

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

KATEDRA OPTIKY



# Vliv akomodace a velikosti zornice na hodnotu nitroočního tlaku

Diplomová práce

VYPRACOVALA:

Bc. Aneta Šedivková

Obor 5345T008 OPTOMETRIE

Studijní rok 2019/2020

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE:

Mgr. Eliška Najmanová, Ph.D.

ODBORNÝ KONZULTANT:

RNDr. Mgr. František Pluháček, Ph.D.

**Čestné prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Mgr. Elišky Najmanové, Ph.D. a RNDr. Mgr. Františka Pluháčka, Ph.D., za pomoci odborné literatury, která je uvedena v seznamu na konci práce.

V Olomouci dne

.....

Bc. Aneta Šedivková

**Poděkování:**

Tímto bych ráda poděkovala všem, kteří mi pomáhali v průběhu psaní mé diplomové práce, především Mgr. Elišce Najmanové, Ph.D. a RNDr. Mgr. Františku Pluháčkovi, Ph.D., za odborné rady, pomoc a cenné připomínky při vedení mé diplomové práce.

Tato práce byla podpořena projektem 16RPT03 inTENSE v rámci programu European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR). EMPIR je spolufinancován programem Evropské unie Horizon 2020 pro výzkum a inovace a státy podílejícími se na programu EMPIR. Tato práce byla dále podpořena z projektů IGA PřF UP v Olomouci s názvem “Optometrie a její aplikace“, č. IGA\_PrF\_2018\_007 a IGA\_PrF\_2019\_005.

## OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ÚVOD</b> .....   | <b>6</b>  |
| <b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....                              | <b>7</b>  |
| <b>1 ZORNICE</b> .....                                      | <b>7</b>  |
| 1.1 ANATOMIE ZORNICE .....                                  | 9         |
| 1.2 FUNKCE ZORNICE .....                                    | 9         |
| 1.3 SVALY DUHOVKY OVLIVŇUJÍCÍ ŠÍŘKU ZORNICE.....            | 10        |
| 1.3.1 Inervace svalů.....                                   | 10        |
| 1.4 ZORNICOVÉ REAKCE .....                                  | 12        |
| 1.4.1 Aferentní část reflexního oblouku fotoreakce.....     | 13        |
| 1.4.2 Parasympatická eferentní dráha .....                  | 13        |
| 1.4.3 Sympatická eferentní dráha.....                       | 14        |
| 1.4.4 Reakce zornic na světlo a tmu .....                   | 14        |
| 1.4.5 Reakce zornic na akomodaci a konvergenci .....        | 15        |
| 1.4.6 Farmaka .....   | 15        |
| 1.5 ADAPTACE OKA NA SVĚTLO A TMU.....                       | 16        |
| 1.5.1 Adaptace na světlo.....                               | 16        |
| 1.5.2 Adaptace na tmu .....                                 | 16        |
| <b>2 AKOMODACE</b> .....                                    | <b>18</b> |
| 2.1 AKOMODAČNÍ APARÁT OKA .....                             | 18        |
| 2.2 TEORIE AKOMODACE .....                                  | 21        |
| 2.2.1 Purkyňovy obrazy .....                                | 23        |
| 2.3 MECHANISMUS AKOMODACE .....                             | 24        |
| 2.3.1 Složky akomodačního procesu.....                      | 25        |
| 2.3.2 Akomodační stimuly.....                               | 26        |
| 2.3.3 Změna parametrů Gullstrandova oka při akomodaci ..... | 26        |
| 2.4 ANATOMICKÉ ZMĚNY V PRŮBĚHU AKOMODACE .....              | 27        |
| 2.5 PARAMETRY AKOMODACE.....                                | 27        |
| 2.6 ZMĚNY AKOMODACE S VĚKEM.....                            | 28        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>3</b>  | <b>NITROOČNÍ TLAK .....</b>  | <b>29</b> |
| 3.1       | ANATOMIE VYBRANÝCH OČNÍCH STRUKTUR .....                                   | 29        |
| 3.1.1     | <i>Přední a zadní oční komora (camera oculi anterior, posterior) .....</i> | 29        |
| 3.1.2     | <i>Řasnaté těleso (corpus ciliare).....</i>                                | 29        |
| 3.1.3     | <i>Komorový úhel (angulus iridocornealis).....</i>                         | 31        |
| 3.1.4     | <i>Schlemmův kanál (canalis Schlemmi) .....</i>                            | 32        |
| 3.2       | NITROOČNÍ TEKUTINA .....   | 33        |
| 3.2.1     | <i>Funkce nitrooční tekutiny .....</i>                                     | 34        |
| 3.3       | PRODUKCE NITROOČNÍ TEKUTINY .....  | 34        |
| 3.3.1     | <i>Dynamika nitrooční tekutiny .....</i>                                   | 35        |
| 3.4       | ODTOK NITROOČNÍ TEKUTINY .....   | 35        |
| 3.4.1     | <i>Konvenční cesta odtoku.....</i>   | 35        |
| 3.4.2     | <i>Nekonvenční cesta (uveosklerální cesta).....</i>                        | 36        |
| <b>II</b> | <b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>   | <b>38</b> |
|           | <b>Metodika a soubor.....</b>  | <b>38</b> |
|           | <b>Výsledky měření .....</b>   | <b>41</b> |
|           | <b>Diskuse .....</b>   | <b>47</b> |
|           | <b>ZÁVĚR.....</b>  | <b>51</b> |
|           | Zdroje .....   | 53        |
|           | Seznam obrázků .....   | 57        |
|           | Seznam grafů.....  | 57        |

# ÚVOD

Řada lidí v České republice a dalších zemích se již setkala s pojmy, jakými jsou nitrooční tlak (NOT) či zelený zákal neboli glaukom. Za touto skutečností je na jedné straně větší zájem lidí o své zdraví a na straně druhé jsou zde neustále se zdokonalující technologie a jejich rostoucí dostupnost. V předchozích letech bývalo běžnou praxí, že lidé podstupovali vyšetření NOT až v ordinacích oftalmologů, kam již často přicházeli s konkrétními problémy. V současné době stále častěji provádějí toto vyšetření také optometristé na svých pracovištích, což přináší vyšší pravděpodobnost včasné diagnózy očních onemocnění, včetně zeleného zákalu.

Glaukom má různé klinické projevy a může mít také řadu příčin. Jeho vznik není dosud zcela objasněn, avšak byly specifikovány možné rizikové faktory přispívající ke vzniku onemocnění. Jedná se o bezbolestnou a progresivní chorobu, která postihuje desítky milionů lidí po celém světě. Jedním z vysoce rizikových faktorů je právě vysoký NOT nebo jeho náhlé změny, přičemž tyto stavy mohou mít různé fyziologické (i multifaktoriální) příčiny. Existují studie očekávající vysoký nárůst tohoto onemocnění v globální populaci až na stovky milionů. Podrobnou studii vypracovala například American Academy of Ophthalmology [1]. Podle této studie bude v roce 2040 trpět glaukomovým onemocněním více než 111 milionů lidí ve věku 40 až 80 let. Právě glaukom patří k nejčastějším příčinám slepoty ve vyspělých zemích.

**Teoretická část** má za cíl popsat anatomii zornice a objasnit její fungování. Dále se zabývá teorií, mechanismy akomodace a anatomickými změnami oka v jejím průběhu. V neposlední řadě je cílem teoretické části vysvětlit fyziologii NOT a význam odtoku nitrooční tekutiny (NT). Význam této části spočívá především v ucelení teoretických poznatků, jejichž znalost je nezbytným předpokladem pro správnou interpretaci výsledků experimentální části. **Experimentální část** byla rozdělena do dvou měření. První probíhalo za denního osvětlení, kdy byly měřeny hodnoty NOT v závislosti na krátkodobé akomodaci. Druhé měření bylo uskutečněno za tmy a zkoumalo vliv velikosti zornice na NOT.

# I TEORETICKÁ ČÁST

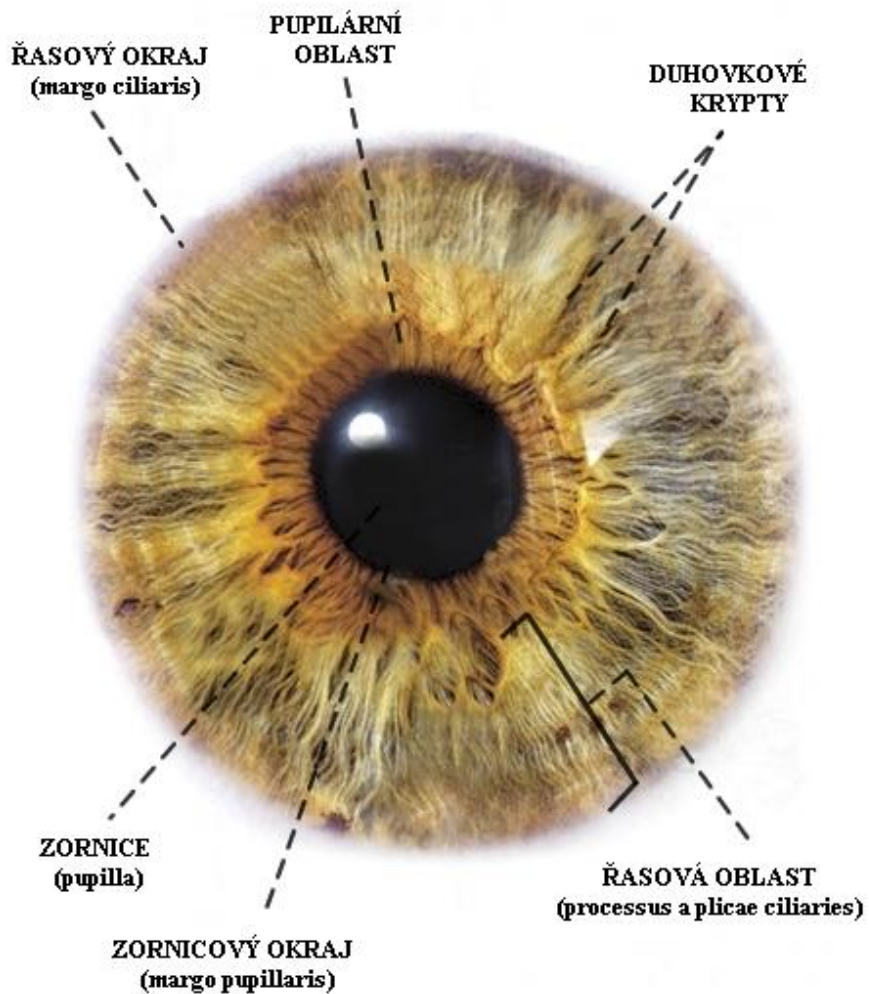
Podstatou teoretické části je shrnutí dosavadních poznatků o funkci zornic, akomodaci a NOT. První kapitola je věnována zornici, její anatomii a fyziologii. Tato část se také zabývá zornicovými reakcemi, inervací zornic a rovněž adaptací oka na světlo a tmu. Ve druhé kapitole je objasněn princip akomodace, složky akomodačního procesu a popsán akomodační aparát oka. Závěrečná kapitola se věnuje NOT a vybraným anatomickým strukturám oka. Cílem této části je ucelení informací potřebných pro správnou interpretaci výsledků měření v experimentální části.

## 1 ZORNICE

Pro popis zornice je nezbytné zmínit anatomii duhovky (*Obr. 1*). **Duhovka** (*iris*) je spolu s cévnatkou a řasnatým tělesem **součástí střední vrstvy oka** nazývané živnatka. Její přední plocha společně s přední plochou čočky ohraničují zezadu přední komoru. Má **tvár mezikruží** a vytváří přepážku mezi přední a zadní oční komorou. Přední plocha není kryta epitelem, obsahuje vazivové stroma, které utváří duhovkové krypty, díky kterým můžeme na duhovce při pohledu zepředu pozorovat její typickou kresbu. Kresba je ovlivněna především úpravou cév, vláken stromatu a v neposlední řadě pigmentem prosvítajícím z epitelu. Středový otvor duhovky nazýváme **zornice** (*pupilla*). Neleží však přímo v jejím středu, ale je lehce mediálně posunuta, proto je zevní strana duhovky širší než strana vnitřní. Vzdálenost mezi středem zornic se nazývá **pupilární distance**. Měří se při zhotovování brýlí a je důležitá i při centraci čoček do zkušebních obrub. U mužů se tato vzdálenost pohybuje přibližně okolo 65 mm, ženy mají tuto hodnotu zhruba o 3 mm menší. [2, 3]

Duhovka má při narození jedince bílé rasy vždy světlé zbarvení, které je dáno malým množstvím pigmentových melanocytů. Do 12tého měsíce života dojde k ustálení její barvy. **Množství duhovkového pigmentu ovlivňuje NOT**, nejvyšší hodnoty jsou pozorovány u duhovek hnědé barvy [4]. Epitel a stroma albinů neobsahuje žádný pigment a jejich duhovka má proto světle šedomodré zbarvení, propouští světlo a vykazuje nižší hodnoty NOT. Bylo rovněž zjištěno, že tmavší barva duhovky zvyšuje riziko katarakty a je také spojena se sníženým rizikem očního melanomu [5]. Vyšetření duhovky se nejčastěji provádí za pomoci šterbinové lampy. Při vyšetření hodnotíme

především kresby a barvu duhovky. U modrých očí lze lépe pozorovat jakékoliv změny. Barva duhovky se může patologicky měnit v závislosti na různých nemocích. Například u **glaukomu s uzavřeným úhlem** je kresba méně výrazná a duhovka ztrácí svůj pigment. Jako projev **neovaskulárního glaukomu** je díky vytvoření nových cév na duhovce pozorováno její růžové, někdy až červené zbarvení. [3, 6]



*Obrázek 1 - Anatomie duhovky*



## 1.1 ANATOMIE ZORNICE

Zornice je **okrouhlý otvor** přibližně ve středu duhovky. V případech nervové, infekční či zánětlivé choroby oka nebo při glaukomatickém záchvatu může být však její tvar narušen. Velikost zornice je závislá na činnosti dvou protichůdně působících svalů duhovky, které budou podrobněji popsány v kapitole 1.3. Šíře zornice je proměnlivá, její velikost se pohybuje v rozmezí **2 - 8 mm**. Největší šíře obvykle nabývá ve věku 15 - 20 let. S přibývajícím věkem se zmenšuje a ve stáří dosahuje velikosti pouze 2 – 3 mm. V temnu tak nedosahuje takové šířky, reakce na osvit bývá pomalejší a méně vydatná. Její **velikost ovlivňuje několik faktorů**, jedním z nich je i spánek. Po probuzení a v bdělém stavu bývá širší, při spánku se naopak zužuje. Čím hlubší je spánek, tím užší jsou zornice. Dalším faktorem ovlivňujícím šíři zornice jsou farmaka, stupeň akomodace, stav bdělosti a intenzita světla. Rozdílná velikost zornic neboli **anizokorie** je jedním z klinicky významných faktorů. Může totiž představovat autonomní nervové přerušení duhovky u sympatického či parasympatického systému. [3, 7, 8]

## 1.2 FUNKCE ZORNICE

Hlavní funkcí zornice je **regulace množství světla vstupujícího do oka**. Při nedostatečném osvětlení zornice zvětšuje svůj průměr a poskytuje tak okamžitý způsob pro maximalizaci počtu fotonů dopadajících na sítnici. Tento stav se nazývá **mydriáza**. Naopak při vysokém množství světla dochází k **mióze**, tedy sevření pupily a zabránění oslnění. Průměr zornice **ovlivňuje hloubku ostrosti**, protože při zúžené zornici nejsou propouštěny paprsky pod velkým úhlem, dochází k jejímu zvýšení [9]. Zornice eliminuje okrajové paprsky a tím odstraňuje sférickou aberaci. Její šíři určuje tonus sympatiku a parasympatiku. V neposlední řadě **napomáhá vstřebávání NT** do cévního systému za pomoci trámčiny duhovkorohovkového úhlu. **Při mióze je usnadněn odtok komorové vody** z přední komory do trámčiny a Schlemmova kanálu. Pokud je vstřebávání NT narušeno, dochází ke vzniku zeleného zákalu (glaukomu) a vlivem zvýšeného NOT k utlačování vláken zrakového nervu. [2, 7, 10]

Bylo zjištěno, že se při osvitě oka přizpůsobeného tmě, zornice začne stahovat za **0,1875 s**. Potom následuje rychlá **primární kontrakce** po dobu **0,4365 s** o rychlosti **5,48 mm/s** následována **sekundární kontrakcí 0,3125 s**, při pomalejší rychlosti

