

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
BIOMEDICÍNSKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2022**

**ADÉLA  
MÁDLOVÁ**



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta biomedicínského inženýrství  
Katedra přírodovědných oborů**

## **Ochrana očí před UV zářením a modrým světlem**

### **Eye protection against UV and blue light**

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Optika a optometrie

**Autor bakalářské práce: Adéla Mádlová**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Písařík, Ph.D

---

**Kladno 2022**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mádlová** Jméno: **Adéla** Osobní číslo: **491789**  
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:

**Ochrana očí před UV zářením a modrým světlem**

Název bakalářské práce anglicky:

**Eye protection against UV and blue light**

Pokyny pro vypracování:

UV záření a modré světlo může způsobit trvalé poškození očí, proto je potřeba zajímat se touto problematikou a chránit svůj zrak. Zpracujte anatomii oka a propustnost jednotlivých částí oka pro různé vlnové délky elektromagnetického záření. Sepište rešerši vlivu UV záření a modrého světla na oko, jaké zdroje nás nejvíce ovlivňují a jak se před nimi můžeme chránit. V praktické části student změří pomocí spektrometru kvalitu ochrany před UV zářením a modrým světlem. Naměřená data zpracuje a vyhodnotí.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ZHAO, Z.C.,ZHOU, Y.,TAN, G., LI, J., Research progress about the effect and prevention of blue light on eyes, International Journal of Ophthalmology, ročník 11, číslo 12, 2018, pp. 1999-2003 s., DOI:10.18240/ijo.2018.12.20
- [2] NASINGHE, P., WATHURAPATHA, W.S., PERERA, Y.S., et al., Computer vision syndrome among computer office workers in a developing country: an evaluation of prevalence and risk factors, BMC Research Notes, ročník 9, číslo 150, 2016, 9 s., DOI: 10.1186/s13104-016-1962-1
- [3] SPARDHAN, S., SAPKOTA, R.P. , Eye Complications of Exposure to Ultraviolet and Blue-Violet Light, Highlights of Ophthalmology, ročník 45, číslo 2ENG, 2017, 2-5 s., DOI: 10.5005/highlights-45-2-2

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Petr Písařík, Ph.D.**

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2023**

prof. RNDr. MUDr. Petr Maršálek, Ph.D.  
vedoucí katedry

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

## **Název bakalářské práce:** Ochrana očí před UV zářením a modrým světlem

### **Abstrakt:**

Bakalářská práce se zabývá vlivem UV záření a modrého světla na oko a možné ochraně zraku před tímto zářením. Je zde popsána spektrální propustnost optických médií oka pro světlo. V teoretické části práce jsou popsány možné změny a onemocnění vzniklé krátkovlnným zářením. Experimentální část práce je věnována spektrálnímu vyzařování vybraných světelných zdrojů a možnostem filtrace tohoto záření. Měření byly jak možnosti snížení intenzity osvětlení digitálních zařízení, tak přístupné zabudované filtry. Dále byla měřena spektrální propustnost brýlových a nitroočních čoček se zaměřením na blokaci UV záření a modrého světla.

### **Klíčová slova:**

UV záření, modré světlo, ochrana zraku, brýlové čočky, nitrooční čočky

## **Bachelor's Thesis title:** Eye protection against UV and blue light

### **Abstract:**

The bachelor thesis deals with the effect of UV radiation and blue light on the eye and possible protection of the eye against this radiation. The spectral transmittance of the optical media of the eye to light is described. In the theoretical part of the thesis possible changes and diseases caused by short-wave radiation are described. The experimental part of the thesis is devoted to the spectral emission of selected light sources and the possibilities of filtering this radiation. Both the possibilities of reducing the illumination intensity of digital devices and the accessible built-in filters were measured. In addition, the spectral transmittance of spectacle and intraocular lenses was measured with a focus on blocking UV radiation and blue light.

### **Key words:**

UV radiation, blue light, eye protection, spectacle lenses, intraocular lenses

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych ráda poděkovala panu Ing. Petru Písaříkovi, Ph.D., za vedení mé práce, za jeho čas a cenné rady při jejím zpracování.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „*Ochrana očí před UV zářením a modrým světlem*“ 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 .....

.....

podpis

# Obsah

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Úvod .....  | 1  |
| 2     | Anatomie zrakového analyzátoru .....                                | 3  |
| 2.1   | Zevní vazivová vrstva – tunica fibrosa oculi .....                  | 3  |
| 2.2   | Střední vrstva cévnatá – tunica vasculosa oculi.....                | 4  |
| 2.3   | Vnitřní vrstva nervová – tunica nervosa oculi .....                 | 5  |
| 2.4   | Nitrooční prostor, obsah oční koule.....                            | 7  |
| 2.5   | Fyziologie vidění .....   | 9  |
| 2.6   | Gullstrandovo schématické oko .....                                 | 9  |
| 3     | Optické záření.....   | 11 |
| 3.1   | Spektrum elektromagnetického záření.....                            | 12 |
| 3.1.1 | Viditelné optické záření.....                                       | 12 |
| 3.1.2 | Ultrafialové záření .....   | 13 |
| 3.1.3 | Infračervené záření .....   | 13 |
| 3.2   | Interference .....  | 13 |
| 3.3   | Difrakce .....  | 14 |
| 3.4   | Interakce světla s prostředím .....                                 | 14 |
| 3.5   | Zdroje optického záření .....                                       | 16 |
| 4     | Spektrální propustnost optických médií oka .....                    | 18 |
| 5     | Vliv modrého světla a UV záření na oko .....                        | 21 |
| 5.1   | Fotochemické poškození.....   | 21 |
| 5.2   | Povrch oka .....  | 22 |
| 5.3   | Čočka .....   | 23 |
| 5.4   | Sítnice .....   | 24 |
| 5.4.1 | Mechanismus fotochemického poškození sítnice.....                   | 27 |
| 5.5   | Význam procesu vidění ve fototoxicitě .....                         | 28 |
| 5.6   | Dopad vystavení světlu u věkem podmíněné makulární degenerace ..... | 28 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.7   | Ametropie .....                                | 29 |
| 5.8   | Cirkadiální rytmus .....                       | 29 |
| 5.9   | Computer vision syndrom.....                   | 30 |
| 6     | Ochrana zraku.....                             | 31 |
| 6.1   | Přirozené bariéry .....                        | 31 |
| 6.1.1 | Ozonová vrstva .....                           | 31 |
| 6.1.2 | Obranný mechanismus oka.....                   | 31 |
| 6.2   | Brýlové čočky .....                            | 32 |
| 6.2.1 | Povrchové úpravy brýlových čoček .....         | 33 |
| 6.2.2 | Brýlové čočky blokující modré světlo.....      | 34 |
| 6.2.3 | Sluneční brýle .....                           | 34 |
| 6.3   | Kontaktní čočky .....                          | 35 |
| 6.4   | Nitrooční čočky.....                           | 35 |
| 6.5   | Digitální zařízení.....                        | 37 |
| 6.6   | Chemická ochrana.....                          | 37 |
| 7     | Experimentální část .....                      | 38 |
| 7.1   | Spektrum vybraných světelných zdrojů.....      | 38 |
| 7.1.1 | Základní zdroje světla – zářivky, žárovky..... | 38 |
| 7.1.2 | Počítač .....                                  | 40 |
| 7.1.3 | Mobilní telefon .....                          | 45 |
| 7.2   | Spektrální propustnost čoček .....             | 46 |
| 7.2.1 | Brýlové čočky.....                             | 47 |
| 7.2.2 | Nitrooční čočky .....                          | 50 |
| 8     | Diskuze .....                                  | 56 |
| 9     | Závěr.....                                     | 61 |
| 10    | Citovaná literatura .....                      | 64 |
|       | Seznam symbolů a zkratek .....                 | 69 |



---

|                     |    |
|---------------------|----|
| Seznam tabulek..... | 70 |
| Seznam obrázků..... | 71 |
| Seznam grafů.....   | 72 |

# 1 Úvod

Oko jako orgán zraku přijímá z vnějšího prostředí informace pomocí světla. Světlo se prostředím šíří formou vln a jeho barva je charakterizována vlnovou délkou, respektive vlnovými délkami. Po dopadu světelného paprsku vzniká zrakový signál, který je pomocí zrakové dráhy přenesen do mozku a je vytvořen zrakový vjem. Světlo nejenom přináší informaci, ale také nese energii odpovídající jeho vlnové délce, která působí na tkáň oka.

Oko je neustále vystavováno nejen viditelnému světlu, ale také UV záření, které dopadá na Zem ze Slunce. UV záření, jemu blízké modrofialové a modré spektrum viditelného světla má díky krátkým vlnovým délkám vysokou energii. Toto záření před dopadem na sítnici prochází optickými médii oka tvořícími optický filtr. Ten má za úkol chránit sítnici, která je díky své fotoreceptivní funkci na světlo velmi citlivá. Vlivem krátkých vlnových délek, které na sítnici dopadnou, vznikají chemické změny buněk sítnice. Nejvíce jsou ohroženy buňky obsahující pigmentová zrna. Tyto buňky jsou díky absorpční schopnosti pigmentových zrn a vysoké energii UV záření a modrého světla ničeny a nastává jejich smrt.

Krátkovlnnému elektromagnetickému záření, tedy UV záření a modrému světlu, je důležité se bránit. Modré světlo nevychází spolu s UV zářením pouze z přirozeného zdroje světla, tedy Slunce, ale také je tvořeno umělými zdroji světla. Tyto zdroje se vyskytují všude kolem nás. Kromě zrakových signálů ovlivňují naše biologické hodiny a mají vliv na buněčné tkáň. S postupnou dobou a modernizací se stále více používají digitální zařízení s LCD podsvícenými displeji, místnosti jsou osvětleny umělými zdroji záření a stoupá i doba strávená prací do blízka, zejména pak s mobilními telefony a počítači.

V této práci se budu věnovat vlivu modrého světla a UV záření na zrakový orgán a možnostem ochrany. Práce bude zaměřena na riziko vzniku patologických změn sítnice vyvolaných modrým světlem a UV zářením, zejména u pacientů po operaci katarakty. U těchto pacientů je vysoké riziko vzniku progresivních změn a úbytku fotoreceptorů z důvodu implantace nitrooční čočky. V experimentální části budou měřeny brýlové a nitrooční čočky a bude porovnávána spektrální propustnost konvenčních čoček a čoček blokujících modré světlo. Měřena budou i spektra vyzařovaná umělými zdroji osvětlení. Kromě těchto zdrojů bude měřeno a porovnáváno spektrální složení světla vyzařovaného obrazovkou digitálního zařízení s možností nastavení nočního režimu, který snižuje množství vyzařovaného modrého světla.

Cílem bakalářské práce je vyhodnocení a porovnání spektrální propustnosti brýlových a nitroočních čoček blokujících UV záření (konvenční čočky) a čoček blokujících modré světlo. Bude posuzována jejich schopnost blokovat UV záření a modré světlo. U brýlových i nitroočních čoček bude porovnávána schopnost blokace UV záření a modrého světla, a tedy i kvalita ochrany zraku před těmito zářeními.

## 2 Anatomie zrakového analyzátoru

### 2.1 Zevní vazivová vrstva – tunica fibrosa oculi

#### BĚLIMA – SCLERA

Sclera je bílá pevná neprůhledná vazivová blána, která tvoří 5/6 povrchu pevného obalu oka. Skládá se z propletených svazků kolagenních a elastických fibril. Do bělimy se upínají okohybné svaly, v zadním pólu vystupuje zrakový nerv spolu s centrální sítnicovou artérií a vénou. V předním pólu přechází v rohovku, přechod se nazývá limbus. V místě komorového úhlu bělima tvoří trabekulární tkáň a Schlemmův kanál. Díky schopnosti vázat vodu má skléra bílou barvu a obsahuje minimum cév. Skléra se skládá ze tří vrstev: episkléra, stroma, lamina fusca.. Přední část je kryta spojivkou (tunica conjunctiva), která přechází až na zadní plochu očních víček. Spojivka nepokrývá rohovku. [1; 2; 3; 4]

#### ROHOVKA – CORNEA

Přední část zevní vazivové vrstvy oka tvoří rohovka, která má vlastnost mechanické a chemické bariéry mezi zevním prostředím a vnitřkem oka. Je hladká, lesklá, transparentní, neobsahuje žádné cévy. Patří mezi hlavní optické prvky oka se svou optickou mohutností 43 D. Od skléry je oddělena limbem. Průměr rohovky se pohybuje mezi 11–12 mm, tloušťka centrálně 560 µm, periferně 650–1000 µm. Rohovka obsahuje mnoho senzitivních nervových zakončení, které ji činí nejcitlivější tkání lidského těla. [2; 4]

Rohovka má pět vrstev, na povrchu epithelium anterius (epitel), pod ním lamina limitans anterior (Bowmannova membrána), substantia propria cornea (stroma rohovky), lamina limitans posterior (Descemetova membrána) a spodní vrstva endothelium camerae anterioris (endotel). Povrch rohovky je tvořen nerohovějícím, dlaždicovým epitelem, který obsahuje 4–6 vrstev buněk. Má schopnost regenerace, jeho obnova trvá 7 dní. Pod vrstvou epitelu je Bowmannova membrána, která jej odděluje od stroma. Stroma, vlastní vrstva rohovky, tvoří zhruba 90 % tloušťky rohovky. Skládá se z pravidelně uspořádaných lamel kolagenních vláken, mezi kterými je extracelulární matrix, základní hmota stromatu. Z vnitřní strany je stroma zpevněné Descemetovu membránou, na kterou nasedá endotel, nejspodnější vrstva rohovky. Jedná se o jednovrstevný plochý epitel složený z buněk hexagonálního tvaru bez schopnosti regenerace. Endotel udržuje konstantní hydrataci a transparentci rohovky, tedy i její stálou optickou mohutnost. Voda tvoří 78 % hmoty rohovky, zbylých 22 % jsou organické

sloučeniny. Hydratace a výživa rohovky probíhá difuzí ze slzného filmu, komorové vody a cévní pleteně kolem limbu. [1; 2; 3; 4]

## **2.2 Střední vrstva cévnatá – tunica vasculosa oculi**

### **CÉVNATKA – CHOROIDEA**

Největší plochu střední, cévnaté vrstvy oka zaujímá cévnatka. Jedná se o tenkou, pružnou vazivovou vrstvu bohatou na cévy. Svrchní stranou je přiložena ke sklěře, vnitřní k sítnici. Skládá se ze 3 vrstev. Zevní lamina vasculosa je bohatá na žilní pleteně, které přecházejí do střední lamina choridocapillaris s bohatou kapilární sítí vyživující fotoreceptory sítnice. Vnitřní vrstva, lamina basalis, odděluje cévnatku od pigmentového epitelu sítnice. Cévnatka vyživuje hluboké vrstvy sítnice. Kromě vyživovací funkce má cévnatka i funkci mechanickou, kdy díky pružnosti vazivových sítí a krevnímu tlaku v kapilárách udržuje napětí corpus ciliare, napíná tak závěsný aparát čočky a udržuje zaostření na dálku. [1; 3; 4]

### **ŘASNATÉ TĚLESO – CORPUS CILIARE**

Řasnaté těleso je součástí přední části tunica vasculosa bulbi. Má tvar nařaseného mezikruží a v příčném řezu má trojúhelníkový tvar. Na vnitřním obvodu se nacházejí paprscitě uspořádané plastické výběžky, processus ciliares. Mezi nimi vystupují fibrae zonulares, tedy závěsná vlákna čočky. Směrem dozadu jsou processus ciliares vystřídány jemnějšími plicae ciliaris, které mají podobu paprscitého prstence. Toto uspořádání se nazývá corona ciliaris, na němž se nachází hladký povrch orbiculus ciliaris. Uvnitř řasnatého tělesa se spolu se stromou nachází hladký sval musculus ciliaris, který svými kontrakcemi umožňuje spolu se zonulárními vlákny proces akomodace. Na zevním okraji corpus ciliares se nachází ora serrata, hranice mezi pars optica retinae a pars caeca retinae. Výběžky ciliárního tělesa vylučují do zadní komory komorový mok. [1; 3]

### **IRIS – DUHOVKA**

Před přední a dolní okraj corpus ciliare vybíhá duhovka. Ve středu duhovky se nachází otvor, zornice (pupilla), která má schopnost regulovat svůj průměr na základě množství procházejícího světla, hloubky ostroty, potlačení aberací rohovky a čočky. Průměr zornice závisí na dvou svalech – musculus sphincter pupillae způsobující zúžení zornice a musculus dilatator pupillae, který zornici rozšiřuje. Je bohatá na pigmentové buňky a cévní síť. Duhovka rozděluje vnitřní prostor oka na přední a zadní oční komoru. Přední plocha duhovky je individuálně zbarvená různým množstvím pigmentu a podmiňuje tak barvu očí [1; 3; 5].

## 2.3 Vnitřní vrstva nervová – tunica nervosa oculi

### SÍTNICE – RETINA

Vnitřní vrstvu očního bulbu tvoří sítnice, jemná receptorová vrstva, která vystýlá celou vnitřní dutinu oka. Podle funkce a stavby se sítnice rozděluje na funkční senzoričnou část sítnice (pars optica) a slepou část sítnice pars caeca. Pars caeca doléhá na vnitřní stranu řasnatého tělesa (pars ciliaris retinae) a na zadní stranu duhovky (pars iridica retinae). Pars caeca a pars optica jsou od sebe odděleny zubovitou linií ora serrata. Optická, nebo také senzoričká část sítnice obsahuje hlavně světločivné elementy a nervové buňky. Při pohledu oftalmoskopem do oka je možné pozorovat oční pozadí (fundus oculi) a na něm několik útvarů. Laterálně od zadního pólu oka se nachází žlutá skvrna (macula lutea), v jejím středu je místu nejostřejšího vidění nazývané fovea centralis. Směrem nasálně od žluté skvrny vybíhá z oka zrakový nerv (nervus oculi) v místě discus nervi optici. V tomto místě se sbíhají nemyelizovaná vlákna z gangliových buněk sítnice. Discus nervi optici neobsahuje světločivné elementy, je zde fyziologická slepá skvrna (macula caeca). [1; 3; 5]

Pars optica retinae je tvořena světločivnými a nervovými buňkami uspořádanými ve vrstvách. Na povrchu je bazální membrána pigmentového epitelu (Bruchova membrána), pod ní vrstva pigmentového epitelu. Pigmentová vrstva spolu s pigmentem cévnatky pohlcuje dopadající světelné paprsky a zabraňuje jejich odrazu. Do pigmentové vrstvy se zanořují zevní segmenty fotoreceptorů (světločivné výběžky). Světločivné výběžky tyčinek (bacilli) a čípků (coni) jsou od jaderných částí odděleny membránou, stratum limitans externum. Další vrstva je tvořena jádry tyčinek a čípků, nazývaná zevní vrstva jader. Na tuto vrstvu navazuje zevní plexiformní vrstva obsahující nervová vlákna a synapse mezi fotoreceptory a bipolárními buňkami sítnice. Bipolární buňky spolu s dalšími nervovými buňkami sítnice vytvářejí vnitřní vrstvu jader a tím i stratum ganglionare retinae (ganglion retinae). Následuje vnitřní plexiformní vrstva, kde se nacházejí nervová vlákna a synapse bipolárních a gangliových buněk. Vrstva gangliových buněk tvoří stratum ganglionare retinae (ganglion opticum). Pod touto vrstvou je vrstva nervových vláken, kde se neurity gangliových buněk sbíhají do nervus opticus. Nejspodnější vrstvou je stratum limitans internum, která vzniká propojením výběžků Müllerových podpůrných buněk. [1; 3]

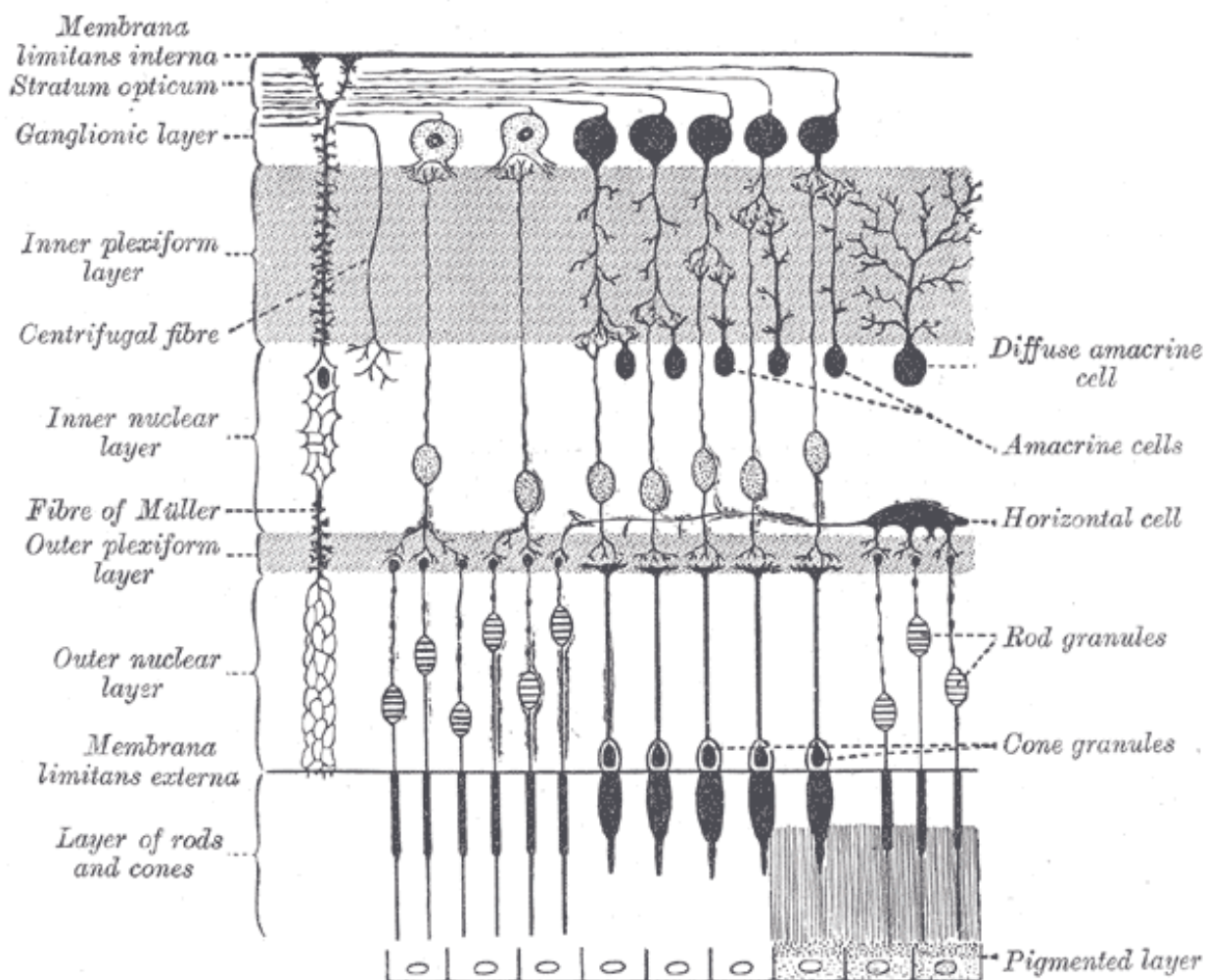
Buňky pigmentového epitelu sítnice jsou polarizované. Jejich funkcí je kontrola objemu a kompozice tekutiny v subretinálním prostoru, aktivní transport iontů, tekutiny a metabolitů. Buňky jsou schopny fagocytózy vnějšího segmentu fotoreceptorů a probíhá zde regenerace

zrakového pigmentu. Obsahují intracelulární melaninová granula, mikroperoxisomy, antioxidantní enzymy, které umožňují detoxikaci. Pigmentový epitel nemá fotoreceptivní ani neurální funkci. [6]

Čípky jsou převážně v oblasti zadního pólu oka v místě macula lutea. Obsahují barvivo iodopsin, které je maximálně citlivé na červené světlo. Barviva iodopsinu existují tři odlišné typy citlivé na různé vlnové délky, čímž umožňují barevné vidění. Citlivost čípků je na intenzitu záření mezi  $10^{-1}$ – $10^5$  luxů. Tyčinky jsou umístěny více periferně od žluté skvrny, umožňují černobílé, skotopické vidění. Citlivé jsou na osvětlení o intenzitě do  $10^{-2}$  luxů. V jejich membránách je uloženo zrakové barvivo rhodopsin neboli zrakový purpur. Rhodopsin se skládá z proteinu opsinu, který sedmkrát protíná membránu disku tyčinky, a aldehyd 11-cis-retinal. Rhodopsin po dopadu světelných paprsků bledne, tedy mění svou barvu. Tím vyvolává nervové vzruchy, které vycházejí na opačné straně buňky zaoblenou nožkou tyčinky, představující neurit fotoreceptoru a končí synapsí s dendrity bipolárních buněk. Tyčinky i čípky mají podobnou stavbu. Skládají se z vnějšího segmentu, vnitřního segmentu, perikaryonu, axonu a synapse. Vnější segment zachytává fotony a převádí podnět na nervový signál. Má diskovité dvojité membrány obsahující zrakový pigment. [3; 4; 6; 7]

