

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ  
Katedra přírodovědných oborů**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Květen 2017**

**Denisa Ciprová**





**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta biomedicínského inženýrství  
Katedra přírodovědných oborů**

**Měření biomechanických vlastností rohovky systémem ORA**

**Measurement of corneal biomechanical properties by ORA**

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Optika a optometrie

**Autor práce: Denisa Ciprová**

Vedoucí práce: Doc. MUDr. Šárka Pitrová, CSc., FEBO

## **Název práce:** Měření biomechanických vlastností rohovky systémem ORA

### **Abstrakt:**

Cílem práce bylo provádět měření nitroočního tlaku klasickou metodou, která zohledňuje centrální tloušťku rohovky (bezkontaktní metoda), a přístrojem ORA (Ocular Response Analyzer), kterým jsou zjišťovány biomechanické vlastnosti rohovky nezávisle na její tloušťce. Pro klasickou metodu byl použit bezkontaktní tonometr Canon TX 10. Před měřením touto metodou není nutno rohovku obarvit a ani ji znecitlivět. K měření nitroočního tlaku nezávisle na centrální tloušťce rohovky byl použit přístroj ORA, by Reichert Ophthalmic Instruments. V důsledku dynamické povahy pulzu vzduchu a viskózního tlumení v rohovce vznikají při této metodě dvě různé hodnoty tlaku. Rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami tlaku je korneální hystereze (CH), výsledná hodnota hystereze je určena zprůměrováním alespoň tří hodnot měření. Jako doplňující bylo prováděno měření tloušťky rohovky (pachymetrie). Průměrné naměřené hodnoty nitroočního tlaku přístrojem ORA zohledňující hysterezi rohovky (IOPcc) byly  $18,878 \pm 4,453$  mmHg a průměrné naměřené hodnoty nitroočního tlaku bezkontaktním tonometrem (IOPnc) byly  $17,593 \pm 4,546$  mmHg. Při porovnání těchto hodnot s IOPg, získaným vyšetřením ORA přístrojem, byly zjištěny tyto odchylky: u IOPcc pro oko pravé  $-0,182 \pm 2,124$  mmHg, pro levé oko  $-0,0392 \pm 2,108$  mmHg a celkem  $-0,1182 \pm 2,117$  mmHg, u IOPnc byly odchylky pro oko pravé  $-1,7587 \pm 3,246$  mmHg, pro oko levé  $-1,0177 \pm 2,722$  mmHg a celková odchylka byla  $-1,4027 \pm 3,017$  mmHg. Zohlednění hystereze při měření nitroočního tlaku je přesnější než zohlednění centrální tloušťky rohovky. S rostoucí tloušťkou rohovky rostla i hystereze, a proto byla potvrzena hypotéza H1 i H2, tedy měření nitroočního tlaku je ovlivňováno jak tloušťkou rohovky, tak i hysterezí.

### **Klíčová slova:**

korneální hystereze, ORA, bezkontaktní tonometr, pachymetrie, glaukom

## **Thesis title:** Measurement of corneal biomechanical properties by ORA

**Abstract:** Study compares measurement of intraocular pressure using classic method taking into account central corneal thickness (noncontact method) and Ocular Response Analyzer (ORA) determining biomechanical corneal properties regardless of its thickness. Noncontact tonometer Canon TX 10 was utilized for a classic method measurement without a need of coloring or anaesthetizing cornea. ORA, by Reichert Ophthalmic was employed in the second method. Due to dynamic characteristic of air pulse and viscous corneal dumping two different pressure values were emerging. Variety in mentioned values is corneal hysteresis (CH). Final values of CH are means of at least three measurements. Additionally, measurement of corneal thickness (pachymetry) was performed. Average values of intraocular pressure IOPcc and IOPnc was  $18,878 \pm 4,453$  mmHg and  $17,593 \pm 4,546$  mmHg. In comparison with IOPg was found these differences, deviation of IOPcc for right eye was  $-0,182 \pm 2,124$  mmHg, for left eye was  $-0,0392 \pm 2,108$  mmHg and whole difference was  $-0,1182 \pm 2,117$  mmHg, by IOPnc was deviations for right eye  $-1,7587 \pm 3,246$  mmHg, for left eye  $-1,0177 \pm 2,722$  mmHg and whole deviation was  $-1,4027 \pm 3,017$  mmHg. Values measured by method taking account corneal hysteresis was more accurate than values measured by classic noncontact method. With increasing corneal thickness increase value of corneal hysteresis, and therefore hypothesis H1 and H2 was confirmed, which mean the measurement of intraocular pressure is influenced by both corneal thickness and corneal hysteresis.

### **Key words:**

Corneal hysteresis, ORA, noncontact tonometry, pachymetry, glaucoma

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych ráda poděkovala doc. MUDr. Šárce Pitrové, CSc., FEBO, za důsledné vedení, cenné rady a připomínky při vypracování projektu. Dále mé poděkování patří doc. Ing. Marii Pospíšilové, CSc. za pomoc při analýze naměřených dat. Také bych chtěla poděkovat Alici Staveníkové za pomoc s korekturou práce.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „*Měření biomechanických vlastností rohovky systémem ORA*“ vypracoval(a) samostatně a použil(a) k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

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

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

.....

podpis

# Obsah

Úvod.....	1
1. Rohovka.....	2
1.1 Anatomie.....	2
1.1.1 Epitel.....	2
1.1.2 Bowmanova membrána.....	3
1.1.3 Stroma.....	3
1.1.4 Descemetova membrána.....	3
1.1.5 Endotel.....	3
1.2 Fyziologie.....	4
1.2.1 Výživa.....	4
1.2.2 Inervace.....	4
1.3 Biomechanické vlastnosti.....	5
1.3.1 Pružnost.....	5
1.3.2 Viskozita.....	5
1.3.3 Viskoelasticita.....	6
1.3.4 Hystereze.....	6
1.4 Biomechanické vlastnosti rohovky.....	7
2 Nitrooční tekutina.....	9
2.1 Složení.....	9
2.2 Produkce nitrooční tekutiny.....	10
2.3 Cirkulace.....	11
2.4 Odtok nitrooční tekutiny.....	11
2.4.1 Konvenční cesty.....	11
2.4.2 Nekonvenční cesty.....	12
3 Nitrooční tlak.....	12
3.1 Faktory dlouhodobě ovlivňující nitrooční tlak.....	13
3.2 Faktory krátkodobě ovlivňující nitrooční tlak.....	13
4 Měření nitroočního tlaku.....	14
4.1 Historie.....	14
4.2 Palpační tonometrie.....	15
4.3 Impresní tonometrie.....	15
4.3.1 Schiøtzův impresní tonometr.....	16



4.4	Aplanační tonometrie .....	18
4.4.1	Goldmannův aplanační tonometr.....	18
4.4.2	Perkinsův tonometr .....	20
4.4.3	Mackayův-Margův tonometr .....	20
4.4.4	Tonopen .....	21
4.4.5	Pneumotonometr .....	21
4.4.6	Dynamická konturní tonometrie .....	21
4.5	Bezkontaktní tonometrie .....	22
4.6	Ocular Response Analyzer (ORA).....	23
5	Glaukom.....	25
5.1	Klasifikace.....	26
5.2	Vývojový glaukom.....	26
5.3	Primární glaukom.....	27
5.3.1	Primární glaukom s otevřeným úhlem (POAG) .....	27
5.3.2	Primární glaukom s uzavřeným úhlem (PACG).....	27
5.3.3	Normotenzní glaukom (NTG) .....	28
5.3.4	Oční hypertenze .....	28
5.4	Sekundární glaukom.....	28
5.4.1	Sekundární glaukom s otevřeným úhlem.....	29
5.4.2	Sekundární glaukom s uzavřeným úhlem.....	30
6	Diagnostické metody glaukomu .....	30
6.1	Anamnéza.....	30
6.2	Tonometrie .....	30
6.3	Vyšetření zrakové ostrosti.....	31
6.4	Gonioskopie .....	31
6.5	Vyšetření papily zřakového nervu .....	32
6.6	Perimetrie .....	33
6.7	Pachymetrie.....	33
6.8	Zobrazovací metody.....	34
7	Experimentální část.....	37
7.1	Metodika výzkumu.....	37
7.2	Charakteristika souboru pacientů .....	38
7.3	Analýza dat.....	40
	Diskuze .....	46

---

Závěr .....	48
Seznam použité literatury .....	49
Seznam obrázků.....	55
Seznam tabulek .....	56

# Úvod

Hlavním rizikovým faktorem glaukomu je nitrooční tlak, který byl dříve považován za jeho hlavní příčinu. V dnešní době pohlížíme na glaukom jako na multifaktoriální onemocnění, na jehož vzniku se kromě nitroočního tlaku podílejí např. genetické faktory, celková onemocnění, refrakční vady, atd. Měření nitroočního tlaku patří k základním vyšetřovacím metodám pro stanovení diagnózy glaukomu. Běžně se ke zjišťování hodnot nitroočního tlaku užívají přístroje zohledňující centrální tloušťku rohovky, výsledky však mohou být zatíženy chybou měření u tlustších nebo tenčích rohovek. Z těchto důvodů se v dnešní době stále častěji používají přístroje, které při měření zohledňují biomechanické vlastnosti rohovky bez závislosti na její centrální tloušťce.

Biomechanické vlastnosti rohovky mají vliv na celkovou funkčnost zrakového systému. Na anatomii a fyziologii rohovky závisí schopnost reakce tkáně na působící zátěž nebo změnu tvaru. Rohovka je viskoelastická, tedy vykazuje chování jak pružných, tak i viskózních materiálů. S těmito vlastnostmi je spojen i pojem hystereze, který vyjadřuje množství energie, kterou je tkáň schopna absorbovat a rozptýlit.

První zmínky o biomechanických vlastnostech rohovky jsou již z roku 1937, kdy je popsal Friedenwald. V této době probíhalo testování pouze ex vivo na rohovkových pásech nebo na celých rohovkách vyjmutých z oka. Toto testování nebylo přesné, jelikož rohovka ex vivo ztrácí přirozené regulační mechanismy, není pokrytá slzným filmem, dochází ke změně teploty a zejména k morfologickým změnám. U rohovkových pásů docházelo ke změně orientace fibril vůči původnímu postavení. I přes tyto nepřesnosti se podařilo stanovit základní biomechanické vlastnosti, např. při různých zátěžích vykazuje rohovka viskoelastické vlastnosti s různou mírou hystereze, periferní a paracentrální oblasti jsou tužší než centrální oblast, a to v důsledku rozdílné orientace a počtu fibril. Biomechanické vlastnosti se mění v průběhu života a s rostoucím věkem je rohovka tužší.

Cílem bakalářské práce je seznámit se s biomechanickými vlastnostmi rohovky a porovnat měření nitroočního tlaku klasickou metodou, která zohledňuje centrální tloušťku rohovky (bezkontaktní metoda) a přístrojem ORA (Ocular Response Analyzer), kterým jsou zjišťovány biomechanické vlastnosti rohovky nezávisle na její tloušťce.

# 1. Rohovka

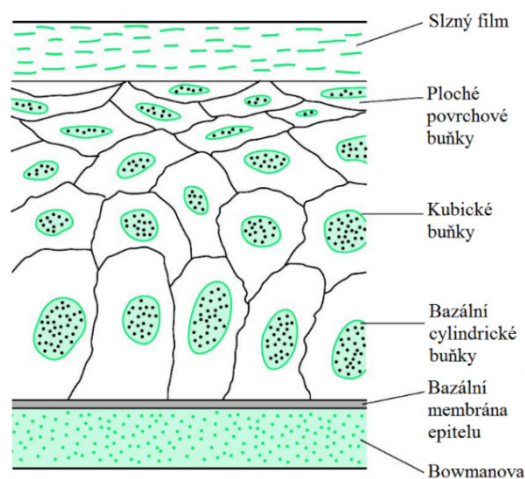
Rohovka je transparentní optická tkáň, která společně se sklérou, spojivkou a slzným filmem tvoří mechanickou a chemicky neprostupnou bariéru. Díky avaskularizaci tkáně, rovnoběžnému uspořádání kolagenních fibril a hydrataci je udržována průhledná. Jedná se o nejcitlivější tkáň v těle, protože obsahuje největší počet senzitivních nervových zakončení na  $\text{mm}^2$ . Samotná rohovka zaujímá zhruba 1/6 bulbu, poté přechází v neprůhlednou a pevnou skléru, tvořící větší část zevního povrchu bulbu. Místo přechodu se nazývá limbus. [1, 2, 3]

## 1.1 Anatomie

Rohovka se skládá z pěti vrstev, těmi jsou epitel, Bowmanova membrána, stroma, Descemetova membrána a endotel (obr. 2).

### 1.1.1 Epitel

Epitel tvoří vnější vrstvu rohovky a je tvořen 5-7 vrstvami buněk (obr. 1). Jedná se o nerohovějící mnohovrstevný dlaždicový epitel. Zevní vrstvou jsou tenké a ploché buňky, pod nimi se nachází buňky kubické a bazální vrstvu tvoří buňky cylindrické. Odumírající buňky se odlupují a jsou odplavovány slzami. Regenerační schopnost epitelu je rychlá, celý epitel se v průměru obnoví každých 7 dní. Při rozsáhlejších poškození se obnovuje na základě dělení kmenových buněk, které se nacházejí v oblasti limbu, odkud poté putují na místo poškození. Hlavní funkcí epitelu je ochrana vnějšího povrchu oka před poškozením a zabraňuje vniknutí infekce do vnitřní části oka. Společně se slzným filmem udržuje hladkost povrchu oka. [1, 2, 4]



Obrázek 1: Složení epitelu rohovky [5]

### 1.1.2 Bowmanova membrána

Bowmanova membrána se nachází mezi bazální membránou epitelu a stromatem. Je tenká 8-12  $\mu\text{m}$  a je tvořena extracelulární matrix. Má dvě základní funkce: odděluje epitel od stromatu a podílí se na organizaci bazální vrstvy epitelu. Po poškození neregeneruje a způsobuje rohovkovou jizvu. [1, 2, 4]

### 1.1.3 Stroma

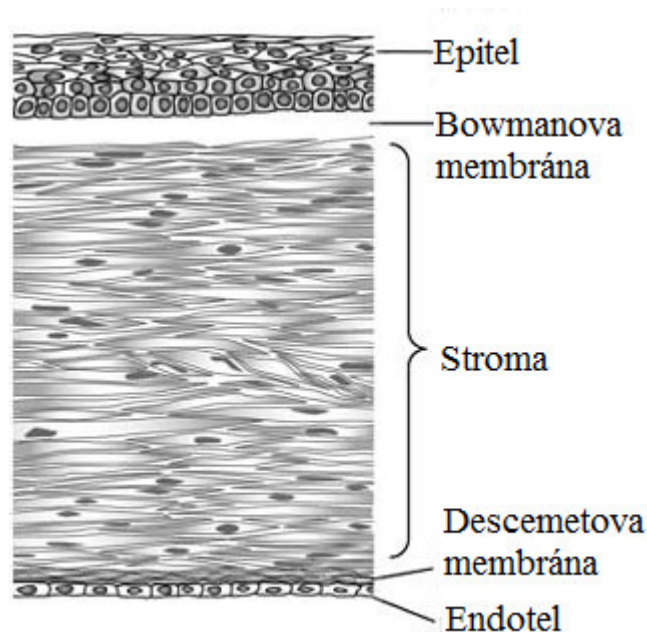
Zaujímá asi 90 % tloušťky rohovky, je složeno z extracelulární matrix a kolagenních vláken, která mají pravidelné uspořádání. Kolagenní vlákna jsou tvořena jemnými fibrilami a jsou uspořádána do 200-250 vrstev s tloušťkou kolem 2  $\mu\text{m}$ . Stroma se vyznačuje svou nízkou schopností regenerace a velkou transparentností, která je dána pravidelným uspořádáním vláken. Normální obsah vody se pohybuje okolo 80 %, při zvýšení obsahu dochází ke stromálnímu edému a k zakalení. [1, 2, 4]

### 1.1.4 Descemetova membrána

Descemetova membrána je modifikovanou bazální membránou a tvoří ji jemné kolagenní fibrily uspořádané do trojrozměrné mřížky. Je relativně pevná, odolná proti poranění a má schopnost regenerace pomocí endotelových buněk. Při narození je tloušťka jen 3  $\mu\text{m}$  v dospělosti dosahuje tloušťky přibližně 8-12  $\mu\text{m}$ . [1, 2, 4]

### 1.1.5 Endotel

Nejvnitřnější rohovková vrstva o tloušťce 4-6  $\mu\text{m}$ , která je tvořena jednovrstevným plochým epitelem. Buňky endotelu jsou pravidelné hexagonální a těsně na sebe naléhají. Po narození se počet buněk pohybuje mezi 4000-5000 buněk na  $\text{mm}^2$  a v průběhu života klesá na polovinu. Jelikož buňky endotelu nemají schopnost dělení, při úbytku jsou nahrazeny buňkami stávajícími, které změny svůj tvar a velikost. Pokud počet buněk klesne pod hranici 500 buněk na  $\text{mm}^2$ , dochází k edému rohovky. Hlavní úlohou endotelu je udržení konstantní hydratace stromatu. [1, 2, 4]



Obrázek 2: Vrstvy rohovky [6]

## 1.2 Fyziologie

### 1.2.1 Výživa

Pro metabolismus rohovky je důležitý přísun kyslíku, aminokyselin a glukózy. Největší množství glukózy získává difúzí z komorové vody. Naopak největší množství kyslíku získává difúzí ze slzného filmu a část ze spojivkových cév limbu. Avaskularizace přímo souvisí s pomalým metabolismem, díky kterému probíhá hojení ran pomalu.

