

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
BIOMEDICÍNSKÉHO
INŽENÝRSTVÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2023

**MARKÉTA
HÁBOVÁ**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta biomedicínského inženýrství
Katedra přírodovědných oborů**

Poruchy barevného vidění a diagnostika

Disorders of colour vision and diagnosis

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Optika a optometrie

Autor bakalářské práce: Markéta Hábová

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Veronika Vymětalová, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: MUDr. Erik Ondek

Kladno 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hábová** Jméno: **Markéta** Osobní číslo: **459712**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra přírodovědných oborů**
Studijní program: **Biomedicínská a klinická technika**
Studijní obor: **Optika a optometrie**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Poruchy barevného vidění a diagnostika

Název bakalářské práce anglicky:

Disorders of colour vision and diagnosis

Pokyny pro vypracování:

Popište fotoreceptory v lidském oku a princip barevného vnímání. Zpracujte problematiku barvosleposti (daltonismu), poruchy barevného vidění a popis monogenního, gonozomálně recesivního, způsobu genetického přenosu. Analyzujte rozšíření poruch v populaci, současné možnosti diagnostiky poruch a možné handicapity u pacientů s poruchou barevného vidění při výběru budoucího povolání. Proveďte vlastního šetření s cílem zjistit rozšíření poruch ve vybraném vzorku populace se zaměřením na rozdělení podle věku a pohlaví, kterým by toto postižení zraku mohlo bránit při výběru budoucího povolání. Při záchytu postižených proveďte vyšetření poruch barevného vidění v rámci jedné rodiny a zmapování genetické dispozice alespoň u tří generací této rodiny. Výsledky analyzujte a vhodně zpracujte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] NUSSBAUM, R.L. et al, Klinická genetika, ed. 6. vydání, TRITON, 2004, 492 s., ISBN 978-80-7254-475-2
- [2] Mihalová R., Otová B., Bobková K., Základy biologie a genetiky člověka, ed. 2. vydání, Karolinum, 2021, 244 s., ISBN 978-80-246-4565-0

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

Mgr. Veronika Vymětalová, Ph.D.

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

MUDr. Erik Ondek

Datum zadání bakalářské práce: **15.02.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2024**

doc. Ing. Petr Kudrna, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA
děkan

Název bakalářské práce: Poruchy barevného vidění a diagnostika**Abstrakt:**

Barvy jsou součástí života každého z nás, tvoří svět okolo nás zajímavější a veselejší. Někteří z nás jsou však nuceni žít bez barev. Tato bakalářská práce se zaměřuje na poruchy barevného vidění a jejich diagnostiku. Lidské oko má 3 základní druhy čípků pro 3 různé základní barvy. V závislosti na tom, kterého z těchto čípků se to týká, rozpoznáváme 3 základní typy poruch barvocitu. Patří mezi ně poruchy čípků protos, deuterops nebo tritos. V případě částečné poruchy dochází k pozměněnému vnímání barvy, respektive ke sníženému vjemu barvy. O závažnější formě poruchy mluvíme v případě, kdy na sítnici chybí receptory zodpovědné za vnímání konkrétní barvy. Cílem této práce je monitoring poruch barvocitu v běžné lidské populaci a zkoumání jejího následného vlivu na kvalitu života. Vyšetřované subjekty byly vybrány mezi běžným dospělým obyvatelstvem. Vyšetřované osoby byly testovány pomocí seřazovacího Farnsworth-Munsellova testu složeného z 16 barevných terčů (0-15) a dále bylo jejich úkolem identifikovat 14 obrázků pomocí Ishiharových tabulek. U osob, kde došlo ke zjištění poruch barvocitu, byl sledován její výskyt v rodině v dalších generacích. Četnost poruch barvocitu mezi obyvatelstvem je velmi malá, nicméně u mužů je riziko výskytu o mnoho vyšší.

Klíčová slova:

vnímání barev, daltonismus, dědičnost, Ishiharův test, Farnsworth-Munsellův test

Bachelor's Thesis title: Disorders of colour vision and diagnosis**Abstract:**

Colors are the part of our lives, it makes the world around us more interesting and cheerful. However some of us are forced to live without colors. This bachelor's Thesis is focused on color vision disorders and diagnosis. Human eye has 3 basic kinds of eye suppositories for 3 basic colors. Depends on which eye suppository is the disorder connected to, there are 3 basic kinds of color vision disorders. There are protos, deuterops or tritos eye suppositories disorders. Partial color vision disorder is when our color perception is changed, respectively when the perception of color is lowered. The disorder is more severe when on retina there is some kind of eye suppository missing. The goal of this Thesis is to determine the occurrence of color vision disorders in common human population and its effect on life quality. Investigated individuals were chosen from common adults. Investigated individuals were tested by Farnsworth-Munsell test consisted of 16 colored targets (0-15) and their next task was to identify 14 pictures from Ishihara's test. Individuals with any kind of colour deficiency or disorder were asked about their families and colour vision disorder occurrence in older generations. The occurrence of disorders is very low and men are at higher risk of color vision disorder than women.

Key words:

color perception, daltonism, heredity, Ishihara's test, Farnsworth-Munsell's test

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád/a poděkovala své vedoucí práce Mgr. Veronice Vymětalové, Ph.D. za veškerou pomoc a podporu při vypracovávání práce a také MUDr. Erikovi Ondekovi za odbornou konzultaci. Děkuji též optice Lentiamo za zapůjčení brýlí pro korekci poruch barevného vidění, Mateřské škole Brejličky Kladno v Moskevské 3083 za spolupráci a Bc. Přemyslovi Kučerovi za zapůjčení Farnsworth-Munsellova testu a barevných Ishiharových tabulek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Poruchy barevného vidění a diagnostika 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), ve znění pozdějších předpisů.

V *Kladně* dne 18.5.2023

.....

podpis

Obsah

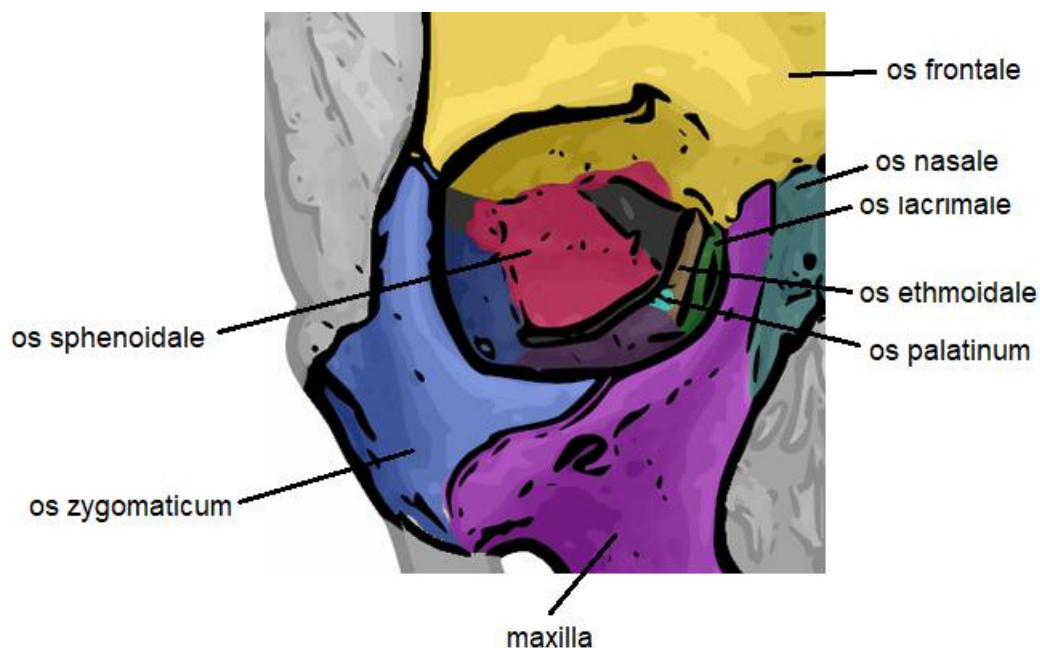
1	Teoretický úvod	9
1.1	Anatomie oka.....	9
1.1.1	Oční koule (bulbus oculi).....	10
1.1.2	Přídavné oční orgány (organa oculi accessoria).....	10
1.2	Světlo a fyziologie vidění.....	11
1.2.1	Vnímání barev	13
1.2.2	Fotoreceptory.....	15
1.3	Gonozomálně recesivní dědičnost	18
1.3.1	Poruchy barvocitu z pohledu genetiky.....	21
1.4	Popis a formy poruch barvocitu.....	22
1.5	Diagnostika a vyšetření barvocitu	26
2	Použité metody.....	27
2.1	Barevné vidění u lidí.....	27
2.2	Průběh samotného měření	31
3.	Experimentální část (výsledky)	33
3.1	Testování brýlí.....	36
4.	Diskuse	42
5.	Závěr	56
	Seznam použité literatury.....	58
	Seznam obrázků.....	61
	Seznam tabulek.....	63
	Příloha A: Obsah příloženého CD	64

1 Teoretický úvod

Úvodní kapitola je věnována teoretickým poznatkům z problematiky lidského oka, barvocitu a jeho poruch. Daltonismus je závažná porucha barvocitu, která se v populaci vyskytuje ve velmi nízkém procentu. U mužů se poruchy barvocitu vyskytují u přibližně 9 % z celkové populace, kdežto u žen, které mají výrazně menší riziko vzniku poruchy, se výskyt poruch barvocitu odhaduje na pouze 0,5 %. Porucha se může týkat buď omezení vnímání jedné nebo několika barev, většinou červené a zelené. U jednotlivců s výskytem poruchy barvocitu bylo provedeno testování. Vyšetření barvocitu je neinvazivní a provádí se pomocí seřazovacích barevných testů nebo pomocí Ishiharových barevných tabulek. V dnešní době existuje možnost poruchu barvocitu korigovat pomocí speciálních brýlí se speciálně vyrobeným filtrem, který má pomáhat barvoslepému vidět téměř jako kdyby poruchu barvocitu neměl. Cílem této práce je zjistit výskyt poruch barvocitu v běžné populaci a pomocí genealogie sestavit rodokmen dědičnosti této poruchy v rodině postiženého poruchou barvocitu. Důležitá součást práce je i otestování korekčních brýlí od firmy EnChroma určených pro osoby s poruchami barvocitu v praxi a ověření jejich funkčnosti.

1.1 Anatomie oka

Lidské oko je složitý orgán umožňující zrakový vjem. Pomocí něho vnímáme světlo, rozlišujeme barvy a též nám poskytuje značnou část informací o našem okolním světě, se kterými jsme následně schopni se v prostoru, jako takovém, orientovat. Orgán zrakového smyslu se, z anatomického pohledu, nachází v očnici, oční dutině. Oko je tvořeno oční koulí (bulbus oculi) a přídatnými očními orgány (organa oculi accessoria). Z latinského jazyka pochází pro tuto kostěnou strukturu, která je tvořena celkem sedmi kostmi, název orbita. Mezi kosti, tvořící orbitu, patří horní čelist (maxilla), lící kost (os zygomaticum), čelní kost (os frontale), čichová kost (os ethmoidale), os lacrimale (slzní kost), klínová kost (os sphenoidale) a os palatinum (patrová kost). Jedná se o párovou strukturu nacházející se v horní části tváře o tvaru pyramidy, jejíž báze se nachází vpředu v oblasti tváře, zatímco její apex (vrchol) směřuje posteromediálně. [1] [19]



Obrázek č. 1: Anatomie orbity – kosti (pozn. os nasale není přímo součástí orbity) [2]

1.1.1 Oční koule (bulbus oculi)

Oční koulí se rozumí útvar téměř kulovitého tvaru o průměru přibližně 23 mm x 24 - 26 mm. Dva segmenty oční koule mají odlišné poloměry křivosti – jedním z těchto dvou segmentů je rohovka o poloměru křivosti 7 – 8 mm, zatímco zadní část tvořená bělimou má poloměr zakřivení 11 – 12 mm. Větší část oční koule je ukryta hluboko v očnici, část, která je mezi dolním a horním víčkem viditelná, je pouze menší přední úsek. [3]

Oční kouli je možno rozdělit na dva póly; přední pól (latinsky označován *polus anterior*) zahrnuje vrchol rohovky a zadní pól (latinsky *polus posterior*), od něhož se mediálně nachází výstup *n. opticus* z oční koule. Tyto póly propojuje *axis bulbi externus*, geometrická oční osa, kterou si ale nesmíme plést se zornou osou oka, označovanou jako *linea visus*, neboť se nejedná o totožnou osu. Oba zmiňované póly jsou propojeny očními poledníky (*meridiani*), příčemž rovník (*equator*) označuje největší obvod oční koule roviny frontální. [3]

Oko je složeno ze 3 vrstev, řadíme mezi ně skléru (bělimu), uveu (živnatku) a retinu (sítnici).

1.1.2 Přídavné oční orgány (*organa oculi accessoria*)

Přídavné oční orgány souhrnně označovány oční adnexa zahrnují víčko (horní a dolní), slznou žlázu a slzné cesty. Víčko, latinsky nazývané *palpebra*, je pro oko velmi důležité, neboť mu poskytuje ochranu (funguje jako taková bariéra) a zároveň díky mrkání dochází ke

zvlhčení povrchu oka pomocí slz. Víčko si můžeme rozdělit na dvě vrstvy – vnější a vnitřní. Vnější vrstva je tvořena kůží, součástí vnitřní vrstvy je spojivka spojující oko s bulbem. Margo víčka je termín označující prostor, kde dochází k „setkání“ horního a dolního víčka (margo v překladu znamená hrana), pod ním dochází k vyústění řas. U řas se nachází Zeissovy a Mollovy žlázy. Směrem k margu se nachází Meimbomské žlázy, které jsou odpovědné za produkci tukového sekretu, který je velmi důležitou složkou slzného filmu. [3]

1.2 Světlo a fyziologie vidění

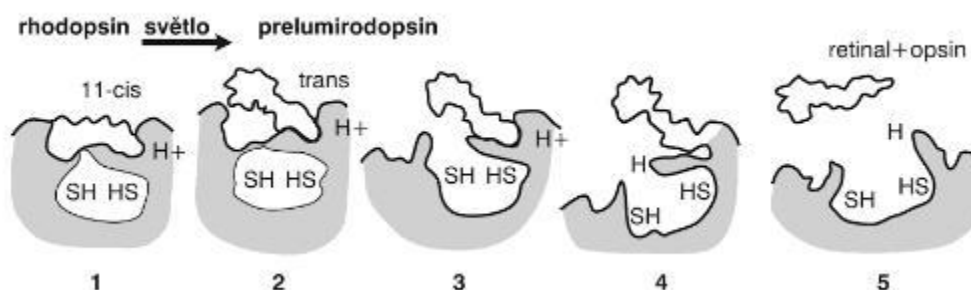
Zrakový vjem je výsledek komplexního procesu, kdy jsou světelné paprsky soustřeďovány optickým systémem na vrstvu receptorů nacházejících se na sítnici (lat. retina). V oku se nachází též systém neuronů, které vedou signál od receptorů do mozku, kde dochází k jeho zpracování. Informace získávané prostřednictvím zraku jsou pak přiváděny do zrkové korové oblasti cestou capsula interna posledním neuronem zrkové dráhy. Oko si lze, stejně jako u fotoaparátu, představit jako soustavu čoček, která shromažďuje a usměrňuje paprsky světla směrem dovnitř. Zatímco duhovka (iris) funguje jako clona regulující množství světelných paprsků, které do oka projdou, retina funguje jako snímací prvek a fotoreceptory – tyčinky a čípky, které se v ní nacházejí, zachycují okolní světlo. Čípky se v největší hustotě nacházejí v oblasti zvané žlutá skvrna (macula lutea). Centrální paprsek prochází na střed žluté skvrny, do prohlubně nesoucí název fovea centralis. Jedná se o část nacházející se na vrcholu optické osy oka (lat. linea visus) považovanou za místo nejostřejšího vidění. U žijícího člověka má sytě červené zabarvení, zatímco u mrtvé osoby zabarvení žluté. Přibližně 4 mm mediálním směrem od žluté skvrny se nachází místo – papila, ze kterého vystupuje z oční koule n. opticus (2. hlavový nerv). Na sítnici se dále nachází slepá skvrna (macula caeca), která neobsahuje žádné světločivé buňky. [4]

