivost je maximální při hodnotě 555 nm vlnové délky, což odpovídá žlutozelené barvě. Pokud je sítnice intenzivně osvětlena, nastane mióza a tok světla do oka je omezený. [2] Reakce nastane okamžitě a slouží k ochraně oka před oslněním. [7] Pokud se na zrakovém vjemu podílejí tyčinky i čípky, mluvíme o mezopickém pásmu. [2] Procentuální poměr zastoupení funkčních tyčinek a čípků závisí na intenzitě světla. V mezopickém pásmu se postupně vypínají čípky a dochází k posunu citlivosti oka ke kratší vlnové délce. [27]

### 3.3.2 Adaptace na tmu

Oko je adaptované na jas menší než  $0,01 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ . Při adaptaci na tmu dochází ke zpětné resyntéze zrakového purpuru [27] a funkci postupně přebírají tyčinky, které jsou mnohem citlivější na světlo než čípky a reagují i za velmi nízkých hladin osvětlení. Při těchto hladinách oko barvy nevnímá a mluvíme o skotopickém pásmu vidění. Značnou úlohu v adaptaci hraje zornice, která se při nedostatečném osvětlení rozšíří a nastane mydriáza, aby se do oka dostalo co nejvíce světla. Maximální spektrální citlivost se posouvá ke kratším vlnovým délkám, konkrétně k vlnové délce 505 nm, která odpovídá modrozelené barvě. Tyčinky nejsou schopné zaznamenat červenou barvu. [2]

#### 3.3.2.1 Adaptační křivka

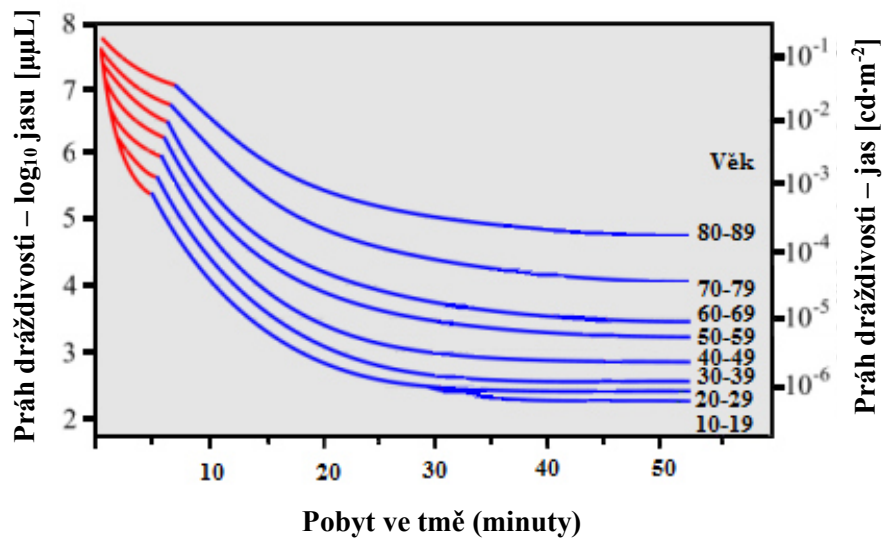
Na obrázku 10 je zobrazen časový průběh adaptace na tmu, tzv. adaptační křivka, která vyjadřuje prahovou citlivost sítnice v závislosti na čase a osvětlení. Celý proces probíhá ve dvou fázích, adaptace čípků a adaptace tyčinek. První část křivky znázorňuje mechanismus čípků. Po první minutě se citlivost sítnice zvýší až 10x. Po 5-10 minutách dosáhnou maximální citlivosti čípky, a to až o 100 násobek původní hodnoty. Po uplynutí toho času začínají svou funkci plnit tyčinky. Po 15 minutách se citlivost sítnice zvýší až 10 tisíckrát. [27] Zvýšení citlivosti tyčinek je znázorněno ve druhé, pozvolnější části adaptační křivky. [29] Maximální citlivost mají tyčinky po 40 minutách, kdy je citlivá 100 - 200 tisíc násobně. V tuto chvíli je oko plně adaptováno na tmu. [27]



Obrázek 10: Adaptační křivka [30]

### 3.3.2.2 Adaptace a věk

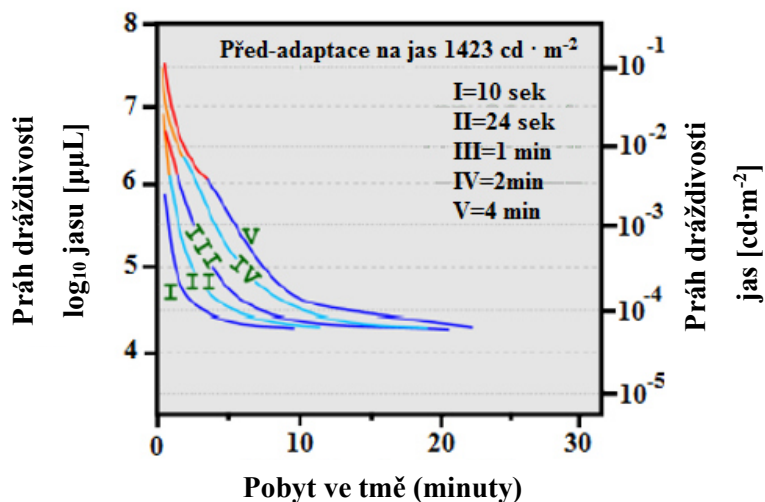
Adaptace na tmou je závislá na věku. U mladého člověka trvá adaptace na tmou 45 minut. S vyšším věkem citlivost klesá a prodlužuje se čas potřebný k adaptaci na tmou. U 50 letého člověka je doba potřebná k adaptaci větší 2-3x a citlivost sítnice je 10x menší. V 80 letech je citlivost 1000x menší a práh citlivosti tyčinek se dostává do úrovně prahu citlivosti tyčinek u 20 letého člověka, takže 80 letý člověk má po úplné adaptaci stejnou citlivost sítnice jako 20 letý člověk po 5 – 10 minutách. Například 20 letému člověku stačí na adaptaci půl hodiny, 30 letý potřebuje 40 minut a 50 letý alespoň hodinu. Graf adaptace v závislosti na věku lze vidět na obrázku 11. Tyto hodnoty jsou pouze orientační a jsou individuální, protože záleží i na celkovém zdravotním stavu a životosprávě. [27]



Obrázek 11: Adaptace v závislosti na věku [27]

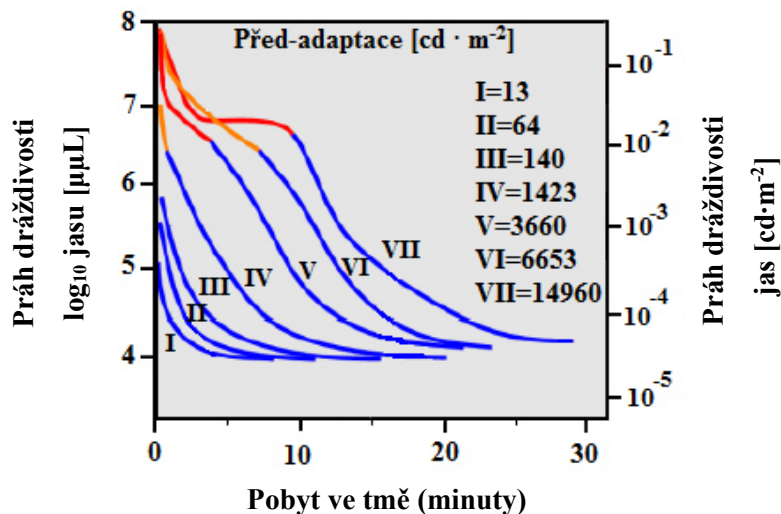
### 3.3.2.3 Před-adaptace

Délka adaptace na tmu a její průběh závisí na stavu oka před tím, než samotná adaptace začne probíhat. Pokud jsme se před adaptací nacházeli v silně osvětlené místnosti, bude adaptace trvat déle, než kdybychom se nacházeli v tmavé chodbě. Pokud je plně adaptované oko vystaveno světlu na několik sekund, je následná adaptace rychlejší, než kdyby oko bylo vystaveno stejně intenzivnímu světlu několik minut. Graf na obrázku 12 říká, že čím déle je adaptované oko vystaveno světelnému zdroji, tím je průběh adaptace delší. [27]



**Obrázek 12:** Závislost před-adaptace na průběhu adaptace na tmu [27]

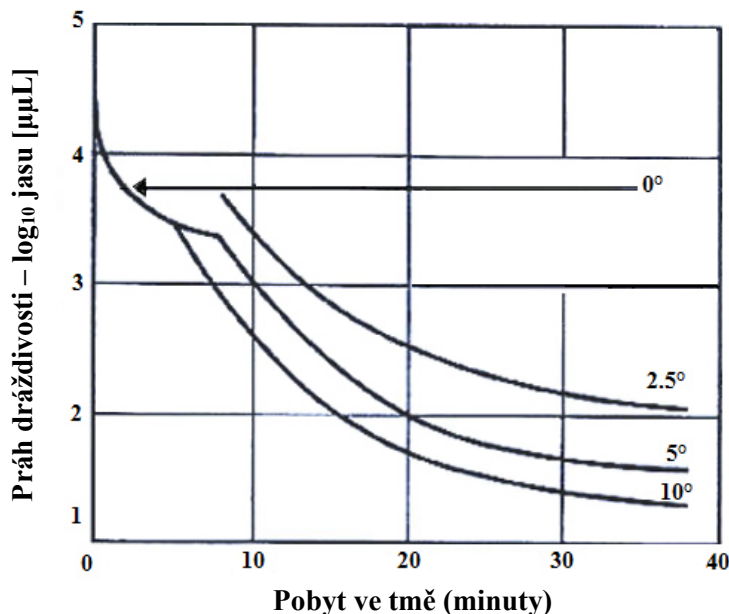
Graf na obrázku 13 znázorňuje, jaký vliv má intenzita světelného zdroje na následnou adaptační křivku. Pokud je oko plně adaptováno na tmu a je vystaveno 4 minuty světelnému zdroji (4 minuty trvá adaptace na světlo) o rozdílném jas, je adaptační křivka různá. Při nejnižším jas je adaptace rychlejší, než když je oko vystaveno nejvyššímu jas. [27, 29]



**Obrázek 13:** Závislost intenzity osvětlení na adaptaci [27]

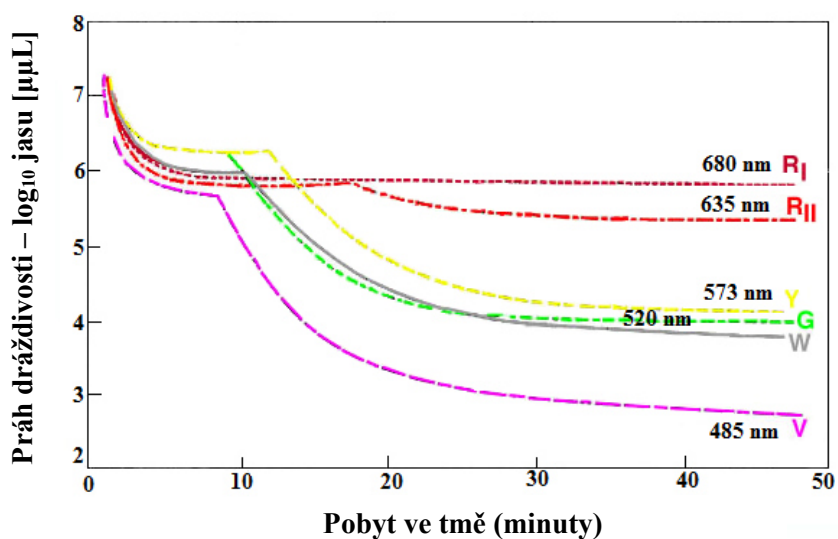
### 3.3.2.4 Další vlivy na průběh adaptace

V důsledku rozložení tyčinek a čípků na sítnici je adaptační křivka různá v různých úhlových vzdálenostech od fixačního bodu. [29] Ve foveole má adaptační křivka pouze čípkovou (první) fázi, protože se zde rozkládají pouze čípky. Graf závislosti adaptace na rozložení tyčinek a čípků je na obrázku 14. [27]



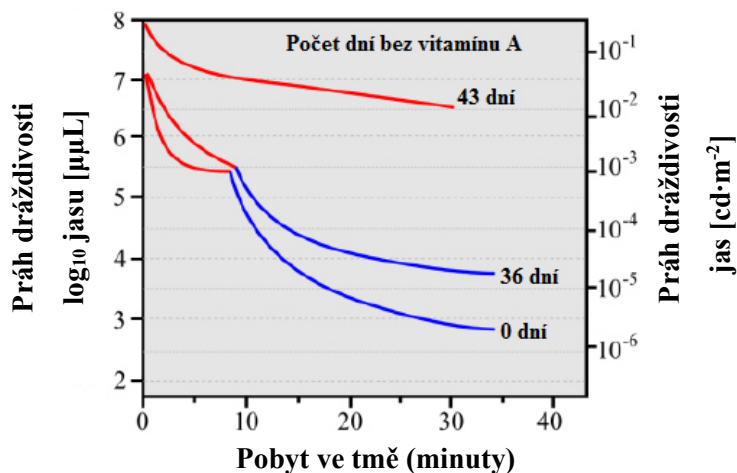
Obrázek 14: Závislost vzdálenosti od fixačního bodu na adaptační křivce [29]

Průběh adaptační křivky je také rozdílný pro různé spektrální barvy. U červené barvy dokonce chybí tyčinková fáze v adaptační křivce (obrázek 15). [27]



Obrázek 15: Adaptační křivka a různé spektrální barvy [29]

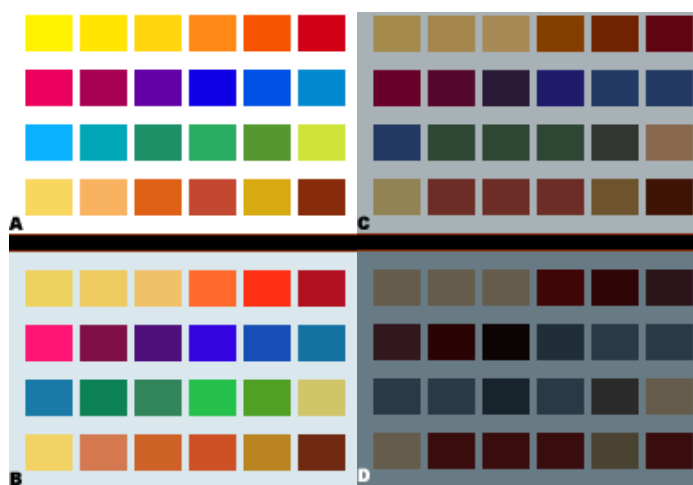
Také výskyt vitamínu A má vliv na průběh adaptace a jeho vysazení má negativní vliv na citlivost sítnice (obrázek 16). Závislost vitamínu A na citlivosti sítnice je individuální. [27]



Obrázek 16: Závislost množství vitamínu A na citlivosti sítnice [27]

### 3.4 Vzhled barvy

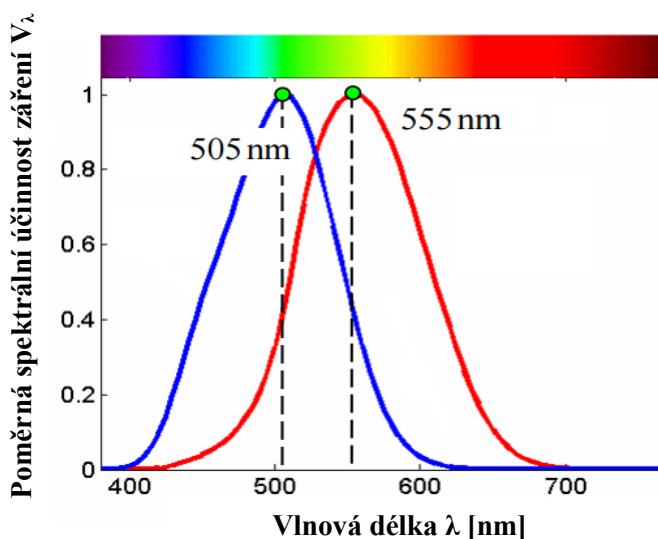
Vzhled barvy je odlišný při různých světelných podmínkách a při zhoršeném osvětlení jej ovlivňují některé jevy, které jsou uvedeny níže. Změny ve vzhledu barvy jsou pro znázornění uvedeny na obrázku 17, kde je na bílém podkladu 24 barevných vzorků. Pokud se na tento papír podíváme při 200, 20, 2 a 0,2 luxech, můžeme vidět, k jakým změnám zde dochází. Při 200 luxech lze vidět plnou škálu barev. Při 20 luxech se bílé pozadí zda být utlumenější a červená, oranžová a purpurová se zdá být více nasycená. Zelené odstíny se utlumily a žlutá není tak zářivá a přibližuje se spíše k okrové. Při osvětlení 2 luxy jasně žluté barvy nelze rozlišit od okrové. Modrá a zelená začíná vypadat stejně a tmavě fialová se zdá být černá. Při 0,2 luxech všechny barvy ztmavly. [31]



Obrázek 17: Vzhled barev, A-200lx, B-20lx, C=2lx, D=0,2lx [31]

### 3.4.1 Purkyňův jev

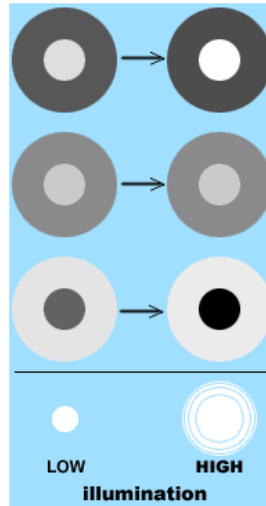
Při velmi nízkých intenzitách osvětlení se modrá a zelená jeví jasnější než červená. Z toho vyplývá, že při nízkých úrovních osvětlení nastává Purkyňův posun a dojde k posunu spektrální citlivosti lidského oka ke kratším vlnovým délkám (z 555 nm na 505 nm), jak lze vidět na obrázku 18. V šeru nebo ve tmě se modré předměty zdají jasnější než červené. Čípky citlivé na červenou se vypínají jako první a při ještě menším osvětlení se postupně vypnou i čípky citlivé na modrou a zelenou barvu a začínáme vidět černobíle. [27]