Fotoreceptory nespotřebovávají nejvíce energie na vznik zrakového signálu, ale na neustálé otáčení jejich molekul a procesech nezávislých na jejich funkci. Jsou nejfragilnějšími buňkami centrálního nervového systému, jsou zranitelné malými mutacemi bílkovin a jsou více citlivé na poškození okolním prostředím. energii získávají ve formě adenosintrifosfátu (ATP), který vzniká oxidativním metabolismem glukózy a glykolýzou v mitochondriích, vyskytujících se ve vnitřním segmentu fotoreceptorů. Fotoreceptory potřebují 3–4x více energie než ostatní neurony CNS. Hodnotově tak probíhá největší oxidativní metabolismus v těle. [6]

Sítnice obsahuje také podpůrné buňky, které jsou umístěny ve vrstvě bipolárních buněk. Jedná se o horizontální buňky a amakrinní buňky, které propojují jednotlivé vrstvy sítnice. V sítnici jsou roztroušeny i neuroglie, mezi ně patří astrocyty, mikroglie nebo jsou zde také Müllerovy podpůrné buňky. Poslední buňky sítnice, gangliové buňky, jsou velké multipolární buňky a jejich axony tvoří zrakový nerv. Mezi nimi rozmístěny další velké gangliové buňky, které obsahují pigment melanopsin a jsou světločivné. Reagují převážně na vlnové délky modrého světla, tvoří obraz, ale zachycují úroveň osvětlení a ovlivňují cirkadiální rytmy. [1; 3]



Obrázek 2.1: Struktura sítnice [8]

## 2.4 Nitrooční prostor, obsah oční koule

### OČNÍ KOMORY – CAMERAE BULBI

Prostory mezi zadní plochou rohovky, přední plochou čočky, závěsným aparátem čočky a řasnatým tělesem se nazývají oční komory, podle polohy pak přední komora a zadní komora. Jsou vyplněny komorovým mokem a spojeny pomocí pupily. Přední komora, (camera oculi anterior) je prostor ohraničený zadní plochou rohovky, přední plochou duhovky a v zornicové oblasti ještě přední plochou čočky. Zadní komora (camera oculi posterior) pak začíná zadní plochou duhovky, dále ji pak ohraničuje zbývající okrajová část přední plochy čočky a část řasnatého tělesa. [1; 3; 4]



## **ČOČKA – LENS**

Oční čočka je bikonvexní transparentní struktura, která je součástí optického systému oka. Má schopnost akomodace, tedy měnit svou optickou mohutnost mezi zhruba 10–17 dioptriemi a tím zaostřovat různě vzdálené předměty. Čočka není nervově ani cévně zásobena. Výživa čočky probíhá difuzí z komorového moku. Čočka je v oku zavěšena pomocí zonulárních vláken k závěsnému aparátu čočky, který se upíná k ciliárnímu tělesu. U čočky lze rozlišit přední plochu ohraničující přední i zadní oční komoru a zadní plochu, která se dotýká fossa hyaloidea sklivce. Vrcholy vyklenutí ploch čočky se nazývá přední pól čočky a zadní pól čočky, jejich spojnicí je osa čočky dlouhá 3,6–4 mm vyjadřující tloušťku čočky. Plochy čočky se stýkají v místě ekvátoru, obvodu čočky. Čočka je složena z tenkého pružného a pevného pouzdra (capsula lentis), které není s ostatními složkami čočky srostlé, dále čočkového epitelu, jádra a kortexu. Čočkový epitel odděluje pouzdro čočky od kortexu. Jádro a kortex jsou podobné struktury. Zdravá čočka je průhledná a čirá, postupem času ztrácí svou průhlednost a žloutne. [1; 2; 3]

## **SKLIVEC – CORPUS VITREUM**

Největší prostor očního bulbu vyplňuje sklivec (corpus vitreum). Jedná se o transparentní, světlolomnou, bezbuněčnou, gelovitou hmotu s vysokým obsahem vody (98,6 %). Sklivec vyplňuje prostor od corpus ciliare a čočky k vnitřní ploše sítnice. Tento prostor se nazývá sklivcová komora (camera vitrea). Sklivec tvoří řídká pletěň kolagenních vláken (stroma vitreum) vyplněná vodnatou hmotou (humor vitreus) s vysokým obsahem kyseliny hyaluronové. [1; 2; 3; 4]

## **KOMOROVÝ MOK – HUMOR AQUOSUS**

Komorový mok nebo také komorová tekutina (humor aquosus) vyplňuje oční komory, přední i zadní. Jedná se o čirou tekutinu produkovanou výběžky řasnatého tělesa aktivním transportem a difuzí z krevní plazmy. Mezi komorami cirkuluje skrz pupilu. Odváděn je pomocí Schlemmova kanálu a Fontanových prostorů v trabekulární trámčině komorového úhlu (iridokorneální úhel). [1; 3]

## 2.5 Fyziologie vidění

Tyčinky a čípky kromě zrkových pigmentů obsahují také řasu enzymů a signálních molekul, které umožňují přeměnu zrkového stimulu na elektrickou stimulaci senzorů (fotoelektrická transdukce). Dopad světla vyvolá primární fotochemickou reakci v zrkovém barvivu rhodopsinu, tj. přeměnu 11-cis-retinalu na all-trans-retinal. Vytvoří se batorodopsin, poté lumirodopsin, metarodopsin I a konečný metarodopsin II. Metarodopsin II aktivuje inhibiční  $G_s$  protein, který přenáší informace mezi buňkami. Během světelného stimulu dochází ke změně koncentrace iontů v molekulách, díky které vzniká elektrický signál. [7]

Po přeměně 11-cis-retinalu na all-trans-retinal se molekula přesune z membrány disku fotoreceptoru do cytoplazmy a tam je all-trans-retinal redukovaný na all-trans-retiol. Dále je transportovaný pomocí proteinů do cytoplazmy buněk pigmentového epitelu sítnice. Tam dochází k esterifikaci alkoholu na ester all-trans-retinyly a následně se izomerizuje na 11-cis-retinol. Nastává oxidace 11-cis-retinolu na 11-cis-retinal, který je transportován zpět do fotoreceptoru a váže se opsinem, vzniká rhodopsin. [9]

## 2.6 Gullstrandovo schématické oko

Oko jako orgán tvoří optický systém, který je schopen zobrazit vnější předměty na sítnici, kde se nacházejí fotoreceptory a vytvoří tak zrkový vjem. Optická soustava je složena z rohovky, komorové vody, čočky a sklivce. Od vnějšího osvětlení je tato soustava izolována pigmentem cévnatky a množství paprsků, které projdou tímto systémem reguluje zornice fungující jako clona. Zobrazení předmětu v různých vzdálenostech je umožněno akomodací, kdy je měněna dioptrická hodnota celého systému. [2]

Pro teoretické výpočty zobrazení optickou soustavou oka a pro rozboru chodu optických paprsků zrkovým orgánem je nutno znát parametry očního dioptrického systému. Pro tyto účely byly vytvořeny optické modely schématických očí. Jsou v nich použity průměrné hodnoty zjištěné u skutečných očí. Předpokládají, že jednotlivé lomivé plochy systému jsou kulové a centrované. [2]

Nejpodrobnějším modelem je Gullstrandův model oka, který sestavil švédský oftalmolog A. Gullstrand. Předmětovým prostředím je považován vzduch o indexu lomu  $n=1$ . Zobrazuje jednotlivé prvky optické soustavy oka s jejich lomivými plochami, indexy lomu a vzdáleností od vrcholu rohovky (*Tabulka 2.1*). Rohovka je ohraničena dvěma lomivými plochami, přední

a zadní. Čočku tvoří periferní oblast (kortex) a jádro, ohraničeny celkem 4 lámavými plochami. Vzdálenost sítnice od vrcholu rohovky, tedy délka optické soustavy je 24 mm. [2]

Tabulka 2.1: Parametry Gullstrandova schématického oka – hodnoty jsou v neakomodovaném stavu optického systému oka, hodnoty v závorce jsou pro stav plné akomodace [2]

|                           | <b>Vzdálenost od<br/>vrcholu rohovky<br/>(mm)</b> | <b>Poloměr zakřivení<br/>(mm)</b> | <b>Index lomu</b> |
|---------------------------|---|-----------------------------------|-------------------|
| Přední plocha rohovky     | 0,000   | 7,700                             | -                 |
| Rohovka                   | -   | -                                 | 1,373             |
| Zadní plocha rohovky      | 0,500   | 6,800                             | -                 |
| Komorová voda             | -   | -                                 | 1,336             |
| Přední plocha čočky       | 3,6 (3,2)   | 10,00 (5,33)                      | -                 |
| Periferie čočky           | -   | -                                 | 1,386             |
| Přední plocha jádra čočky | 4,146 (3,8725)                                    | 7,911 (2,655)                     | -                 |
| Jádro čočky               | -   | -                                 | 1,406             |
| Zadní plocha jádra čočky  | 6,665 (6,5275)                                    | -5,760 (-2,655)                   | -                 |
| Zadní plocha čočky        | 7,200   | -6,000                            | -                 |
| Sklivec                   | -   | -                                 | 1,336             |
| Předmětové ohnisko        | -15,707 (-12,397)                                 | -                                 | -                 |
| Obrazové ohnisko          | 24,387 (21,016)                                   | -                                 | -                 |
| Poloha sítnice            | 24,000  | -                                 | -                 |

### 3 Optické záření

Optické záření je souhrnným označením pro elektromagnetické vlnění viditelné lidským okem, vlnění ultrafialové a infračervené spektrální oblasti. Elektromagnetické vlny jsou navzájem svázané periodické kmity magnetického a elektrického pole, které se šíří prostorem s konečnou rychlostí. Elektrické pole je charakterizováno vektorem  $E$ , magnetické vektorem  $B$ . Tyto vektory mají stejnou fázi, na sebe jsou navzájem kolmé a jsou kolmé ke směru šíření. Rychlost šíření elektromagnetické vlny ve vakuu  $c$  je  $c=299792498 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [10], nebo je také používána hodnota  $c=3\cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [11]. [10; 11; 12; 13]

Index lomu prostředí je poměr rychlosti světla ve vakuu  $c$  a rychlosti světla v jiném prostředí  $v$ . Závisí na vlnové délce  $\lambda$ :

$$n_\lambda = \frac{c}{v_\lambda} \quad (3.1)$$

Světlo se ze světelného zdroje šíří v podobě vlnění, které má ve vakuu vlnovou délku  $\lambda$ . Ta je vyjádřena poměrem rychlosti světla ve vakuu  $c$  a frekvencí světelného záření:

$$\lambda[m] = \frac{c [m \cdot s^{-1}]}{f[Hz]} \quad (3.2)$$

Každé těleso je schopno emitovat zářivou energii. Některá tělesa jsou schopna toto záření absorbovat za vzniku tepelné energie. Energii elektromagnetického záření lze vyjádřit závislostí energie fotonu na vlnové délce  $\lambda$  záření nebo jeho frekvenci  $f$ . [14]

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3.3)$$

Světlo lze také charakterizovat jeho intenzitou. Tato intenzita je energie procházející jednotkou plochy za jednotku doby. Plocha, kterou prochází, je kolmá ke směru šíření světla. [14]

### 3.1 Spektrum elektromagnetického záření

Elektromagnetické vlny lze pozorovat v širokém spektrálním intervalu, který je možné rozdělit na spektrální oblasti (*Tabulka 3.1*). Na Zem dopadá optické záření od zhruba 100 nm do 1 mm. 50 % je tvořeno viditelným zářením, 45 % infračerveným zářením a 5 % ultrafialovým zářením. Účinky elektromagnetického záření na živé organismy jsou závislé na energii tohoto záření. [11; 14]

Tabulka 3.1: Tabulka spektrálních oblastí [12]

| Interval vlnových délek | Název oblasti                    |
|-------------------------|----------------------------------|
| 25–200 nm               | Vakuová ultrafialová             |
| 200–380 nm              | Ultrafialová                     |
| 380–700 nm              | Viditelná                        |
| 700–1000 nm             | Blízká infračervená              |
| 1–3 $\mu\text{m}$       | Infračervená – krátké vlny       |
| 3–5 $\mu\text{m}$       | Infračervená – střední vlny      |
| 5–14 $\mu\text{m}$      | Infračervená – dlouhé vlny       |
| 14–30 $\mu\text{m}$     | Infračervená – velmi dlouhé vlny |
| 30–100 $\mu\text{m}$    | Daleká infračervená              |
| 100–1000 $\mu\text{m}$  | Submilimetrová                   |

#### 3.1.1 Viditelné optické záření

Viditelné záření zaujímá oblast vlnových délek 380–700 nm. Jedná se o záření, na které je citlivé lidské oko. Barva světla je vyvolána různou vlnovou délkou, vyvolán je tedy různý zrakový vjem. Fialová barva má nejkratší vlnovou délku, červená nejdelší. Krátkovlnné oblasti (světlo modré a fialové) mají fotochemické účinky, oblast delších vlnových oblastí má tepelný účinek. Viditelné světlo ovlivňuje periodičnost některých funkcí organismů, jako je například spánkový režim, produkce hormonů a regulace tělesné teploty u člověka nebo fotosyntéza u rostlin. Lidské oko je nejcitlivější na optické záření v oblasti kolem 555 nm (žlutozelená barva). [10; 14; 15]

Krátkovlnné záření, o vlnové délce 380–500 nm, ze spektra viditelného záření má vysokou energii a nazývá se modré světlo. Jedná se o vlnové délky modré a modrofialové barvy. Přírodním zdrojem tohoto záření je slunce, mezi umělé patří například digitální přístroje s LCD obrazovkou, umělá osvětlení aj. [16]

### 3.1.2 Ultrafialové záření

Ultrafialové světlo (UV) má nejkratší vlnové délky z optického záření, které dopadá ze Slunce na Zem. Lze jej podle vlnové délky rozdělit na 3 pásma: UV-A, UV-B, UV-C. UV-A záření je dlouhovlnné (320–365 nm) a tvoří většinu dopadajícího UV záření na zemský povrch. Paprsky UV-A pronikají do největší hloubky, jsou propouštěny ozonovou vrstvou a atmosférou. Prostřední pásmo UV-B má vlnové délky 280–320 nm a dopadá na zemský povrch. Nejbližší UV-C pásmo se nachází vlnovými délkami pod hranicí 280 nm a je absorbováno ozonovou vrstvou a atmosférou. [11; 10]

Množství UV záření dopadajícího záření a jeho intenzita závisí na několika faktorech. Jedním z nich je například poloha Slunce vůči Zemi. Čím více je Slunce kolmo k povrchu Země, tím je vyšší intenzita UV záření. Dalším faktorem je oblačnost (UV-A a UV-B dokáží projít i tenkou vrstvou mraků), nadmořská výška, vzdálenost od rovníku. Neméně důležitá je i reflexe od povrchu země. Od trávy, hlíny a vody je odrazivost nižší než 10 %, od čerstvého sněhu se odrazí až 80 % záření, suché pláže 15 % a mořské pěny 25 % záření. [17]

UV záření neproniká do hlubších tkání, ale působí na kůži a oko. Jeho účinky závisí na energii, intenzitě, době trvání záření a schopnosti absorpce tkáněmi. Obrannou reakcí kůže je pigmentace, při větší intenzitě vzniká zčervenání a vytvoření puchýřů. Působením na oko může vzniknout zánět spojivek a rohovky, při dlouhodobém působení i katarakta. UV záření napomáhá vzniku vitamínu D, řídí metabolismus vápníku a v oblasti 254 nm má baktericidní účinky, kdy způsobuje změnu DNA bakterií. [11]

### 3.1.3 Infračervené záření

Infračervené záření (IR) má delší vlnové délky než světlo. Je vyzařováno každým tělesem, jehož teplota je vyšší než 0 K. IR záření má tepelný účinek a lze jej rozdělit do 3 pásem: IR-A (780–1400 nm), IR-B (1400–3000 nm) a IR-C (3000–10000 nm). IR záření působí tepelně na kůži, kde jsou receptory tepla a bolesti. Nepříznivý účinek má IR záření na oko, kdy může poškodit rohovku, je absorbováno duhovkou a čočkou (katarakta). Může vyvolat i tepelné poškození sítnice. [11; 14]

## 3.2 Interference

Interference (skládání vlnění) je jevem dokazujícím princip šíření světla ve formě vln. Jedná se o skládání dvou či více koherentních vln (mají stejnou frekvenci a liší se fázovým rozdílem kmitů). Vzájemným skládáním vln lze zesílit či zeslabit světlo nebo jeho barevné složky. Při

dopadu bílého světla na tenkou interferenční vrstvu vzniká duha, jejíž rozložení závisí zvláště na maximech a minimech každé barvy ve vzdálenostech odpovídajících jejich vlnové délce. Monochromatické světlo tvoří interferenční proužky, kdy se střídá světlý a tmavý proužek. Tenkou interferenční vrstvou lze ovlivnit množství odraženého světla a tím i množství světla, které projde prostředím. [11; 10; 15]

### 3.3 Difrakce

Na základě interference vzniká další jev vlnového šíření světla, difrakce. Difrakce je jev, kdy při průchodu štěrbinou dochází k ohybu vlnění. Pokud dopadá elektromagnetické vlnění na překážku, hranu nebo otvor, dojde k rozšíření směru průchodu tohoto vlnění a tím i k interferenci. Světlo se nešíří pouze přímočaře, ale prochází i do oblasti geometrického stínu. Tento obraz je jiný než stín clony. Velikost štěrbin, kterou světlo projde, musí být srovnatelná s vlnovou délkou daného světla. Po průchodu koherentního záření vzniká difrakční obraz, který je důkazem interference vlnění přicházejícího z různých směrů. Pomocí optické mřížky s vrypů je možné separovat záření na složky dle vlnové délky. [11; 10; 15]

### 3.4 Interakce světla s prostředím

#### FERMATŮV PRINCIP

Přímočaré šíření světla v optickém izotropním prostředí je popsáno Fermatovým principem. Paprsek světla se v optickém prostředí o určitém indexu lomu  $n$  šíří z jednoho bodu do druhého po co nejkratší dráze. Z tohoto principu vychází i zákon odrazu a lomu světla. Pokud dopadá světlo na rozhraní dvou optických prostředí o rozdílných indexech lomu, část světelného paprsku se odrazí zpět do prostředí, z něž přichází, a zbytek paprsku prochází do druhého prostředí, kde se změní dráha jeho šíření. Při odrazu se paprsek vrací ve stejné rovině dopadu, tedy úhel dopadu se rovná úhlu odrazu. Paprsky se v optickém prostředí šíří nezávisle na sobě [12; 13; 14]

#### DISPERZE

Disperze světla je závislost fázové rychlosti šíření elektromagnetické vlny na její vlnové délce. Jde o rozklad optického záření podle spektrálního složení. Je udávána rychlostí změny indexu lomu v závislosti na vlnové délce daného záření. S klesající vlnovou délkou roste index lomu, tedy kratší vlnové délky se lámou při dopadu na optické prostředí více než dlouhé vlnové délky. [13; 14]

## ABSORPCE

Při průchodu optického záření prostředím dochází k absorpci. Je to proces, při kterém se nezvratně přeměňuje energie optického záření na jinou formu energie. Tím se snižuje intenzita záření. Oblast elektromagnetického záření, které se pohlcováno prostředím se nazývá absorpční pásmo, závislost prostředí na frekvenci vlnění je dána absorpčním spektrem.

Výslednou intenzitu  $I$  optického záření lze vypočítat pomocí vzorce (3.4), kdy  $I_0$  je původní intenzita záření,  $d$  tloušťka materiálu a  $\alpha$  koeficient absorpce (funkce vlnové délky). [13; 14]

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (3.4)$$

Výslednou absorpci  $A$  lze poté vypočítat pomocí vzorce

$$A = \frac{I_0 - I}{I_0} \quad (3.5)$$

## ROZPTYL

Rozptyl světla je jev, ke kterému dochází při průchodu světelného paprsku optickým prostředím a světlo je tímto jevem zeslabováno. Světlo mění své parametry, jako je směr, fáze, vlnová délka nebo polarizace. Směr šíření světla látkou je měněn indexem lomu látky, který je strukturně jiný na vzdálenostech menších, než je vlnová délka světla. V homogenním prostředí je sekundární nežádoucí vlnění rušeno ve všech směrech kromě směru, ve kterém se paprsek světla má šířit na základě zákona odrazu a lomu. [12; 13]

## POLARIZACE

Polarizace světla je jevem usměrnění neuspořádaných vln záření. Nepolarizované světlo se šíří prostorem paprsky s nahodilým směrem šíření. Toto světlo lze polarizovat, tedy usměrnit různými způsoby, jako je odraz a lom, dvojlom, absorpce, rozptyl nebo pomocí polarizačních filtrů. Pokud dopadne nepolarizované světlo na polarizační destičku, projdou jen vlny, kmitající v polarizační rovině destičky. Z destičky pak vystupuje lineárně polarizované světlo, které má intenzitu rovnu polovině intenzity dopadajícího světla. Odražené světlo lze považovat za plně polarizované, dopadne-li na rozhraní prostředí pod Brewsterovým úhlem  $\alpha_B$ , který lze vypočítat (vzorec 3.6). [10; 14]

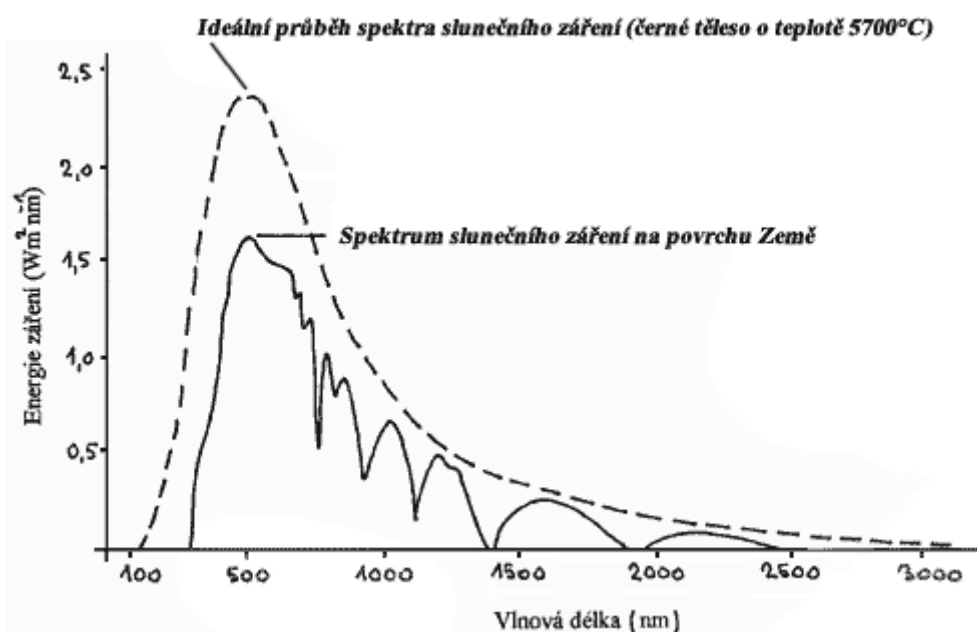
$$\operatorname{tg} \alpha_B = n \quad (3.6)$$



### 3.5 Zdroje optického záření

Objekty přeměňující různé formy energie na energii elektromagnetického záření v oblasti optického záření se nazývají zdroje optického záření. Mohou být přirozené nebo umělé. Do skupiny přirozených zdrojů patří Slunce, hvězdy, luminiscenční objekty z rostlinné i živočišné říše či atmosférické výboje. Umělé zdroje lze dělit na tepelné a luminiscenční. Do tepelných zdrojů jsou zahrnuty žárovky, plameny, zářiče s tepelným ohřevem a modely absolutně černého tělesa. Luminofory a luminiscenční diody patří do luminiscenčních zdrojů. [10]

Světlo vycházející za Slunce a světlo přicházející z oblohy je nazýváno jako denní světlo. Spektrální složení těchto dvou složek je různé. Spektrum světla vyzářeného Sluncem, které ještě neprošlo atmosférou Země, odpovídá spektru záření černého tělesa, jehož teplota je přibližně 6000 K. spektrální složení světla vyzářeného Sluncem je vyobrazeno na obrázku (Obrázek 3.1). Světlo dopadající na zemský povrch je částečně absorbováno a rozptýleno atmosférou. [12]



Obrázek 3.1 Spektrální složení Slunečního záření [18]

Jedním z tepelných zdrojů světla jsou žárovky. Jsou tvořeny wolframovým vláknem, které se po rozžhnutí stává vlastním zdrojem záření. Vláknem je umístěno do skleněné nebo křemenné baňky s vakuem, vyplněné inertním plynem (argon, dusík) nebo parami halogenů (brom, jód), které znemožňují odpařování vlákna. Žárovky mají spojité spektrum, tedy spektrum světla

žárovky odpovídá spektru tepelného záření odpovídající teploty. Zahrnují viditelnou i infračervenou oblast optického záření. [12; 10]