Světelné záření do oka proniká přes vnější oční segment – konkrétně tvarem vyboulenou rohovku (cornea). Duhovku (iris) si lze přirovnat ke kruhovému svaly, který se na základě množství světelného záření buď roztahuje (mydriáza – zornička se reakcí na menší množství světla roztahuje), nebo se stahuje (mióza – zornička se reakcí na větší množství světla stahuje). Dále do oka světlo vstupuje otvorem, který se nachází ve středu iris, jde o tzv. zornici, bývá označována jako panenka (lat. název pupilla), která svůj průměr mění dle množství procházejícího světelného záření – při mydriáze se roztáhne až na 8 mm, zatímco při mióze se při denním osvětlení stáhne až na 2 mm. Procházející světelné záření však na tento děj nemá vliv jako jediné, velikost zornice je též ovlivněna užitím některých látek, či léčiv,

dále záleží, v jakém emočním rozpoložení se daná osoba zrovna nachází a obecně má jistou spojitost s autonomním nervovým systémem, kdy mydriáza je spojována se sympatikem, kdežto mióza je spojována s parasympatikem. Zatímco sympatikus se uplatňuje v organismu při vybuzení a projevuje se např. zrychlením srdeční činnosti, parasympatikus nachází uplatnění při zklidňování, a tudíž se srdeční činnost zpomaluje. Pomocí činnosti svalů dochází k ohybu a změnám zakřivení čočky (lens) – tomuto procesu, při němž se mění optická mohutnost oka (vyklenutím nebo zploštěním oční čočky) a tím dochází k zaostřování na různě vzdálené předměty, říkáme akomodace. Toto označení je odvozeno od slova „accomodare“, což znamená přizpůsobit se. Jde tedy o schopnost oka přizpůsobit se ve věci zaostřování na různě vzdálené předměty/objekty. V poslední fázi světelné paprsky dopadají na retinu, sítnici, kde je následně vyvolán receptorový potenciál. Zde na sítnici dochází ke vzniku vzruchů, které jsou dále přeneseny do kůry mozkové a zde se nakonec průběh samotného zrakového vjemu odehrává. [4]

Absorbováním fotonů zevními segmenty fotoreceptorů dochází k začátku zrakového vjemu. V zevních segmentech tyčinek a čípků, tedy fotoreceptorů, se nachází diskové membrány, v nichž je uložen zrakový pigment. K obnově celého zevního segmentu dochází přibližně 10 dnů. Pod názvem rodopsin, zrakový purpur, se skrývá tyčinkový pigment, který je složen ze složky schopné absorpce světla – chromatorfor a protein opsin. Chemicky je chromatorfor retinaldehyd, aldehyd vitaminu A (vitamin A1 = retinol). Vyskytuje se ve dvou formách; v 11-cis formě, která svým tvarem přesně zapadá do opsinové části molekuly a v trans-formě, ve které se vyskytuje po ozáření, kdy vzniká prelumirodopsin, který se posléze mění na lumirodopsin, poté na metarodopsin I a metarodopsin II. Finální fáze zahrnuje hydrolýzu rodopsinu na trans-formu retinalu a opsin a dochází k ní v retinálním pigmentovém epitelu a zároveň vyžaduje energii ve formě ATP (adenosintrifosfátu). Na základě těchto dějů vznikají při osvětlení v receptorech rané receptorové potenciály. Tyto potenciály jsou zaznamenávány elektrodami při snímání klidových potenciálů sítnice u vyšetření EOG (elektrookulografie). Tyčinkové a zrakové pigmenty se vzájemně liší, přesto je reakce na světlo podobná jako v tyčinkách. K přenosu světla je potřeba velké množství energie, přičemž zdrojem energie je glukóza a glukózový cyklus, který pro změnu spotřebovává velké množství kyslíku – podobné množství kyslíku pak vyžaduje i tkáň mozková. Celý tento děj je zahájen glykolýzou na produkt pyruvát, který poté za výskytu kyslíku vstoupí do mitochondriálního řetězce. Glukóza pak může být zahrnuta do metabolismu pentózofosfátového cyklu, kde se již kyslík nevyskytuje, ten je pak uplatňován

v regeneračním cyklu rodopsinu pro ochranu retiny před oxidativním stresem. Při regulování pH v extracelulárním prostoru se pak uplatňují Müllerovy buňky. [3] []



Obrázek č. 2: Reakce rodopsinu na světelné záření. [3]

1.2.1 Vnímání barev

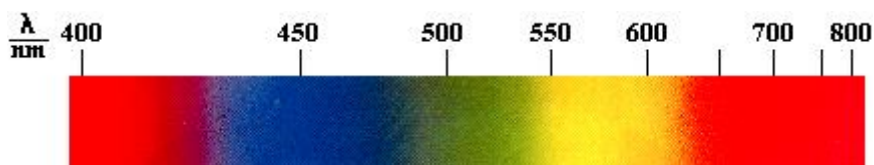
Jako světlo označujeme příčné elektromagnetické vlnění o rozpětí vlnových délek přibližně 390 nm až 790 nm (tyto hodnoty se v závislosti na literatuře mohou lehce odlišovat, přesto však rozpětí zůstává přibližně stejné), na tyto paprsky je lidské oko citlivé a vyvolávají v něm zrakový vjem. Za normálních podmínek jsou paprsky o vlnové délce méně než 400 nm pohlcovány čočkou. [3] Toto vlnění je šířeno různým prostředím, nicméně rychlost jeho šíření je ovlivněna indexem lomu prostředí, ve kterém se zrovna vlnění nachází. Jako nejvyšší rychlost, kterou se fyzikální objekt může pohybovat, je označena konstanta známá jako velikost rychlosti světla ve vakuu, která nese označení c a má rozměr $c = 299792458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro účely výpočtu bývá tato konstanta zjednodušena v závislosti použité jednotky na $c = 3 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nebo $c = 3 \times 10^5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. [24] Pro výpočty je používán tento vzoreček:

$$n = \frac{c}{v} \Rightarrow c = n \cdot v ,$$

kde c je zmiňovaná rychlost šíření světla ve vakuu, n značí index lomu prostředí, ve kterém se vlnění šíří a v je pak rychlost, kterou se vlnění v daném prostředí pohybuje. U látkového prostředí se jedná o menší velikost rychlosti světla, nicméně prostředí není jediný faktor, který rychlost ovlivňuje, ale např. je ovlivněna i frekvencí světelného záření. Světelné záření, stejně jako ostatní druhy vlnění, charakterizuje též vlnová délka (vyjadřovaná v jednotkách nm). Značíme ji λ a z následujícího vzorce vyplývá, že jde výpočtem o obrácenou hodnotu frekvence:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

kde c označuje rychlost světla ve vakuu a f značí frekvenci světla udávanou v jednotkách Hz (s^{-1}).

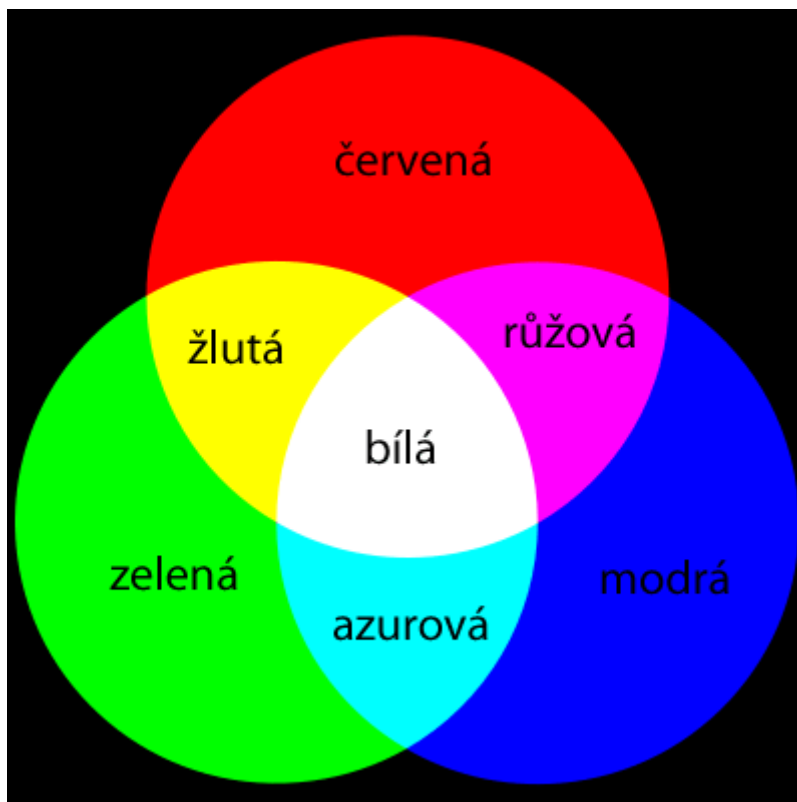


Obrázek č. 3: Barevné spektrum.[5]

Pod slovem barva se skrývá světelné záření o různých frekvencích, které vyvolávají v lidském oku různý zrakový vjem. Toto barevné spektrum, které máme schopnost rozlišit, bývá přibližně o určitých vlnových délkách. Každá vnímaná barva zaujímá určité rozmezí vlnových délek, které vnímáme jako spoustu dalších různých odstínů dané barvy. S ohledem na individuální zrak každého jednotlivce a na základě jeho určitých genetických predispozicí se může interval vnímaných vlnových délek lehce odlišovat osoba od osoby – záleží též na adaptabilitě oka vůči jednotlivému záření. Na jedné straně tento interval začíná fialovou barvou (o vlnové délce přibližně 390 nm) a končí barvou červenou na straně druhé (vlnová délka přibližně 790 nm). Odstíny, ve kterých je přidáno bílé světlo, se nazývají odstíny nenasycené, zatímco barvy, které považujeme za základní (sem patří červená, zelená a modrá), považujeme za odstíny nasycené. [3]

Přestože by se nám podařilo při měření zajistit všem osobám stejné podmínky (osvětlení, teplotu aj.), velmi stěží bychom dosáhli identických výsledků, co se týče spektrální citlivosti očí, u všech zúčastněných. To je důvod, proč se pro účely výpočtu spektrální citlivosti a jejího průběhu u jednotlivých osob využívá smluvený průběh citlivosti podle CIE (Comission Internationale de l'Eclairage). Lidské oko dosahuje nejvyšší citlivosti při vlnové délce o hodnotě přibližně 550 až 555 nm, což považujeme za odstín výrazné žlutozelené barvy. [6] Pokud zvýšíme intenzitu světla na maximum, dochází ke vjemu žlutobílé barvy. Tři čípkové pigmenty, nacházející se v sítnici lidského oka, mají absorpční maximum 445, 535 a 570 nm. Tyto vlnové délky představují modrý, zelený a žlutý pigment. Co se týče citlivosti, jsme schopni rozeznat rozdíl přibližně 1 nm (takto rozlišujeme odstíny mezi sebou dle zdánlivých podtonů). [25] Oko je též schopno, po chvilce adaptace, při vysoké intenzitě světla rozeznat i osvětlení vlnové délky cca 313 nm – např. světlo rtuťové výbojky. Pak je možné,

bez předchozího adaptování, detekovat i laserové záření vlnové délky přibližně až 900 nm. [3]
[17]



Obrázek č. 4: Základní barvy a jejich míchání. [5]

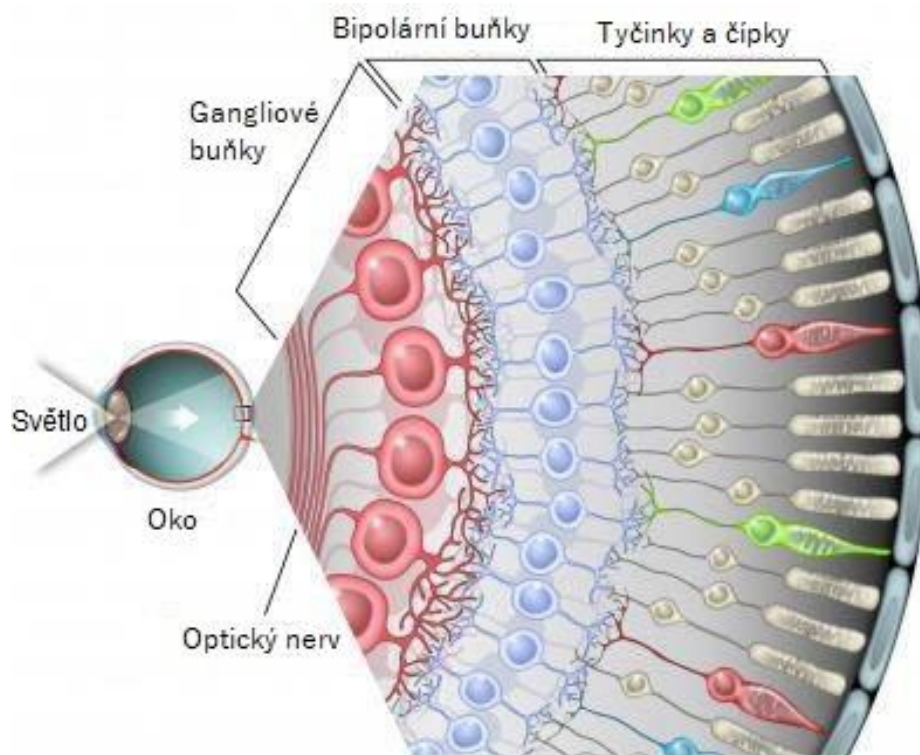
Světlo, které svým okem vnímáme, však není dáno jednoznačnou frekvencí, nýbrž je tvořeno směsí světelného záření o různých hodnotách frekvence. Konečný barevný vjem, který dané vlnění vyvolá, je pak určen účinky jednotlivých složek, které tuto směsí světelného záření vytváří. Správným poměrem určitých barevných složek získáme bílé světlo. Vědní obor, který se soustřeďuje na mísení světél o různých barevných odstínech, se nazývá kolorimetrie. V praxi dochází k uplatnění např. při zaznamenávání a reprodukování signálu pomocí barevné televize. [6]