**1,34 mm/s.** Experiment byl prováděn na zdravých mladých lidech, pro osvětlení bylo použito 8 ampérového oblouku. [11]

### 1.3 SVALY DUHOVKY OVLIVŇUJÍCÍ ŠÍŘKU ZORNICE

Pod povrchovým vazivem duhovky se nachází vrstva hladké svaloviny, konkrétně **svěrač zornice** (*musculus sphincter pupillae*) a její **rozvěrač** (*musculus dilatátor pupillae*). Díky těmto svalům může zornice měnit svůj průměr. Oba svaly vznikají z neuroepitelu, nejdříve vzniká sphincter, který se od neuroepitelu po určitém čase úplně oddělí. Opačně je tomu u dilatátoru, který je trvale součástí předního listu pigmentového epitelu duhovky a vzniká až ke konci těhotenství. Z tohoto důvodu jsou zornice u novorozenců v mióze, dilatátor u nich ještě není úplně vyvinut. **M. sphincter pupillae** je široký asi 1 mm obtáčí zornici a vytváří trojrozměrnou strukturu s mnoha otvory, ve kterých probíhají cévy a pojivová vlákénka. U málo pigmentovaných duhovek může být tento sval vidět pouhým okem jako černohnědý vrásčitý lem. Je silnější než dilatátor a právě proto je **hlavním faktorem při zornicových reakcích**. Při kontrakci tohoto svalu dochází k omezení množství světla, které vstupuje do oka, zornice se zúží. **M. dilatátor pupillae** je tvořen jemnými, pigmentovanými vlákny, které se částečně překrývají a v oblasti duhovkového kořene vytvářejí cirkulární prsteneček. Začíná u kořene duhovky a končí 2 mm od okraje zornice. Jeho kontrakcí dojde k **rozšíření zornice**. [2, 3, 12]

#### 1.3.1 Inervace svalů

Hybnost obou těchto svalů je ovládána autonomními nervy. **Autonomní systém**, někdy nazývaný jako **vegetativní nervový systém**, dokáže pracovat bez naší vůle. Orgány, které jím jsou řízeny, pracují i v bezvědomí. Tento systém zajišťuje přežití organismu a převádí vzruchy mezi centrální nervovou soustavou a hladkou svalovou tkání. Při **zátěžových reakcích organismu převládá sympatická inervace**, pokud je organismus **v klidu převažuje inervace parasympatická**. Aktivita parasympatiku se projevuje zúžením zornic či průdušek nebo také zpomalením srdeční činnosti. Naopak ke zvýšení srdeční činnosti, rozšíření zornic či zvýšení krevního tlaku dochází při zapojení sympatiku. [13, 14]

**M. sphincter pupillae** je inervován parasymptickou složkou III. páru mozkových nervů (*n. oculomotorius*). Při akomodaci do blízka dochází k zapojení parasymptiku, naopak u akomodace na dálku dojde k aktivaci sympatiku. **M. dilatátor pupillae** je tedy inervován sympatikem, centrum pro dilataci pupil se nachází na rozhraní krční a hrudní míchy, tzv. *Budgeho centrum*. Díky dvojí inervaci sphincteru je i při přerušení sympatické inervace pořád možná dilatace pupil. [13, 15]

### **Parasympatická inervace**

Při normálních podmínkách je stah zornice vyvolán za pomoci tzv. mediátoru, který vzniká na nervosvalovém spojení při přenosu podnětu. V případě zornic se konkrétně jedná o **parasympatický mediátor acetylcholin**, po jeho uvolnění vznikají akční potenciály. Acetylcholin je v těle rozkládán za pomoci enzymu acetylcholinesterázi, který je obsažen v ciliárním svalu, také ve svěrači zornice, rohovkovém epitelu, cévnatce a sítnici. Jak již bylo zmíněno, svěrač zornice je inervován cestou III. párového hlavového nervu (*n. oculomotorius*). Okohybný nerv má dvě části, motorickou a parasymptickou. Motorická část slouží k inervaci čtyř ze šesti okohybných svalů. Jeho parasymptická část je určena k inervaci svěrače zornice, působí miózu a inervuje *m. ciliaris*, který **ovládá akomodaci čočky**. [6, 13]

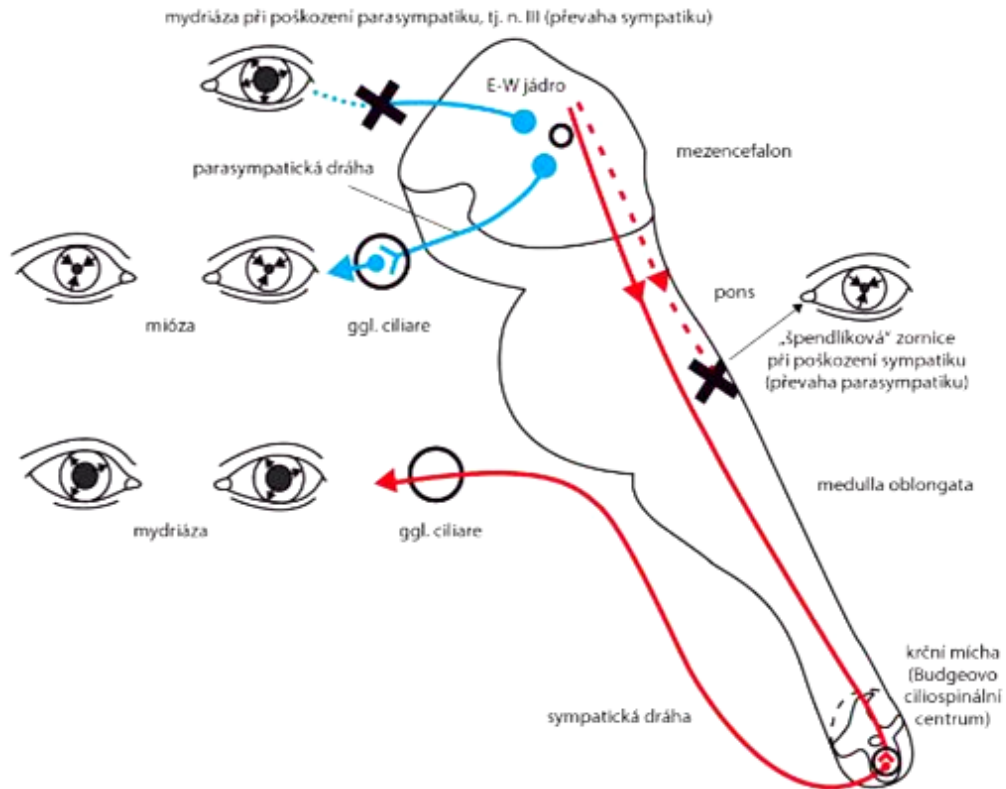
**Pregangliová parasymptická vlákna** vystupují z *Edingerova-Westphalova jádra*. Protože parasymptická vlákna mají stejnou dráhu jako okulomotorický nerv, dochází při jeho poškození k **abnormální dilataci zornice**. *Edinger-Westphalovo jádro* je umístěno ve středním mozku, nahoře a vpředu od hlavního jádra III. páru. Dělí se na část rostrální, kde je lokalizována funkce reflexu na světlo, zadní kaudální část řídí akomodaci. [8, 16]

### **Sympatická inervace**

Mediátorem pro sympatická nervová vlákna je **noradrenalin**, který se váže na tzv. *adrenergní receptor*. Svěrač zornice obsahuje  $\alpha$ -1 a  $\alpha$ -2 receptory. Podráždění  $\alpha$ -1 receptorů vyvolá vydatnou **mydriázu**. Aktivace  $\alpha$ -2 receptorů zabraňuje vstřebání noradrenalinu a dochází k nepřímé aktivaci dilatátoru zornice.

Inervace **m. dilatátor pupillae** probíhá krčním **sympatikem**. Centrální neuron je uložen v *Budgeovu centru* na hranici krční a hrudní míchy ve výši C8 – Th3

(*kraniální sympatikus*). Při poruše sympatické inervace dochází k paralytickému zúžení a spastickému rozšíření zornice. Naopak je tomu při poruše inervace parasympatické (Obr.2). [7, 13, 17]



Obrázek 2 – *Sympatická* a *parasympatická* inervace zornic za fyziologického a patologického stavu.

## 1.4 ZORNICOVÉ REAKCE

Zornicové reakce dělíme do dvou hlavních skupin, jedná se o reakce fyziologické a patologické.

### Fyziologické reakce:

- **Zúžení zornic**
  - *Přímá reakce na světlo* – náhlé osvětlení vyšetřovaného oka při zakrytém druhém oku. Okamžitá, zornice reaguje 0,2 – 0,5 sekundy po osvětlení.
  - *Nepřímá (konsenzuální) reakce na světlo* – po osvětlení druhostranného oka pozorujeme zúžení zornice na neosvětleném oku.

- *Reakce zornic při konvergenci a akomodaci* - zúžení při náhlém pohledu na blízký předmět.
- *Ostatní* – sevření víček, podráždění trojklanného nervu, narkóza.
- **Rozšíření zornic**
  - *Podráždění sympatiku* z podnětů sensiblních, sensorické a psychické podněty – bolest, strach, při abdukci. [3, 13]

## Patologické reakce

Mezi patologické zornice se řadí například **amaurotická ztuhlost zornice**, která vzniká přerušením či ztrátou všech vláken zrakového nervu. Pokud dojde k poškození zrakového nervu či sítnice, vymizí přímá reakce zornic na osvit. Je-li vidění druhého oka zachováno, je ve většině případů zachována také nepřímá reakce vyvolaná z oka vidoucího. Dráha reflexu z mozku k periférii totiž neprochází zrakovým nervem a nedochází tak k jejímu přerušení. V okamžiku smrti se zornice nejprve rozšíří a po několika hodinách přechází do miózy. [13, 17, 18]

### 1.4.1 Aferentní část reflexního oblouku fotoreakce

**Pupilmotorická vlákna** tvoří asi **20 % vláken primární zrakové dráhy**. Začínají v retinálních fotoreceptorech, jdou zrakovým nervem a kříží se v *chiasmatu*. Vlákna z nazální části sítnice se zde kříží, vlákna z temporální části nikoliv. Dále pokračují do *optického traktu*, pravým traktem probíhají vlákna z temporální části sítnice pravého oka a naopak. Před *corpus geniculatum* se **pupilmotorická vlákna odpojí** od vláken primární zrakové dráhy a odbočí do pretektální oblasti na *diencefalon-mezencefalické pomezí*. Toto místo je **první synapsí aferentní dráhy**. Obě pretektální jádra jsou propojena mezi sebou a také s oběma částmi párového *Edingerova-Westphalova jádra*. Díky dvojitmu překřížení je možný mechanismus **konsenzuální reakce zornic**, tedy fakt, že se při osvitě jedné poloviny oka zúží zornice obou očí. [8, 10, 18]

### 1.4.2 Parasympatická eferentní dráha

Eferentní dráha reflexního oblouku fotoreakce je **zprostředkována pupilárními vlákny třetího hlavového nervu**. Vychází z *Edinger-Westphalova jádra*, které je

uloženo v *mezenkefalu*. Parasympatická eference pro svěrač zornice spolu s ciliárním svalem je **dvouneuronová**. První (**pregangliový**) neuron spojuje *Edingerovo-Westphalovo jádro* s *ciliárním gangliem* v očníci. Jeho pupilomotorická vlákna probíhají společně s motorickou částí *n. oculomotorii*, po opuštění *ramus inferior* vstupují samostatně jako *radix brevis* do *ciliárního ganglia*. **Postgangliová vlákna** po synapsi pronikají sklérou a jako *nn. ciliares breves* inervují ciliární sval a *m. sphincter pupillae*. K samotným receptorům svěrače zornice se dostane pouze 3 % všech parasympatických vláken. Zbylá vlákna pokračují k ciliárnímu svalu, proto se poškození parasympatických vláken projeví vždy více v zornicových reakcích než v akomodaci. [18, 19, 20]

#### 1.4.3 Sympatická eferentní dráha

Sympatická eference pro *m. dilatátor pupillae* je **tříneuronová**. Centrální neuron jde z hypothalamu postranním míšním provazcem k ciliospinálnímu *Budgeovu centru* ve výši C8 až Th3 (*kraniální sympatikus*). Vlákna, která prochází předními míšními kořeny do *ganglion cervicale superius* ve výši C2 a C3 (*krční sympatikus*), představují **pregangliový** (1. periferní) **neuron**. **Postgangliový** (2. periferní) **neuron** směřuje do očníce dvěma cestami. První jde do *Gasseova semilunárního ganglia*, následně cestou *n. ophthalmicus*, *n. nasociliaris* a *nn. ciliares longi* k pupilárnímu dilatátoru. Druhá větev jde přes *plexus caroticus* do *fissura orbitalis superior*, jako *radix sympathica* bez interpolace ciliárním gangliem. K duhovce jdou společně s parasympatickými vlákny cestou *nn. ciliares breves* k rozvěrači zornice. Sympatická pupilomotorická dráha se na rozdíl od parasympatické **nikde nekříží**, její léze tak působí pouze homolaterální (stejnostrannou) poruchu. [13, 19, 21]

#### 1.4.4 Reakce zornic na světlo a tmu

K aktivaci parasympatiku dochází tehdy, když na tyčinky a čípky dopadá větší množství světla. Jeho vlákna vedou impuls do mozku (**aferentní dráha**) a po vyhodnocení signálu sestupují do orbity, kde dochází k aktivaci *m. sphincter pupillae* (**eferentní dráha**) a tím vyvolanému stahu zornice. Naopak je tomu za sníženého osvětlení, kdy na sítnicové fotoreceptory dopadá malé množství světla. Dochází k inervaci sympatiku, který aktivuje *m. dilatátor pupillae*, a zornice se tak rozšíří.

Normální velikost zornice u dospělých kolísá okolo 2 - 4 mm za jasného světla, ve tmě její průměr nabývá hodnot 4 - 8 mm. [10, 12, 14, 22]

#### 1.4.5 **Reakce zornic na akomodaci a konvergenci**

Při náhlém pohledu na blízký předmět dochází ke **konvergenci, akomodaci a mióze**, tzv. akomodační triáda. Tato reakce zajišťuje ostré zobrazení blízkého předmětu na sítnici (akomodaci), i jednoduché binokulární vidění předmětu (konvergence zorných os). Jedná se tedy o současnou reakci okohybných svalů, svěrače zornice a ciliárního svalu. Průběh této složité reakce nebyl dosud zcela objasněn a to právě vzhledem ke skutečnosti, že tuto reakci můžeme pozorovat i u pacientů s jedním okem, či u presbyopů. [3, 13]

Podnětem pro pupilární reakci při konvergenci je neostré zobrazení blízkého předmětu na sítnici. Tato informace se dostává zrakovou dráhou do zrakové kůry, z přilehlých oblastí jdou poté do mozkového kmene korekční impulzy ke kaudální části parasympatického jádra n. III, vynechána jsou jádra pretectální. Z toho vyplývá, že se kaudální část parasympatického jádra podílí výlučně při reakcích na konvergenci, rostrální část pouze na fotoreakci. Impulzy z mozkového kmene jdou k vnitřním přímým svalům, ke svěrači zornice a k ciliárnímu svalu cestou *m. oculomotorius*. [12, 13]

#### 1.4.6 **Farmaka**

Jak již bylo zmíněno, farmaka také mohou ovlivnit šířku zornice. Bylo zjištěno, že jejich působení souvisí s barvou duhovky, u lidí s modrými očima je jejich účinek výraznější než u lidí s tmavými duhovkami. K mydriáze dochází po předávkování atropinem nebo v emočních situacích jako je bolest, radost či strach. Emoční vzruchy z mozkové kůry přichází do hypotalamu, kde se nachází centrum reakcí zornic na psychické a senzitivní podněty. [7, 17, 23]

## 1.5 ADAPTACE OKA NA SVĚTLO A TMU

Adaptací nazýváme schopnost oka přizpůsobit se různým zrakovým podmínkám. Lidské oko se dokáže přizpůsobit hladinám osvětlení v rozmezí od 0,25 lx až 105 lx. Proces adaptace doprovází fotochemický děj, při kterém dochází k rozkladu zrakových pigmentů obsažených v zevních segmentech tyčinek a čípků, tzv. resyntéza. Dalším adaptačním mechanismem je **fotopupilární reflex**, tedy změna velikosti zornice v závislosti na hladině osvětlení. Šířka zornice se pohybuje v rozmezí od 1,8 mm až 7,5 mm. Doba pro změnu její šíře je asi **360 – 380 ms**, pokud dojde k náhlé změně osvětlení, zkracuje se tato doba až na 100 ms. [3, 24, 25]

### 1.5.1 Adaptace na světlo

Adaptací na světlo označujeme reakci při přechodu z běžného osvětlení do prudkého slunečního jasů. Na rozdíl od adaptace na tmů **trvá pouze několik desítek vteřin**, proces je dokončen po 1 minutě. Duhovka se zužuje a rozšiřuje jako odpověď na nárůst a pokles úrovně osvětlení. Při velkém a prudkém nárůstu intenzity osvětlení se **zornice okamžitě zúží** a chrání tak oko před oslněním. Krátké oslepení bývá také doprovázeno křečí víček (*blefarospazmem*), které za nedlouho a bez následků zmizí. [10, 26, 18]