Dalším zdrojem optického záření jsou výbojky, které lze zahrnout do skupiny luminiscenčních zdrojů. Jsou tvořeny skleněnou či křemennou trubicí zakončenou elektrodami, mezi kterými dochází k elektrickému výboji plynu, který je v trubici uzavřen. Elektrický proud ionizuje, excituje atomy plynu. Během relaxace atomy vyzařují světlo čárového spektra, které odpovídá energetickým hladinám atomů. Často jsou využívány výbojky naplněné parami rtuti, zářivky, kdy spektrální čáry mají vlnové délky 404,7 nm, 435,8 nm, 546,1 nm, 577,0 nm a 579,1 nm. Stěny trubice bývají pokryty „fosforescenční“ vrstvou, která má schopnost absorpce ultrafialového záření a následně vyzařuje světlo viditelného spektra. [12; 10]

Známým zdrojem záření jsou polovodičové svítící diody (LED, light emitting diode). Světlo vzniká díky zářivé mezipásové rekombinaci elektronů a děr v polovodičích. Dioda je tvořena p-n přechodem, na který je v propustném směru přiloženo napětí. Energie vyzářených atomů je blízká hodnotě energie zakázaného pásma, proto je spektrum vyzářeného světla tvořeno úzkou čarou. Nejznámějšími diodami jsou diody GaAs (okolo 900 nm), SiC (viditelná oblast kolem 580 nm) a GaN (modrofialová oblast, 400 nm). [12]

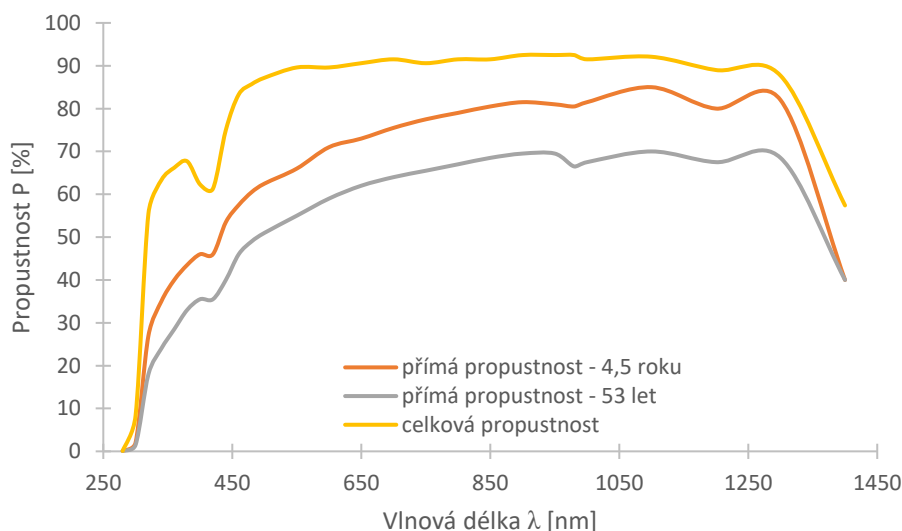
Zdrojem koherentního, monochromatického, vysokoenergetického záření je laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Je založen na principu zesilování světla stimulovanou emisí záření. Nejčastěji vyzařuje světlo ultrafialové, viditelné a infračervené oblasti elektromagnetického záření. Lasery využívají jevu stimulované emise záření aktivních částic, které jsou buzeny vnějším zdrojem energie. Lasery mají vysokou účinnost přeměny energie. [10]

## 4 Spektrální propustnost optických médií oka

Elektromagnetické záření po průchodu optickým médiem interaguje několika způsoby. Záření může být transmitováno, tedy prochází optickým médiem. Dalším způsobem je odraz od povrchu. Dále může nastat rozptyl záření optickým prostředím. Čtvrtým způsobem je absorpce záření médiem, kdy vzniklá energie vede k ionizaci atomů, zahřátí atomů média, nebo způsobí jejich fluorescenci. [19]

Při průchodu elektromagnetického záření okem část energie záření prochází přímo na sítnici, aby vytvořila obraz. Zbytek je rozptýlen optickými médii oka nebo je jimi absorbován. Na rozhraní prostředí dochází také k odrazu záření. Nejvíce odráží světlo přední plocha rohovky, kde je největší rozdíl indexu lomu prostředí (rohovka vs. okolní vzduch). [19]

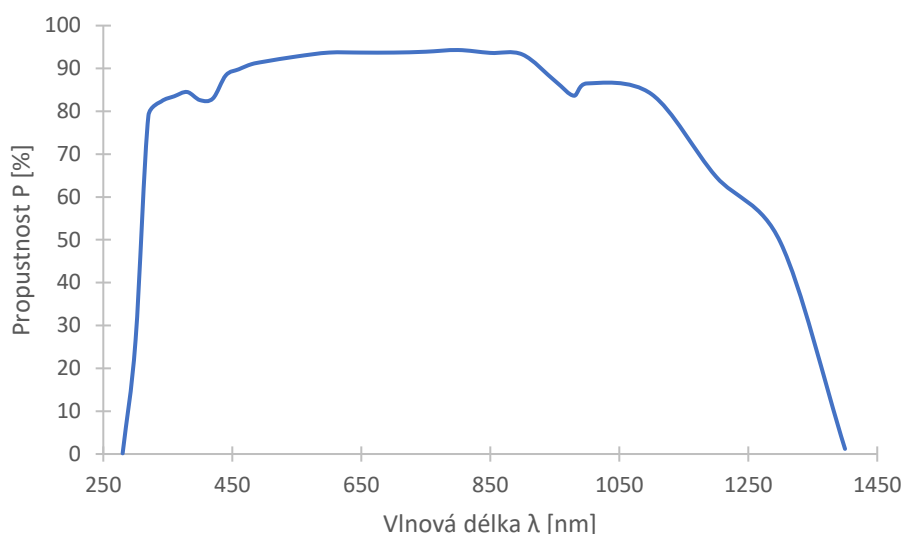
V roce 1962 Edward A. Boettner a J. Reimer Wolter experimentálně měřili spektrální propustnost optických médií lidského oka v různém věku života člověka. Byla měřena přímá transmitance optického média, která následuje optickou osu oka a dopadající paprsky tvoří obraz na sítnici. Dále byla brána celková propustnost, která zahrnuje množství záření, které by dopadlo na sítnici. Zde je počítáno i se zářením, které je rozptýleno optickým prostředím. [19]



Graf 4.1: Spektrální propustnost rohovky [20]

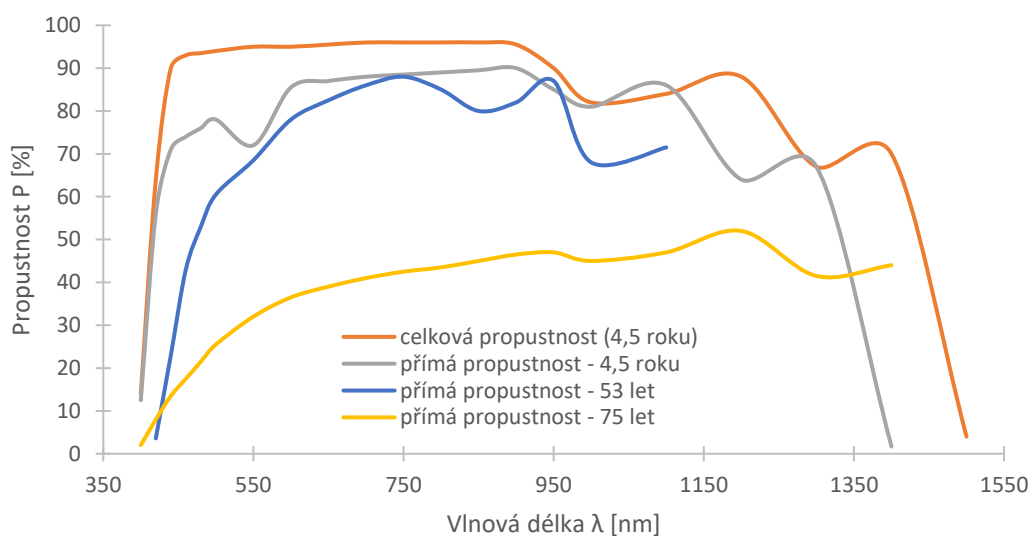
V grafu spektrální propustnosti rohovky (*Graf 4.1*) jsou zobrazena naměřená data při experimentu pana E. A. Boettnera a J. R. Woltera [20]. Propustnost rohovky začíná na 300 nm vlnové délky světla. Zbytek je odražen nebo absorbován strukturou rohovky. Poté propustnost

rychle stoupá na zhruba 68 % pro vlnovou délku 380 nm. Pro větší vlnové délky je propustnost větší než 90 % a klesá až v oblasti infračerveného záření (1300 nm). [19; 20]



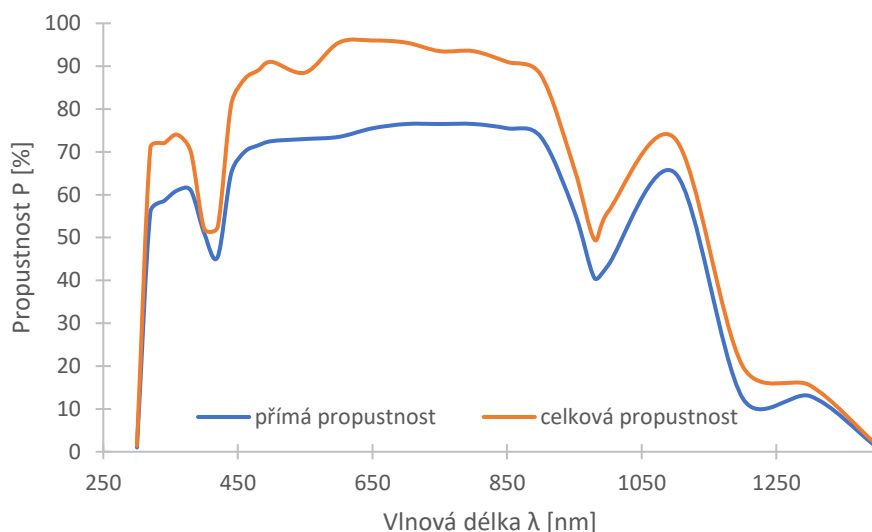
Graf 4.2: Spektrální propustnost komorové tekutiny lidského oka [20]

Komorová voda má vzhledem k svému indexu lomu vysokou propustnost i pro kratší vlnové délky. Její spektrální propustnost je vyobrazena v grafu (*Graf 4.2*). Světlo je propouštěno od 260 nm (UV záření) až do spektra infračerveného záření. Vzhledem k průchodu světla okem jsou tyto vlnové délky odfiltrovány strukturou rohovky a komorovou vodou tak prochází veškeré záření, které prošlo rohovkou. Dochází zde k minimálnímu rozptylu, který je nižší než 2 %. [19; 20]



Graf 4.3: Spektrální propustnost oční čočky člověka [20]

Propustnost oční čočky se mění s věkem, jak je již patrné na první pohled v grafu spektrální propustnosti čočky (*Graf 4.3*). Čočka malého dítěte začíná propouštět světlo od 300 nm. Absorpční vlastnosti strmě klesají od 360 nm do 390 nm a roste tak propustnost oční čočky. Propustnost čočky pro 320 nm je u dětí mladších 5 let kolem 8 %, s postupujícím věkem klesá a u jedince ve věku 22 let je nižší než 0,1 %. Celková propustnost oční čočky mladého oka strmě stoupá od 390 nm a dosahuje 90 % propustnosti pro světlo o vlnové délce 450 nm. Oproti tomu propustnost čočky staršího člověka (63 let) začíná na 400 nm a 90% propustnosti dosahuje až na vlnové délce 540 nm. Dochází k většímu rozptylu světla ve struktuře čočky. Přímá propustnost pro vlnovou délku 700 nm čočky mladého člověka dosahuje hodnot kolem 88 %, zato čočka 75letého jedince propustí pouze 41 %. [19]



Graf 4.4: Spektrální propustnost sklivce [20]

Sklivec je posledním optickým médiem, kterým světlo prostupuje a následně dopadá na sítnici. Jeho spektrální propustnost je vykreslena v grafu (*Graf 4.4*). Propustnost je díky jeho složení vysoká. Začíná na zhruba 300 nm a končí na 1400 nm. V oblasti UV záření strmě stoupá a propouští 75 % světla o vlnové délce 350 nm. Úplná propustnost pro viditelné světlo je vyšší než 90 %. [19]

## 5 Vliv modrého světla a UV záření na oko

Slunce a umělé zdroje světla, jako například LED zářivky a halogenové zářivky, jsou primárními zdroji viditelného světla bílé barvy. Bílé světlo je tvořeno všemi barvami spektra. Jak je již výše zmíněno, součástí viditelného světla je i světlo modré a modrofialové barvy, které je blízké UV záření a má vysokou energii. Zmíněné zdroje záření vyzařují množství modrého světla, které se blíží mezinárodní stanovené hranici pro jeho expozici. S rostoucí oblibou displejů podsvícených LED technologií, jako jsou mobilní telefony, tablety či obrazovky počítačů, dochází k vyššímu vystavování očí tomuto záření než v minulosti. [21]

I když má krátkovlnné záření většinou negativní účinky na orgán oka, je nutno zmínit i pár pozitivních účinků. Modré světlo má například významný vliv při rozlišování barev nebo při nočním vidění. Čípky a tyčinky, které jsou za tyto funkce zodpovědné, mají maximum své senzitivity právě pro modrou a modrozelenou barvu. Dále expozice modrého světla během dne reguluje cirkadiální rytmus, stimuluje mozek k bledosti během dne inhibicí sekrece melatoninu. [21]

### 5.1 Fotochemické poškození

Pokud budeme brát světelný paprsek jako proud fotonů, tak s tkání, buňkou a jednotlivými molekulami interaguje foton o určité energii. Elektron v excitovaném (vybuzeném) stavu může předat energii několika způsoby. Prvním způsobem je rozdělení vazby v jedné molekule při výměně elektronů nebo vodíku. Vznikají volné vodíkové radikály, volný kyslík, radikály superoxidů, peroxid vodíku, hydroxylové radikály. Volné radikály mohou napadnout různé druhy molekul, a tak je inaktivovat. Tkáně s vysokou koncentrací buněčných membrán mohou být více poškozeny napadením volnými radikály nenasycených mastných kyselin. Vzniká zde řetězová reakce peroxidace lipidů, která ničí struktury membrán. [6]

Záření podobných vlnových délek vyvolává stejné změny v určitých buňkách. Pro kompletní přetrhání vazem molekul nebo atomů je potřebné určitě množství fotonů. Reakce pokračuje s množstvím energie, se kterou fotony přijdou. Důležitý je vztah záření a doby ozáření, který udává velikost a sílu poškození dané tkáně. Poškození chronickým ozářením trvá měsíce až roky, řídí se různými zákony a závisí na okolních vlivech. [6]

## 5.2 Povrch oka

Rohovka je první tkání oka setkávající se s dopadajícím optickým zářením na oko. Většina UV záření je absorbována rohovkou a očními adnexy (oční víčka, spojivka). Chronickou absorpcí UV-B záření může vzniknout fotokeratitida a fotokonjunktivitida. UV záření může způsobit spojivkové degenerace, pterygium a pingueculu. Dlouhodobé ozáření očních víček UV zářením může vést k nádorovým změnám, např. karcinomu bazálních buněk, squamóznímu karcinomu nebo melanomu. [17; 22]

Absorpční spektrum rohovky má maximum 300 nm. Dále prochází jen záření s vyšší vlnovou délkou, tedy viditelné světlo počínající modrou spektrální oblastí. Při dlouhodobé expozici a vysoké intenzitě modrého záření dochází k přeměně energie, vnikají volné reaktivní částice kyslíku způsobující oxidativní stres tkáně. Ten může vést k oxidativnímu poškození buněk rohovky a až k buněčné apoptóze. Na toto poškození je nejvíce náchylný epitel rohovky, který je první buněčnou strukturou, která se v oku se zářením setkává. [17; 23]

Volné radikály kyslíku vzniklé modrým zářením způsobují i zánětlivé procesy rohovkového epitelu, které mohou být spojeny se syndromem suchého oka (Blue light-induced dry eyes). Zánět a následující protizánětlivé reakce snižují sekreci slz a mucinu, čímž dochází k nestabilitě slzného filmu a vzniká hyperosmotické prostředí očního povrchu. Modré světlo blízké se vlnovými délkami spektru UV záření může narušit mitotickou fázi buněk epitelu a snížit tak jeho schopnost obnovy (omezení počtu buněk i času růstu jednotlivých buněk). Druh a závažnost poškození předního segmentu oka závisí na vlnové délce záření a době expozice. V tabulce (*Tabulka 5.1*) jsou vypsány vybrané vlnové délky, doba rizikové expozice a změny, které těmito faktory mohou být vyvolány. [23; 24]

Modré světlo má nejen degenerativní účinky, ale lze jej využít i terapeuticky při léčbě bakteriálních keratitid. Kombinace záření o vlnové délce 440 nm a riboflavinu může být použita pro léčbu keratitidy způsobené bakterií *Staphylococcus aureus*. [23]

Tabulka 5.1: Mechanismy poškození povrchu oka modrým zářením [24]

| Zdroj záření     | $\lambda$ (nm)                    | doba expozice | Tkáň/buňka                                    | Změny   |
|------------------|-----------------------------------|---------------|---|---|
| LED              | 405                               | 3 min         | Buňky epitelu rohovky                         | Oxidativní stres, zkrácení životaschopnosti buněk epitelu   |
| Xenonová zářivka | 380-525                           | 17 h          | Buňky epitelu rohovky, buňky epitelu spojivky | Zkrácení životaschopnosti buněk, změny stavby buněk, nadměrný vznik volných radikálů, zánětlivé reakce, změny potenciálů mitochondriální membrány, oxidativní stres |
| LED              | 390,420, 430, 480, 630            |               |   |   |
| LED              | 410                               | 10 d          | Povrch oka                                    | Oxidativní stres, neprůhlednost rohovky a neovaskularizace, zánětlivé poškození tkáně, suché oko  |
| LED              | 410, 480, 525, 580, 595, 630, 850 | 24 h          | Buňky epitelu rohovky                         | Zkrácení životaschopnosti buněk epitelu, výskyt reaktivních forem kyslíku, poškození očního povrchu   |

### 5.3 Čočka

Po průchodu rohovkou a komorovou vodou záření dále prochází oční čočkou. Ta má schopnost filtrovat krátkovlnné záření a částečně tak chrání sítnici. Modré a modrofialové záření je absorbováno bílkovinami, enzymy a bílkovinnými depozity oční čočky. Tyto látky produkují žlutý pigment lutein, který způsobuje postupné tmavnutí a žloutnutí čočky. Snížena je tak i transparentnost oční čočky. Tímto principem může vzniknout katarakta zapříčiněná modrým zářením. Se zákalem čočky se snižuje propustnost pro krátkovlnné záření a je tím zvýšena ochrana sítnice. [23]

Podobně jako u rohovky, tak i v čočce může krátkovlnné záření indukovat produkci volných radikálů v mitochondriích čočkového epitelu [23]. Oční čočka absorbuje zhruba 20 % modrého záření ve 20 letech věku, v 60 letech absorbuje až 60 % [1]. Je potvrzené, že po vyjmutí oční čočky je vyšší transmitance záření v oku, protože oční čočka absorbuje vysokoenergetickou část viditelného záření a fotonů UV-A záření. Na základě vyšší propustnosti nitrooční čočky pro krátké vlnové délky dochází k fotochemickému poškození fotoreceptorů a buněk pigmentového epitelu sítnice [6].



## 5.4 Sítnice

Poslední tkání oka, se kterou se záření setkává, je sítnice. Zde může dojít k fotochemickým změnám. Modré světlo může urychlit vznik a progresi věkem podmíněné makulární degenerace (VPMD) či jiných morfologických změn buněk sítnice. Dochází k poškození vnějšího i vnitřního segmentu fotoreceptorů a pigmentového epitelu sítnice. Modré záření hraje důležitou roli ve zrakových i nezrakových procesech (proces vidění, cirkadiální rytmus). [6; 23]

Každý den absorbuje sítnice  $10^{12}$ – $10^{15}$  fotonů. Množství závisí na pracovním prostředí, intenzitě osvětlení prostředí a medicínském obrazu sítnice. Právě fotony vedou k nenapravitelnému poškození sítnice. Dlouhodobá expozice záření může vést k termálnímu poškození doprovázenému chemickým poškozením buněk sítnice. Termální poškození může být zapříčiněno zářením všech vlnových délek, změna teploty je vyšší než 20 °C a expozice je kratší než 24 hodin. Často nastává permanentní skotom. Chemické poškození je vyvoláno krátkými vlnovými délkami kratšími než 600 nm, minimální potřebná expozice ke změnám se pohybuje v rozmezí 24–48 h a zvýšení teploty je nižší než 10°C. [25]

Světlo není absorbováno všemi vrstvami sítnice. Buňky jako gangliové buňky, Müllerovy b., amakrinní b., bipolární b., jsou v podstatě transparentní díky absenci pigmentových zrn a nemohou tak absorbovat fotony záření. Naopak nejvíce jsou zářením poškozeny buňky obsahující pigment, tedy buňky pigmentového epitelu sítnice, tyčinky a čípky. [25]

Pigmentový epitel sítnice má důležitou funkci při vývoji a při procesu vidění, jako je sekrece růstového faktoru, antioxidační ochrana, fagocytóza buněčných fragmentů z vnějšího segmentu fotoreceptorů a regenerace zrakového pigmentu. V lysozomech buněk pigmentového epitelu sítnice se s věkem hromadí pigment lipofuscin, který je vedlejším produktem procesu vidění a fagocytózy. Pohlcuje světlo krátkých vlnových délek a iniciuje fotochemické procesy vedoucí k permanentnímu poškození tkáně. [6; 25]

Fluorescenční součástí lipofuscinu je látka A2E (N-retinyldiene-N-retinyloethanolamin). A2E se také jinak nazývá orange-emitting pyridinium bisretinoid. Je tvořen ve vnějších segmentech fotoreceptorů sekvencí reakcí, které jsou iniciované kondenzací dvou molekul all-trans-retinaldehydu s fosfatidylethanolaminem. Akumulace A2E v pigmentovém epitelu zasahuje do lysozomálních funkcí, tlumí bílkovinné a glykosaminoglykanové katabolické cesty. Množství lipofuscinu v pigmentovém epitelu je závislé na vystavování světlu. Ke strmému zvýšení

množství lipofuscinu dochází během prvních 20 let života. Toto zvýšení může být způsobeno vysokou propustností světla čočkou spolu se silným ozařováním krátkovlnným modrým světlem a UV-A zářením. Dlouhodobé vystavování viditelnému světlu tvoří predispozice pro vznik VPMD. Absorpční maximum A2E je mezi 430–440 nm. [6]

Součástmi lipofuscinu mohou být chromofory spouštějící nebo tlumící světelné poškození. Citlivost na ozáření modrým světlem je závislá na akumulaci lipofuscinu v pigmentovém epitelu, do kterého jsou zanořeny fotoreceptory. Buňky mají nižší stabilitu lysosomální membrány a životaschopnosti buňky. A2E jako fluorofor (chromofor) lipofuscinu je ovlivněn funkcí pigmentového epitelu, tlumí degradační kapacitu lysozomů, redukuje membránovou integritu a zvyšuje náchylnost k poškození světlem. A2E je schopno vyvolat buněčnou apoptózu buněk pigmentového epitelu. [6]

Produkty fotochemického poškození v A2E indukují produkci reaktivních forem kyslíku a vzniká tak oxidativní stres. Oxidativní stres může vést k zánětlivým reakcím v tkáni. Tvoří se zánětlivé faktory jako je interleukin, faktor nádorové nekrózy  $\alpha$ , kaspáza nebo monocyte adhesion factor. Tyto faktory vedou k destrukci cévní sítnicové bariéry a zánětům, které mohou způsobit buněčnou smrt a apoptózu. Poškození se týká také mitochondrií buněk pigmentového epitelu. Mitochondrie jsou největší továrnou energie v buňce a při jejich poškození vzniká buněčná apoptóza. Zvýšeným počtem volných radikálů vzniklých při ozáření vysokoenergetickým modrým zářením dochází k narušení vápníkové homeostázy mitochondrií, tedy transmembránového potenciálu organely a je zvýšena propustnost mitochondriální membrány. [6; 23; 24; 25; 26]

Krátkovlnné záření vede i k poškození cévní sítnicové bariéry. Na základě oxidativního stresu jsou poškozeny čípky sítnice a dochází k jejich odumírání. Při tomto procesu se zapojují makrofágy a mikroglie sítnice. Zvyšuje se počet protizánětlivých faktorů včetně tumor supresorového faktoru v cévní bariéře sítnice. Díky těmto faktorům se zvýší propustnost cévních kapilár a je přítomný i otok sítnice. [23]

Modré světlo způsobuje buněčnou smrt fotoreceptorů, převážně čípků. Při průchodu jednotlivými vrstvami sítnice je krátkovlnné modré světlo o vlnové délce 400–480 nm absorbováno ve vnější plexiformní vrstvě. Dochází však také k poškození gangliových buněk sítnice. Světlo nedopadá jen do centrální části sítnice, ale i do periferních oblastí, kde dochází k fotooxidativnímu poškození pigmentového epitelu. Stejně jako u fotochemických změn

rohovky závisí patologické změny tkáně i u sítnice na vlnových délkách světla, které se dostanou na sítnici, době ozařování (Tabulka 5.2). [23; 24]