Obrázek 18: Purkyňův jev [32]

### 3.4.2 Stevensův efekt

Jak se intenzita světla zvyšuje, zvyšuje se také vnímání kontrastu. Tento kontrast zvyšuje zrakovou ostrost zejména jemných detailů. Obrázek 19 názorně ukazuje působení Stevensova efektu. Je zde vidět účinek intenzivnějšího osvětlení na kontrast. U první dvojice soustředných kruhů je patrné, že barva uprostřed je mnohem světlejší než ta, která ji obklopuje a při navýšení intenzity osvětlení se kontrast mezi těmito oblastmi ještě víc zvyšuje. Kruhy uprostřed mají podobný jas a se zvýšenou intenzitou světla se kontrast nemění. Poslední soustředné kruhy znázorňují případ, kdy je cílová barva tmavší než ta, která ji obklopuje a po zvýšení osvětlení se ještě více zvyšuje kontrast mezi těmito barvami. [31]



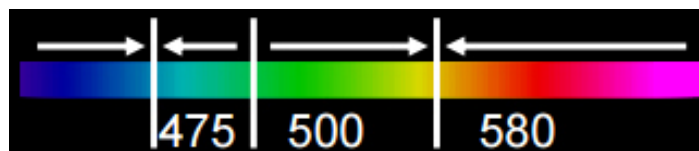
*Obrázek 19: Stevensův efekt [31]*

### 3.4.3 Huntův efekt

Pokud zvyšujeme intenzitu světla, vnímání barevnosti či sytosti se také zvyšuje. Huntův efekt také říká, že když budeme porovnávat dva vzorky, první o nižší čistotě odstínu a druhý o vyšší čistotě odstínu, můžou se tyto vzorky jevit jako stejné, pokud je intenzita osvětlení vzorku s nižší čistotou vyšší. Jednoduše řečeno, se zvyšujícím se osvětlením se zvyšuje barevná vydatnost. [31, 33]

### 3.4.4 Bezold-Brückeho efekt

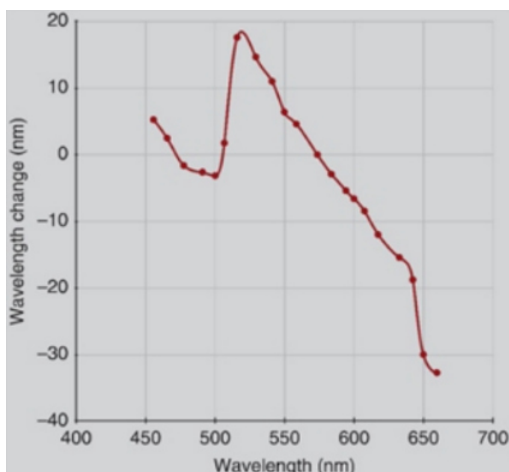
Tento jev nám říká, že pokud se zvyšuje intenzita světla, vnímání odstínů vlnových délek se také mění. Na obrázku 20 je znázorněn posun vlnových délek odstínů, pokud je intenzita osvětlení snížena desetinásobně. S rostoucí intenzitou světla se vlnové délky pod 500 nm posunují více směrem k modré a vlnové délky nad 500 nm se posunují více ke žluté. Bezold-Brückeho efekt vlastně říká, že u monochromatického stimulu nezůstává odstín konstantní, ale závisí na osvětlení. [31, 33, 34]



*Obrázek 20: Posun vlnových délek [31]*



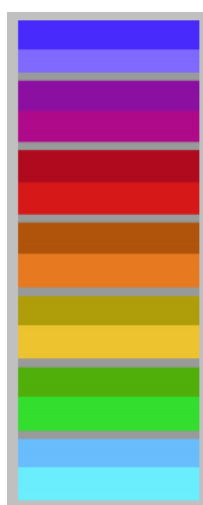
Například aby byl shodný odstín barvy o vlnové délce 650 nm, je třeba při desetinasobném snížení osvětlení využít světlo o vlnové délce 620 nm, což je posun 30 nm. Celkový posun vlnových délek způsobený tímto efektem napříč spektrem je zobrazen na obrázku 21. [33]



**Obrázek 21:** Bezold-Brückeho efekt [33]

### 3.4.5 Abneyho efekt

Tento jev popisuje, jak se mění odstín s kolorimetrickou čistotou. Jedná se o posun odstínu, který vnímáme, pokud k monochromatickému světlu přidáme bílé světlo. [33] Na obrázku 22 je vidět, jak na nás vizuálně Abneyho efekt působí a zobrazuje změnu barevného odstínu po přidání bílého světla. Na obrázku jsou uvedeny dva odstíny barvy, jako druhý je vždy uveden odstín po přidání bílého světla.

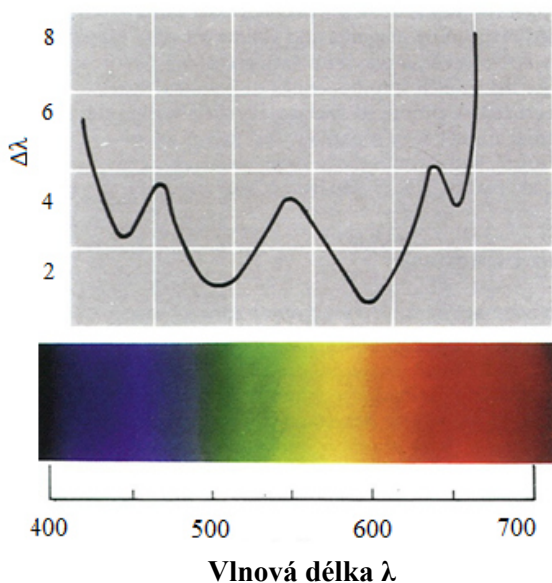


**Obrázek 22:** Abneyho efekt [33]

### 3.5 Citlivost na změnu vlnové délky

Naše schopnost vnímat změnu v odstínu je variabilní v závislosti na vlnové délce. Odstín je definován nejmenší vlnovou délkou světla s nejmenším rozdílem vlnové délky, který lze rozlišit lidským okem. Pro modré a červené světlo je vyžadována větší změna vlnové délky pro detekci změny odstínu, zatímco pro žlutooranžovou je dostatečná malá změna ve vlnové délce, abychom rozeznali dva odlišné odstíny. U lidí s normálním barevným viděním je citlivost na rozdíl v odstínu pro většinu spektra vysoká a lze rozeznat rozdíl ve vlnové délce menší než asi 2 nm. [35, 36]

Citlivost na změnu vlnové délky je zobrazena na obrázku 23, kde křivka znázorňuje závislost vlnové délky na nejmenším pozorovaném odstínu (vyjádřený jako rozdíl vlnové délky  $\Delta\lambda$ ). [35, 36] Jak můžeme vidět, křivka prochází dvěma minimy, a to přibližně u 490 nm (zelená) a 590 nm (oranžová). V tomto bodě je možné zaznamenat rozdíl až 1 nm. Při 550 nm (žlutozelená) se pohybuje změna vlnové délky kolem 4 nm, při 460 nm (modrá) se  $\Delta\lambda$  blíží 5 nm a největší hodnotu  $\Delta\lambda$  nalezneme u červené barvy (650 nm). [37]



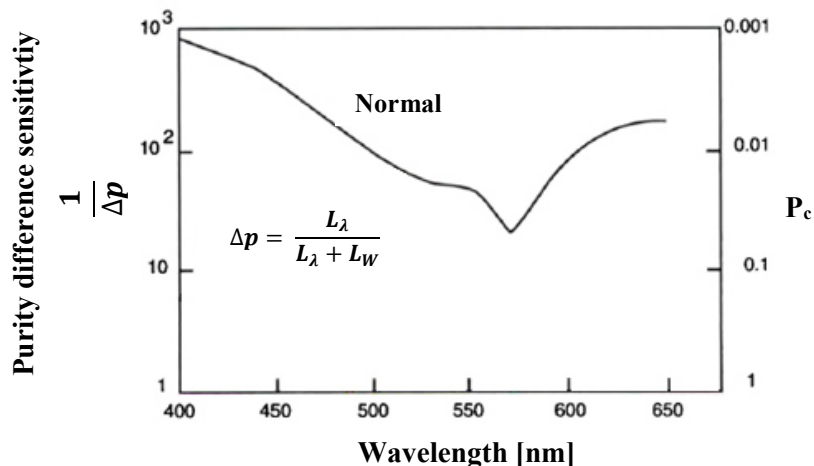
Obrázek 23: Křivka citlivosti na změnu vlnové délky [38]

### 3.6 Citlivost na změnu kolorimetrické čistoty

Ke zjištění nejmenší pozorovatelné změny kolorimetrické čistoty se používá index saturace spektra. Kolorimetrická čistota ( $P_c$ ) je poměr jasu monochromatického světla ( $L_\lambda$ ) k jasu směsi monochromatického a bílého světla ( $L_\lambda + L_{\text{white}}$ ). Abychom získali prahové hodnoty pro změnu kolorimetrické čistoty, můžeme k bílému bodovému zdroji přidávat

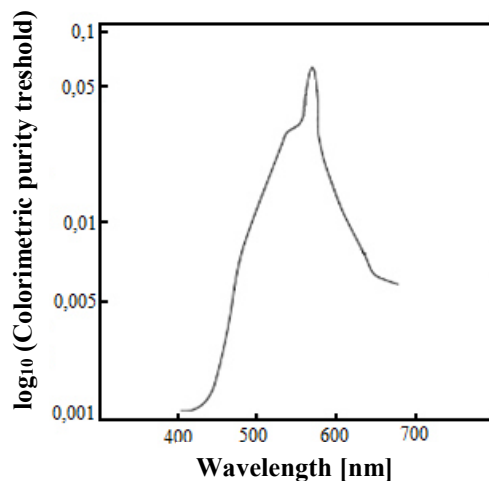
monochromatické světlo, dokud se tento podnět nebude lišit od bílého světla nebo přidávat bílé světlo k monochromatickému.

Pokud je bílé světlo přidáváno k monochromatickému, tak u jedinců s normálním barvocitem je nejmenší rozpoznatelná hodnota přibližně u 580 nm, což odpovídá žlutooranžové části spektra. Od 580 nm směrem k modré části spektra a směrem od 580 nm k červené části spektra se hodnoty potřebné k rozlišení bílého světla od směsi bílého spektra a monochromatického spektra zvyšují (obrázek 24). [39, 40]



**Obrázek 24:** Křivka citlivosti vyjadřující kolorimetrické čistoty [39]

Nutno zmínit, že pokud je k bílému světlu přidáváno světlo monochromatické, dojdeme k odlišným hodnotám. Obrázek 25 ukazuje, že žluté světlo má malou sílu saturace a modrá a červená mají velkou sílu saturace. Pokud tedy budeme k bílému světlu přidávat monochromatické světlo a budeme hledat prahovou hodnotu, kdy bude zřejmé, že se nejedná o bílou barvu, je nutné v případě žluté dodat více žlutého světla, aby se zdál bílý stimul barevný, než u modrého a červeného světla. [40]



**Obrázek 25:** Křivka citlivosti pro změnu kolorimetrické čistoty 2 [40]

## 4 Testování barvocitu

Existuje mnoho vyšetřovacích metod pro zjištění poruch barevného vidění, které se řadí do čtyř kategorií podle způsobu provedení a vyhodnocení. Podle účelu se dělí do tří kategorií. Dělíme je na testy pro zjištění vrozeného a získaného barvocitu, testy které pomáhají určit druh a míru poškození barvocitu a testy kterými se stanovuje význam poruchy barvocitu vzhledem k zaměstnání. [39, 41]

### 4.1 Rozlišovací testy

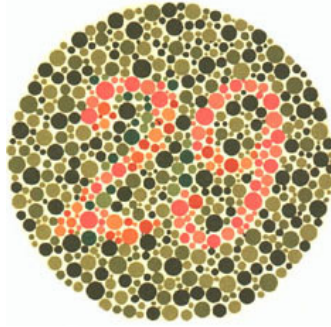
#### 4.1.1 Pseudoizochromatické (PIC)

Mezi používané tabulky se řadí pseudoizochromatické testy. Pro tyto testy je typické, že symboly (písmena, čísla) jedné barvy jsou umístěny na pozadí jiné barvy, takže symbol a pozadí je pro osoby s poruchou barvocitu stejně barevný. Symboly se odlišují barvou, ale ne jasem. [26] Pseudoizochromatické tabulky jsou navrženy čtyřmi způsoby: [39, 41]

1. Transformační – Osoba s poruchou barvocitu čte jiný symbol než osoba bez poruchy barvocitu. [39]
2. Mizející – Osoba s poruchou barvocitu nečte symbol, osoba bez poruchy barvocitu čte. [39]
3. Testy se skrytými symboly – Osoby s normálním barvocitem nemůžou rozlišit symbol, ale osoby s poruchou barvocitu ano. [39]
4. Diagnostické testy – Symbol je izochromatický pro jeden druh poruchy barvocitu a pro osoby s ostatními poruchami a bez poruchy je snadno rozlišitelný. [39]

##### 4.1.1.1 Ishiharovy tabulky

Jedná se o nejčastěji používané tabulky ve třech variantách, po 16, 24, nebo 38 tabulkách. Tabulky umožňují rozpoznat protanopii a deuteranopii a totální poruchu barvocitu. V tabulkách jsou zobrazeny číslice, obrazce tvaru čtverce, trojúhelníku, nebo kolečka. Symboly a pozadí jsou tvořeny různě barevnými a různě velkými body. Ukázka tabulek je obrázku 26. [26, 39]



*Obrázek 26: Znak podle Ishihary [42]*

#### **4.1.1.2 AO - HRR (American Optical Hardy-Rand-Rittler Plates)**

Tento test, který je rozsáhlejší než Ishiharovy tabulky, se skládá ze dvou oddílů. První je určený pro screening a druhý pro diagnostiku a třídění červené a zelené vady. Strana se dělí na 4 části, ve kterých se nacházejí různé symboly (křížky, trojúhelníky, čtverce, kruhy). Na jedné stránce je vždy jeden, nebo dva symboly. V tomto testu je barva pozadí neutrálně šedá s tečkami různého jasů. V tabulkách se nachází šest mizejících desek, čtyři z nich slouží k rozpoznání červeno-zelené poruchy a 2 pro poruchu modrožlutou. Pokud znak není viděn správně, pokračuje se k tabulkám, které upřesňují poruchu barvocitu. (obrázek 27). [39]



*Obrázek 27: AO-HRR [43]*

#### **4.1.1.3 American Optical Company Plates**

Tento test je určen pro zjištění červené a zelené vady. Na patnácti deskách jsou zobrazeny jednociferné, nebo dvouciferné arabské číslice. Jedna deska je pouze demonstrační, 8 z nich je založeno na principu mizejících testů a 6 z nich na principu transformačních desek. V tomto testu je použito více typů písma, což může vysvětlovat poměrně více chyb než u Ishiharova testu. Pokud není správně zodpovězeno pět nebo více čísel, je test považovaný za nesplněný, i když je správně určeno jedno číslo ze dvou na jedné desce. [39]

#### **4.1.1.4 Dvorine**

Tento široce využívaný test slouží pro screeningové vyšetření červené a zelené poruchy a umožňuje tyto poruchy klasifikovat podle závažnosti do tří úrovní, podle počtu chyb. Tento test tvoří 23 desek. Jedna z nich je demonstrační, na 15 jsou arabské číslice a na 8 deskách jsou cesty, které jsou využívány negramotnými osobami a dětskými pacienty. Při špatném zodpovězení tří desek je test považován za nesplněný. V kolečku o průměru 2,54 cm se objevuje nejprve 8 saturovaných a 8 nesaturovaných pastelových barev. Slouží k posouzení závislosti barevné vady na rozpoznání a pojmenování barvy. [39]

#### **4.1.1.5 The tritan Plate (F-2)**

Test tvoří jedna deska navržená Farnsworthem pro diagnostiku poruchy v modro-žluté části spektra a může být použit i pro diagnostiku poruchy v červeno - žluté oblasti. Funguje na principu mizejících testů. Na fialovém pozadí jsou dva navzájem propletené čtverce s různou chromatičností. Jeden čtverec je fialovomodrý, který není viděn jedincem s poruchou barvocitu v červeno-zelené oblasti. Druhý čtverec je zeleno-žlutý a mají ho problém vidět osoby s poruchou barvocitu v oblasti modro-žluté. Osoby bez poruchy barvocitu vidí oba dva čtverce, ale zeleno-žlutý vidí výrazněji. [39]

#### **4.1.1.6 Standard Pseudoisochromatic Plates Part 1 a Part 2**

Skládá se ze dvou částí. První slouží ke screeningu červeno-zelené vady a druhá pro zjištění modro-žluté a červeno-zelené tyčinkové monochromazie. První část tvoří celkově 19 desek, 10 z nich slouží pro screening, 4 pouze pro demonstraci a 5 pro rozlišení protanopie a deuteranopie. V druhé části je 12 desek, 2 z nich jsou demonstrační a 10 je testovacích. [39]

## **4.2 Seřazovací testy**

Existuje několik seřazovacích testů, které vyžadují umístění vzorků do určitého pořadí na základě barevného odstínu, sytosti, jasu nebo seřadit vzorky na základě podobnosti. Seřazovací testy umožňují posoudit závažnost poruchy a diagnostikovat její typ. [39]