1.2.2 Fotoreceptory

Výsledek barevného vjemu ovlivňuje i naše okolní prostředí (např. viditelnost v místnosti – světelné podmínky) včetně toho, jaká část světlocitlivých buněk je právě v danou chvíli aktivní. Máme hned několik typů vidění, které je regulováno dle denní doby – jinak se kouká po ránu, a jinak se bude koukat večer, kde již začíná zapadat Slunce a bývá tak

později tma. Prvním typem je fotopické vidění (tedy denní vidění), které je obstaráno zejména čípkami – těch máme aspoň 7 milionů. [3]

Čípky jsou fotoreceptory, které mají o poznání vyšší práh dráždivosti s mnohem větší ostrostí systému a uplatňují se za jasného denního světla, a zároveň také stojí za barevným viděním. Druhým typem fotoreceptorů umístěných na sítnici jsou tyčinky, máme jich přibližně 130 milionů. Pomocí tyčinek máme zajištěné skotopické (tedy noční) vidění. Taková pomyslná přechodová oblast je pak tvořena mezopickým viděním. Co se týče citlivosti, největší citlivost u čípků je přibližně 555 nm, zatímco u tyčinek je to vlnová délka 507 nm. Ovšem neznamená to, že existuje pouze to, co jsme schopni vidět očima, existuje také záření, které se vlnovými délkami pohybuje mimo rozpětí, které jsme schopni zachytit. Pro příklad UV záření s vlnovou délkou menší než 313 nm může při vyšší dávce způsobovat velmi bolestivé záněty spojivek. Záření o vlnové délce menší než 313 nm je pohlcováno oční čočkou. Infračervené záření, mající vlnové délky v rozpětí 800 nm až 1 mm, proniká až do retiny, kde způsobuje její ohřev. Krátkodobě by nemělo uvedené ohřívání tolik škodit, přesto při dlouhodobé a intenzivnější expozici hrozí poškození části, či celé sítnice. Infračervené světlo mající vlnovou délku nad 1 350 nm silně absorbuje rohovka a oční mok, kde hrozí díky ohřevu sítnice až zakalení oční čočky. Nejzásadnějším rizikem a nejvíce zrádné na tomto záření je jeho neviditelnost a hrozba poškození a důsledky jeho vlivu a účinků. V případě práce v prostředí, kde dochází ke styku s tímto zářením, je pak nezbytné dodržovat bezpečnostní řád a dbát zvýšené opatrnosti. [3] [18]



Obrázek č. 5: Buňky a fotoreceptory vyskytující v sítnici. [7]

Mezi tmou a světlem máme výrazný přechod, na který si oko musí zvykat po určitou dobu (co jiné světelné podmínky, tím odlišná doba), tomuto času říkáme adaptace. Máme-li přechod mezi tmou a světlem, oko potřebuje výrazně kratší dobu k adaptaci, a sice 5 minut. Zatímco při adaptaci z většího na menší, až nedostatečné osvětlení, oko potřebuje přibližně čtrnásovek této hodnoty, tedy 20 minut. Použitím červeného osvětlení je možnost tuto dobu výrazně ovlivnit, či dokonce eliminovat. Je to díky tomu, že červené světlo (650 – 750 nm) se nachází v hodnotách, které dráždí tyčinky pouze nepatrně a nejsou na ni tedy citlivé, zatímco čípky zůstávají stále aktivní. To tedy znamená, že osoba mající na sobě červené brýle, vidí na světle dobře, přestože má stále adaptované tyčinky na tmu, neboť červené brýle propouští pouze část světla, která vyvolává reakci u čípků. Tohoto jevu je využíváno např. v rentgenologii nebo při nočních vojenských operacích, kde je potřeba zrychlit adaptaci na tmu. Testováním oka na citlivost na jednotlivé složky barevného spektra za rozdílných světelných podmínek, získáme tím rozdílné křivky citlivosti, přičemž za fotopických podmínek dosahuje čípková citlivost maximum při vlnové délce 555 nm (tato hodnota se blíží zelenožluté barvě), kdežto skotopická čípková citlivost se pohybuje na maximum za kratších vlnových délek, při hodnotě 507 nm (tedy modrozelená barva). Skotopické pásmo vidění je obecně při nižší hladině osvětlení, kdy oko nevnímá barvy. Mesopickým pásmem pak

nazýváme intenzitu osvětlení, kdy jsou aktivní jak čípky, tak i tyčinky. Fotopické pásmo pak pokrývá barevné vidění. Termínem fotochromatický interval rozumíme rozdíl prahu citlivosti pro světlo a pro určitou barvu. Za podmínek, kdy jsou přítomny v sítnici tři různé fotoreceptory, přičemž každý je citlivý pro jinou základní barvu (máme tři základní barvy – červená, modrá a zelená), má oko schopnost trichromatického barevného vidění. Na jednotlivých barvách rozlišujeme dále jas a saturaci. Nahodilou kombinací základních barev získáme téměř jakoukoliv barvu. [3] [16]

V případě dopadu světelného paprsku na rozhraní dvou prostředí, přičemž každé má jinou vlastnost, dochází k částečnému odrazu světla a částečnému lomu do druhého prostředí. Tento jev se nazývá odraz a lom světla. V závislosti na povrchu dochází k odrazu dopadajícího světla, či k jeho pohlcování. Jestliže nedochází k odrazu žádné barevné složky, pak se jedná o černou barvu. [20]

Z hlediska elektrofyziologie barevného vidění dochází ke zpracování informace o barvě v sítnici pomocí horizontálních buněk, které signály přijímají z čípků a v reakci na stimulování sítnice rozdílnými složkami barevného světla se projevují vznikem elektrických potenciálů (tzv. S-potenciály). Termín oponentní kódování značí jev, kdy, zatímco červená barva způsobuje hyperpolarizaci, zelená barva způsobuje depolarizaci. Dalším příkladem je kdy modrá barva způsobuje hyperpolarizaci a žlutá působí depolarizaci. Podobný průběh je i v případě vyšších etážích zrakové dráhy v podobě on-reakce gangliových buněk na začátku osvětlení a následně off-reakce po vypnutí osvětlení. [3]

1.3 Gonozomálně recesivní dědičnost

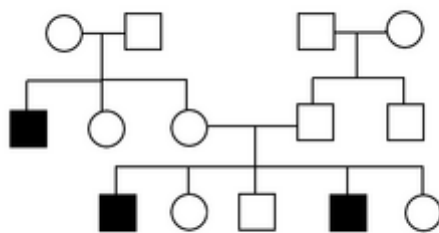
Organismy odlišující se vzájemně pohlavím, mají součástí genomu nejen chromozomy, které s pohlavím nesouvisí (jedná se o tzv. autozomy), ale také pohlavní chromozomy, zvané gonozomy, Gonozomální chromozomy se od autozomálních chromozomů odlišují svým tvarem, strukturou a samozřejmě i geny, kterých jsou tyto chromozomy nositeli. Gonozomy bývají označovány jako chromozomy X a chromozomy Y. Pohlaví, které ve svých buněčných jádrech nese pár shodných chromozomů – XX, se nazývá homogametické pohlaví. Heterogametické pohlaví je pak termín pro případ, kdy jsou gonozomy jedince odlišné, tím pádem, zatímco polovina haploidních gamet obsahuje chromozom X, druhá část haploidních gamet nese chromozom Y. Za normálních podmínek je u lidí jako homogametické pohlaví označováno pohlaví ženské (XX) a jako heterogametické pohlaví je označováno pohlaví

mužské (XY). Takové chromozomové určení pohlaví je považováno za savčí typ, nese název *Drosophila*.

Kromě tohoto chromozomového určení však existují i další, nicméně používá se u ptáků, nikoliv u savců – jde tedy o ptačí typ a nese název *Abraxas*. U tohoto chromozomového určení je považováno samičí pohlaví za heterogametické (na rozdíl od lidí, kde ženské pohlaví je považováno za homogametické) a samčí pohlaví je pak homogametické. Tato kategorie zahrnuje většinou ptáky (proto také ptačí typ chromozomového určení) a motýly, ale také plazy, obojživelníky a některé z ryb. Podobně jako u lidí, dochází k přenosu poloviny samčích a poloviny samičích genů od rodičů potomkům. Geny jsou ukládány do homologických, či nehomologických částí pohlavních chromozomů – gonozomů. Na základě umístění těchto genů rozlišujeme buď znaky pohlavně vázané (v takovém případě jsou geny ukládány do nehomologické části chromozomu), nebo znaky neúplně pohlavně vázané (geny se ukládají do homologických částí chromozomu). Podle místa, kam se geny uloží, jsou způsoby dědičnosti odlišné. [8]

Pokud se geny nachází na gonozomu, nikoliv na autozomu, jedná se o gonozomální (tedy pohlavní) dědičnost – konkrétně se geny nachází na nehomologní části chromozomu X. V případě mužského heterogametického pohlaví mluvíme s ohledem na tyto geny o tzv. hemizygotní konstituci. [9]

Gonozomální dědičnost rozdělujeme na dominantní a recesivní. V případě recesivní gonozomální dědičnosti (označovaná zkratkou GR – gonozomálně recesivní) jsou postiženi zejména muži. Ženské pohlaví je pro X homozygotní nebo heterozygotní – v případě heterozygotek se jedná o přenašečky dané choroby. V rodokmenech, které zachycují GR dědičnost onemocnění, se vyskytuje typický přeskok genu mezi generacemi. Muž trpící GR chorobou má dcery heterozygotky – tedy přenašečky choroby, jejichž alely obsahují mutaci způsobující chorobu, ale zároveň mají i jeden chromozom bez výskytu mutace, proto k projevu choroby nedochází. Synové muže s GR onemocněním však budou zdraví, neboť získají od otce chromozom Y a od matky chromozom X bez výskytu mutace (za předpokladu, že daný chromozom od matky mutaci nemá), z tohoto důvodu jim onemocnění nehrozí. Synové heterozygotek, přenašeček choroby s jednou recesivní alelou obsahující mutaci, mají z 50 % pravděpodobnost, že budou nakaženi. Mezi GR onemocnění řadíme hemofilii A, hemofilii B (což je dědičná porucha tvorby faktorů pro srážení krve, která vyvolává krvácivost), daltonismus (porucha vnímání/rozeznávání barev), nebo např. těžká porucha svalové funkce (známá jako svalová dystrofie Duchennova typu). [9]



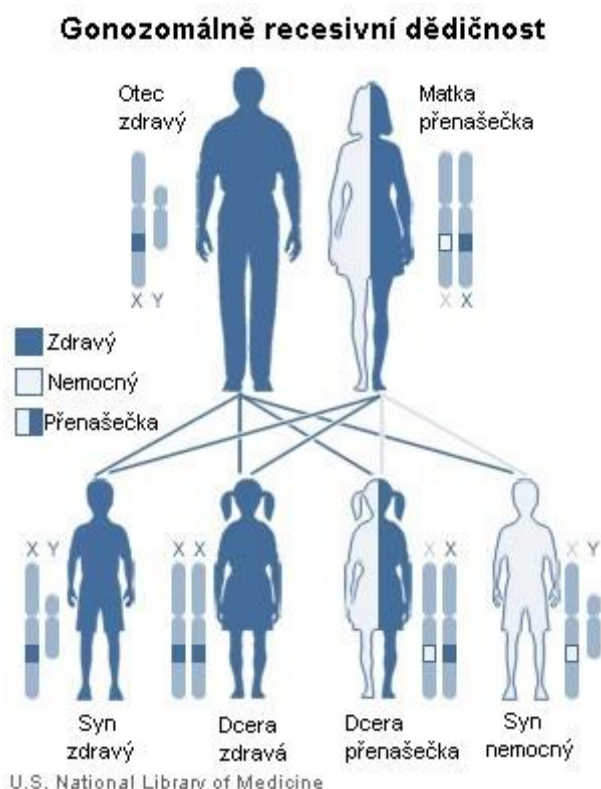
Obrázek č. 6: Ukázka rodokmenu s gonozomálně recesivně dědičným znakem. [10]

Geny, které jsou součástí gonozomů, nejsou mezi ženským a mužským pohlavím rovnoměrným způsobem segregovány, z tohoto důvodu jsou v rodokmenech viditelné a snadno rozpoznatelné nerovnosti mezi jednotlivci. Na základě těchto nerovností a dalších znaků se dá snadno poznat, o jakou dědičnost se jedná. V gonozomální dědičnosti se geny vážou na gonozomy X a Y, nicméně z praktického hlediska je důležitá vazba na chromozom X. Geny, které jsou klíčové pro diferenciaci mužského pohlaví (pohlavními znaky rozumíme např. růst vousů, mužská tělesná konstrukce, tvorba mužských hormonů aj.). Holandrická dědičnost souvisí s geny, které jsou na gonozom Y vázané, tím pádem se výlučně týká mužského pokolení – u žen je absence tohoto gonozomu. V autozomální dědičnosti jsou obě alely v páry geneticky aktivní. V gonozomální dědičnosti je u žen však aktivní pouze jedno X, druhé inaktivní X se nazývá Barrovo tělíčko. U mužského pohlaví je též aktivní pouze jedno X, neboť za normálních okolostí má pouze jedno X. U žen, které mají dva gonozomy X, je pak zcela na náhodě, od kterého rodiče zdědí které X. Co se týče typů gonozomální dědičnosti – recesivní a dominantní – u ženy je možné, že polovina všech buněk bude obsahovat mutovaný gen jako funkční alelu, nicméně u muže není důležité, zda zděděná alela je recesivní, či dominantní, pokaždé se taková zděděná alela projeví. [11] V tuto chvíli se dá říci, že u X-vázané dědičnosti mezi recesivní a dominantní dědičnosti není příliš velký rozdíl.

Žena, jež je pro X-vázaný gen heterozygotkou, má zhruba polovinu svých buněk tvořenou funkční alelou a druhou polovinu buněk obsahující abnormální alelu – mutovaný gen. Přenašečky mohou mít buď více buněk s normální funkční alelou, anebo naopak mohou mít více buněk s mutovaným genem. [11]

1.3.1 Poruchy barvocitu z pohledu genetiky

V případě gonozomálně recesivní dědičnosti se recesivní znak u žen projeví pouze v případě, kdy zdědí obě alely recesivní, a tudíž bude recesivní homozygotka. Na rozdíl od žen u muže stačí zdědit pouze jednu recesivní alelu. Má mutovaný gen ve svém genotypu a mutace se projeví. [11] Mužské pohlaví je tedy gonozomálně recesivním onemocněním postiženo častěji než pohlaví ženské – jedná se o genotyp X_aY . [8] Žena postižená gonozomálně recesivním onemocněním má genotyp X_aX_a , jedná se však o výjimečnou situaci, ke které nedochází příliš často. Tím pádem tedy tento typ dědičnosti má četnější výskyt u mužů. [22]



Obrázek č. 7: Ukázkové schéma dědičnosti gonozomálně recesivního onemocnění. [12]

Z obrázku výše znázorňuje potomstvo ženy přenašečky s genotypem $X_A X_a$ a zdravého otce s genotypem $X_A Y$. Potomci takového páru budou z 50 % dcer přenašečky, zbylých 50 % dcer bude zdravých a synové budou z 50 % zdraví a z 50 % budou postiženi GR onemocněním. Recesivní alela z matčiny strany se přenese na 50 % potomků.