Tabulka 5.2: Mechanismy poškození sítnice modrým zářením [24]

| Zdroj záření      | $\lambda$ (nm) | Doba expozice | Tkáň/buňka                         | Změny   |
|-------------------|----------------|---------------|------------------------------------|---|
| LED               | 480            | 3 měsíce      | Sítnice                            | Ztenčení centra sítnice, apoptóza fotoreceptorů, aktivace mikroglíi, degenerace sítnice |
| LED               | 450            | 12 h          | Neurální buňky sítnice             | Změny štěpení a navázání bílkovin v mitochondriích, zvýšení počtu volných radikálů      |
| Merkurová zářivka | 480            | 5 h           | Buňky pigmentového epitelu sítnice | Buněčná apoptóza  |
| LED               | 410–530        | 24 h          | Neurální buňky sítnice             | Oxidativní stres, klesá životnost buněk, klesá množství ATP                             |
| LED               | 430            | 30 min        | Buňky pigmentového epitelu sítnice | Zvýšení počtu volných radikálů, autofagie, poškození lyzozomu                           |
| Modré záření      | 448            | 6 h           | Buňky pigmentového epitelu sítnice | Propustnost membrány lyzozomů,  |
| Xenonová lampa    | 403            | 9 dní         | Sítnice                            | Degenerace sítnice, apoptóza fotoreceptorů  |
| Modré záření      | 403            | 30 min        | Sítnice                            | Fotoreverzibilní vyblednutí rodopsinu   |
| LED               | 456            | 5 dní         | Sítnice                            | Snížení zrakových funkcí, změna lokalizace rodopsinu                                    |
| LED               | 400            | 15 h          | Buňky pigmentového epitelu sítnice | Věkem podmíněná makulární degenerace  |
| Halogenová lampa  | 460            | 48 h          | Buňky pigmentového epitelu sítnice | Zpomalení růstu buněk pigmentového epitelu sítnice                                      |
| LED               | 460            | 0–12 h        | Buňky pigmentového epitelu sítnice | Poškození fundu, ztenčení sítnice, poškození přenosu informace mezi neurony             |
| LED               | 465            | 6–24 h        | Fotoreceptory sítnice              | Volné radikály  |
| LED               | 464            | 3–24 h        | Fotoreceptory sítnice              | Volné radikály  |
| LED               | 470            | 4 h           | Buňky pigmentového epitelu sítnice | Poškození funkce bariéry pigmentového epitelu, oxidativní stres                         |

Při krátkodobém osvětlení sítnice slunečním zářením může dojít k poškození buněk pigmentového epitelu sítnice, který má však schopnost rychlé regenerace a je rychle obnovena celistvost krevní sítnicové bariéry. K degeneraci fotoreceptorů dochází až po delší době po vystavení záření. Může vzniknout permanentní centrální skotom, termální poškození sítnice nebo expoziční retinitida. [6]

V makule jsou koncentrované 2 hydroxyl-karotenotidy, lutein a zeaxanthin, které mají schopnost absorbance do 460 nm a fungují tak jako širokopásmový filtr. Makulární pigment může chránit makulu před poškozením modrým zářením nebo se může chovat jako antioxidant. [6]

#### **5.4.1 Mechanismus fotochemického poškození sítnice**

Po dopadu záření na buňku proběhne hned několik reakcí. Energie fotonu světla mění ozářenou molekulu, probíhají změny v elektronových orbitalech, nebo vede k rozbití fyzikálních vazeb. Následná změna energie z fotonu na fotosenzitivní molekulu iniciuje oxidativní změny v elektronových orbitalech, kdy se tvoří reaktivní formy kyslíku, volné radikály. Tyto reakce mohou být následovány buněčnou smrtí. Náchylnost k poškození závisí na typu fotosenzitivní buňky a energii fotonu (vlnové délce záření). [25]

Jsou známy 2 mechanismy fotochemického poškození. Prvním je Noellovo poškození (Noell a spol., 1966). V něm akční spektrum obsahuje účast fotocitlivého pigmentu fotoreceptorů, expozice záření musí být delší než 8 h a světlo má konstantní zelenou barvu (490–580 nm). Prokázané poškození je prokazatelné po 8–50 dnech u fotoreceptorů a pigmentového epitelu. Druhým mechanismem je Hamovo poškození (Ham a spol., 1976), nebo také poškození modrým světlem. Jeho příčinou je ohraničené spektrum vlnových délek spojené s chemickými změnami lipofuscinu. Předpokladem je expozice světla taková, že se v ní zrakový pigment v podstatě úplně vybělí. Nezávisle na druhu záření, fotoreceptory jsou primárním terčem poškození sítnice fialovým a ultrafialovým zářením (Norren a Gorgels, 2011). Hamovo poškození počítá s tím, že viditelným zářením je poškozeno nejvíce buněk pigmentového epitelu a nejméně jsou poškozeny fotoreceptory. Poškození zahrnuje melanin, lipofuscin a další produkty zrakového cyklu. Melanin hraje hlavní roli ve fotochemickém poškození, protože absorbuje volné radikály kyslíku a má informativní funkci. [25]

Lipofuscin se stává součástí buněk pigmentového epitelu zdravé sítnice zhruba od 10 let věku života jedince. Obsahuje několik různých fluoroforů schopných širokospektré fluorescence při

excitaci (vzruchu) vyvolané UV zářením nebo modrým světlem. Pokud je lipofuscin ozářen vlnovými délkami o velikosti 390–550 nm, může generovat anionty superoxidu, volný kyslík, peroxid vodíku a hydroperoxydy lipidů. Tvorba těchto volných radikálů vzrůstá s klesající vlnovou délkou. Fototoxická lipofuscinu ohrožuje citlivost lysozomů, narušuje aktivitu katalázy, vyvolává peroxidaci tuků. Tím je způsobeno poškození mitochondriální DNA a poškození buněk pigmentového epitelu sítnice. K poškození DNA modrým světlem dochází hlavně kvůli oxidaci purinu, guaninu a pyrimidinových bází. [6]

Náchylnost sítnice k poškození světelným zářením je dána mnoha důvody. Jedním z důvodů je bohaté zásobení sítnice kyslíkem. Dále díky své fotosenzitivní funkci dostává sítnice velké dávky záření. Dalšími důvody je také to, že je v sítnici obsaženo mnoho nenasycených mastných kyselin ve vnějších segmentech fotoreceptorů a mnoho chromoforů v neuroretině a pigmentovém epitelu. [6]

## 5.5 Význam procesu vidění ve fototoxicitě

Absorpce fotonu rhodopsinem nebo jedním z opsinů čípků zahájí kaskádu reakcí, které jsou známé jako zrakový cyklus. All-trans-retinal se mění zpět na 11-cis-retinal pro znovustvoření zrakového pigmentu. Kroky tohoto procesu umožněného fotoreceptory a pigmentovým epitelem sítnice generují retinoidy, které se chovají fotosenzitivně. V čípcích může být 11-cis-retinal měněný buď výše zmíněnou cestou, nebo může být regenerovaný jiným mechanismem, který zahrnuje Müllerovy buňky sítnice. All-trans-retinal a all-trans-retinol mohou být také citlivé na poškození světlem. Absorpční spektrum all-trans-retinalu má horní práh na 387 nm. All-trans-retinal zrychluje formování a akumulaci lipofuscinu jako látky v pigmentovém epitelu. Estery retinyly jsou fotosenzitivní ve formě anhydridretinolu, který zahajuje buněčnou apoptózu při oxidativním stresu. Není známo, jestli all-trans-retinal a all-trans-retinol jsou dostatečně stabilní a volné k zabudování ve vnějších segmentech fotoreceptorů a schopné se tak chovat jako fotosenzitivní látky. Retinoidy mají absorpční spektrum do 450 nm. [6; 25]

## 5.6 Dopad vystavení světlu u věkem podmíněné makulární degenerace

Věkem podmíněná makulární degenerace (VPMD) je degenerativní poškození, které postihuje fotoreceptory, buňky pigmentového epitelu sítnice, Bruchovu membránu, a cévnatku. Je nejčastější příčinou slepoty ve věku nad 65 let. Klinickými známkami jsou depozita (drúzy) mezi bazální membránou retinálního pigmentového epitelu a Bruchovo membránou. Drúzy

jsou extracelulární masy heterogenních kompozit. Akumulace lipofuscinových granul a dalších produktů fagocytózy přispívá k formaci a ukládání drúz. Lipofuscin se akumuluje s postupujícím věkem, takže oči starého člověka jsou náchylnější k poškození modrým světlem. Poškození fotoreceptorů je ovlivněno konstantní obnovou disků. Stárnutí má i malý vliv na počet čípků ve foveole, kde počet parafoveolárních tyčinek klesá zhruba o 30 % s přibývajícím věkem. Prostorové rozložení lipofuscinu odpovídá rozložení tyčinek na sítnici a v té souvislosti i věkem podmíněné ztrátě jako u tyčinek. Pokud dojde ke ztrátě větší než 30–60 %, dochází ke vzniku VPMD. Je tak redukována skotopická citlivost v makule. Brzká ztráta tyčinek je typickým projevem procesu stárnutí a VPMD, odráží nepřetržité změny spojené s věkem a vzniká poškození tkáně. [6]

## 5.7 Ametropie

Elektromagnetické záření, hlavně spektrum viditelného světla, ovlivňuje i růst oka. Červené a zelené světlo urychluje růst oka, modré světlo naopak zpomaluje růst oka. Ametropické vady oka (myopie, hypermetropie, astigmatismus) jsou ovlivněny refrakčním stavem oka a axiální délkou. Jak je již výše zmíněno, modré záření způsobuje disfunkci pigmentového epitelu sítnice. Pigmentový epitel je velmi náchylný k poškození světlem díky vysokému obsahu fototoxických pigmentových zrn. Probíhají zde zánětlivé procesy a neovaskularizace svrchních vrstev sítnice, které vedou k jejímu poškození. Modrým zářením způsobená dysfunkce může způsobit narušení stability matrixu skléry a následně dochází k remodelaci skléry, která vede k ametropickým procesům. [27]

## 5.8 Cirkadiální rytmus

Modré světlo, hlavně jeho modro-tyrkysové spektrum, reguluje „tělesné hodiny“ organismu nazývané cirkadiální cyklus. Podporuje ostražitost, paměť, poznávání, náladu a hormonální stabilitu. Modré světlo stimuluje sekreci melatoninu, který má za následek regulaci hladiny kortizolu v určitou denní dobu a reguluje cirkadiální rytmus. Při nadměrném vystavení modrému záření, hlavně v nočních hodinách, je produkce melatoninu na vrcholu. Nejenže dochází k delšímu vystavení buněk sítnice modrému světlu a zvyšuje se tak riziko vzniku patologie ozářením, ale může vést i k procesům ovlivňujícím stav celého organismu.

Hormonální nerovnováha způsobená modrým zářením stimuluje mozek, brání produkci melatoninu a zvyšuje produkci kortikosteroidů, která narušuje sekreci hormonů a tím i kvalitu spánku. Právě kvalita spánku může mít vliv na vznik a progresi očních onemocnění. Nekvalitní

spánek má za následek vyšší hladinu kortikosteroidů, které mohou snižovat citlivost parasympatických nervů a snížení produkce slz. Hrozí tak vznik syndromu suchého oka. Spánkové poruchy způsobené modrým zářením způsobují nižší frekvenci mrkání, díky které se vypařují rychleji slzy a přední segment oka osychá. Nedostatek spánku může také snižovat hladinu androgenů v krvi, vzniká dysfunkce žláz očních víček a je tak sníženo množství lipidové složky slzného filmu zabraňující odpařování slz. [17; 23]

## 5.9 Computer vision syndrom

Syndrom počítačového vidění, také známý jako computer vision syndrom (CVS), je soubor zrakových a očních problémů vzniklých na základě používání digitálních zařízení. Syndromem počítačového vidění trpí zhruba 60 milionů lidí na celém světě a každý rok přibude jeden milion dalších. CVS zahrnuje symptomy jako jsou suché a podrážděné oči, napětí očí a jejich únavu, rozmazané vidění, zčervenání očí, pálení očí, nadměrné slzení, dvojité vidění, bolest hlavy, světloplachost, změny zrakového vnímání, problémy s přestřováním mezi blízkem a dálkou. CVS může být spojen i s různými poruchami pohybového aparátu, jako jsou bolesti zad, krku, ramen, paží a rukou. Tyto problémy vznikají na špatném dodržování ergonomie pracovního prostředí a dlouhodobého sezení u počítače. [28; 29]

Příčinou očních problémů a astenopických obtíží jsou nejčastěji refrakční, akomodační a vergenční anomálie. Problémem jsou malé obrazovky počítačů a mobilních telefonů či tabletů. Spolu se zmenšováním obrazovky se zmenšuje i písmo textu, což může být příčinou zmenšování pracovní vzdálenosti a s tím i spojená větší nutnost akomodovat a konvergovat. Akomodace a konvergence umožňují jednoduché a ostré vidění. Nejčastějším akomodačním problémem u CVS je akomodační infacilita, tedy akomodační nepružnost a akomodační zpoždění, kdy je problém s přestřováním mezi pohledem do blízka a povolením akomodace do dálky. [28; 29]

CVS je často spojovaný se syndromem suchých očí. Se zvyšující se dobou práce na počítači se zvyšuje prevalence výskytu syndromu suchého oka. Suché oči jsou zapříčiněny několika faktory. Vliv má pracovní prostředí jedince, ve kterém je vyšší riziko osychání povrchu oka. To je ovlivněno přítomností klimatizace, horkovzdušného topení, vlhkost vzduchu a znečištění vzduchu v místnosti. Další příčinou je snížená frekvence mrkání při soustředění se na práci, nedokonalé mrkání, nošení kontaktních čoček. [29]

## 6 Ochrana zraku

### 6.1 Přirozené bariéry

#### 6.1.1 Ozonová vrstva

Ozón je plyn přítomný ve vnějších vrstvách atmosféry a tvoří první vrstvu, která brání Zemi před UV zářením přicházejícím ze Slunce. Molekula ozonu se skládá z tří atomů kyslíku a má schopnost absorbovat UV záření. Ozonová vrstva odfiltruje všechno UV-C záření a absorbuje zhruba 70–90 % UV-B záření. [22]

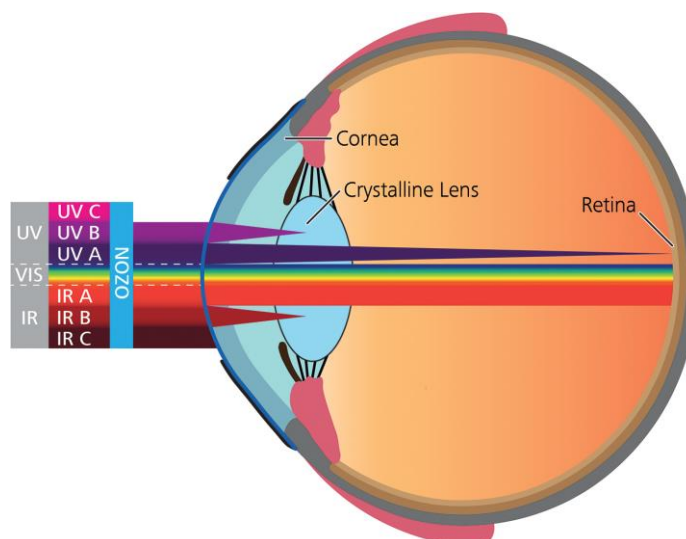
#### 6.1.2 Obranný mechanismus oka

Přicházející světlo do oka je částečně filtrováno a blokováno před dopadem na sítnici strukturami oka. Prvotní bariérou jsou oční víčka a řasy. UV-B záření je filtrováno slzným filmem. Dalšími absorpčními strukturami jsou rohovka a oční čočka. Rohovka jako transparentní struktura propustí do oka viditelné záření spolu s UV-A zářením a částí UV-B záření, které nebylo odfiltrováno slzným filmem. Rohovkou projde do oka 22–73 % UV-B záření v rozmezí 300–320 nm a UV-A záření. Vlnové délky od 295 do 317 nm jsou absorbovány komorovou vodou. [22]

Světlo dále prochází oční čočkou. Propustnost čočky pro krátkovlnné záření se snižuje s věkem. Čočka mladého jedince absorbuje zhruba 36 % záření do vlnové délky 320 nm a 48 % do vlnové délky 340 nm. V dospělosti projde až na sítnici méně než 1 % UV záření s vlnovou délkou nižší než 340 nm a 2 % UV záření o vlnových délkách 340–360 nm. Posledním optickým médiem, se kterým se světlo v oku setká, je sklivce. Sklivcem projde více než 90 % viditelného světla a 80 % UVA záření s vlnovou délkou vyšší než 360 nm. [22]

Fotoreceptory sítnice jsou bráněny makulárními pigmenty, které je brání před vysokoenergetickým modrým světlem. Absorpční maximum pigmentů sítnice je zhruba 460 nm. Filtrují tak 40 % viditelného modrého světla. [22]





Obrázek 6.1: Průchod světla okem [22]

## 6.2 Brýlové čočky

Brýlové čočky (BČ) se používají pro korekci refrakční vady. Brýlová čočka může mít různé optické a mechanické vlastnosti. Vše závisí na materiálu a povrchových úpravách čočky. Brýlové čočky jsou vyráběny ze skla (minerální) nebo z plastu (organické). [30; 31]

Jednou z hlavních veličin popisujících brýlovou čočku je index lomu. Čím vyšší je index lomu čočky, tím se BČ stejné vrcholové lámavosti stává tenčí. Brýlová čočka je charakterizovaná také Abbeovým číslem, které udává stupeň disperze. S rostoucím Abbeovým číslem klesá disperze. Vysoká disperze je u brýlových čoček nežádoucí a může způsobovat duhové lemy hlavně na černobílých rozhraních předmětů. Materiál brýlové čočky by neměl mít Abbeovo číslo nižší než 30. Materiál brýlové čočky charakterizuje také hustota, kdy ideální je co nejnižší, aby čočka nebyla těžká. [30]

Skleněné neboli minerální či anorganické čočky se od sebe mohou lišit indexem lomu. Nízkoindexové sklo nazývané jako korunové sklo má index lomu 1,523, Abbeovo číslo 58,3 a hustotu 2,55 g/cm<sup>2</sup>. Druhým typem je flintové sklo, kdy index lomu může nabýt až hodnot 1,9 a hustotu až 4,02 g/cm<sup>2</sup>. Abbeovo číslo s rostoucím indexem klesá a může dosáhnout hodnot až 30,4. Skleněné čočky jsou oproti plastovým těžší a křehčí. [30; 31; 32]

Plastové čočky jsou mnohem používanější než skleněné čočky. Prvním plastovým materiálem byl polymethylmetakrylát (PMMA, plexisklo), který má index lomu 1,49 a hustotu 1,30 g/cm<sup>2</sup>. Postupem času byl tento materiál nahrazen polyallyldiglycolcarbonátem, u kterého se uchytil název CR 39. Jedná se o speciální čirou pryskyřici, který má příznivé optické i mechanické

vlastnosti. Index lomu materiálu CR 39 je 1,49 až 1,5 a Abbeovo číslo 58 a hustota je 1,32 g/cm<sup>2</sup>. CR 39 je reaktoplast. [30; 31; 32]

Více odolným materiálem vůči nárazu je polykarbonát (PC) oproti CR 39. PC je řazen do skupiny termoplastů. Hustota tohoto materiálu je 1,22 g/cm<sup>2</sup>, Abbeovo číslo 31 a index lomu 1,59. Polykarbonát má příznivé mechanické vlastnosti a je odolnější nežli sklo nebo CR 39.

Velmi odolným, lehkým a pružným materiálem je Trivex. Index lomu Trivexu je 1,53. Abbeovo číslo se udává mezi hodnotami 43–45 a hustota je 1,11 g/cm<sup>2</sup>. [30; 31; 32]

### 6.2.1 Povrchové úpravy brýlových čoček

Brýlové čočky mohou být povrchově upravovány, zušlechtovány. Na přední i zadní plochu BČ se nanášejí tenké vrstvy, které vylepšují mechanické a optické vlastnosti čočky. Mezi tyto úpravy patří tvrzení, antireflexní vrstvy, hydrofobní a olejořobní úpravy. Tvrzení brýlové čočky (Hard coating, HC) je povrchová úprava, která zmírňuje riziko poškrábání plastové brýlové čočky. Plastové čočky jsou mnohem měkčí nežli čočky z minerálního skla. Jsou tedy i více náchylné k poškrábání povrchu. [30]

Úkolem antireflexní vrstvy je snížení nežádoucích odrazů (reflexů) z povrchu čoček a aberací druhého řádu světelných zdrojů za snížených světelných podmínek. Dále poskytují zlepšení kontrastu obrazu a svým jemným barevným odstínem zbytkového odrazu povrchu čoček plní i funkci estetickou. Zabraňují vzniku možné diplopie zobrazovaného předmětu při šikmém dopadu světla. Dále například brání několikanásobným reflexům mezi brýlovou čočkou a rohovkou, kdy u vyšší optické mohutnosti brýlové čočky může dojít také k diplopii. Díky antireflexní vrstvě se také zamezí nežádoucímu odrazu okolního prostředí od přední plochy čočky. [30; 33]

Antireflexní vrstvy se nanášejí v několika vrstvách. Pro snížení nebo změnu odrazivosti povrchu čočky se využívá principu interference. Antireflexní vrstva je tak tlustá, aby byla polovinou poloviny vlnové délky, kterou eliminuje. Jde o to, že pokud se vybraná vlnová délka setká s vlnovou délkou posunutou o ½ její vlnové délky (má o polovinu posunutou fázi), dojde k jejímu vyrušení. Dochází k destruktivní interferenci. Světlo však prochází vrstvou dvakrát, jednou přichází a pak je část odražena. Proto tloušťka tenké vrstvy je  $\lambda/4$ . [34; 35]

## 6.2.2 Brýlové čočky blokující modré světlo

Standardní brýlové čočky mají schopnost nepropouštět UV záření (do 380 nm). Pro UV záření mají brýlové čočky maximální transmitanci 0,12 %. Přidáním antireflexní vrstvy nebo žlutého chromoforu do materiálu čočky pak může čočka blokovat i modré světlo. [21; 36]

Brýlové čočky blokující modré světlo blokují krátkovlnné záření dopadající na oko. Jsou firmami prezentované jako snižující únavu a nepohodlí vzniklé při používání digitálních zařízení, zlepšují kvalitu spánku a chrání před fototoxickým poškozením sítnice. Blokují jak UV záření (200–380 nm), tak i fialové (380–440 nm) a modré světlo (440–500 nm) viditelného spektra. Transmitance pro modré záření blízké UV spektru je 74,9 %–90,3 %. Laboratorní studie zjistily, že 50% propustnost čočky blokující modré světlo o vlnové délce 430 nm může až o 80 % snížit riziko fotochemického poškození sítnice. [21; 36; 37]

První metodou blokující modré světlo jsou antireflexní vrstvy nanášené na přední i zadní plochu čočky. Selektivně tlumí modrofialové spektrum světla do 415–455 nm. Druhou, jak je výše zmíněno, je přidání žlutého chromoforu do materiálu čočky. Barvivo absorbuje modré záření a nepropustí jej dále do oka. [21; 36]

Během provedených studií nebyl potvrzen rozdíl v pozorování příznaků digitální únavy u respondentů mezi čočkami blokujícími modré světlo a konvenčními čočkami s běžnou antireflexní úpravou. Digitální únava (syndrom počítačového vidění) je však multifaktoriální stav s mnoha příčinami, zahrnující hlavně špatnou refrakční korekci, dlouhodobou práci do blízka, vergenční poruchy a nestabilitu slzného filmu. Při pozorování vlivu čoček blokujících modré světlo na cirkadiální rytmus bylo zaznamenáno zlepšení kvality spánku u respondentů. [36]

## 6.2.3 Sluneční brýle

Sluneční brýle jsou opatřeny zbarvenými brýlovými čočkami s UV filtry. Kritéria pro kvalitu slunečních čoček stanovil American National Standards Institute (ANSI), který sluneční brýle uznal spíše jako módní doplněk a dodržování těchto standardů je pro firmy dobrovolné. ANSI stanovil kritérium pro sluneční čočky, kdy brýlová čočka pro toto označení musí propustit maximálně 1 % záření o vlnové délce nižší, než je 310 nm. [38]

Sluneční brýle chrání oko o jeho okolí, ale vzhledem k parametrům obroučky může nežádoucí záření na oko pod jistým úhlem dopadnout. Největší nebezpečí vzniká při odrazu světla od sněhu vzhledem k jeho vysoké odrazivosti. Pro pohyb na horách, zimní sporty a pobyt v oblasti

pólů jsou proto doporučeny sluneční brýle s vyššími UV filtry. Lyžařské brýle jsou opatřeny UV filtry, které snižují riziko vzniku tzv. sněžné slepoty, která vzniká intenzivní odrazivostí světla od sněžové plochy. Světlo se také odráží od vodní hladiny, která ale odráží méně paprsků než sníh. Na základě Fresnelova zákona odrazu je odražené světlo polarizované, avšak odražené světlo tvoří nežádoucí odlesky až diskomfortní oslnění. Tohoto jevu využívají i polarizační brýle, které usměrněním světelných paprsků dopadajících na čočku selektivně odfiltrují nežádoucí paprsky tvořící nechtěné odlesky. [38]