### **4.2.1 Farnsworth-Munsell 100-Hue Test (FM100)**

Výsledky tohoto testu se využívají k vyšetřování získaných poruch barevného vidění, pro posouzení kvality barevného vidění a k posouzení rozdílů mezi oběma očima. Test se

skládá z 85 černých plastových krytek, které jsou rozděleny do čtyř zásobníků a obsahují barvy z celého spektra (červené, zelené, žluté, modré). Tyto barvy se seřazují podle odstínů, sytost a jas barev zůstává zachovaný. [39] První a poslední krytka v každém boxu je pevná a ostatní jsou pohyblivé (obrázek 28). Cílem je seřadit krytky podle odstínů mezi nepohyblivými terči. [41] Pomocí čísel na zadní straně krytek se tento test vyhodnocuje a určuje se celkové chybné skóre testu, které závisí na věku. Do dvaceti let klesá a poté roste. Čím je vyšší, tím je porucha barvocitu horší. [39] FM100 je vytvořen na základě Munsellova systému barev. [41]



*Obrázek 28: FM 100 Hue Test [44]*

#### **4.2.2 Farnsworth-Munsell Dichotomous D-15 Test**

Tento test je zkrácenou verzí předchozího testu a slouží k hodnocení získaných poruch barvocitu. Je rychlejší a snazší pro testování poruch barevného vidění, jelikož obsahuje pouze jeden pevný terčik a 15 pohyblivých (obrázek 29). Jeho výhodou je zkrácení doby vyšetřování u FM 100 Hue testu. [39, 41]

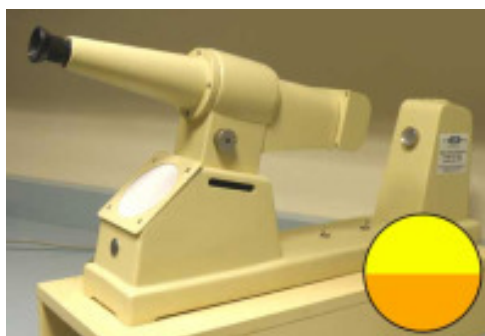


*Obrázek 29: FM D-15 Test [45]*

Mezi další seřazovací testy řadíme ještě Lanthonyho D-15 test, který vychází z Farnsworthova D-15 testu a dále Holmgrenovy bavlnky, které se používají jen zřídka. [41]

### 4.3 Míchací testy

Pro diagnostiku jsou nejpřesnější míchací testy, do kterých patří anomaloskop. Při testování se vychází z Rayleighovy rovnice, která říká: zelená + červená = žlutá. V okuláru je kruh rozdělený na dvě poloviny. V levém půlkruhu je stálá žlutá barva a ve druhém je směs zelené a červené. Poměr zelené a červené se dá měnit a vyšetřovaná osoba má za úkol nastavit druhý poměr zelené a červené tak, aby obě poloviny kruhu byly stejné. Vyšetřování je prováděno každým okem zvlášť. Mezi nejznámější míchací testy patří Nagelův anomaloskop, který je zobrazen na obrázku 30. [39]



*Obrázek 30: Nagelův anomaloskop [46]*

### 4.4 Pojmenovávací testy

Slouží k vyšetřování profesního barvocitu, například u strojvůdců, námořníků, pilotů, nebo řidičů, jelikož velmi reálně stimulují různé situace. [41] Avšak k tomuto účelu se mohou využít i předchozí uvedené testy. [39]

Mezi pojmenovávací testy řadíme například Farnsworth Lantern test, který byl vyvinut speciálně pro americké námořnictvo. V tomto testu byly použity barvy amerického námořnictva – červená, zelená, bílá. [41] V současné době ho nahrazuje přístroj Stereo Optical OPTEC 900, kde má vyšetřovaný za úkol pojmenovat kombinaci dvou barev během 2 sekund.



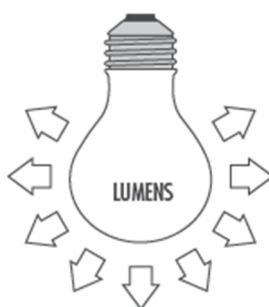
## 5 Fotometrcké veličiny

Fotometrie je část optiky zabývající se studiem a měřením světelné energie. Fotometrie kvantifikuje světelné veličiny z hlediska vnímání světla lidským okem. Zabývá se pouze elektromagnetickým zářením z viditelné části spektra. [47]

### 5.1 Světelný tok

Světelný tok zdroje  $\Phi$  (obrázek 31) popisuje šíření světla prostorem. [48] Odpovídá zářivému toku, pokud je brána v úvahu citlivost lidského oka na jednotlivá světla barevného spektra. Světelný tok vyjadřuje intenzitu zřakového vjemu oka, který je vyvolán energií záření, jež projde za jednotku času určitou plochou v prostoru, ve kterém se světlo šíří.

Jednotkou je lumen, značka lm. [49] Lumen definujeme jako světelný tok, který vyzáří zdroj o svítivosti 1 kandela do prostorového úhlu 1 steradián. [48]



*Obrázek 31: Světelný tok [50]*

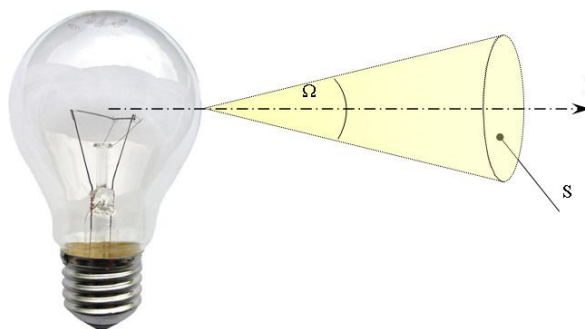
### 5.2 Svítivost

Svítivost  $I$  patří mezi základní jednotky soustavy SI. Svítivost bodového zdroje v daném směru lze definovat jako podíl světelného toku  $\Delta\Phi$ , který vyzáří zdroj v tomto směru do malého prostorového úhlu  $\Delta\Omega$  a velikosti tohoto prostorového úhlu, vypočítáme ji dle vzorce 1 (obrázek 32). [16, 49] Jednotkou je kandela, značka cd. [47] Svítivost vyjadřuje rozdělení světelného toku do různých směrů. [49] 1 kandela odpovídá přibližně svítivosti obyčejné svíčky. [48]

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega} \quad (1)$$

Svítivost můžeme vyjádřit i jako vektory, které vychází ze zdroje světla. Velikost těchto vektorů v daném směru odpovídá svítivosti. Koncové body vektorů tvoří plochu

svítivosti a pro praktické účely stačí znát pouze řez rovinou, která prochází světelným zdrojem. Tomuto řezu se říká čára svítivosti (diagram svítivosti). Takto se dá popsat vyzařování světla světelných zdrojů do různých směrů, protože různé světelné zdroje nesvíjí do různých úhlů stejně. U zdrojů je proto nutné znát diagram svítivosti, který vyjadřuje, kolik světelného toku zdroj vyzáří do určitého směru. Můžeme říci, že svítivost udává hustotu paprsků, která je závislá na směru a nemění se změnou vzdálenosti od světelného zdroje. [40]



**Obrázek 32:** Svítivost [51]

### 5.3 Osvětlení

Osvětlení  $E$  nebo také intenzita osvětlení vyjadřuje dopad světelného toku  $\phi$  na osvětlovanou plochu  $S$  a vypočítá se podle vzorce 2. [16] Je to podíl světelného toku a plochy, na kterou světelný tok dopadá. Jednotkou je lux, značka lx. Plocha má osvětlení 1 lux, pokud na plochu  $1 \text{ m}^2$  dopadá rovnoměrně rozložený světelný tok 1 lumen, [52] nebo zdroj o svítivosti 1 cd při kolmém dopadu světla na ploše, která je vzdálená 1 m od zdroje (obrázek 33).

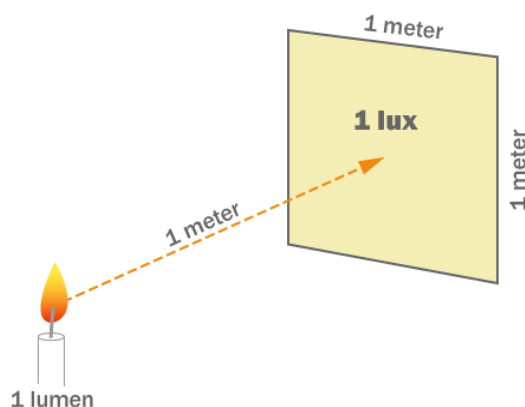
Jedná se o fotometrickou veličinu, která je závislá na vzdálenosti osvětlené plochy od zdroje světla. S rostoucí vzdáleností se zmenšuje a závisí také na úhlu  $\alpha$ , pod kterým světlo na plochu dopadá. Plocha, na kterou dopadají paprsky kolmo, je osvětlena nejlépe, jsou-li paprsky rovnoběžné, osvětlení je potom nulové. [49]

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad (2)$$

Osvětlení  $E$ , které způsobí bodový zdroj o svítivosti  $I$  ve vzdálenosti  $l$  a kde  $\alpha$  určuje úhel, který svírá normála v bodě osvětlené plochy se spojnicí zdroje a osvětlovaného místa lze určit vztahem 3. [16, 49]

$$E = \frac{I \cdot \cos \alpha}{l^2} \quad (3)$$

Osvětlení se měří luxmetrem a dostatečné hodnoty osvětlení patří k základním požadavkům hygieny práce. Hodnoty osvětlení jsou stanoveny normami. [49]



**Obrázek 33:** Osvětlení [53]

## 5.4 Jas

Jas  $L$  je fotometrická veličina definovaná pro plošný zdroj. V daném bodě a v daném směru vyjadřuje podíl svítivosti plošného zdroje a průmětu tohoto plošného elementu do roviny, která je k danému směru kolmá. Jas vyjadřuje vzorec 4, [52, 16]

$$L = \frac{dI}{dS \cdot \cos \alpha} \quad (4)$$

kde  $I$  je svítivost,  $S$  je velikost plochy a  $\alpha$  je úhel mezi normálou plochy a daným směrem.

Jednotkou jasu je  $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ , tato jednotka je definována jako jas části povrchu plošného zdroje, který má svítivost 1 kandela, jehož průmět do roviny kolmé ke směru pozorování je  $1 \text{ m}^2$ . [52]

Můžeme říci, že jas je síla světla, které se odráží od plošného předmětu nebo je vyzářené plochým zdrojem světla, např. monitoru a udává svítivost tohoto zdroje s plochou o obsahu  $1 \text{ m}^2$ . Zajímá nás tedy hustota paprsků, což je svítivost nikoliv počet světelných paprsků (světelný tok). [49]

## 5.5 Světlení

Druhou veličinou, která je definována pro plošný zdroj světla je světlení  $M$ . [54] Světlení je definováno jako podíl světelného toku  $\Phi$ , který je vyslán plochou zdroje do poloprostoru a obsahu  $S$  této plochy (vzorec 5). Jednotku je  $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$ . [47]

$$M = \frac{d\Phi}{dS} \quad (5)$$

## 5.6 Měření fotometrických veličin

Měřením fotometrických veličin jsou zjišťovány a ověřovány světelně technické parametry, v různých prostorách, u přístrojů a nejčastěji u světelných zdrojů a svítidel. Metody měření se rozdělují na subjektivní neboli vizuální metody, kde je jako indikátor využíván zrak a objektivní neboli fyzikální. Kvůli tomu, aby měření bylo hlavně snadné a rychlé, se používají spíše fyzikální metody. [56]

### 5.6.1 Přesnost měření

Přesnost udávají přístroje, kterými fotometrické veličiny měříme. Pro přesnost 14-20 % slouží přístroje k orientačnímu měření, pro přesnost 8-14 % slouží běžné provozní přístroje a pro přesnost okolo 8 % slouží přesné laboratorní přístroje. Pro přesná měření je nutné využít etalony, což jsou speciální žárovky, které se musí pravidelně ověřovat. Všechny zásady pro měření udávají normy ČSN. [54]

### 5.6.2 Podmínky měření

Mezi základní podmínky měření řadíme to, že měření nesmí být ovlivňováno rozptýleným světlem. Dále optické části přístrojů musíme udržet v čistotě. Další podmínkou je dostatečná vzdálenost přístroje od zdroje, což znamená, že musí být nejméně 10x větší, než je velikost zdroje. [54]

Je dobré při měření dodržovat několik zásad. Například nové světelné zdroje jako zářivky nebo výbojky, musí před samotným měřením svítit alespoň 100 hodin a nové žárovky alespoň 6 hodin. Je to z toho důvodu, že vlivem stárnutí světelného zdroje dochází k poklesu světelného toku. [56] Před měřením je také důležité, aby byl zdroj ve stabilním stavu. [54] U výbojek je to 20 minut, u zářivek může stabilizace trvat déle a fotočlánky je

třeba osvětit 5-15 minut podobným osvětlením. Poté je třeba uvést, při jaké teplotě byl světelný tok měřen, protože zejména u zářivek se světelný tok mění s okolní teplotou. Světelný tok se také mění s napětím. [56]

### 5.6.3 Luxmetr

Luxmetr se používá pro měření osvětlení a byl také použit při experimentu v praktické části této práce. Podle mezinárodních norem jsou luxmetry rozděleny do 4 tříd: [54]

L = laboratorní přístroje, s celkovou chybou asi  $\pm 3\%$

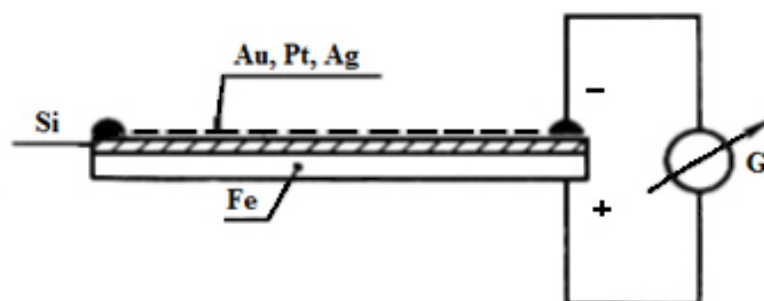
A = přesné přístroje, s celkovou chybou  $\pm 5\%$

B = provozní přístroje, s celkovou chybou  $\pm 10\%$

C = orientační přístroje, s celkovou chybou  $\pm 20\%$

Princip luxmetru spočívá ve vrstvě polovodiče, dříve selenu, dnes křemíku, která je nanášena na základní desce (železo, hliník). Na polovodičové vrstvě je průsvitná vodivá vrstva z platiny, zlata, nebo stříbra a na obvodu se nachází sběrný kroužek. Po ozáření se mezi polovodičovou a průsvitnou vodivou vrstvou vytvoří rozdíl potenciálů a sběrným kroužkem začne procházet proud. Proud se měří galvanoměrem. Detektor, kterým je obvykle křemíkový fotočlánek, je citlivý na světlo a je často připojen k přístroji kabelem. Schéma luxmetru je na obrázku 34. [54]

Aby bylo měření přesné, křivka spektrální citlivosti luxmetru musí být shodná se spektrální citlivostí lidského oka, jinak vzniká chyba v řádu 5 až 50 %. [54] Řešením může být použití speciálních filtrů, které slouží pro úpravu spektrální citlivosti do požadovaného rozsahu. [55]



**Obrázek 34:** Schéma luxmetru [56]

#### 5.6.4 Kulový integrátor

Kulový integrátor slouží k měření světelného toku. Je to dutá koule, ve které je světelný zdroj (umístěn přibližně v jejím středu), korekční světelný zdroj s clonou, která zabraňuje přímému dopadu světla ze zdroje a fotočlánek. Vnitřní povrch je natřen bílou barvou s vysokou odrazivostí. Měření probíhá srovnávací metodou. Nejprve se do koule umístí referenční zdroj a následně se změří jeho fotoproud. Pak se vymění za měřený zdroj a z hodnot měření obou zdrojů se vypočítá světelný tok měřeného zdroje. Z těchto hodnot lze také získat energetickou a světelnou účinnost svítidla. [55]

#### 5.6.5 Jasoměr

Slouží k měření jasu s přesností od 8 do 15 %. [57] Jako detektor světla slouží fotočlánek s optickým systémem, který vymezuje prostorový úhel  $\Omega$ . Jasoměry mohou být bodové (pro malé plochy) a integrační (pro větší plochy). [55]

Princip měření je založen na dopadu paprsku z měřené plochy na fotonku. Dopadající paprsky jsou vymezeny prostorovým úhlem  $\Omega$ . Fotočlánek změří osvětlenost a na základě toho se vypočítá hodnota jasu. Zabíraná plocha musí být stejná jako měřená plocha a podle velikosti plochy, kterou měříme, je použita clona o daném průměru. [57]

#### 5.6.6 Goniofotometr

Goniofotometr slouží k měření rozložení svítivosti zdroje. Můžeme jím posoudit vyzářovací úhel. Měření se provádí nepřímo a to pomocí měření osvětlenosti, která je poté přepočítaná na svítivost. Existují tři možnosti konstrukce goniofotometru.