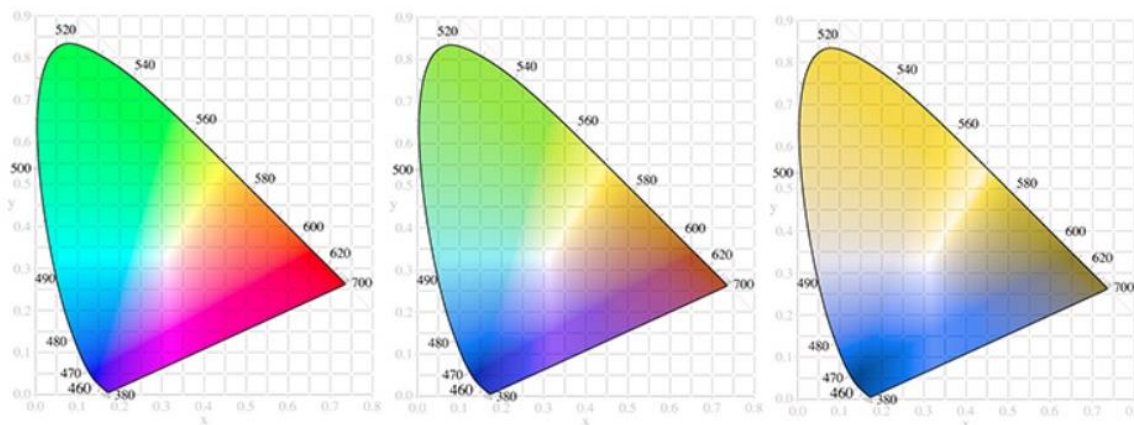
Mezi další příklady gonozomálně recesivně dědičných onemocnění řadíme daltonismus (barvoslepost), Duchennovu muskulární dystrofii, hemofilii a Beckerovu muskulární dystrofii, [8]

Výskyt poruch barvocitu v populaci je přibližně 9 % mužů a pouze 0,4 % žen. Název daltonismus je odvozen od britského přírodovědce Johna Daltona, který sám touto nemocí trpěl a koncem 18. století ji definoval. [15]

1.4 Popis a formy poruch barvocitu

Poruchy barvocitu existují buď získané, nebo vrozené a dále se rozdělují podle závažnosti poruchy, a také o kterou barvu se jedná. Někteří lidé však schopnost rozeznávat barvy postrádají úplně – v tomto případě se většinou jedná o poruchu čípků, nebo mohou v sítnici chybět úplně. V takovém případě se jedná o monochromazii. Zároveň bývá doprovázena nystagmem a poruchou centrální zrakové ostrosti, nicméně se vyskytuje i forma se zrakovou ostroť v normě. Tento typ poruchy se ovšem vyskytuje velmi vzácně. Porucha barvocitu, která je mírnějšího rázu, se nazývá dichromazie a vyznačuje se absencí rozlišování jedné ze základních barev. Podle toho, která barva není rozlišována, rozlišujeme protanopii (při ní jde o poruchu vnímání červené barvy s tím, že na sítnici nejsou přítomny receptory citlivé na červenou barvu), deuteranopii (porucha vnímání zelené barvy – jedinec postrádá zelené receptory) a tritanopii (porucha vnímání modré složky světla). Existuje další typ poruchy barvocitu – nazývá se anomální trichromazie a jedná se o situaci, kdy postižený má trichromatické vidění, ale poměr vnímání jednotlivých základních barev je pozměněný. Opět je dále rozdělována podle toho, které základní barvy se pozměněné vnímání týká. Prvním typem je protanomálie (při ní je snižená citlivost pro červenou barvu), deuteranomálie (snižovaný vjem zelené barvy) a tritanomálie (snižovaná citlivost pro modrou barvu). Osoba s protanomálií má tedy poruchu vnímání červené barvy a osoba trpící deuteranomálií vnímá nesprávně zelenou barvu. Často osoby tyto barvy vnímají až pokud jsou velmi syté nebo silně zbarvené, za opačných podmínek je vnímají jinak. V případě vrozených poruch se nejčastěji jedná o poruchu/snížení citlivosti zelené a červené barvy. [3] [26]

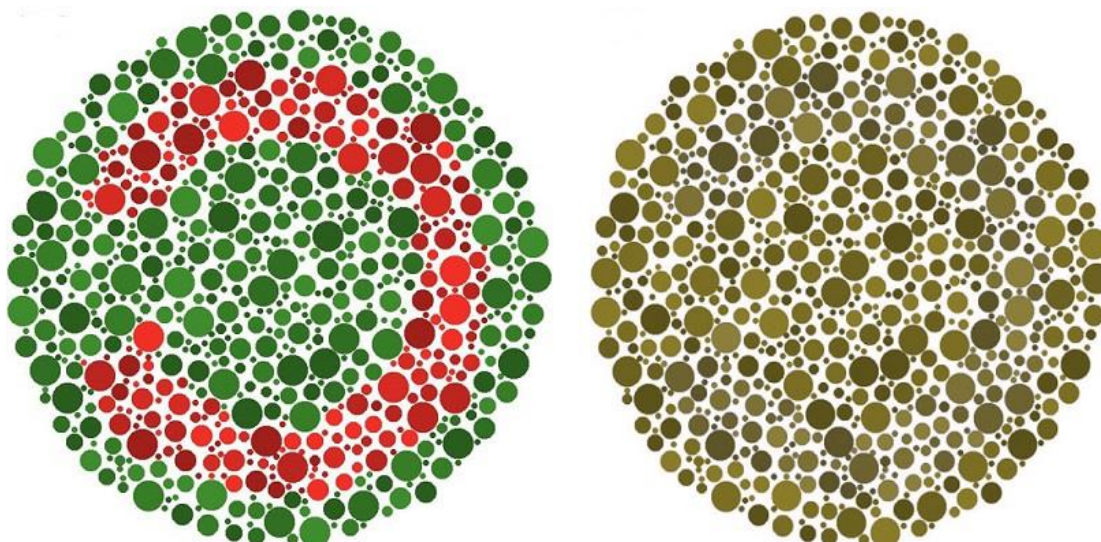
U jedinců s červeno-zelenou barvoslepostí se žlutá škála rozšiřuje, dokud nedojde u závažnějších případů zcela k vytlačení červené a zelené škály barev. Tyrkysová barva se postupně mění na bílou (neutrální odstín), zatímco červená část fialové barvy zmizí, díky čemuž pak fialová barva vypadá jako modrá. [13]



Obrázek č. 8: Zobrazení vidění jednotlivých barev u jedinců s červeno-zelenou barvoslepostí. [13]

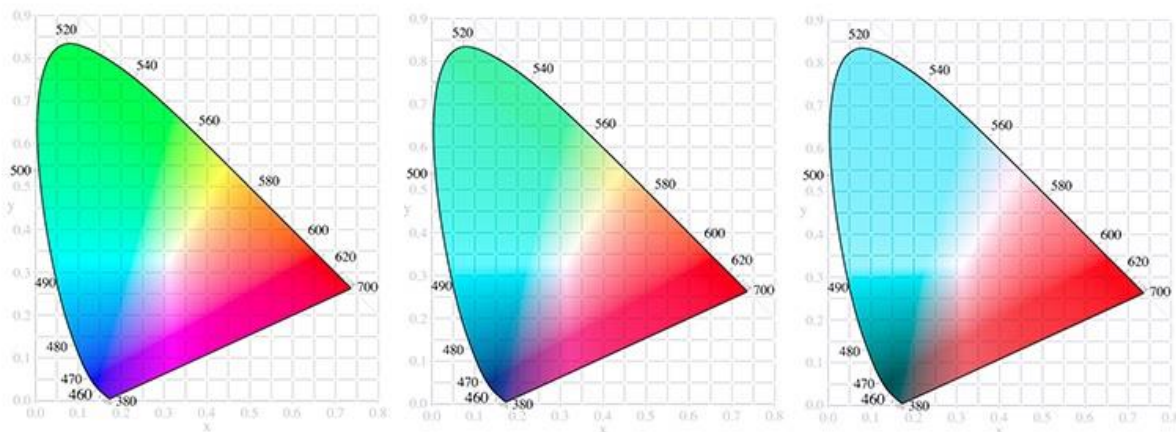
Osoby s protanopií mají kratší spektrum viditelných barev než lidé s normálním barvocitem a, v porovnání se zdravými jedinci, modro-zelená barva se jeví jako šedá barva. Tato šedá barva pak spektrum rozděluje na 2 části. Červenou barvu s lehkým fialovým podtónem je též vnímána jako šedá. Osoby trpící poruchou deuteranopie vnímají část, která zdravým lidem připadá zelená, jako šedou a tato šedá pak také spektrum vnímaných barev rozděluje na 2 části. Fialovo-červená barva se též jeví jako barva šedá. Dá se tedy říci, že v případě červeno-zeleného testu vidí osoby s barvoslepostí typu protan a deuteran obrázky velmi podobně.

V případě protanomálie a deuteranomálie se části vnímané osobami s protanopií a deuteranopií jako šedé, zdají být neurčité barvy s našedlým tónem. Hlavní zvláštností tohoto typu poruch je tedy to, že modrá a žlutá barva se jeví jako výrazné tóny v porovnání červené a zelené, které jsou nevýrazné a neznatelné. [23]



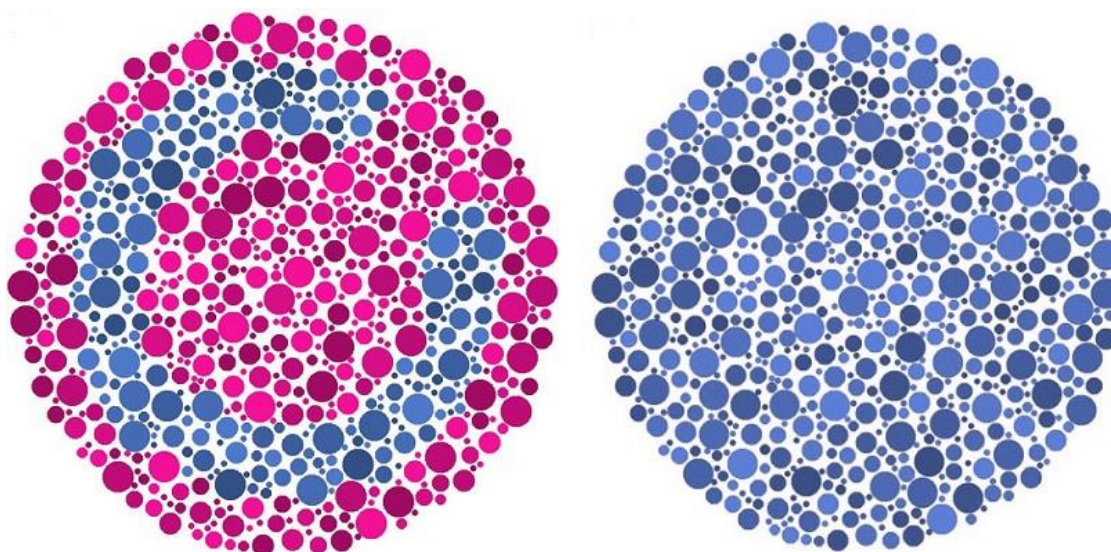
Obrázek č. 9: Porovnání, jak vidí červeno-zelený test zdraví jedinci (obrázek vlevo) vs. barvoslepí typu protanop-deuteranop (obrázek vpravo). [13]

Čím závažnější formou tritanové barvosleposti jedinec trpí, tím méně zářivými se zdají odstíny modré barvy. Zatímco žlutá barva se jeví jako bílá a zelená vypadá jako tyrkysová barva, modrá část nacházející se u fialové barvy zmizí a zdá se červenější. [13]



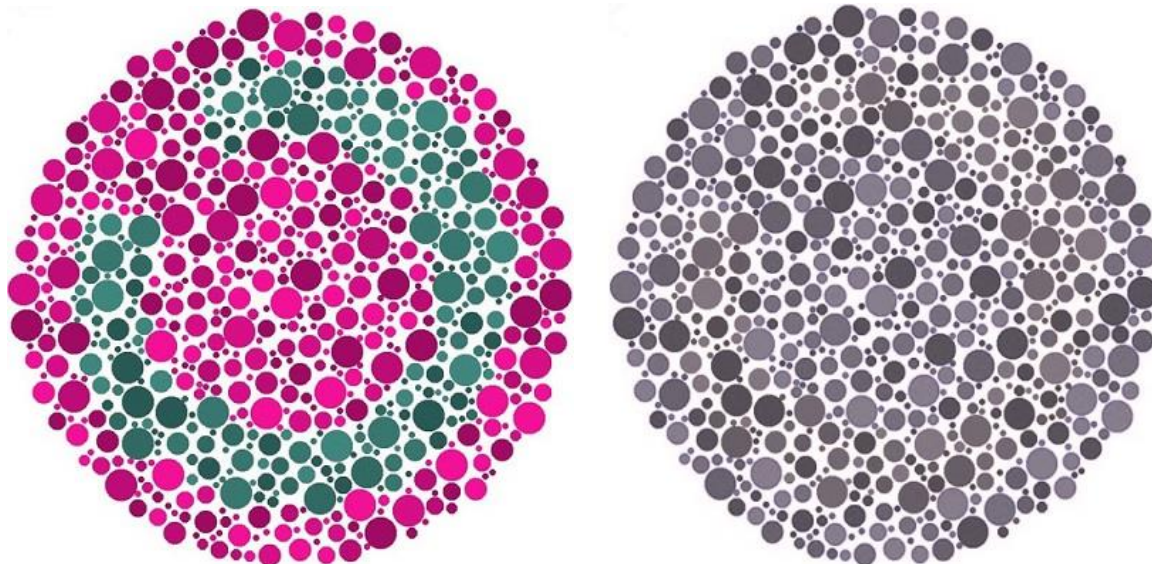
Obrázek č. 10: Jak vidí barvy osoba s tritanovou barvoslepostí. [13]

Ukázka fialovo-modrého/protan testu barevného vidění s výsledkem pro protanopy, kteří na obrázku pozorují pouze modrou barvu bez jakéhokoliv obrazce:



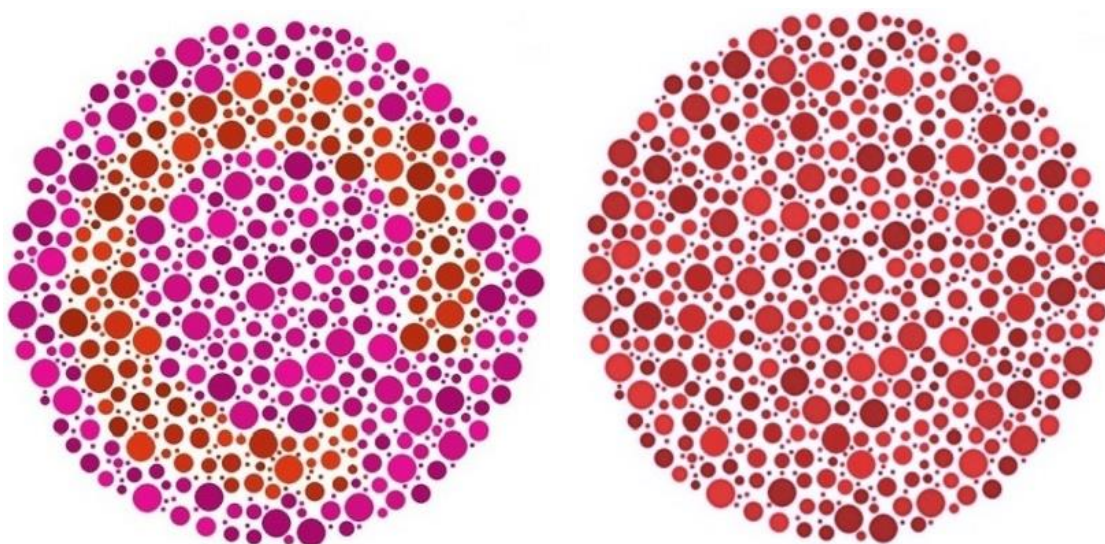
Obrázek č. 11: Výsledek testu protan – vlevo pohled zdravého jedince, vpravo pohled protanopa. [13]

Další obrázek zobrazuje rozdíl pro porovnání, jak vidí obrazec, v porovnání s osobami se zdravým rozlišováním barev, osoba trpící barvoslepostí typu deuteranop.