Nejvíce energie spotřebovává sodnodraselná pumpa, která se podílí na aktivním transportu vody z rohovkového stromatu do přední komory. Udržuje optimální hydrataci a tím i transparentnost rohovky. [1, 2]

### 1.2.2 Inervace

Rohovka je inervována z první větve pátého hlavového nervu. V rohovce se větev dělí na stromální a subepitelovou pletěň. Průchodem přes limbus nervy přicházejí o myelinovou pochvu. Nejvíce senzitivních nervových zakončení na  $\text{mm}^2$  činí rohovku nejcitlivější tkání v těle, proto podráždění nebo narušení epitelu vyvolávají intenzivní bolest, mrkací reflex a reflexivní slzení. [1]

## 1.3 Biomechanické vlastnosti

### 1.3.1 Pružnost

Pružností se zabývá část mechaniky, která studuje vztah mezi deformací tělesa a vnějšími silami, které na těleso působí. Pružným materiálem označujeme takový materiál, který se působením vnější síly deformuje a po odstranění této síly se vrátí do původního stavu.

Veličina charakterizující pevnostně deformační chování daného materiálu se nazývá Youngův modul pružnosti. Čím je hodnota Youngova modulu pružnosti větší, tím je vyšší hodnota síly, která je potřeba k dosáhnutí deformace. Označuje se písmenem E a jednotkou je Pa. [7, 8]

#### Hookeův zákon elasticity

Zákon popisující přímou úměru mezi prodloužením a velikostí síly.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

Tato lineární závislost platí pouze v případě, pokud napětí nepřevýší hodnotu zvanou mez úměrnosti. Dále se materiál může elasticky deformovat, ale Hookeův zákon již přestává platit. Další kritickou hodnotou je tzv. mez pružnosti, po překročení této hodnoty dochází k ireverzibilním změnám, jako je deformace nebo narušení integrity materiálu. [7, 8]

### 1.3.2 Viskozita

Viskozita neboli vazkost je součástí mechaniky kapalin. Tato veličina charakterizuje vnitřní tření a závisí hlavně na přitažlivých silách mezi částicemi. Větší viskozita znamená vyšší přitažlivost mezi částicemi, a tudíž i pomalejší pohyb kapaliny nebo těles v ní ponořených. Hodnota viskozity je závislá na teplotě, s rostoucí teplotou tato hodnota klesá. [9]

Viskózní materiál, na rozdíl od elastického materiálu, po působení vnějších sil nezaujme zpět svůj původní tvar. [8]

### 1.3.3 Viskoelasticita

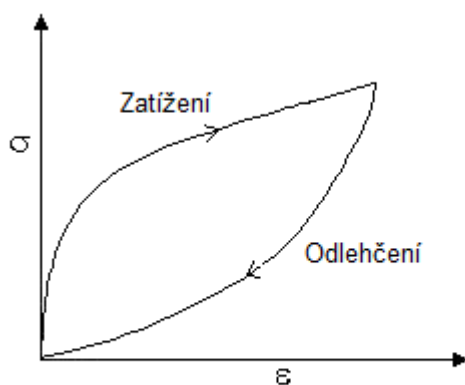
Charakterizuje materiál, který má jak elastické, tak i viskózní vnitřní interakce. Viskoelasticita je typickou vlastností biologických materiálů, nejvíce měkkých tkání.

Deformace dané látky je funkcí času a funkcí působeného napětí. Po působení napětí se nevrací do původní podoby samovolně, ke zrušení deformace je nutné působit silou z opačného směru. Tento jev je znám jako relaxace a udává hysterezi dané látky. [10, 11]

### 1.3.4 Hystereze

Viskoelastické látky nebo materiály jsou charakteristické svou hysterezí. Měření hystereze rohovky udává, jak materiál reaguje na působící napětí při měření (obr.3). Vyjadřuje schopnost rohovkové tkáně absorbovat a rozptýlit energii během aplanace.

Hystereze pravého a levého oka pacienta je silně korelující, ale liší se mezi jednotlivými pacienty. Není úzce spojená s ostatními běžnými ukazateli, jako je zakřivení, astigmatismus, sférický ekvivalent, axiální délka oka nebo nitrooční tlak. Spojení mezi rohovkovou hysterezí a centrální tloušťkou rohovky je pouze u jedinců bez rohovkových onemocnění. [11]



Obrázek 3: Hysterezní křivka [12]



## 1.4 Biomechanické vlastnosti rohovky

Stále častější laserové refrakční zákroky přispěly ke stanovení biomechanických vlastností rohovky a stanovení faktu, že rohovka není mechanicky inertní. Biomechanické vlastnosti rohovky mají vliv na celkovou funkčnost zrakového systému a ovlivňují schopnost reakce tkáně na působící zátěž nebo změnu tvaru. [8, 40, 41]

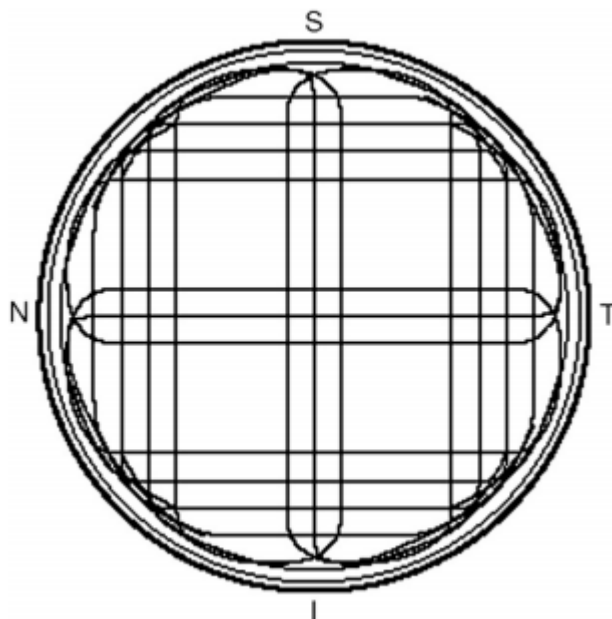
Jelikož je rohovka složena jak z pevných, tak i z tekutých látek je označována za anizotropní kompozit, který je charakterizován nelineárním elastickým a viskoelastickým chováním. Při působení vnější síly se deformuje, ale po odstranění této síly se nevrací ihned do původního tvaru, jelikož dochází k částečnému rozptýlení energie. Youngův modul elasticity je závislý na místě měření a směru působení zátěže. Nejvíce jsou biomechanické vlastnosti ovlivňovány stromatem, které je z 78 % tvořeno vodou, 15 % tvoří kolagen a 7 % tvoří proteoglykany, proteiny a další látky. [8, 40, 41]

Kolagen je primární stavební složka rohovky a skléry. Kolagenní fibrily jsou organizovány do lamel, které mají v rohovkovém stromatu přesné uspořádání a je mezi nimi udržována konstantní vzdálenost 20–41 nm, dále je pro rohovkové kolagenní fibrily typické, že se jejich průměr pohybuje mezi 23–33 nm. Oproti jiným tkáním v těle je tento průměr velmi nízký a společně s pravidelným uspořádáním umožňuje transparentnost rohovky. [8, 40, 41]

Ve stromatu je nejvíce zastoupen kolagen typu I, tvořící vlákna dlouhá 1-20  $\mu\text{m}$ , který umožňuje odolnost vůči vnějším silám. Dále je zde zastoupen kolagen typu V, vzájemná interakce těchto dvou kolagenů má vliv na tloušťku kolagenních fibril. Ve stromatu se také nachází kolagen typu III a typu IV, kolagen typu III je typicky nacházen u lidí s vyšším věkem a v rohovkách, které utrpěly poranění nebo zánět. Kolagen typu IV se váže na kolagenní fibrily a účastní se při stabilizaci a udržení konstantní vzdálenosti mezi vlákny. [8, 40, 41]

Pevné postavení fibril je také regulováno vzájemnými vazbami s proteoglykany, které jsou tvořené z polysacharidových řetězců a proteinových jader.

V centru rohovky se nachází přibližně 300 lamel složených z kolagenních fibril a směrem k periférii tento počet roste až na 500. V přední části stromatu mají lamely šikmý průběh a náhodně se kříží, obvykle začínají u limbu a končí v Bowmannově membráně, kde se vzájemně proplétají s kolagenními vlákny membrány. V zadní části stromatu, blíže k endotelu, jsou kolagenní vlákna širší a vykazují přesnější uspořádanost (viz obr.4). [8, 40, 41]



Obrázek 4: Organizace fibril v zadní části stromatu [8]

Biomechanické vlastnosti jsou dále ovlivňovány hydratací rohovky, která je udržována konstantní pomocí sodnodraselné pumpy přítomné hlavně v endotelu, ale také v rohovkovém epitelu. Jakákoliv změna hydratace způsobí změny v rozložení fibril, vedoucí ke ztrátě transparentnosti a zhoršení biomechanických vlastností. S rostoucím věkem se v rohovce usazuje kolagen, dochází ke křížení mezi fibrilami a tkáň se stává tužší. [8, 40, 41]

Snížená schopnost tkáně reagovat na změny vyvolané proudem vzduchu se projeví nízkou hodnotou hystereze. Je nutné vyvinout vyšší tlak pro oploštění rohovky. Fyziologické hodnoty hystereze se pohybují v rozmezí od 8,5 mmHg do 12,5 mmHg. Naměření nízkých hodnot obvykle poukazuje na progresi glaukomu.

## 2 Nitrooční tekutina

Komorová voda (nitrooční tekutina) je čirá a bezbarvá tekutina, která vyplňuje přední a zadní komoru oka. Podobá se skutečné vodě a její index lomu je 1,333. [3] Při fyziologickém stavu je hypertonická s vyšším obsahem kyseliny askorbové. Komorová tekutina je zdrojem výživy čočky a rohovky, proto obsahuje nejen vodu (98,8%), ale i aminokyseliny, glukózu, minerály, ionty a malý obsah proteinů. Dále slouží pro odsun metabolitů, kterými jsou pyruvát a laktát. Vnitřní odpor proudění a stav rovnováhy mezi rychlostí tvorby a rychlostí odtoku udávají nitrooční tlak. [1, 2, 13]

### 2.1 Složení

Nitrooční tekutina se tvoří v řasnatém tělese z krve, kde prochází přes hematookulární bariéru. Tento komplex je tvořen pigmentovým epitelem sítnice, řasnatým tělesem a duhovkou a je spojen membránovými spojkami. Filtruje látky z plazmy a složením se jí podobá (tab.1). Dále se na složení podílí metabolické procesy probíhající v oku a také odtok nitrooční tekutiny. Látky přes bariéru přecházejí na základě velikosti, velké molekuly (např. bílkoviny nebo inzulin) pronikají velmi málo, naopak menší nebo izolované molekuly (např. etylalkohol) pronikají více [3, 14].

Tabulka 1: Složení nitrooční tekutiny

	Nitrooční tekutina	Plazma
Natrium ( $\mu\text{mol/ml}$ )	152	148
Chloridy ( $\mu\text{mol/ml}$ )	131	107
$\text{HCO}_3^-$ ( $\mu\text{mol/ml}$ )	22	26
Kalium ( $\mu\text{mol/ml}$ )	3,9	4,0
Kalcium ( $\mu\text{mol/ml}$ )	2,5	4,9
Magnesium ( $\mu\text{mol/ml}$ )	1,2	1,2
Fosfor ( $\mu\text{mol/ml}$ )	0,6	1,1
Askorbát ( $\mu\text{mol/ml}$ )	1,06	0,04
Laktát ( $\mu\text{mol/ml}$ )	4,5	1,9
Močovina ( $\mu\text{mol/ml}$ )	6,1	7,3
Glukóza ( $\mu\text{mol/ml}$ )	2,8	5,9
Bílkovina (g/dl)	0,024	7,0
PH	7,21	7,4

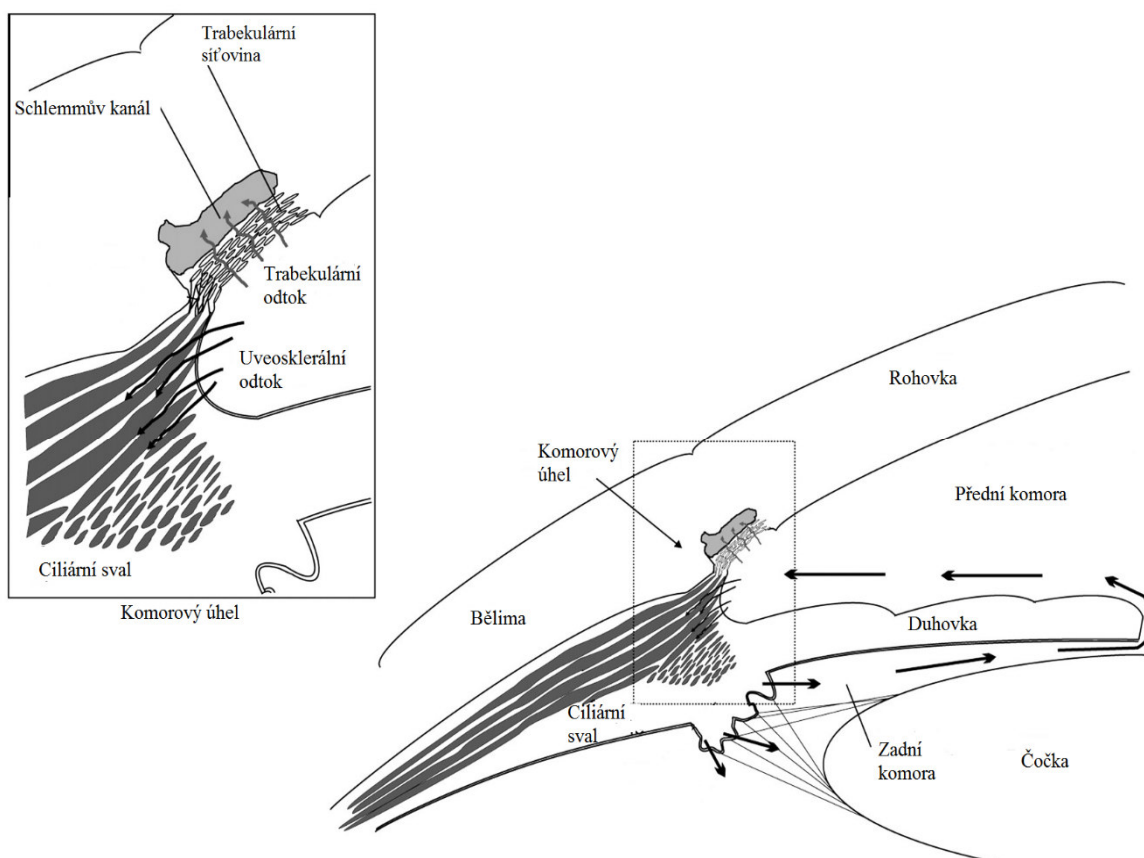
## 2.2 Produkce nitrooční tekutiny

Nitrooční tekutina je tvořena ve výběžcích řasnatého tělesa, které má v průřezu tvar trojúhelníku. Řasnaté těleso se skládá ze svalů, cév a epitelů. Tvorba probíhá aktivní sekrecí, ultrafiltrací a difúzí.

Největší množství komorové vody je produkováno aktivním transportem. Aby byl umožněn pohyb iontů proti elektrochemickému gradientu, je zde vysoká spotřeba energie. Takto jsou sekretovány  $\text{Na}^+$  kationty,  $\text{Cl}^-$  anionty a bikarbonáty. Bikarbonáty vytvářejí osmotický gradient a na základě tohoto gradientu proniká  $\text{H}_2\text{O}$  do vytvářející se nitrooční tekutiny.