- 1) Detektor, nejčastěji fotočlánek je umístěn na lavici, která se otáčí kolem zdroje světla v konstantní vzdálenosti
- 2) Zdroj světla je v pohybu a článek je umístěn pevně. Tento způsob měření se nedá použít, když je rozložení svítivosti závislé na poloze zdroje světla
- 3) Třetí možností je použít pevné umístění detektoru i zdroje světla a doplnit soustavu o otočné zrcadlo. Výhodou je, že tuto metodu lze použít pro všechny zdroje záření, nevýhodou je náročná konstrukce. [55]

## 6 Hygiena osvětlení

Kvalita osvětlení při práci významně působí na náš zrak, a tím ovlivňuje produktivitu práce a také bezpečnost při výkonu práce. [16] Jelikož je zrak nejdůležitějším orgánem pro většinu povolání, tak je třeba vhodně zvolit intenzitu osvětlení pracoviště podle druhu vykonávané práce. [16, 58]

Osvětlení na pracovišti se řídí základními pravidly. Světlo nesmí oslňovat a v zorném poli nesmí být předmět s velkou svítivostí. Do místnosti by mělo denní světlo přicházet zepředu a zleva, aby nedošlo ke vzniku stínu při práci pravou rukou. [59] Umělé světlo může nahradit denní světlo nebo doplňovat denní světlo. [16]

Pokud je osvětlení zvoleno nevhodně, může vést k předčasné únavě zraku. Zraková únava se nejčastěji projevuje pálením očí, bolestí, nebo pocitem horka v očích. U některých pozorovatelů se mohou objevovat deformace pozorovaných předmětů, například písmen v textu, při nadměrné únavě může dojít až k diplopii. Zrakovou únavu může také provázet bolest hlavy nebo zarudlé spojivky. Pro volbě optimálního osvětlení bereme v úvahu intenzitu a rovnoměrnost osvětlení, kontrast, rozložení jasů, barvu světla předmětu a také oslnění. [16]

### 6.1 Oslnění

Oslnění vzniká, pokud sítnici vystavíme značně většímu jasů, než na který je adaptována. Příčinou oslnění je přílišný jas v porovnání s adaptačním jasnem, nebo nevhodné rozložení jasů v zorném poli. Oslnění lze rozdělit na rušivé, omezující a oslepující. Rušivé oslnění si pozorovatel často neuvědomí, ale narušuje zrakovou pohodu. Při omezujícím oslnění pozorovatel těžko rozeznává detaily a může způsobit pokles pracovního výkonu a zrakovou únavu. Oslepující oslnění znemožňuje vidět na delší dobu, než je jeho délka trvání. [16]

Druhou možností jak rozdělit oslnění, je podle příčiny. Rozlišujeme absolutní oslnění, které vzniká, pokud je v zorném poli kritický jas a zrak není schopen se přizpůsobit. U denního světla je hranice pro absolutní oslnění  $200\ 000\ \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ . [16]

Náhlou změnou jasů v zorném poli nastává přechodové oslnění. Zraková pohoda je porušena při překročení změny jasů zorného pole v poměru 1:10 a k oslnění dojde při změně jasů v poměru 1:100, ale tento druh oslnění postupně vymizí vlivem adaptace oka. [16]

Pokud jsou v zorném poli plochy o rozdílném jasu, jedná se o oslnění kontrastem. Pro poměr jasů platí stejný poměr jako u přechodového osvětlení ale s rozdílem, že se mu oko nepřizpůsobí adaptací. [16]

Závoje oslnění způsobuje jasnější prostředí, prostředí kalné, nebo s jemnou strukturou, například znečištěné sklo, záclona, mlha. Toto oslnění vzniká například v autě za mlhavého počasí, nebo pokud se podíváme do místnosti oknem se záclonou, nebo pokud se obloha odráží od okna. [16]

Podle toho, která část sítnice je oslněna, dále rozeznáváme osově oslnění, ke kterému dochází, pokud se oslňující zdroj zobrazuje do žluté skvrny. Okrajové oslnění, neboli periferní, vzniká, pokud se obraz oslňujícího zdroje vytvoří mimo žlutou skvrnu. [16]

Důležité je znát také dobu trvání osvětlení, protože zrak se zotaví snadno po krátkodobém oslnění, ale při dlouhodobém, ale slabém oslnění se může dostavit zraková únava. [16]

## 6.2 Veličiny významné pro hygienickou praxi

### 6.2.1 Relativní osvětlenost

Relativní osvětlenost byla zavedena, protože intenzita denního osvětlení není konstantní a stále se mění. Relativní osvětlenost je udávána pomocí činitele denní osvětlenosti, která se značí písmenem  $D$  a vypočítá podle vztahu: [58]

$$D = \frac{E_{vnit}}{E_H} \cdot 100 \quad (6)$$

kde  $E_{vnit}$  udává vnitřní osvětlenost dané roviny přímým i odraženým oblohovým světlem v luxech a  $E_H$  je srovnávací osvětlenost venkovní nezastíněné vodorovné roviny za známého jasů oblohy. Musíme však vyloučit přímé sluneční světlo. Činitel denní osvětlenosti se skládá ze tří složek, z oblohové, vnější a vnitřní odražené složky a je udáván v procentech. [58]

### 6.2.2 Absolutní kontrast jasů

Absolutní kontrast jasů  $K_A$  ( $K_A = |L_1 - L_2|$ ) udává rozdíl dvou sousedících jasů a je významnou veličinou pro hygienickou praxi. Pokud ale posuzujeme jasové poměry, použijeme relativní kontrast jasů  $K$ , který se vypočítá podle vzorce 7 [60]



$$K = \frac{L_p - L_{BO}}{L_A} \quad (7)$$

kde  $L_p$  je jas pozorovaného předmětu,  $L_{BO}$  definuje jas bezprostředního okolí a  $L_A$  je jas vztažený k okolí, na který je zrak adaptovaný. [60]

### 6.3 Denní a umělé osvětlení

U denního osvětlení se musí stanovit množství denního světla pomocí poměrných hodnot osvětlenosti, k tomu slouží činitel denní osvětlenosti  $D$  v procentech. Činitel se stanovuje proto, jelikož během dne i v průběhu roku dochází k proměnlivosti denního osvětlení. Nároky na denní osvětlení pracoviště rostou s délkou pobytu na pracovišti a pracovní prostor musí být osvětlován hygienickým minimem. Průměrný činitel denní osvětlenosti odpovídá 3 % a minimální činitel denní osvětlenosti 1,5 %. Při vykonávání určité činnosti, se však tyto hodnoty mohou zvyšovat a doporučené rozmezí činitele denního osvětlení je podle zrakové náročnosti uvedeno v předpisech s odkazem na normy. [58]

Umělé osvětlení je stanoveno normovými hodnotami udržované osvětlenosti a rovnoměrnosti v osvětlovaném prostoru. Osvětlenost prostor s trvalým pobytem osob by neměla být menší jak 200 lx a doporučená rovnoměrnost osvětlení by měla být v poměru minimálně 1:3. Pro konkrétní činnosti se může uvedená hodnota podle zrakové zátěže zvyšovat. [58]

U sdruženého osvětlení, kdy je současně použito osvětlení denní a umělé, musí být zachován podíl denního osvětlení. Ve všech případech však musí být průměrná hodnota činitele denní osvětlenosti nejméně 1 % a minimální hodnota činitele denní osvětlenosti 0,5 %. [58]

### 6.4 Osvětlování vnitřních prostorů

Vhodné osvětlení je důležité, aby bylo možné vykonávat různé zrakové úkoly přesně a účinně. To umožňuje denní osvětlení, umělé osvětlení, nebo kombinace denního a umělého osvětlení. Požadavky na osvětlení se formulují na základě zrakového vnímání, různých experimentů a šetření a také pomocí technických a ekonomických možností. [60]

Zrakový výkon a zraková pohoda charakterizují úroveň vidění a jsou to pojmy důležité pro odvození světelně-technických parametrů. Zrakový výkon je určen fyziologickými vlastnostmi našeho zraku a zraková pohoda zohledňuje i psychické aspekty.

Volba vhodného prostředí vede k vytvoření zrakové pohody, která je důležitá pro potřeby člověka při práci a při odpočinku a má pozitivní vliv na kvalitu práce a zdravotní stav lidského organismu. [61]

### 6.4.1 Osvětlenost pracoviště

Intenzita osvětlení pracoviště se řídí druhem práce a závisí na ní také požadavky na denní osvětlení. Požadavky na osvětlení pracoviště jsou určovány pomocí zrakové obtížnosti, kterou zjistíme pomocí poměrné pozorovací vzdálenosti, vyjádřené vzorcem: [62]

$$PPV = \frac{N}{n} \quad (8)$$

kde N je pozorovací vzdálenost kritického detailu a n je skutečná velikost kritického detailu. Požadavky se dělí do několika tříd a jsou uvedeny v tabulce 1. [16, 58, 62]

*Tabulka 1: Požadavky na pracoviště a prostory a odpovídající osvětlení [16, 58, 62]*

Třída	Požadavky	Příklady	PPV	Umělé osvětlení celkové (lx)	Denní osvětlení	
					D <sub>min</sub> (%)	D <sub>prům</sub> (%)
I	Mimořádné	Hodinářské práce, operační sál	3300 a více	5000	3,5	10
II	Velmi vysoké	Jemné práce, rýsovný, speciální laboratoře	16700 - 3300	2000 - 5000	2,5	7,0
III	Vysoké	Pletení, tkani	1000 - 1670	600 - 2000	2,0	6,0
IV	Středně vysoké	Strojní obrábění, čtení, psaní, laboratorní práce	500 - 1000	200 - 600	1,5	5,0
V	Nízké	Obchod	100 - 500	100 - 200	1,0	3,0
VI	Velmi nízké	Mytí, převlékání, udržování čistoty	Méně než 100	25 - 100	0,5	2,0
VII	Orientační	Chůze			0,2	1,0

## 6.5 Hygienické normy kladené na osvětlení na pracovišti

Normy vychází z odkazů v závazných předpisech. [63] Právní požadavky na osvětlení a české technické normy při různých činnostech v různých zařízeních vychází ze zákonů a nařízení vlády, nejdůležitější vyhlášky a zákony jsou uvedeny níže. [62, 63, 64]

- Zákon o ochraně veřejného zdraví 258/2000 Sb.
- Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. *kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci*, (zde jsou uvedeny bližší hygienické požadavky na osvětlení pracoviště a je vymezena zraková zátěž)
- Vyhláška č. 410/2005 Sb. *o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých*
- Zákon č. 262/2006 Sb., *zákoník práce, ve znění pozdějších předpisů*
- Zákon č. 309/2006 Sb., *o zajištění dalších podmínek bezpečnosti a ochrany zdraví při práci, ve znění zákona č. 362/2007 Sb.*
- Zákon č. 40/1964, *občanský zákoník, ve znění pozdějších předpisů*
- Zařízení vlády č. 101/2005 Sb., *o podrobnějších požadavcích na pracoviště a pracovní prostředí*

Seznam základních ČSN norem souvisejících s osvětlením je uveden v tabulce 8 v příloze I.

## 7 Praktická část

Předmětem praktické části bakalářské práce bylo navrhnout a provést experiment, zaměřený na vnímání barev při navození různého stupně zhoršených světelných podmínek. Za tímto účelem byly na základě uvedené literatury vytvořeny testovací tabulky a formulovány tři hypotézy.

### 7.1 Výběr metody a hypotézy

Cílem tohoto výzkumu je zjistit vnímání barev při zhoršených světelných podmínkách. Práce byla zaměřena na to, jaký rozdíl ve změně jasu u šesti barev je možné zaznamenat při různě zhoršených světelných podmínkách. Na základě literatury popsané v podkapitole 3.4 (Vzhled barvy), můžeme předpokládat, že vliv na výsledky testování budou mít jevy popsané v této kapitole, například Stevensův, Huntův a Purkyňův jev. Dále můžeme předpokládat citlivost pro jednotlivé barvy na základě literatury popsané v podkapitole 3.5 (Citlivost na změnu vlnové délky) a 3.6 (Citlivost na změnu kolorimetrické čistoty).

Na základě Huntova a Stevensova jevu, byla zvolena první hypotéza, že se zvyšujícím se osvětlením se zvýší také citlivost na změnu jasu pro všechny barvy, které byly vybrány pro realizaci testovacích tabulek.

Další hypotézou je, že nejhůře bude rozeznatelná změna jasu při nejhorším osvětlení u červené barvy z důvodu Purkyňova jevu. Díky tomuto jevu se spektrální citlivost posune ke kratším vlnovým délkám

Poslední hypotézou testování je, že nejlépe viděný rozdíl bude ve žlutooranžovém spektru, a to na základě poznatků z literatury uvedené v kapitole 3.5 a 3.6, kde najdeme grafy závislosti citlivosti na změnu odstínu a změnu kolorimetrické čistoty.

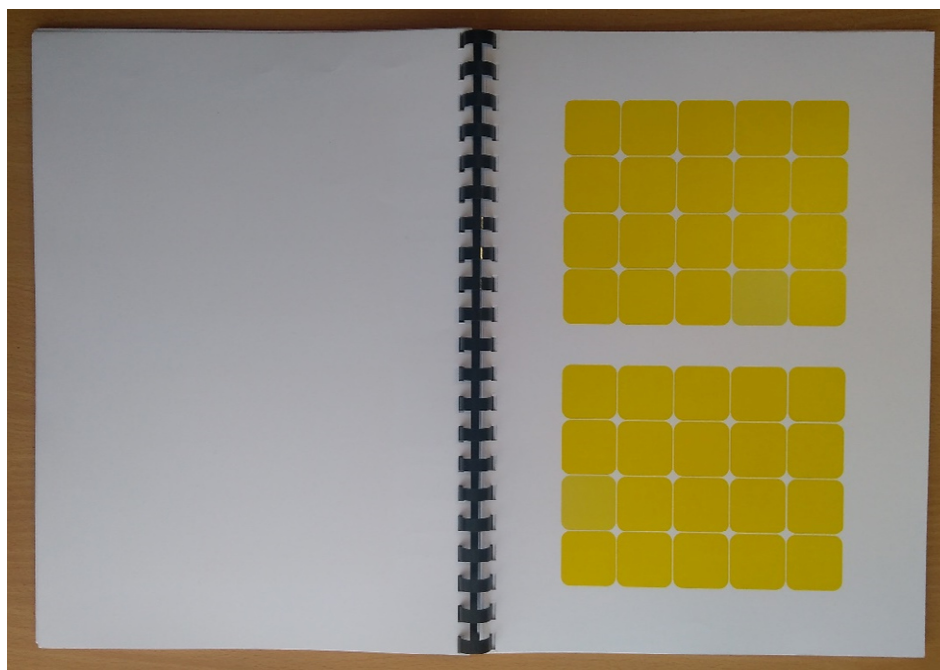
Kdybychom v praktické části použili bodový zdroj světla, výběr hypotézy by ovlivnila pouze křivka citlivosti na změnu kolorimetrické čistoty. Ale pokud bereme v úvahu, že máme k dispozici pouze tištěné testovací tabulky a ne bodový zdroj světla, tak do hypotéz zahrneme i citlivost na změnu odstínu. Testovací tabulky totiž také vytvořeny na principu přidávání bílé, a tudíž na zvyšování jasu – viz Abneyho efekt a změna odstínu. Tabulky budou podrobně popsány v následující kapitole.

## 7.2 Metodika práce

### 7.2.1 Testovací tabulky

Bakalářská práce se zabývá vnímáním barev při zhoršených světelných podmínkách a konkrétně je zaměřena na schopnost lidského oka, jakou změnu jasu v procentech je schopné rozeznat. Za tímto účelem byly navrženy testovací tabulky.

Testovací tabulky se skládají celkem z 24 listů, z toho na každé straně se nachází 2 sady testovacích čtverců, jak lze vidět na obrázku 35.



*Obrázek 35: Testovací tabulky*

Každá testovací sada se skládá z 20 čtverců o velikosti 2,75 x 2,75 cm určité barvy. Pro každou barvu je tento test vytvořený tak, že u jednoho z dvaceti čtverců je změněn jas. Jednotlivé sady čtverců jsou seřazeny od nejmenší změny jasu (10 %) po největší změny (45%) s krokem po 5 %. K testování byla zvolena červená, oranžová, žlutá, zelená, modrá a fialová barva, aby bylo obsáhnuto napříč celé spektrum.

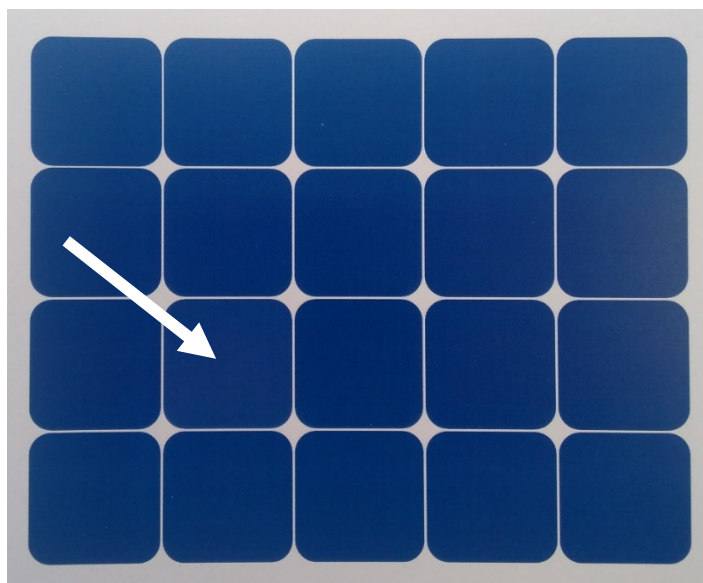
Testovací tabulky byly vytvořeny pomocí programu freewaru Barvy (v. 4.1) a pomocí softwaru Microsoft Word. Nejprve byl zvolen základní odstín pro všech 6 barev pomocí tří barevných složek systému RGB (červená, zelená, modrá). Když bylo dosaženo chtěného odstínu, v programu Barvy byl odstín barvy z RGB systému převeden do HLS (odstín, jas sytost), který umožňuje na stupnici L zvyšovat nebo snižovat jas. Jas byl u základního čtverce nastaven na polovině stupnice a pomocí této stupnice byla vždy vypočítána hodnota jasu, která odpovídala

10 %, 15 %, 20 % atd. Když byl na stupnici změněn jas, v programu Barvy byl odstín převeden do systému RGB, s odpovídajícími hodnotami velikostí složek R, G, B.

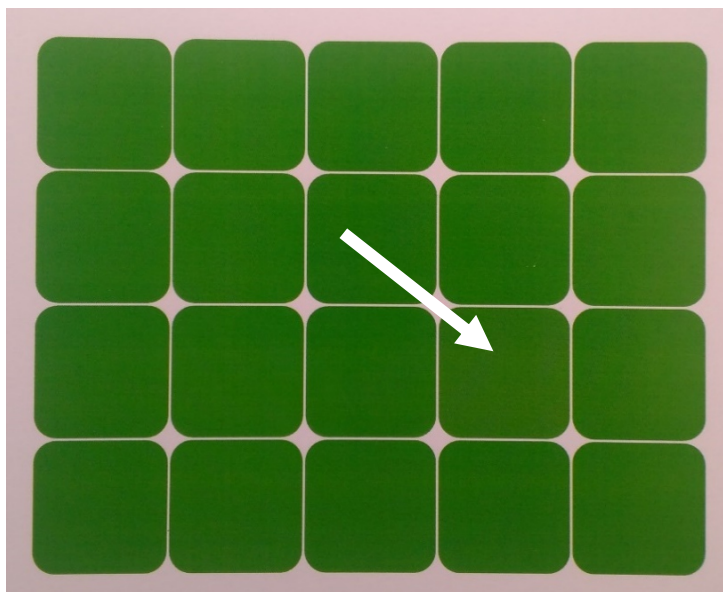
Po vytvoření všech barev už byl použit Microsoft word. Pomocí funkce vložení byl zvolen obrazec čtverce se zaoblenými rohy. Poté byla pomocí formátu obrazce zvolena výplň obrazce pro základní barvu devatenácti čtverců a pro barvu odlišného čtverce. K tomu sloužily hodnoty ze systému RGB, které byly získány z programu Barvy.