Obrázek č. 12: Vlevo zachycen obrázek, jej vnímají osoby se zdravým barvocitem, vpravo pohled osoby s deuteranopíí. [13]

Následující obrázky představují pro porovnání pohledu na obrázek z fialovo-červeného/tritan testu.



Obrázek č. 13: Fialovo/červený tritan test. Vlevo pohled osoby se zdravým barvocitem, vpravo osoba s poruchou typu tritan. [13]

1.5 Diagnostika a vyšetření barvocitu

V klinické praxi je barvocit nejčastěji vyšetřován pomocí pseudoizochromatických tabulek, kdy vyšetřovaný popisuje, co na obrázcích vidí. Nejčastěji se jedná o číslice, písmena, či nějaké geometrické obrazce/obrázky, které jsou sestaveny z různobarevných kroužků/skvrn. Další metodou používanou pro přesné stanovení případných poruch barvocitu je spektrální přístroj zvaný Nagelův anomaloskop, který má v okuláru na dvě části rozdělené barevné pole. Jedna část tohoto pole je tvořena spektrální žlutou barvou, na té druhé části se snaží vyšetřovaný vytvořit smícháním červené a zelené tutéž barvu. Výsledek tohoto vyšetření je uváděn kvocientem anomálie, a tímto typem přístrojového vyšetření lze zjistit poruchu v oblasti červené, či zelené barvy. Anomaloskop HMC je mikroprocesorem řízený přístroj pro přesnou diagnostiku rozpoznávání barev s integrovaným systémem automatické adaptace neutrálních barev. [30]



Obrázek č. 14: Anomaloskop HMC (Heidelberg Multi Color). [30]

Farnsworthův-Munsellův 100-hue test je velmi přesný test, skládá se z 85 barevných terčů, ze kterých pacient sestavuje barevné spektrum. Tento test je též vhodný pro diagnostiku též získaných poruch, které mohou souviset s onemocněním sítnice, či zrakové dráhy. Nicméně též z časového hlediska je v klinické praxi praktičtější využít jeho zkrácenou verzi – Farnsworthův-Munsellův D15 test. [3]

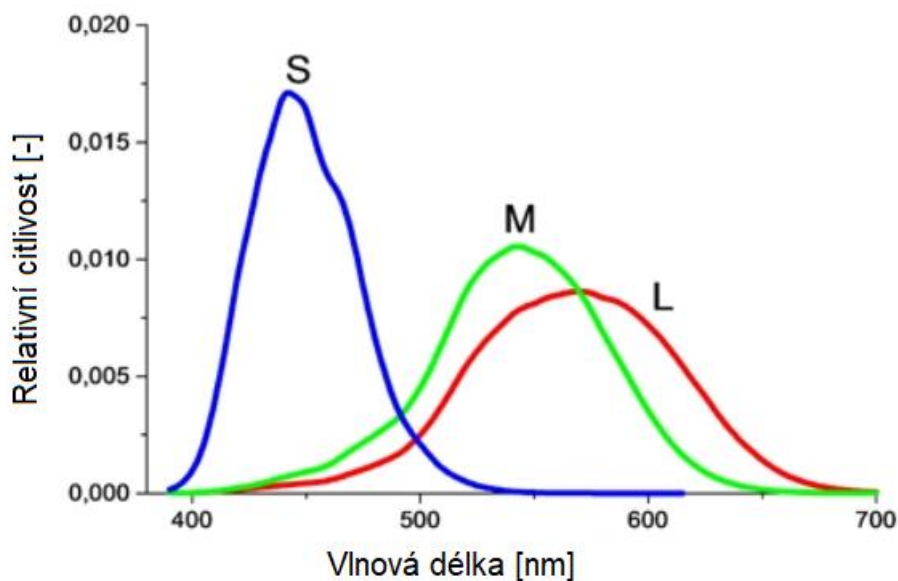
2 Použité metody

Praktická část této bakalářské práce se zaměřuje na diagnostikování poruch barvocitu u různých věkových kategorií, největší část vyšetřovaných osob je tvořena dospělými jedinci. U každého vyšetřovaného je provedena analýza stavu barvocitu pomocí seřazovacího Farnsworthova-Munsellova D15 testu, který se skládá z 16 různobarevných terčů (označených 0-15), které má vyšetřovaný za úkol seřadit dle vlastního citu pro barvy, přičemž startovací barva je označena zespodu číslicí 0. Dalším úkolem vyšetřovaného je pomocí barevných Ishiharových tabulek identifikovat, co vidí na dané tabulce za znak, číslici, případně jaký obrazec mu daný obrázek připomíná. Vyšetřovací tabulky obsahují rozmanité barvy tak, aby pokryly co největší množství barevných kombinací a tím se zjistily případné poruchy jiných odstínů. V dnešní době je též možnost některé testy provádět i digitální cestou, tedy na počítači, či notebooku. Tyto testy není výrazně doporučováno provádět na mobilu, ani na tabletu, a to kvůli hrozícímu zkreslení barevných tónů a tím pádem ztrácí na relevantnosti. U každého vyšetřovaného jedince je též zjišťována situace v rodině, zda se někdy setkali s potížemi určení barev a případně zda byli někdy vystaveni situaci, kdy na základě svých potíží s barvocitem byli nuceni změnit zaměření svého vzdělávání, či pocíťovali komplikace ve vykonávání svého povolání.

Na poruchy barvocitu, ani barvoslepost, stále bohužel neexistuje přímá léčba. Existuje však možnost jejich symptomy zmírnit pomocí speciálně upravených brýlí, dělaných na míru dle poruchy, a zároveň může být i zmírněna i často přítomná přecitlivělost na světlo. U jednoho z vyšetřovaných, u kterého byla prokázána přítomnost poruch barvocitu, byly otestovány korekční brýle určené právě pro osoby postižené poruchami barvocitu a byla tak zjištěna jejich skutečná účinnost v praxi.

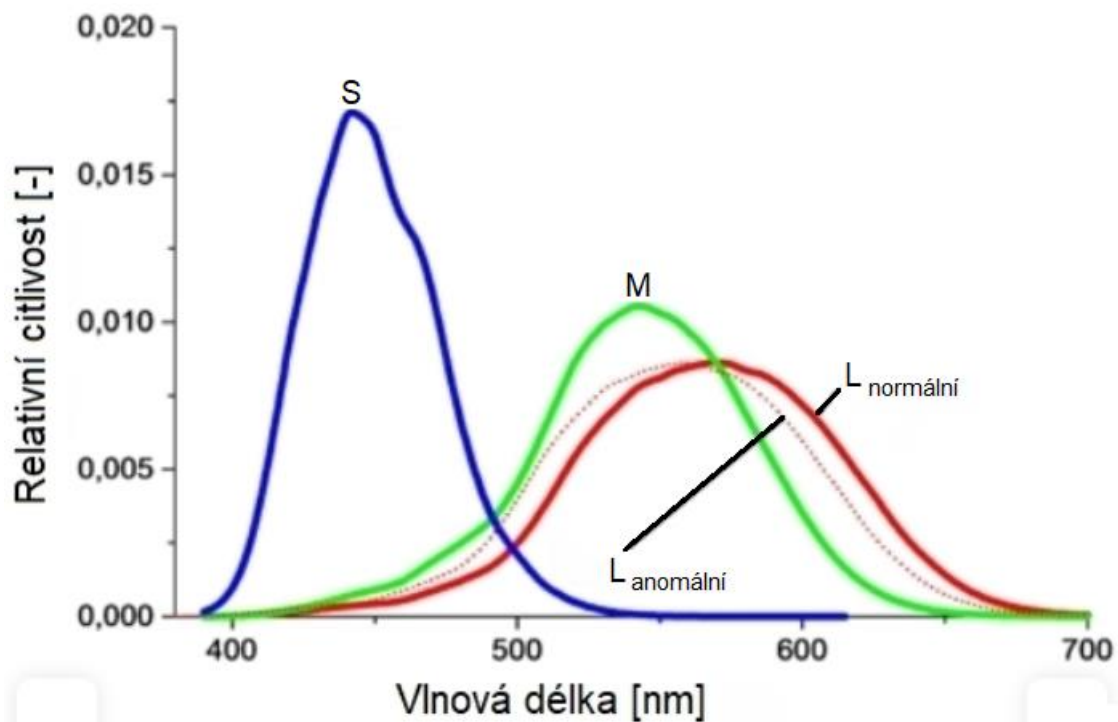
2.1 Barevné vidění u lidí

V lidském oku se nachází přibližně 6 milionů smyslových buněk, čípků, které nám umožňují vnímat světlo coby smyslový vjem. Lidé jsou schopni rozeznat až několik milionů barevných tónů. Čípky nesou pojmenování Protos, Deuteros, Tritos, zkratkou označované L, M a S podle toho, jaké vlny dopadajícího světla rozeznávají – L (long), M (middle), S (short). [16]



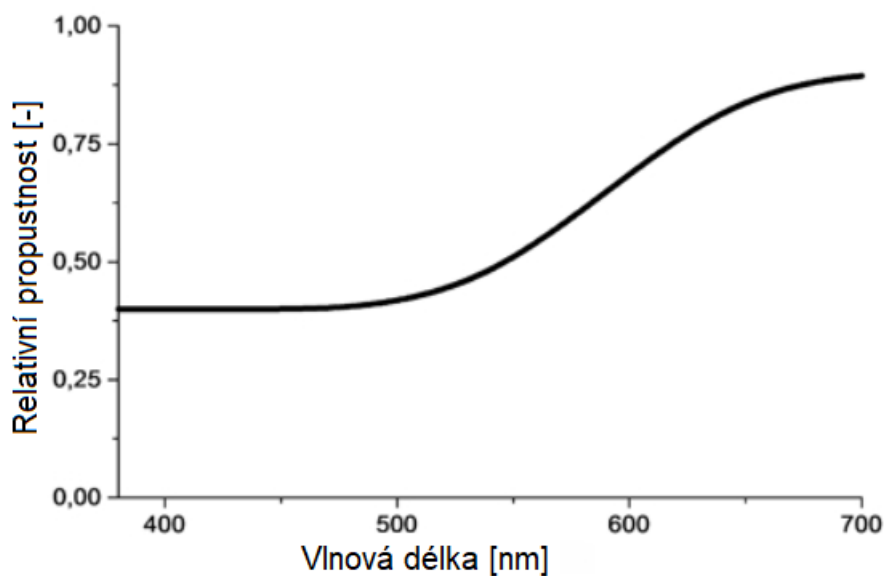
Obrázek č. 15: Citlivost fotoreceptorů osoby s normálním barvocitem. [14]

Obrázek č. 16 zachycuje citlivost fotoreceptorů barvoslepečého člověka s deuteran poruchou. V případě nefunkčních deuteran čípků je citlivost posunutá ve směru proto čípků, což má za následek ztížené rozlišování červených, žlutých a zelených barevných odstínů. Tuto poruchu lze korigovat pomocí speciálního filtru, který byl speciálně pro tuto poruchu vyroben. U nanesení filtru/vrstvy je důležité, aby světelné spektrum, které přes něj přechází, bylo zmenšené tak, že barvoslepý dostane totožné vzruchy jako kdyby barvoslepostí netrpěl. Při navrhování barevného filtru je důležité dávat pozor na to, aby docházelo k ovlivnění vlnových délek, které je opravdu potřeba ovlivnit, aby nedocházelo k dalšímu zkreslování barevného vidění a aby docházelo k co nejmenšímu dopadu na ostatní receptory. [14] [27]



Obrázek č. 16: Citlivost fotoreceptorů u osoby s deuteran poruchou. [14]

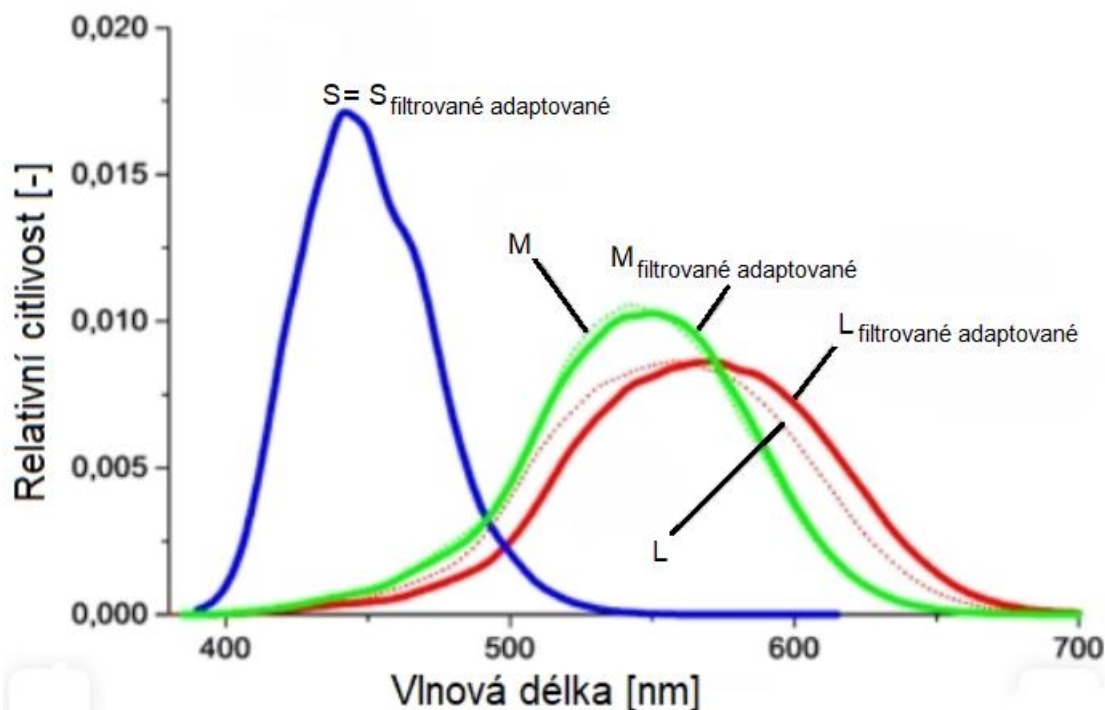
Následující obrázek ukazuje případné řešení filtrem:



Obrázek č. 17: Viditelná propustnost s filtrem. [14]

Účinek barevného filtru nejvíce dopadá na fotoreceptory citlivé na danou barvu. Je samozřejmě potřeba brát v úvahu, že účinek filtru není naprosto bez chyby a též je potřeba dbát na rozdílnou přizpůsobivost čípků působením filtru, nicméně na základě podobnosti

křivek ke křivkám, které ukazují schopnost vnímání osob se zdravým barvocitem, lze říci, že si jsou velmi blízko.