Látky rozpustné v tucích pronikají do nitrooční tekutiny difúzí přes lipidovou složku membrán. [14, 15]

Množství vytvořené nitrooční tekutiny za 24 hodin se pohybuje kolem 2-5  $\mu\text{l}/\text{min}$ . V průběhu dne tvorba komorové vody kolísá jen minimálně, naopak během noci se množství vytvořené tekutiny sníží na polovinu běžného denního množství a nejnižší množství bývá od půlnoci do 6 hodin ráno. [14]



Obrázek 5b: Odtok nitrooční tekutiny [17]

## 2.3 Cirkulace

Cirkulace komorové vody je důležitá pro vykonávání funkcí, kterými jsou výživa avaskulárních tkání, udržení konstantního prostředí a odstranění odpadních látek metabolismu. [14, 15]

Rozeznáváme primární a sekundární komorový mok. Primární komorový mok vstupuje do zadní komory, kde se jeho složení mění reabsorpční tkání a obsahem odpadních látek metabolismu. Takto pozměněná komorová tekutina se nazývá sekundární komorový mok, který vstupuje přes zornici do přední komory oka, kde cirkuluje díky rozdílné teplotě duhovky a rohovky. [1, 13, 14]

## 2.4 Odtok nitrooční tekutiny

Nitrooční tekutina je z oka odváděna dvěma cestami, konvenčními a nekonvenčními (obr. 5a, 5b). Konvenčními cestami nazýváme odtok trámčinou do Schlemmova kanálu, dále přes vodní vény pryč z oka, touto cestou je odvedeno 80-90 %. Uveosklerálními odtokovými cestami (nekonvenční cesty) je odvedeno zbylých 10-20 %. [14]

### 2.4.1 Konvenční cesty

Trámčina komorového úhlu ohraničuje přední komoru a částečně tvoří vnitřní část Schlemmova kanálu. Skládá se ze tří vrstev: uveální, korneosklerální a juxtakanalikulární. Uveální vrstva je tvořena trámci, které se rozkládají od duhovky a ciliárního tělesa až k rohovce. V této vrstvě jsou póry mezi trámci velké 25-75  $\mu\text{m}$ . Druhou vrstvou je vrstva korneosklerální, póry zde mají tvar elipsy a blíže ke Schlemmově kanálu se zmenšují. Přes juxtakanalikulární vrstvu se pomocí pinocytózy dostává komorová tekutina do Schlemmova kanálu a tato vrstva vystýlá i jeho vnitřní povrch. Trámčinu tvoří různé druhy tkání, jako jsou kolagenní fibrily, elastická vlákna, glykosamidy a glykoproteiny. Povrch trámců pokrývá endotel, který se podílí na imunitních pochodech, je schopný fagocytace a degradace nežádoucího materiálu. [14, 15]

Schlemmův kanál obklopuje celý obvod komorového úhlu. Obvykle má tvar elipsy a jeho průměr je 180-370  $\mu\text{m}$ . Po celém obvodu z něj vycházejí Ascherovy vodní vény, které prochází sklérou a putují do episklerálních a konjunktiválních vén. [14, 15]

### Nekonvenční cesty

Nitrooční tekutina odtéká z oka přes kořen iris do supraciliárního a suprachoroidálního prostoru. Odtéká podél cév a nervů přítomných ve sklěře. Část tekutiny proniká do cév duhovky, ciliárního svalu a také choroidey. [14, 15]

## 3 Nitrooční tlak

Nitrooční tlak je udáván jako poměr mezi rychlostí sekrece a odtoku nitrooční tekutiny. Dále také závisí na odporu, který je tvořen odtokovou trámčinou a na episklerálním venózním tlaku. Rychlost odtoku komorové tekutiny je úměrná rozdílu nitroočního tlaku a episklerálního venózního tlaku. [16]

Nitrooční tlak je vyjádřen pomocí rovnice:

$$P_i - P_e = \text{průtok nitrooční tekutiny} \times R \quad (2)$$

kde  $P_i$  je nitrooční tlak,  $P_e$  je tlak v episklerálních vénách a  $R$  je odpor v komorové trámčině. [3]

Normální hodnoty nitroočního tlaku se v běžné populaci pohybují mezi 10-20 mmHg (1,3-2,9 kPa), ale přesná hranice pro patologii není dána. Hodnota 21 mmHg je považována za limit fyziologických hodnot u normálního oka. Vyšší hodnoty jsou indikací pro vyšetření terče zrakového nervu pomocí optické koherentní tomografie. Pokud nejsou přítomny funkční a morfologické změny na terči zrakového nervu, nehovoříme o glaukomu, ale o oční hypertenzi. [2, 16]

Za kritickou hodnotu nitroočního tlaku se považuje  $31 \pm 2,5$  mmHg, při této hodnotě dochází k poruše cévního zásobení oka. Pokud je tato hodnota překročena, dochází k nevratným změnám trvale poškozujících zrakový systém. [2]

Hladina nitroočního tlaku se mění v průběhu dne, ráno je tlak vyšší, a naopak odpoledne nebo večer bývá nejnižší. Dále je závislý také na tepové frekvenci, krevním tlaku a dýchání. Fluktuace hodnot nitroočního tlaku je kolem 5 mmHg. [16]

### 3.1 Faktory dlouhodobě ovlivňující nitrooční tlak

#### Věk

S rostoucím věkem se hodnoty nitroočního tlaku zvyšují, jelikož dochází k degenerativním změnám v odtokových cestách. U kojenců se hodnoty pohybují mezi 8-11 mmHg a u předškolních dětí dosahují hodnoty 14 mmHg. [14]

#### Genetika

Hodnoty nitroočního tlaku jsou v populaci podmíněny kombinací genetických a negenetických faktorů. U glaukomových onemocnění bývá až 80% z nich zapříčiněno multifaktoriální a polygenní dědičností, a naopak jen 20% má genetický podklad. [14]

#### Oční onemocnění

Některá onemocnění, jako například iridocyklitida a reumatogenní odchlípení sítnice, mohou snižovat nitrooční tlak. Při těchto onemocněních dochází ke snížení produkce, zvýšení odtoku přes trhliny sítnice nebo ke kombinaci obou mechanismů. [14]

### 3.2 Faktory krátkodobě ovlivňující nitrooční tlak

#### Poloha

Změna polohy ze sedu do lehu krátkodobě zvýší hodnotu nitroočního tlaku až o 6 mmHg u zdravého člověka, u glaukomatika jsou tyto změny vyšší.

#### Námaha

Dlouhodobá námaha (např. běh) snižuje hodnoty nitroočního tlaku, tyto změny jsou dobře pozorovatelné u mladých jedinců, ale míra změny tlaku se liší. [14]

#### Víčka a oční pohyby

Křečovitě svírání víček, široké rozevření víček, nebo jen pohled nahoru zvyšují nitrooční tlak, naopak opakované mrkání nitrooční tlak snižuje. [14]

#### Léky a potraviny

Při podávání steroidů dochází u 60% běžné populace k mírnému zvýšení tlaku a zbylých 40% reaguje výrazným zvýšením nitroočního tlaku. Tyto reakce se objevují až po 5-8 týdnech užívání. Dále mydriatika a anticholinergní léčiva mohou vyvolat akutní glaukomový záchvat.[14]

Alkohol a drogy, jako jsou heroin a marihuana, snižují nitrooční tlak. Je prokázáno, že pravidelné malé dávky konopí dlouhodobě snižují hodnoty nitroočního tlaku, ale dochází ke zhoršení kvality slzného filmu, vysušování očí a s tím spojenému zarudnutí. Dále se tlak snižuje při celkové anestezii nebo při podání lokálních anestetik [16, 18].

## 4 Měření nitroočního tlaku

Měření nitroočního tlaku patří mezi základní vyšetřovací metody. V klinické praxi je používáno několik způsobů dle toho, pro jaký účel hodnoty nitroočního tlaku zjišťujeme. Pokud chceme např. stanovit diagnózu glaukomu, mělo by být měření co nejpřesnější, zatímco pro běžné vyšetření stačí metoda jednodušší.

### 4.1 Historie

Historie měření nitroočního tlaku sahá až do roku 1622, Richard Banister jako první odhadl vysoký nitrooční tlak, kdy vyvíjel tlak na bulbus pomocí prstů. Palpační tonometrie se po několik století stala základní metodou pro zjišťování přibližné hodnoty nitroočního tlaku. Na konci 19. století byl představen první mechanický tonometr, avšak oftalmologové nevěřili nové technologii. V této době panoval názor, že zkušený doktor je schopen zjistit hodnotu nitroočního tlaku lépe než přístroj. [14]

S prvními pokusy o vytvoření přístroje na mechanické měření nitroočního tlaku je spojováno jméno Albrecht von Graefe, ačkoliv jeho navrhované přístroje nebyly nikdy sestavené. První přístroj schopný měřit nitrooční tlak vytvořil německý oftalmolog Franciscus Donders, v roce 1880 tento přístroj přepracovali Smith a Lazerat, poprvé změřili zakřivení skléry a stanovili hloubku indentace vytvořenou tyčinkou tonometru. [14]

O 4 roky později, Carl Koller objevil využití kokainu jako anestetika, tento objev vedl k rozvoji impresní tonometrie a dal základ měření nitroočního tlaku přes rohovku.

Na začátku 20. století, kdy palpační tonometrie stále znamenala zlatý standart pro měření nitroočního tlaku, Hjalmar Schiøtz sestrojil první běžně využívaný aplanační tonometr. Již o 10 let později Schiøtzův tonometr nahradil palpační tonometrii a přispěl tak k rozšíření vědomostí o glaukomu. [14]



Tato situace trvala až do roku 1950, kdy byl sestrojen Goldmannův aplanační tonometr. Tento tonometr je i v současné době považován za zlatý standart aplanační tonometrie i přesto, že u 30 % měření dochází k chybě. [14]

Na konci 50. let 20. století McKay a Marg sestrojili tonometr, který kombinoval jak aplanační, tak indentační tonometr. Oproti Goldmannově aplanační tonometrii nebyl závislý na rohovkových parametrech, a proto byl lépe využitelný u nepravidelně zakřivených rohovek. Tento tonometr byl vyráběn jen omezenou dobu, proto jeho místo nahradil Tonopen, který funguje na stejném principu. Tonopen našel své uplatnění hlavně při vyšetření ležících pacientů nebo při operacích. Jelikož je možné měřit tlak i přes terapeutické kontaktní čočky, umožňuje měření i pacientů s popáleninami nebo chronickými neurotrofickými vředy. [19, 20]

Až do roku 1970 bylo pro měření nitroočního tlaku zapotřebí anestezie rohovky, v tomto roce se v tonometrii uskutečnila změna, když Dr. Bernard Grollmann vytvořil bezkontaktní tonometr, který pro aplanaci rohovky využíval proud vzduchu, a proto nebylo zapotřebí použití anestezie. [19, 20]

## 4.2 Palpační tonometrie

Palpační tonometrie je nejstarší a nejjednodušší metoda pro zjištění orientační hodnoty nitroočního tlaku. Tato metoda je základní znalostí oftalmologů, avšak vyžaduje značné zkušenosti. Při palpační tonometrii se pacient kouká směrem dolů a je nutné, aby oči zůstaly otevřené. Vyšetřující stanovuje fluktuaci bulbů střídavě ukazováčky přes horní víčka, dále porovnává rozdíly mezi pravým a levým okem. Tato metoda nahrazuje kvantitativní metody měření u stavů, kdy nejde použít klasický tonometr, lze ji provést téměř v jakékoliv poloze pacienta a u všech věkových kategorií. [21, 22]

## 4.3 Impresní tonometrie

Jedna z prvních metod, která byla využívána již na začátku 20. století. Tato metoda se řadí mezi kontaktní metody, rohovka je stlačena pomocí pístu umístěného uprostřed kontaktní plošky, jejíž zakřivení odpovídá průměrnému zakřivení rohovky. Jelikož se jedná o kontaktní metodu, je nutné použít anestezii rohovky. [3, 23]

### 4.3.1 Schiøtzův impresní tonometr

Typickým impresním tonometrem je tonometr Schiøtzův (obr.6). Skládá se ze základny, kde jsou umístěna místa pro držení přístroje a kontaktní plošky, která se přikládá na znečitlivělou rohovku a má zakřivení jako průměrná rohovka. Uprostřed této plošky je zakončení pelotky, na kterou se připevňují závaží. V horní části je umístěna stupnice, na které ručička spojená s pelotkou ukazuje hloubku stlačení rohovky.



Obrázek 6: Schiøtzův impresní tonometr [24]

Dílky na stupnici jsou v poměru 1:20, to znamená, jeden díl stupnice se rovná 0,05 mm hloubky imprese. Hodnoty závaží umístěvaného na válcovou tyčinku (pelotku) jsou 5,5 g, 7,5 g, 10 g a 15 g. Podle váhy závaží a počtu dílků ukázaných na stupnici, lze v tabulkách zjistit přesnou hodnotu nitroočního tlaku.

Pacient při vyšetření leží na zádech a fixuje bod na stropě. Na znečitlivělou rohovku se přiloží tonometr ve vertikální rovině tak, aby ručička byla volně pohyblivá. Obvykle se začíná s 5,5g závažím, ale pokud se ručička nevychýlí alespoň o 4 dílky, je nutné zvýšit hodnotu závaží. Pokud je tonometr správně umístěn, je možné pozorovat výkyvy ručičky, které odpovídají pulsu vyšetřovaného. Z těchto výkyvů se určí průměrná hodnota a poté se podle tabulky (tab.2) určí hodnota nitroočního tlaku. [14, 23, 25]

Pokud má pacient oční infekci nebo úraz, nelze tímto přístrojem vyšetření provádět.

Tabulka 2: Převodní tabulka hodnot, Schiøtzův impresní tonometr [26]

Hodnota na stupnici	Hodnota tlaku pro závaží 5,5 g [ <i>mmHg</i> ]	Hodnota tlaku pro závaží 7,5 g [ <i>mmHg</i> ]	Hodnota tlaku pro závaží 10,0 g [ <i>mmHg</i> ]
3,0	24,4	35,8	50,6
4,0	20,6	30,4	43,4
5,0	17,3	25,8	37,2
6,0	14,6	21,9	31,8
7,0	12,2	18,5	27,2
8,0	10,2	15,6	23,1
9,0	8,5	13,1	19,6
10,0	7,1	10,9	16,5

V přepočtových tabulkách se používá průměrná hodnota koeficientu rigidity K, protože se předpokládalo, že všechny rohovky mají stejné biomechanické vlastnosti a na zátěž odpovídají stejně. Zde mohou vzniknout chyby měření, jelikož u hypermetropie nebo oční hypertenze je rigidita vysoká, a proto hodnoty nitroočního tlaku budou falešně vysoké. Naopak s nízkou rigiditou se můžeme setkat u myopie, po operacích a po laserových refrakčních zákrocích, v tomto případě budou naměřené hodnoty nižší. [14]

Chyby v měření se mohou vyskytovat i díky faktu, že na rohovku nepůsobí jen hmotnost závaží, ale hmotnost celého přístroje. [2]

## 4.4 Aplanační tonometrie

Aplanační tonometrie je založena na modifikovaném Imbert-Fickově zákoně. Tento zákon říká, že tlak, který je uvnitř ideální koule se rovná síle, kterou musíme vynaložit na aplanaci této koule danou plochou. Imbert-Fickův zákon vyžaduje, aby daná plocha byla dokonale sférická, suchá, flexibilní a stejně tenká. Jelikož rohovka nesplňuje tyto vlastnosti, byl modifikován tento zákon, kdy je zohledněna vlhkost, rigidita a různá tloušťka. [14, 27]

Rovnice modifikovaného Imbert-Fickova zákona,

$$F+T=P_n \cdot S_1+B \quad (3)$$

kde  $F$  je velikost vnější síly,  $T$  je povrchové napětí,  $P_n$  je tlak,  $S_1$  je aplanovaná plocha a  $B$  je síla potřebná k oploštění rohovky (nezávisle na hodnotě nitroočního tlaku) [14].

### 4.4.1 Goldmannův aplanační tonometr

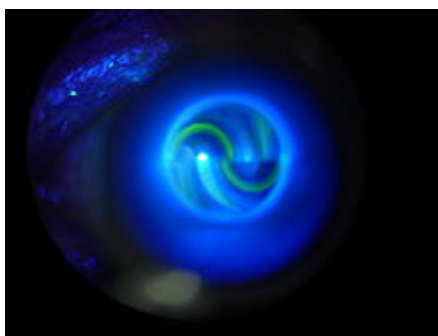
Goldmannova aplanační tonometrie (obr.7) se celosvětově považuje za „zlatý standard“ v měření nitroočního tlaku, jelikož se jedná o jednu z nejpřesnějších metod. Obvykle je součástí štěrbinové lampy a měření se provádí ve stejné pozici jako vyšetření štěrbinovou lampou. Jedná se o kontaktní metodu vyžadující anestezii rohovky a obarvení slzného filmu fluoresceinem. [14, 20]



Obrázek 7: Goldmannův aplanační tonometr [28]

Tonometr se skládá z dvojlomného prizmatu v objímce, které je dále spojeno s tělem přístroje. Uvnitř těla se nachází soustava závaží přenášející sílu na prizma a po straně se nachází regulační prvek se stupnicí. Podle Goldmanna byl stanoven průměr aplanace prizmatem na 3,06 mm, protože při tomto průměru lze zanedbat povrchové napětí, korneální rigiditu a vliv skléry. [20]

Měření se provádí na štěrbinové lampě, kdy pacient sedí a má opřenou bradu i čelo na opěrce. Lokálním anestetikem se znecitliví rohovka a obarví se slzný film fluoresceinem. Pro pozorování na štěrbinové lampě je nutné nastavit modrý filtr a otevřít aperturu osvětlení. K aplanaci dochází při kontaktu rohovky s prizmatem, vyšetřující pomocí štěrbinové lampy pozoruje dva půlkruhy o průměru 3,06 mm (obr.8). Je-li přítomen vyšší astigmatismus, mohou mít půlkruhy eliptický tvar. Otočným regulátorem vyšetřující nastaví sílu tak, aby se půlkruhy dotýkaly vnitřní stěnou. Tato síla odpovídá hodnotě nitroočního tlaku. Vyšetření vyžaduje spolupráci pacienta, je potřeba aby se díval přímo vpřed a měl široce otevřené oči. U nespolupracujících klientů se víčka musí přidržet. [14, 20]



Obrázek 8: Obraz rohovky štěrbinovou lampou [29]

#### 4.4.2 Perkinsův tonometr

Perkinsův aplanační tonometr využívá stejný princip jako Goldmannův aplanační tonometr. Na rozdíl od Goldmannova tonometru je přenosný a lze jej využít zejména u dětí, ležících pacientů nebo na operačních sálech. Pro horizontální posun půlkruhů je také použit dvojlomný hranol a k jeho osvětlení se využívá žárovka napájená baterií. Přesnost měření je obdobná jako u Goldmannova tonometru. [14, 23, 25]

#### 4.4.3 Mackayův-Margův tonometr

Je prvním z tonometrů, u kterého je využívána kombinace impresní a aplanační tonometrie. Rohovka je aplanována jednotkou složenou z objímky, v jejíž středu je vyčnívající píst o průměru 1,5 mm. Píst je spojen s velice citlivým převaděčem, který převádí posun pístu na elektrický signál a zapisuje jej na papír podobně jako elektrokardiogram.