Ještě je nutné říci, že převod těchto tabulek, které byly vytvořeny v systému RGB do tištěné podoby, není totožný, jelikož model RGB slouží pouze pro počítačové zpracování. Při tisku si tiskárna převede hodnoty RGB do CMYKu a z toho důvodu dochází k mírnému zkreslení vzhledu barvy. Nicméně to nic nemění na tom, že rozdíly ve změně jasu zůstávají oproti čtverci o základní barvě konstantní.

Pro ilustraci vytvořeného testu jsou na obrázcích 36 a 37 uvedeny sady čtverců zelené a modré barvy se změnou jasu o 20 %. Šipkou je označen čtverec s příslušnou změnou jasu. Pro srovnání jsou ostatní barvy se čtvercem se změnou jasu o 20 % zobrazeny v příloze II.



**Obrázek 36:** Sada čtverců modré barvy, změna jasu o 20 %.



*Obrázek 37: Sada čtverců zelené barvy, změna jasu o 20 %.*

### **7.2.2 Navození světelných podmínek**

Testování probíhalo v prostorách fakulty biomedicínského inženýrství, konkrétně ve velkém sále C1. Tato místnost byla zvolena proto, že zde bylo umožněno zatažení rolet a navození zhoršených světelných podmínek v jakoukoliv denní dobu. Pomocí ovládacího panelu bylo možné nastavit různé osvětlení.

Ovládací panel umožňoval zapnout přední světla na 50 % a na 100 %, zářivky na 50 % a na 100 % a reflektory na 50 % a na 100 %. Díky tomuto nastavení a kombinacím všech druhů osvětlení bylo umožněno navodit různě zhoršené světelné podmínky. Osvětlení bylo měřeno a kontrolováno luxmetrem značky EXTECH LT40. Počet luxů nezávisí nejen na osvětlení, ale také na vzdálenosti od ovládacího panelu. Měření z tohoto důvodu neprobíhalo na stále stejném místě, ale za pomoci luxmetru byly zjištěny nejvhodnější pozice v sále pro určité světelné podmínky.

Pomocí měření luxmetrem a pomocí ovládacího panelu s osvětlením se podařilo zajistit světelné podmínky 0,1, 2, 7, 15, 25, 60, 120 a 400 luxů. Jak už je výše zmíněno, cílem bylo zjistit, při jaké hodnotě osvětlení jsou vnímány jednotlivé změny jasu v procentech.

### 7.2.3 Průběh měření

Před samotným testováním pomocí navrženého vlastního testu, proběhlo testování barvocitu pomocí tabulek k vyšetření barvocitu (nakladatelství AVENTINUM) na principu pseudoisochromasie. Toto testování probíhalo pouze z toho důvodu, aby bylo ověřeno, jestli proband nemá poruchu barvocitu. Toto ověření trvalo přibližně 5-10 minut, včetně instruktáže. Probandovi bylo vysvětleno, že v tabulkách může nalézt jeden až tři znaky (písmena, číslice) a na odpověď má přibližně 15 sekund. Tabulky byly umístěny ve vzdálenosti 70 cm.

Druhou částí testování bylo přizpůsobení probanda na zhoršené světelné podmínky. Tato adaptace na zhoršené podmínky probíhala pouze 20 minut, jelikož samotné měření bylo poměrně časově náročné (cca 40 minut).

Testováno bylo 50 osob, z toho 33 žen a 17 mužů. Věk testovaných osob se pohyboval v rozmezí 20 – 30 let. Všechny testované osoby jsou studenty FBMI.

Před samotným testováním a v průběhu adaptace na zhoršené světelné podmínky proběhla jednoduchá instruktáž probandů. Za tímto účelem byly pro představu vytvořeny vzorové testovací tabulky, kde byly odlišné barvy, než jsou barvy uvedené v testovacích tabulkách. Zde si probandi mohli prohlédnout, jak testovací tabulky budou vypadat a co je jejich principem. Proband byl také informován, že bude postupovat vždy od sady čtverců, kde je odlišný čtverec nejhůře odlišitelný. Pokud neuvidí žádnou změnu, přesune se na další sadu čtverců, kde by rozpoznání odlišného čtverce mělo být o něco jednodušší.

Jako takzvaná čtecí vzdálenost bylo zvoleno cca 40 cm. Testovaná osoba byla poučena o tom, že během testování není možné test různě naklánět nebo přemisťovat, aby bylo zachováno konstantní osvětlení. Proband byl také informován, že na nalezení odlišného čtverce má přibližně 15 sekund. Po uplynutí této doby se přesune na sadu čtverců, kde je odlišný čtverec lépe rozlišitelný, jelikož se jas zvýšil o dalších 5 %.

Testování začínalo vždy od nejhoršího osvětlení postupně po nejlepší. Prvním stanovištěm proto bylo místo s osvětlením 0,1 luxu. Od zhoršených světelných podmínek začínalo testování z toho důvodu, aby si probandi ve zhoršených světelných podmínkách nepamatovali výsledky a aby byla zachována věrohodnost testování.

Dosažené výsledky byly zaznamenávány do tabulek, které jsou uvedeny v příloze III. Do prázdného pole byla zaznamenávána poloha čtverce, který dotyčný označil a po testování byly odpovědi vyhodnoceny.



## 7.3 Výsledky a jejich zpracování

Výsledky experimentu byly zpracovány pomocí softwaru Microsoft Excel. Nejprve byly zaneseny hodnoty pro všechny barvy a pro všechna osvětlení do tabulek. Ukázka zpracování výsledků pro 0 luxů se nachází v tabulce 2. Ostatní tabulky pro všechna osvětlení se nacházejí v příloze IV.

**Tabulka 2:** Tabulka vnímaných změn jasu při 0 luxech – ženy (vlevo), muži (vpravo)

0 lx							0 lx						
Č	O	Ž	Z	M	F		Č	O	Ž	Z	M	F	
35	15	30	30	25	15		30	10	25	25	20	15	
35	15	35	35	30	20		30	15	25	30	25	15	
30	10	25	25	15	10		35	20	35	25	25	15	
35	10	30	30	30	15		30	15	25	25	15	10	
30	10	35	35	25	15		40	10	25	30	25	10	
30	15	35	25	30	10		30	10	25	25	20	10	
30	10	30	30	25	10		35	20	40	35	35	20	
30	15	20	15	20	15		30	10	30	30	25	15	
35	15	35	25	25	20		40	15	30	35	30	20	
30	10	25	30	20	15		40	15	30	25	20	10	
35	15	30	30	25	10		35	15	30	25	35	15	
40	15	30	25	10	15		25	20	30	25	20	10	
30	15	25	25	25	10		30	15	30	20	30	15	
30	20	30	25	30	10		30	10	25	20	20	10	
40	20	30	30	30	20		40	10	30	25	30	15	
35	15	30	25	30	15		30	10	30	25	20	15	
35	10	25	25	25	10		35	15	25	25	25	15	
40	20	40	30	40	20								
30	15	30	30	40	20								
35	15	25	25	25	10								
45	20	40	40	40	25								
40	15	35	40	40	20								
35	20	30	35	25	10								
35	15	30	20	25	15								
30	15	25	30	30	10								
30	10	25	35	20	15								
30	10	25	25	30	10								
40	15	30	30	20	20								
30	15	25	25	20	20								
40	10	40	25	30	15								
30	10	30	25	25	10								
40	10	40	25	30	15								
35	20	35	30	25	20								

V tabulce 3 níže jsou zaneseny hodnoty nejčastěji viděných změn v jasu. Při zanášení hodnot do tabulek byly zahrnuty nejčastější hodnoty správných odpovědí dohromady od mužů a žen. Hodnoty vnímané změny jasu jsou uvedeny v %.

Při osvětlení 0,1 lx je nejčastější hodnota vnímané změny jasu 30 % u žluté a červené barvy. Poté následuje zelená a modrá, kde byla nejčastější hodnota vnímané změny jasu 25 %. U fialové a oranžové barvy byla nejčastější viděná změna jasu 15 %.

Při osvětlení 1 lux došlo ke zlepšení vnímání všech barev, kromě červené, kde zůstávala nejčastější rozpoznatelná úroveň na hodnotě 30 %. U žluté došlo k poklesu z 30 na 25 %. U zelené a modré barvy došlo k poklesu z 25 na 20 %. Stejně tak poklesla i nejčastější rozpoznatelná úroveň u fialové a oranžové barvy o 5 % z 15 na 10 %.

Při zvýšení osvětlení na dva luxy došlo ke snížení vnímané změny jasu pouze u žluté barvy z 25 na 20 % a u červené barvy z 30 na 25 %. Všechny ostatní barvy byly vnímány stejně jako při předešlém osvětlení.

Pokud bylo použito intenzivnější osvětlení 7 luxů, došlo opět u několika barev ke zlepšení citlivosti na vnímání změny jasu. To se týká barvy modré a žluté, kde došlo ke zlepšení z 20% vnímané změny na 15%. U ostatních barev zůstala nejčastější hodnota vnímané změny jasu stejná jako u 2 luxů.

Jako další bylo použito osvětlení 15 luxů a při tomto osvětlení došlo ke změně pouze u modré barvy, a to z hodnoty 15 na 10 %.

Při osvětlení 25 luxů, zůstaly nejčastěji viděné hodnoty stejné jako u předchozího osvětlení 15 luxů a ke změnám došlo až při osvětlení 60 luxy. Při tomto osvětlení se snížila vnímaná změna jasu u zelené barvy z dokonce z 20 na 10 %. Poté u žluté barvy došlo ke zlepšení z 15 na 10 %.

Při osvětlení 120 a 400 luxů se už nejčastější hodnoty vnímané změny jasu nezměnily a zůstaly stejné jako při 60 luxech.

Pro oranžovou a pro fialovou barvu se nejčastější hodnota vnímané změny jasu ustálila na 1 luxu, pro žlutou, modrou a zelenou barvu se ustálila na 60 luxech a červená zůstala nezměněna od 2 luxů.

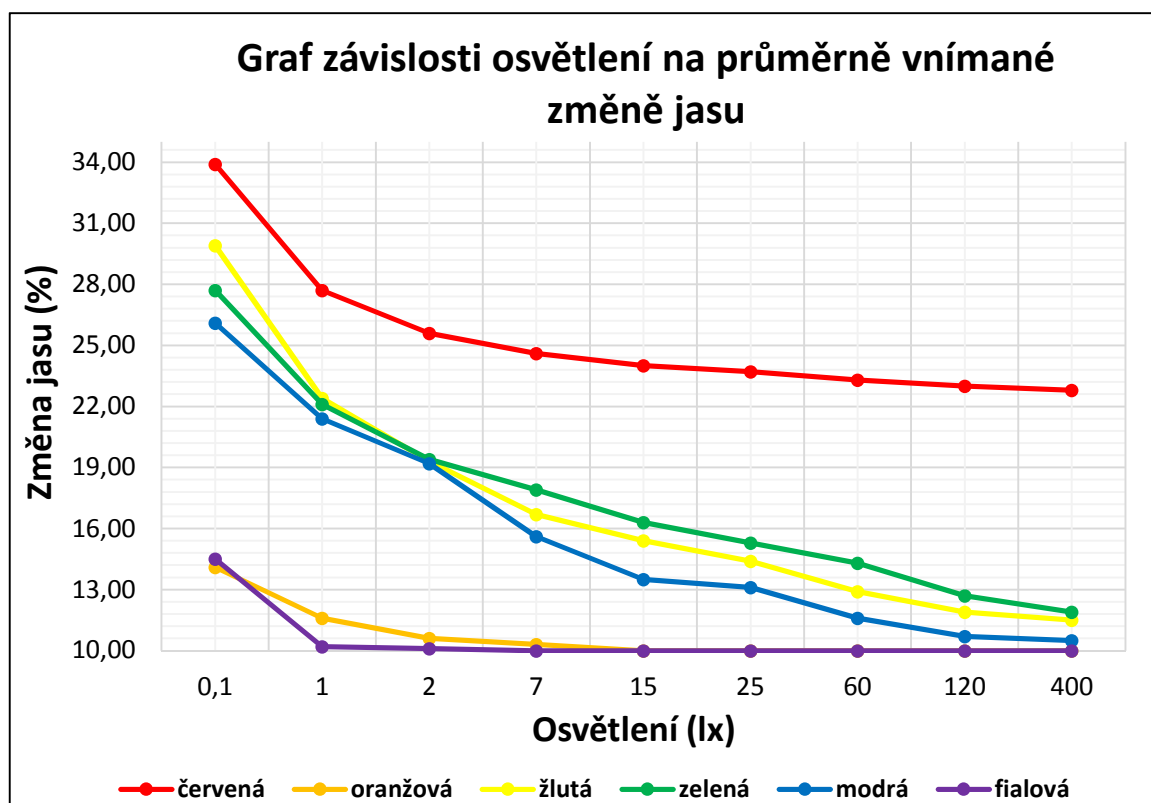
*Tabulka 3: Tabulka nejčastějších hodnot viděné změny jasu*

Osvětlení [lx]	Barva					
	fialová	modrá	Zelená	žlutá	oranžová	červená
0,1	15	25	25	30	15	30
1	10	20	20	25	10	30
2	10	20	20	20	10	25
7	10	15	20	15	10	25
15	10	10	20	15	10	25
25	10	10	20	15	10	25
60	10	10	10	10	10	25
120	10	10	10	10	10	25
400	10	10	10	10	10	25

Se vzrůstajícím osvětlením rostla citlivost oka na rozlišení menších hodnot změny jasu a zvyšoval se počet osob, které viděly tyto menší změny. Z toho důvodu jsou v tabulce 4 zaneseny průměrné hodnoty změny jasu v procentech. K tabulce 4 se vztahuje graf na obrázku 38.

*Tabulka 4: Průměrné hodnoty viděných změn jasu*

Osvětlení [lx]	Barva					
	fialová	modrá	zelená	žlutá	oranžová	červená
0,1	14,50	26,10	27,70	29,90	14,10	33,90
1	10,20	21,40	22,10	22,40	11,60	27,70
2	10,10	19,20	19,40	19,30	10,60	25,60
7	10,00	15,60	17,90	16,70	10,30	24,60
15	10,00	13,50	16,30	15,40	10,00	24,00
25	10,00	13,10	15,30	14,40	10,00	23,70
60	10,00	11,60	14,30	12,90	10,00	23,30
120	10,00	10,70	12,70	11,90	10,00	23,00
400	10,00	10,50	11,90	11,50	10,00	22,80



**Obrázek 38:** Graf závislosti osvětlení na průměrně vnímané změně jasu

Na obrázku 38 se nachází graf, který vyjadřuje závislost intenzity osvětlení na schopnosti oka vnímat změnu jasu u barvy, pozorovanou probandy. Jak můžeme vidět, se vzrůstajícím osvětlením dochází u všech 6 barev ke zlepšení schopnosti vnímat změnu jasu a dochází ke zvýšení citlivosti lidského oka na tyto změny.

Z Grafu na obrázku 39 a za tabulky 4 je patrné, že nejhůře vnímatelný rozdíl jasu byl při všech hodnotách osvětlení u červené barvy (33,9 % při 0,1 luxech a 22,8 % při 400 luxech) a nejlépe vnímaný rozdíl ve změně jasu je u oranžové (14,10 % při 0,1 luxech a 10,00 % při 400 luxech). Podobné hodnoty dosáhla také fialová barva (14,50 % při 0,1 luxech a 10,00 % při 400 luxech).

Největší pokles při přechodu z 0,1 luxu do 400 luxů, byl zaznamenán u žluté barvy, kde se průměrná hodnota vnímané hodnoty jasu zmenšila o 18,4 %, poté následovala zelená barva, kde byl pokles o 15,9 %. Třetí barvou byla modrá, kde pokles vnímané změny jasu dosáhl 15,6 % a poté následovala červená s poklesem o 11,1 %. Nejmenší změny ve vnímání barvy byly zaznamenány u barvy fialové (4,5 %) a u barvy oranžové (4,1 %).

*Tabulka 5: Směrodatné odchytky vnímaných změn jasu*

Osvětlení [lx]	Barva					
	fialová	modrá	zelená	žlutá	oranžová	červená
0,1	4,03	6,43	4,92	4,85	3,56	4,39
1	0,98	4,48	2,62	5,02	2,54	2,69
2	0,70	4,04	3,56	4,24	1,62	2,58
7	0,00	4,65	3,75	4,43	1,19	2,42
15	0,00	4,39	4,45	4,45	0,00	2,45
25	0,00	4,11	4,41	4,32	0,00	2,61
60	0,00	2,91	3,87	3,62	0,00	2,76
120	0,00	2,00	3,35	3,30	0,00	2,65
400	0,00	1,80	2,81	2,87	0,00	2,48

V tabulce 5 jsou uvedeny vypočítané hodnoty směrodatných odchylek. Největší odchylka při 0,1 luxech je u modré barvy 6,43. Poté následuje zelená barva, kde je odchylka 4,92, poté žlutá barva s odchylkou 4,85, poté následuje červená s odchylkou 4,39 a nejmenší odchylky jsou u barvy fialové (4,03) a oranžové (3,56) při všech intenzitách osvětlení.

Velikost odchylek v závislosti na vnímané barvě není u všech barev mezi sebou konstantní, ale mění se s přibývajícím osvětlením. Při 1 luxu je největší odchylka u žluté barvy (5,02) a u modré (4,48). Při osvětlení 2 luxy je největší odchylka znovu u žluté barvy (4,24), při osvětlení 7 luxů u modré barvy (4,65), při 15 luxech u zelené a žluté barvy (4,45).