Obrázek č. 18: Ukázka, jak filtr působí na čípky. [14]

Kromě identifikování barvy také disponujeme schopností barvy rozeznat podle jednotlivých odstínů a také následně rozdělovat. Každá osoba je individuální a jedinečná i s ohledem na počet čípků – někteří jedinci jich mají více, některým jedinců mohou některé z čípků pro změnu chybět, což pak zapříčiňuje vznik poruch vnímání barev okolo nás. Z hlediska četnosti je nejčastější odchylka čípků protos a deuteris (patří sem protanomálie, protanopie, deuteranomálie a deuteranopie). Zřídka se pak vyskytuje tritanopie (tedy porucha týkající se tritanos čípků). Málodky pak dochází k poruchám fotoreceptorů zodpovědných za vidění v noci, pro tuto poruchu se užívá název achromázie. [25]

V Evropské populaci je přibližně 9 % mužů a 0,4 – 0,5 % žen postiženo červeno-zelenou barvoslepostí. Tritanopie se v populaci vyskytuje velmi zřídka, zhruba v 0,05 %, je tedy velmi vzácná. Dlouho vznikaly předpoklady, že barvoslepost vzniká nefunkčními smyslovými buňkami, ale dnešní předpoklady se uchylují k domněnkám, že zejména dochází k posunu citlivého prostoru daných smyslových buněk. [14]

K poruchám barvocitu může dojít i možným úrazem, případně k nim může dojít vlivem nežádoucích účinků některých užívaných léčiv nebo užitím některých látek. Například halucinogeny patrně pozměňují, mimo jiné, i vnímání barev v okolí uživatelů.

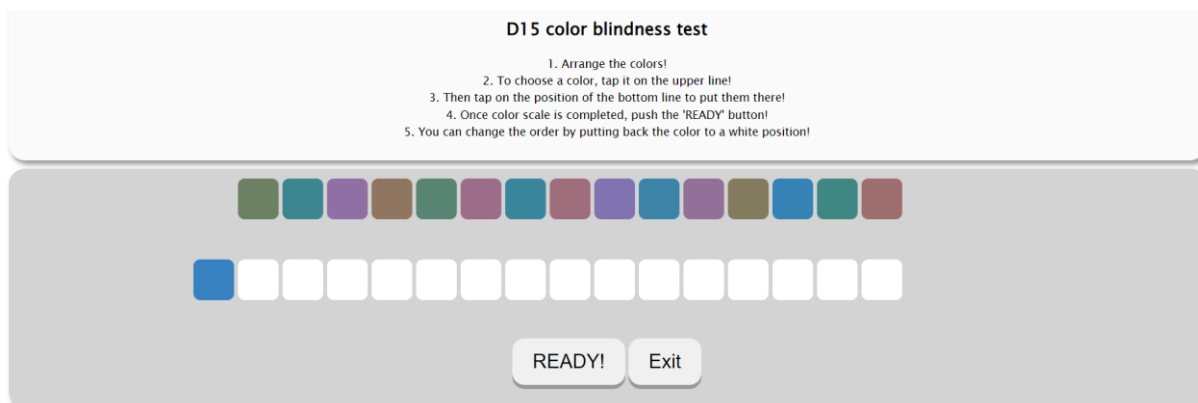
Osoba trpící poruchami barvocitu je svým způsobem ošizena o některé informace ze svého okolí. Barvy totiž často v lidech vyvolávají i určité pocity a ovlivňují náladu. Většina dětí dokáže rozlišovat a pojmenovávat barvy již okolo 5. roku života a dítě mající poruchu barvocitu si samo tuto skutečnost neuvědomuje, je zvyklé svět okolo sebe vnímat jinak než děti, které poruchou netrpí a tím pádem v této oblasti může z pohledu druhých zaostávat a pak bude chybně označeno za „pomalejšího“ jedince. Osoby s poruchou barvocitu se o svém stavu dozvídají postupně během života, neboť zde se uplatňuje fakt, že se adaptujeme na svět, jak ho sami vidíme a např. osoba mající poruchu zraku si ani neuvědomuje, že poruchu zraku má, dokud si nenasadí poprvé brýle, díky kterým zjistí, že dosud neviděla úplně dobře díky detailům, které nyní díky brýlím rozezná. Vrozené poruchy barvocitu bohužel není možné léčit, ale naštěstí díky speciálně vyvinutým brýlím je možné její symptomy zmírnit či korigovat. [23]

2.2 Průběh samotného měření

Subjekty, které se zúčastnily měření, dostaly za úkol pomocí seřazovacího Farnsworth-Munsellova testu, který se skládá z 15 barevných terčů. Obsahuje startovací barvu označenou vespodu číslicí 0 (číslicí jsou označeny všechny terče, vyšetřovaný proto nesmí během testování barvičky otáčet), tato barva je odstínem modrá. Výsledné seřazení by pak mělo tvořit spektrum z jedné strany začínající modrou barvou, posléze přecházející v odstíny zelené, žluté, narůžovělé, až v poslední fialovou barvou. Nezřídka kdy dojde v tomto testu k zaměnění dvou podobných barviček, přičemž tato vzniklá situace neznačí přítomnost poruch barvocitu.

Další část vyšetření proběhla pomocí barevných Ishiharových tabulek, v případě této práce byly použity testy pro poruchy barvocitu od Kanehara Trading Inc. (Tokyo, Japan). Tyto testy jsou určeny pro vyšetření poruch vrozeného původu. Nejčastější vrozenou poruchou je červeno-zelená porucha vyskytující se ve formě protan, která existuje ve formě úplné (protanopie) nebo částečné (protanomálie), nebo deuteran (úplná – deuteranopie, částečná – deuteranomálie).

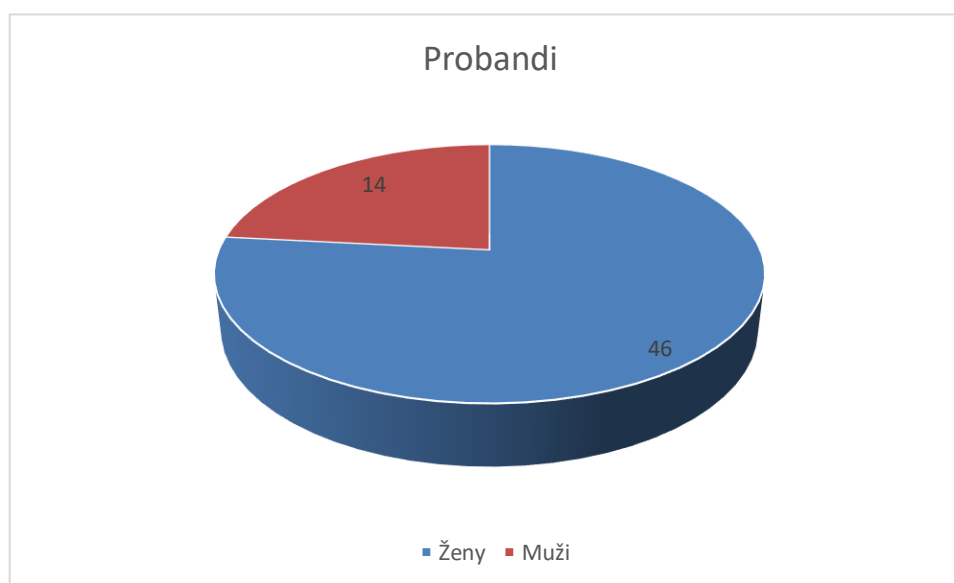
Kromě fyzických testů je v dnešní době i možností si některé testy vyzkoušet na počítači, či notebooku. Ovšem je velmi důležité provádět je pouze na těchto digitálních zařízeních, nikoliv například na mobilu, či na tabletu.



Obrázek č. 19: Ukázka elektronické podoby D15 testu. [29]

3. Experimentální část (výsledky)

Celkem bylo měřeno 60 dospělých subjektů a 8 dětí. Všichni byli podrobena vyšetření pomocí seřazovacího testu a barevných Ishiharových tabulek. Osoby, které měli některé odpovědi chybné a výsledky poukazovaly na poruchu, byli dotazováni ohledně výskytu barvocitu v rodině.



Obrázek č. 20: Rozložení zúčastněných probandů podle pohlaví.

Z celkem 60 vyšetřovaných bylo 14 jedinců mužského pohlaví a 46 ženského pohlaví. Procentuálně to znamená 23,3 % dotazovaných tvoří muži a 76,7 % ženy.

Bezchybně všechny obrázky barevných Ishiharových tabulek identifikovalo celkem 51 jedinců, 9 jedinců pak mělo nějakým způsobem potíže identifikovat některá čísla nebo udělali ve svých odpovědích chyby. Z 9 chybujiících bylo 5 žen a 4 mužského pohlaví.

V následující tabulce jsou vyjádřeny správné odpovědi v situaci s normálním barvocitem. Pro porovnání jsou vedle uvedeny odpovědi osob trpících červeno-zelenou barvoslepostí, kde „x“ v tabulce znamená, že symbol nejde v dané situaci přečíst. Pokud trpí vyšetřovaný poruchou typu protan, v lehké formě této poruchy vidí jako 12. číslici, místo čísla 35, číslo 3 nebo 5 a jako následující číslici místo čísla 96 vidí číslo 9 nebo 6. Osoby trpící silnější formou poruchy typu protan vidí místo číslice 35 číslo 5 a místo následující 96 vidí 6 – tedy vidí pouze pravou růžovou/fialovou část. Osoby s poruchou typu deuteran vidí

z číslice 35 pouze 3 (ve slabší formě buď 3 nebo 5) a místo číslice 96 vidí v závažnější formě poruchy pouze 9, kdežto ve slabší formě opět 9 nebo 6. Políčka označená „*“ znamenají, že na daném obrázku nejsou zobrazeny číslice, nýbrž nějaký obrazec.

Tabulka č. 1: Výsledky při experimentálním testování Ishiharových tabulek. [21]

Pořadí	Osoba bez poruchy rozpoznávání	S červeno-zelenou poruchou rozpoznávání	Úplná ztráta barvocitu/slabý barvocit
1	12	12	12
2	8	3	x
3	5	2	x
4	29	70	x
5	74	21	x
6	7	x	x
7	45	x	x
8	2	x	x
9	*	2	x
10	16	x	x
11	*	x	x
12	35	5 nebo 3	x
13	96	6 nebo 9	x
14	* (vidí oba)	fialový nebo červený	x

Tabulka č. 1 přehledně zobrazuje výsledky Ishiharova testu u testovaných osob: a) osob bez poruchy rozpoznávání, b) osob s červeno-zelenou poruchou rozpoznávání, c) osoby s úplnou ztrátou barvocitu nebo se slabým barvocitem.

Tabulka č. 2: Chybné výsledky barevných Ishiharových tabulek.

Pořadí	Osoba bez poruchy	JK, muž	LAB, žena	TN, muž	EK, žena	VB, žena	VH, muž	JH, muž	PH, žena	LD, žena
1	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
2	8	3	8	3	8	8	x	3	8	8
3	5	2	5	2	5	5 (6)	H	2	5	5
4	29	29	29 (28)	70	28/29	29	x	29	29	29
5	74	21 (91)	74 (21)	21	74	74 (21)	11	74 (21)	74 (hůř)	74 (hůř)
6	7	9 (7)	7	x	7	7	11	7	7	7
7	45	45	45 (hůř)	x	15	45	x	45	45 (hůř)	45
8	2	2	2 (8?)	x	2	2	x	2	2	2
9	*	x	vidí více zelenou	x	ok	ok	x	ok	ok	ok
10	16	16	16	x	16 (hůř)	16	x	16	16 (horší 1)	16
11	*	čtyřlístek	ok	x	ok	ok	ok	ok	ok	ok
12	35	35	35	9	35	35	x	35	35	35
13	96	96	96	9	96	96	x	96	96	96
14	*(vidí oba)	dolní linie dle úhlu pohledu	ok	jen červená	ok	ok	x	ok	ok	ok

Tabulka č. 2 má funkci seznamu 9 chybných výsledků Ishiharova testu, zároveň funguje jako seznam chyb s tím, že je poukázáno, kde došlo k udání chyby.

Hvězdička v druhém sloupci „Osoba bez poruchy“ poukazuje, kde nejsou vyobrazena čísla, nýbrž určité obrazce. Všichni bez rozdílu správně identifikovali první číslici jako 12. Odpovědi, které mají vedle v závorce slovo „hůř“ znamená, že vyšetřovaný měl obtíže danou číslici identifikovat. Zároveň další čísla v závorce označují, že si vyšetřovaný nevěděl příliš rady a udal dvojitou odpověď nebo jednou viděl jednu, podruhé jinou možnost. Někdy i výsledky ovlivnilo i naklánění, více v diskusi.

Seřazovací test měla většina vyšetřovaných v pořádku, případně došlo pouze k zaměnění barev nebo pouze v případě, kdy měl dotyčný větší obtíže s barvocitem, bylo pro vyšetřovaného obtížné barvy seřadit skutečně dle čísel.

Byla též vyšetřena skupina dětí v předškolním věku ze speciální MŠ, která ale k určování obdržela jiné obrázky typu Ishiharovy tabulky – viz příloha. Všechny děti byly vyšetřeny monokulárně, neboť nosily okluzor. Obrázků k vyšetřování bylo celkem 15 a vyšetřovaných dětí bylo 8. Jedno dítě mělo větší zrakovou vadu a již oboustranně

odoperovanou kataraktu, což ovlivnilo výsledek jeho testu – měl 9 chyb z 15. Ostatní děti měly výsledky testů v pořádku bez větších chyb – maximálně zaměnily motýla a pavouka a v případě ramínka některé zapoměly název, ale dokázaly popsat k čemu slouží.

3.1 Testování brýlí

Ke zpracování práce zapůjčila optika Lentiamo k dispozici speciální brýle, které mají osobám trpícím poruchami barvocitu umožnit vidění barev. Tyto brýle jsou vyráběny společností EnChroma a fungují na principu vytvoření filtru, který umožňuje oddělování červených a zelených pigmentů. Tyto brýle jsou k dostání v České republice pouze v optikách Lentiamo – pobočku mají v Praze a v Brně. Součástí testovací sady, která byla zapůjčena k otestování, je 6 brýlí, přičemž každé jsou určeny pro jinou část poruch barvocitu. Proband, který tyto brýle vyzkoušel, trpí červeno-zelenou barvoslepostí. Kromě seřazovacího testu a barevných Ishiharových tabulek byl též otestován internetovým červeno-zeleným klikacím testem, který se skládá ze 14ti obrázků se zeleným pozadím a červenou kruhovou linkou, která je pouze v jedné části přerušena – do této mezery má za úkol testovaný klikat. [28]



Obrázek č. 21: Snímek zapůjčených brýlí Enchroma od optiky Lentiamo.

Testovaný subjekt, s jehož pomocí byla otestována funkčnost brýlí, je 26letý muž. Napřed byl otestován bez použití brýlí a poté zkoušel jedny brýle za druhými. V tabulce níže

jsou uvedeny výsledky Ishiharova testu bez použití brýlí a poté výsledky v jednotlivých brýlích. Muž označil brýle č. 2 za nejlepší brýle, viděl s nimi nejvíce barev, a především viděl nejbližše osobám bez poruchy barvocitu.

Tabulka č. 3: Porovnání výsledků barevných Ishiharových tabulek bez a s brýlemi.