Při kontaktu pístu s rohovkou se rohovka aplanuje, vlivem odporu rohovky a nitroočního tlaku roste síla působící na píst. Jakmile je dosaženo průměru u aplanované plochy 1,5mm, síla působící na rohovku se přenáší na objímku. V tento moment měření končí. Pokud se pokračuje dále, rohovka je více aplanovaná a jsou získávány falešné hodnoty tlaku.

Tento typ tonometru není tak ovlivňován vlastnostmi rohovky jako Goldmannův aplanační tonometr. Lze jej využít u nepravidelně zakřivených rohovek. [14, 19]

#### 4.4.4 Tonopen

Jedná se o přenosnou verzi MacKay-Margova tonometru, může být proto použit v jakékoli poloze pacienta (obr.9). Hodnoty nitroočního tlaku jsou převáděny na elektrický signál vyhodnocovaný zabudovaným mikroprocesorem. Přístroj provádí 4-10 měření a tyto hodnoty poté zprůměruje.[14, 25]



Obrázek 9: Tonopen [35]

#### 4.4.5 Pneumotonometr

Pneumotonometr využívá princip MacKay-Margova tonometru, navíc je součástí přístroje i tonograf, který měří odtokovou snadnost nitrooční tekutiny. Přístroj se skládá z komory naplněné plynem, která je pokrytá silikonovým elastomerem. Při kontaktu s rohovkou se plyn stlačí a tlak v komoře vzroste. Tlak vzduchu potřebný k aplanaci rohovky je měřen pneumatickým senzorem. Hodnota tlaku se zaznamenává v reálném čase a lze jej využít u rohovek s jizvami nebo edémem. [14, 20, 25]

#### 4.4.6 Dynamická konturní tonometrie

Digitální kontaktní tonometr, s možností upevnění na štěrbinovou lampu, měří nitrooční tlak nezávisle na vlastnostech rohovky. Rohovky se dotýká hlavice přístroje, která má konkávní tvar kopírující parametry rohovky, tento tvar umožňuje, že v místě kontaktu nevzniká pnutí a tlak je na obou stranách rohovky stejný. Pro měření tlaku se používá piezoelektrický tlakový senzor umístěný v hlavici přístroje, zaznamenávající hodnoty až 100x za minutu. [2, 14, 25].

## 4.5 Bezkontaktní tonometrie

U kontaktních tonometrů je vždy riziko zanesení infekce do oka a pozůstatky desinfekce na kontaktních plochách tonometrů mohou narušit povrch oka. To vedlo v 2. polovině 20. století k vytvoření prvního bezkontaktního tonometru. V dnešní době se s tímto typem tonometru můžeme setkat v přístrojích, které kombinují více funkcí, jako je pachymetrie nebo keratometrie (obr.10). Bezkontaktní tonometry využívají princip aplanace centrální části rohovky proudem vzduchu. Průměr aplanované plochy je  $3,6 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$  a rychlost proudu vzduchu roste lineárně, pohybuje se mezi 1-3 m/s. Základními prvky bezkontaktních tonometrů jsou generátor vzduchového pulsu, zdroj světla, který pod určitým úhlem od zdroje vzduchu vysílá paprsky světla a fotodetektor snímající odražené paprsky od aplanované rohovky. [2, 14, 25]



Obrázek 10: Bezkontaktní tonometr [30]

Při vyslání proudu vzduchu jsou současně vyslány paralelně uspořádané paprsky, pokud rohovka není aplanovaná, paprsky se odráží divergentně tzn. mimo fotodetektor. Naopak při oploštění rohovky se paprsky odrazí přímo do fotodetektoru a je snímána intenzita dopadajícího světla. Doba od vyslání pulsu vzduchu až po zaznamenání maximální intenzity světla na fotodetektoru je přímo úměrná výši nitroočního tlaku.

Bezkontaktní tonometry jsou velice přesné, pokud se hodnoty nitroočního tlaku pohybují do 35 mmHg, u vyšších hodnot lze očekávat nepřesnosti měření. Přesnost měření může být také ovlivněna výrazným astigmatismem nebo změnami rohovky po úrazu. [2, 14, 25]



## 4.6 Ocular Response Analyzer (ORA)

První přístroj umožňující měření biomechanických vlastností rohovky in vivo (obr.11). Nově definované parametry, kterými jsou hystereze (CH) a faktor rohovkové rezistence (CRF), popisují viskoelastické vlastnosti rohovky. Dále je měřen nitrooční tlak (IOPg), který je srovnatelný s Goldmannovou aplanační tonometrií, centrální tloušťka rohovky (CCT) měřená vestavěným ultrazvukovým pachymetrem a nitrooční tlak nezávislý na centrální tloušťce rohovky (IOPcc) [31, 32].

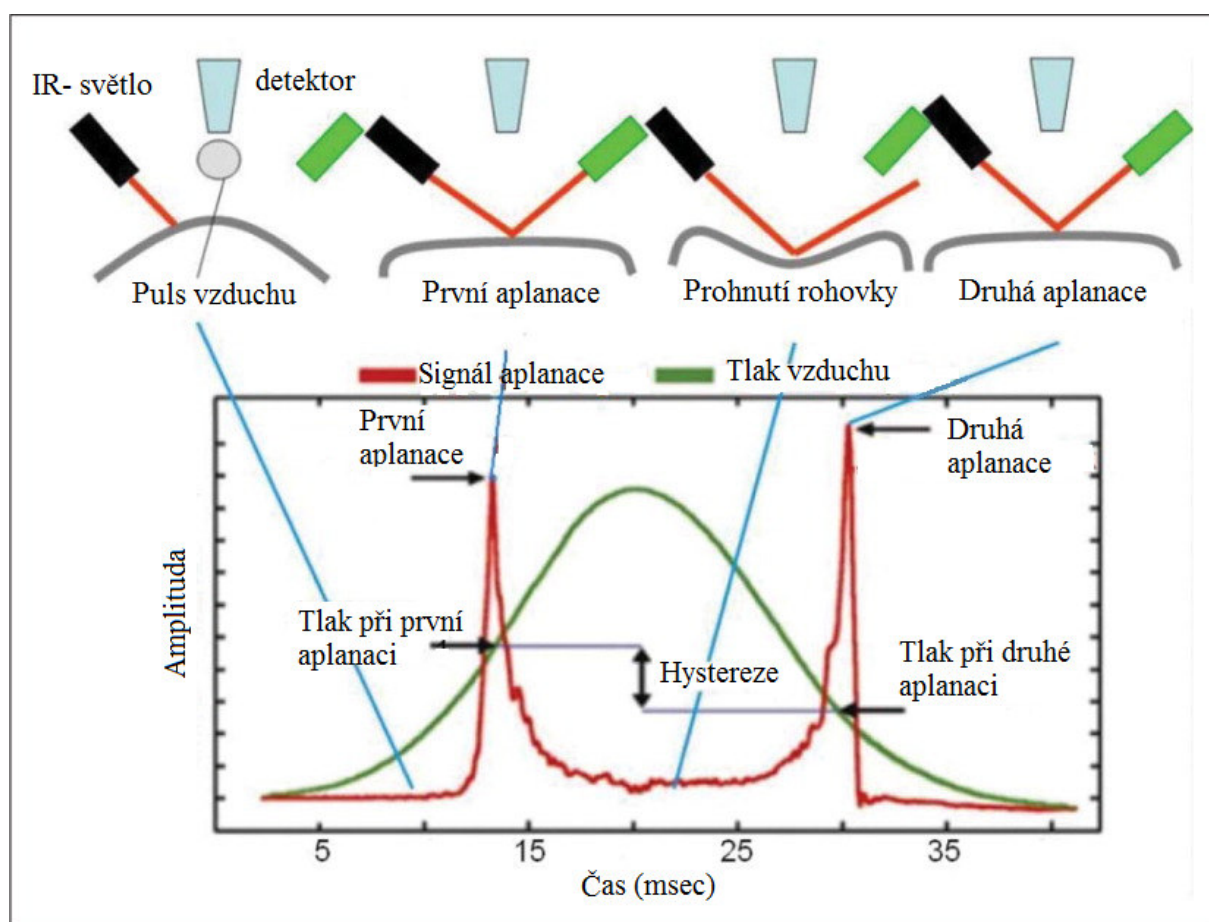


Obrázek 11: Ocular response analyzer [33]

Znalost viskoelastických vlastností může poukázat na riziko ektatického onemocnění, Fuchsovy endoteliální dystrofie, a pomoci pochopit patofyziologii glaukomu. [19]

Ocular Response Analyzer využívá dvousměrný aplanační proces s přesně odměřeným impulsem pro aplanaci rohovky a detektor aplanace, kterým je elektrooptický systém pro sledování korneální deformace. Celé měření trvá mezi 10-20 msec oproti normální bezkontaktní tonometrii, kdy tento proces trvá okolo 3 msec.

Puls vzduchu působící na rohovku způsobí, že se rohovka nejdříve oploští, tento moment je zaznamenán jako první aplanace. Tlak vzduchu dále působí na rohovku a dochází k deformaci do konkávního tvaru. Jakmile klesá síla proudu vzduchu, rohovka se začne vracet do původního tvaru, v této chvíli dochází k druhé aplanaci. Obě tyto hodnoty jsou měřené detektorem aplanace, ale v důsledku biomechanických vlastností tkáně a dynamické povaze proudu vzduchu se hodnoty od sebe liší. Rozdíl mezi těmito hodnotami udává korneální hysterezi (CH) a jejich průměrná hodnota odpovídá hodnotě nitroočního tlaku srovnatelné s Goldmannovou aplanací tonometrií (obr. 12). [19, 31, 32].



Obrázek 11: Schéma průběhu měření, výsledný graf [34]

## 5 Glaukom

Glaukom je skupina chronických očních chorob, u kterých je charakteristické poškození zrakového nervu. Jedná se o multifaktoriální onemocnění, u kterého se projevují jak genetické faktory, tak i negenetické. Kombinace mnoha faktorů vede ke ztrátě gangliových buněk sítnice a k progresivní neuropatii optiku. Pokud není nitrooční tlak udržován na normální hodnotě, dochází k výpadkům zorného pole a ztrátě vidění.

Zpravidla jde o asymptomatické onemocnění, proto může být diagnostikován až v jeho rozvinutém stadiu. Pokud jde o akutní glaukomový záchvat, může neléčený pacient oslepnout během několika hodin nebo dnů.

První zmínky o glaukomu jsou již z roku 400 před n.l., kdy Hippokrates popsal barvu pupily jako „glaukosis“- nazelenalá. Do roku 1705 se domnívali, že se jedná o onemocnění čočky. Ale až v tomto roce byla popsána katarakta jako onemocnění čočky a glaukom jako onemocnění „za čočkou“. Na začátku 19. století Purkyně vydal spis, ve kterém charakterizoval vliv tlaku na buňky sítnice a na zrakový nerv. Již v polovině 19. století vynález oftalmoskopu umožnil popsání glaukomového postižení optiku a vztah ke změnám v zorném poli. K rozvoji znalostí o glaukomu významně přispěly vynálezy tonometrů, tonografů, perimetrů a jiných diagnostických pomůcek. Glaukom byl spojován s vysokým nitroočním tlakem až do 20. století, kdy bylo zjištěno, že u některých pacientů nemá hodnota nitroočního tlaku vliv na vznik onemocnění. [1, 2, 36]

## 5.1 Klasifikace

Základní dělení glaukomu je podle příčiny vzniku a šíře komorového úhlu. Pro běžnou klinickou praxi je dělení následující (tab.3): vývojový glaukom (v dětském věku), primární glaukom a sekundární glaukom. [1]

Tabulka 3: Klasifikace glaukomu [1]

primární glaukom	s otevřeným úhlem (POAG)	primární glaukom s otevřeným úhlem
		glaukom s normální tenzí (NTG)
		oční hypertenze
	s uzavřeným úhlem (PACG)	akutní primární glaukom s uzavřeným úhlem (AACG)
		intermitentní primární glaukom s uzavřeným úhlem (IACG)
chronický primární glaukom s uzavřeným úhlem (CACG)		
sekundární glaukom	s otevřeným úhlem	způsobený očními chorobami
		iatrogenní glaukomy
	s uzavřeným úhlem	glaukom s pupilárním blokem
		glaukom bez pupilárním blokem
		glaukom bez pupilárního bloku v důsledku misdirekce
vývojový glaukom	kongenitální glaukom	
	infantilní glaukom	
	juvenilní glaukom	

## 5.2 Vývojový glaukom

Vývojový glaukom je obvykle zapříčiněn změnami v úhlu přední komory, který je způsoben špatným vývojem oka. Vývojový glaukom můžeme rozdělit podle doby manifestace. Kongenitální se objeví do tří měsíců věku dítěte, infantilní od tří měsíců do tří let a juvenilní od tří let věku jedince.

Prvotními příznaky vrozeného glaukomu je slzení, světloplachost nebo zvětšený průměr rohovek. Jelikož nitrooční tekutina proniká snáze do rohovky, je zde přítomen edém rohovky nebo difúzní opacita rohovky. [1, 2, 36]

Všechny typy glaukomů můžeme dále rozdělit na primární a sekundární, kdy primární glaukom je způsoben pouze změnami v komorovém úhlu a tvoří 70 % ze všech vývojových glaukomů. Sekundární glaukom je charakteristický nejen změnami v komorovém úhlu, ale jsou zde přítomné další systémové nebo oční abnormality. [1, 2, 36]

## 5.3 Primární glaukom

Prvotní mechanismus primárního glaukomu není znám, protože na tomto typu glaukomu se nepodílí jiná onemocnění nebo zranění. [1, 2, 36]

### 5.3.1 Primární glaukom s otevřeným úhlem (POAG)

Glaukom s otevřeným úhlem se často nazývá chronický prostý glaukom. Hlavními projevy jsou zvýšená hodnota nitroočního tlaku, změny na terči zrakového nervu, výpadky v zorném poli a normální otevřený komorový úhel. Postiženy bývají obě oči, avšak často asymetricky.

Průběh onemocnění je obvykle asymptomatický, od začátku zvyšování nitroočního tlaku může uplynout několik let. Na terči zrakového nervu dochází k postupné glaukomové neuropatii, postižení terče zrakového nervu a gangliových buněk se projevuje postupnou ztrátou zorného pole. Nejprve skotomy vznikají v periférii a v oblasti fixace se projevují až v pozdním stadiu nemoci. Již při ztrátě 25 % až 35 % gangliových buněk sítnice se projevují změny zorného pole a jedná se o pokročilou fázi onemocnění.

Hlavním rizikovým faktorem je věk - postihuje osoby vyššího věku bez rozdílu pohlaví, v rozvinutých zemích tímto onemocněním trpí 2,1 % obyvatel ve věku 40 let a výše. Další roli může mít i rasa, jelikož u černošské populace je výskyt častější a onemocnění má horší průběh. Pokud se u přímých příbuzných objevuje glaukom, je riziko dědičnosti onemocnění až 10 %. Dále onemocnění postihuje často diabetiky a myopy. [1, 2, 36]

### 5.3.2 Primární glaukom s uzavřeným úhlem (PACG)

Glaukom s uzavřeným úhlem se v populaci vyskytuje v menším počtu než glaukom s otevřeným úhlem. V tomto případě je uzavřen komorový úhel a nitrooční tekutina se hromadí v přední i zadní komoře. [2]

Často se objevuje u jedinců s hypermetropií, menší rohovkou nebo u starších jedinců, kdy čočka zvětšuje svůj objem a tlačí na duhovku. Působením tlaku na duhovku nebo dlouhodobou mydriázou duhovka nalehne na trabekulární systém a znemožní odtok tekutiny. Nejčastějším projevem jsou akutní ataky, které vznikají při snížené intenzitě světla v prostředí, emočním rozrušením nebo při čtení na břicho. [2]

Průběh onemocnění má obvykle tři stádia, kdy prvním stádiem je klidové, pacient nepocítuje žádné změny. Druhým je prodromální stádium, při němž se objevuje přechodné rozmížení, irizace okolo světla a bolest poloviny hlavy. Tyto obtíže zmizí, zvýší-li se intenzita světla. Posledním stádiem bývá glaukomový záchvat s prudkými bolestmi poloviny hlavy, nauzeou, světloplachostí, edémem epitelu a širokou zornicí. Tyto symptomy jsou indikací k okamžitému vyhledání lékaře, jinak může během několika hodin dojít ke slepotě postiženého oka. [2]

### 5.3.3 Normotenzní glaukom (NTG)

U tohoto typu onemocnění se glaukomové změny objevují i přesto, že hodnota nitroočního tlaku není vyšší než 21 mmHg. Projevuje se neuropatií optiku v důsledku zhoršení cévního zásobení zrkového terče, dále se na vzniku podílí jiná oční, systémová, vaskulární nebo neurologická onemocnění. [1, 2, 36]

### 5.3.4 Oční hypertenze

Hodnoty nitroočního tlaku na jednom nebo obou očích jsou při 2 a více tonometrických měřeních vyšší než 21 mmHg, ale není přítomno oční onemocnění, které by způsobovalo vyšší nitrooční tlak. Neobjevují se zde nálezy jako u glaukomu, kterými jsou výpadky zorného pole a neuropatie optiku. Prakticky není možné odlišit oční hypertenzi od latentního glaukomu a jedinci jsou pravidelně sledováni a jsou jim podávány kapky na snížení nitroočního tlaku. [2]

## 5.4 Sekundární glaukom

Sekundární glaukomy jsou charakteristické přítomností jiného systémového nebo očního onemocnění, které se podílí na zvýšení nitroočního tlaku. Mezi časté příčiny patří záněty, traumata, cévní onemocnění a nádory. V těchto případech se lečí nejdříve primární onemocnění, které vedlo k rozvoji glaukomu.