Při hodnotách osvětlení 25 a 60 a 120 luxů, je největší odchylka zaznamenána u zelené barvy a při 400 luxech je největší odchylka u žluté barvy.

Pro přehled průměrných hodnot a směrodatných odchylek, byla vytvořena tabulka 6, kde jsou uvedeny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky pro osvětlení 0,1, 1, 2 a 7 luxů a tabulka 7, kde jsou uvedeny hodnoty 15, 25, 60, 120 a 400 luxů.

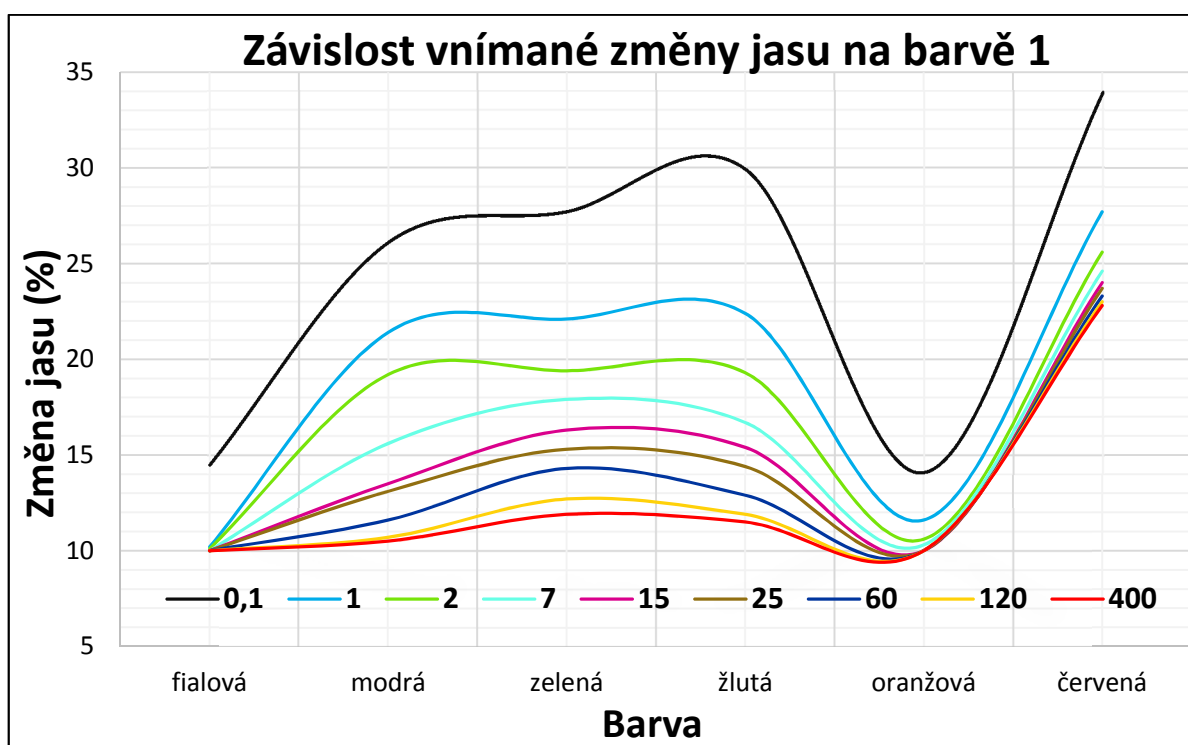
*Tabulka 6: Tabulka průměrných hodnot vnímané změny jasu a jejich odchylek pro všechny barvy a osvětlení 0,1, 1, 2 a 7 luxů*

Barva	Intenzita osvětlení			
	0,1	1	2	7
červená	33,90±4,39	27,70±2,69	25,60±2,58	24,60±2,42
oranžová	14,10±3,56	11,60±2,54	10,60±1,62	10,30±1,19
žlutá	29,90±4,85	22,40±5,02	19,30±4,24	16,70±4,43
zelená	27,70±4,92	22,10±3,62	19,40±3,56	17,90±3,75
modrá	26,10±6,43	21,40±4,48	19,20±4,04	15,60±4,65
fialová	14,50±4,03	10,20±0,98	10,10±0,70	10,00±0,00

*Tabulka 7: Tabulka průměrných hodnot vnímané změny jasu a jejich odchylek pro všechny barvy a osvětlení 15, 25, 60, 120 a 400 luxů*

Barva	Intenzita osvětlení				
	15	25	60	120	400
červená	24,00±2,45	23,70±2,61	23,30±2,76	23,00±2,65	22,80±2,48
oranžová	10,00±0,00	10,00±0,00	10,00±0,00	10,00±0,00	10,00±0,00
žlutá	15,40±4,45	14,40±4,32	12,90±3,62	11,90±3,30	11,50±2,87
zelená	16,30±4,45	15,30±4,41	14,30±3,87	12,70±3,35	11,90±2,81
modrá	13,50±4,39	13,10±4,11	11,60±2,91	10,70±2,00	10,50±1,80
fialová	10,00±0,00	10,00±0,00	10,00±0,00	10,00±0,00	10,00±0,00

Pro shrnutí dosažených výsledků jsou zde uvedeny grafy závislosti vnímané změny jasu na jednotlivých barvách. Na obrázku 39 je vyobrazen graf závislosti vnímané změny jasu na barvě, kde jsou zaneseny křivky pro všechna osvětlení. Zde můžeme vidět, že při zvyšujícím se osvětlení roste citlivost na změny jasu u všech barev. Nejvíce závislá barva na osvětlení je žlutá, jelikož je zde největší rozdíl mezi maximem a minimem a nejméně závislá na osvětlení je barva oranžová a fialová, kde vidíme nejmenší rozdíl mezi maximem a minimem.

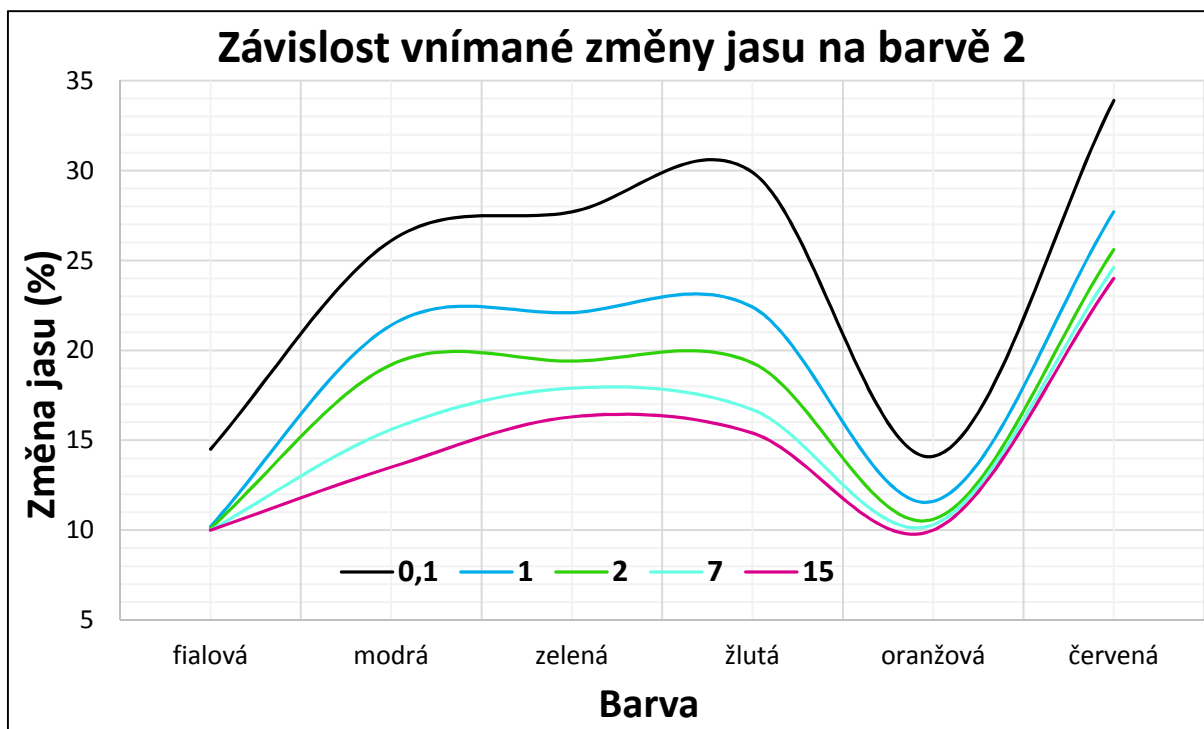


**Obrázek 39:** Graf závislosti vnímané změny jasu na barvě 1 – pro všechna osvětlení

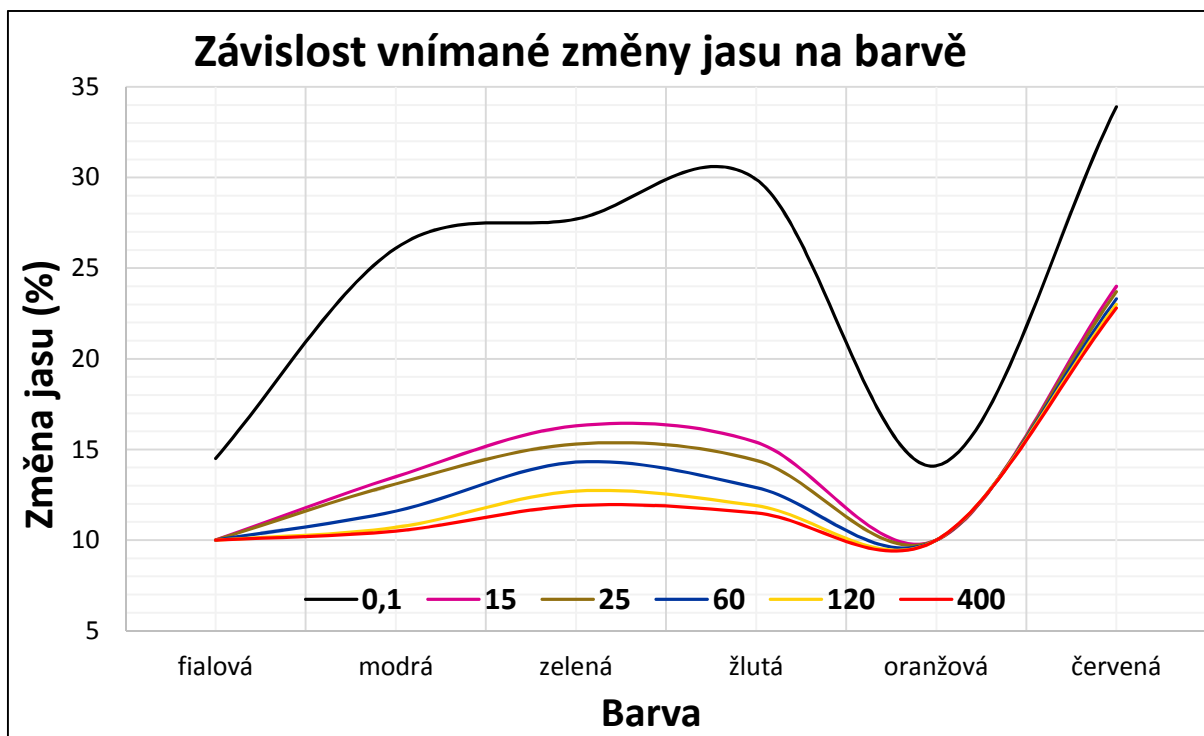
Pro lepší přehled je zde také uveden graf na obrázku 40, kde jsou zobrazeny pouze křivky pro osvětlení 0,1, 1, 2, 7 a 15 luxů a graf na obrázku 41, kde vidíme křivky závislosti vnímané změny na jasu na barvě pro osvětlení 0,1, 15, 25, 60, 120 a 400 luxů.

Na obrázku 40 je vidět, že k největším změnám vnímání změny jasu dochází u modré, zelené a žluté barvy a nejmenší rozdíl je u barvy fialové a oranžové.

Na obrázku 41 jsou uvedeny křivky pro osvětlení 0,1, 15, 25, 60, 120 a 400 luxů a je zřejmé, že už nedochází k takovým změnám vnímané změny jasu jako na předchozím obrázku, kde jsou zobrazeny křivky pro osvětlení 0,1 – 15 luxů.



Obrázek 40: Graf závislosti vnímané změny jasu na barvě 2 – pro osvětlení 0,1, 1, 2, 7 a 15 luxů



Obrázek 41: Graf závislosti vnímané změny jasu na barvě 3 – pro osvětlení 0,1, 15, 25, 60 a 400 luxů



## 7.4 Diskuze

V této práci bylo provedeno testování založené na zjišťování, jakou změnu jasu v % je lidské oko schopno rozpoznat při zhoršených světelných podmínkách. K testování byly použity testovací tabulky, ve kterých probandi museli najít jeden čtverec lišící se jasně, mezi dvaceti stejnými čtverci. Pro toto testování bylo vybráno 6 barev, a to červená, oranžová, žlutá, zelená, modrá a fialová. Před samotným testováním byly určeny tři hypotézy, které se zakládají na publikovaných faktech uvedených v kapitole 3.4, 3.5 a 3.6.

První hypotéza byla úspěšně potvrzena, jelikož bylo dokázáno, že se zvyšujícím se osvětlením dochází ke zvýšení citlivosti lidského oka na změnu jasu barvy. Toto potvrzuje tabulka 3 (Tabulka nejčastějších hodnot viděné změny jasu) a tabulka 4 (Průměrné hodnoty viděných změn jasu), se kterou je spojen graf na obrázku 38 (Graf závislosti osvětlení na průměrně vnímané změně jasu). Na tomto grafu lze vidět, že nejvíce se průměrná hodnota vnímané hodnoty jasu zmenšila u žluté barvy (18,4 %), poté následovala zelená barva (15,9 %), jako třetí byla modrá barva (15,6 %), čtvrtou barvou byla červená (11,1 %) a nejmenší pokles byl zaznamenán u fialové (4,5 %) a u oranžové barvy (4,1 %). Na obrázku 39, 40 a 41 vidíme, že při zvyšujícím se osvětlení roste citlivost na změny jasu u všech barev. Nejvíce závislá barva na osvětlení je žlutá, jelikož je zde největší rozdíl mezi maximem a minimem a nejméně závislá na osvětlení je barva oranžová a fialová, kde vidíme nejmenší rozdíl mezi maximem a minimem. Zvyšující se citlivost na změny jasu je s největší pravděpodobností zapříčiněna tím, že dochází k působení Stevensova a Huntova jevu, protože se zvýšil kontrast a barevnost testovacích tabulek se zvyšujícím se osvětlením.

Druhou hypotézou bylo, že nejhůře vnímaná hodnota změny jasu bude při nejhorším osvětlení 0,1 luxů u červené barvy. I tento předpoklad byl potvrzen, jak si můžeme ověřit například v tabulce 6 a 7 (Tabulka průměrných hodnot vnímané změny jasu a jejich odchylek pro všechny barvy a osvětlení 0,1, 1, 2 a 7 luxů a pro 15, 25, 60, 120 a 400 luxů). Potvrzení tohoto předpokladu je také názorně vidět na grafech na obrázcích 39, 40 a 41 (Grafy závislosti vnímané změny jasu na barvě 1, 2 a 3), kde lze pozorovat zřetelný nárůst vnímané změny jasu při všech intenzitách osvětlení. Pro červenou je tedy potřeba větší změna jasu pro detekci změny odstínu. Jak už bylo výše popsáno, nejhorší citlivost na vnímání změny jasu je pravděpodobně způsobena Purkyňovým jevem.

Z uvedených tabulek a grafů také vyplývá, že nejvíce závislá barva na osvětlení je žlutá, jelikož je zde největší rozdíl mezi maximem a minimem a nejméně závislá na osvětlení je barva oranžová a fialová, kde vidíme nejmenší rozdíl mezi maximem a minimem. Také

můžeme porovnat velikost odchylek testování vnímané změny jasu. Největší odchylky od průměru byly zaznamenány u modré, žluté a zelené barvy. Čím větší jsou odchylky, tím větší byla variabilita odpovědí a větší odchylky od průměrné hodnoty.

Poslední hypotéza byla potvrzena jen částečně. Nejlépe vnímaná hodnota změny jasu se měla pohybovat ve žlutooranžové oblasti, ale z výsledků je patrné, že nejlepších výsledků bylo dosaženo pouze u oranžové barvy. Pro detekci změny odstínu je vyžadována malá změna v jasu, aby byly rozeznány dva odstíny. Tato hypotéza byla potvrzena pouze částečně a nejpravděpodobněji to je způsobeno tím, že k testování byly použity pouze tištěné tabulky.

Jak můžeme vidět na grafech na obrázcích 39, 40 a 41, ke zvyšování citlivosti oka na změnu jasu dochází nejvíce od intenzity osvětlení 0,1 luxu do 15 luxů. Od osvětlení 25 luxů, nedochází už k tak velkému zvětšení citlivosti na vnímanou změnu jasu. Křivky citlivosti také ukazují, že k největším změnám vnímání změny jasu dochází u modré, zelené a u žluté barvy a k nejmenším dochází u oranžové a fialové barvy, kde není potřeba intenzity osvětlení ani 2 luxy, abychom rozpoznali změnu jasu 10 %.

## Závěr

V bakalářské práci na téma vnímání barev při zhoršených světelných podmínkách je zpracováno téma barevného vnímání a testování barvocitu. Cílem bakalářské práce bylo zpracovat téma barevného vnímání a navrhnout a provést experiment vnímání barev při zhoršených světelných podmínkách.

V teoretické části byla popsána anatomie sítnice, včetně stavby fotoreceptorů, vznik zrakového vjemu a také v práci byly popsány jevy, které souvisí s vnímáním barev při zhoršených světelných podmínkách. Zejména byla v práci popsána citlivost lidského oka na změnu vlnové délky a kolorimetrické čistoty. Na základě této kapitoly byly formulovány hypotézy. Součástí teoretické části bakalářské práce je také popis základních metod testování barvocitu. V závěru teoretické části se autor věnuje fotometrickým veličinám (jejich měření a popis) a světelným podmínkám při hygieně práce.