Pořadí	Osoba bez poruchy	TN, muž	brýle č. 1	brýle č. 2	brýle č. 3	brýle č. 4	brýle č. 5	brýle č. 6
1	12	12	12	12	12	x	12	12
2	8	3	x	8	x	x	x	x
3	5	2	5	5	5	2	2	2
4	29	70	2?	28 (9)	x	9	9	x
5	74	21	74 (s pomocí)	74	21	21	21	21
6	7	x	7	7	7	7	x	7
7	45	x	45	45	x	x	x	x
8	2	x	2	2	2	x	x	2
9	*	x	ok	ok	horší	2	x	?
10	16	x	16	16	16	x	x	6
11	*	x	ok	ok	horší	část nespojitá	x	ok
12	35	9	35	35	3	3	9	35 (5 hůř)
13	96	9	96	96	96 (6 méně vidět)	9	x	96 (6 jen náznak)
14	* (vidí oba)	jen červená	ok	ok	horší	jen červená	jen červená	jen červená

Na následujících obrázcích jsou zachyceny jednotlivé brýle:

Brýle č. 1 mají čočku typu „Cx3 Sun“, zabarvení čočky je Classic Gray (15% T) – Blue Flash a má být vhodná pro lehkou/střední/těžkou formu deuteran a lehkou/střední formou poruchy protan. Jedná se o venkovní čočky vhodné do zářivého slunečního počasí a mají pokrývat většinu poruch barvocitu.



Obrázek č. 22: Brýle č. 1 – Cx3 Sun.

Dalšími brýlemi jsou brýle č. 2 s čočkou typu „Cx3 Sun SP“ se zbarvením Dark Red (15% T) – Blue Flash. Je vhodná pro střední a těžkou poruchu typu protan. Jedná se o venkovní čočky, které mají být nejvhodnější pro závažné poruchy typu protan.



Obrázek č. 23: Brýle č. 2 – Cx3 Sun SP.

Brýle č. 3 s čočkou typu „Cx2 Shade“ jsou zbarveny do odstínu Medium Gray (25 % T) – Green Flash jsou určeny především pro lehkou/střední/těžkou formu poruchy typu deuteran a lehká/střední forma protan poruchy. Jsou vhodné jako čočky na outdoorové použití do zamračeného počasí a má být vhodný pro většinu poruch barvocitu.



Obrázek č. 24: Brýle č. 3 – Cx2 Shade.

Čtvrté brýle mají typ čočky „Cx2 Shade SP“ jsou tónované do odstínu „Medium Red (25% T) – Green Flash“ a jsou vhodné pro protan typ poruchy barvocitu střední/těžké formy. Jedná se též o outdoorové čočky do zamračeného počasí a jsou vhodné pro těžké formy protan poruch barvocitu.



Obrázek č. 26: Brýle č. 4 – Cx2 Shade SP.

Dalšími brýlemi jsou brýle č. 5 s typem čoček „Cx1 Indoor“ s tónováním „Rose (50% T) – Gold AR“, které jsou určené pro lehké/střední/těžké poruchy typu deuteran a lehkou/střední formy poruchy typu protan. Jedná se o indoorové čočky pro použití doma a v práci a jsou vhodné pro většinu typů poruch barvocitu.



Obrázek č. 27: Brýle č. 5 – Cx1 Indoor.

Šesté brýle mají čočky typu „Cx1 Indoor DT“ s tónováním „Blue (60% T) – Blue AR“ vhodné pro lehkou/střední/těžkou formu pro deuteranové poruchy barvocitu. Jsou ideální pro použití doma a v práci a nejvhodnější pro deuteran poruchy.



Obrázek č. 28: Brýle č. 6 – Cx1 Indoor DT. (nelze již objednat)

4. Diskuse

První částí vyšetřování barvocitu bylo seřadit 16 barevných terčků podle citu, jak se vyšetřovaný domnívá, že jdou barvy za sebou. Tyto barvy při správném seřazení tvoří spektrum, které startuje vlevo modrou barvičkou zespodu označenou číslicí 0, a na druhé straně končí fialovou barvičkou zespodu označenou číslicí 15.



Obrázek č. 29: Ukázka správně seřazeného Farnsworth-Munsellova testu.

Z celkem 60 vyšetřovaných subjektů přibližně 13 lidí udělalo při seřazování barevných terčků Farnsworth-Munsellova testu některou z chyb. Často šlo o zaměnění dvou barevných terčků, jak je ukázáno na snímku níže. Procentuálně tedy cca 21,7 % dotazovaných chybovalo v tomto testu, z toho 9 bylo ženského a 4 mužského pohlaví. Je potřeba brát v úvahu, že většina zúčastněných byly ženy v počtu 46 a 14 zúčastněných pak tvořili muži. Vycházíme-li z čísla 46 a 14 pro každé pohlaví zvlášť, pak chybovalo přibližně 19,6 % žen a 28,6 % mužů.

První osoba, která chybovala v seřazovacím testu, byla mladá 21letá žena s iniciály LAB, jejíž výsledek Farnsworth-Munsellova testu je zachycen na následujícím obrázku (obr. č. 26).



Obrázek č. 30: Test mladé ženy, kde došlo k přehození 2 terčičků – v přechodu z oranžovožlutých tónů do růžové.

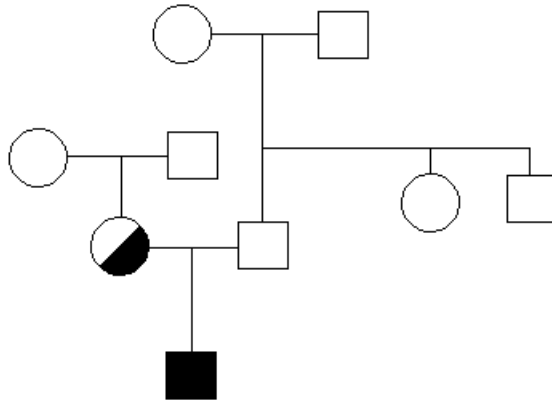
Při správném seřazení jsou zespodu na terčičkách čísla od 0 do 15, které jdou za sebou ve správném pořadí zleva od 0 (modrá startovací barva) do čísla 15 (fialová).



Obrázek č. 31: Došlo k prohození terčičků v pasáži 9-11-10-12.

Tato mladá žena, která terčíky takto zaměnila, si též během testování barevnými Ishiharovými tabulkami v některých obrázcích nebyla příliš jistá; číslo 29 v jistém úhlu vnímala jako číslo 28, stejně tak následující číslo 74 vnímala jako číslo 21. Taky pro ni bylo těžké rozpoznat číslo 45 a číslo 2 si pletla částečně s číslem 8. Výsledek tedy lehce naznačuje, že se může jednat o lehké posunutí vnímání červeno-zelených odstínů. Slečna má dnes již 75letého otce, který dříve pracoval jako kameraman a sám trpěl červeno-zelenou poruchou, o které se dozvěděl sám při práci s barvami. V takové situaci mu nehrozilo omezení v dané kariéře, nicméně bylo docela důležité umět rozeznat barvy pro tiskaře a typografy. S ohledem na věk nebylo možné otce slečny vyšetřit osobně, z tohoto důvodu udělal testy elektronicky. Při seřazování barev udělal 13 chyb, při červeno-zeleném testu měl 6 chyb ze 14.

Zajímavostí je výsledek testu muže s iniciálami JK ve věku 42 let, který měl Farnsworth-Munsellův test naprosto bezchybný, zatímco s určováním podle Ishiharových tabulek měl problémy. Měl celkem 5 chyb a k tomu na posledním obrázku, kde vedou dvě linie – horní červená a dolní fialovo-růžová, viděl spodní fialovo-růžovou správně nebo špatně. Výsledky tedy napovídají, že by se mohlo jednat o lehkou formu poruchy vnímání červeno-zelené barvy. Ačkoliv dle testů se jedná o spíše lehkou formu poruchy, i tak zaznamenal tento muž omezení při výběru svého povolání; jeho snem bylo pracovat jako vojenský pilot, nicméně bohužel na základě obrázkových testů mu byla zjištěna nedostatečná citlivost k červené a zelené barvě, což bohužel vedlo k jeho odmítnutí. Jako kompenzace situace mu byl nabídnut obor raketového mechanika, což vyšetřovaný odmítl. Na obrázku níže je zobrazen jeho rodokmen, ze kterého vyplývá, že geny spojené s poruchami barvocitu pochází z matčiny strany. Jaký byl stav v dalších generacích je zpětně náročné zjistit, neboť v dřívější době se barvoslepost neřešila a nevyšetřovala a lidé tak na potíže s určováním barev narazili vždy náhodně, např. při vykonávání povolání. Na děti s poruchami barvocitu bylo dříve spíše pohlíženo jako na „pomalejší“ jedince, což poté vedlo k nedorozumění a nepochopení.



Obrázek č. 32: Rodokmen označující dědičnost genu spojeného s poruchami barvocitu.

Další zajímavý vyšetřovaný jedinec je 26letý muž s iniciálami TN, který trpí červeno-zelenou barvoslepostí.



Obrázek č. 33: Výsledek testu muže trpícího červeno-zelenou barvoslepostí.

V Ishiharově testu měl 12 chyb, přičemž jeho odpovědi odpovídaly odpovědím osoby s červeno-zelenou poruchou.



Obrázek č. 34: Výsledek testu muže s červeno-zelenou poruchou barvocitu focený zespodu (aby byla vidět čísla).

Vyšetřovaný zkoušel brýle určené pro osoby s poruchami barvocitu (viz. kapitola 3.3 Testování brýlí). Pro shrnutí lze říci, že byl nejvíce spokojený s brýlemi č. 2 s čočkou typu Cx3 Sun SP – viděl s nimi velmi podobně jako osoba bez poruch barvocitu. Uvedl, že zamlada měla potíže s barvocitem babička ze strany matky, a to při vyřizování řidičského oprávnění, nicméně v tehdejší době se barvocitu příliš pozornosti nevěnovalo a neřešilo se to tolik jako dnes. Z tohoto důvodu je možné, že tedy dotazovaní často neví, jaká byla situace s barvocitem u prarodičovských generací, protože se tomu tehdy nevěnovala pozornost. V dnešní době nemá babička vyšetřovaného dobrý zrak, takže by byly výsledky testu značně zkresleny. Vyšetřovaný též zkoušel elektronický červeno-zelený test na webu (<https://www.cz.colorlitelens.com/barvoslepost-test.html#TEST>). Zkoušel jej zpočátku bez brýlí, poté jej zkoušel znovu s jednotlivými brýlemi. Nejlepších výsledků opět dosáhl s brýlemi č. 2. Byl s nimi dokonce natolik spokojený, že se rozhodl pro jejich koupi.

**Diagnóza:**

Můžete trpět barevní slepotou typu 'Protan-Rudý'!

Výsledky testu

Rudý- Zelený: 14/0

Fialový a modrý (P): 9/4

Fialový a zelený (D): 9/7

« Opakujte test

Brýle »

Obrázek č. 35: Výsledek elektronického červeno-zeleného testu bez použití brýlí.

Je vidět, že skutečně má potíže s rozlišováním červené barvy, a tedy pravděpodobně může mít poruchu typu protan.

Další osobou, která měla potíže identifikovat 3 obrázky z barevných Ishiharových tabulek, je dospělá žena (iniciály EK). Při seřazování barevných terčíků zaměnila zelenou barvu číslo 5 a modrou barvu označenou číslicí 3. Seřadila je chybně následovně: 2-5-3-4-7-6-8 atd.



Obrázek č. 36: Výsledek testu dospělé ženy (EK), která zaměnila terčíky v tomto pořadí: 2-3-5-4-6.

Tato žena uvedla, že má opakovaně potíže s přehazováním barvy zelené/modré.



Obrázek č. 37: Záměna ve výsledku testu ženy EK je patrná od čísla 3.

Studentka NT měla výsledek Ishiharova testu v pořádku, zatímco v seřazování barviček udělala pouze jednu chybu.



Obrázek č. 38: Záměna barev je patrná ze žluto-oranžovou pasáží barevného spektra – 9-11-10-12.

Starší žena s iniciálami VB, ročník 1941, neměla během Ishiharova testu žádnou výraznou chybu, jen během testování si párkrát v první sekundě myslela, že vidí na obrázcích něco jiného, ale během chvílky své tvrzení změnila na správnou odpověď. Vyšetřovaná je hypermetrop na pravé, i levé oko, její dioptrie jsou + 4,5 a má v obou očích kataraktu v počátečním stádiu. V brýlích na čtení má přibližně + 7,0 D a má výpadky zorného pole na periferii. Díky tomuto zdravotnímu stavu a výpadkům zorného pole se jí barvy zdály malé a špatně čitelné. Z tohoto důvodu je barevné spektrum místy barevně prohozené.



Obrázek č. 39: Výsledek seřazování barev ženy VB.

Na obrázku č. 40 je ukázán otočený test, patrné je prohození číslic, kterými jsou barevné terčičky zespu označeny.



Obrázek č. 40: Výsledek testu ženy VB focený zezdola.

Někteří z vyšetřovaných měli správně Ishiharovy testy, ale přehodili třeba barvu ve Farnsworth-Munsellova testu. To mohlo být způsobeno vlivem umělého světla, že z pohledu vyšetřovaných bylo v jistém světle obtížnější rozpoznat některé odstíny. Mohlo dojít ke zkreslení testu tím, že co světlo, to vidí jinak někteří některé odstíny.

Následující obrázek číslo 41 zobrazuje výsledek testu ženy, ročnick 1988, která zaměnila dva odstíny.



Obrázek č. 41: Došlo k prohození v odstínech 3-5-4-6.

Obrázek číslo 42 zobrazuje výsledek testu slečny narozené v roce 2002. Ačkoliv měla bezchybný výsledek barevných Ishiharových tabulek, slečna se přiznala, že si čas od času plete některé odstíny. Není si však vědoma toho, že by měla ve své rodině někoho barvoslepého.



Obrázek č. 42: Prohození v odstínech 7-9-8-10

Stejný test, akorát otočený zesponu, aby byly vidět přehozené číslice:



Obrázek č. 43: Patrné zaměnění číslic v pořadí 7-9-8-10.

Vyšetřovaná, ročník 1990, měla též Ishiharův test bez chyby, nicméně přehodila některé barvy.



Obrázek č. 44: Došlo k prohození v odstínech 9-11-10-12.

Na následujícím obrázku je výsledek testu mužského subjektu, ročník 1965, který měl též Ishiharův test bez chyby.



Obrázek č. 45: Prohození v odstínech 9-10-15-14-13-12-11.

Další chyby v seřazování barev Farnsworth-Munsellova testu měl vyšetřovaný narozen v roce 1938. Nicméně vyšetřovaný měl zároveň i chyby v Ishiharově testu, kde odpověděl správně pouze v prvním obrázku, kde identifikoval číslo 12. Ostatní obrázky nedokázal identifikovat. Svěřil se, že mu červeno-zelené odstíny dělají potíže a měl s tím komplikace na vojenské škole.



Obrázek č. 46: V druhé části je již prohozeno více odstínů.

Výsledky obou testů naznačují poruchu vnímání červeno-zelených odstínů, což sám vyšetřovaný potvrdil, že s tím bojuje celý život.