Glaukomy sekundární, stejně jako primární, jsou rozdělené na glaukomy s otevřeným úhlem a s uzavřeným úhlem. [1, 2, 36]

### 5.4.1 Sekundární glaukom s otevřeným úhlem

Nitrooční tlak se zvyšuje v důsledku omezení odtoku nitrooční tekutiny, které je zapříčiněno přítomností patologického materiálu z očního onemocnění. Léčba a prognóza se vztahuje k primárnímu onemocnění. [2]

#### **Pseudoexfoliativní glaukom (PEX glaukom)**

Příčinou PEX glaukomu je porucha bazálních membrán, která se vyskytuje ve vyšším věku. Typickým znakem jsou fibrilární materiálová depozita, lokalizovaná na přední ploše čočky, okraji zornice, řasnatém tělese a v trámčině úhlu. Zvyšující se hladina nitroočního tlaku je hůře ovlivnitelná pomocí léků, proto je indikována laserová trabekuloplastika. [1, 2, 36]

#### **Pigmentový glaukom**

Pigmentový glaukom je charakteristickým nálezem pigmentu v trámčině komorového úhlu, na čočce a duhovce. Pigment v přední komoře je způsoben atrofií pigmentového epitelu duhovky, Zonulární vlákna jsou v kontaktu se zadním listem duhovky a pigment se uvolňuje. Nitrooční tlak kolísá během dne podle fyzické aktivity a dilatací zornice, preventivně se podávají miotika a parasymptomimetika. Zpravidla se také využívá chirurgická intervence. [1, 2, 36]

#### **Čočkou indukovaný glaukom**

Zamezení odtoku nitrooční tekutiny vzniká při úrazech, kdy dochází k luxaci nebo subluxaci čočky, uvolněné části čočky se usazují v trámčině komorového úhlu a brání odtoku. Dále může vznikat při uvolnění proteinu z čočky u zralé nebo přezrálé katarakty – fakolytický glaukom. Reakce autoimunitního systému na čočkový protein způsobuje fakoanalytický glaukom, výskyt tohoto typu glaukomu je hlavně po operacích katarakty a úrazech. Léčba prvotní příčiny spočívá v chirurgickém odstranění fragmentů čočky a v podávání protizánětlivých léků. [1, 2, 36]

### **Glaukom hemolytický**

Způsobený nitroočním krvácením, blokáda komorového úhlu je zapříčiněna nahromaděním krvinek nebo jiných složek krve. [2]

### **Glaukom způsobený nitroočním zánětem**

Hromaděním zánětlivých mediátorů, buněk a proteinů, je jako u jiných sekundárních glaukomů zamezen odtok nitrooční tekutiny v trávčíně. Záněty jsou způsobovány systémovými chorobami, jako jsou sarkoidóza nebo revmatoidní artritida, dále mohou být způsobeny tuberkulózou, syfilisem nebo jinou oční chorobou. Léčba probíhá lokálními anestetiky a dlouhodobým podáváním léků na snížení nitroočního tlaku. [1, 2, 36]

### **Glaukom způsobený tumorem**

Nitrooční tumory mechanicky brání průchodnosti trávčiny tkáňovými elementy, nádorovými a zánětlivými buňkami. Lečí se chemoterapií, ozařováním nebo chirurgickým zákrokem. [1, 2, 36]

### **Glaukom po úrazech**

Přítomnost cizího tělíska v oku nebo rozkládající se krevní elementy tvoří mechanickou blokádu trávčiny a zvyšují nitrooční tlak. Při poranění kořene duhovky se objevuje hyféma, zvýšení tlaku se může projevit až po delší době a obvykle způsobuje jednostrannou atrofii terče zrakového nervu. [1, 2, 36]

## **5.4.2 Sekundární glaukom s uzavřeným úhlem**

Podle mechanismu vzniku se rozlišuje zadní blok a přední blok. Zadní blok vzniká hromaděním komorové tekutiny v zadní komoře a ve sklivci, zvyšující se objem sklivce vytlačuje čočku oproti duhovce. Uzavřením štěrbin mezi čočkou a duhovkou následně vzniká pupilární blok. Přední blok vzniká hromaděním nitrooční tekutiny v zadní komoře a vytlačovaný kořen duhovky uzavře komorový úhel. Blokády cirkulace a odtoku vedou k náhlému zvýšení nitroočního tlaku až na 50–80 mmHg, což se projevuje akutním glaukomovým záchvatem. [1, 2, 36]



## 6 Diagnostické metody glaukomu

Stanovení diagnózy u glaukomu není vždy jednoduché, jelikož téměř všechny formy jsou v ranných stádiích asymptomatické. Nenahraditelnou součástí jsou tudíž preventivní vyšetření, při kterých je snaha odhalit onemocnění v takovém stavu, kdy nejsou patrné změny v zorném poli, tzv. preperimetrické stadium. [37]

Mezi diagnostické metody patří:

- Anamnéza
- Tonometrie
- Vyšetření zrakové ostrosti
- Gonioskopie
- Vyšetření papily zrakového nervu
- Perimetrie
- Pachymetrie
- Zobrazovací metody

### 6.1 Anamnéza

K časně diagnóze glaukomu napomáhají i informace získané od pacienta. Ze znalostí rizikových faktorů vzniku glaukomu se soustředíme na vysokou myopii, prodělané trauma nebo chirurgické zákroky. Dále na systémové choroby, kterými jsou hypertenze, hypotenze, diabetes mellitus nebo onemocnění štítné žlázy. Největší pozornost je kladena na rodinou anamnézu, výskyt glaukomu v předcházejících generacích nebo oslepnutí může poukázat na možné ohrožení vyšetřovaného tímto onemocněním.

Mezi subjektivními obtížemi pacienta mohou být uváděny jednostranné nebo celkové bolesti hlavy a očí, dále pocit diskomfortu, zamlžené vidění, rychle progredující presbyopie a výpadky zorného pole. [1, 37, 38]

### 6.2 Tonometrie

Metody a průběh měření nitroočního tlaku jsou již popsány v kapitole č. 3.

### 6.3 Vyšetření zrakové ostrosti

Pokud se jedná o ranné stádium nemoci, centrální zraková ostrost nebývá postižena. Při výrazné atrofii optiku dochází k postižení papilomakulárního svazku a je prokazatelně snížena zraková ostrost. U akutního glaukomového záchvatu se jedná o přechodné snížení zrakové ostrosti v důsledku edému rohovky. [1]

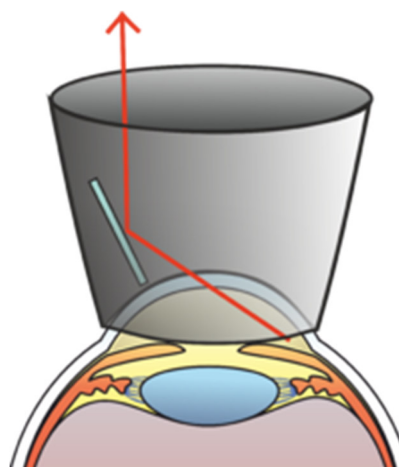
### 6.4 Gonioskopie

Při gonioskopii je vyšetřován úhel přední komory, tedy úhel, který je svírán mezi rohovkou a duhovkou. Pro diagnózu a určení typu glaukomu je toho vyšetření velmi důležité. Podle velikosti úhlu je určeno, zda se jedná o glaukom s otevřeným nebo uzavřeným úhlem (tab.4). Podle přítomných patologických změn v úhlu se dále glaukom rozlišuje na primární nebo sekundární. Patologické struktury, které můžeme najít v komorovém úhlu, jsou novotvořené cévy, srůsty duhovky v komorovém úhlu, pigmentace a bílkovinné usazeniny (pseudoexfoliace). Dále je nutné zaznamenat výšku úponu duhovky a profil periferní duhovky. [1, 39]

V praxi se běžně používá metoda nepřímé gonioskopie, kdy je pacient vyšetřován v sedě. Na znečitlivěný povrch oka se přikládá gonioskopická čočka (obr.13a), která obsahuje jedno až čtyři zrcadla. Paprsek osvětlovací soustavy šterbinové lampy je zaměřen na zrcadlo, dojde k odrazu od zrcadla a tím se osvětlí komorový úhel v protilehlé části (obr.13b). [1]



Obrázek 12: Gonioskopická čočka [45],



Obrázek 13b: Princip zobrazení přes gonioskopickou čočku [44]

Tabulka 4: Rozdělení kategorií dle velikosti úhlu podle Shaffera [1]

	Velikost úhlu	Popis	Uzávěr
Stupeň 4	35- 40°	Široce otevřený	Není možný
Stupeň 3	25- 35°	Otevřený	Není možný
Stupeň 2	20°	Mírně uzavřený s viditelnou trámčinou	Je možný
Stupeň 1	10°	Výrazně úzký úhel s viditelnou horní částí trámčiny nebo štěrbinovitý úhel	Pravděpodobný
Stupeň 0	0°	Struktury úhlu nejsou viditelné, přítomen iridokorneální kontakt	Uzavřený úhel

## 6.5 Vyšetření papily zrakového nervu

K projevu glaukomového onemocnění dochází hlavně na papile zrakového nervu, která je přímo vystavena vlivům vyššího nitroočního tlaku a změnám cévního zásobení. U optické neuropatie dochází ke strukturním změnám papily nervu a sítnicových nervových vláken. Pro určení diagnózy a kontrolu onemocnění se popisují následující charakteristiky: [1]

### Tvar, velikost a barva papily

Terč zrakového nervu má průměr 1,2- 2,5 mm a zaujímá plochu 0,92- 5,54 mm<sup>2</sup>, velikost plochy je dána jak geneticky, tak i etnicky. Pro vyšetření u podezření na glaukom se používají kategorie veliký, střední nebo malý terč. U malé papily je riziko přehlédnutí exkavace vyšší a tím i riziko přehlédnutí morfologických změn. [1]

### Plocha a tvar neuroretinálního lemu

Tvar neuroretinálního lemu přímo koresponduje s tvarem papily. Plocha lemu je nižší na temporální a nazální straně, širší lem nacházíme na horním pólu papily a největší plochu zaujímá lem na dolním pólu. Při glaukomové neuropatii je zjevná ztráta této tkáně, která se projevuje zářezy do lemu nebo difúzní ztrátou. [1]

### Exkavace a cup/disc ratio (C/D poměr)

Exkavace neboli vyhloubení místa na papile zrakového nervu, kde nejsou přítomny axony nebo částečně chybí. V případě glaukomu velikost exkavace odpovídá ztrátě neuroretinálního lemu. C/D poměr popisuje poměr mezi průměrem exkavace a celkovým průměrem papily. Fyziologický C/D poměr je v rozmezí 0,0 do 0,3- 0,4. [1]

### **Přítomnost hemoragie**

Pokud je na papile přítomna hemoragie, obvykle se jedná o známku progresu onemocnění. U zdravých lidí se prakticky neobjevují, u pacientů s glaukomem je nález u 4-7 %. Opakovaný nález poukazuje na systémové onemocnění nebo jinou oční chorobu. [1]

## **6.6 Perimetrie**

Subjektivní metoda stanovující rozsah zorného pole. Podle charakteristického umístění defektů zorného pole lze rozpoznat, zda se jedná o úbytek gangliových buněk sítnice, onemocnění zrakového nervu nebo lézi centrální nervové soustavy. Cílem perimetrie je tedy stanovit rozsah poškození, sledovat progresi nálezu a porovnat výsledky s výsledky naměřenými u populace stejné věkové skupiny. Vyšetření může být ovlivněno přítomností katarakty nebo velikostí zornice. [1, 14, 38, 42]

V současné době je využívána nejvíce statická perimetrie, kde je stanovena prahová citlivost v každém z testových bodů. Na konstantně osvětlením podkladu se zobrazují stimuly s různou intenzitou a je stanovena nutná intenzita stimulu pro jeho rozeznání. Jedná se o časově náročné, ale velmi přesné vyšetření. [1, 14, 38, 42]

U kinetické perimetrie je stimul promítán na vnitřní stranu polokoule a pohybuje se směrem od periferie k centru. Pohybem stimulu stejné intenzity jsou získávány izoptery, hranice oblastí, ve kterých je stimul rozpoznán. U glaukomu se nedoporučuje provádět kinetickou perimetrii, jelikož nelze zachytit drobné změny v zorném poli. [1, 14, 38, 42]

Krátkovlnná perimetrie (SWAP) využívá vybrané vlnové délky pro vyšetření zorného pole. Vychází z podstaty poškození vnímání modrého spektra u glaukomového onemocnění, proto promítá modrý stimul na žluté pozadí. Nálezy tímto typem perimetru jsou výraznější než u klasické perimetrie, ale mohou poukazovat na počínající strukturní změny terče nervu nebo nervových vláken. [1, 14, 38, 42]

## **6.7 Pachymetrie**

Pachymetrie, neboli měření tloušťky rohovky, se využívá hlavně v laserové refrakční chirurgii a pro přesnou interpretaci naměřených hodnot nitroočního tlaku. Pro měření se využívají dvě metody: optická a ultrazvuková. Optická pachymetrie využívá koherentní polarizované světlo, jedná se o nejpresnější metodu, která umožňuje měření tloušťky rohovky

po celé ploše. Naměřené hodnoty jsou vyšší než u ultrazvukové, jelikož je do měření zahrnuta i mukozní složka slzného filmu, proto je nutné upravit hodnotu pomocí korekčního faktoru. Ultrazvuková pachymetrie vyžaduje anestezii rohovky a může být vlivem kontaktu s rohovkou zatížena chybou. [1, 2]

## 6.8 Zobrazovací metody

V současné době si moderní zobrazovací metody nacházejí větší uplatnění v každodenní diagnostice glaukomu. Přínos moderních technologií je hlavně v podrobnějších a přesnějších výsledcích, které umožňují detekci již v ranných stádiích. Pro zobrazení komorového úhlu a hloubky přední komory je často využíván Pentacam, naopak pro vizualizaci papily zrakového nervu a nervových vláken se využívají Heidelbergův retinální tomograf, analyzátor nervových vláken a optická koherentní tomografie. [1, 38, 39]

### **Pentacam**

Pentacam je jeden z nejmodernějších analyzátorů předního segmentu oka. Při analýze využívá metodu Scheimpflugovy kamery, kdy je přední segment osvětlen pruhem světla a osvětlená část je snímána kamerou, která s optickou osou svírá  $45^\circ$  a rotuje o  $180^\circ$ . Z takto snímaných řezů předního segmentu je zrekonstruován model předního segmentu v celém rozsahu  $360^\circ$ . Mezi základní funkce patří topografie rohovky, pachymetrie, hodnocení zakalení oční čočky, scheimpflugovy snímky a zhodnocení komorového úhlu a přední komory. [1, 25, 37, 43]

### **Heidelbergův retinální tomograf (HRT)**

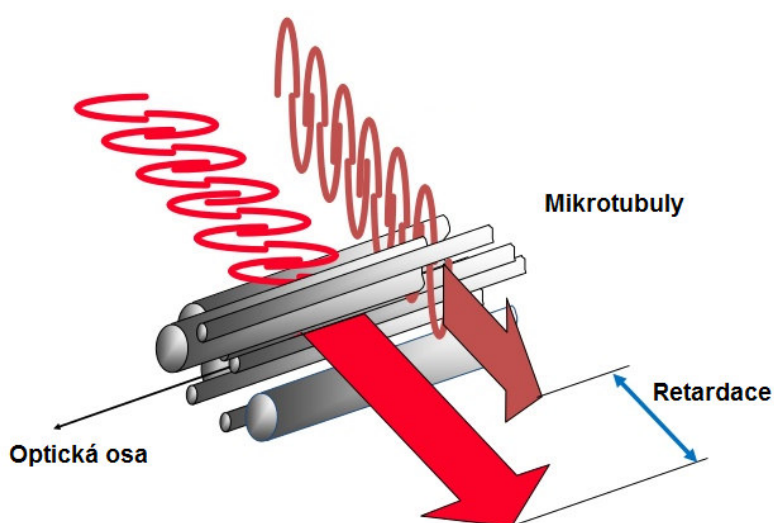
Konfokální laserový skenovací systém, který pomocí monochromatického záření získává obrazy zadního segmentu oka. Zdrojem monochromatického záření je diodový laser o vlnové délce 670 nm, který je vychylován oscilujícími zrcadly. Obraz zadního segmentu oka je tvořen až 64 řezy a každý řez je vytvořen až 148000 měřeními.

V praxi je nejvíce využívána verze HRT II-glaukomový modul, která se používá pro detekci glaukomových změn a míru progresu onemocnění. Dále existuje makulární modul pro screening diabetické makulopatie nebo kvantifikaci edému sítnice. [1, 25, 37, 43]

### Nerve fiber analyzer (GDx)

Analyzátor nervových vláken umožňuje pomocí polarizovaného světla zjistit tloušťku vrstvy nervových vláken. Vlivem pravidelnosti struktur vrstvy nervových vláken se při dopadu polarizované světlo rozdělí do dvou na sebe kolmých rovin. Průchod světla polarizačními rovinami není stejně rychlý a dochází zde k fázovému posunu, tzv. retardaci. Tato retardace je přímo úměrná tloušťce analyzované tkáně (obr.14).