V praktické části bylo provedeno testování vnímání barev, které bylo založeno na zjišťování, jak velkou změnu jasu je člověk schopný rozeznat při různých světelných podmínkách. Na základě teoretické části byly formulovány tři hypotézy.

První a druhá hypotéza byla na základě vyhodnocení experimentu potvrzena. Jak je podrobně popsáno ve výsledcích, se zvyšujícím se osvětlením dochází ke zvýšení citlivosti oka na změnu jasu, což potvrzuje první hypotézu. Druhá hypotéza byla také potvrzena, a to z toho důvodu, že nejhůře vnímaná změna jasu byla u červené barvy, což je v souladu s poznatky uváděnými v odborné literatuře. Třetí hypotéza byla potvrzena pouze částečně, jelikož nejlépe vnímanou barvou dle výsledků byla oranžová spolu s fialovou.

Osvětlení hraje významnou roli při všech činnostech a v každém zaměstnání, protože nedostatek osvětlení má vliv na zrakovou únavu a také na pracovní výkon. V praktické části bylo dokázáno, že při zhoršených světelných podmínkách dochází ke snížení schopnosti vnímat změnu odstínů, a proto je důležité, aby byly dodržovány hygienické podmínky osvětlení, předepsané v normách ČSN.

## Seznam použité literatury

- [1] ROZSÍVAL, Pavel. *Oční lékařství*. Vyd. 1. Praha: Karolinum, 2006. ISBN 80-246-1213-5.
- [2] SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. *Fyziologie oka a vidění*. 2., dopl. a přeprac. vyd. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3992-2.
- [3] KUČHYNKA, Pavel. *Oční lékařství*. 1.vyd. Praha: Grada, 2007. ISBN 978-80-247-1163-8
- [4] KASCHKE, Michael, Karl-Heinz DONNERHACKE, Michael Stefan RILL a Simone BENJAMIN. *Optical devices in ophthalmology and optometry: technology, design principles and clinical applications*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2014. ISBN 978-3-527-64896-2.
- [5] ČIHÁK, Radomír et al. *Anatomie 3*. 2., uprav. a dopl. vyd., Praha: Grada, 2004, ISBN 80-247-1132-X.
- [6] KONRÁDOVÁ, Václava et. al. *Funkční histologie*. 2. vyd. Jinočany: H&H, 2000, ISBN 80-8602-280-3.
- [7] AUSRATA, Rudolf. *Nauka o zraku*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2002. ISBN 80-7013-362-7.
- [8] KRAUS, Hanuš. *Kompéndium očního lékařství*. Praha: Grada, 1997. ISBN 80-7169-079-1.
- [9] HORNOVÁ, Jara. *Oční propedeutika*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-4087-4.
- [10] Helba Kolb. *Facts and Figures concerning the human retina* [online]. [cit. 2016-11-5]. Dostupné z: <http://webvision.med.utah.edu/book/part-xiii-facts-and-figures-concerning-the-human-retina/>
- [11] *Rods and cones of the human eye* [online]. [cit. 2016-11-6]. Dostupné z: <https://askabiologist.asu.edu/rods-and-cones>
- [12] *Rods and cones* [online]. [cit. 2016-11-8]. Dostupné z <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/rodcone.html#c3>
- [13] LEŠTÁK, Ján. *Oftalmologie pro obor optika a optometrie: (soubor přednášek)*. Praha: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04956-3.
- [14] *Eye spectral response* [online]. [cit. 2016-11-8]. Dostupné z: [http://www.telescope-optics.net/eye\\_spectral\\_response.htm](http://www.telescope-optics.net/eye_spectral_response.htm)

- [15] *Spectral sensitivity of human eye* [online]. [cit. 2016-11-9]. Dostupné z: [http://what-when-how.com/wp-content/uploads/2011/10/tmp1A362\\_thumb.jpg](http://what-when-how.com/wp-content/uploads/2011/10/tmp1A362_thumb.jpg)
- [16] POLÁŠEK, J. a kol., *Technický sborník oční optiky*, ed. 1, Oční optika n.p., Praha, 1997, ISBN SIP – 41304/03112-301-05-2
- [17] *The visual pathways* [online]. [cit. 2016-11-11]. Dostupné z: <http://pocketdentistry.com/18-the-cranial-nerves/>
- [18] *Zrakové korové oblasti* [online]. [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: <http://www.nan.upol.cz/neuro/cd708.html#>
- [19] *The perception of colour* [online]. [cit. 2016-11-13]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/color/The-perception-of-colour>
- [20] *Kalorimetrie* [online]. [cit. 2016-11-13]. Dostupné z: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/kolorimetrie.pdf>
- [21] *Viditelné světlo* [online]. [cit. 2016-11-15]. Dostupné z: [http://www.fotoroman.cz/tech2/light/rom\\_svetlo\\_1\\_02.gif](http://www.fotoroman.cz/tech2/light/rom_svetlo_1_02.gif)
- [22] *Hue, saturation, brightness* [online]. [cit. 2016-11-15]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- [23] *Barevný model HSB (HSV)* [online]. [cit. 2016-11-15]. Dostupné z: [http://fotoroman.cz/glossary/3\\_hsb.htm](http://fotoroman.cz/glossary/3_hsb.htm)
- [24] *Barevné vidění* [online]. [cit. 2016-11-17]. Dostupné z: <http://www.videni.cz/oko/29-barevne-videni>
- [25] *Munsellův systém barev* [online]. [cit. 2016-11-17]. [http://geo3.fsv.cvut.cz/vyuka/kapr/sp/2008\\_2009/pospisilova\\_rousarova/mun.html](http://geo3.fsv.cvut.cz/vyuka/kapr/sp/2008_2009/pospisilova_rousarova/mun.html)
- [26] BROSCHMANN, Dieter a Jörn KUCHENBECKER. *Tabulky k vyšetření barvocitu: vynalezli a vytřbili Jakob Stilling, Ernst Hertel, Karl Velhagen*. 2., aktualiz. vyd. Přeložil Jiří CENDELÍN. Praha: Aventinum, 2012. ISBN 978-80-7151-267-7.
- [27] Peter Begeni. *Astronomické oko* [online]. Hurbanovo: Slovenská ústredná hviezdáreň, 2015 [cit. 2016-11-18]. ISBN 978-80-8522-83-1. Dostupné z: <http://astro.begi.sk/publ/oko/oko.pdf>
- [28] *Luminous deficiency functions* [online]. [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <http://agi32.com/blog/tag/sp-ratio/>
- [29] CHARLES LUU, Michael Kalloniatis. *Dark adaptation* [online]. 2007 [cit. 2016-11-22]. Dostupné z: <http://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-gabac-receptors/light-and-dark-adaptation/>

- [30] *Special Senses* [online]. 2011 [cit. 2016-11-22]. Dostupné z: <http://medicalshow.blogspot.com/2011/03/special-senses.html>
- [31] *Mesopic Color Appearance* [online]. [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: <https://www.handprint.com/HP/WCL/color4.html#lumcontrast>
- [32] *Vnímání barev* [online]. 2005 [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/publikace/jancovic1.html>
- [33] Michal Vik a Martina Viková. *Základy koloristiky* [online]. [cit. 2016-12-3]. Dostupné z: [http://dirk.kmi.tul.cz/depart/ktc/sylaby/Zaklady\\_Koloristiky/9ZKO-CAM.pdf](http://dirk.kmi.tul.cz/depart/ktc/sylaby/Zaklady_Koloristiky/9ZKO-CAM.pdf)
- [34] Mark D. Fairchild. *Color appearance model* [online]. 3. Chichester, UK: Wiley-IS&T, 2013 [cit. 2016-12-3]. ISBN 978-1-119-96703-3. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=1BT9R6FjVhIC&printsec=frontcover&dq=color+appearance+model&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwje05fwcTTAhVJuBoKHR32CWkQ6AEIJTAA#v=onepage&q=color%20appearance%20model&f=false>
- [35] *Color Perceptions* [online]. 2007 [cit. 2016-12-5]. Dostupné z: <http://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-gabac-receptors/color-perception/>
- [36] *Hue discrimination* [online]. [cit. 2016-12-5]. Dostupné z: <http://the-solutions-group.net/Asia%20seminars/HK%20seminars/Vision%20Training/Colour%20perception/Colour.html>
- [37] Claudio Oleari. *Standard Colorimetry: Definitions, Algorithms and Software* [online]. UK: Wiley, 2016 [cit. 2017-12-8]. ISBN 9781118894446. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=D9aOCQAAQBAJ&pg=PA123&lpg=PA123&dq=saturation+discrimination&source=bl&ots=4Z1bbgUP6Y&sig=2wXsy\\_G3BjRdCW200PE0qR3qwTs&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjMxLkQ2cTTAhULbRQKHQidDewQ6AEIcTAJ#v=onepage&q=saturation%20discrimination&f=false](https://books.google.cz/books?id=D9aOCQAAQBAJ&pg=PA123&lpg=PA123&dq=saturation+discrimination&source=bl&ots=4Z1bbgUP6Y&sig=2wXsy_G3BjRdCW200PE0qR3qwTs&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjMxLkQ2cTTAhULbRQKHQidDewQ6AEIcTAJ#v=onepage&q=saturation%20discrimination&f=false)
- [38] *Hue discrimination* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://www.maroon.dti.ne.jp/spluso/%23pop/pop-col1.html>
- [39] BENJAMIN, William J. a Irvin M. BORISH. *Borish's clinical refraction*. 2nd ed. St. Louis Mo.: Butterworth Heinemann/Elsevier, c2006. ISBN 978-0-7506-7524-6.
- [40] Claudio Oleari. *Standard Colorimetry: Definitions, Algorithms and Software* [online]. UK: Wiley, 2016 [cit. 2016-12-20]. ISBN 9781118894446. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=D9aOCQAAQBAJ&pg=PA123&lpg=PA123&dq=saturation+discrimination&source=bl&ots=4Z1bbgUP6Y&sig=2wXsy\\_G3BjRdCW200PE0qR3qwTs](https://books.google.cz/books?id=D9aOCQAAQBAJ&pg=PA123&lpg=PA123&dq=saturation+discrimination&source=bl&ots=4Z1bbgUP6Y&sig=2wXsy_G3BjRdCW200PE0qR3qwTs)

&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjMxLKQ2cTTAhULbRQKHQidDewQ6AEIcTAJ#v=onepage&q=saturation%20discrimination&f=false

[41] VESELÝ. Současné metody vyšetřování barvocitu. *4 oči* [online]. 2010, (4), 54-66 [cit. 2012-1-8]. Dostupné z: [http://www.4oci.cz/dokumenty/pdf/4oci\\_2010\\_04.pdf](http://www.4oci.cz/dokumenty/pdf/4oci_2010_04.pdf)

[42] *Ishihara's test for colour deficiency* [online]. [cit. 2017-1-10]. Dostupné z: <http://www.color-blindness.com/2012/10/>

[43] *Richmond HRR Color Test* [online]. [cit. 2017-1-10]. Dostupné z: <http://www.myflightsurgeon.com/Farnsworth.html>

[44] *Farnsworth Munsell 100 Hue Test* [online]. [cit. 2017-1-10]. Dostupné z: <https://www.plasticsnet.com/doc/farnsworth-munsell-100-hue-test-0002>

[45] *FM Dichotomous D-15 Test* [online]. [cit. 2017-1-12]. Dostupné z: <http://www.unitycolor.com/Advanced-Training/Tutorials/Munsell-ColorTraining/FM-Dichotomous-D-15-Test::171.html>

[46] *Nagel anomaloscope* [online]. [cit. 2017-1-15]. Dostupné z: <http://www.color-blindness.com/2010/03/23/color-blindness-tests/>

[47] MALÝ, Petr. *Optika*. Praha: Karolinum, 2008. ISBN 978-80-246-1342-0.

[48] Petr Kácovský. *Fotometrické veličiny* [online]. 2012 [cit. 2017-1-20]. Dostupné z: [http://fyzweb.cz/materialy/kacovsky/fotometricke\\_veliciny.pdf](http://fyzweb.cz/materialy/kacovsky/fotometricke_veliciny.pdf)

[49] Jaroslav Reichl. *Fotometrické veličiny* [online]. [cit. 2017-2-9]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/index.php/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>

[50] *Luminous flux* [online]. [cit. 2017-2-9]. Dostupné z: <http://2bora.com/en/technologie/strumien-swietlny>

[51] *Luminous intensity* [online]. [cit. 2017-2-10]. Dostupné z: [http://www.technikerschule-beckum.de/maschinen/projekte/2006\\_07/p18/53926998e610f9605/53926998e61100e0b/index.html](http://www.technikerschule-beckum.de/maschinen/projekte/2006_07/p18/53926998e610f9605/53926998e61100e0b/index.html)

[52] MIKŠ, Antonín. *Aplikovaná optika*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04254-0.

[53] *Footcandle* [online]. [cit. 2017-2-12]. Dostupné z: <https://www.archtoolbox.com/images/materials/elect/footcandle-vs-lux.png>

[54] *Fotometrie* [online]. [cit. 2017-3-6]. Dostupné z: <http://artemis.osu.cz/voptp/skriptum/kap09.pdf>

[55] Ladislava Černá. *Fotometrie, radiometrie a spektriskopie* [online]. [cit. 2017-3-15]. Dostupné z: <http://pasan.feld.cvut.cz/dokumenty/fotometrie.pdf>

- [56] *Světlo* [online]. [cit. 2017-3-24]. 3/2009 Dostupné z: <http://odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-4--15601>
- [57] *Světelná technika - fotometrie* [online]. [cit. 2017-4-6]. Dostupné z: [https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni\\_materialy/prezentace/elektricka.../svetlo\\_6.pps](https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/prezentace/elektricka.../svetlo_6.pps)
- [58] Vybrané kapitoly z pracovního lékařství – díl 3. [online]. [cit. 2017-4-8]. Dostupné z: <https://www.ipvz.cz/seznam-souboru/2357-vybrane-kapitoly-z-pracovniho-lekarstvi-dil-3.pdf>
- [59] Fotometrie [online]. [cit. 2017-4-12]. Dostupné z: [gvn.cz/data/files/fotometrie.pdf](http://gvn.cz/data/files/fotometrie.pdf)
- [60] VRBÍK, Petr. *Hygiena optického záření a osvětlování*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 1998. ISBN 80-7013-265-5.
- [61] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika* [online]. České vysoké učení technické v Praze, 2011 [cit. 2017-4-15]. ISBN 978-80-01-04941-9. Dostupné z: [http://k315.feld.cvut.cz/CD\\_MPO/CVUT-6-Svetelna.pdf](http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-6-Svetelna.pdf)
- [62] Požadavky na osvětlování denním osvětlením v pracovním prostředí [online]. [cit. 2017-4-18]. Dostupné z: [http://www.szu.cz/uploads/documents/cpl/Materily\\_ze\\_seminaru/Materialy\\_2009/kanka-19.3.pdf](http://www.szu.cz/uploads/documents/cpl/Materily_ze_seminaru/Materialy_2009/kanka-19.3.pdf)
- [63] Osvětlení z pohledu hygienika [online]. [cit. 2017-4-20]. Dostupné z: [http://www.svn.cz/assets/files/seminare\\_a\\_konference/2014/seminar-vnitri-osvetleni/dobisik-osvetleni-z-pohledu-hygienika.pdf](http://www.svn.cz/assets/files/seminare_a_konference/2014/seminar-vnitri-osvetleni/dobisik-osvetleni-z-pohledu-hygienika.pdf)
- [64] Světlo [online]. [cit. 2017-4-20]. 04/2008 Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/pravni-pozadavky-na-osvetleni-a-ceske-technicke-normy-cast-2--15857>
- [65] Třída 36 – Osvětlování všeobecně [online]. [cit. 2017-4-21]. Dostupné z: <https://seznam.normy.biz/trida/36>



# Příloha I.

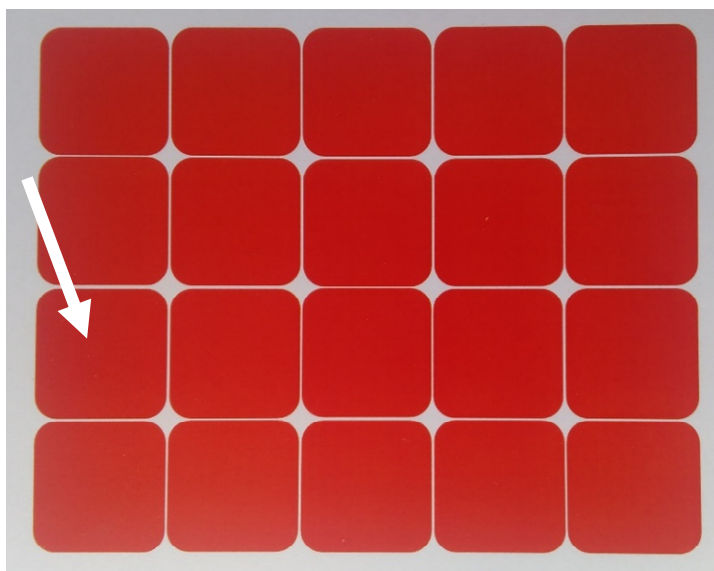
*Tabulka 8: Normy ČSN [65]*

Číslo	Název
ČSN EN 12464-1	Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory
ČSN EN 12464-2	Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů – Část 2: Venkovní pracovní prostory
ČSN EN 12193	Světlo a osvětlení - Osvětlení sportovišť
ČSN EN 13032-1 +A1	Světlo a osvětlení - Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel - Část 1: Měření a formát souboru údajů
ČSN EN 13032-2	Světlo a osvětlení - Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel - Část 2: Způsob uvádění údajů pro vnitřní a venkovní pracovní prostory
ČSN EN 13032-3	Světlo a osvětlení - Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel - Část 3: Způsob uvádění údajů pro nouzové osvětlení pracovních prostorů
ČSN EN 13032-4	Světlo a osvětlení - Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel - Část 4: LED světelné zdroje a svítidla
ČSN EN 12665	Světlo a osvětlení - Základní termíny a kritéria pro stanovení požadavků na osvětlení
ČSN 36 0011-1	Měření osvětlení prostorů - Část 1: Základní ustanovení
ČSN 36 0011-2	Měření osvětlení prostorů - Část 2: Měření denního osvětlení
ČSN 36 0011-3	Měření osvětlení prostorů - Část 3: Měření umělého osvětlení vnitřních prostorů
ČSN 36 0011-4	Měření osvětlení prostorů - Část 4: Měření umělého osvětlení venkovních prostorů
ČSN 36 0020	Sdružené osvětlení
ČSN 73 0580-1	Denní osvětlení budov - Část 1: Základní požadavky
ČSN 730580-2	Denní osvětlení budov - Část 2: Denní osvětlení obytných budov