### 1.5.2 Adaptace na tmů

Hlavní roli v adaptační schopnosti oka hraje regenerace a syntéza zrakových pigmentů. Adaptace na tmů je ovlivněna rychlostí, jakou se snižuje intenzita osvětlení. Pokud je snižování intenzity pomalé, přestává naše oko postupně vnímat barvu, tvar a detaily předmětů. Naopak je tomu při rychlém snížení intenzity, kdy může dojít až ke znemožnění vidění. Adaptace na tmů je mnohem delší než adaptace na světlo a **trvá zhruba 40 – 60 minut**. Při vidění za šera a v noci se uplatňují tyčinky. Čípky zajišťují fotopické vidění, tedy vidění za světla. Adaptace čípků na tmů je rychlejší, avšak jejich citlivost je menší. V zevních segmentech tyčinek je obsažený rhodopsin, fotosenzitivní látka bílkovinného původu. **Rhodopsin** (zrakový purpur) obsahuje v tučích rozpustný vitamín A, účinkem světla se rozkládá na zrakovou žluť, dále na zrakovou běl. Rychlost jeho přeměny závisí na vlnové délce pohlceného světla. Nejcitlivější je pro paprsky o vlnové délce 555 nm – žlutozelené světlo, nejpomaleji bledne působením červeného světla. Rhodopsin se skládá ze dvou částí, ze složky absorbující světlo (*chromatoforu*)



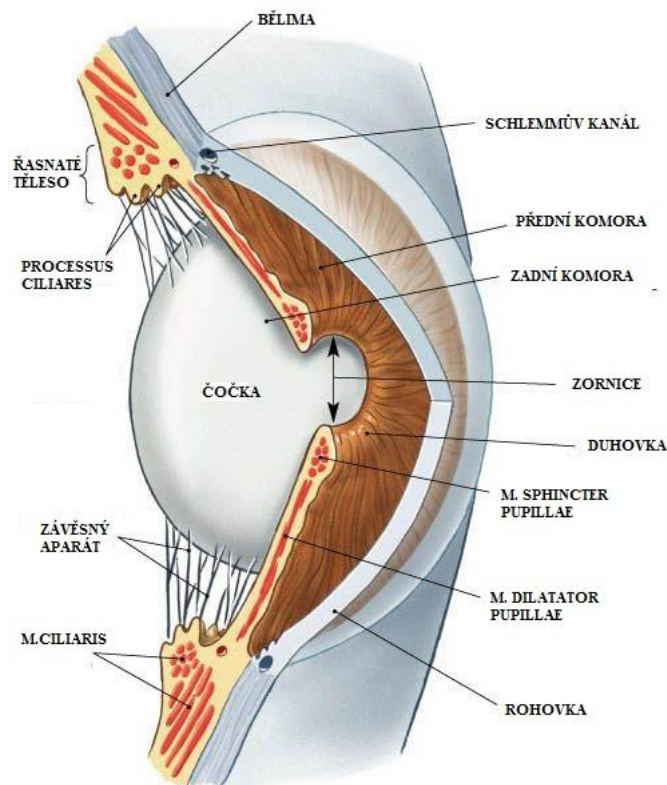
a bílkovinné části opsinu. Jedním z důsledků adaptace oka na tmu, je posun spektrální citlivosti sítnice ke kratším vlnovým délkám, tzv. Purkyňův jev. Proto se za šera barvy z krátkovlnného úseku spektra (modrá) jeví světlejší. Pokud na tyčinky a čípky dopadá pouze malé množství světla, dochází k aktivaci sympatiku. Protože právě sympatikus inervuje *m. dilatátor pupillae*, dojde k **rozšíření zornice**. [10, 24, 26]

## 2 AKOMODACE

Akomodací rozumíme **schopnost oka zvýšit optickou mohutnost** své dioptrické soustavy a tím zajistit ostré vidění předmětů ležících v konečné vzdálenosti. Její centrum se vymezuje od *mezencefala* po *Edinger-Westphalovo jádro*. Refrakční stav oka je ovlivněn převážně **změnou zakřivení lomivých ploch čočky**. Aby byly viděny ostře i blízké objekty, musí mít rozbíhavé paprsky, které se odráží od blízkých předmětů, ohnisko na sítnici. Nezbytným předpokladem je plasticita oční čočky a integrita jejího závěsného aparátu, který je napínán činností kruhového ciliárního svalu inervovaného parasymptikem. Akomodace **s přibývajícím věkem klesá**, v dětství je její síla okolo 40 dioptrií, postupně však vlivem kondenzace čočky slábne a zhruba v 65 letech života vymizí. Tento proces nazýváme presbyopií. [7, 17, 27]

### 2.1 AKOMODAČNÍ APARÁT OKA

Na akomodaci se podílí **ciliární sval řasnatého tělesa, závěsný aparát čočky** a **vlastní elasticita čočky**. Pro lepší přehlednost jsou tyto a další oční struktury znázorněny na obrázku číslo 3.



Obrázek 3 – Řez okem

### **Řasnaté těleso** (*corpus ciliare*)

Je trojúhelníkovitého tvaru a skládá se ze svaloviny a pojivové tkáně. Právě jeho **svalovina zajišťuje změnu zakřivení čočky** a podílí se tak na akomodaci. Další úlohou řasnatého tělesa je **tvorba komorové vody**, která je produkována jeho výběžky. Podrobněji bude řasnaté těleso popsáno v kapitole 3.1.2. [3]

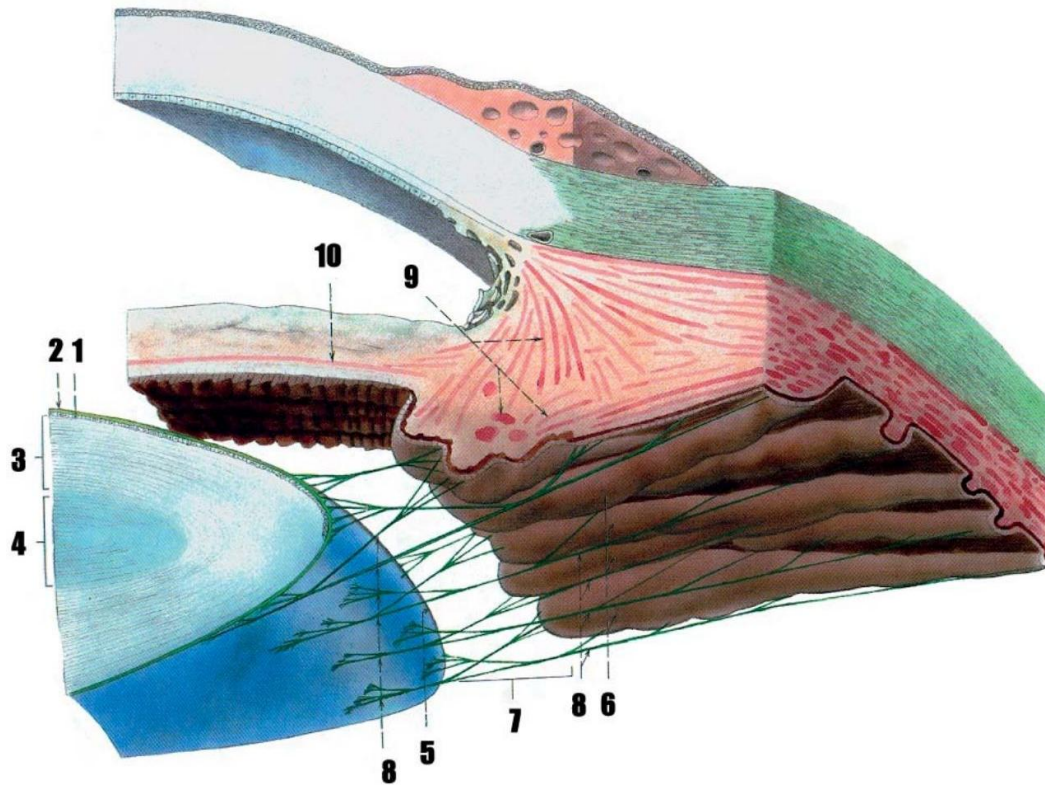
### **Ciliární sval** (*musculus ciliaris*)

Podle nejnovějších poznatků se jedná o **jednotný svalový orgán**, jehož svalová vlákna vytváří trojrozměrnou mřížku, ve které se protínají vlákna *Brücknerova* a *Müllerova svaly*. Při kontrakci ciliárního svalu dojde k přeskupení této mřížky, které vede k **akomodaci**, tedy zvýšení výkonu *Müllerova svaly*. Naopak je tomu při relaxaci svalu, kdy svou převahu získávají vlákna *Brücknerova svaly* a dochází k tzv. **desakomodaci**. Inervace tohoto svalu probíhá za účasti **autonomního nervového systému**. Podílí se na ní vlákna sympatiku, který inervuje *Brücknerův sval* a postgangliová parasympatická vlákna *n. oculomotorius* inervující *sval Müllerův*. **Parasympatická stimulace aktivuje kontrakci svalu**, zatímco sympatická inervace má pravděpodobně inhibiční účinek, který je dán funkcí parasympatické aktivity. Ciliární sval se spojuje s *lamina elastica Bruchovy membrány*, která odděluje cévnatku od sítnice. Dopředu vybíhají jeho svalová vlákna ke sklerální ostruze, část vláken jí proniká a končí až v trámčině komorového úhlu. Pohyb ciliárního svalu ovlivňuje průchodnost trámčiny a tím i odtok NT. Při **kontrakci ciliárního svalu** se značně **zvýšuje snadnost odtoku** [53]. Dojde ke zvětšení průměru trámčiny na sagitálním řezu, odtažení sklerální ostruhy směrem dozadu, čímž se rozšíří prostor mezi lamelami v trámčině. [13, 28, 29]

### **Čočka** (*lens*)

Čočka (*Obr. 4*) je součástí optického systému oka, její **optická mohutnost je 19 D**. Má bikonvexní tvar a je umístěna v prohlubíně sklivce (*fossa patellaris*) za duhovkou. Skládá se z **elastického pouzdra, kůry a tuhého jádra**. Ve své poloze je **fixována pomocí vláken závěsného aparátu**. Tkáň čočky je tvořena vláknovými buňkami čočky tvořené 65 % vodou a 35 % proteiny. V průběhu života roste a mění se její hmotnost, v dospělosti **dosahuje 255 mg**. Ekvatoriální průměr v dospělosti je přibližně 9 mm. Tloušťka čočky v období života kolísá, v dospělosti se pohybuje okolo

3,7 mm. Bez akomodace se velikost poloměru **zakřivení přední plochy čočky pohybuje mezi 10 – 11 mm**, zadní plochy okolo 6 mm. Čočka má při akomodaci na blízko tloušťku přibližně 4,4 mm. [2, 3]



Obrázek 4 - Čočka a její závěsný aparát

- |  |  |
|--|--|
| 1. Čočkové pouzdro ( <i>capsula lentis</i> )   | 6. Řasové výběžky ( <i>processus ciliares</i> )                  |
| 2. Čočkový epitel ( <i>epithelium lentis</i> ) | 7. Závěsný aparát čočky ( <i>apparatus suspensorius lentis</i> ) |
| 3. Čočková hmota ( <i>cortex lentis</i> )      | 8. Pásmová vlákna ( <i>fibrae zonulares</i> )                    |
| 4. Čočkové jádro ( <i>nucleus lentis</i> )     | 9. Řasový sval ( <i>musculus ciliaris</i> )                      |
| 5. Čočkový rovník ( <i>equator lentis</i> )    | 10. Zomicový svěrač ( <i>musculus dilatátor pupillae</i> )       |

**Čočkové pouzdro** (*capsula lentis*) uzavírá čočku, je elastické a průhledné. V oblasti před a za ekvátorem se do něho upínají vlákna závěsného aparátu (*fibrae zonulares*). V jeho přední části jsou **metabolicky aktivní epitelové buňky**, které se prodlužují a vytváří čočková vlákna. Ta ztrácí buněčné organely a dochází v nich ke zvýšení obsahu proteinů. Starší vlákna čočky se přibližují více a více k centru a tvoří

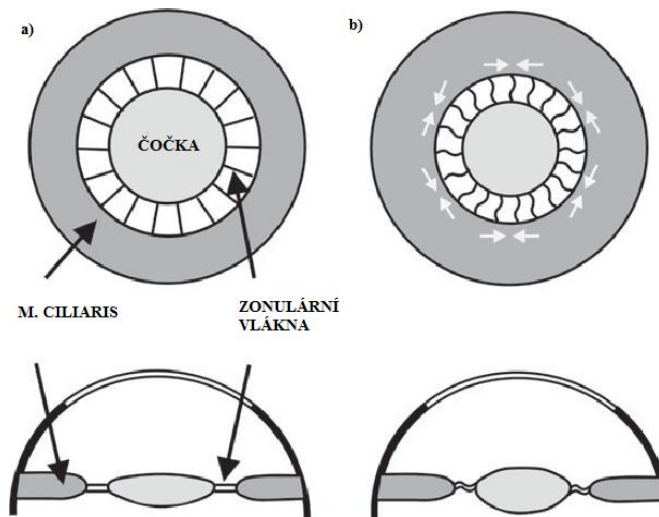
jádro čočky. Vpředu je tlustší než vzadu, proto se může přední povrch čočky během akomodace vyklenout více než v případě, že by čočkové pouzdro mělo ve všech místech stejnou tloušťku. Studií čočkového pouzdra se zabýval E. F. Finchman, který také zjistil, že **tloušťka čočkového pouzdra je silnější v oblasti ekvátoru než na jeho pólech**. [3, 30, 31]

### **Závěsný aparát čočky (*aparatur suspensorius lentis*)**

Tvoří ho systém radiálně uspořádaných jemných vláken, která probíhají mezi řasnatým tělesem a čočkou. Čočka je pomocí těchto vláken fixována na svém místě, vlákna se také podílí na akomodaci. Nejsilnější jdou z *pars plana* řasnatého tělesa k přední ploše čočky. Od oblasti *ora serrata* k zadní ploše čočky jsou vlákna tenčí. Vlákna závěsného aparátu (*fibrae zonulares*) se upínají na zonulární lamely čočkového pouzdra a jsou tvořena jak kolagenními tak elastickými fibrilami. Vlákna se na přední a zadní stranu čočky připojují v ekvátorové oblasti. Při tahu čočky k řasnatému tělesu (do periferie) dochází k **zaostření na dálku** (zploštění čočky). **Zaostření na blízko** probíhá po uvolnění tahu vláken, kdy se čočka vlastní pružností vyklene. S přibývajícím věkem vlákna ztrácí svou elasticitu a stávají se křehčí. [2, 13]

## 2.2 TEORIE AKOMODACE

Dle **Helmholtzovy teorie** (*Obr. 5*) objasňující zevní akomodační mechanismus, je akomodace zajištěna kontrakcí cirkulárních vláken ciliárního svalu, jedná se o **aktivní akomodaci**. Kontrakce těchto vláken při pohledu do blízka zužuje prsteneček ciliárního svalu a uvolňuje napětí vláken závěsného aparátu. Z výběžků řasnatého tělesa vystupují vlákna závěsného aparátu, která se upínají podél ekvátoru čočky. Při **pasivní akomodaci** ztrácí tato vlákna napětí a čočka díky plasticitě svého pouzdra mění svůj lentikulární tvar na tvar více sférický. Při procesu pasivní akomodace se **změľčí hloubka přední komory** a dochází k vyklenutí především přední a částečně také zadní plochy čočky. Při maximální akomodaci klesá čočka svou vlastní vahou a při pohybech oka se lehce zachvívá. [13, 27, 33]

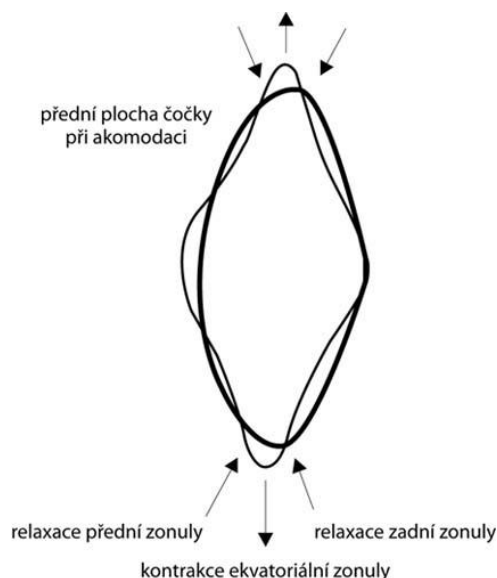


Obrázek 5 - Helmholtzova teorie

Obrázek 5 a) popisuje **pasivní akomodaci** - v uvolněném oku je čočka držena, zploštěna pod napětím zonulárních vláken. Na obrázku 5 b) je znázorněna **aktivní akomodace**, tedy proces, při kterém se díky kontrakci kruhových vláken v ciliárním svalu snižuje vnitřní průměr řasnatého tělesa. Dále dochází k uvolnění napětí zonulárních vláken a tím k vyklenutí čočky v důsledku elasticity jejího pouzdra. [47]

Protože pouhé zvětšení lomivosti přední a zadní plochy čočky nevysvětluje rozdíl optické mohutnosti soustavy oka při uvolněné a maximální akomodaci, doplnil Gullstrand původní Helmholtzovu teorii o tzv. **vnitřní akomodační mechanismus**. Tento mechanismus je založen na přesunu částí hmoty čočky s vyšším indexem lomu do optické osy a ve zvětšeném zakřivení jejího předního pólu. [13, 27, 32]

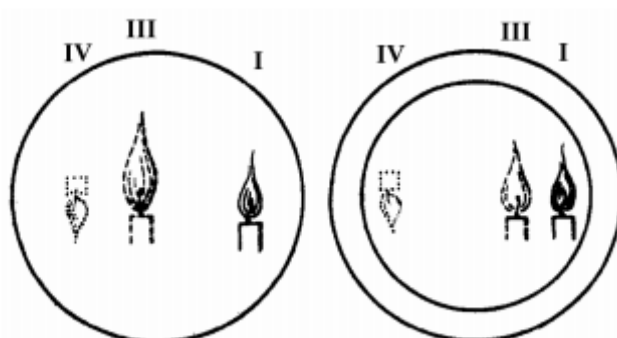
Jsou známy ještě další akomodační teorie, například **teorie podle Schachara a Tscherninga (Obr. 6)**. **Schachar** během akomodace předpokládá aktivní spolupráci ciliárního svalu a závěsného aparátu, a také přiblížení ekvátoru čočky ke sklěře. Tato teorie je v rozporu s teorií **Helmholtzovou**, která naopak předpokládá vzdálení ekvátoru čočky od skléry a spoléhá na pasivní uvolnění závěsného aparátu. V neposlední řadě můžeme zmínit teorii Tscherningovu, která se ztotožňuje s teorií Schacharovou s rozdílem předpokladu účasti sklivce na akomodaci. [7, 13, 25, 32]



Obrázek 6 - Princip teorie akomodace podle Schachara a Tscherninga (činnost zonulárních vláken při akomodaci).