### 6.3 Kontaktní čočky

UV ochrana zraku je také možná pomocí kontaktních čoček s UV filtrem. Americký úřad pro kontrolu potravin a léčiv (Food and Drug Administration, FDA) stanovil dvě třídy pro kontaktní čočky blokující UV záření. Kontaktní čočky třídy 1 blokují 90 % UV-A paprsků a 99 % paprsků UV-B. Čočky třídy 2 mají schopnost blokovat 70 % UV-A záření a 95 % UV-B. Kontaktní čočky třídy 1 jsou doporučeny pro používání v oblastech, kde je zrak vystavován vyššímu riziku poškozením přirozeným světlem, jako jsou hory nebo pláže. [39]

Materiál blokující UV záření je přidáván do směsi, ze které jsou kontaktní čočky vyráběny. Záleží proto na tloušťce čočky. Propustnost pro světlo je díky tomu měřena za standardizovaných podmínek, tj. vždy u kontaktní čočky i dioptrické hodnotě -3,0 dpt. Tloušťka čočky je závislá na dioptrické hodnotě, tedy plusové kontaktní čočky jsou ve středu tlustší než mínusové čočky. Firmy vyrábějící kontaktní čočky však používají stejnou monomerní směs pro různé dioptrické hodnoty stejného typu kontaktních čoček. Proto tenké kontaktní čočky (zejména nízké mínusové) filtrují méně UV záření nežli tlustší kontaktní čočky (silné plusové). [40]

Kontaktní čočky blokující UV záření jsou schopny blokovat krátkovlnné záření, které pronikne k oku nechráněním slunečními brýlemi, hlavně periferií. Avšak kontaktní čočky chrání pouze rohovku a tkáň uvnitř očního bulbu. Spojivka a přídatné orgány oka, zejména pak oční víčka jsou vystaveny záření. Spolehlivou ochranu oka pak zajistí kombinace slunečních brýlí spolu s kontaktními čočkami blokující UV záření. [40]

### 6.4 Nitrooční čočky

Nitrooční čočky (Intraocular lenses, IOL) jsou oční implantáty, které slouží jako náhrada fyziologické oční čočky člověka. Jsou používány ke zrakové korekci afakie u dospělých

pacientů po operaci katarakty. Optická část má bikonvexní tvar. Průměr optické části je 6,0 mm, celková délka čočky i s haptikami je 13,0 mm. [36; 37; 41]

Konvenční nitrooční čočky blokují UV záření, dále jsou používané nitrooční čočky blokující modré světlo. Obsahují žlutá barviva, která absorbují nežádoucí krátkovlnné záření. Nitrooční čočky blokující modré světlo se více blíží svou propustností pro světlo většinou zbarvené oční čočce. Chrání tak sítnici před poškozením zářením po operaci katarakty, zejména pak snižují riziko vzniku a/nebo progresu již vzniklé VPMD. [36; 37; 41]

Nitrooční čočka může být vyrobena z akrylátu nebo ze silikonu. Čočky z těchto materiálů jsou biokompatibilní, trvanlivé, neantigenní, nekancerogenní. Mají vysoký refrakční index, aby byla čočka co nejtenčí a nejlehčí. [2]

Akrylátové čočky jsou děleny do dvou skupin, na tvrdé a měkké. Tvrdé akrylátové čočky jsou vyrobeny z polymethylmetakrylátu (PMMA). Kvůli tvrdosti nejsou možné aplikovat mikroincizí jako měkké čočky, které jsou svinutelné. Měkké akrylátové čočky mohou být hydrofobní a hydrofilní. Hydrofobní čočka je vyráběna z materiálu, který je podobný PMMA. Hydrofilní akrylátové čočky byly původně vyráběny z poly-HEMA (polyhydroxyethylmetakrylát). V současné době se nejčastěji kombinuje 2-hydroxyethylmetakrylát s jiným akrylátem (hydrofobním metylmetakrylátem). Měkký materiál čočky umožňuje svinutí čočky pro snadnější zavedení IOL skrz incizi, která je menší než optická část čočky. Po zavedení do oka na požadované místo se čočka rozvine a haptiky zajistí správné umístění čočky v čočkovém pouzdře. [2; 42]

Silikonové čočky jsou stejně jako akrylátové čočky vysoce biokompatibilní. Silikonový materiál je neadhezivní k dalším tkáním a jsou velmi elastické. Tyto materiály jsou adherentní k silikonovému oleji, který se využívá v sítnicové chirurgii. [2]

Jednou z možných komplikací zbarvených nitroočních čoček blokujících modré světlo je pravděpodobné snížení barevného vnímání, skotopické citlivosti (nižší zrakové vnímání při snížených světelných podmínkách) a zásah do cirkadiálního rytmu člověka. Tyto jevy jsou možné díky krátkovlnnému modrému záření, které je ale filtrováno IOL. Nitrooční čočky blokující modré světlo jsou vhodné pro pacienty s potenciální zrakovou únavou a zvýšenou pravděpodobností vzniku poškození makuly. Nitrooční čočky blokují více modrého světla než brýlové čočky opatřené úpravou snižující propustnost pro modré světlo. [21; 36; 37]

## 6.5 Digitální zařízení

U digitálních zařízení je možné použít různé aplikace, které umožňují upravit spektrum displeje a posunout jej do teplejších barev [16]. Některá digitální mají možnost nastavení „nočního používání“, které redukuje vyzařování krátkovlnného záření. Úmyslem je zamezit vystavování očí modrému světlu ve večerních hodinách kvůli zlepšení kvality spánku. Také je doporučeno nepoužívat digitální zařízení před spánkem. [21; 23]

## 6.6 Chemická ochrana

Kromě fyzikální ochrany zraku pomocí čoček a filtrů zabraňujícím dopad paprsků na oko je možné zrak, zejména pak sítnici, chránit i chemickou cestou před fotochemickým poškozením. Jednou z možností jsou antioxidační látky. Patří mezi ně barvivo lutein, kurkumin, vitamin E nebo *Prunella vulgaris* (černohlávek obecný). Jedná se o látky, které snižují akumulaci volných radikálů. Lutein je karotenoid obsažený v sítnici a lze jej najít i v přírodě. Chrání sítnici před poškozením tím, že se začne hromadit v oblasti makuly a absorbuje spolu s dalšími makulárními pigmenty nežádoucí krátkovlnné záření, čímž chrání fotoreceptory. Další rostlinné látky, kurkumin a extrakt z černohlávků obecného mají antioxidantní účinky. Chrání buňky pigmentového epitelu sítnice před volnými radikály a zvyšují výskyt protizánětlivých faktorů. [24]

Dalšími látkami snižujícími fotochemické poškození sítnice jsou protizánětlivé léky. Působením modrého záření se v sítnici hromadí zánětlivé faktory, které způsobují buněčnou apoptózu. Protizánětlivé léky sniží výskyt těchto faktorů a tím je i nižší riziko vzniku buněčné smrti. [24]

Jedním z ochranných opatření je i genová terapie. Ciliary neurotrophic factor (CNTF) je protein, který zabraňuje buněčné apoptóze, aktivuje Müllerovy buňky sítnice a sekreci neurotrofického faktoru. Injekce tohoto proteinu do oka může zpomalit degeneraci a následnou smrt fotoreceptorů způsobenou zářením. Modifikací genu CNTF je možné léčit i poškození zrakového terče a nervu, které vzniklo na základě modrého záření. [24]

## 7 Experimentální část

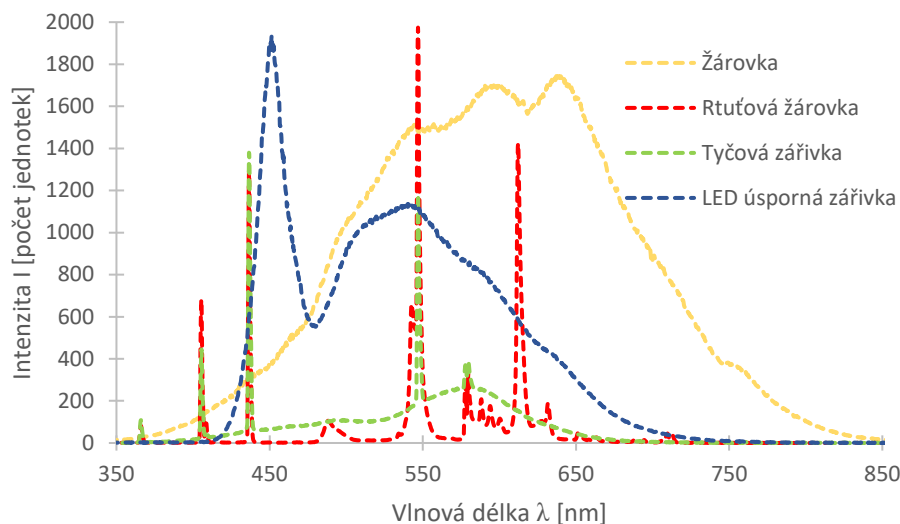
Krátkovlnné elektromagnetické záření, které má vysokou energii, je možno filtrovat. Existují různé metody filtrace. Experimentální část je tvořena ze dvou částí. První částí je měření vybraných umělých zdrojů viditelného světla. Kromě základních zdrojů světla jsou měřena i spektra digitálních zařízení, která mají možnost snížení intenzity krátkovlnného světla pomocí softwarového nastavení. Druhá část se věnuje filtraci krátkovlnného záření pomocí čoček. Pro měření byly vybrány brýlové čočky a nitrooční čočky.

### 7.1 Spektrum vybraných světelných zdrojů

Prvním měřením je měření spektrálního vyzařování vybraných zdrojů světelného záření. Zdroje záření byly měřeny pomocí UV-VIS vláknového spektrometru USB2000+ dodávaného firmou Ocean optics, ve fyzikální laboratoři na FBMI ČVUT. V místnosti během měření nebyly spuštěny jiné světelné zdroje kromě měřeného vzorku a obrazovky počítače, který zaznamenával data naměřená spektrometrem. Optické vlákno spektrometru, které přijímalo optický signál, bylo přikládáno přímo ke zdroji optického záření.

#### 7.1.1 Základní zdroje světla – zářivky, žárovky

Jako zdroje optického záření byly měřeny vybrané dostupné umělé zdroje světla. Prvním zdrojem byla klasická žárovka s wolframovým vláknem od značky Philips (Philips classic tone, příkon 100 W). Dále byla měřena úsporná LED žárovka (AA61645, 10 W), tyčová zářivka (Sylvania F18W/T8, 18 W) a rtuťová žárovka (Osram dulux micro twist, 23 W). Naměřená data jsou vykreslena v grafu (*Graf 7.1*), kde je vyobrazena závislost intenzity na vlnové délce. Graf je doplněn tabulkou (*Tabulka 7.1*) se shrnutými maximy intenzity vlnových délek.



Graf 7.1: Spektrální složení světla vyzařovaného běžnými světelnými zdroji

Tabulka 7.1: Vlnové délky maxim intenzity světla vyzařovaného různými světelnými zdroji

| Zdroj záření                                     | Vlnová délka maxima [nm] | Intenzita I [počet jednotek] |
|--|--------------------------|------------------------------|
| LED úsporná zářivka<br>AA61645, 10 W             | 450                      | 1901                         |
|  | 549                      | 1090                         |
| Žárovka<br>Philips classicitone, 100 W           | 600                      | 1710,5                       |
|  | 640                      | 1743                         |
| Rtuťová žárovka<br>Osram dulux micro twist, 23 W | 405                      | 681                          |
|  | 436                      | 1296                         |
|  | 547                      | 1974                         |
|  | 612                      | 1424                         |
| Tyčová zářivka<br>Sylvania F18W/T8, 18 W         | 405,5                    | 444,5                        |
|  | 437                      | 1310                         |
|  | 547                      | 1181                         |

Podle grafu (*Graf 7.1*) spektrálního složení světla lze říci, že každý zdroj vyzařuje jiné spektrum. Graf je doplněn tabulkou (*Tabulka 7.1*), ve které jsou vypsána maxima dosažené intenzity. LED zářivka má nejvyšší intenzitu v oblasti krátkých vlnových délek (maximální intenzita je pro vlnovou délku 450 nm – modré světlo). Poté dochází ke snížení intenzity pro zelené a červené světlo. Žárovka, jakožto i tepelný zdroj, vyzařuje minimum studeného modrého světla. Intenzita stoupá v oblasti zeleného světla a maxima dosahuje v oblasti vlnových délek pro červenou barvu. Nejvyšší intenzita žárovky je v oblasti delších vlnových délek viditelného světla, maxima dosahuje vlnová délka 640 nm. Rtuťová žárovka má své spektrum posunuté do teplejších barev. V grafu jsou patrné čtyři hlavní píky s maximy v modrofialové (405 nm), modré (436 nm), zelené (547 nm) a červené barvě (612 nm).

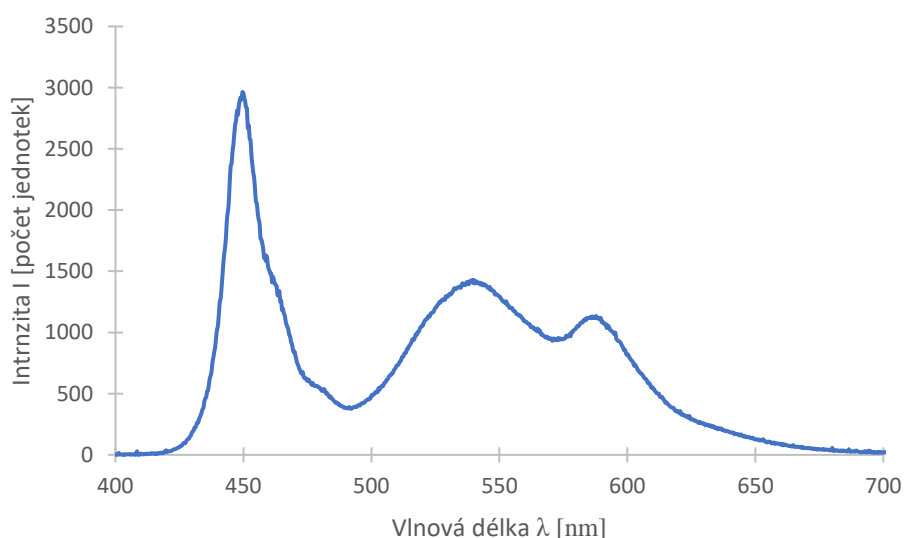


Maximální intenzity dosahuje světlo v oblasti zelené barvy, dále v oblasti červené barvy a modré barvy, nejnižší intenzitu má oblast modrofialového světla blízkého UV oblasti. Posledním zdrojem je úsporná tyčová zářivka. Její spektrum je tvořeno třemi barvami spektra, které jsou patrné z grafu dle dosažených maxim. Maximum po vlnové délky modré až modrofialové barvy je 405,5 nm, dále nejvyšší intenzitu má modré světlo s vlnovou délkou 437 nm, třetí spektrální barvou je zelená, kde je maxima dosaženo pro vlnovou délku 547 nm.

### 7.1.2 Počítač

Dalším měřeným zdrojem optického záření byla měřena obrazovka notebooku. Jedná se o notebook HP Pavilion x360 Convertible 14 s dotykovým IPS displejem, WLED podsvícením, 250 nits ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ).

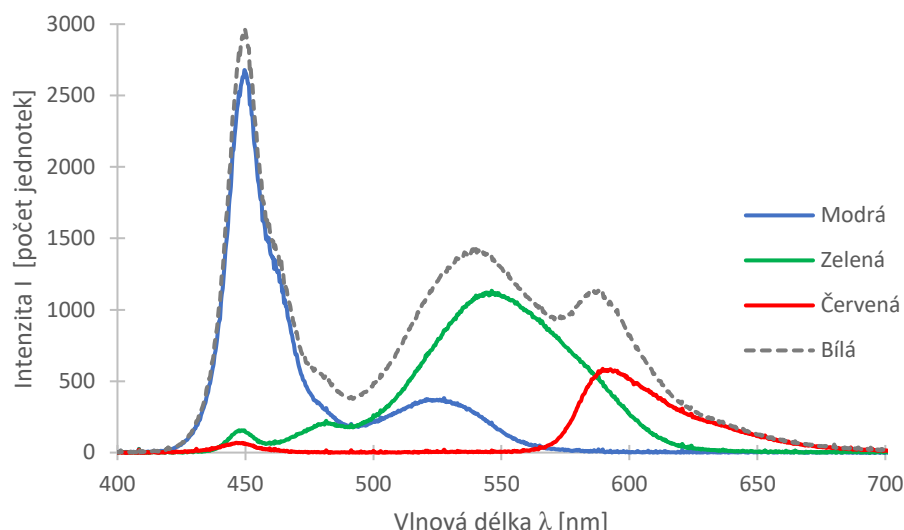
#### Spektrální vyzařování RGB spektra počítače



Graf 7.2: Spektrální složení světla vyzařovaného obrazovkou počítače

Základní vyzařované spektrum počítače bylo měřeno na bílé obrazovce, která byla nastavena v programu Malování. Byla měřena závislost intenzity na vlnové délce. Naměřené spektrum je vyobrazeno v grafu (Graf 7.2). Z grafu je patrné, že nejvyšší intenzitu má viditelné světlo kratších vlnových délek. Maximální dosažené intenzity jsou spolu s vlnovými délkami, které těchto maxim dosáhly, shrnuty s tabulce (Tabulka 7.2).

Maxima dosahuje vlnová délka o velikosti 450 nm. U delších vlnových délek je intenzita nižší. Další dvě dosažená maxima (540 nm a 586 nm) dosahují nejvýše polovičních hodnot maxima intenzity pro modré světlo.



Graf 7.3: RGB spektrum světla vyzařované obrazovkou počítače

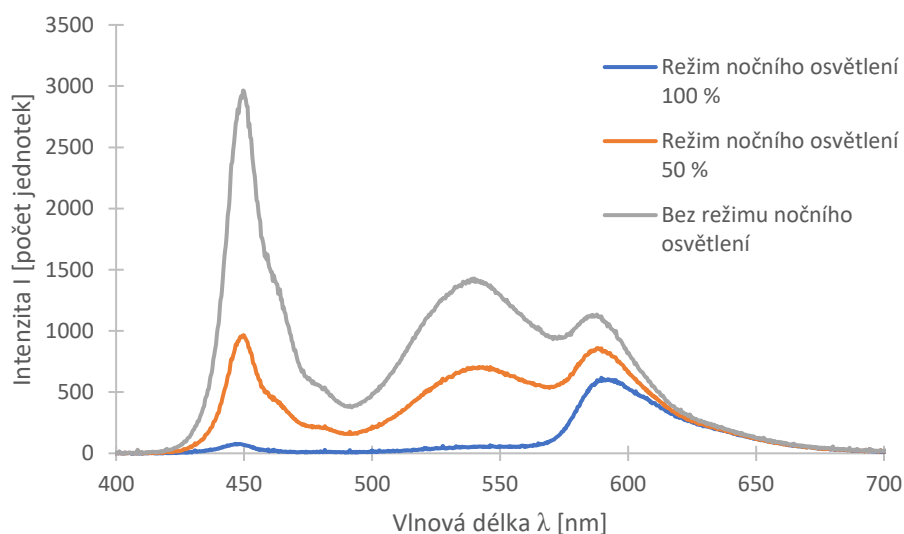
Tabulka 7.2: Dosažení maxim intenzity vlnových délek u obrazovky počítače pro různou barvu obrazovky

| Nastavená barva obrazovky | Maximum [nm] | Intenzita I [počet jednotek] |
|---------------------------|--------------|------------------------------|
| Bílá                      | 450          | 2889                         |
|                           | 540          | 1404                         |
|                           | 586          | 1126                         |
| Modrá                     | 450          | 2664                         |
| Zelená                    | 546          | 1133                         |
| Červená                   | 589          | 587                          |

Kromě bílé obrazovky bylo měřeno i spektrum pro základní barvy RGB spektra. Byla tedy nastavena jednotlivě červená, zelená a modrá barva opět v programu Malování. Jednotlivá spektra jsou vyobrazena v grafu (Graf 7.3). Graf je doplněn tabulkou (Tabulka 7.2) shrnující dosažená maxima intenzity spolu s vlnovými délkami těchto maxim. Pro srovnání se spektrálním složením vyzařované bílé obrazovky je do grafu přidán i naměřené spektrum pro bílou barvu. Nejvyšší intenzitu má modrá barva, která svého maxima dosahuje v 450 nm. Nižší intenzitu má barva zelená, která má své maximum ve vlnové délce 546 nm. Nejnižší intenzitu má červená barva, která je tvořena dlouhými vlnovými délkami. Maxima je dosaženo vlnovou délkou 589 nm.

### Použití režimu nočního osvětlení

Většina digitálních zařízení má ve svém nastavení možnost zapnutí nočního režimu. Tento režim by měl posunout spektrum vyzařovaného světla do teplejších barev a eliminovat tak modré záření, které by ve večerních a nočních hodinách mohlo narušit cirkadiální rytmus a zhoršit tak kvalitu spánku. V možnostech nastavení měřeného počítače byla možnost nastavit filtr „Nočního osvětlení“ od 0 % do 100 % intenzity filtru. Skok mezi jednotlivými intenzitami filtru byl po 10 %. V grafu je vyobrazeno spektrum naměřené při použití filtru 100 %, 50 % a 0 % (tedy obrazovka bez použití filtru).



Graf 7.4: Spektrální složení světla vyzařovaného obrazovkou počítače s použitím filtru modrého světla a bez použití filtru

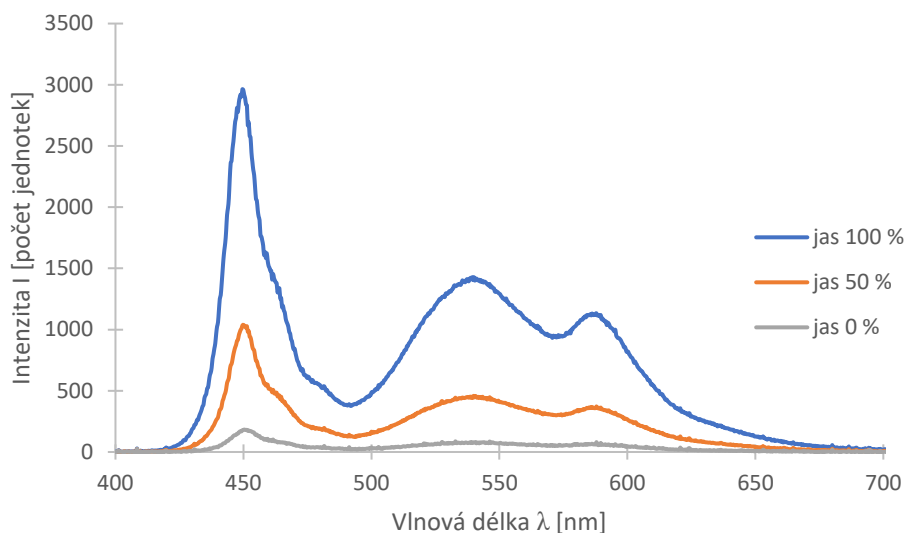
Tabulka 7.3: Dosažení maxim intenzity vlnových délek při použití různého stupně režimu nočního osvětlení obrazovky počítače

| Intenzita režimu nočního osvětlení [%] | Maxima [nm] | Intenzita I [počet jednotek] |
|--|-------------|------------------------------|
| 0 (bez použití filtru)                 | 450         | 2889                         |
|  | 540         | 1404                         |
|  | 586         | 1126                         |
| 50                                     | 450         | 963                          |
|  | 546         | 705                          |
|  | 588         | 859                          |
| 100                                    | 450         | 67                           |
|  | 546         | 50                           |
|  | 590         | 605                          |

Z grafu (*Graf 7.4*) a tabulky (*Tabulka 7.3*) vyplývá, že tento filtr je schopný odfiltrovat krátké a středně dlouhé vlnové délky. Při 50% filtraci je snížena intenzita modrého světla, mírně je snížena i intenzita pro světlo zelené barvy. S použitím 100 % intenzity filtru „Nočního osvětlení“ je odfiltrováno jak krátkovlnné modré světlo, tak i zelené světlo a zůstává červené světlo, které má nižší intenzitu.

### **Filtrace vyzařovaného světla na základě snížení jasu obrazovky**

Intenzita vyzařovaného světla lze snížit i změnou jasu digitálního zařízení. Měřený počítač měl možnost snížení jasu ze 100 % na 0 %. Stejně jako u filtru nočního osvětlení se jas snižoval po 10 %. V grafu (*Graf 7.5*) jsou vyobrazeny hodnoty pro maximální (100 %), střední (50 %) a minimální jas (0 %), který lze na zařízení nastavit. Graf je doplněn tabulkou (*Tabulka 7.4*) shrnující vlnové délky dosahující maximální intenzity pro různé úrovně jasu obrazovky.