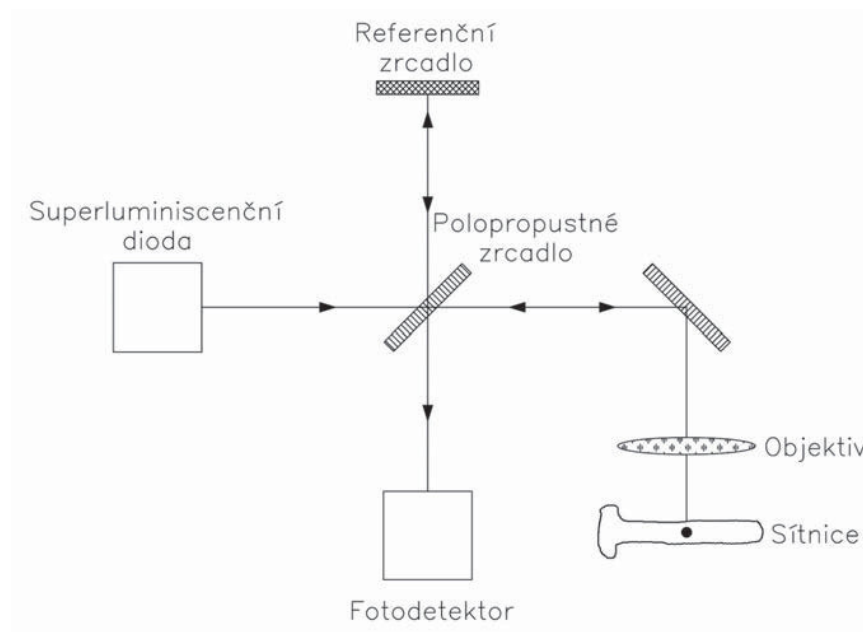
Změny tloušťky vrstvy nervových vláken mohou poukázat na strukturní změny sítnice dříve, než se projeví při vyšetření perimetrie. Lze proto zachytit i raná stádia glaukomu. [1, 25, 37, 43]



Obrázek 13: Princip fázové retardace při měření [46]

### Optická koherentní tomografie (OCT)

Bezkontaktní diagnostická metoda umožňující zobrazení struktur sítnice a stanovení tloušťky vrstvy nervových vláken. Využívá principu interferometrie neboli skládání světelných vln, v tomto případě infračerveného záření. Infračervené záření má vyšší rozlišovací schopnost než ultrazvukové záření. Vygenerované záření superluminiscentní diodou prochází zornicí až na sítnici a pomocí Michelsonova interferometru je měřen časový rozdíl mezi odraženým paprskem od referenčního zrcadla a paprskem odraženým od jednotlivých struktur sítnice (obr.15). Vysoko odrazivé tkáně jsou ve výsledném zobrazení zvýrazněny červeně až bíle, naopak méně reflektující vrstvy jsou zobrazeny modře až černě. [1, 25, 37, 43]



Obrázek 14: Princip OCT [47]

## 7 Experimentální část

Experimentální část je zaměřena na porovnání měření nitroočního tlaku klasickým bezkontaktním tonometrem, který zohledňuje centrální tloušťku rohovky a přístrojem ORA (Ocular Response Analyzer), zohledňujícím při měření nitroočního tlaku biomechanické vlastnosti rohovky, kdy je měření nezávislé na rohovkové tloušťce. Dále se zabývá měřením hystereze a tím i pochopení biomechanických vlastností rohovky.

### 7.1 Metodika výzkumu

V bakalářské práci byla použita data pacientů, kteří dochází na pravidelné kontroly na kliniku JL v Praze. Jedná se o pacienty, u nichž byl již primární glaukom otevřeného úhlu diagnostikován nebo mají predispozice k rozvinutí tohoto onemocnění.

Při očním vyšetření byla u pacientů odebrána osobní a oční anamnéza, byla stanovena subjektivní i objektivní refrakce včetně zjištění hodnoty nejlepšího visu s korekcí. Dále bylo provedeno vyšetření předního segmentu oka na šterbinové lampě (biomikroskopie) a vyšetření očního pozadí oftalmoskopem. Nitrooční tlak byl změřen bezkontaktním tonometrem Canon TX 10 (každé oko 3x), bylo provedeno kompletní vyšetření biomechanických vlastností rohovky přístrojem Reichert ORA (II. Generation). Tloušťka rohovky byla měřena ultrazvukovým pachymetrem Tomey SP-100, Nagoya Japan, zorné pole bylo vyšetřeno statickou perimetrií přístrojem Medmont M700.

Výsledná hodnota nitroočního tlaku měřeného bezkontaktním tonometrem Canon TX 10 byla stanovena zprůměrováním hodnot ze tří po sobě následujících měření. Hodnoty a výsledné křivky naměřené systémem ORA byly vybrány podle skóre kvality a vždy se jednalo o zprůměrované hodnoty ze čtyř měření. Ultrazvuková pachymetrie a její výsledná hodnota byla opět dána zprůměrováním hodnot z pěti měření. Při vyšetření zorného pole byl hodnoceným parametrem vzorový defekt (pattern standard deviation - PSD), jedná se vzorovou směrodatnou odchylku ztrát citlivosti v zorném poli.



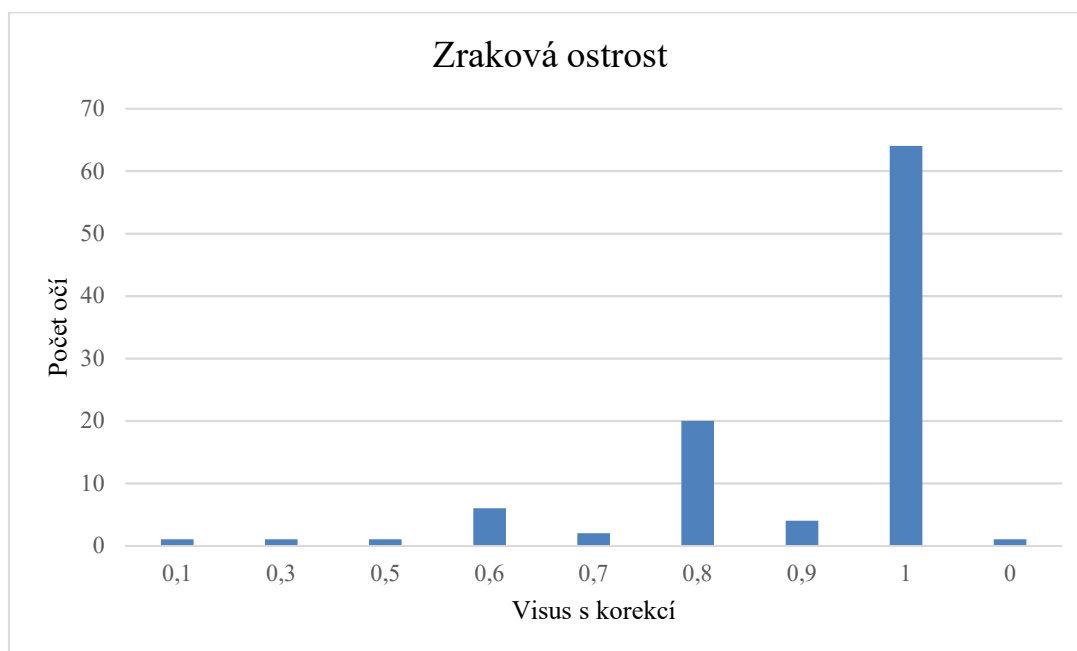
## 7.2 Charakteristika souboru pacientů

Celkový zkoumaný soubor zahrnuje 50 pacientů u kterých byl diagnostikován primární glaukom otevřeného úhlu a do statistické analýzy dat bylo zahrnuto 99 očí. Z celkového počtu pacientů tvoří 68 % ženy (34 pacientů) a 32 % muži (16 pacientů). Průměrný věk v době kontroly byl u žen  $65,94 \pm 14,04$  let a u mužů  $65,84 \pm 13,38$  let. Tato data jsou uvedena v tabulce 5.

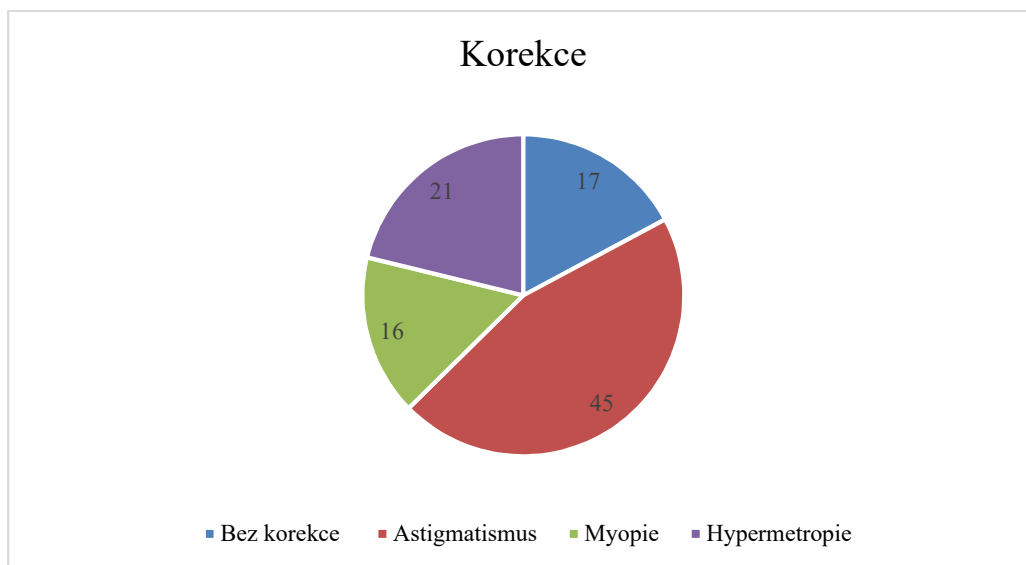
Tabulka 5: Charakteristika souboru pacientů zahrnutých do analýzy

	Počet	Počet očí	Průměrný věk	Odchylka	Minimální věk	Maximální věk
Ženy	34	67	65,94	$\pm 14,04$	28	87
Muži	16	32	65,84	$\pm 13,38$	41	87

U každého subjektu byla při kontrole provedena subjektivní refrakce a stanovena hodnota korekce pro dosažení nejlepší zrakové ostrosti do dálky. Visu 1,0 dosahovalo 64 očí, visus 0,8 byl zjištěn u 20 očí a visus 0,6 u 6 očí (graf 1). Z celkového počtu 99 očí bylo 45 očí astigmatických, 21 hypermetropických, 16 myopických a 17 nevyžadovalo korekci (graf 2).

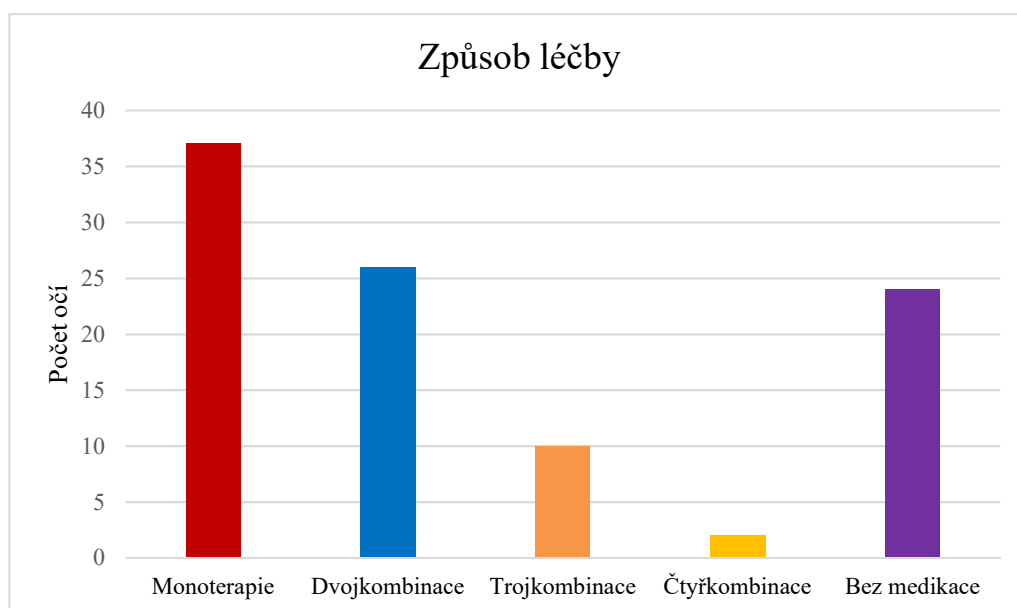


Graf 1: Zraková ostrost do dálky s korekcí



Graf 2: Typy korekce do dálky u vyšetřených očí

V celkovém souboru pacientů bylo 24 očí bez předepsané medikace. Nejvíce byla zastoupena léčba monoterapií, tedy předepsané léky obsahující jen jednu účinnou látku, takto bylo léčeno 37 očí. Léky obsahující dva typy účinných látek (dvojkombinace) byly podávány u 26 očí. U 10 očí byla užívána trojkombinační léčba a 2 oči byly léčeny čtyřkombinací účinných látek (graf 3). Seznam užívaných preparátů a jejich účinných látek je uveden v příloze 1.



Graf 3: Typy medikací v souboru pacientů

## 7.3 Analýza dat

Na začátku analýzy byly stanoveny následující hypotézy:

**H1: Hystereze rohovky ovlivňuje měření nitroočního tlaku více než centrální tloušťka rohovky.**

**H2: Centrální tloušťka rohovky má větší vliv na měření nitroočního tlaku než hystereze rohovky.**

U každého pacienta bylo provedeno vyšetření pomocí Ocular Response Analyzeru, zjištěné hodnoty: nitrooční tlak podle hystereze (IOPcc), nitrooční tlak srovnatelný s Goldmannovým měřením nitroočního tlaku (IOPg), hystereze (CH). Centrální tloušťka rohovky (CCT) byla měřena ultrazvukovým pachymetrem. Dále byly změřeny hodnoty nitroočního tlaku bezkontaktním tonometrem (IOPnc), zorné pole bylo vyšetřeno statickou perimetrií přístrojem Medmont M700 a vyhodnocen vzorový defekt (PSD).

Tabulka 6: Průměrné hodnoty naměřené u souboru pacientů

	PSD [dB]	IOPcc[mmHg]	IOPg[mmHg]	CH[mmHg]	CCT[mmHg]	IOPnc[mmHg]
Ženy OP	3,157	18,043	18,379	10,806	569,848	17,535
Ženy OL	2,522	18,630	19,656	11,281	563,750	19,979
Muži OP	4,385	20,669	20,538	9,525	563,267	17,021
Muži OL	2,586	19,744	19,181	9,881	563,200	17,229
Celkem	3,148	18,878	18,996	10,424	568,708	17,593

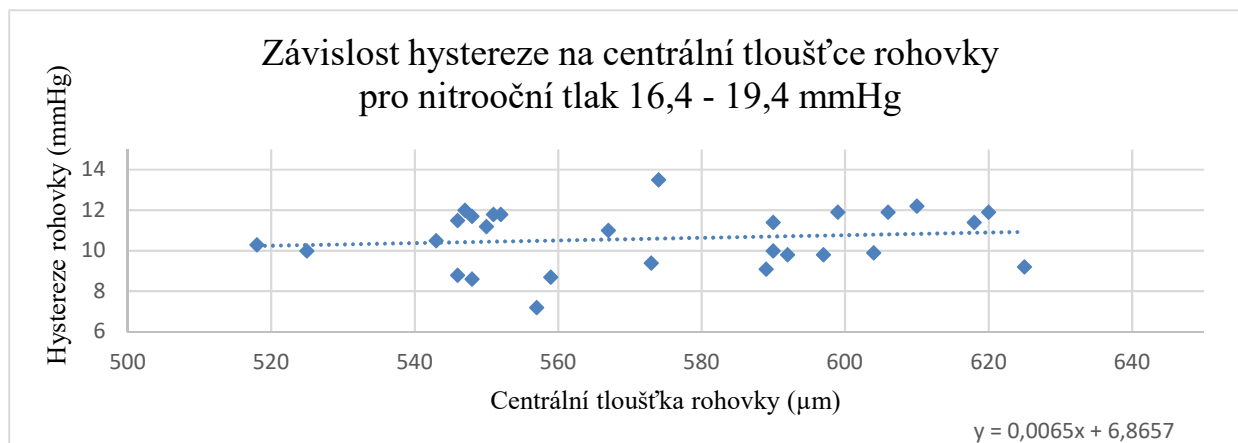
Výše uvedená tabulka č. 6 obsahuje průměrné hodnoty nitroočních tlaků měřených různými způsoby, dále hysterezi, centrální tloušťku rohovky a vzorový defekt získaný vyšetřením na perimetru. Tyto hodnoty jsou rozděleny podle pohlaví a zda se jedná o oko pravé nebo levé.

Pro porovnání závislosti hystereze na centrální tloušťce rohovky byly vytvořeny 3 skupiny podle hodnoty nitroočního tlaku. Následující tabulka č. 7 ukazuje naměřené hodnoty hystereze pro tyto tři skupiny.