### 2.2.1 Purkyňovy obrazy

V roce 1823 pozoroval Jan Evangelista Purkyně nejen dříve známou reflexi od rohovky, ale také reflexe od oční čočky. Purkyňovy obrazy (Obr. 7) **vznikají odrazem paprsků na povrchu struktur přední části oka** a podporují představu o změně zakřivení čočky v průběhu akomodace.



Obrázek 7 - Purkyňovy obrázky při pohledu do dálky (vlevo), při pohledu na blízko (vpravo)

- *Obrázek I.* – vzniká na přední ploše rohovky, je jasný a přímý
- *Obrázek II.* – vzniká odrazem na zadní stěně rohovky, je méně jasný, přímý a přibližně stejně velký jako obrázek I
- *Obrázek III.* – vzniká odrazem na přední konvexní ploše čočky, je méně jasný, přímý a zvětšený oproti obrázku I

- *Obrázek IV.* – vzniká na zadní konkávní ploše čočky, je jasný, převrácený a zmenšený

Tuto sérii obrázků pozorujeme při pohledu do dálky. Pokud vyšetřovaný přesune pohled na předmět umístěný blízko od oka, dojde ke změně obrazu III. – zmenší se a je jasnější. Tato skutečnost je přímým důkazem změny tvaru přední plochy čočky při akomodaci (čočka se vyklene dopředu). [7]

Při známém poloměru křivosti rohovky lze dle změny velikosti Purkyňových obrazů **vypočítat hodnotu poloměru zakřivení přední stěny čočky**. Při pohledu do dálky je tento poloměr roven 12,2 mm, za úplné akomodace u mladých lidí klesá na 6,8 mm. Z měření také vyplývá, že vyklenutí čočky se týká obzvláště její přední stěny. Zadní stěna se mění pouze neznatelně, což ukazuje, že je čočka při pohledu do dálky v předozadním průměru nejužší. [7, 33]

### 2.3 MECHANISMUS AKOMODACE

Na samotné akomodaci se podílí **stah ciliárního svalu, elasticita čočky a uvolnění závěsného aparátu čočky**. **Zesílení akomodace** nastane při zaměření oka na blízký objekt. V tom případě se cirkulární část ciliárního svalu vlivem působení parasymptiku stáhne a tím dojde k uvolnění závěsného aparátu čočky. Čočka vlivem své elasticity a působením tlaku sklivce získává sférický tvar. Zvýší se také její zakřivení (z 10 mm na 5,3 mm) a optická mohutnost. Vzdálenost mezi zadní plochou čočky a sítnicí se zmenší, přední plocha se přiblíží k rohovce. Dalším projevem akomodace je také to, že se **přední komora stane mělká**. Zároveň dochází k **mióze a konvergenci**. **Konvergence** umožní zachovat jednoduché binokulární vidění při sledování blízkých předmětů, stahem zornic se zvýší optická mohutnost. Změnou optické lomivosti čočky se mění i lomivost celého systému oka a na sítnici se vždy vytvoří ostrý obraz. Pokud oko **akomoduje na dálku**, je čočka tažena závěsným aparátem a ciliární sval je relaxován. V tomto případě pozorujeme maximální zploštění přední stěny čočky. Při **pohledu do dálky** dochází ke kontrakci *Brückeova svalu* inervovaného sympatikem. Stahem meridionálních vláken ciliárního svalu se čočková vlákna napínají, čočka se oplošťuje a snižuje se optická mohutnost oka. **Zornice se rozšíří** a zároveň dojde k **prohloubení přední oční komory**. [13, 34, 35, 36]



Rychlost akomodačního mechanismu je ovlivněna celkovým stavem organismu, únavou očí a také závisí na aktuálním stavu autonomního nervového systému. Na rozdíl od latence zornicového reflexu (0,1875 s) je **reakční čas akomodačního mechanismu delší (0,37 s)** a je uskutečněn během 0,5 – 1,5 s. [7, 11, 34]

**Fyzikální akomodace** představuje aktuální fyzikální deformace čočky měřitelná v dioptriích. **Fyziologická akomodace** udává kontrakční sílu ciliárního svalu nutnou pro změnu refrakčního stavu oka o 1 D. **Pseudoakomodace** je nezávislá na činnosti ciliárního svalu. Jedná se o statický stav, který napomáhá akomodaci nebo ji napodobuje. Dochází k ní například při zúžení zornic, kdy se zvětšuje hloubka ostrosti, podílí se na ní i mírný stupeň myopie. [36]

### **Akomodační triáda**

- *Akomodace* - dochází ke zvýšení optické mohutnosti celého optického systému, které umožňuje zaostření blízkých předmětů.
- *Konvergence* – je potřebná k dosažení jednoduchého binokulárního vidění. Aby došlo k projekci obrazu do místa nejostřejšího vidění na sítnici (žluté skvrny) dochází ke konvergenci očí při pohledu na blízký předmět.
- *Zúžení zornice* – má za následek také zúžení kužele paprsků vstupujících do oka, tím je využita nejkvalitnější část optického systému oka kolem optické osy.

Za akomodaci, konvergenci i miózu je zodpovědný třetí hlavový nerv (*n. oculomotorius*). [18, 29, 37]

#### **2.3.1 Složky akomodačního procesu**

- *Reflexní akomodace* – má za úkol zajistit zaostření obrazu na sítnici.
- *Vergenční akomodace* – je po reflexní akomodaci druhá nejdůležitější složka celého akomodačního procesu. Vyjadřujeme ji jako poměr vergenční akomodace CA (v dioptriích) a konvergence C (v prizmatických dioptriích nebo metrových úhlech), která ji vyvolala (CA/C). U mladých lidí je tento poměr asi 0,5 D na metrový úhel. Metrový úhel je takový úhel, který spolu svírají obě oči při pohledu na předmět vzdálený 1 m od oka. Kolik emetropické oko akomoduje dioptrií, tolik konverguje metrových úhlů.
- *Proximální akomodace* – vzniká na základě představy vzdálenosti předmětu.

- *Tónická akomodace* – k vyvolání nepotřebuje žádný stimul, je tedy přítomná bez jakéhokoliv podnětu. U mladých lidí je její hodnota okolo 1 D. [23]

### 2.3.2 Akomodační stimuly

Mezi akomodační stimuly řadíme **změnu pozorovací vzdálenosti, změnu konvergence a rozostřený obraz**. Akomodaci lze stimulovat pomocí **změny vzdálenosti** nebo **předřazením rozptylné čočky**.

Ani při pozorování blízkého předmětu není akomodace zcela ustálena, její výkyvy (fluktuační) jsou nejvyšší při pohledu do blízka. Snižují se při pozorování v oblastech bez akomodačních stimulů, při pohledu do dálky zcela zmizí. Akomodace se **mění v rozsahu 0,25 D s frekvencí 2 Hz**. Reakční doba akomodace je okolo **0,3 s**, akomodační systém vyžaduje minimálně 1 s na to, aby se dokázal přizpůsobit akomodačnímu požadavku (doba odezvy). **Akomodační odezvou** nazýváme výsledný skutečný akomodační stav oka, kterým oko reaguje na daný akomodační stimul. [36, 38]

### 2.3.3 Změna parametrů Gullstrandova oka při akomodaci

Nositel Nobelovy ceny za oftalmologii, Allvar Gullstrand představil začátkem 20. století **nejpodrobnější optický model průměrného lidského oka**. Tvoří ho **šest kulových lámavých ploch**, které obklopují optická prostředí shodná pro komorovou vodu a sklivce o indexu lomu 1,336. Čtyři čočkové plochy (jádro a kůra čočky) a dvě rohovkové (přední a zadní lomivá plocha). Za předmětové prostředí je uvažován vzduch, jehož index lomu je 1. Při maximální akomodaci dojde ke zvýšení optické mohutnosti čočky asi o + 14,0 D, mohutnost oka se zvýší asi o + 12,2 D a ohniskové vzdálenosti se zkrátí přibližně o 17 %. [33, 38]

## 2.4 ANATOMICKÉ ZMĚNY V PRŮBĚHU AKOMODACE

Při akomodaci dochází zprvu k **nervovému podráždění a kontrakci ciliárního svalu**, který se posouvá dovnitř a dopředu. Spolu s ciliárním svalem se posouvá i ciliární prstenec. Dále pozorujeme **protahování cévnatky a zadní části zonulárního závěsu**, přední zonulární závěs je uvolněn. Čočka a její pouzdro se díky své elasticitě zaoblí a zvýší tak svoji lomivost. Poté pozorujeme tyto změny:

- zvýšení centrální tloušťky čočky
- stah pupily
- lehký pokles čočky vlivem gravitace
- změna poloměru zakřivení centrální části přední plochy čočky
- zmenšení ekvatoriálního průměru
- pohyb cévnatky směrem dopředu

## 2.5 PARAMETRY AKOMODACE

Vzdálenost mezi tzv. **blízkým bodem** (*punctum proximum*) a **dalekým bodem** (*punctum remotum*) stanovuje míru akomodace, kterou je oko schopno uskutečnit.

Nejvzdálenější objekt, který je oko schopno v relaxovaném stavu vidět, leží v **dalekém bodě R**. U emetropického oka se tento bod nachází v nekonečnu. Hypermetrop má tento bod v konečné vzdálenosti za okem, myop v konečné vzdálenosti před okem. Při pohledu do blízka tak myop bez korekce akomoduje méně než emetrop. Opačně je tomu u hypermetropa, který vyvíjí vyšší akomodační úsilí. Vzdálenost dalekého bodu od oka označujeme  $a_R$  a měříme ji v metrech. Z její převrácené hodnoty (vergence) můžeme definovat **axiální refrakci  $A_R$** .

$$A_R = 1/a_R [D]$$

**Blízký bod P** je bod nejvíce blízko oka, kdy je ještě předmět vnímán ostře. Tento bod se zobrazí ostře na sítnici oka při maximální akomodaci, blízký bod leží ve vzdálenosti  $a_p$  od oka.

$$A_P = 1/a_P [D]$$

**Akomodační interval  $\Delta a$**  stanovuje rozmezí, ve kterém vidíme jednotlivé body ostře. Je definován jako rozdíl hodnot dalekého a blízkého bodu.

$$\Delta a = a_R - a_P \text{ [m]}, \quad \Delta a = 1/A_R - 1/A_P \text{ [mm]}$$

**Akomodační výkon  $\Delta A_v$**  - pokud známe pozici dalekého bodu, můžeme akomodační výkon na danou pracovní vzdálenost  $a_{prac}$  stanovit jako

$$\Delta A_v = A_R - 1/a_{prac}$$

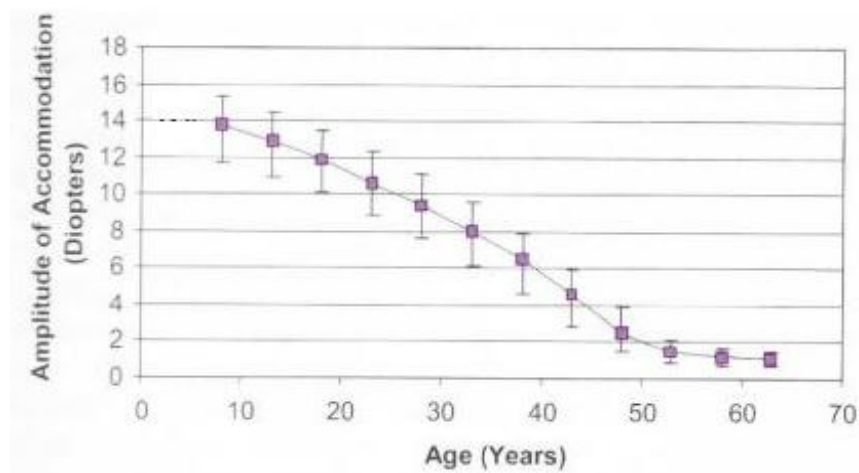
**Akomodační šíře  $Aš$**  (amplituda akomodace) udává rozdíl optických mohutností soustavy oka při minimální a maximální akomodaci.

$$Aš = A_R - A_P, \quad Aš = 1/a_R - 1/a_P \text{ [D]}$$

Pacienti se slabou hypermetropií či emetropií mají akomodační šíři velikou, naopak u silných hypermetropů a myopů je akomodační šíře krátká. [13, 25, 37 ]

## 2.6 ZMĚNY AKOMODACE S VĚKEM

V průběhu stárnutí dochází k **fyziologickému poklesu akomodace**, který je zapříčiněn několika faktory. Jedná se například o ztrátu elasticity kapsule, růst čočky s věkem a nižší stažlivosti ciliárního svalu. V předškolním věku dosahuje akomodační šíře hodnot okolo 14 D (blízký bod ve vzdálenosti 7 cm před okem). V průběhu stárnutí plynule klesá a ve věku 45 let dosahuje 4 D (blízký bod 25 cm), v 60 letech je její hodnota pouze 1 D (blízký bod 1 m). Graf na obrázku číslo 8 ukazuje, že akomodační šíře klesá lineárně. Její pokles je průměrně o 0,25 D ročně od 20 let věku. [13, 37, 38]



Obrázek 8 - Závislost amplitudy akomodace na věku

## 3 NITROOČNÍ TLAK

NOT je charakterizován jako stav rovnováhy mezi rychlostí tvorby nitrooční tekutiny (NT) ciliárním tělesem a rychlostí jejího odtoku z oka trámčinou a uveosklerální cestou. NOT je na rozdíl od atmosférického tlaku lehce vyšší, díky této skutečnosti si oko zachovává svůj tvar při všech pohybech. Za normální je považována hodnota okolo **20 mmHg**. V průběhu dne NOT **kolísá o 2,93 – 4,95 mmHg**. Nejvyšších hodnot nabývá NOT po probuzení. Jeho hladina je udržována homeostatickými mechanismy, které nejsou doposud zcela objasněné. Dojde-li ke zvýšení produkce nebo ke vzrůstu odporu průtoku filtrační tkáně komorového úhlu, NOT se zvýší. [7, 12]

### 3.1 ANATOMIE VYBRANÝCH OČNÍCH STRUKTUR

Tato kapitola se bude zabývat anatomickými strukturami oka, které mají vliv na NOT a NT.

#### 3.1.1 Přední a zadní oční komora (*camera oculi anterior, posterior*)

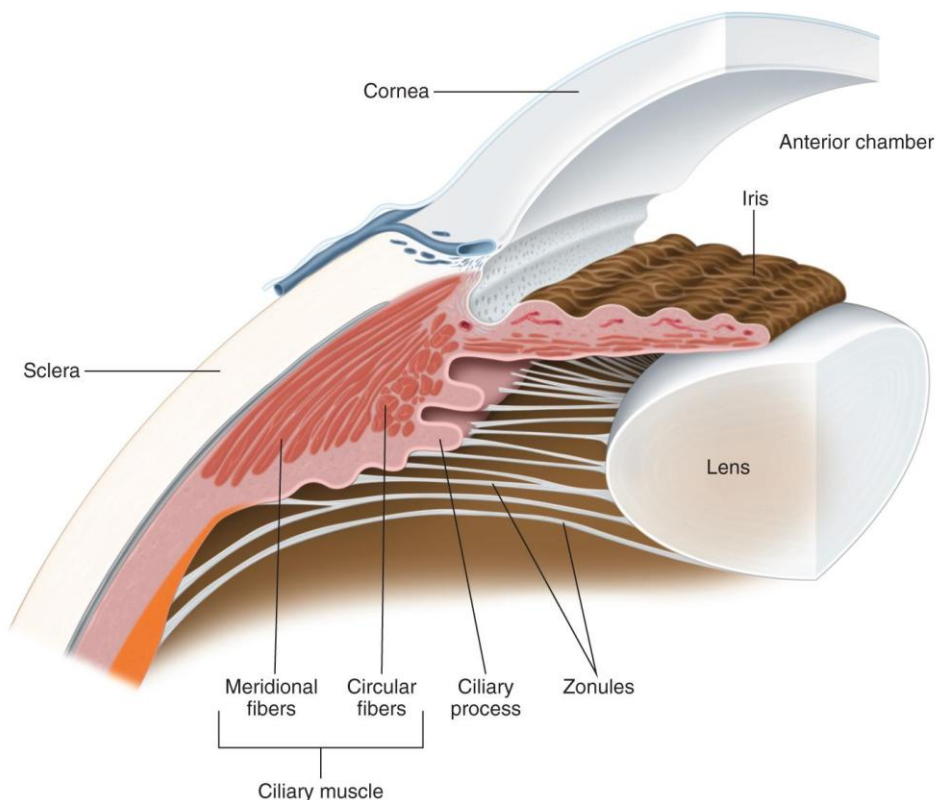
**Přední komora** je vymezena tkáněmi duhovkorohovkového úhlu, přední plochou duhovky, zadní plochou rohovky a přední plochou čočky v oblasti zornice. Hloubku přední komory ovlivňuje poloha čočky a věk jedince, nejhlubší bývá v 15 – 20 letech věku. Komora myopického oka je hlubší, naopak je tomu u hypermetropů, kteří mají přední komoru mělkou. Její hloubka se u normálně vidoucího oka pohybuje mezi **3 – 3,7 mm**. Obsah NT v přední komoře je okolo **0,26 cm<sup>3</sup>**.