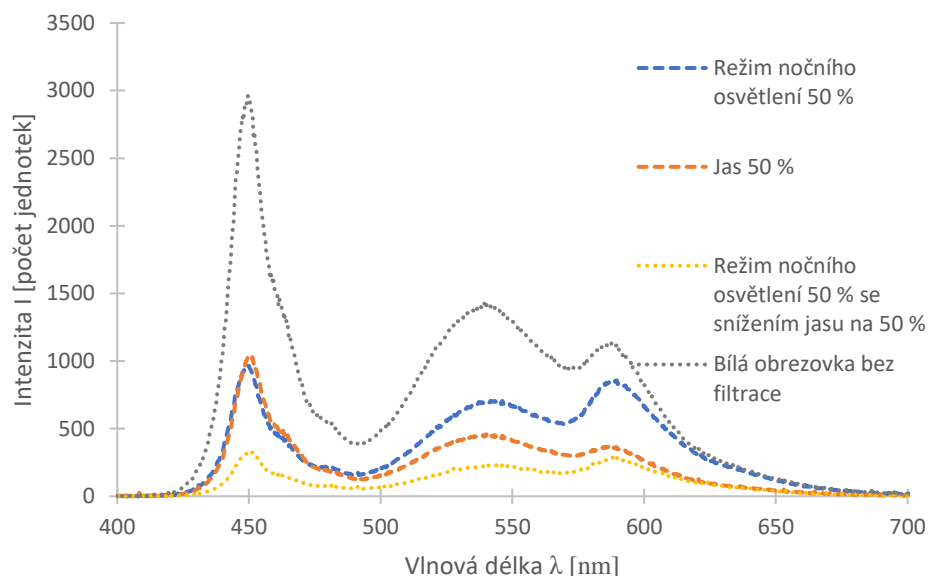


Graf 7.5: Spektrální složení světla vyzařované obrazovkou počítače pro různé intenzity jasu

Tabulka 7.4: Dosažení maxim intenzity vlnových délek při snižování jasu obrazovky počítače

| Intenzita jasu [%] | Maxima [nm] | Intenzita I [počet jednotek] |
|--------------------|-------------|------------------------------|
| 100                | 450         | 2962                         |
|                    | 540         | 1404                         |
|                    | 586         | 1126                         |
| 50                 | 450         | 1039                         |
|                    | 540         | 458                          |
|                    | 586         | 366                          |
| 0                  | 450         | 183                          |
|                    | 540         | 81                           |
|                    | 586         | 66                           |

Po snížení jasu na 50 % se snížila intenzita pro všechny vyzařované vlnové délky. Krátké vlnové délky mají i při snížení jasu nejvyšší intenzitu. Intenzita všech vlnových délek byla snížena zhruba o třetinu. Je tak zachován přibližně poměr jednotlivých barevných složek světla. Snížením jasu na 0 % dochází ke snížení intenzity všech barevných složek světla.



Graf 7.6: Spektrální složení vyzařovaného světla obrazovkou počítače s použitím režimu Nočního osvětlení a se snížením jasu obrazovky

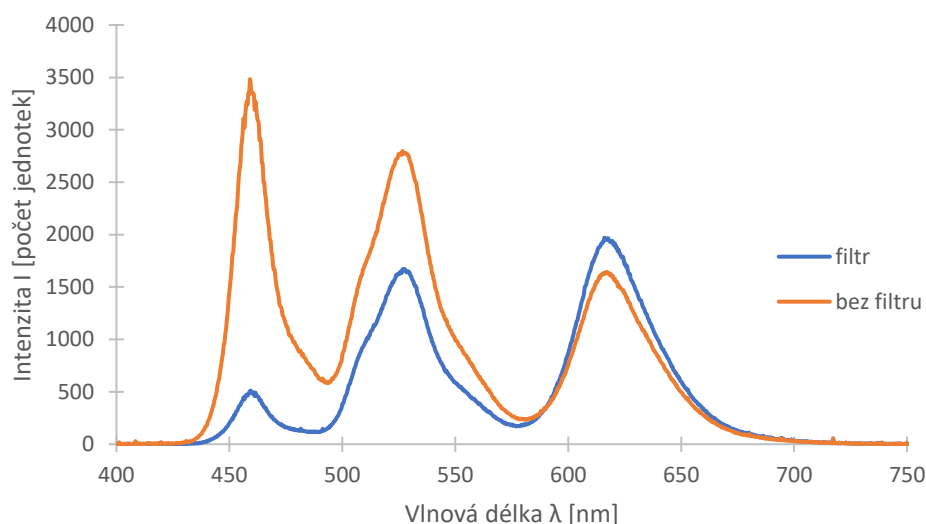
Při porovnání spektrálních křivek v grafu (*Graf 7.6*), kde je vyobrazeno spektrální složení světla obrazovky počítače při použití režimu nočního osvětlení s intenzitou 50 % a spektrální složení světla se snížením jasu na intenzitu 50 %. Pro porovnání je v grafu zobrazeno i spektrální složení světla obrazovky bez použití filtrace jasu a režimu nočního osvětlení. Dále je zde zobrazena kombinace jasu obrazovky o intenzitě 50 % s intenzitou 50 % filtru nočního osvětlení.

Při porovnání 50% intenzity režimu nočního osvětlení a 50% intenzity jasu obrazovky je patrné, že podobně filtrují modré světlo oproti původní nefiltrované obrazovce. Rozdíl nastává až u středně dlouhých a dlouhých vlnových délek. Režim nočního osvětlení snižuje intenzitu vlnových délek zelenožluté barvy zhruba o polovinu, filtrace pomocí snížení jasu obrazovky o třetinu. Rozdíl je patrný i u dlouhých vlnových délek reprezentujících červenou barvu, kdy u režimu nočního osvětlení je intenzita oproti kratším vlnovým délkám snížena méně, ale u snížení jasu je intenzita červené barvy třetinová.

### 7.1.3 Mobilní telefon

Mezi další velmi často používané zdroje záření lze zařadit i mobilní telefon. Měřen byl dotykový mobilní telefon Samsung A30s. Tento mobilní telefon má Super AMOLED displej s rozlišením 1560x720. Maximální obnovovací frekvence displeje je 60 Hz. AMOLED displej se od LCD liší principem osvětlení. LCD displeje fungují na podsvícení jednotlivých tekutých pixelů, čímž jsou osvětleny i pixely okolo osvětleného. U AMOLED displeje jsou tekuté organické pixely schopny vytvářet své vlastní osvětlení a nejsou tak podsvíceny okolní pixely. AMOLED displeje tak mají rychlejší odezvu, ostřejší zobrazení barev a nižší spotřebu baterie. [43]

U mobilního telefonu lze stejně jako u počítače nastavit režim „Pohodlí pro oči“, který podobně jako režim „Noční osvětlení“ u počítače filtruje krátkovlnné světlo. V grafu je vyobrazeno spektrum mobilního telefonu bez použití filtru a s použitím filtru „Pohodlí pro oči“.



Graf 7.7: Spektrální složení světla vyzařovaného mobilním telefonem bez použití filtru modrého světla a s použitím filtru modrého světla

Tabulka 7.5: Maxima intenzity vyzařovaného světla displejem mobilního telefonu bez použití a s použitím Filtru „Pohodlí pro oči“

|                                   | Maxima [nm] | Intenzita I [počet jednotek] |
|-----------------------------------|-------------|------------------------------|
| Bez použití filtru modrého světla | 459         | 3484                         |
|                                   | 528         | 2798                         |
|                                   | 619         | 1607                         |
| Použití filtru modrého světla     | 459         | 511                          |
|                                   | 528         | 1670                         |
|                                   | 619         | 1937                         |

Z grafu (*Graf 7.7*) a doplňující tabulky (*Tabulka 7.5*) je patrné, že nejvyšší intenzitu nefiltrované obrazovky mají krátké vlnové délky odpovídající modré barvě, maximální intenzity dosahuje vlnová délka 459 nm. Nižší intenzitu mají střední vlnové délky viditelného světla, kdy maxima dosahuje vlnová délka 528 nm. Nejnižší intenzitu mají krátké vlnové délky odpovídající červené barvě, maxima je dosaženo pro vlnovou délku 619 nm.

Při filtraci vyzařovaného světla pomocí filtru „Pohodlí pro oči“ je snížena intenzita krátkovlnného světla modré barvy a částečně je snížena i intenzita středních vlnových délek odpovídajících zelené barvě. Je patrné, že krátkovlnné záření není úplně odfiltrováno a dochází pouze k snížení jeho intenzity. Jsou tak částečně zachovány barvy.

## 7.2 Spektrální propustnost čoček

Vybrané čočky, v této práci brýlové čočky a nitrooční čočky, mají kromě své refrakční funkce i funkci filtru světla přicházejícího do oka. Přicházející světlo je čočkou kromě propuštění strukturou také odraženo nebo absorbováno. Lze tak určit absorpci, odrazivost a propustnost čočky. Tyto jevy nastávají v závislosti na materiálu, indexu lomu materiálu a povrchových úpravách čočky.

Čočky byly měřeny ve fyzikální laboratoři na FBMI ČVUT. Pro měření spektrální propustnosti byl použit spektrofotometr UV-2600i od firmy Shimadzu. Použit byl modul Spectrum, který umožňuje řídit a skenovat přes rozmezí vlnových délek a zaznamenávat hodnotu absorbance, transmitance a reflektance při každé vlnové délce ve skenovaném rozmezí. Pro měření vybraných čoček, brýlových i nitroočních, bylo zvoleno rozmezí vlnových délek 200–800 nm.

Měřena byla spektrální propustnost brýlových a nitroočních čoček. Čočky byly do spektrometru umístěny pomocí nástavce tak, aby světlo procházelo optickým středem čočky. Před měřením byl spektrometr zkalibrován, aby naměřené hodnoty byly co nejpřesnější. Spektrometr umožňuje uzavření víka při vkládání měřeného vzorku, takže měření není ovlivněno jinými světelnými svazky.

### 7.2.1 Brýlové čočky

V tabulce (Tabulka 7.6) jsou vypsány měřené brýlové čočky. Měřeny byly brýlové čočky od firmy HOYA a Omega optics, které byly přístupné ve fyzikální laboratoři FBMI ČVUT. Jde hlavně o čočky z organického plastu, které se liší materiálem plastu, povrchovou úpravou nebo přidáním chromoforu do struktury brýlové čočky. Většina brýlových čoček má optickou mohutnost 0,0 dpt, výjimkou jsou čočky Maxxee 1,55 SP (+2,25/-1,75 dpt), CR39 Antireflex (+3,75/- 0,25 dpt) a čočka z minerálního skla (+1,25 dpt). Měřeny byly čočky různých materiálů a různých povrchových úprav.

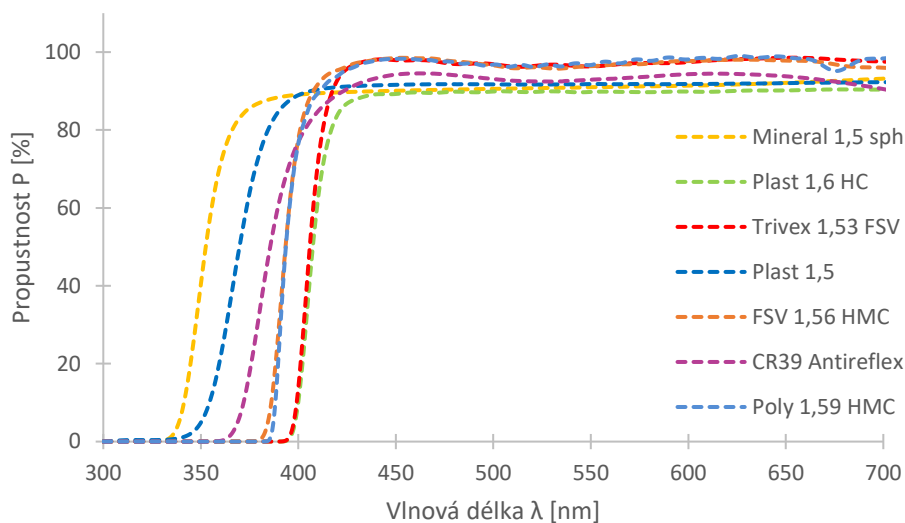
Tabulka 7.6: Přehled měřených brýlových čoček

| Název čočky            | Výrobce     | Index lomu | Materiál       | Povrchová úprava                   |
|------------------------|-------------|------------|----------------|------------------------------------|
| Maxxee 1,5 HCC blue    | HOYA        | 1,5        | Plast          | HCC Blue                           |
| Maxxee 1,6 SP HCC Blue | HOYA        | 1,6        | Plast          | HCC Blue                           |
| HVLL blue AR65         | HOYA        | 1,5        | Plast          | Blue AR                            |
| EnRoute Daily          | HOYA        | 1,6        | Plast          | Čočka pro řidiče (žlutý chromofor) |
| Plast 1,5              | Omega optix | 1,5        | Plast          | HC                                 |
| CR39 Antireflex        | Omega optix | 1,5        | CR39           | Běžný antireflex                   |
| Trivex 1,53 FSV        | Omega optix | 1,53       | Trivex         | HMC                                |
| FSV 1,56 HMC           | Omega optix | 1,56       | FSV            | HMC                                |
| Poly 1,59 HMC          | Omega optix | 1,59       | Plast          | HMC                                |
| Plast 1,6 HC           | Omega optix | 1,6        | Plast          | HC                                 |
| Mineral 1,5 sph        |             | 1,5        | Minerální sklo |                                    |

Tabulka 7.7: Spektrální propustnost materiálů vybraných brýlových čoček ke grafu 8.8

| Brýlová čočka   | Počátek propustnosti [nm] | Propustnost 10 % [nm] | Maximum (ustálení) [nm] | Maximální propustnost [%] |
|-----------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|
| Mineral 1,5 sph | 335                       | 341,5                 | 398                     | 89–90                     |
| Plast 1,6 HC    | 396                       | 400                   | 437                     | 89–90                     |
| Trivex 1,53 FSV | 395                       | 399                   | 438                     | 96–98                     |
| Plast 1,5       | 341                       | 355                   | 438                     | 90–91                     |
| FSV 1,56 HMC    | 381                       | 386                   | 439                     | 96–98                     |
| CR39 Antireflex | 364                       | 372                   | 446                     | 92–94                     |
| Poly 1,59 HMC   | 386                       | 388                   | 441                     | 96–98                     |



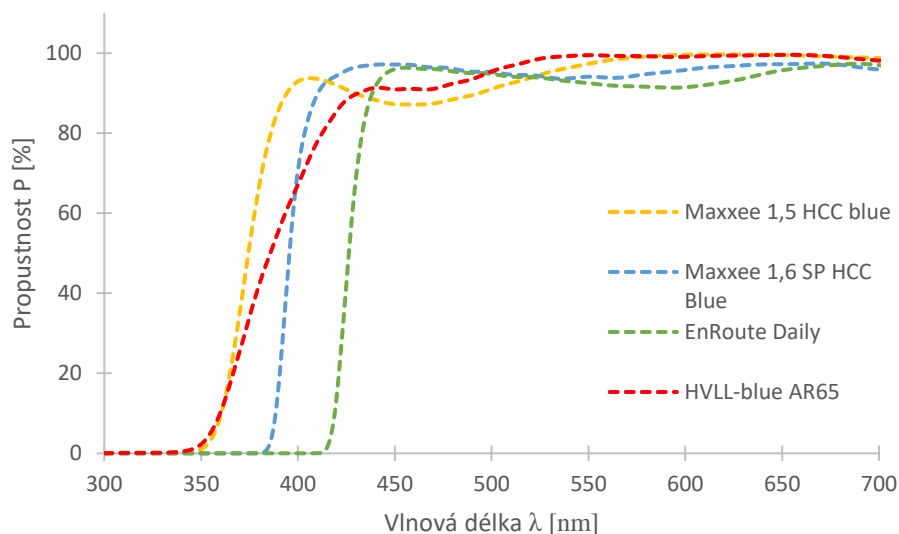


Graf 7.8: Spektrální propustnost materiálů brýlových čoček

V grafu (*Graf 7.8*) je vyobrazena spektrální propustnost brýlových čoček různých materiálů. V doplňující tabulce (*Tabulka 7.7*) je zaznamenán počátek propustnosti (kdy byla propustnost vyšší než 1 %), propustnost rovna 10 % a dosažení maximální propustnosti (od jaké vlnové délky propustnost brýlové čočky nestoupá) s intervalem maximální propustnosti. Jsou patrné rozdíly propustnosti jednotlivých čoček.

Vysokou propustnost pro krátké vlnové délky má BČ z minerálního skla, která nemá antireflexní vrstvu. Její propustnost začíná již na 335 nm. Tvrzená brýlová čočka bez antireflexní úpravy o indexu lomu 1,5 také propouští krátké vlnové délky od 341 nm. Poslední čočka bez antireflexní úpravy, plast 1,6 HC, začíná propouštět vlnové délky až od 396 nm. Maximální propustnost těchto čoček bez antireflexní úpravy dosahuje maximálně 90 %.

Vyšší maximální propustnost mají brýlové čočky s antireflexní úpravou. Tyto čočky jsou od firmy Omega optics a mají podobnou povrchovou úpravu. Lze tedy pozorovat rozdíl ve spektrální propustnosti materiálu. Nejkratší vlnové délky propouští brýlová čočka z materiálu CR39, která má i nízkou maximální propustnost (94 %). Podobnou křivku spektrální propustnosti mají brýlové čočky FSV 1,56 HMC a Poly 1,59 HMC od firmy Omega optics. Nejvíce blokuje krátkovlnné záření brýlová čočka z materiálu Trivex (Trivex 1,53 FSV). Spektrální propustnost začíná na 395 nm, 10 % dosahuje na 399 nm a maxima 98 % na 438 nm.



Graf 7.9: Spektrální propustnost brýlových čoček blokujících modré světlo od firmy HOYA

Tabulka 7.8: Meze spektrální propustnosti brýlových čoček blokujících modré světlo

| Brýlová čočka          | Počátek propustnosti [nm] | Propustnost 10 % [nm] | Dosažení maxima propustnosti [nm] |
|------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Maxxe 1,5 HCC blue     | 350                       | 360                   | 406                               |
| Maxxee 1,6 SP HCC blue | 396,5                     | 400,5                 | 429,5                             |
| EnRoute Daily          | 414,5                     | 419                   | 450                               |
| HVLL-blue AR65         | 345                       | 360                   | 436                               |

Při porovnání brýlových čoček s blokací modrého záření v grafu (*Graf 7.9*) a doplňující tabulce (*Tabulka 7.8*), jsou patrné rozdíly v propustnosti pro krátkovlnné záření. Byly měřeny brýlové čočky od firmy HOYA. Brýlová čočka Maxxee 1,5 HCC blue začíná propouštět krátké vlnové délky zhruba od podobné vlnové délky jako čočka HVLL-blue AR65, tedy od 345-350 nm. Rozdíl u těchto čoček nastává u dosažení prvotního maxima propustnosti. U čočky Maxxee 1,5 nastává na 406 nm a u čočky HVLL-blue až na 436 nm. Brýlová čočka Maxxee 1,6 má stejnou povrchovou úpravu a materiál jako čočka Maxxee 1,5. Liší se jen v indexu lomu. Je tedy patrné, že spektrální propustnost čoček pro krátké vlnové délky se liší. Čočka Maxxee 1,5 propouští světlo již od 350 nm, čočka Maxxee 1,6 popustí až vzdálenější krátké vlnové délky od 396,5 nm. Tato čočka dosahuje také dále svého maxima propustnosti a to na 429,5 nm. Poslední měřenou čočkou filtrující krátkovlnné modré záření byla brýlová čočka EnRoute Daily, která se od předchozích čoček opatřených speciální antireflexní úpravou lišila svým blokátorem. Čočka EnRoute má ve své struktuře zabudovaný žlutý chromofor pohlcující modré záření a je primárně určena pro řidiče. Spektrální propustnost této brýlové čočky nastává na 414,5 nm.

Prvotního maxima propustnosti je dosaženo pro vlnovou délku 450 nm. Propustnost dále stoupá ještě u středně dlouhých vlnových délek.

### 7.2.2 Nitrooční čočky

Jako poslední byly měřeny nitrooční čočky od firmy Alcon. Jako vzorky byly použity zadněkomorové nitrooční čočky Acrysof, Acrysof Natural a Clareon. Optická část nitrooční čočky je vyrobena z měkkého akrylátového materiálu s indexem lomu 1,55 a podpůrné mechanické prvky (haptiky).

#### SA60AT – AcrySof (jednokusová IOL)

AcrySof je jednokusová, akrylátová hydrofobní nitrooční čočka pohlcující UV záření. Materiálem je hydrofobní kopolymer akrylátu/metakrylátu pohlcující UV záření. 10% propustnost je pro čočku o lomivosti +20,0 dpt udána při 396 nm. [41]

#### SN60AT – AcrySof Natural

Acrysof Natural je hydrofobní, akrylátová, jednokusová nitrooční čočka, která filtruje UV záření a modré světlo. Materiálem optické části je hydrofobní kopolymer akrylátu/metakrylátu filtrující UV záření a modré světlo. Materiál je obohacen o patentovaný chromofor společnosti Alcon, který filtruje modré světlo způsobem napodobujícím lidskou čočku v rozsahu vlnových délek 400–475 nm. Tato čočka podle výrobce také snižuje propustnost vlnových délek příslušejícím modrému světlu v rozsahu od 71 % při 400 nm do 22 % při 475 nm. Pro čočku +20,0 dpt je propustnost udána 10 % při 402 nm. [42]

#### CNA0T0 – Clareon

Clareon IOL je asférická, jednokusová, akrylátová nitrooční čočka, která filtruje UV záření a modré světlo. Optická část je vyrobena z měkkého akrylátového/metakrylátového hydrofobního kopolymeru s kovalentně navázaným chromoforem pro filtraci modrého záření. Jedná se o patentovaný chromofor společnosti Alcon, který filtruje krátkovlnné záření v rozmezí 400–475 nm. Čočka o lomivosti +20,0 dpt má propustnost 10 % při 403 nm. Index lomu materiálu je 1,55. [44]

Dostupné vzorky jsou poskytovány zdravotnickým zařízením k zácvičení lékařů. Tyto čočky byly v základním balení bez poskytnutí informace o optické mohutnosti nitrooční čočky. Optická mohutnost IOL se tedy musela doměřit. Pro měření byla zvolena metoda měření optické mohutnosti pomocí ohniskové vzdálenosti. Měření proběhlo ve fyzikální laboratoři na FBMI ČVUT.

Měření ohniskové vzdálenosti bylo měřeno pomocí polohy předmětu a jeho obrazu. Vzdálenost předmětu  $a$  byla měřena mezi středem nitrooční čočky a stínítka. Vzdálenost obrazu  $a'$  je vzdálenost středu čočky a obrazu. Pomocí úpravy vzorce zobrazovací rovnice (Vzorec 7.1) lze získat vztah pro výpočet ohniskové vzdálenosti (Vzorec 7.2). [10]

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'} \quad (7.1)$$

$$f = \frac{aa'}{a + a'} [m] \quad (7.2)$$

Optická mohutnost  $\varphi$  byla dopočítána jako vergence ohniskové vzdálenosti  $f$  (Vzorec 7.3). [10]

$$\varphi = \frac{1}{f} [dpt] \quad (7.3)$$

Měření optické mohutnosti lze vzhledem k naměřeným hodnotám považovat pouze jako orientační. Zvolená metoda určení ohniskové vzdálenosti sice byla jedinou možnou variantou měření ve fyzikální laboratoři, co se týče měření IOL, avšak není přesná. Aparatura nebyla pro toto měření vhodná z několika důvodů. Umístění IOL do aparatury vzhledem k její velikosti nemuselo být přesné, byl použit poměrně široký svazek světla a optické mohutnosti měřených IOL byly příliš vysoké pro přesné určení.

Vzhledem k vysoké optické mohutnosti, širokému svazku paprsků a malé optické části IOL lze považovat měření optické mohutnosti spíše orientačně. Při přepočtu naměřených hodnot na optickou mohutnost čočky vycházejí velmi vysoké hodnoty, proto byly pro měření a porovnání propustnosti materiálu vybrány čočky se stejnými naměřenými hodnotami (+28,0 dpt). Pro porovnání spektrální propustnosti různých optických mohutností IOL byly použity čočky s nejnižší a nejvyšší naměřenou hodnotou optické mohutnosti.

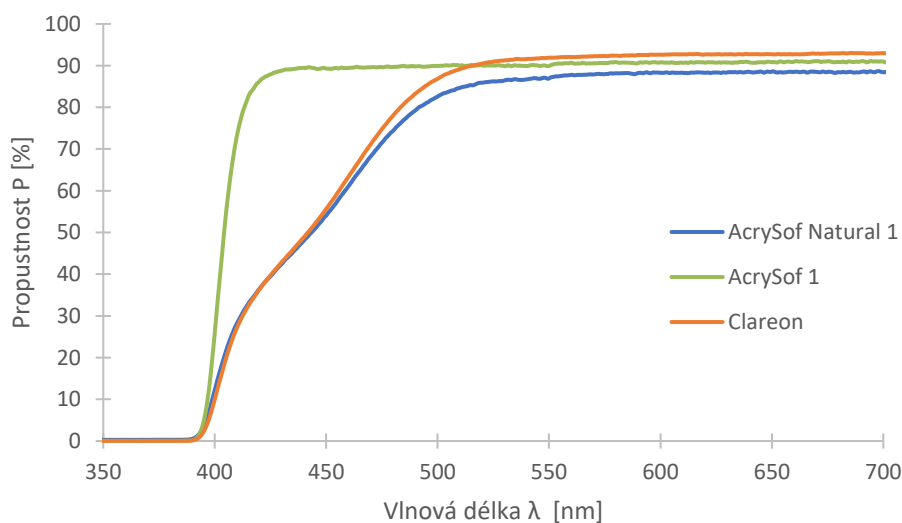
Tabulka 7.9: Přehled měřených vzorků nitroočních čoček spolu s naměřenou ohniskovou vzdáleností a dopočtenou optickou mohutností čočky

| Vzorek IOL        | Ohnisková vzdálenost [m] | Optická mohutnost [dpt] |
|-------------------|--------------------------|-------------------------|
| Clareon           | –                        | +10,0                   |
| AcrySof 1         | 0,035                    | +28,0                   |
| AcrySof 2         | 0,01                     | +100,0                  |
| AcrySof Natural 1 | 0,035                    | +28,0                   |
| AcrySof Natural 2 | 0,016                    | +60,0                   |

Spektrální propustnost nitroočních čoček byla měřena na spektrometru za použití „integrační koule“, kdy paprsky byly rozptýleny zrcadly uvnitř koule a měření tak nebylo ovlivněno fokusací paprsků kvůli vysoké optické mohutnosti čočky. IOL byly do spektrometru umístěny pomocí speciálně upraveného nástavce, aby všechny byly měřeny za stejných podmínek.