Tabulka 7: Naměřené hodnoty hystereze u tří skupin rozdělených podle nitroočního tlaku

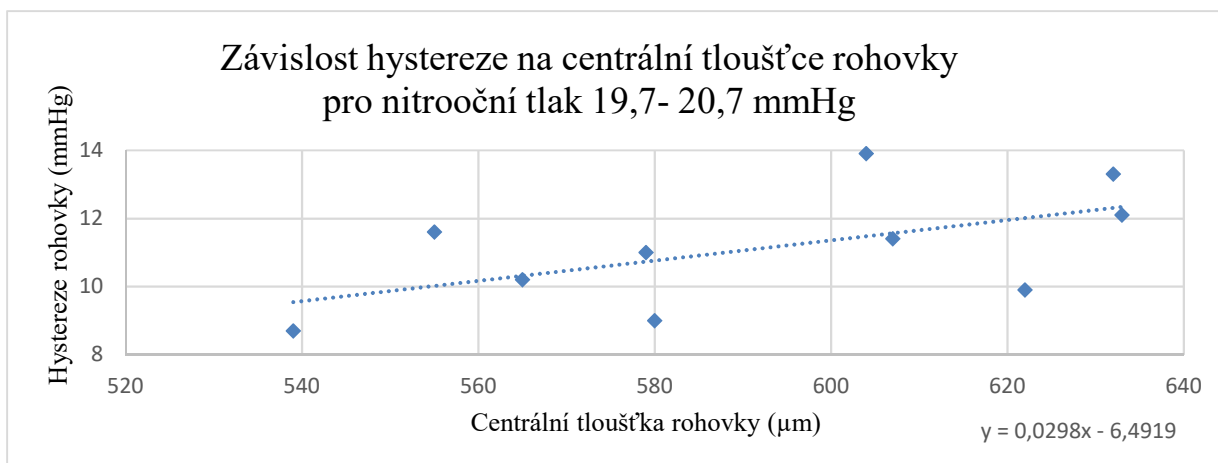
	Nitrooční tlak [mmHg]	Průměrná hystereze [mmHg]	Směr. odchylka hystereze [mmHg]	Minimum [mmHg]	Maximum [mmHg]
Skupina 1	16,4 - 19,4	10,589	$\pm 1,406$	7,2	13,5
Skupina 2	19,4 - 20,7	10,964	$\pm 1,618$	9,0	13,9
Skupina 3	20,7 - 30,2	9,919	$\pm 1,955$	6,8	14,0

Skupina 1 byla stanovena tak, aby naměřené hodnoty nitroočního tlaku odpovídaly fyziologickým hodnotám a byli zde zařazeni jak pacienti užívající medikaci, tak i pacienti bez medikace. Průměrná hodnota hystereze byla  $10,589 \pm 1,406$  mmHg a z níže uvedeného grafu č. 4 pro tuto skupinu je patrné, že hodnota hystereze není závislá na tloušťce rohovky.



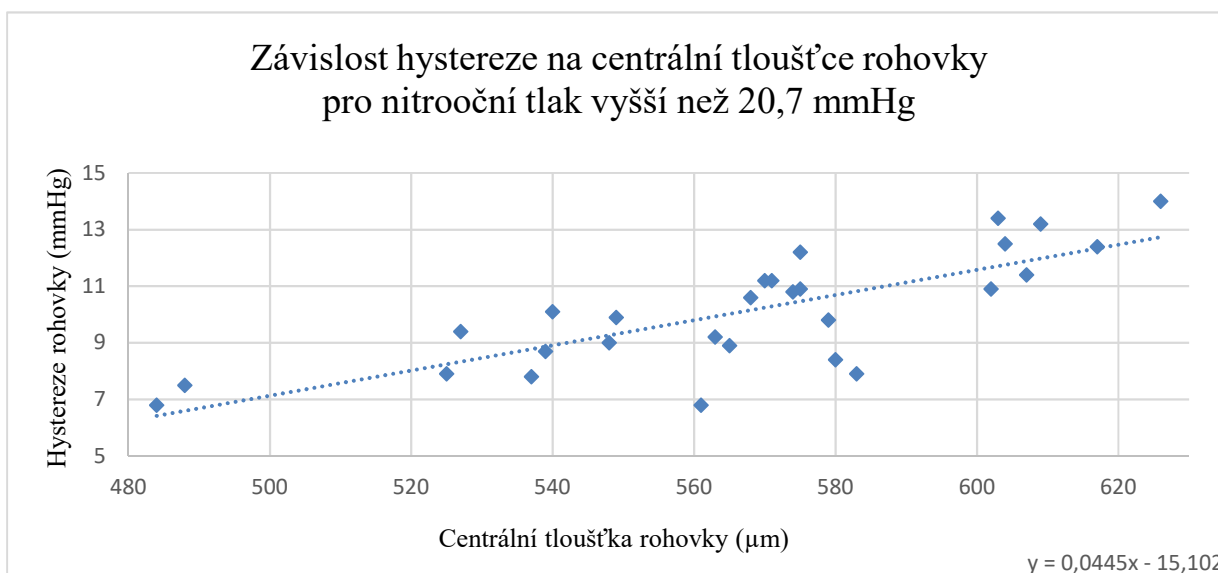
Graf 4: Závislost hystereze na centrální tloušťce rohovky u skupiny 1

Hodnoty nitroočního tlaku zařazené do skupiny 2 byly na hranici, zda se ještě jedná o fyziologickou nebo již o patologickou hodnotu. Průměrná hodnota hystereze byla  $10,964 \pm 1,618$  mmHg, v tomto případě bylo zjištěno, že se jedná o lineární závislost a s rostoucí hodnotou centrální tloušťky rohovky roste její hystereze (graf 5).



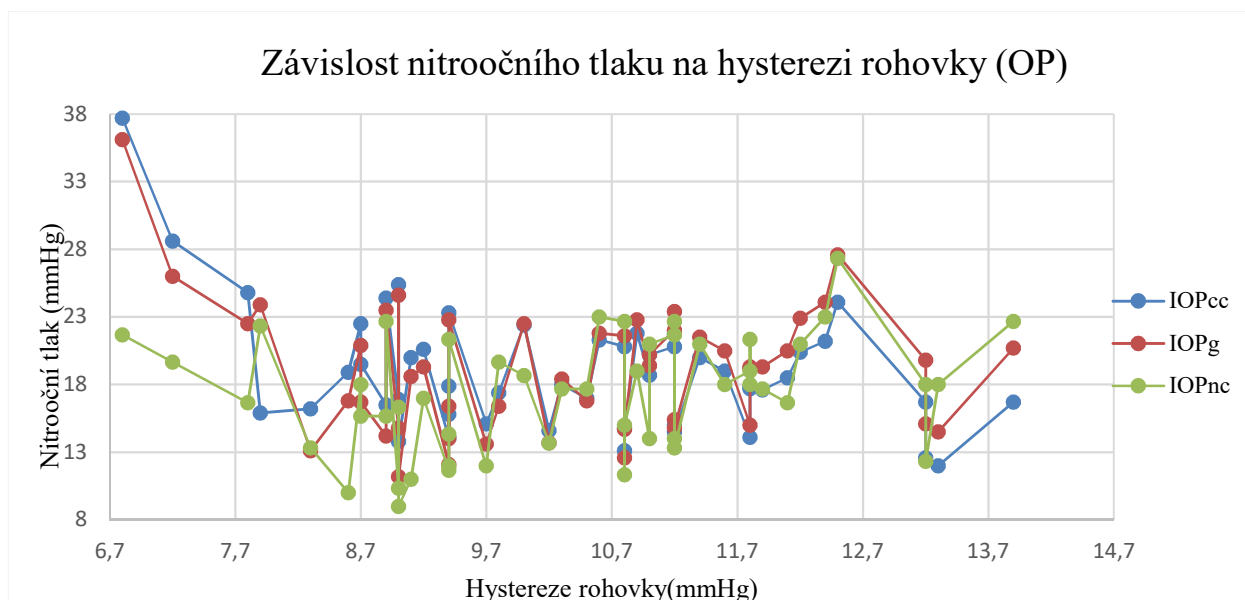
Graf 5: Závislost hystereze na centrální tloušťce rohovky u skupiny 2

Do skupiny 3 byly zahrnuty vysoké hodnoty nitroočního tlaku, které již mohou být patologické. Průměrná hodnota byla  $9,919 \pm 1,955$  mmHg, tedy nejnižší z těchto skupin a směrodatná odchylka byla naopak nejvyšší. Opět je z níže uvedeného grafu č.6 patrné, že se zde jedná o lineární závislost, ale oproti předchozí skupině je zde větší směrnice přímky a funkce má dramatičtější průběh.



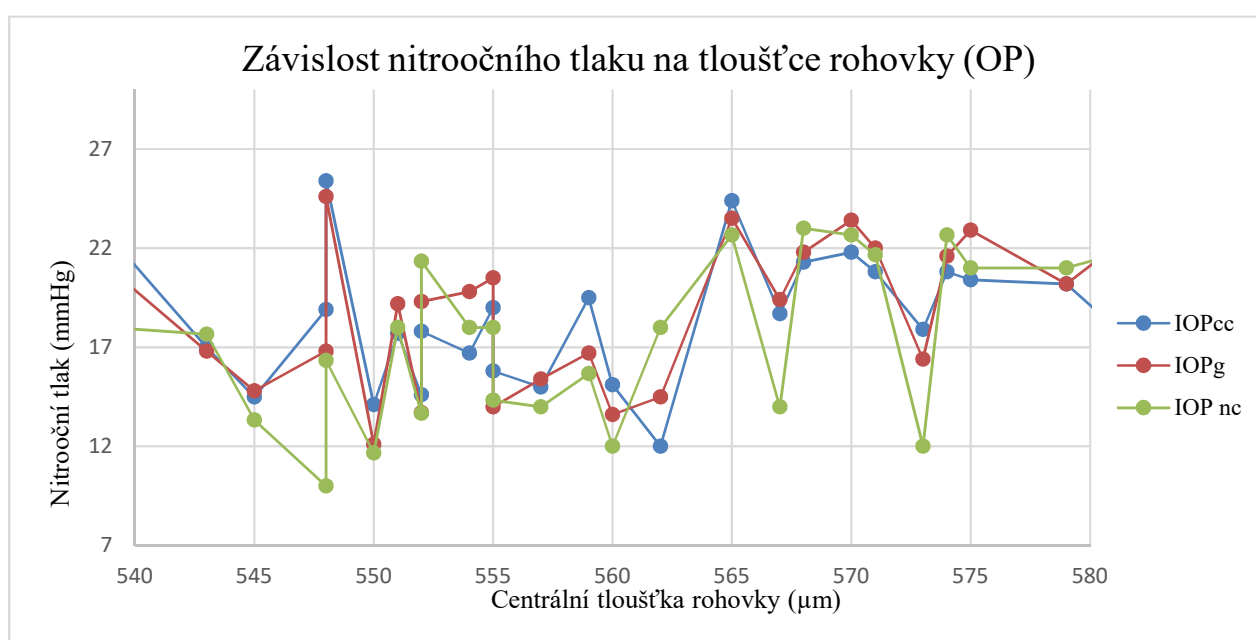
Graf 6: Závislost hystereze na centrální tloušťce rohovky u skupiny 3

Cílem experimentu bylo porovnat, zda je měření nitroočního tlaku ovlivněno více hysterezi rohovky nebo centrální tloušťkou rohovky. V následujícím grafu jsou vyneseny naměřené hodnoty nitroočního tlaku různými metodami v závislosti na hysterezi rohovky. Z grafu 7 pro pravé oko je patrné, že pro střední hodnoty nitroočního tlaku a pro střední hodnoty hystereze je průběh křivek měření podobný, ale hodnoty se liší.



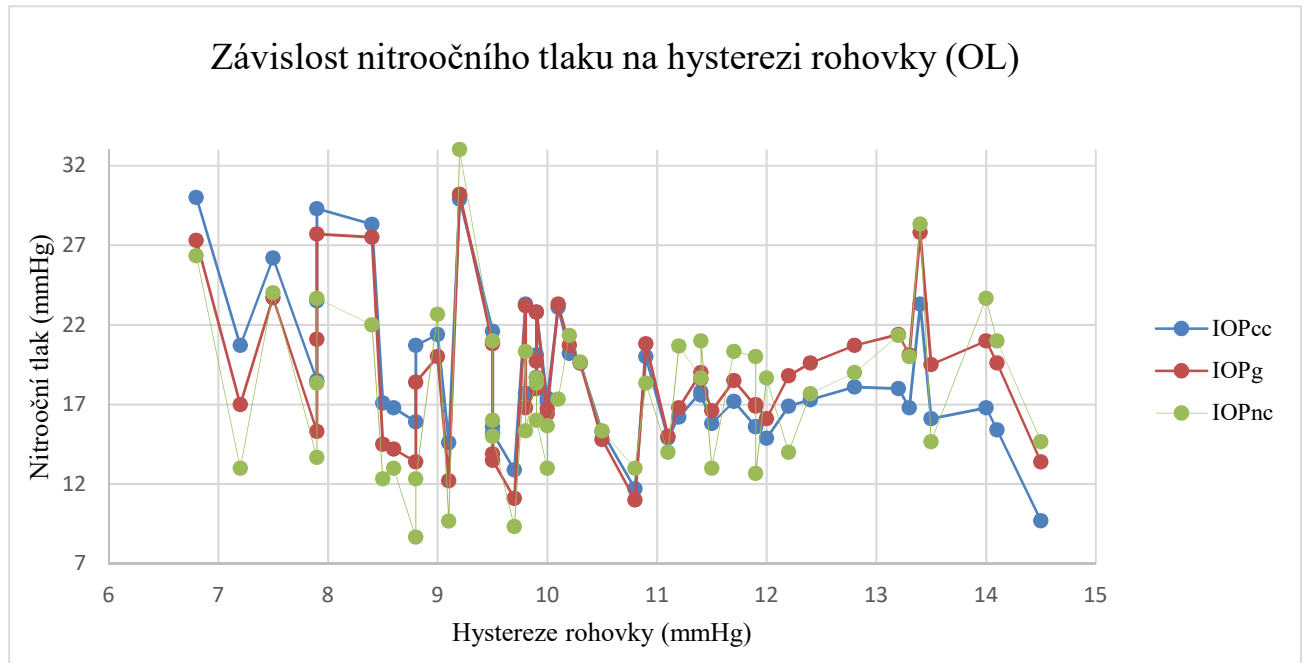
Graf 7 : Závislost nitroočního tlaku na hysterezi OP

Následující graf č. 8 ukazuje závislost naměřených hodnot nitroočního tlaku na centrální tloušťce rohovky také pro pravé oko. Křivky jednotlivých metod jsou nepravidelné a jejich hodnoty se odlišují. Nejvíce se liší křivka ukazující měření bezkontaktním tonometrem.

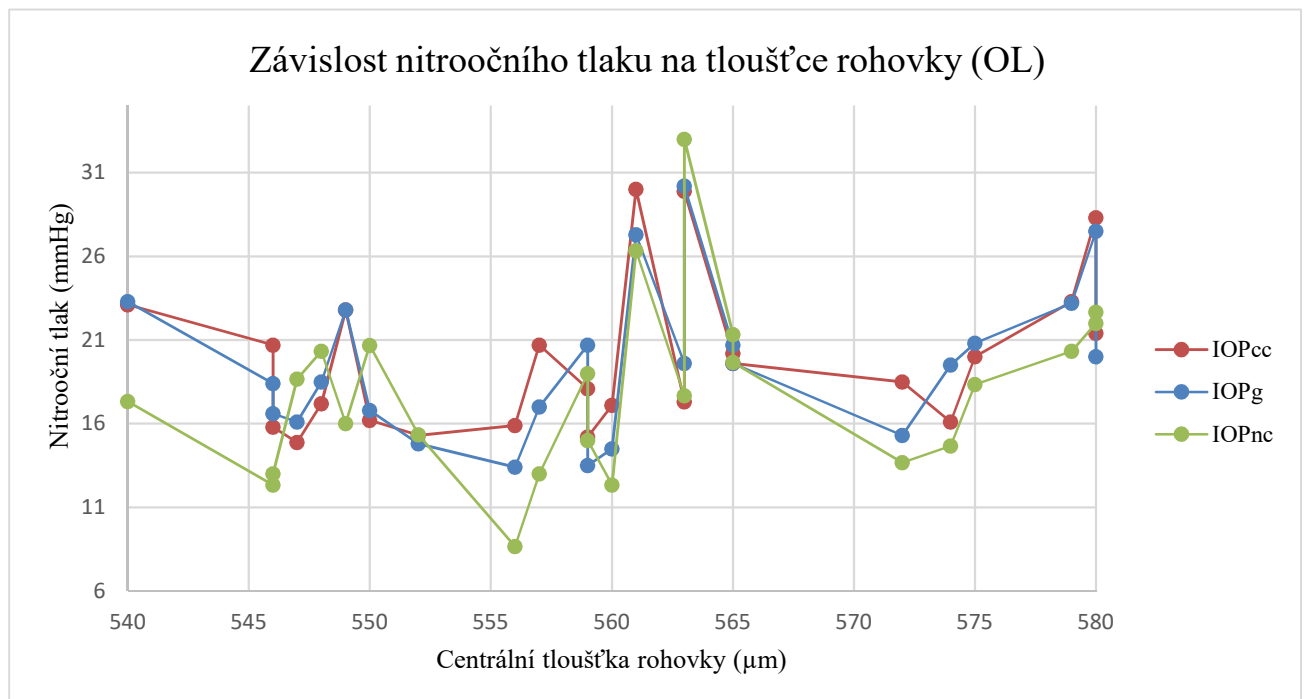


Graf 8: Závislost nitroočního tlaku na centrální tloušťce rohovky OP

Následující grafy č. 9 a 10 ukazují závislosti naměřených hodnot na hysterezi rohovky a na centrální tloušťce rohovky pro levé oko.