**Zadní oční komora** představuje úzkou štěrbinu s největší **hloubkou 0,5 mm**. Je ohraničena zadní plochou duhovky, závěsným aparátem a přední vnitřní plochou řasnatého tělesa. Přední i zadní oční komora jsou propojeny kapilární štěrbinou mezi čočkou a duhovkou. [2, 13]

#### 3.1.2 Řasnaté těleso (*corpus ciliare*)

Řasnaté těleso (*Obr. 9*) tvoří **přední část živnatky**, která se rozšiřuje a vytváří trojúhelníkovitý tvar. Nachází se mezi kořenem duhovky a *ora serrata* – oblast, kde přechází světločivá část sítnice (*pars optica retinae*) a část sítnice zastírající řasnaté těleso (*pars ciliaris retinae*), která neobsahuje světločivé buňky. Jeho přední

část přechází do duhovky (*pars plicata*). Zadní část (*pars plana*) je tenčí a hladší, spojuje se s cévnatkou. V přední části tělesa se zdvihá **70 – 80 paprscitě uspořádaných výběžků** (*processus ciliares*). Z rýh a boků na jejich hrbolatém povrchu vystupují závěsná vlákna čočky (*fibrae zonulares*). Menší řasy, které jsou mezi *processus ciliares* se označují jako *plicae ciliares*. Společně si tento soubor výběžků lze představit jako dětskou kresbu slunce s paprsky. [2, 13, 18]



Obrázek 9 - Řasnaté těleso

Hladký povrch řasnatého tělesa (*orbiculus ciliaris*) je zezadu pokryt sítnicí, která na řasnatém tělese (*pars ciliaris retinae*) a duhovce (*pars iridica retinae*) nemá světločivé elementy, jedná se o vrstvu sítnicového pigmentového epitelu. *Pars ciliaris retinae* je důležitá pro svou funkci **sekrece NT**. Obsah NT přední a zadní oční komory je 0,2 – 0,3 ml. NT je stále obměňována díky produkci řasnatého tělesa, které dokáže vyprodukovat až desetinásobek jejího množství. [13, 18, 37]

Inervace funguje za pomoci **parasymptických vláken** z *n. oculomotorius*. V *ganglion ciliare* se tato vlákna přepojí na postgangliový neuron a vyvolají kontrakci řasnatého tělesa, tedy akomodaci na blízko. **Sympatická vlákna** způsobují neschopnost

zaostřit na blízko, ochabují *m. ciliaris*. Tento stav nemůže nastat při akomodaci na dálku, protože čočka není udržována za pomoci svalů ale pružností cévnatky.

Uvnitř řasnatého tělesa se nachází svazky hladké svaloviny (*m. ciliaris*), jejíž vlákna lze rozdělit do tří hlavních směrů:

- **Fibrae meridionales** (*m. Brücke*) – při jejich kontrakci dochází k uvolnění napětí zadních zonulárních vláken, řasnaté těleso je taženo dopředu.
- **Fibrae circulares** (*m. Müller*) – jeho stahem jsou uvolněny přední zonulární vlákna.
- **Fibrae radiales** – tvoří nejmenší část. [2, 3, 13]

### 3.1.3 Komorový úhel (*angulus iridocornealis*)

Komorový úhel je vystlán endotelem a ohraničen přední plochou duhovky, řasnatým tělesem a sklérou. Řasnaté těleso a duhovka vysílají do úhlu pouze úzký proužek, šlašinky ciliárního svalu se do skléry upínají v místě zvaném sklerální ostruha. Prohlubeň nacházející se před sklerální ostruhou je vyplněna řídkou tkání a dotváří zadní plochu úhlu. Nejdůležitější funkcí komorového úhlu je **odtok komorové vody přes trabekulum**. Histologicky v komorovém úhlu rozeznáváme:

- *Trabeculum uveale* – leží mezi rohovkovým endotelem a kořenem duhovky, zaniká v řasnatém tělesu.
- *Trabeculum corneosclerale* – probíhá z konce Descemetovy membrány (*Schwalbeho prstenec*) až ke sklerální ostruze. Je hlavní tkání v úhlu, který překlenuje a vytváří elastickou mříž s oválnými póry.
- *Trabeculum juxta-canalicular* – obepíná Schlemmův kanál a vytváří značný odpor odtoku NT. [2, 3, 13, 18]

### 3.1.4 Schlemmův kanál (*canalis Schlemmi*)

Představuje **hlavní odtokový systém komorové vody**. Jeho stavba připomíná více lymfatickou cévu než věnu či kapiláru. V jeho zadní části jsou *Sondermanovy kanály*, které zvětšují filtrační plochu v oblasti největšího průměru kapiláry. Vnitřní endotelové buňky obsahují vakuoly různých velikostí. Jejich velikost je ovlivňována NOT v přední komoře. Čím je NOT vyšší, tím je jejich velikost větší a naopak. Vytváří se transcelulární mikrokanál, kterým NT prochází do Schlemmova kanálu. Funkci vnitřní stěny můžeme přirovnat k jednosměrné chlopni, která zabraňuje refluxu krve a proteinů z kanálu do trámčiny a přední komory. K zajištění nasávání do trámčiny a jednosměrného proudu NT Schlemmovým kanálem, musí být v přední komoře vyšší tlak, než ve Schlemmově kanále. Z vnější stěny Schlemmova kanálu vychází 25 - 30 kolektorů, které jsou spojeny s vaskulárním systémem v oblasti limbu. Diferencujeme dva typy kolektorů:

- Tunely přímo běžící do episklerálního venózního plexu v počtu 1 – 6, bez funkčních spojení s episklerálními vodními cévami (*venae aquosae*).
- Nepřímé kolektory, početnější a menší, spojující se s intersklerální kapilární sítí v blízkosti kanálu. [3, 13, 37]

Trámce se s přibývajícím věkem ztlušťují a utváří se extracelulární materiál ve formě shluků, pruhů a plaků. Rozlišujeme několik typů plaků, pro glaukom je však nejvýznamnější typ II, vyskytující se u vláken elastického vzhledu. Jedná se o výběžky či ztluštění opouzdření elastoidních vláken, která po ztrátě kontaktu s nimi vytvářejí pláty v kribriformní trámčině (SD plaky). Při normotenzním glaukomu jsou tyto plaky v blízkosti endotelu Schlemmova kanálu a v kribriformní trámčině. [13, 18]

Schlemmův kanál ústí do intrasklerálního cévního plexu uloženého ve sklěře. Z intrasklerálního plexu vychází spojky směrem k předním ciliárním vénám a do episklerálního prostoru. Ve větších odvodných cévách je obsažena čirá NT ústící přímo do ciliárních vén. Při zhoršení průtoku komorové vody těmito odtokovými cestami, které jsou také nazývány jako **Ascherovy vodní vény**, dochází ke **zvýšení NOT**. [3, 13, 18]



### 3.2 NITROOČNÍ TEKUTINA

Bezbarvá tekutina o **indexu lomu 1,336**, která se tvoří z krve v řasnatém tělese a vzniká procesem **difuze, ultrafiltrace a aktivní sekrece**. Na rozdíl od krevní plazmy obsahuje malý obsah bílkovin, je hypertonická s vysokou koncentrací kyseliny askorbové. Její produkce probíhá **neustále s rychlostí 2,2 mm<sup>3</sup>/min**. Představuje **hlavní zdroj výživy čočky** a podílí se na výživě rohovky. Z tohoto důvodu obsahuje kromě **98,8 % vody** také proteiny, ionty, aminokyseliny, pyruvát, kyselinu askorbovou, laktát a v menší koncentraci glukózu. **Kyselina askorbová** je v důsledku aktivního transportu zastoupena ve vyšší koncentraci a to z důvodu ochrany tkání před volnými radikály, které vznikají například při zánětech nebo působením UV záření. Hlavní odlišností komorové vody od plazmy je obsah bílkovin, 100 ml plazmy obsahuje 6 – 7 g bílkovin, zatímco 100 ml komorové vody pouze 5 – 15 mg. V porovnání s plazmou je koncentrace bílkovin v NT pouze 1 %. Díky vyššímu podílu chloridů a nízkému obsahu bikarbonátů je NT oproti plazmě kyselejší. Její hodnota **pH je 7,21**, zatímco pH plazmy činí 7,40. Tabulka na obrázku číslo 10 poskytuje detailnější přehled o podílu jednotlivých látek NT v porovnání s plazmou. [3, 13]

|            | NT v přední komoře | Plazma (μmol/ml) |
|------------|--------------------|------------------|
| sodík      | 152                | 148              |
| chloridy   | 131                | 107              |
| bikarbonát | 22                 | 26               |
| draslík    | 3,9                | 4                |
| vápník     | 2,5                | 4,9              |
| hořčík     | 1,2                | 1,2              |
| fosfáty    | 0,6                | 1,1              |
| urea       | 6,1                | 7,3              |
| glukóza    | 2,8                | 5,9              |
| laktát     | 4,5                | 1,9              |
| askorbát   | 1,06               | 0,04             |

Obrázek 10 - Složení NT a plazmy

### 3.2.1 Funkce nitrooční tekutiny

NT je důležitá pro zachování odpovídajícího NOT, který **udržuje strukturální integritu a optické parametry oka**. Dále se podílí na **metabolických funkcích** avaskulární tkáně předního segmentu oka (čočka, rohovka, trávčina) zásobováním glukózou, kyslíkem a aminokyselinami. V neposlední řadě se také účastní odstraňování odpadních produktů metabolismu, jako je například oxid uhličitý, laktát aj. Obsahuje protilátky a má tak významný **vliv při imunitní odpovědi na záněty a infekce**. Zajišťuje také to, aby se v ní rozpuštěná farmaka dostala do cílových očních struktur. [3, 39]

### 3.3 PRODUKCE NITROOČNÍ TEKUTINY

NT je produkována neustále, zhruba za 10 hodin dojde k obnovení veškerého obsahu nitroočních komor (1,23 – 1,32 cm<sup>3</sup>). Na tok NT u lidí má vliv tzv. **cirkadiánní rytmus**, který je ráno vyšší než v noci. NT proudí ze zadní komory z prostor výběžků ciliárního tělesa přes zornici do přední komory, kde cirkuluje. Cirkulaci podmiňuje tepelný rozdíl mezi studenou rohovkou a teplou duhovkou. NT přechází z teplejšího do chladnějšího prostředí, cirkuluje kolem vnější strany duhovky směrem nahoru a zároveň pod ní proudí chladnější tekutina. Po jejím postupném ochlazení proudí kolem rohovky směrem dolů. [3, 13, 50]

Při tvorbě NT jsou zapojeny tři mechanismy: **difúze, ultrafiltrace a aktivní sekrece**. První fází procesu tvorby NT je **pasivní ultrafiltrace plazmy** z kapilár do řasnatého tělesa. Druhou fází je **aktivní sekrece ciliárním epitelem** do zadní komory. Aktivní sekrece je zodpovědná za přibližně 80 - 90 % celkové tvorby NT [51]. Ciliární epitel je složen z vnější pigmentové a vnitřní nepigmentové buněčné vrstvy. Aktivní transport do zadní komory oka je zajištěn za pomoci buněk nepigmentované vrstvy výběžků ciliárního tělesa. Tyto buňky tvoří adenosintrifosfatázu, která řídí aktivní transport do zadní komory proti osmotickému gradientu. Podmínkou pro správnou funkci aktivního transportu je udržení iontového prostředí. To je zajištěno karboanhydrázou, kterou obsahují nepigmentované buňky řasnatého tělesa. Přestupu velkých a středně velkých molekul z krve do NT je zamezeno díky těsnému spojení buněk nepigmentovaného epitelu řasnatého tělesa. NT se svým složením začne více

podobat plazmě, pokud dojde k porušení této bariery. K tomuto jevu dochází nejčastěji při očních zánětech. [13, 18, 50]

### 3.3.1 Dynamika nitrooční tekutiny

Sekrece komorového moku a regulace jeho odtoku jsou fyziologicky důležité procesy pro normální funkci oka. Dynamika NT se **mění v průběhu dne**, nejrychlejší tok bývá v ranních hodinách ( $2,91 \pm 0,71 \mu\text{l}/\text{min}$ ), klesá mezi 12. až 16. hodinou ( $2,66 \pm 0,58 \mu\text{l}/\text{min}$ ). Vůbec **nejpomalejší je dynamika ve spánku** ( $1,23 \pm 0,41 \mu\text{l}/\text{min}$ ). Rychlost toku je podobná u žen i mužů, avšak každou dekádou života dochází k jejímu zpomalení o 3,2 %. [39, 50, 52]

## 3.4 ODTOK NITROOČNÍ TEKUTINY

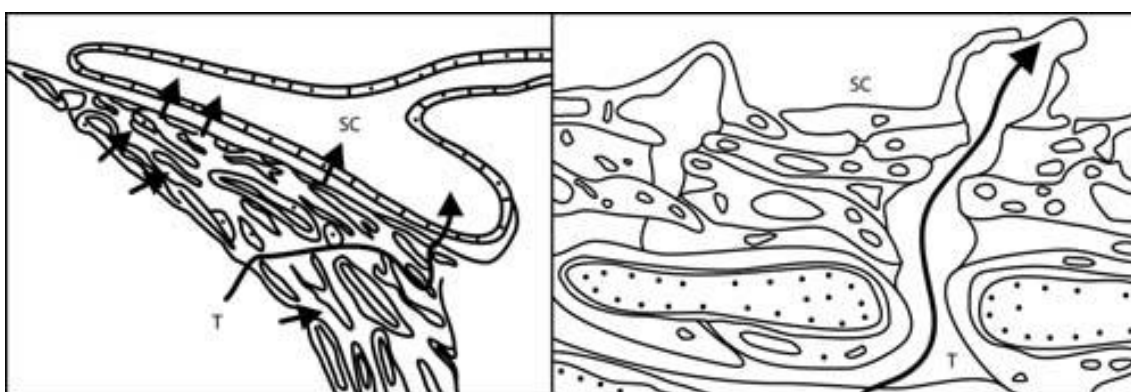
Odtok NT je zajištěn dvěma způsoby, primárně trámčinou komorového úhlu tzv. **konvenční cestou odtoku**. Menší část odtéká řasnatým tělesem a duhovkou tzv. **nekonvenční (uveosklerální) cesta odtoku**. Nejmenší množství NT se odpaří rohovkou. K překonání odporu odtokových cest je nutná produkce odpovídajícího množství NT. U glaukomu je vlivem porušené funkce trámčiny zhoršený odtok NT, to má za následek zvýšení NOT. [2, 3, 13]

Bylo zjištěno, že na **odtok NT má vliv duhovka a ciliární sval**. Během kontrakce se totiž ciliární sval pohybuje dopředu a dovnitř, což má za následek zvětšení průměru trámčiny na sagitálním řezu a dilataci Schlemmova kanálu. Zároveň dojde k odtažení sklerální ostruhy směrem dozadu, čímž se rozšíří prostor mezi lamelami v trámčině. Tento proces má za následek značné **zvýšení snadnosti odtoku**. Během relaxace ciliárního svalu dochází k opaku, čímž se snižuje snadnost odtoku. [53]

### 3.4.1 Konvenční cesta odtoku

NT proudí zornicí do přední komory a odtéká primárně trámčinou úhlu přední komory. Konvenční cestou (*Obr. 11*) tedy odtéká až 90 % NT. **Trámčina** je umístěna v apexu úhlu přední komory, ohraničuje jí duhovka, kořen duhovky a periferní rohovka. Má několik vrstev, jednou z nich je **trámčina kribriformní**, je složená ze sítě jemných fibril a elastoidních vláken. **Korneosklerální trámčina** vystupuje ze sklerální ostruhy směrem k rohovce. K ciliárnímu tělesu a kořeni duhovky pokračuje **trámčina uveální**.