Tabulka 7.10: Spektrální propustnost nitroočních čoček Alcon

| Vzorek IOL        | Začátek propustnosti (1 %) [nm] | Propustnost 10 % [nm] | Dosažení maxima propustnosti [nm] | Maximální propustnost [%] |
|-------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| Clareon           | 393,5                           | 400,5                 | 550                               | 92–93                     |
| AcrySof 1         | 392,5                           | 397                   | 431                               | 89–91                     |
| AcrySof 2         | 396                             | 400,5                 | 435                               | 85–87                     |
| AcrySof Natural 1 | 392                             | 399                   | 547                               | 87–89                     |
| AcrySof Natural 2 | 397                             | 406                   | 554                               | 87–88                     |



Graf 7.10: Spektrální propustnost nitroočních čoček

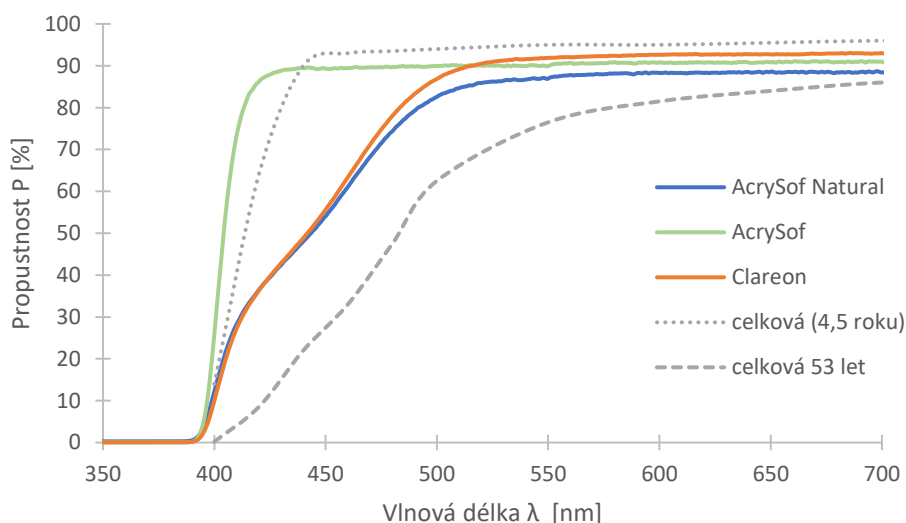
Spektrální propustnost nitroočních čoček je zaznamenána v grafu (*Graf 7.10*). V tabulce (*Tabulka 7.10*) jsou shrnuty mezníky spektrální propustnosti IOL. Pro porovnání spektrální propustnosti nitrooční čočky blokující UV záření (AcrySof IOL) a čočky blokující i modré záření (AcrySof Natural IOL) byly vybrány čočky se stejnou naměřenou optickou mohutností. Nitrooční čočka AcrySof je čočka blokující UV záření. Výrobce udává 10% propustnost pro vlnovou délku 398 nm. Tato data jsou vztažena pro IOL o +20,0 dpt. Měřená čočka AcrySof 1

měla optickou mohutnost zhruba +28,0 dpt. Její spektrální propustnost začíná na vlnové délce 392 nm. Propustnosti 10 % dosahuje na 397 nm, vrcholu propustnosti a ustálení zhruba na 88 % dochází pro světlo od 429 nm.

Čočka blokující modré světlo AcrySof Natural má od výrobce uvedenou propustnost 10 % pro 402 nm, vztaženou pro IOL s optickou mohutností +20,0 dpt. Měřený vzorek je o odhadnuté optické mohutnosti +28,0 dpt. Propustnost vzorku AcrySof Natural 1 začíná na 393 nm, 10 % dosahuje pro vlnovou délku 400 nm. Nejvyšších hodnot a svého ustálení dosahuje od 507 nm.

Nitrooční čočka Clareon filtruje stejně jako čočka AcrySof Natural spolu s UV zářením i modré světlo. Měřený vzorek má optickou mohutnost +10,0 dpt. Pro optickou mohutnost +20,0 dpt je udána 10% propustnost při 403 nm. Propustnost měřeného vzorku začíná při 392 nm, 10 % dosahuje při 399 nm. Hodnoty se ustalují od 521 nm.

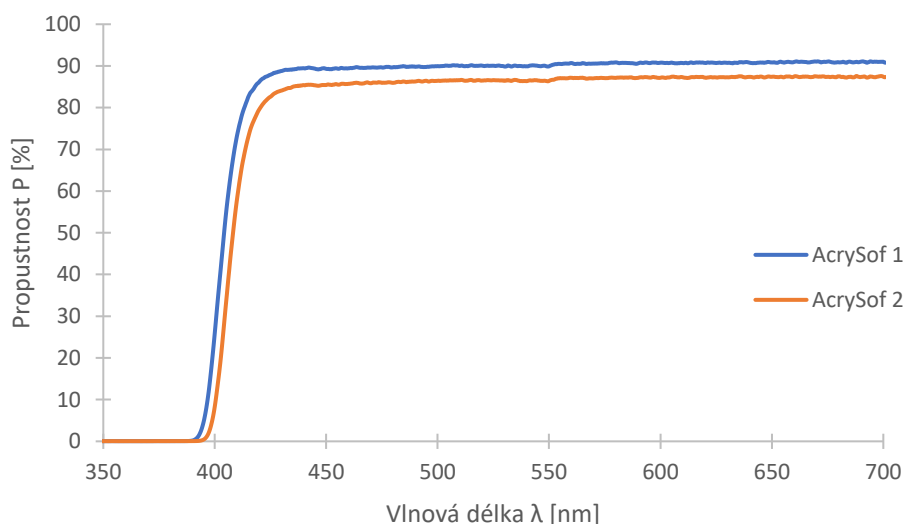
Rozdíl v propustnosti nitrooční čočky Clareon a AcrySof Natural je pravděpodobně způsobena rozdílnou optickou mohutností vzorků čoček, kdy čočka Clareon má optickou mohutnost +10,0 dpt a čočka AcrySof Natural 1 má optickou mohutnost vyšší, zhruba +28,0 dpt.



Graf 7.11: Spektrální propustnost nitroočních čoček a celková spektrální propustnost lidské čočky u dítěte (4,5 roku) a dospělého jedince (53 let) [20]

V grafu (*Graf 7.11*) jsou vyobrazeny stejné naměřené hodnoty pro různé nitrooční čočky jako v grafu 7.10. Dále je v grafu zaznamenána celková spektrální propustnost lidské oční čočky ve věku 4,5 roku života a 53 let [20]. Z grafu je patrné, že nitrooční čočka blokující pouze UV záření filtruje podobně jako oční čočka dítěte. Spektrální křivka má podobný tvar. Její maximální propustnost nastává však dříve nežli u fyziologické oční čočky.

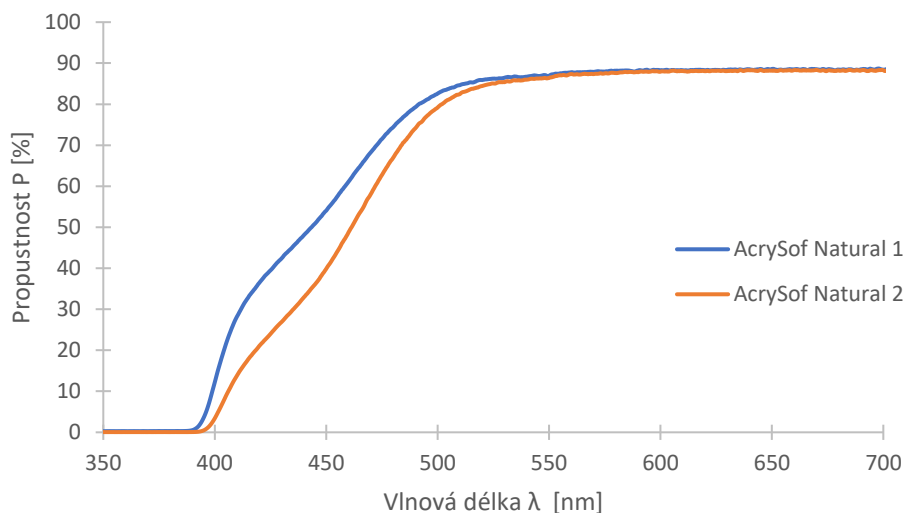
Spektrální křivka celkové propustnosti lidské oční čočky dospělého člověka (53 let) má podobný tvar jako spektrální křivka nitrooční čočky Clareon a AcrySof Natural, avšak propouští nižší procenta méně světla. Spektrální propustnost obou nitroočních čoček blokujících modré světlo se pohybuje v intervalu spektrální propustnosti lidské oční čočky v dětském a dospělém věku.



Graf 7.12: Srovnání spektrální propustnosti nitroočních čoček AcrySof různé optické mohutnosti

V grafu (*Graf 7.12*) jsou zobrazeny křivky spektrální propustnosti nitroočních čoček AcrySof od firmy Alcon. Čočky se od sebe liší dioptrickou mohutností. Nitrooční čočka AcrySof 1 má naměřenou ohniskovou mohutnost 0,035 m, při přepočtu na optickou mohutnost tak vychází +28,0 dpt. Čočka AcrySof 2 má vysokou optickou mohutnost, ohnisková vzdálenost vyšla při měření 0,001 m, optická mohutnost by tak měla být +100,0 dpt. Maximální optická mohutnost nitrooční čočky by měla být +40,0 dpt. Lze tedy pouze pracovat s předpokladem, že AcrySof 1 má vyšší optickou mohutnost než AcrySof 2.

Při porovnání spektrální propustnosti vzorku AcrySof 1 a AcrySof 2 je patrné, že vzorek s nižší optickou mohutností má větší spektrální propustnost než vzorek s vyšší optickou mohutností. Maximální spektrální propustnost vzorku AcrySof 1 je o 4 % vyšší než maximální spektrální propustnost vzorku AcrySof 2. Křivka propustnosti čočky s vyšší optickou mohutností je posunuta o 4 nm.



Graf 7.13: Srovnání spektrální propustnosti nitroočních čoček AcrySof Natural různé optické mohutnosti

Výraznější rozdíl propustnosti nitroočních čoček jednoho materiálu, ale různé tloušťky je patrný u čoček AcrySof Natural. V grafu (*Graf 7.13*) je vyobrazena spektrální propustnost vzorku nitrooční čočky AcrySof Natural 1 a AcrySof Natural 2. U vzorku AcrySof Natural 1 vyšla ohnisková vzdálenost 0,035 m a optická mohutnost tedy 28 dpt. Vzorek AcrySof Natural 2 má vysokou optickou mohutnost, proto jeho ohnisková vzdálenost není naměřena přesně. Ohnisková vzdálenost nitrooční čočky AcrySof Natural 2 vyšla zhruba 0,016 m a dopočtená optická mohutnost +60,0 dpt. Tato hodnota je opět velmi orientační, protože maximální dodávaná optická mohutnost je +40,0 dpt.

Lze předpokládat na základě naměřených ohniskových vzdáleností má čočka AcrySof Natural 1 nižší optickou mohutnost než AcrySof Natural 2. Při porovnání spektrální propustnosti těchto dvou vzorků je patrné, že AcrySof Natural 1 má větší spektrální propustnost. Počátek spektrální propustnosti se liší o 5 nm. Větší rozdíl je patrný u delších vlnových délek patřících do modrého spektra, kde se tyto dvě spektrální křivky výrazně rozbíhají. Propustnost 10 % je u čočky AcrySof Natural 1 na 399 nm a u čočky AcrySof Natural 2 na 406 nm. Propustnosti 50 % je u čočky AcrySof Natural 1 dosaženo na vlnové délce 443,5 nm. Na této vlnové délce propustí čočka AcrySof Natural 2 35 % a 50 % propustnosti je dosaženo vlnovou délkou 461,5 nm. Maximální propustnosti je u obou vzorků dosaženo podobně.



## 8 Diskuze

Z rešerše vlivu UV záření a modrého světla na zrakový orgán vyplívá, že právě krátkovlnné záření může být příčinou vzniku degradace buněk sítnice. Je patrné, že s postupujícím věkem je vyšší riziko vzniku poškození zraku. Oko, které nebylo tolik vystavováno světlu, má zpravidla vysokou spektrální propustnost oční čočky, ale také má v sítnici uloženo menší množství pigmentu. S postupujícím věkem, tedy i s vyšším vystavováním zrakového orgánu světlu, se hromadí pigmentová granula jak v čočce, tak v buňkách sítnice. Nahromaděné pigmenty působí jako obranné filtry před krátkovlnným zářením a toto záření absorbují či odrážejí.

UV zářením a modrým světlem mohou být ohrožena všechna optická média oka, jimiž světlo prochází. Výjimku netvoří ani tkáň, na které světlo dopadá. Mohou nastat potíže od syndromu suchého oka až po nádorové změny buněk.

Světlo přicházející do oka je filtrováno optickými médii oka. Rohovka je schopna odfiltrovat většinu UV záření. Propustí až 70 % světla o vlnové délce 380 nm a pro delší vlnové délky má propustnost kolem 90 %. Rohovkou tedy prochází celé spektrum viditelného světla. Kratší vlnové délky jsou dále filtrovány oční čočkou. Jak je již zmíněno, její propustnost se mění s věkem. Filtrováno je kompletní spektrum UV záření a částečně je filtrováno i modrofialové a modré spektrum viditelného světla.

Určité vlnové délky, zejména ty odpovídající UV oblasti a modrofialovému až modrému světlu, mohou poškodit buňky sítnice. Tím, že mají vysokou energii, mohou způsobit fotochemické změny buněk obsahujících pigmentová zrna, která toto záření absorbují. Vznikají volné kyslíkové radikály, které působí destruktivně. Fotochemické změny mohou být způsobeny krátkovlnným světlem zejména v rozmezí vlnových délek 400–480 nm (kratší vlnové délky jsou filtrovány).

Modré světlo má sice vysokou energii, ale je nezastupitelné pro zrakové vnímání, skotopické vidění, a i pro procesy, které náš mozek nevnímá jako obraz, ale je jimi ovlivněn celý organismus. Krátkovlnné světlo reguluje náš cirkadiální rytmus a produkci hormonů. Světlo obsahující i krátké vlnové délky dokáže navodit bdělý stav organismu, ovlivnit náladu jedince a v podstatě i regulovat kvalitu spánku.

Tím, že se s postupným věkem hromadí pigment lutein v oční čočce a vzniká její zakalení, stává se velmi účinným filtrem krátkovlnného záření. Při operaci katarakty, kdy už je významný nález

zakalení čočky, je oční čočka nahrazena nitroočním implantátem (umělá nitrooční čočka). Tato čočka by měla taktéž účinně filtrovat krátkovlnné elektromagnetické záření, a to zejména UV oblast. Jak již je výše zmíněno, s postupným vystavováním světlu se i v buňkách sítnice hromadí pigment, zejména v pigmentovém epitelu a fotoreceptorech. Vzniká tak vyšší riziko vzniku fotochemických patologických změn. Tyto změny mohou vést ke vzniku věkem podmíněné makulární degenerace (VPMD). Je prokázána souvislost mezi operací katarakty a vznikem či progresí VPMD. Tím, že je odstraněna zakalená oční čočka a je nahrazena nitroočním implantátem, který má mnohem vyšší propustnost pro světlo, dopadá na sítnici mnohem více světla. Nejsou tolik filtrovány krátké vlnové délky a ty spolu s nahromaděným pigmentem v buňkách sítnice reagují. Z důvodu rizika progresu VPMD se doporučuje implantace nitroočních čoček blokujících modré světlo, zejména u pacientů s již sledovaným patologickým nálezem sítnice.

S tematikou modrého světla se široká veřejnost setkává častěji a častěji. S rostoucí oblibou používání digitálních zařízení roste i nabídka a poptávka o ochranné pomůcky. Firmy často propagují své výrobky, zejména čočky a brýle jako snižující digitální únavu. Digitální únava, syndrom počítačového vidění neboli computer vision syndrom je však multifaktoriální problém a modré světlo má v tomto případě jen nepatrný vliv. Digitální únava je nejčastěji způsobena špatnou ergonomií pracoviště, nevykorigovanou refrakční vadou, dlouhodobou prací do blízka. Při práci do blízka se zapojuje hlavně akomodace a konvergence. K syndromu počítačového vidění patří také syndrom suchého oka, který je zapříčiněn hlavně sníženou frekvencí mrkání při soustředění se na práci. Často ke vzniku syndromu suchého oka přispívá i přítomnost klimatizace v místnosti nebo špatná cirkulace vzduchu na pracovišti.

Modrým světlem vyzařovaným digitálními zařízeními tedy nevzniká syndrom počítačového vidění, ale může přispět ke vzniku a progresi jiných očních onemocnění. Z rešerše vyplývá i souvislost vzniku syndromu suchého oka a krátkovlnného záření. Nestabilita slzného filmu je způsobena vznikem zánětlivých reakcí při působení UV záření a modrého světla na povrch oka. Vzhledem k všudypřítomnosti modrého světla z různých zdrojů (od slunečního svitu přes umělé osvětlení místnosti až po digitální zařízení) lze těžko říci, že je syndrom suchého oka způsoben pouze modrým světlem vyzářeným displeji digitálních zařízení.

První část experimentálního měření je věnována spektrálnímu vyzařování světelných zdrojů. Při porovnání vybraných zdrojů světla zdrojů pro osvětlení interiérů je patrné, že každý zdroj vyzařuje jiné spektrum světla. Žárovka, která je v dnešní době nahrazována úspornými zdroji, má vyzařované spektrum bohaté na středně dlouhé a dlouhé vlnové délky. Jde spíše o tepelný

zdroj záření. Z měření vyplívá, že její světlo obsahuje oproti jiným barvám světla menší množství modrého a modrofialového světla. Oproti žárovce má úsporná LED zářivka nejvyšší intenzitu světla právě v oblasti modrého světla. Rtuťová žárovka a tyčová zářivka mají spektrum svého světla dané úzkými okruhy vlnových délek, jejichž barvy se skládají a tvoří výslednou barvu světla.

Ke zdrojům světla neodmyslitelně patří v dnešní době i digitální zařízení. U těchto zařízení často trávíme i několik hodin denně a jimi vyzařované světlo může být často nejvýraznějším zdrojem světla na pracovišti. Při měření spektra obrazovky počítače je patrné, že i na bílé obrazovce má nejvyšší intenzitu modré světlo. Při porovnání intenzit měřených barev základního RGB spektra je patrné, že modrá barva má mnohem vyšší intenzitu než barva zelená a červená. Při filtrování světla obrazovky pomocí filtru modrého světla nastavitelného na zařízení se intenzita modrého světla účinně tlumila. Tlumeny byly i vlnové délky středních délek. Při maximální filtraci byla přítomna pouze červená barva. Během tlumení jasu obrazovky bylo taktéž možno pozorovat snižování intenzity modrého světla, ale přítomno bylo i snižování intenzity světla středních a dlouhých vlnových délek.

Při použití filtru modrého světla u mobilního telefonu nedošlo k úplné blokaci modrého světla. Byla snížena intenzita krátkých a středních vlnových délek. U obrazovky mobilu nebylo možné nastavit intenzitu filtru po krocích, jako tomu bylo možné u počítače. Při 100% filtraci modrého světla u obrazovky počítače zůstaly přítomny pouze vlnové délky příslušející červené barvě. Zato u mobilu byla částečně zachována i modrá a zelená barva.

V druhé části experimentální části byla měřena spektrální propustnost brýlových a nitroočních čoček. Brýlové čočky mají kromě refrakční funkce i ochrannou funkci. Ať jde o ochranu mechanickou, tak světelnou. Při porovnání různých materiálů brýlových čoček je patrné, že každý materiál propouští různé množství světla. Samozřejmě kromě materiálu závisí propustnost pro světlo i na indexu lomu a povrchových úpravách čočky. Největší propustnost pro krátkovlnné světlo mají brýlové čočky bez antireflexní úpravy. U měřených brýlových čoček bez antireflexní úpravy lze pozorovat změnu propustnosti u zvýšení indexu lomu čočky. Například brýlová čočka z plastu s indexem lomu 1,5 propouští vlnové délky od 341 nm, zato brýlová čočka s indexem lomu 1,6 propustí světlo až od 396 nm. Tyto čočky se používají pouze ve výjimečných případech a zákazníkům optiky jsou doporučovány brýlové čočky s antireflexní úpravou. Z měřených čoček s antireflexní úpravou blokuje nejlépe krátkovlnné záření brýlová čočka z materiálu trivex, jejíž propustnost začíná na 395 nm a maximální propustnosti dosahuje na 438 nm.

Všechny měřené brýlové čočky jsou schopny blokace UV záření. Některé čočky, například brýlová čočka z trivexu nebo překvapivě i plastová brýlová čočka s indexem lomu 1,6 bez antireflexní úpravy, jsou schopné odfiltrovat i část oblasti krátkovlnného viditelného světla.

UV záření a část modrého světla blokují i měřené brýlové čočky s antireflexní úpravou blokující modré světlo. I zde závisí na indexu lomu materiálu. Rozdíl propustnosti je patrný u brýlové čočky s antireflexní úpravou blokující modré světlo, která byla dostupná v indexu lomu 1,5 a 1,6. Čočka s indexem lomu začala propouštět světlo při 350 nm a maxima dosahuje při 406 nm. Zato čočka s indexem lomu 1,6 začíná propouštět světlo od 396,5 nm a maxima je dosaženo pro světlo o vlnové délce 429,5 nm. Nejlépe blokovala krátkovlnné světlo brýlová čočka EnRoute Daily od firmy HOYA, která je primárně určena jako čočka pro řidiče. Ve své struktuře má zabudovaný žlutý chromofor, který světlo neodráží, ale absorbuje. Propustnost této čočky začala při 414,5 nm a maxima dosahuje při 450 nm.

Jako poslední byla měřena spektrální propustnost nitroočních čoček od firmy Alcon. Nitrooční čočky použité pro naše měření byly poskytnuty bez informace o optické mohutnosti optické části čočky. Orientačně byly přeměřeny metodou určení ohniskové vzdálenosti čočky pomocí měření vzdálenosti předmětu a obrazu. Toto měření bylo pouze orientační vzhledem k vysoké optické mohutnosti čoček, použitému širokému svazku paprsků pro promítnutí obrazu a malé optické části čočky. Pro porovnání propustnosti materiálu konvenční IOL a IOL blokující modré světlo tak byly vybrány čočky, které měly stejné naměřené hodnoty ohniskové vzdálenosti. Pro srovnání propustnosti IOL různé optické mohutnosti pak byly vybrány IOL s nejnižší a nejvyšší optickou mohutností.

Při porovnání spektrálních křivek konvenční IOL (AcrySof – čočka blokující UV záření) a IOL blokující modré světlo (AcrySof Natural a Clareon), je patrný rozdíl ve spektrální propustnosti v oblasti modrého světla viditelné oblasti elektromagnetického záření. Propustnost IOL blokující UV záření strmě stoupá (392,5–431 nm) a je podobná křivce spektrální propustnosti oční čočky člověka ve věku 4,5 roku. Čočka je schopna kompletní blokace UV záření. Maximální propustnosti dosahuje až v oblasti viditelného světla s částečnou blokací spektra modrého světla.

IOL blokující modré světlo má podobný tvar křivky spektrální propustnosti jako oční čočka dospělého člověka. Při porovnání se spektrální propustností čočky dospělého jedince ve věku 53 let je na první pohled patrné, že IOL propustí celkově mnohem více světla a její propustnost pro zelené a červené světlo je konstantnější. Čočka blokující modré světlo má pomalý nástup propustnosti pro krátké vlnové délky (392–547 nm).

Pro naše účely je vhodné porovnat měřené vzorky nitroočních čoček AcrySof 1 a AcrySof Natural 1 (*Graf 7.10 a Graf 7.11*). Podle měření ohniskové vzdálenosti mají obě čočky zhruba stejnou optickou mohutnost, budou tedy stejné tloušťky. Oproti IOL blokující UV záření má čočka blokující modré světlo pomalejší nástup propustnosti pro krátké vlnové délky. Obě čočky začínají propouštět světlo na podobných vlnových délkách (392–392,5 nm). Propustnost na hodnotě 10 % je také zhruba stejná, kdy IOL blokující UV dosahuje této hodnoty při 397 nm a IOL blokující modré světlo na 399 nm. Větší rozdíl nastává, až když se podíváme například na propustnost 50 %. Této propustnosti dosahuje IOL blokující UV na 404 nm a IOL blokující modré světlo na 443 nm. Maximální propustnosti, nebo tedy spíše ustálení propustnosti, je u IOL blokující UV dosaženo na 431 nm a u IOL blokující modré světlo na 547 nm.