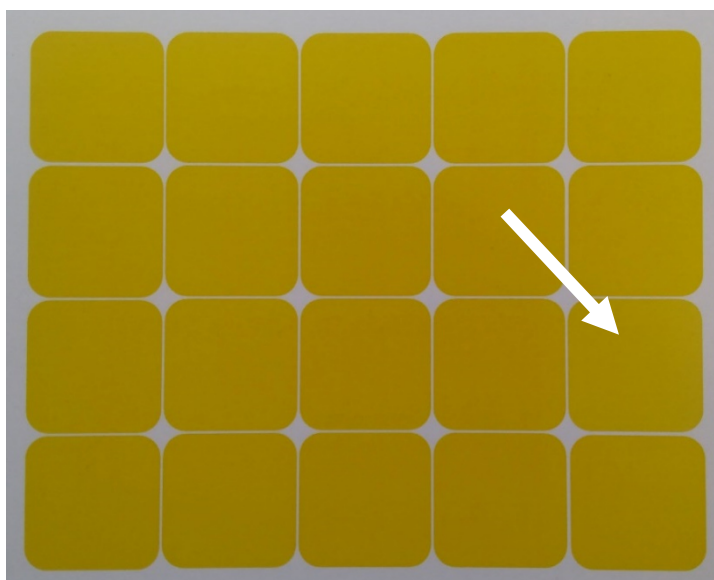
<b>Číslo</b>	<b>Název</b>
ČSN 73 0580-3	Denní osvětlení budov - Část 3: Denní osvětlení škol
ČSN 73 0580-4	Denní osvětlení průmyslových budov
ČSN EN 1838	Světlo a osvětlení - Nouzové osvětlení

## Příloha II.

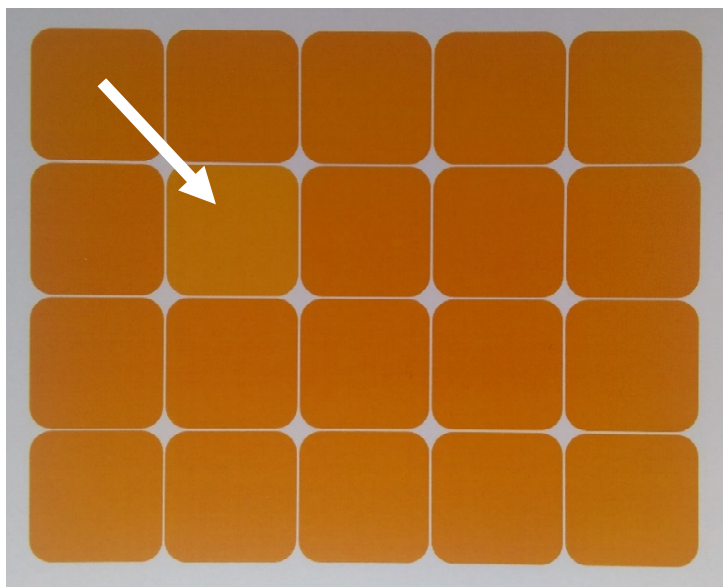
Na následujících obrázcích je ukázka sady čtverců, kde se vyskytuje jeden čtverec, lišící se 20% změnou jasu (Obrázky pro červenou, žlutou, oranžovou a fialovou barvu)



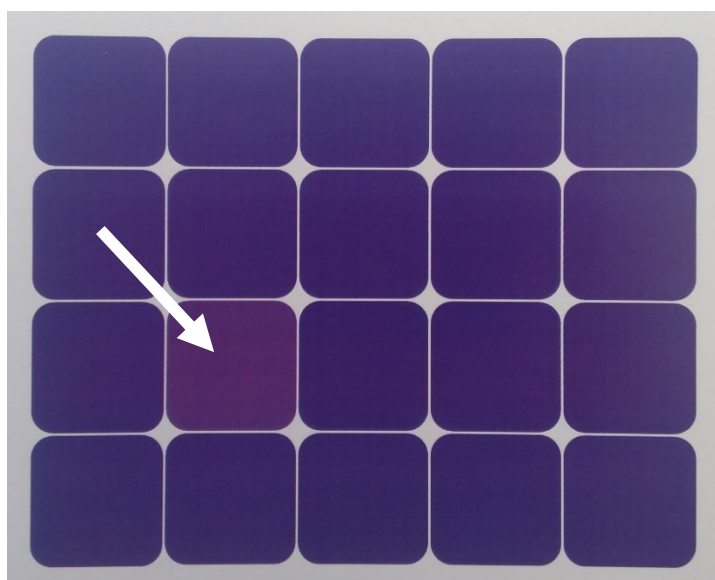
*Obrázek 43 : Sada čtverců červené barvy, změna jasu o 20 %.*



*Obrázek 44: Sada čtverců žluté barvy, změna jasu o 20 %.*



**Obrázek 45:** Sada čtverců oranžové barvy, změna jasu o 20 %.



**Obrázek 46:** Sada čtverců fialové barvy, změna jasu o 20 %.

# Příloha III.

Záznamová tabulka:

<b>0,1 lx</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>25 lx</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>
Červená									Červená								
Oranžová									Oranžová								
Žlutá									Žlutá								
Zelená									Zelená								
Modrá									Modrá								
Fialová									Fialová								
<b>1 lx</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>60 lx</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>
Červená									Červená								
Oranžová									Oranžová								
Žlutá									Žlutá								
Zelená									Zelená								
Modrá									Modrá								
Fialová									Fialová								
<b>2 lx</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>120 lx</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>
Červená									Červená								
Oranžová									Oranžová								
Žlutá									Žlutá								
Zelená									Zelená								
Modrá									Modrá								
Fialová									Fialová								
<b>7 lx</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>400 lx</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>
Červená									Červená								
Oranžová									Oranžová								
Žlutá									Žlutá								
Zelená									Zelená								
Modrá									Modrá								
Fialová									Fialová								
<b>15 lx</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>									
Červená																	
Oranžová																	
Žlutá																	
Zelená																	
Modrá																	
Fialová																	

# Příloha IV.

Tabulka 9: Tabulka vnímaných změn jasu při 1 a 2 luxech – ženy (vlevo), muži (vpravo)

1 lx							1 lx							2 lx							2 lx						
Č	O	Ž	Z	M	F		Č	O	Ž	Z	M	F		Č	O	Ž	Z	M	F		Č	O	Ž	Z	M	F	
30	15	25	25	25	10		25	10	15	20	20	10		25	10	15	20	20	10		25	10	15	20	20	10	
30	15	25	25	25	10		25	15	25	20	20	10		30	10	25	25	15	10		25	10	25	20	20	10	
30	10	25	20	15	10		30	15	20	20	25	10		25	10	15	20	15	10		25	10	20	20	25	10	
25	10	15	25	25	10		25	10	25	15	15	10		25	10	15	15	20	10		25	10	20	10	15	10	
30	10	30	25	20	15		25	10	25	20	25	10		25	10	15	20	20	10		25	10	20	20	20	10	
30	10	25	25	25	10		30	10	25	15	20	10		25	10	20	25	20	10		25	10	20	15	20	10	
25	10	25	20	20	10		30	15	25	30	30	10		25	10	25	15	20	10		30	10	25	25	25	15	
25	15	15	15	15	10		30	10	25	25	25	10		25	15	15	15	15	10		25	10	20	20	20	10	
30	15	30	25	20	15		30	15	25	30	25	10		25	10	25	20	20	10		30	10	25	20	20	10	
25	10	20	20	20	10		25	10	25	25	20	10		25	10	20	20	20	10		25	10	20	20	20	10	
30	10	20	20	20	10		30	15	25	25	20	10		25	10	20	20	15	10		30	15	20	20	20	10	
30	10	25	25	10	10		25	10	10	20	20	10		25	10	20	25	10	10		25	10	10	20	20	10	
30	10	25	20	20	10		25	10	15	20	15	10		25	10	15	20	20	10		20	10	15	10	15	10	
25	10	25	20	20	10		25	10	20	20	20	10		25	10	25	15	20	10		25	10	15	15	15	10	
30	15	30	25	25	10		25	10	20	20	20	10		30	15	25	25	25	10		25	10	20	10	20	10	
25	10	25	20	20	10		25	10	15	20	15	10		25	10	25	20	20	10		20	10	15	20	15	10	
30	10	25	25	20	10		30	10	20	20	20	10		30	10	20	20	20	10		25	10	15	20	20	10	
30	15	30	20	30	10		30	10	15	20	20	10		30	10	25	20	20	10		30	10	25	20	20	10	
25	10	15	20	30	10		25	10	15	20	25	10		25	10	15	20	25	10		25	10	15	20	20	10	
25	10	25	20	25	10		25	10	25	20	20	10		25	10	25	20	20	10		35	20	35	30	30	10	
35	20	35	30	30	10		30	15	25	25	30	10		25	15	20	25	30	10		30	15	25	25	30	10	
30	15	25	25	30	10		25	15	25	25	25	10		20	10	20	20	20	10		25	15	25	25	25	10	
25	10	20	20	20	10		25	10	20	20	20	10		25	10	20	20	20	10		25	10	20	20	20	10	
25	10	25	20	25	10		25	10	25	20	25	10		25	10	15	20	20	10		25	10	25	20	25	10	
25	10	15	20	20	10		25	10	15	20	20	10		25	10	15	20	20	10		25	10	15	20	20	10	
30	10	25	20	15	10		30	10	20	20	15	10		25	10	20	20	15	10		30	10	25	20	15	10	
30	10	20	20	15	10		25	10	15	25	20	10		25	10	15	20	20	10		25	10	20	20	15	10	
25	10	15	25	20	10		30	10	20	20	20	10		25	10	15	20	20	10		25	10	20	20	20	10	
30	10	20	20	20	10		25	10	20	25	25	10		25	10	20	15	15	10		30	10	20	20	20	10	
25	10	20	25	25	10		30	10	20	20	20	10		25	10	15	20	20	10		25	10	20	20	20	10	
30	10	20	20	20	10		30	15	20	30	20	10		25	15	20	20	10	10		25	15	20	20	10	10	

**Tabulka 10:** Tabulka vnímaných změn jasu při 7 a 15 luxech – ženy (vlevo), muži (vpravo)

7 lx							7 lx							15 lx							15 lx						
Č	O	Ž	Z	M	F		Č	O	Ž	Z	M	F		Č	O	Ž	Z	M	F		Č	O	Ž	Z	M	F	
25	10	15	20	15	10		25	10	15	20	10	10		25	10	15	20	10	10		25	10	15	20	10	10	
25	10	15	20	10	10		25	10	15	20	15	10		20	10	15	15	10	10		25	10	15	10	10	10	
25	10	15	20	15	10		25	10	20	20	20	10		20	10	15	20	15	10		25	10	10	20	20	10	
20	10	10	10	15	10		25	10	20	10	15	10		20	10	10	10	15	10		25	10	20	10	10	10	
25	10	15	20	20	10		25	10	10	20	20	10		25	10	15	20	20	10		25	10	10	20	20	10	
25	10	20	20	10	10		25	10	15	15	20	10		25	10	20	15	10	10		20	10	15	10	20	10	
25	10	20	15	10	10		30	10	25	25	25	10		25	10	20	15	10	10		30	10	20	25	25	10	
20	10	15	15	15	10		25	10	15	20	15	10		20	10	10	15	15	10		25	10	15	10	10	10	
25	10	15	20	15	10		25	10	25	20	10	10		25	10	15	20	15	10		25	10	25	20	10	10	
25	10	15	15	20	10		20	10	15	15	20	10		25	10	15	10	10	10		25	10	10	20	20	10	
25	10	15	20	15	10		25	10	20	20	15	10		25	10	15	15	15	10		25	10	20	20	15	10	
25	10	20	15	10	10		20	10	10	20	20	10		25	10	15	15	10	10		20	10	10	10	10	10	
25	10	15	20	10	10		20	10	15	10	15	10		25	10	15	20	10	10		20	10	15	10	10	10	
25	10	20	15	10	10		20	10	10	10	10	10		20	10	20	10	10	10		20	10	10	10	10	10	
25	15	25	20	20	10		25	10	20	10	10	10		25	10	25	20	20	10		25	10	20	10	10	10	
25	10	25	20	20	10		20	10	15	10	10	10		25	10	20	20	10	10		20	10	10	10	10	10	
30	10	20	20	10	10		25	10	15	20	20	10		25	10	20	20	10	10		25	10	15	20	10	10	
30	10	15	20	20	10		25	10	15	20	20	10		25	10	15	20	20	10		25	10	10	15	15	10	
25	10	15	15	20	10		25	10	15	10	15	10		25	10	15	10	20	10		25	10	15	10	20	10	
25	10	25	20	20	10		30	15	30	25	30	10		30	10	30	20	20	10		25	10	15	20	20	10	
25	10	15	20	20	10		25	10	15	20	20	10		25	10	15	20	20	10		25	10	15	20	20	10	
20	10	20	20	10	10		20	10	20	20	10	10		20	10	20	20	10	10		20	10	20	20	10	10	
25	10	15	20	20	10		25	10	15	20	20	10		20	10	15	20	20	10		25	10	15	20	20	10	
25	10	15	20	15	10		25	10	15	20	15	10		25	10	15	20	15	10		25	10	15	20	15	10	
25	10	15	20	15	10		25	10	15	20	15	10		25	10	15	20	15	10		25	10	15	20	15	10	
25	10	15	20	10	10		25	10	15	20	10	10		25	10	10	20	10	10		25	10	10	20	10	10	
25	10	15	20	20	10		25	10	10	20	10	10		25	10	10	20	10	10		25	10	10	20	10	10	
25	10	10	15	15	10		25	10	10	15	10	10		25	10	10	15	10	10		25	10	10	15	10	10	
25	10	10	15	15	10		25	10	10	15	10	10		25	10	10	15	10	10		25	10	10	15	10	10	
25	15	15	20	10	10		25	15	15	20	10	10		25	10	15	15	10	10		25	10	15	15	10	10	





Tabulka 12: Tabulka vnímaných změn jasu při 120 a 400 luxech – ženy (vlevo), muži (vpravo)

120 lx							120 lx							400 lx							400 lx						
Č	O	Ž	Z	M	F		Č	O	Ž	Z	M	F		Č	O	Ž	Z	M	F		Č	O	Ž	Z	M	F	
20	10	15	15	10	10		20	10	10	10	10	10		20	10	15	15	10	10		20	10	10	10	10	10	
20	10	15	10	10	10		25	10	10	10	10	10		20	10	15	10	10	10		25	10	10	10	10	10	
20	10	10	15	10	10		25	10	10	15	10	10		20	10	10	15	10	10		25	10	10	15	10	10	
20	10	10	10	10	10		20	10	10	10	10	10		20	10	10	10	10	10		20	10	10	10	10	10	
25	10	15	15	10	10		25	10	10	10	10	10		25	10	15	15	10	10		25	10	10	10	10	10	
25	10	15	10	10	10		20	10	10	10	10	10		25	10	15	10	10	10		20	10	10	10	10	10	
25	10	10	10	10	10		25	10	15	20	20	10		25	10	10	10	10	10		25	10	15	20	20	10	
20	10	10	15	10	10		25	10	10	10	10	10		20	10	10	10	10	10		25	10	10	10	10	10	
25	10	10	15	10	10		25	10	15	15	10	10		25	10	10	10	10	10		25	10	10	15	10	10	
25	10	10	10	10	10		20	10	10	15	10	10		25	10	10	10	10	10		20	10	10	10	10	10	
25	10	15	15	10	10		25	10	15	20	10	10		25	10	10	15	10	10		25	10	15	15	10	10	
25	10	10	15	15	10		25	10	10	10	10	10		25	10	10	15	15	10		25	10	10	10	10	10	
20	10	10	10	10	10		20	10	10	10	10	10		20	10	10	10	10	10		20	10	10	10	10	10	
20	10	10	10	10	10		20	10	10	10	10	10		20	10	10	10	10	10		20	10	10	10	10	10	
25	10	20	10	10	10		25	10	15	10	10	10		25	10	15	10	10	10		25	10	15	10	10	10	
25	10	15	20	15	10		20	10	10	10	10	10		25	10	15	15	15	10		20	10	10	10	10	10	
25	10	20	15	10	10		20	10	10	10	10	10		25	10	15	10	10	10		20	10	10	10	10	10	
25	10	10	10	10	10									25	10	10	10	10	10								
25	10	10	10	10	10									25	10	10	10	10	10								
20	10	10	10	10	10									20	10	10	10	10	10								
30	10	25	20	15	10									25	10	25	20	10	10								
25	10	15	15	10	10									25	10	15	15	10	10								
20	10	10	10	10	10									20	10	10	10	10	10								
20	10	15	10	10	10									20	10	15	10	10	10								
25	10	10	15	15	10									25	10	10	15	15	10								
25	10	10	20	15	10									25	10	10	10	10	10								
25	10	10	15	10	10									25	10	10	15	10	10								
25	10	10	15	10	10									25	10	10	15	10	10								
25	10	10	15	10	10									25	10	10	15	10	10								
20	10	10	10	10	10									20	10	10	10	10	10								
20	10	10	10	10	10									20	10	10	10	10	10								
20	10	10	10	10	10									20	10	10	10	10	10								
25	10	10	15	10	10									20	10	10	15	10	10								