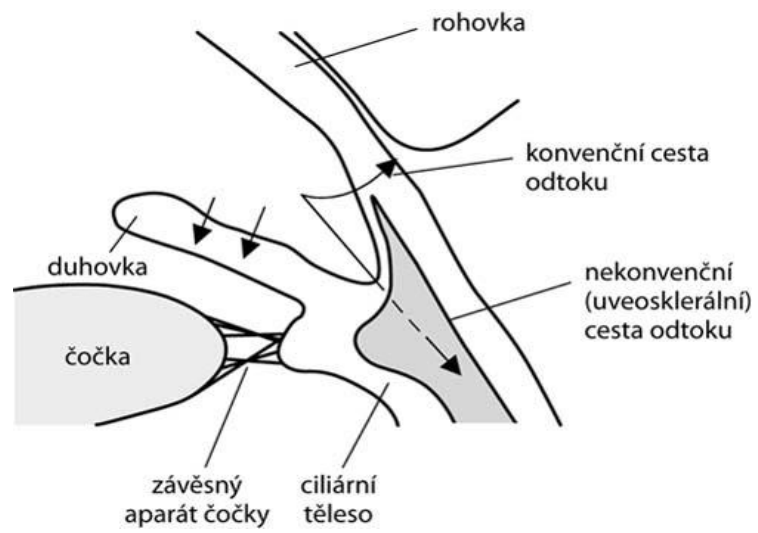
Trabekulární buňky mají schopnost fagocytózy, odstraňují například molekuly bílkovin, čímž čistí NT. Je složena z lamelárně uspořádaných vrstev pojivové tkáně s póry o průměrech 12 – 20  $\mu\text{m}$ , kterými protéká NT. U trámčiny rozlišujeme dvě oblasti – nefiltrující část trámčiny, tedy přední oblast, která není ve styku se Schlemmovým kanálem a oblast filtrující. NT přestupuje buňkami endotelu za pomoci systému transcelulárních mikrotubulů do Schlemmova kanálu. Tekutina dále pokračuje systémem kolektorů a vodních vén do episklerálních vén a zpátky do celkového krevního oběhu. Konvenční odtok NT je závislý na velikosti NOT. [3, 13, 48, 49]



Obrázek 11 - Odtok nitrooční tekutiny trámčinou: T – trámčina, SC – Schlemmův kanál (vpravo detail)

### 3.4.2 Nekonvenční cesta (uveosklerální cesta)

NT prostupuje **mezi svazky ciliárního svalu do suprachoroideálního prostoru**. Za tuto cestu přibírá tkáňový mok z ciliárního tělesa a choroidey. Uveosklerální způsob odtoku (*Obr. 12*) je důležitý především pro odstraňování potencionálních toxických tkáňových metabolitů. Na rozdíl od odtoku NT konvenční cestou, trámčinou do Schlemmova kanálu není tento odtok závislý na NOT. Podíl uveosklerálního odtoku je u živočišných druhů rozdílný (u opic 30 - 65 %, u člověka 10 - 30 %, u kočky 3 %). Ciliární sval je nejspíše limitujícím činitelem v nekonvenční cestě odtoku. Ke zvýšení této složky odtoku dochází například při iridocyklitidě, kdy je rozšířen intermuskulární prostor. [3, 13, 48, 49]



*Obrázek 12 - Odtok nitrooční tekutiny uveosklerální cestou – duhovkou a ciliárním tělesem.*

## II EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### Vliv akomodace a velikosti zornice na hodnotu nitroočního tlaku

Cílem experimentální části mé diplomové práce je zjistit, zda akomodace a velikost zornice ovlivňuje hodnotu NOT. Hodnoty NOT a velikosti zornice byly sledovány s určitými časovými rozestupy. Studie byla rozdělena do dvou částí. V první části byly sledovány změny NOT v čase navozené akomodací, druhá část se zabývala změnami NOT ve tmě. Jelikož velikost NOT může být ovlivněna velikostí zornice, byl v obou částech sledován i tento parametr.

### Metodika a soubor

Výzkum probíhal v laboratoři optometrie na Katedře optiky Univerzity Palackého v Olomouci. Celkem se studie zúčastnilo 25 zdravých probandů, ve věkovém rozmezí 19 až 25 let (průměrný věk  $23 \pm 2$  roky), z toho pouze 3 muži. Testování jedinci museli pro účast na experimentu splnit některé podmínky. Museli být bez očních abnormalit (např. porucha zornicových reakcí, anizokorie, glaukom). Dále se probandi neměli léčit se žádným systémovým onemocněním a museli být bez jakékoliv medikamentózní léčby. Pokud byl proband nositelem kontaktních čoček, byl požádán, aby minimálně 2 dny před experimentem kontaktní čočky vysadil a použil brýlovou korekci. Každý proband se výzkumu účastnil po dobu 90 - 100 minut (z toho 30 minut pauza). V první fázi probíhalo měření za normálního osvětlení, poté následovala 30 minutová pauza a následné měření hodnot za tmy.

V den měření byla probandům zakázána konzumace kávy, energetických nápojů, černého či zeleného čaje a dalších prostředků, které by mohly ovlivnit výsledky experimentu. Dále bylo také vhodné, aby se probandi v tento den nevystavovali nadměrné fyzické zátěži. Každý proband byl řádně seznámen s průběhem a riziky studie a dobrovolně podepsal informovaný souhlas. Měření prováděl vždy stejný experimentátor. Všechna měření byla nejdříve provedena na obou očích, pomocí autorefraktokeratotonometru s pachymetrem TONOREF III značky Nidek. Měření NOT proběhlo automaticky na základě krátkého sledování reakcí rohovky na krátký vzduchový impuls. Z důvodu možné korelace výsledků však byly nakonec použity pouze hodnoty z pravého oka. Velikost zornice byla měřena pomocí manuálně

nastavených měřicích značek na displeji se zobrazenou zornicí probanda snímanou v infračervené oblasti.

### **Vlastní měření**

Po příchodu do laboratoře následovala úvodní klidová fáze, kdy proband seděl v klidu 5 minut, a to z důvodu minimalizace případného vlivu předchozí pohybové aktivity na NOT. Po této klidové fázi byly změřeny výchozí (referenční) hodnoty sledovaných parametrů tj. NOT a velikost zornice. Následovala první fáze experimentu, kdy proband dostal zkušební obrubu s binokulárně předloženými čočkami o velikosti -2 D, aby došlo k stimulaci (navození) akomodace. Ihned po nasazení zkušební obruby byl znovu změřen NOT a velikost zornice. Mimo okamžiky měření sledoval proband s předloženými čočkami znaky na optotypu, které byly umístěny 7 m od místa, kde byl posazen. Měření se vždy opakovalo v 5 minutových intervalech, poslední měření první části experimentu probíhalo po 15 minutách od navození akomodace. Poté měl proband povinnou minimálně 30 minutovou pauzu, aby došlo k ustálení akomodace a nebyla tak ovlivněna další část experimentu. V této pauze byl požádán, aby se vyvaroval všeho, co by mohlo dále ovlivnit měření.

Po této pauze následovala druhá fáze experimentu. V laboratoři byly staženy všechny rolety tak, aby bylo zamezeno průchodu světla a navozena naprostá tma. Proband měl navíc nasazené speciální světlotěsné brýle s odklopitelnou clonou. Před měřením byl poučen, aby měl po celou dobu experimentu otevřené oči. Těsně před samotným měřením proband opřel hlavu o opěrku přístroje, přičemž měřicí část přístroje a proband byli přikryti dekou. Následně byla odklopena clona na brýlích. Na přístroji byla vypnuta světelná signalizace tak, aby nedošlo k žádnému ovlivnění měření. Měření NOT a velikosti zornice probíhalo ihned po zhasnutí světel, poté se znovu měřilo v 5 minutových intervalech. Poslední měření probíhalo za 20 minut od zatmění.

### **Statistická analýza**

Naměřená data byla charakterizována pomocí průměrných hodnot a směrodatných odchylek za pomoci softwaru MS Excel. Pro srovnání jednotlivých měřených hodnot NOT a průměru zornice v čase byla v jednotlivých fázích experimentu použita metoda ANOVA pro opakovaná měření. V případě NOT byl

sledován též vliv jeho výchozí hodnoty. Pro zjištění signifikantních rozdílů mezi jednotlivými měřeními byl použit post-hoc Tukeyův HSD test. Vliv počátečního tlaku na změny NOT oproti výchozí hodnotě byl dále sledován pomocí Pearsonova korelačního koeficientu  $r$ . V případě, že v průběhu experimentu docházelo k významným změnám velikosti zornice, byl sledován vliv těchto změn (měřených od výchozí hodnoty) na změny NOT (uvažovaných oproti výchozí hodnotě). Všechny statistické analýzy proběhly na hranici významnosti 0,05. Pro lepší přehlednost jsou v textu uvedeny mezní hodnoty hladiny významnosti  $p$ , při kterých by právě došlo k zamítnutí rovnosti dat. Statistická analýza byla provedena za pomoci programu STATISTICA 13 (ANOVA) a MS Excel (výpočet korelačního koeficientu).

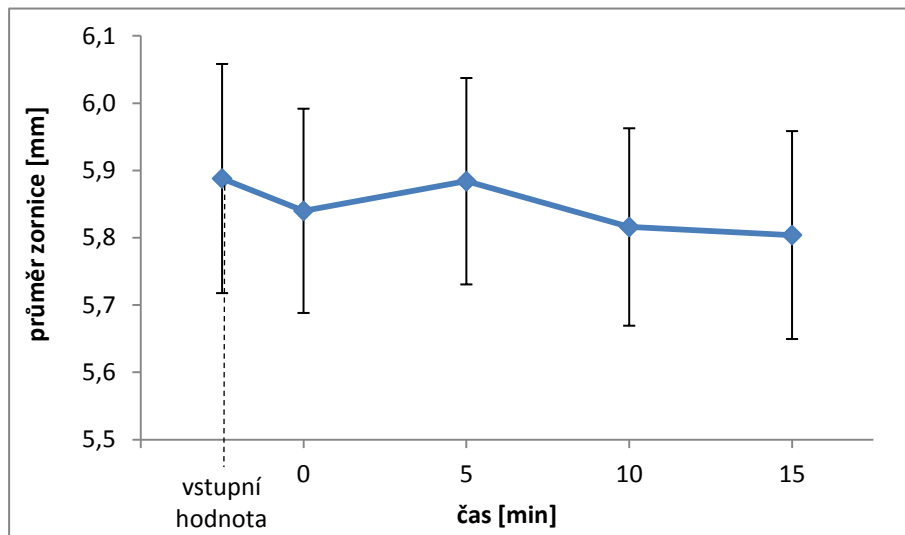


## Výsledky měření

Počáteční hodnota velikosti zornice probandů byla průměrně 5,89 mm  $\pm$  0,68 mm. A průměrný počáteční NOT činil 14,11 mmHg  $\pm$  2,99 mmHg. Výsledky měření budou pro lepší přehlednost rozděleny do dvou kapitol.

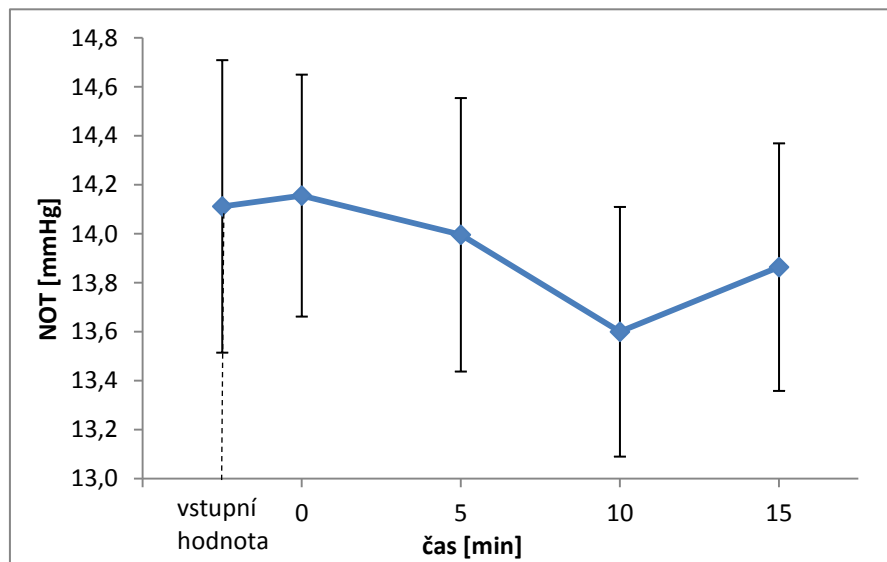
### Akomodace

Závislost velikosti zornice a NOT na čase v průběhu experimentu po navození akomodace ukazují grafy číslo 1 a 2. Z grafu číslo 1 je zřejmé, že se zornice v průběhu měření měnila pouze minimálně. V souladu s grafem ani statistická analýza (jednofaktorová ANOVA pro opakovaná měření, faktor čas) neprokázala významné změny velikosti zornice na čase ( $p = 0,27$ ).



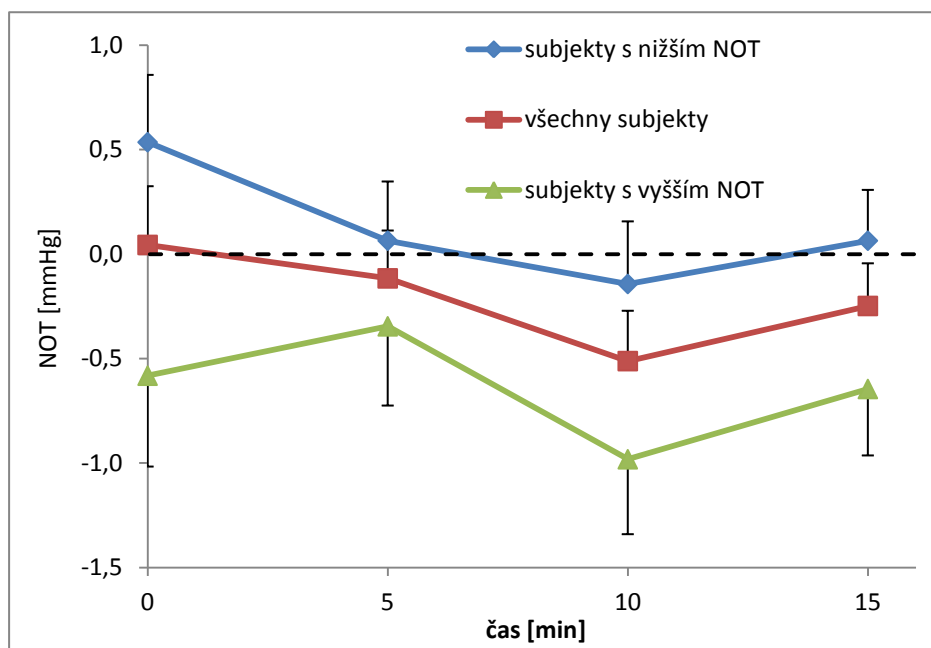
*Graf 1 - Závislost velikosti zornice na čase v průběhu experimentu po navození akomodace; symboly představují průměrné hodnoty, velikost svislých úseček reprezentuje dvojnásobek směrodatné odchylky dat*

Z grafu číslo 2 je vidět, že **NOT po navození akomodace postupně klesal**, minimální hodnoty dosáhl v 10. minutě (s průměrným rozdílem 0,5 mmHg oproti výchozí hodnotě a směrodatnou odchylkou 1,2 mmHg) a následně se vracel na původní hodnotu. Statistická analýza metodou dvoufaktorová ANOVA pro opakovaná měření (faktor čas a počáteční hodnota tlaku) prokázala, že změny NOT s časem byly statisticky významné ( $p = 0,042$ ). Dále zjistila významný vliv jeho výchozí hodnoty ( $p < 0,0001$ ). Interakce výchozí hodnoty tlaku s časem ( $p = 0,073$ ) byla nevýznamná. Post-hoc Tukeyův HSD test sice neprokázal signifikantní rozdíly tlaku mezi jednotlivými časy, nicméně v 10. minutě vykazuje srovnání s výchozím tlakem hodnotu těsně na hranici signifikance ( $p = 0,054$ ;  $p > 0,09$  pro ostatní srovnání).



*Graf 2 - Závislost NOT na čase v průběhu experimentu po navození akomodace; symboly představují průměrné hodnoty, velikost svislých úseček reprezentuje dvojnásobek směrodatné odchylky dat*

Změny NOT od výchozí hodnoty jsou zachyceny v grafu číslo 3, kde lze navíc vidět rozdíly mezi skupinou s vyšším a nižším NOT. **U skupiny s vyšším NOT bylo dosaženo většího poklesu než u skupiny s nižším tlakem.** Závislost změny NOT na výchozí hodnotě byla ověřena korelační analýzou, přičemž se zjistila významná korelace se změnami v 10. minutě a s průměrnou změnou v celém monitorovaném období po navození akomodace ( $r = -0,538$  a  $r = -0,576$ ).