Z měření také vyplývá, že spektrální propustnost čoček závisí na optické mohutnosti čočky. Lze předpokládat, že s rostoucí optickou mohutností IOL (bikonvexní čočka) roste i tloušťka čočky. Z grafů je patrné, že u čoček s vyšší optickou mohutností klesla propustnost pro světlo. Větší rozdíl propustnosti je přítomný u IOL blokující modré světlo. Patrně je tomu tak díky chromoforu přítomnému v materiálu čočky, který krátkovlnné záření absorbuje.

Brýlové čočky i nitrooční čočky jsou tedy schopny kompletně odfiltrovat UV záření. Dále záleží na speciálních úpravách čoček a materiálu. Vybírány by tak měly být podle požadavků zákazníka nebo pacienta. Nemělo by se zapomenout i na vedlejší vlivy blokace UV záření a modrého světla, kam lze zařadit nerušení cirkadiálního rytmu nebo snížení vnímání kontrastu a barev objektů.

## 9 Závěr

Práce je věnována problematice vlivu UV záření a modrého světla na oko, spolu s možnostmi ochrany zraku před těmito zářeními. V práci je obsažena rešerše vlivu UV záření a modrého světla na zrakový orgán. Zejména je práce zaměřena na fotochemické změny buněk sítnice, které nastávají reakcí tohoto vysokoenergetického záření s pigmentovými granuly obsaženými v buňkách sítnice. UV záření a modré světlo může vést k nenávratným změnám buněk tkání oka. Dále následkem vystavení organismu těmito zářeními může dojít k narušení cirkadiálního rytmu člověka. Z těchto a mnohem více důvodů je potřeba se před těmito zářeními chránit.

S postupující dobou a modernizací se čím dál více pracuje s digitálními zařízeními. V posledních letech nastal rapidní nárůst počtu uživatelů digitálních zařízení, kdy se většina úkonů konala v souvislosti s pandemickou situací pomocí mobilních telefonů a počítačů. Proto se čím dál více řeší i problematika modrého světla, zejména v souvislosti s narušením cirkadiálního rytmu. Tato problematika by však neměla být řešena pouze v souvislosti práce na digitálních zařízeních. Veliká část úsporných zdrojů umělého osvětlení vyzařuje světlo bílé barvy. Toto světlo obsahuje i modré světlo, které má díky krátkým vlnovým délkám vysokou energii a bývá tak nejintenzivnější součástí tohoto světla. Běžné denní světlo vyzařované Sluncem má taktéž bílou barvu, kromě kompletního spektra viditelného světla obsahuje i část UV spektra, které nebylo odfiltrováno průchodem atmosférou.

Zvýšená opatrnost by měla být zejména u pacientů po operaci katarakty. Tím, že je zakalená čočka, která byla díky zákalu účinným filtrem modrého světla, nahrazena umělou nitrooční čočkou propouštějící větší množství světla, roste riziko vzniku nebo progresu věkem podmíněné makulární degenerace a dalších patologických změn sítnice. Sítnice, která byla dlouho vystavována světlu, zejména modrému spektru viditelného světla, obsahuje velké množství pigmentových granul ve svých buňkách. Tato granula absorbují světlo krátkých vlnových délek a chrání tak fotoreceptory. Tím, že světlo absorbují, tak vznikají fotochemické změny v buňkách sítnice (zejména v buňkách pigmentového epitelu a fotoreceptorech), které vedou k nenávratnému poškození buněk. Z tohoto důvodu je důležité zrak chránit, aby nedošlo k jeho ztrátě právě takto.

V dnešní době je široká nabídka ochranných pomůcek, počínaje úpravou vyzařovaného spektra přímo na zařízení či výměnou světleného zdroje až po ochranné čočky a filtry chránící oko. Efektivní a vlastně i velmi častou ochrannou pomůckou jsou brýlové čočky, v případě intenzivnějšího UV záření i sluneční brýle. Brýle jsou běžně dostupné a výběr úprav brýlové

čochky lze uzpůsobit uživateli. Každá brýlová čočka s antireflexní úpravou blokuje UV záření a chrání tak nejen přední segment oka s očními adnexy, ale i oční čočku, ve které se ukládají důsledkem záření pigmenty, zejména zbytkem UV záření, které není odfiltrováno rohovkou. Brýlová čočka může být opatřena i speciální úpravou blokující modré světlo, která bývá doporučována zejména osobám pracujícím na počítačích. Brýlové čočky obsahující žlutý chromofor absorbující modré světlo mají využití i jako čočky pro řidiče, kdy v noci blokují modré světlo, které snáze vede k oslnění a nežádoucím odleskům od vozovky. Brýlové čočky blokující modré světlo mohou být doporučovány i pacientům po operaci katarakty, kterým byla implantována konvenční nitrooční čočka, která blokuje pouze UV záření.

Jako ochrannou pomůcku zraku lze považovat i nitrooční čočku, kterou je po operaci katarakty nahrazena postižená čočka. Použita může být buď konvenční IOL, která blokuje UV záření, nebo IOL blokující modré světlo, která má ve své struktuře chromofor, který způsobuje její žlutavé zbarvení. Tím, že je tato čočka schopna absorbovat modré světlo, chrání tak ve veliké míře sítnici před vznikem a/nebo progresí věkem podmíněné makulární degenerace.

V experimentální části jsou porovnávána vyzařovaná spektra světelných zdrojů. Mezi světelné zdroje byly zařazeny i digitální zařízení s možností nastavení Nočního režimu, který má za úkol odblokovat modré světlo, ulevit tak očím a zlepšit kvalitu spánku. Z měření spektrálního složení vyzařovaného spektra je patrné, že tyto filtry jsou účinné. Intenzita modrého světla se snižovala i se snížením jasu displeje, kdy byla snížena intenzita všech vlnových délek.

Druhou částí experimentální části bylo měření spektrální propustnosti brýlových a nitroočních čoček. Měřeny byly jak běžné konvenční čočky, tak čočky blokující modré světlo. Konvenční brýlové čočky jsou schopny blokace UV záření a brýlové čočky s filtrem modrého světla mají posunutý začátek spektrální propustnosti a blokují tak i modré světlo. Obdobně je tomu i u nitroočních čoček. Počátek propustnosti je sice na stejných vlnových délkách, avšak nitrooční čočky blokující modré světlo mají mnohem pomalejší nástup propustnosti pro krátké vlnové délky a maximální propustnosti dosahují až v oblasti vlnových délek odpovídajících zelené barvě světla. Nitrooční čočky blokující modré záření jsou tedy účinnějším filtrem krátkých vlnových délek viditelného světla.

Z rešerše a experimentálního měření vyplývá, že ochrana před UV zářením a modrým světlem je důležitá. Jsou nejrůznější možnosti ochrany zraku. UV ochranu zajistí očím i běžná brýlová čočka s antireflexní úpravou. Proti modrému světlu pak lze použít speciální úpravy čoček. U pacientů s kataraktou je důležité zvážit, jaká nitrooční čočka je vhodná. Nejlepším řešením je samozřejmě nitrooční čočka blokující modré světlo, protože svou propustností pro světlo se

lehce podobá lidské oční čočce dospělého člověka. Je tedy vhodným filtrem i pacientů, u kterých se předpokládá, že jejich sítnice již obsahuje větší množství nahromaděného pigmentu. Nitrooční čočka se tak může stát preventivním opatřením před vznikem nebo progresí věkem podmíněné makulární degenerace, která je častou příčinou slepoty ve vyspělých zemích.

Po implantaci konvenční nitrooční čočky je vhodné doporučit pacientovi brýlovou dokorekci s úpravou blokace modrého světla, aby oko bylo lépe chráněno před tímto světlem. Zanedbávat by se neměly ani další preventivní opatření, jako je výběr vhodných zdrojů umělého osvětlení nebo používání slunečních brýlí.

Samozřejmě tato problematika by se neměla řešit pouze u této skupiny pacientů. S UV zářením a modrým světlem se setkává běžně každý z nás. Můžeme se jim také bránit například slunečními brýlemi, úpravou brýlových čoček nebo přenastavením vyzařovaného spektra našimi digitálními zařízeními.



## 10 Citovaná literatura

- [1] SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. *Fyziologie oka a vidění*. 2., dopl. a přeprac. vyd. Praha: Grada, 2014. ISBN ISBN978-802-4739-922.
- [2] KUČHYNKA, Pavel. *Oční lékařství*. 2., přepracované a doplněné vydání. Praha: Grada Publishing, 2016. ISBN ISBN978-80-247-5079-8.
- [3] ČIHÁK, Radomír. *Anatomie*. Třetí, upravené a doplněné vydání. Praha: Grada, 2011-2016. ISBN 978-802-4756-363.
- [4] AUTRATA, Rudolf. *Nauka o zraku*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2002. ISBN 80-701-3362-7.
- [5] DYLEVSKÝ, Ivan. *Funkční anatomie*. 1. vydání. Praha: Grada, 2009, 544 s. ISBN 978-80-247-3240-4.
- [6] WU, Jiangmei, Stefan SEREGARD a Peep V. ALGVERE. Photochemical Damage of the Retina. *Survey of Ophthalmology* [online]. 2006, **51**(5), 461-481 [cit. 2022-03-13]. ISSN 00396257. Dostupné z: doi:10.1016/j.survophthal.2006.06.009
- [7] SILBERNAGL, Stefan a Agamemnon DESPOPOULOS. *Atlas fyziologie člověka*. 6. vyd., zcela přeprac. a rozš., Vyd. 3. české. Praha: Grada, 2004. ISBN 80-247-0630-X.
- [8] ŠÍPEK, Antonín MUDr. Nalezen gen zajišťující zdravý vývoj oka. In: *Gate2biotech: vše o českých biotechnologiích na jednom místě* [online]. Jihočeská agentura pro podporu inovačního podnikání o.p.s., 2021 [cit. 2021-12-28]. ISSN 1802-2685. Dostupné z: <http://www.gate2biotech.cz/nalezen-gen-zajistujici-zdravy-vyvoj-oka/>
- [9] HUNTER, Jennifer J., Jessica I.W. MORGAN, William H. MERIGAN, David H. SLINEY, Janet R. SPARROW a David R. WILLIAMS. The susceptibility of the retina to photochemical damage from visible light. *Progress in Retinal and Eye Research* [online]. 2012, **31**(1), 28-42 [cit. 2021-11-15]. ISSN 13509462. Dostupné z: doi:10.1016/j.preteyeres.2011.11.001
- [10] NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA. *Medicínská biofyzika*. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-1152-4.

- [11] ROSINA, Jozef. *Biofyzika: pro zdravotnické a biomedicínské obory*. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-802-4742-373.
- [12] MALÝ, Petr. *Optika*. Praha: Karolinum, 2008. ISBN 978-802-4613-420.
- [13] VRBOVÁ, Miroslava. *Lasery a moderní optika*. Praha: Prometheus, 1994. Oborová encyklopedie. ISBN 80-858-4956-9.
- [14] BENEŠ, Jiří. *Základy lékařské biofyziky*. 3., upr. vyd. Praha: Karolinum, 2011. ISBN 978-802-4620-343.
- [15] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- [16] HORÁKOVÁ, Bc. Gabriela. MODRÉ SVĚTLO: neviditelná hrozba. SPOLEČENSTVO ČESKÝCH OPTIKŮ A OPTOMETRISTŮ. *Česká oční optika* [online]. EXPO DATA spol. s r.o., 2018, **59**(32018) [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: [https://www.4oci.cz/dokumenty/pdf/4oci\\_2018\\_03.pdf](https://www.4oci.cz/dokumenty/pdf/4oci_2018_03.pdf)
- [17] SPARDHAN, Shahina a Raju P SAPKOTA. Eye Complications of Exposure to Ultraviolet and Blue-Violet Light. *Highlights of Ophthalmology* [online]. 2017, **45**(2), 2-5 [cit. 2022-03-13]. ISSN 1024-6983. Dostupné z: doi:10.5005/highlights-45-2-2
- [18] Je světlo rizikový faktor?. In: *Karel Kuběna s.r.o. – Oční optika* [online]. Zlín [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <http://www.tlt.cz/je-svetlo-rizikovy-faktor>
- [19] BOETTNER, Edward A. a J. Reimer WOLTER. Transmission of the Ocular Media. *Investigative Ophthalmology & Visual Science December 1962, Vol.1* [online]. 1962, **1**(6), 776-783 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://iovs.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2122713>
- [20] BOETTNER, Edward A. a J. Reimer WOLTER. *Transmission of the Ocular Media* [online]. 32. Kalifornská univerzita v Berkeley. Air Force Systems Command, 1962: Life Support Systems Laboratory, 6570th Aerospace Medical Research Laboratories, Aerospace Medical Division, Air Force Systems Command, 1962, 1962, 6. prosinec 2017, 43 s. [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=RB4k3eURYu8C&hl=cs&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.cz/books?id=RB4k3eURYu8C&hl=cs&source=gbs_navlinks_s)

- [21] LEUNG, Tsz Wing, Roger Wing-hong LI, Chea-su KEE a José M. GONZÁLEZ-MÉIJOME. Blue-Light Filtering Spectacle Lenses: Optical and Clinical Performances. *PLOS ONE* [online]. 2017, **12**(1) [cit. 2022-03-13]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0169114
- [22] IVANOV, Iliya V., Timo MAPPE, Patrick SCHAUPP, Christian LAPPE a Siegfried WAHL. Ultraviolet radiation oxidative stress affects eye health. *Journal of Biophotonics* [online]. 2018, **11**(7) [cit. 2022-03-13]. ISSN 1864063X. Dostupné z: doi:10.1002/jbio.201700377
- [23] Research progress about the effect and prevention of blue light on eyes. *International Journal of Ophthalmology* [online]. 2018 [cit. 2022-03-13]. ISSN 22223959. Dostupné z: doi:10.18240/ijo.2018.12.20
- [24] OUYANG, Xinli, Jing YANG, Zexin HONG, Yide WU, Yongfang XIE a Guohui WANG. *Mechanisms of blue light-induced eye hazard and protective measures: a review* [online]. 2020, **130** [cit. 2022-03-13]. ISSN 07533322. Dostupné z: doi:10.1016/j.biopha.2020.110577
- [25] HUNTER, Jennifer J., Jessica I.W. MORGAN, William H. MERIGAN, David H. SLINEY, Janet R. SPARROW a David R. WILLIAMS. The susceptibility of the retina to photochemical damage from visible light. *Progress in Retinal and Eye Research* [online]. 2012, **31**(1), 28-42 [cit. 2022-03-13]. ISSN 13509462. Dostupné z: doi:10.1016/j.preteyeres.2011.11.001
- [26] DILLON, James, Lei ZHENG, John C. MERRIAM a Elizabeth R. GAILLARD. Transmission of light to the aging human retina: possible implications for age related macular degeneration. *Experimental Eye Research* [online]. 2004, **79**(6), 753-759 [cit. 2022-03-13]. ISSN 00144835. Dostupné z: doi:10.1016/j.exer.2004.06.025
- [27] DAI, Xiaochan, Zhimin TANG, Yahan JU et al. Effects of blue light-exposed retinal pigment epithelial cells on the process of ametropia. *Biochemical and Biophysical Research Communications* [online]. 2021, **549**, 14-20 [cit. 2022-03-13]. ISSN 0006291X. Dostupné z: doi:10.1016/j.bbrc.2021.02.089
- [28] RANASINGHE, P., W. S. WATHURAPATHA, Y. S. PERERA, D. A. LAMABADUSURIYA, S. KULATUNGA, N. JAYAWARDANA a P. KATULANDA.

- Computer vision syndrome among computer office workers in a developing country: an evaluation of prevalence and risk factors. *BMC Research Notes* [online]. 2016, **9**(1) [cit. 2022-03-13]. ISSN 1756-0500. Dostupné z: doi:10.1186/s13104-016-1962-1
- [29] ROSENFELD, Mark. Computer vision syndrome: a review of ocular causes and potential treatments. *Ophthalmic and Physiological Optics* [online]. 2011, **31**(5), 502-515 [cit. 2022-03-13]. ISSN 02755408. Dostupné z: doi:10.1111/j.1475-1313.2011.00834.x
- [30] NAJMAN, Ladislav. *Dílenská praxe očního optika*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2001. ISBN 80-701-3328-7.
- [31] RUTRLE, Miloš. *Brýlová technika, estetika a přizpůsobování brýlí: učební texty pro oční optiky a oční techniky, optometry a oftalmology*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2001. ISBN 80-701-3347-3.
- [32] DIEPES, Heinz a Ralf BLENDOWSKE. *Optik und Technik der Brille*. 2. Auflage. Heidelberg: Optische Fachveröffentlichung GmbH, 2005. ISBN 3-922269-61-3.
- [33] BAŠTECKÝ, Richard. *Praktická brýlová optika*. Praha: R+H Optik, 1997.
- [34] EFRON, Nathan. *Optometry A-Z*. 1. vydání. Elsevier Butterworth Heinemann, 2007. ISBN 978-0-7506-4913-1.
- [35] JALIE, Mo. *Ophthalmic lenses and dispensing*. 3. vydání. Butterworth Heinemann, 2008. ISBN 978-0-7506-8894-9.
- [36] LAWRENSON, John G, Christopher C HULL a Laura E DOWNIE. The effect of blue-light blocking spectacle lenses on visual performance, macular health and the sleep-wake cycle: a systematic review of the literature. *Ophthalmic and Physiological Optics* [online]. 2017, **37**(6), 644-654 [cit. 2021-12-21]. ISSN 02755408. Dostupné z: doi:10.1111/opo.12406
- [37] DOWNIE, Laura E. Blue-light filtering ophthalmic lenses: to prescribe, or not to prescribe?. *Ophthalmic and Physiological Optics* [online]. 2017, **37**(6), 640-643 [cit. 2022-03-13]. ISSN 02755408. Dostupné z: doi:10.1111/opo.12414
- [38] SLINEY, David H. Photoprotection of the eye – UV radiation and sunglasses. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* [online]. 2001, **64**(2-3), 166-175 [cit. 2022-03-13]. ISSN 10111344. Dostupné z: doi:10.1016/S1011-1344(01)00229-9

- [39] RAHMANI, Saeed, Mohadeseh MOHAMMADI NIA, Alireza AKBARZADEH BAGHBAN, Mohammad Reza NAZARI a Mohammad GHASSEMI-BROUMAND. Spectral transmittance of UV-blocking soft contact lenses: A comparative study. *Contact Lens and Anterior Eye* [online]. 2014, **37**(6), 451-454 [cit. 2022-03-13]. ISSN 13670484. Dostupné z: doi:10.1016/j.clae.2014.07.011
- [40] FAUBL, Hermann a Michael H. QUINN. Spectra of UV-absorbing contact lenses: relative performance. *International Contact Lens Clinic* [online]. 2000, **27**(3), 65-74 [cit. 2022-03-13]. ISSN 08928967. Dostupné z: doi:10.1016/S0892-8967(01)00059-1
- [41] ALCON INC. *AcrySof IOL: Návod k použití Alcon Laboratories, Inc.* Alcon Pharmaceuticals (Czech Republic) s.r.o., 2020. Www.ifu.alcon.com.
- [42] ALCON INC. *Návod k použití AcrySof NATURAL Single Piece IOL.* 2020. Dostupné také z: www.ifu.alcon.com
- [43] NETOLIČKA, Jan. Co je AMOLED displej. In: <https://www.huramobil.cz/blog/> [online]. 2022 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.huramobil.cz/co-je-amoled-displej/blog-1071/>
- [44] ALCON INC. *Clareon IOL, Aspheric hydrophobic acrylic IOL with the AutoMe: Informace o výrobku, Alcon Laboratories, Inc.* Alcon Pharmaceuticals (Czech Republic) s.r.o., 2020. Dostupné také z: www.ifu.alcon.com

## Seznam symbolů a zkratk

### Seznam symbolů

| Symbol     | Jednotka                       | Význam                       |
|------------|--------------------------------|------------------------------|
| $n$        |                                | Index lomu                   |
| $c$        | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | Rychlost světla ve vakuu     |
| $v$        | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | Rychlost světla              |
| $\lambda$  | nm                             | Vlnová délka                 |
| $A$        | %                              | Absorpce                     |
| $I$        | lux                            | Intenzita záření             |
| $I_0$      | lux                            | Původní intenzita záření     |
| $d$        | mm                             | Tloušťka materiálu           |
| $\alpha$   |                                | Koeficient absorpce          |
| $\alpha_m$ | °                              | Brewsterův úhel              |
| $P$        | %                              | Propustnost (Transmisiivita) |
| $I$        | Počet jednotek                 | Intenzita                    |
| $f$        | m                              | Ohnisková vzdálenost         |
| $a$        | m                              | Vzdálenost předmětu          |
| $a'$       | m                              | Vzdálenost obrazu            |
| $\varphi$  | dpt                            | Optická mohutnost            |

### Seznam zkratk

| Zkratka | Význam                                |
|---------|---------------------------------------|
| ATP     | Adenosintrifosfát                     |
| CNS     | Centrální nervový systém              |
| UV      | Ultrafialové                          |
| IR      | Infračervené                          |
| LED     | Light emitting diode                  |
| VPMD    | Věkem podmíněná makulární degenerace  |
| CVS     | Computer Vision Syndrome              |
| ANCI    | American National Standards Institute |
| FDA     | Food and Drug Administration          |
| IOL     | Intraocular lens                      |
| CNTF    | Ciliary neurotrophic factor           |
| HC      | Hard Coating (tvrdící vrstva)         |
| BČ      | Brýlová čočka                         |
| PMMA    | Polymethylmetakrylát                  |

## Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Parametry Gullstrandova schématického oka – hodnoty jsou v neakomodovaném stavu optického systému oka, hodnoty v závorce jsou pro stav plné akomodace [2]

Tabulka 3.1: Tabulka spektrálních oblastí [12]

Tabulka 5.1: Mechanismy poškození povrchu oka modrým zářením [24]

Tabulka 5.2: Mechanismy poškození sítnice modrým zářením [24]

Tabulka 7.1: Vlnové délky maxim intenzity světla vyzařovaného různými světelnými zdroji

Tabulka 7.2: Dosažení maxim intenzity vlnových délek u obrazovky počítače pro různou barvu obrazovky

Tabulka 7.3: Dosažení maxim intenzity vlnových délek při použití různého stupně režimu nočního osvětlení obrazovky počítače

Tabulka 7.4: Dosažení maxim intenzity vlnových délek při snižování jasů obrazovky počítače

Tabulka 7.5: Maxima intenzity vyzařovaného světla displejem mobilního telefonu bez použití a s použitím Filtru „Pohodlí pro oči“

Tabulka 7.6: Přehled měřených brýlových čoček

Tabulka 7.7: Spektrální propustnost materiálů vybraných brýlových čoček ke grafu 8.8

Tabulka 7.8: Meze spektrální propustnosti brýlových čoček blokujících modré světlo

Tabulka 7.9: Přehled měřených vzorků nitroočních čoček spolu s naměřenou ohniskovou vzdáleností a dopočtenou optickou mohutností čočky

Tabulka 7.10: Spektrální propustnost nitroočních čoček Alcon

## Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Struktura sítnice [8]

Obrázek 3.1 Spektrální složení Slunečního záření [18]

Obrázek 6.1: Průchod světla okem [22]



## Seznam grafů

Graf 4.1: Spektrální propustnost rohovky [20]

Graf 4.2: Spektrální propustnost komorové tekutiny lidského oka [20]

Graf 4.3: Spektrální propustnost oční čočky člověka [20]

Graf 4.4: Spektrální propustnost sklivce [20]

Graf 7.1: Spektrální složení světla vyzařovaného běžnými světelnými zdroji

Graf 7.2: Spektrální složení světla vyzařovaného obrazovkou počítače

Graf 7.3: RGB spektrum světla vyzařované obrazovkou počítače

Graf 7.4: Spektrální složení světla vyzařovaného obrazovkou počítače s použitím filtru modrého světla a bez použití filtru

Graf 7.5: Spektrální složení světla vyzařované obrazovkou počítače pro různé intenzity jasu

Graf 7.6: Spektrální složení vyzařovaného světla obrazovkou počítače s použitím režimu Nočního osvětlení a se snížením jasu obrazovky

Graf 7.7: Spektrální složení světla vyzařovaného mobilním telefonem bez použití filtru modrého světla a s použitím filtru modrého světla

Graf 7.8: Spektrální propustnost materiálů brýlových čoček

Graf 7.9: Spektrální propustnost brýlových čoček blokujících modré světlo od firmy HOYA

Graf 7.10: Spektrální propustnost nitroočních čoček

Graf 7.11: Spektrální propustnost nitroočních čoček a celková spektrální propustnost lidské čočky u dítěte (4,5 roku) a dospělého jedince (53 let) [20]

Graf 7.12: Srovnání spektrální propustnosti nitroočních čoček AsrySof různé optické mohutnosti

Graf 7.13: Srovnání spektrální propustnosti nitroočních čoček Acrysof Natural různé optické mohutnosti