Dalším vyšetřovaným s chybami v testu byl muž, který v Ishiharově testu viděl místo číslice 8 trojku. Místo číslice 5 pak viděl dvojku a na obrázku s číslicí 74 viděl i zároveň číslo 21. Obrázek číslo 9 někteří vyšetřovaní nazvali „chaos“ nebo „basketbalový míč“. Na Farnsworth-Munsellova testu zaměnil několik odstínů, např. 7-8-11-10-9-12-13-14-15.

Žena ve věku 30 let zaměnila odstíny modré postupně přecházející do zelené. V Ishiharově testu pouze měla potíže identifikovat obrázek č. 5 – číslo 74.



Obrázek č. 47 – záměna v sekvenci 3-5-4-6.

Pro vyšetřování dětí z Materské školy Brejličky v Kladně v Moskevské ulici byly použité jiné typy obrázků – nešlo o vyobrazení číslic, nýbrž objektů. Vyšetřených dětí bylo celkem osm. Všechny nosily okluzor, byly tedy vyšetřeny monokulárně a některé nosily dokonce také brýle. Obrázek motýla byl většinou označen za obrázek pavouka, pouze 1 dítě jej označila správně. Jedno z dětí ho označilo za „pavouka nebo brouka“. Obrázek globusu byl často označován za obrázek zeměkoule, což bylo uznáno za správnou odpověď. V případě, kdy nedokázaly slovně pojmenovat obrázek, byly dotazovány, ke kterému účelu se zobrazený předmět používá nebo kde by na předmět obrázku mohly narazit. Většina odpovědí byla správná. Více chyb mělo jedno dítě, které má ale větší zrakovou vadu a oboustranně odoperovanou kataraktu.

5. Závěr

Bylo testováno celkem 60 dospělých jedinců (46 žen a 14 mužů), z toho Farnsworth-Munsellův test seřadilo s chybou/chybami celkem přibližně 13 lidí (což je 21,7 % chybujících), přičemž 9 z nich tvoří ženy (jestliže se testování zúčastnilo celkem 46 žen, pak chybovalo 19,6 % žen) a zbylé 4 byli mužského pohlaví (což je z celkového počtu zúčastněných mužů – 14 osob – 28,6 % chybujících).

Ohledně barevných Ishiharových tabulek bylo zjištěno celkem 9 chybných testů s min. 1 vzniklou chybou, z toho 4 testy patřili mužům a 5 testů patřilo ženám. U žen je vyšší číslo z toho důvodu, že vyšetřované byly převážně ženského pohlaví – bylo jich více než mužů, proto se na první pohled zdá, že jsou „v přesile“. Na základě procentuálních výsledků lze říci, že opět, v poměru k počtu zúčastněných jednotlivého pohlaví, mělo více mužů potíže určovat nebo rozlišovat barvy. Měřením byla prokázána barvoslepost u 3 mužských jedinců.

Na základě genetické gonozomálně – recesivní dědičnosti jsou častěji postihováni poruchou barvocitu muži. Ačkoliv bylo vyšetřeno mnohem více žen než mužů, přesto je procento chybujících mužů větší než chybujících žen. Zatímco ženy dělaly menší počet chyb, muži často dělali chyb více. Jedinci, kteří měli potíže s identifikací číslic v Ishiharových tabulkách, si všímali pouze zakulacených částí číslic, nicméně neviděli číslice celé. Barvoslepy muž, který testoval brýle výrobce EnChroma, byl dotazován ohledně barevných obrázků, jak by je popsal pohledem svých očí bez použití brýlí. Odpověděl, že někdy vnímá na obrázku více barev, nicméně tyto barvy pocitově vystoupí a poté se promíchají, tudíž je pro něho velmi náročné určit, která část je označena jednotlivými barvami, natož rozeznat skryté obrazce/čísllice. Ze získaných měření a výsledků tedy můžeme prokázat, že u mužů se tyto poruchy projevují zpravidla více než u žen.

Jedincům, kteří udělali chybu pouze v záměně 2 barev, mohlo výsledek testu lehce ovlivnit např. osvětlení v místnosti, jedná se zejména o ty jedince, kteří měli ostatní testy bez chyb. Vnímání barev může být také ovlivněno některými léčivými. Výsledky také mohly být ovlivněny náhodným výběrem testovaných dospělých subjektů, trochu jiné hodnoty bychom získali měřením větší části populace, což z hlediska časového limitu nebylo možné provést.

Do budoucna by bylo zajímavé provést testování účinnosti korekčních brýlí od výrobce EnChroma disponujících speciálně navrženými filtry určených pro osoby s poruchami barvocitu a efektivitu brýlí v praxi (např. nošení za běžného dne) na větším počtu

osob – bohužel z důvodů časového omezení a limitovaných možnostech zapůjčení bylo možné brýle důkladněji vyzkoušet pouze na jedné vyšetřované osobě. O testy bylo více zájemců, to mělo za následek možnosti zapůjčení až se zpožděním, což bylo důvodem, proč se testování nemohl zúčastnit větší počet jedinců.

Seznam použité literatury

- [1] HEISSIGEROVÁ, Jarmila. *Oftalmologie: pro pregraduální i postgraduální přípravu*. Praha: Maxdorf, [2018]. Jessenius. ISBN 978-80-7345-580-4.
- [2] *Wikiskripta - Orbita* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Orbita>
- [3] SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. *Fyziologie oka a vidění: pro pregraduální i postgraduální přípravu*. 2., dopl. a přeprac. vyd. Praha: Grada, 2014. Jessenius. ISBN 978-80-247-3992-2.
- [4] *Encyklopedie fyziky - Oko* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <Http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/485-ok>
- [5] *Encyklopedie fyziky - Optika* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/431-optika>
- [6] *NZIP - Poruchy barvocitu* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.nzip.cz/clanek/381-poruchy-barvocitu>
- [7] *L'Hérédité SELON MENDEL: Le Daltonisme* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <Https://lheredite-selon-mendel-ledaltonisme-68.websself.net/le-daltonisme>
- [8] VYMĚTALOVÁ, Veronika. *Biologie pro biomedicínské inženýrství*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2008-. ISBN 978-80-01-04013-3.
- [9] OTOVÁ, Berta. *Lékařská biologie a genetika*. 3., nezměněné vydání. Praha: Karolinum, 2022-. ISBN 978-80-246-5221-4.
- [10] *Lékařská genetika* [online]. [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: Https://www.wikiskripta.eu/w/Gonozom%C3%A1ln%C4%9B_recesivn%C3%AD_d%C4%9Bdi%C4%8Dnost
- [11] THOMPSON, James S. a Margaret Wilson THOMPSON. *Klinická genetika*. Martin: Osveta, 1988. ISBN 80-7254-475-6.

- [12] *X-linked chondrodysplasia punctuata* [online]. [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://medlineplus.gov/genetics/condition/x-linked-chondrodysplasia-punctata-1/#inheritance>
- [13] *Colorlite - Test barvosleposti* [online]. [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.cz.colorlitelens.com/barvoslepost-test.html#TEST>
- [14] *Colorlite* [online]. [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.cz.colorlitelens.com/>
- [15] *Centrum zraku - barvoslepost* [online]. [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://centrumzraku.cz/2021/07/14/barvoslepost/>
- [16] NICHOLLS, John G. *Od neuronu k mozku*. Praha: Academia, 2013. ISBN 978-80-200-2155-7.
- [17] SKALICKY, Simon E. *Ocular and Visual Physiology: Clinical Application*. 07. listopad 2015. Springer Verlag, Singapore, 2015. ISBN 9812878459.
- [18] LEVIN, Leonard. *Adler's Physiology of the Eye*. 30. březen 2011. Elsevier - Health Sciences Division, 2011. ISBN 9780323057141.
- [19] ČIHÁK, Radomír. *Anatomie*. Třetí, upravené a doplněné vydání. Ilustroval Ivan HELEKAL, ilustroval Jan KACVINSKÝ, ilustroval Stanislav MACHÁČEK. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-3817-8.
- [20] ZHAOPING, Li. *Understanding Vision: Theory, Models and Data*. 31. květen 2018. Oxford University Press, 2018. ISBN 9780198829362.
- [21] *Ishihara's Tests For Colour Deficiency*. Concise Edition. Tokyo, Japan: Kanehara Trading, 2010. ISBN 9780039474065.
- [22] GEGENFURTNER, Karl R. *Color Vision: From Genes to Perception*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN 9780521590532.
- [23] FINE, Aaron. *Color Theory: A Critical Introduction*. Bloomsbury Visual Arts, 2021. ISBN 9781350027275.
- [24] BORN, Max a Emil WOLF. *Principles of Optics*. 19. prosinec 2019. Cambridge University Press, 2019. ISBN 168451309X.

- [25] ECKSTUT, Joann. *Secret Language Of Color*. 22. říjen 2013. Black Dog & Leventhal Publishers, 2013. ISBN 1579129498.
- [26] BAHBOUH, Radvan, Jaroslava BIČOVSKÁ a Melvyn CLARKE. *The story of the colours*. Dar Ibn Rushd s.r.o.; QED Group, 2015. ISBN 9788086149981.
- [27] *EnChroma - Our Technology* [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://eu.enchroma.com/pages/technology>
- [28] *Colorlite - Testy barvosleposti* [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: https://www.cz.colorlitelens.com/barvoslepost-test.html?fbclid=IwAR3Bju8496h7OPYoDjSY_XRn54DoUf_q-t-_Y-Zqd3OGY9M7HtVdkX8WovE#TEST
- [29] *Color blind - D15 color blindness test* [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: https://www.color-blind-test.com/images/test/D15/D15.html?fbclid=IwAR1aTNieue9mGo3mo3hL_5SMwX1ifMMo4ZyY8Eh9COuzfnAIABEF7mwFRog
- [30] *Oculus - HMC-anomaloskop* [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://oculus.pl/oferta/ocena-widzenia-medycyna-pracy/hmc-anomaloskop/>

Seznam obrázků

Obrázek č. 1: Anatomie orbity – kosti (pozn. os nasale není přímo součástí orbity) [2].....	10
Obrázek č. 2: Reakce rodopsinu na světelné záření. [3]	13
Obrázek č. 3: Barevné spektrum.[5]	14
Obrázek č. 4: Základní barvy a jejich míchání. [5]	15
Obrázek č. 5: Buňky a fotoreceptory vyskytující v sítnici. [7]	17
Obrázek č. 6: Ukázka rodokmenu s gonozomálně recesivně dědičným znakem. [10].....	20
Obrázek č. 7: Ukázkové schéma dědičnosti gonozomálně recesivního onemocnění. [12]	21
Obrázek č. 8: Zobrazení vidění jednotlivých barev u jedinců s červeno-zelenou barvoslepostí. [13].....	23
Obrázek č. 10: Jak vidí barvy osoba s tritanovou barvoslepostí. [13].....	24
Obrázek č. 11: Výsledek testu protan – vlevo pohled zdravého jedince, vpravo pohled protanopa. [13].....	24
Obrázek č. 12: Vlevo zachycen obrázek, jej vnímají osoby se zdravým barvocitem, vpravo pohled osoby s deuteranopií. [13].....	25
Obrázek č. 13: Fialovo/červený tritan test. Vlevo pohled osoby se zdravým barvocitem, vpravo osoba s poruchou typu tritan. [13].....	25
Obrázek č. 14: Anomaloskop HMC (Heidelberg Multi Color). [30]	26
Obrázek č. 15: Citlivost fotoreceptorů osoby s normálním barvocitem. [14].....	28
Obrázek č. 16: Citlivost fotoreceptorů u osoby s deuteran poruchou. [14]	29
Obrázek č. 17: Viditelná propustnost s filtrem. [14]	29
Obrázek č. 18: Ukázka, jak filtr působí na čípky. [14]	30
Obrázek č. 19: Ukázka elektronické podoby D15 testu. [29]	32
Obrázek č. 20: Rozložení zúčastněných probandů podle pohlaví.	33
Obrázek č. 21: Snímek zapůjčených brýlí Enchroma od optiky Lentiamo.....	36
Obrázek č. 22: Brýle č. 1 – Cx3 Sun.....	38
Obrázek č. 23: Brýle č. 2 – Cx3 Sun SP.	38
Obrázek č. 24: Brýle č. 3 – Cx2 Shade.	39
Obrázek č. 26: Brýle č. 4 – Cx2 Shade SP.....	40
Obrázek č. 27: Brýle č. 5 – Cx1 Indoor.	40
Obrázek č. 28: Brýle č. 6 – Cx1 Indoor DT. (nelze již objednat).....	41
Obrázek č. 29: Ukázka správně seřazeného Farnsworth-Munsellova testu.	42

Obrázek č. 30: Test mladé ženy, kde došlo k přehození 2 terčičků – v přechodu z oranžovožlutých tónů do růžové.....	43
Obrázek č. 31: Došlo k prohození terčičků v pasáži 9-11-10-12.	43
Obrázek č. 32: Rodokmen označující dědičnost genu spojeného s poruchami barvocitu.	45
Obrázek č. 33: Výsledek testu muže trpícího červeno-zelenou barvoslepostí.	45
Obrázek č. 34: Výsledek testu muže s červeno-zelenou poruchou barvocitu focený zespodu (aby byla vidět čísla).	46
Obrázek č. 35: Výsledek elektronického červeno-zeleného testu bez použití brýlí.	47
Obrázek č. 36: Výsledek testu dospělé ženy (EK), která zaměnila terčičky v tomto pořadí: 2-3-5-4-6.	48
Obrázek č. 37: Záměna ve výsledku testu ženy EK je patrná od čísla 3.	48
Obrázek č. 38: Záměna barev je patrná ze žluto-oranžovou pasáží barevného spektra – 9-11-10-12.	49
Obrázek č. 39: Výsledek seřazování barev ženy VB.	50
Obrázek č. 40: Výsledek testu ženy VB focený zezdola.	50
Obrázek č. 41: Došlo k prohození v odstínech 3-5-4-6.	51
Obrázek č. 42: Prohození v odstínech 7-9-8-10	52
Obrázek č. 43: Patrné zaměnění číslic v pořadí 7-9-8-10.	52
Obrázek č. 44: Došlo k prohození v odstínech 9-11-10-12.....	53
Obrázek č. 45: Prohození v odstínech 9-10-15-14-13-12-11.	53
Obrázek č. 46: V druhé části je již prohozeno více odstínů.	54
Obrázek č. 47 – záměna v sekvenci 3-5-4-6.....	55

Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Výsledky při experimentálním testování Ishiharových tabulek. [21].....	34
Tabulka č. 2: Chybné výsledky barevných Ishiharových tabulek.	35
Tabulka č. 3: Porovnání výsledků barevných Ishiharových tabulek bez a s brýlemi.....	37

Příloha A: Obsah přiloženého CD

K bakalářské práci je přiloženo CD, které obsahuje:

- elektronickou kopii bakalářské práce ve formátu pdf,
- klíčová slova (v českém a anglickém jazyce),
- abstrakt v českém jazyce,
- abstrakt v anglickém jazyce,
- naskenované zadání bakalářské práce,
- soubor Excel s tabulkou výsledků odpovědí vyšetřovaných jedinců, kteří správně identifikovali obrázky barevných Ishiharových tabulek,
- soubor Zip obsahující obrázky Ishiharova testu použitého pro vyšetřování dětí,
- soubor Zip obsahující naskenované obrázky Ishiharových tabulek použitých k vyšetřování dospělých jedinců.