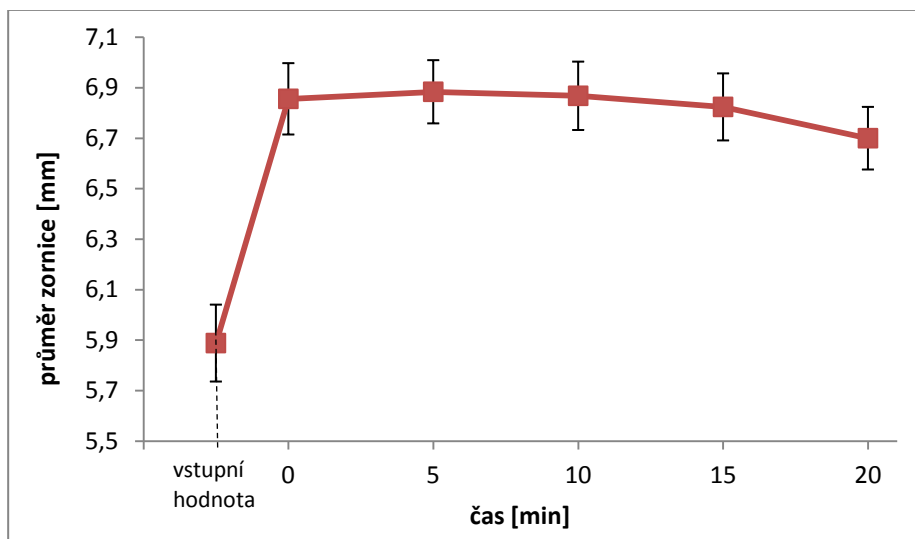


*Graf 3 - Změna NOT oproti výchozí hodnotě po navození akomodace (kladné údaje reprezentují nárůst); symboly představují průměrné hodnoty, velikost svislých úseček reprezentuje směrodatnou odchylku dat*

## Tma

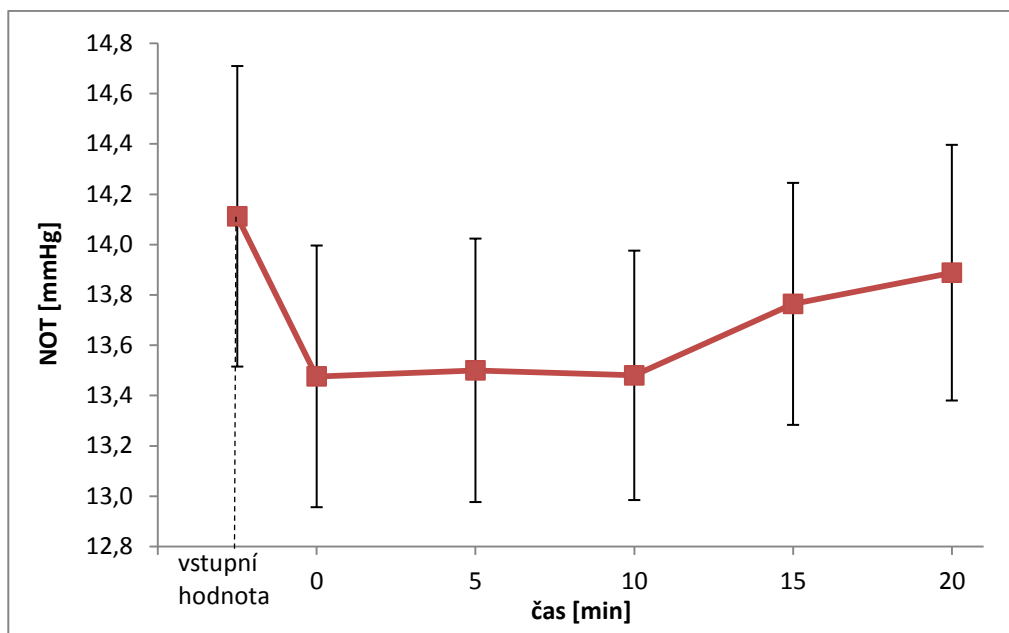
Závislost velikosti zornice a NOT na čase v průběhu experimentu při pobytu ve tmě ukazují grafy číslo 4 a 5. Průběh změn NOT pro skupinu osob s jeho nízkou a vysokou počáteční hodnotou je vyobrazen na grafu číslo 6.

Z grafu číslo 4 je patrné, že se **průměr zornice okamžitě po eliminaci světla zvětšil** (v průměru o 1,0 mm se směrodatnou odchylkou 0,5 mm) a dále setrval přibližně na této hodnotě. Jednofaktorová ANOVA pro opakovaná měření (faktor čas) prokázala významnost těchto změn ( $p < 0,0001$ ).



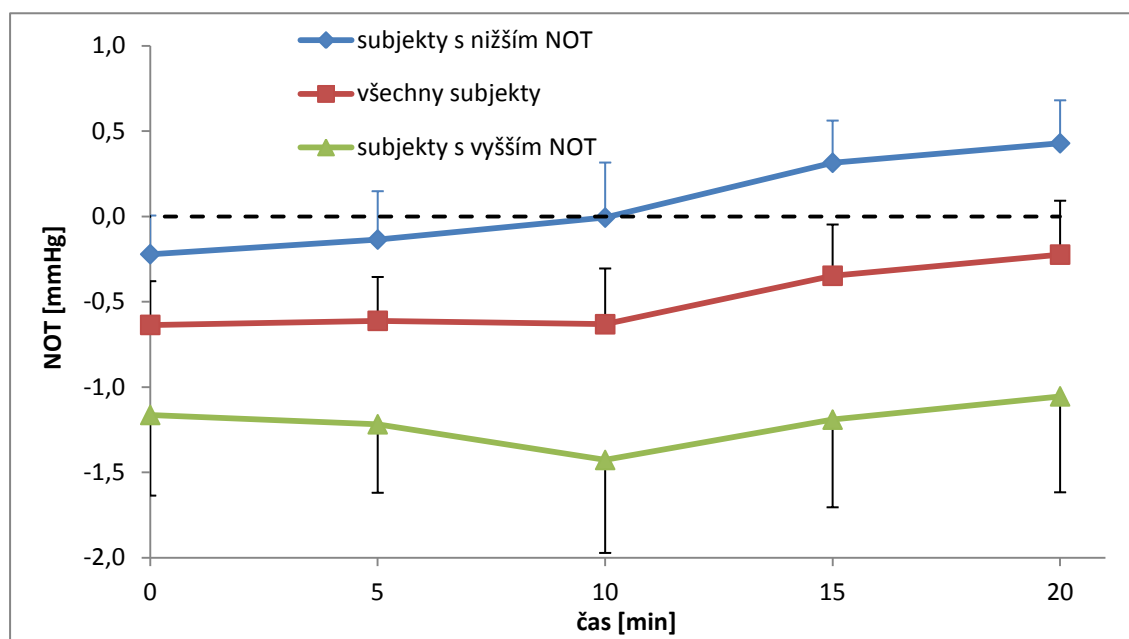
*Graf 4 - Závislost velikosti zornice na čase v průběhu experimentu při pobytu ve tmě; symboly představují průměrné hodnoty, velikost svislých úseček reprezentuje dvojnásobek směrodatné odchylky dat*

Graf číslo 5 ukazuje na **okamžitý pokles NOT ihned po eliminaci světla** o hodnotu 0,6 mmHg se směrodatnou odchylkou 1,3 mmHg, po 10. minutě začal postupně růst a 20 minut po pobytu ve tmě dosáhl výchozí hodnoty. Změny tlaku v čase prokázala též dvoufaktorová ANOVA pro opakovaná měření (faktory čas a výchozí hodnota tlaku;  $p = 0,013$ ). Dále byl významný vliv výchozího tlaku ( $p < 0,0001$ ) a jeho interakce s časem ( $p = 0,012$ ). Post-hoc Tukeyův HSD test těsně po útlumu osvětlení a v 10. minutě experimentu vykázal ve srovnání s výchozím tlakem hodnoty blízké hranici signifikance ( $p = 0,067$  a  $p = 0,070$ ;  $p > 0,087$  pro ostatní srovnání).



*Graf 5 – Závislost NOT na čase v průběhu experimentu při pobytu ve tmě; symboly představují průměrné hodnoty, velikost svislých úseček reprezentuje dvojnásobek směrodatné odchylky dat*

Z průběhu rozdílů tlaku oproti počáteční hodnotě (viz graf č. 6) vyplývá, že osoby s vyšším NOT dosáhly vyššího poklesu, který jevil jen malou tendenci k návratu ve sledované periodě. U subjektů s nižším NOT byla změna výrazně menší. Vliv výchozí hodnoty na průběh změn tlaku potvrdila též korelační analýza, která zjistila, že všechny změny tlaku ve tmě oproti výchozí hodnotě jsou s výchozí hodnotou významně korelovány ( $-0,602 < r < -0,484$ ) včetně průměrné změny za celou dobu pobytu ve tmě ( $r = -0,595$ ). Korelace potvrzuje negativní korelaci změn s výchozí hodnotou tlaku (vyšší hodnoty vedou k menšímu nárůstu, resp. k většímu poklesu).



Graf 6 - Změna NOT oproti výchozí hodnotě po eliminaci světla (kladné údaje reprezentují nárůst); symboly představují průměrné hodnoty, velikost svislých úseček reprezentuje směrodatnou odchylku dat

Ačkoliv se zornice v průběhu experimentu významně měnila, její změny oproti výchozí hodnotě nebyly nijak signifikantně korelovány se změnami NOT od výchozí hodnoty ( $0,170 < r < 0,334$ ).

## Diskuse

Výsledky z experimentální části ukazují, že se NOT v průběhu obou dílčích experimentů signifikantně měnil, přičemž v průměru vždy došlo k jeho poklesu. Naměřené změny navíc vykazovaly závislost na počáteční hodnotě. Velikost zornice se během akomodace významně neměnila. Ve tmě však dle očekávání došlo ke zvětšení jejího průměru. Pozorované změny zornice ale nebyly korelovány se změnami NOT. Jak již bylo zmíněno, dělila se studie do dvou částí. Pro lepší přehlednost je tato struktura zachována i v textu diskuse. Prozatím jsem se v odborné literatuře nesešla se studii, které by využívaly stejný experimentální přístup k měření. Z tohoto důvodu se moje studie tedy opírá o výsledky experimentů zabývajících se podobnou problematikou.

## Akomodace

Z měření vyplývá, že **při navození akomodace nedošlo k významným změnám velikosti zornic**. Z dostupné literatury [13] je známo, že při akomodaci dochází k zúžení zornice. V mé studii nebyla akomodace navozena pohledem do blízka, ale předsazením čoček o optické mohutnosti  $-2$  D. Vzhledem k tomu, že probandi s touto předřazenou korekcí sledovali písmena ve vzdálenosti 7 m, nebyla přítomna konvergence. Absence jednoho ze základních jevů spojených se zúžením zornice tak mohla vést k malým změnám velikosti zornice. Je možné, že při současném zapojení konvergence by byly změny ve velikosti zornice pozorovány. Efekt by se mohl posílit i větší mírou navozené akomodace. Tuto skutečnost podporuje i fakt, že zvýšení dioptrického podnětu k akomodaci vede k téměř lineárnímu zvýšení akomodační reakce a související vergence [40].

Dalším zjištěním během měření byla skutečnost, že **NOT po navození akomodace postupně klesal**. V 10. minutě došlo k největšímu poklesu (s průměrným rozdílem 0,5 mmHg oproti výchozí hodnotě a směrodatnou odchylkou 1,2 mmHg). Následně se NOT vracel zpět k původním hodnotám. Kromě toho u skupiny probandů s vyšší počáteční hodnotou NOT došlo k většímu poklesu než u skupiny s nižším NOT. Ve studii provedené Read, et al. (2009) byl realizován obdobný experiment, který došel ke shodnému závěru jako moje studie, tj. že při zapojení akomodace dojde ke snížení hodnot NOT [41]. Tohoto odborného experimentu se zúčastnilo 32 probandů. Z nich

bylo čtrnáct krátkozrakých a osmnáct emetropických. Výchozí hodnoty NOT byly pořízeny po sedmi minutách pozorování vzdáleného cíle. Pro myopické subjekty byla výchozí hodnota NOT  $17,7 \pm 2,0$  mmHg, pro emetropické  $16,80 \pm 2,9$  mmHg. Poté probandi fixovali do blízka po dobu dvou minut s následným pořízením hodnot. Publikovaná studie prokázala pokles NOT po navození akomodace u obou těchto skupin (průměrná změna:  $-1,8 \pm 1,2$  mmHg,  $p < 0,001$ ). Z výsledku studie rovněž vyplývá, že není signifikantní rozdíl změn NOT mezi myopickými a emetropickými probandy. V případě emetropických očí činila průměrná změna NOT  $-1,7 \pm 0,8$  mmHg. Pro myopické probandy byla naměřena průměrná změna  $-1,9 \pm 1,4$  mmHg.

Závěry obou experimentů tedy potvrzují teze, že se NOT při akomodaci sníží. K tomuto jevu dochází pravděpodobně vlivem zmenšení zornice, čímž dochází ke zvětšení prostoru komorového úhlu. Zvětšení prostoru komorového úhlu má za následek lepší odtok NT a tím dochází ke snížení NOT. Dalším projevem akomodace je vyklenutí čočky dopředu, přičemž dochází k uvolnění svalů závěsného aparátu. Tento jev může také způsobit zvětšení prostoru pro NT, což v konečném důsledku může rovněž vést ke snížení NOT. Vzhledem k tomu, že v našem experimentu nedošlo k výrazným změnám zornice, lze předpokládat, že vliv na snížení NOT mohl mít především posun čočky dopředu a související zvětšení prostoru pro NT.

Studie, kterou se zabýval Jenssen, et al. (2012) na Haukeland University Hospital v norském Bergenu, zkoumala předpoklady snížení NOT při statické a dynamické akomodaci [42]. Experiment předpokládal, že střídavá kontrakce a relaxace ciliárního svalu během dynamické akomodace může kromě odtoku trávčínou podpořit také uveosklerální odtok NT. Celkem 17 probandů podstoupilo experiment statické akomodace, při kterém se po dobu 3 minut dívali na blízký cíl, který byl nastavený tak, aby indukoval 3 D akomodační požadavek. Zbýlých 16 probandů se účastnilo dynamického testování, kde střídavě docházelo k zaměření blízkého a dalekého bodu. NOT byl vždy měřen okamžitě po statické a dynamické akomodaci. Výsledky této zahraniční studie také korespondují s daty naměřenými v naší experimentální části. Studie totiž rovněž prokazuje, že se NOT snížil od výchozího stavu (15 mmHg) jak po statické (13,4 mmHg) tak i po dynamické (12,7 mmHg) akomodaci. Rozdíl ve snížení po statické (1,76 mmHg) a dynamické (2,06 mmHg) akomodaci nebyl statisticky významný. Nedošlo tedy k potvrzení



základního předpokladu studie, protože nebyly poskytnuty přesvědčivé důkazy o tom, že kontrakce ciliárního svalu přispívá k odtoku uveosklerální cestou.

## **Tma**

Výsledky mého experimentu potvrzují skutečnost, že okamžitě **po eliminaci světla dojde ke zvětšení průměru zornice**. Naměřené zvětšení se pohybovalo na průměrné hodnotě 1,0 mm se směrodatnou odchylkou 0,5 mm. Výsledky měření prokazují anatomické zákonitosti. Pokud totiž na tyčinky a čípky dopadá pouze malé množství světla, dochází k aktivaci sympatiku. Protože právě sympatikus inervuje *m. dilatátor pupillae*, dojde k mydriáze zornice. Svaly duhovky, jejich inervace a pupilární dráha jsou podrobněji popsány v kapitolách 1.3 a 1.4.

Jakmile došlo k **eliminaci světla, okamžitě poklesl NOT**. Naměřená hodnota poklesu činila 0,6 mmHg se směrodatnou odchylkou 1,3 mmHg. Nicméně po 10. minutě došlo k postupnému růstu NOT a za 20 min po pobytu ve tmě bylo dosaženo výchozí hodnoty. Tyto změny v čase byly potvrzeny statistickou analýzou, která potvrdila významný vliv času. Průběh rozdílů tlaku ve srovnání s výchozími hodnotami prokázal, že osoby s vyšším počátečním NOT dosáhly vyššího poklesu, který zároveň jevil jen malou tendenci k návratu ve sledované časové periodě. U osob s nižším výchozím tlakem byly změny výrazně menší. Vzhledem k tomu, že předchozí výsledky studie jasně dokazují zvětšení zornice po eliminaci světla, byl očekáván nárůst NOT. Toto očekávání vychází z předpokladu, že dojde k zúžení úhlu z důvodu širší báze duhovky. Tento jev je pozorován obvykle ve tmě při stimulaci sympatiku [43]. Mírný nárůst skutečně pozorován byl, avšak zároveň došlo k neočekávanému snížení NOT na počátku periody. Domnívám se, že to mohlo být zapříčiněno rozevřením zornice a tudíž zlepšením průtoku NT do přední komory, zatímco zhoršené vstřebávání se projevilo až později, což mohlo způsobit nárůst hodnot v čase. Druhou domněnkou, proč k tomuto jevu došlo, může být také prostá skutečnost, že se systém pouze vyrovnával s náhlou změnou okolních podmínek. V oku se při okamžitém zhasnutí světla mohl spustit rychlý obranný mechanismus, díky kterému bylo zamezeno vzestupu tlaku. Mohlo tedy dojít k chemickým reakcím, které vedly buď ke zvýšení odtoku nebo ke snížení produkce NT. Toto tvrzení však není zatím studii podloženo, proto by bylo vhodné tuto problematiku dále zkoumat.

Jednou ze studií, která se také zabývala měřením NOT při pobytu ve tmě, byla studie provedená Gloster, et al. (1973) [44]. Experiment probíhal na 176 očích a zkoumal, zda existuje možné nebezpečí uzavření úhlu při pobytu ve tmě. Experimentátoři nejdříve změřili počáteční hodnotu NOT, poté probanda umístili do tmavé místnosti, kde trávil jednu hodinu. Po tomto časovém úseku byl NOT znovu změřen pomocí Schiötzova tonometru, s použitím co nejmenšího osvětlení. Studie prokázala, že u žádného probanda nenastal pokles podobný tomu, který jsem pozorovala během svého experimentu. Naopak vykazovaly hodnoty probandů nárůst o 2 až 6 mmHg a pouze v 5 případech tlak zůstal beze změny. Zatímco moje studie zkoumala zdravé jedince, u tohoto experimentu bylo známo, že probandi mají diagnostikovaný glaukom a byli léčeni medikamentózně nebo chirurgicky. Navíc byl v dané studii sledován NOT až po hodině, zatímco v mém experimentu jsem NOT měřila okamžitě a následně v pravidelných intervalech. Navíc po dvaceti minutách již NOT u nás vykazoval návrat k původní hodnotě. Je otázkou, zda by u mých probandů následoval (např. po dalších 20 minutách) další nárůst NOT.

# ZÁVĚR

NOT představuje dynamický proces, na který působí celá řada faktorů, jakými jsou například věk, pohlaví a fyzická aktivita jedince. Dalšími důležitými faktory ovlivňující průběh změn NOT je rovněž proces akomodace a vliv okolních světelných podmínek. V teoretické části mé práce se snažím shrnout anatomické a fyziologické poznatky o zornici. Rovněž se zabývám inervací svalů, které se podílejí na procesu zornicových reakcí. Dále v této části shrnuji dosud známé teoretické poznatky adaptace oka na světlo a tmu. Pro správné pochopení výstupu experimentální části bylo důležité rovněž shrnutí teoretických poznatků anatomických změn oka v průběhu akomodace. Zabývám se zde také anatomií očních struktur, které mají příčinnou souvislost s hodnotami NOT. V neposlední řadě jsem se snažila charakterizovat také dynamiku NT, která přímo působí na změny NOT a je tudíž nezbytně důležitá pro pochopení patogeneze glaukomu.

V experimentální části byla interpretována metodika a dosažené výsledky vlastní studie. Výzkum probíhal ve dvou po sobě navazujících fázích, přičemž každé z těchto částí se vždy zúčastnili všichni probandi. V první části byly sledovány změny NOT v čase navozené akomodací, druhá část se pak zabývala změnami NOT ve tmě. Jelikož velikost NOT může být ovlivněna velikostí zornice, byl v obou částech sledován také tento parametr. Základním cílem mé diplomové práce bylo zjistit, zda akomodace a velikost zornice ovlivňuje hodnotu NOT. Naměřená zjištění prokazují, že se NOT signifikantně měnil v průběhu obou dílčích experimentů. Shodným závěrem vždy bylo, že v průměru došlo k poklesu NOT a naměřené hodnoty vykazovaly závislost na počáteční hodnotě. Navíc se za pomoci korelační analýzy potvrdilo, že vyjma měření v 5. minutě po navození akomodace byl pozorovaný pokles NOT u obou experimentů vždy pozitivně korelován s jeho výchozí hodnotou, tj. vyšší výchozí hodnota vedla k většímu poklesu. K maximálnímu poklesu NOT došlo těsně po redukci osvětlení, kdy naměřená hodnota poklesu činila  $0,6 \pm 1,3$  mmHg, a po 10 min od navození akomodace, kdy byl naměřen pokles  $0,5 \pm 1,3$  mmHg. Průměr zornice se během akomodace významně neměnil, ale ve tmě dle očekávání vzrostl ( $1,0 \pm 0,6$  mm). Pozorované změny zornice nebyly korelovány se změnami NOT. Výsledky mé studie ukazují, že jak během krátkodobé akomodace, tak při krátkodobém pobytu ve tmě došlo k mírnému poklesu NOT, který však byl u většiny sledovaných jedinců klinicky nevýznamný

( $\leq 2$  mmHg). Zároveň bylo zjištěno, že změny NOT byly zřetelnější u probandů s větší počáteční hodnotou NOT, což se potvrdilo zejména při pobytu ve tmě.

Abychom mohli ochránit glaukomatiky před možnými změnami NOT, je nutné provádět studie nejprve u zdravých jedinců. Je totiž důležité zjistit, jak se určitý jev chová a co můj aspekt v podobě tmy a akomodace vyvolá právě u zdravých očí. Teprve po získání těchto skutečností je možné zjistit, v čem je glaukomatické oko odlišné. U glaukomatiků obecně platí, že čím vyšší mají NOT, tím více jsou jejich hodnoty tlaku nestabilní. Moje studie probíhala právě u zdravých jedinců, proto je rovněž důležité tento experiment dále ověřit i u pacientů s glaukomem.

Vypracováním diplomové práce jsem měla možnost detailněji nahlédnout do podstaty glaukomatických onemocnění. Přínosem mi byla některá nová zjištění, která mne utvrdila v tom, jak závažné onemocnění glaukom představuje a jak vysokou progresivitu má v globálním měřítku. Tím spíše jsem přesvědčena o tom, že by nadále měly být prováděny kontinuální výzkumy zabývající se touto problematikou.

## Zdroje

- [1] YIH-CHUNG, T. et al. *Global Prevalence of Glaucoma and Projections of Glaucoma Burden through 2040*. *Ophthalmology*, Vol. 121, 2014, No. 11, pp. 2081 – 2090.
- [2] ČIHÁK, R. *Anatomie*. Třetí, upravené a doplněné vydání. Ilustroval Ivan HELEKAL, ilustroval Jan KACVINSKÝ, ilustroval Stanislav MACHÁČEK. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5636-3.
- [3] KVAPILÍKOVÁ, K. *Anatomie a embryologie oka*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2000. ISBN 80-7013-313-9.
- [4] MITCHELL, R. et al. *Blue Mountains Eye Study. Iris color and intraocular pressure: the Blue Mountains Eye Study*. *Am J Ophthalmol*, 2003;135(3):384-386. doi:10.1016/s0002-9394(02)01967-0.
- [5] SUN, HP. et al. *Iris color and associated pathological ocular complications: a review of epidemiologic studies*. *Int J Ophthalmol*, 2014;7(5):872-878. doi:10.3980/j.issn.2222-3959.2014.05.25.
- [6] KOLÍN, J. *Oční lékařství*. 2., přeprac. vyd. Praha: Karolinum, 2007. ISBN 978-80-246-1325-3.
- [7] SYKA, J. a kol. *Fyziologie a patofyziologie zraku a sluchu*. Praha: Avicenum, 1981. ISBN 08-010-81.
- [8] ADLER, F. *Adler's physiology of the eye*. 11th ed. Editor Leonard A. LEVIN, editor Paul L. KAUFMAN, editor Albert ALM. Edinburgh: Saunders Elsevier, c2011, xii, 795 s. ISBN 978-0-323-05714-1.
- [9] UEDA, T. et al. *Change in dynamic visual acuity (DVA) by pupil dilation*. 2006;48(4):651-655. doi:10.1518/001872006779166299
- [10] OTRADOVEC, J. *Klinická neurooftalmologie*. Praha: Grada, 2003. ISBN 80-247-0280-0.
- [11] GRADLE, H. S. et al. *The reaction time of the normal pupil: Second communication*. *Jama*, vol. 99, 1932, No. 16, pp. 1334 – 1336.
- [12] SYNEK, S. a SKORKOVSKÁ, Š. *Fyziologie oka a vidění*. 2., dopl. a přeprac. vyd. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3992-2.
- [13] KUČHYNKA, P. *Oční lékařství*. 2., přepracované a doplněné vydání. Praha: Grada Publishing, 2016. ISBN 978-80-247-5079-8.

- [14] KITTNAR, O. *Lékařská fyziologie*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3068-4.
- [15] MELLONI, J. L. et al. *Attorney's Reference on Human Anatomy*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. ISBN 978-0-521-69608-1.
- [16] FIALA, P., VALENTA, J., EBERLOVÁ, L. *Stručná anatomie člověka*. Praha: Univerzita Karlova v Praze, nakladatelství Karolinum, 2015. ISBN 978-80-246-2693-2.
- [17] RIEBEL, O. *Nauka o zraku: učební text pro střední zdravotnické školy, obor oční optici*. 3. vyd. Brno: Institut pro další vzdělávání středních zdravotnických pracovníků, 1987.
- [18] ROZSÍVAL, P. *Oční lékařství*. Druhé, přepracované vydání. Praha: Galén, 2017. ISBN 978-80-7492-316-6.
- [19] AMBLER, Z. *Základy neurologie: (učebnice pro lékařské fakulty)*. 7. vyd. Praha: Galén, 2011. ISBN 978-80-7262-707-3.
- [20] ROKYTA, R. *Fyziologie a patologická fyziologie: pro klinickou praxi*. Praha: Grada Publishing, 2015. ISBN 978-80-247-4867-2.
- [21] JIRÁSKOVÁ, N., ROZSÍVAL, P. *Kazuistiky z oftalmologie II*. Hradec Králové: Nucleus HK, 2008. Oftalmologie. ISBN 978-80-87009-44-4.
- [22] KENNETH WALKER, H, W DALLAS HALL a J WILLIS HURST. *Clinical Methods: The History, Physical, and Laboratory Examinations*. 3rd edition. Boston: Butterworths, 1990. ISBN 0-409-90077-X.
- [23] ANTON, M. *Refrakční vady a jejich vyšetřovací metody*. Vyd. 3., přeprac. Brno: Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2004. ISBN 80-7013-402-X.
- [24] HABEL, J. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013, 622 s. ISBN 78-80- 86534-21-3.
- [25] POLÁŠEK, J. *Technický sborník oční optiky*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1974.
- [26] GANONG, William F. *Přehled lékařské fyziologie*. 1. vyd. Jinočany: H&H, 1997, 681 s. ISBN 80-857-8736-9.
- [27] DARTT, D. A.; BESHARSE, J. C.; DANA, R. *Encyclopedia of the eye*. Volume 1 A-C. 1st edition. Oxford: Academic Press, 2010. ISBN-13: 978-0-12-374199-8.

- [28] WIEDERHOLT, M. et al. *The regulativ of Trabecular Meshwork and Ciliary Muscle Contractility*. Progress in retinal and eye research, Vol. 19, 2000, No. 3, pp. 271-95.
- [29] REMINGTON, L. A. *Clinical Anatomy and Physiology of the Visual System*. 3rd edition. Oxford: Elsevier, 2012. ISBN 978-1-4377-1926-0.
- [30] BAILEY, S. T. et al. *Light-scattering study of the normal human eye lens: elastic properties and age dependence*. *IEEE transactions on bio-medical engineering*. Vol. 57, 2010, No. 12, pp. 2910-7.
- [31] GROSVENOR, T. *Primary care optometry*. 5th ed. St. Louis: Butterworth - Heinemann, 2007. 510 s. ISBN 13: 978-0-7506-7575-8.
- [32] ŘEHÁK, S. a kol. *Oční lékařství, učebnice pro lékařské fakulty*. 2. vyd. Praha: Avicenum, zdravotnické nakladatelství, 1989.
- [33] RUTRLE, M. *Brylová optika*. 2. přeprac. vyd. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 1993. Učební text pro střední zdravotnické školy. ISBN 80-7013-145-4.
- [34] OLÁH, Z. a kol. *Očné lékařstvo. Učebnica pre lekárske fakulty*. Martin: Osveta, 1998. ISBN 80-88824-74-5.
- [35] LANG, G. K. *Ophthalmology: A pocket textbook atlas*. 2nd edition. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2007. 10-ISBN 3-13-126162-5.
- [36] AUTRATA, R. *Nauka o zraku*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2002. ISBN 80-7013-362-7.
- [37] KRAUS, H. *Kompendium očního lékařství*. Praha: Grada, 1997. ISBN 80-7169-079-1.
- [38] TUNNACLIFFE, Alan H.: *Introduction to visual optics. 4th edition*. England: Association of British Dispensing Opticians. 1993. 603 s. ISBN 0-9009-928-3.
- [39] VÝBORNÝ, P. *Glaukom - vybrané kapitoly*. Hradec Králové: Nucleus HK, 2008. Oftalmologie. ISBN 978-80-87009-35-2.
- [40] RIPPS, H. et al. *The Effect of Pupil Size on Accommodation, Convergence, and the AC/A Ratio*. Investigative Ophthalmology & Visual Science. Vol. 1, 1962, pp. 127 – 135.
- [41] READ, S. A. et al. *The Influence of Accommodation on Intraocular Pressure and Ocular Pulse Amplitude*. Investigative Ophthalmology & Visual Science. Vol. 50, 2009, pp. 2807.

- [42] JENSSEN, F. *Effects of static accommodation versus repeated accommodation on intraocular pressure*. Ocular Surgery News. Vol. 21, 2012, No 1, pp. 45-48.
- [43] SILBERNAGL, S. *Color Atlas Pathophysiology 3rd edition*. Thieme, 2016. ISBN 978313165534.
- [44] GLOSTER, J. et al. *Changes in intraocular pressure during and after the dark-room test*. University of London: Institute of Ophthalmology. Vol. 57, 1973, pp. 170.
- [45] SCHWIEGERLING, J. *Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics*. Spie Press Books, 2004. ISBN 9780819456298.
- [46] DUMKOVÁ, J. Masarykova Univerzita [online], Brno: 2016 [2020-05-26]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/>.
- [47] LAND, M. *Focusing by shape change in the lens of the eye: A commentary on Young (1801) 'On the mechanism of the eye'*. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Vol. 370, 2015.
- [48] SCHMIDT R. F. *Fyziologie*. Přeložil Richard ROKYTA, přeložil Jan MAREŠ. Praha: Scientia Medica, 1993, xiii, 310 s. Memorix. ISBN 80-85526-18-2.
- [49] KUPFER, *Pseudofacility in the human eye*. Transactions of the American Ophthalmological Society. 1971;69:383-396.
- [50] GOEL, M. et al. *Aqueous humor dynamics: a review*. The open ophthalmology journal. Vol. 4, 2010, doi:10.2174/1874364101004010052.
- [51] GABELT, B. T. et al. *Aqueous humor hydrodynamics*. In: Hart WM, editor. Adler's Physiology of the Eye. 9th. St. Louis: MO: Mosby; 2003.
- [52] BRUBAKER, R. F. *Measurement of aqueous flow by fluorophotometry*. St. Louis: Mosby, 1989. pp. 337-44.
- [53] ROHEN, J. W. et al. *The relation between the ciliary muscle and the trabecular meshwork and its importance for the effect of miotics on aqueous outflow resistance. A study in two contrasting monkey species, Macaca irus and Cercopithecus aethiops*. Klin Exp Ophthalmol. 1967;172(1):23-47.



## Seznam obrázků

*Obrázek 1 - Anatomie duhovky, dostupné z: <https://www.abicko.cz> [2020-05-26]*

*(upraveno autorkou)*

*Obrázek 2 - Sympatická a parasympatická inervace zornic [13]*

*Obrázek 3 – Řez okem [46]*

*Obrázek 4 - Čočka a její závěsný aparát [2]*

*Obrázek 5 - Helmholtzova teorie [47]*

*Obrázek 6 - Princip teorie akomodace podle Schachara a Tscherninga [13]*

*Obrázek 7 - Purkyňovy obrázky [7]*

*Obrázek 8 - Závislost amplitudy akomodace na věku [45]*

*Obrázek 9 - Řasnaté těleso, dostupné z: <https://www.tipacilar.com/korpus-siliyare/> [2020-05-26]*

*Obrázek 10 - Složení NOT a plazmy [13]*

*Obrázek 11 - Odtok nitrooční tekutiny trámčinou [13]*

*Obrázek 12 - Odtok nitrooční tekutiny uveosklerální cestou [13]*

## Seznam grafů

*Graf 1 - Závislost velikosti zornice na čase v průběhu experimentu po navození akomodace*

*Graf 2 - Závislost NOT na čase v průběhu experimentu po navození akomodace*

*Graf 3 - Změna NOT oproti výchozí hodnotě po navození akomodace*

*Graf 4 - Závislost velikosti zornice na čase v průběhu experimentu při pobytu ve tmě*

*Graf 5 – Závislost NOT na čase v průběhu experimentu při pobytu ve tmě*

*Graf 6 - Změna NOT oproti výchozí hodnotě po eliminaci světla*