Graf 9: Závislost nitroočního tlaku na hysterezi OL



Graf 10: Závislost nitroočního tlaku na centrální tloušťce rohovky OL

Pro porovnání metod měření nitroočního tlaku byl zvolen jako výchozí nitrooční tlak srovnatelný s Goldmannovou aplanační tonometrií (IOPg), která je dodnes považována za zlatý standart v tonometrii. Porovnáním hodnot nitroočního tlaku při zohlednění hystereze rohovky (IOPcc) s nitroočním tlakem srovnatelným s Goldmannovou aplanační tonometrií (IOPg) bylo zjištěno, že u pravého oka byly hodnoty tlaku o 0,182 mmHg nižší a u levého nižší o 0,0392 mmHg. V celkovém souboru byla odchylka -0,1182 mmHg. Dále byly porovnány hodnoty naměřené bezkontaktním tonometrem (IOPnc) a IOPg, v tomto případě byly hodnoty tlaku u pravého oka naměřeny o 1,759 mmHg nižší, u levého oka byly hodnoty nižší o 1,018 mmHg a v celkovém souboru byly naměřeny hodnoty nižší o 1,403 mmHg (tabulka 8). Z tohoto faktu vyplývá, že naměřené hodnoty nitroočního tlaku přístrojem zohledňujícím rohovkovou hysterezi jsou přesnější než hodnoty naměřené tonometrem zohledňujícím centrální tloušťku rohovky.

Tabulka 8: Výsledné odchylky dvou metod měření

	Odchylka u IOPcc	Odchylka u IOPnc
Oko Pravé	-0,1820	-1,7587
Oko Levé	-0,0392	-1,0177
Celkem	-0,1182	-1,4027



## Diskuze

Změny biomechanických vlastností popisované pomocí hodnot hystereze rohovky (CH) mohou poukazovat na progresi glaukomového onemocnění. Obecně platí, že u pacientů s glaukomem nebo oční hypertenzí nacházíme nižší hodnoty než u zdravých jedinců. V analyzovaném souboru pacientů byla průměrná hodnota hystereze  $10,424 \pm 1,774$  mmHg. Tato hodnota neodpovídá hodnotám, které jsou běžně měřeny u pacientů s glaukomem. V souvislosti s průměrným vzorovým defektem zjištěným při vyšetření na perimetru, který byl  $3,148 \pm 2,6$  dB můžeme usuzovat, že u pacientů vybraných pro analýzu dat byl glaukom zachycen v časném stádiu bez výrazných změn zorného pole. Pokud do vzorku pacientů zařadíme pouze ty, kteří mají předepsanou medikaci, změní se průměrná hodnota  $9,992 \pm 1,686$  mmHg. Naměřené nižší hodnoty mohou být spojené s glaukomovým onemocněním nebo také s dlouhodobou aplikací očních kapek.

Mohamed A. El-Malah ([53]) ve své studii porovnával rohovkovou hysterezi u 47 očí pacientů bez jakýchkoliv očních onemocnění a u 47 očí s primárním glaukomem otevřeného úhlu. U zdravých jedinců byla hystereze  $11,6 \pm 1,2$  mmHg oproti skupině s glaukomem, kde byla průměrná hodnota  $8,4 \pm 2,3$  mmHg.

Abitol a kolektiv ([52]) měřili hodnotu hystereze u 133 očí, z nichž bylo 75 očí zdravých a 58 očí s primárním glaukomem otevřeného úhlu. Výsledky z této studie se téměř shodovaly se studií přecházející, a tedy u zdravých jedinců byla hystereze  $10,46 \pm 1,6$  mmHg a u nemocných očí byla naměřena průměrná hodnota  $8,77 \pm 1,4$  mmHg.

Hlavním cílem bylo porovnat naměřené hodnoty nitroočního tlaku při zohlednění centrální tloušťky rohovky a při zohlednění biomechanických vlastností. Průměrná naměřená hodnota IOPcc byla  $18,878 \pm 4,453$  mmHg a IOPnc byla  $17,593 \pm 4,546$  mmHg. Jako referenční hodnota byla použita hodnota měřená systémem ORA- IOPg  $18,996 \pm 4,517$  mmHg. V několika studiích byl IOPg porovnáván s GAT (Goldmannova aplanační tonometrie) jakožto zlatým standartem. Kiyoshi Yaoeda ([50]) a kolektiv u vzorku 218 očí naměřili mezi těmito hodnotami odchylku pouze  $+0,1$  mmHg. Lucia Perucho-González a kol. [51] u 78 pacientů s primárním glaukomem otevřeného úhlu naměřili hodnoty odlišné o  $-0,55$  mmHg. Proto bylo IOPg stanoveno jako referenční.

V experimentu byla potvrzena nulová hypotéza, že hystereze rohovky ovlivňuje měření nitroočního tlaku více než centrální tloušťka rohovky. Při zohlednění biomechanických vlastností rohovky (IOPcc) v porovnání s IOPg byla zjištěna průměrná odchylka pro oko pravé  $-0,182 \pm 2,124$  mmHg, pro levé oko  $-0,0392 \pm 2,108$  mmHg a celkem  $-0,1182 \pm 2,117$  mmHg. Naopak při zohlednění centrální tloušťky rohovky (IOPnc) v porovnání s IOPg byly průměrné odchylky pro oko pravé  $-1,7587 \pm 3,246$  mmHg, pro oko levé  $-1,0177 \pm 2,722$  mmHg a celková odchylka byla  $-1,4027 \pm 3,017$  mmHg.

Kiyoshi Yaoeda ([50]) a kol. při porovnání naměřených hodnot u 218 očí s primárním glaukomem otevřeného úhlu se odchylka IOPcc od IOPg rovnala  $-0,6$  mmHg a odchylka IOPnc od IOPg byla  $-1,9$  mmHg. Zjištěné odchylky jsou téměř shodné s naměřenými v bakalářské práci.

Lopez-De la Fuente a kol ([49]) porovnávali Pulsair Easy Eye tonometr s Ocular response analyzerem u 65 zdravých očí. Rozdíl hodnot mezi IOPk (Pulsair Easy Eye) a IOPg byl  $0,71 \pm 1,66$  mmHg a průměrný rozdíl IOPcc a IOPg byl  $0,01 \pm 1,54$  mmHg. Nižší odchylky, než které byly naměřeny v bakalářské práci, mohou být způsobeny měřením očí s žádnými či minimálními glaukomovými změnami.

KC Ogbuehi a TM Almubrad ([48]) využili GAT pro porovnání hodnot IOPcc a IOPnc (Topcon CT80) u 89 očí a dále se zabývali reprodukovatelností naměřených hodnot. Při prvním měření byl rozdíl mezi IOPcc a GAT  $-0,3 \pm 2,7$  mmHg a mezi IOPnc a GAT byl  $-0,3 \pm 2,1$  mmHg. U druhého měření byl rozdíl IOPcc a GAT  $0,3 \pm 3,0$  mmHg a odchylka IOPnc od GAT byla  $-0,5 \pm 2,2$  mmHg. Mezi odchylkami nejsou velké rozdíly, ale studie prokázala reprodukovatelnost hodnot naměřených systémem ORA.

## Závěr

Nitrooční tlak je důležitým parametrem, který je zjišťován u pacientů s glaukomovým onemocněním. Jeho měření patří k základním vyšetřovacím metodám pro stanovení diagnózy onemocnění.

V první kapitole jsem zpracovala anatomické a biomechanické poznatky o rohovce umožňující pochopení biomechanických vlastností, které jsou také popsány v této kapitole.

Druhá a třetí kapitola je zaměřená na nitrooční tekutinu a s ní spojeným nitroočním tlakem, jelikož hodnota nitroočního tlaku závisí na tvorbě a odtoku nitrooční tekutiny. Ve čtvrté kapitole jsem popsala historii a metody měření nitroočního tlaku, které budou dále použity v experimentální části projektu.

Pátá a šestá kapitola se zabývají glaukomem, rozdělením typů glaukomu a možnostmi jeho diagnostiky.

V rámci bakalářské práce bylo prováděno a porovnáváno měření nitroočního tlaku klasickou metodou, která zohledňuje centrální tloušťku rohovky (bezkontaktní metoda) a přístrojem ORA (Ocular Response Analyzer), kterým jsou zjišťovány biomechanické vlastnosti rohovky nezávisle na její tloušťce.

Při hodnocení naměřených hodnot hystereze a tloušťky rohovky v daném souboru pacientů bylo zjištěno u vyšších hodnot tlaků (19,7 mmHg a více), že s rostoucí tloušťkou rohovky rostla i její hystereze. Z tohoto faktu vyplývá, že byla potvrzena H1 i H2, tedy jak hystereze rohovky, tak i její centrální tloušťka ovlivňuje měření nitroočního tlaku. Ale při porovnávání metod měření nitroočního tlaku bylo prokázáno, že pokud se využije metoda měření zohledňující hysterezi rohovky, jsou hodnoty nitroočního tlaku téměř srovnatelné s GAT (naměřená odchylka  $-0,1182 \pm 2,117$  mmHg) a jedná se tedy o přesnější metodu měření. Naopak u metody zohledňující centrální tloušťku rohovky byla naměřená odchylka  $-1,4027 \pm 3,017$  mmHg.

## Seznam použité literatury

- [1] KUCHYNKA, Pavel. Oční lékařství. Praha: Grada, 2007. ISBN 978-80-247-1163-8.
- [2] VLKOVÁ, Eva, Šárka PITROVÁ a František VLK. Lexikon očního lékařství: výkladový ilustrovaný slovník. Brno: František Vlk, 2008. ISBN 978-80-239-8906-9.
- [3] SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. Fyziologie oka a vidění. 2., dopl. a přeprac. vyd. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3992-2
- [4] JIRSOVÁ, Kateřina. Příprava rohovky pro transplantaci: historie, současnost, budoucnost. Praha: Karolinum, 2013. ISBN 978-80-246-2364-1.
- [5] Millodot: Dictionary of Optometry and Visual Science, 7th edition. S.v. "corneal epithelium." Retrieved January 4 2017 dostupné z: <http://medical-dictionary.thefreedictionary.com/corneal+epithelium>
- [6] Anatomy & Embryology of the Eye. General Ophthalmology [online]. 2002 [cit. 2017-01- 04]. Dostupné z: [http://www.oculist.net/others/ebook/generalophthal/server-java/arknoid/amed/vaughan/co\\_chapters/ch001/ch001\\_print\\_chapter.htm](http://www.oculist.net/others/ebook/generalophthal/server-java/arknoid/amed/vaughan/co_chapters/ch001/ch001_print_chapter.htm)
- [7] Pružnost. WikiSkripta [online]. 2008- [cit. 2017-01-04]. ISSN 18046517. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Pružnost&oldid=365849>
- [8] KOTECHA, Aachal. What biomechanical properties of the cornea are relevant for the clinician?. Survey of ophthalmology, 2007, 52.6: S109-S114
- [9] Viskozita. WikiSkripta [online]. 2008- [cit. 2017-01-04]. ISSN 18046517. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Viskozita&oldid=341755>
- [10] HRAZDIRA, Ivo a Vojtěch MORNSTEIN. Úvod do obecné a lékařské biofyziky. Brno: Masarykova univerzita, 1998. ISBN 80-210-1822-4
- [11] DEOL, Madhvi; TAYLOR, David A.; RADCLIFFE, Nathan M. Corneal hysteresis and its relevance to glaucoma. Current opinion in ophthalmology, 2015, 26.2: 96.
- [12] Viscoelasticity and hysteresis. University of Cambridge [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/bioelasticity/viscoelasticity-hysteresis.php>
- [13] KVAPILÍKOVÁ, Květa. Anatomie a embryologie oka. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2000. ISBN 80-7013-313-9
- [14] VÝBORNÝ, Petr. Glaukom - vybrané kapitoly. Hradec Králové: Nucleus HK, 2008. Oftalmologie. ISBN 978-80-87009-35-2.
- [15] HORNOVÁ, Jara. Nitrooční tekutina, její funkce, tvorba a odtok. Česká a slovenská oftalmologie, 2003, Roč. 59, č. 1, s. 60-62. ISSN: 1211-9059.

- [16] JACK J. KANSKI,..BRAD BOWLING, Jack J. Kanski,..Brad Bowling a ..Andrew Pearson WITH CONTRIBUTIONS FROM KEN NISCHAL. Clinical ophthalmology a systematic approach. 7th ed. Edinburgh: Butterworth Heinemann Elsevier, 2011. ISBN 9780702040955
- [17] LLOBET, A., X. GASULL a A. GUAL. Understanding Trabecular Meshwork Physiology: A Key to the Control of Intraocular Pressure? Physiology [online]. 2003, 18(5), 205-209 [cit. 2017-01-04]. DOI: 10.1152/nips.01443.2003. ISSN 1548-9213. Dostupné z: <http://physiologyonline.physiology.org/cgi/doi/10.1152/nips.01443.2003>
- [18] CONRAD, Chris. Konopí pro zdraví: fakta o léčivých účincích marihuany. Praha: Pragma, 2. ISBN 80-7205-834-7.
- [19] KIRSTEIN, Elliot M.; ELSHEIKH, Ahmed; GUNVANT, Pinakin. Tonometry-past, present and future. INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [20] FERRERI, Felicia, Rosa MINNITI, Alessandra POLIMENI, Lucia ZAVETTIERI, Giuseppina FERRERI, Paolo FERRERI a Pasquale ARAGONA. Tonometry. Ophthalmology - Current Clinical and Research Updates [online]. InTech, 2014 [cit. 2016-12-06]. DOI: 10.5772/58690. ISBN 978-953-51-1721-6. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/ophthalmology-current-clinical-and-research-updates/tonometry>
- [21] HORNOVÁ, Jara — BAXANT, A. Současné možnosti měření nitroočního tlaku. Česká a slovenská oftalmologie, 2013, roč. 69, č. 4, s. 175-180. ISSN: 1211-9059
- [22] EDS. ASHOK GARG .. Mastering the techniques of glaucoma diagnosis and management; [97 international contributors from 15 countries]. New Delhi: Jaypee Brothers Med. Publ, 2006. ISBN 8180617580
- [23] Alguire PC. Tonometry. In: Walker HK, Hall WD, Hurst JW, editors. Clinical Methods: The History, Physical, and Laboratory Examinations. 3rd edition. Boston: Butterworths; 1990. Chapter 118. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK222/>
- [24] Schiotz Tonometer. Bino Scientific [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: [http://www.opthalmicequipments.in/schiotz\\_tonometer.htm](http://www.opthalmicequipments.in/schiotz_tonometer.htm)
- [25] BENEŠ, Pavel. Přístroje pro optometrii a oftalmologii. Brno: Národní centrum ošetrovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2015. ISBN 978-80-7013-577-8.
- [26] Understanding and caring for a Schiotz tonometer. Community Eye Health Journal [online]. 2014 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.cehjournal.org/article/understanding-and-caring-for-a-schiotz-tonometer/>
- [27] RUTRLE, Miloš. Přístrojová optika: učební texty pro oční optiky a oční techniky, optometry a oftalmology. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2000. ISBN 80-7013-301-5.

- [28] Tonometro de aplanacion. Circulo Laser [online]. 2015 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.circulolaser.com.uy/wp-content/uploads/2015/07/TONOMETRO-DE-APLANACION-1.jpg>
- [29] Wikipedia contributors. Ocular tonometry [Internet]. Wikipedia, The Free Encyclopedia; 2016 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ocular\\_tonometry&oldid=755340131](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ocular_tonometry&oldid=755340131).
- [30] Non Contact Tonometer. Device Optical [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: [http://www.deviceoptical.com/prod\\_images\\_blowup/ft10001.jpg](http://www.deviceoptical.com/prod_images_blowup/ft10001.jpg)
- [31] REALINI, Toni, MD. The Ocular Response Analyzer: Measuring the biomechanical properties of the cornea might provide insight into the pathophysiology of glaucoma. *Glaucoma Today*. 2008, July/August 2008, 27-30.
- [32] Návod k obsluze Ocular Response Analyzer. *Reichert*.
- [33] Ocular Response Analyzer by Reichert. Grafton Optical [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.graftonoptical.com/products/884-ocular-response-analyzer-by-reichert.html>
- [34] SPOERL, Eberhard, Naim TERAI, Freia SCHOLZ, Frederik RAISKUP a Lutz E. PILLUNAT. Detection of Biomechanical Changes After Corneal Cross-Linking Using Ocular Response Analyzer Software. *Journal of Refractive Surgery* [online]. 2011, 27(6), 452-457 [cit. 2017-01-04]. DOI: 10.3928/1081597X-20110106-01. ISSN 1081-597x. Dostupné z: <http://www.slackinc.com/doi/resolver.asp?doi=10.3928/1081597X-20110106-01>
- [35] Tono-Pen® XL Applanation Tonometer. Reichert technologies [online]. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: [http://www.reichert.com/product\\_details.cfm?skuId=3124&skuTk=1064909655#.WGzI7xvhDIV](http://www.reichert.com/product_details.cfm?skuId=3124&skuTk=1064909655#.WGzI7xvhDIV)
- [36] ROZSÍVAL, Pavel. *Oční lékařství*. Praha: Galén, c2006. ISBN 80-7262-404-0.
- [37] LEŠTÁK, Ján. Moderní vyšetřovací postupy u glaukomu. *Sanquis*, 2004, č. 31, s. 14-17. ISSN: 1212-6535.
- [38] RŮŽIČKOVÁ, Eva. Glaukom včasná diagnostika a léčba. *Postgraduální medicína*, 2008, roč. 10, č. 1, s. 19-22. ISSN: 1212-4184.
- [39] RŮŽIČKOVÁ, Eva. *Glaukom: průvodce ošetřujícího lékaře*. 2. aktualizované vydání. Praha: Maxdorf, 2016. Farmakoterapie pro praxi. ISBN 978-80-7345-473-9.
- [40] DUPPS, William J.; WILSON, Steven E. Biomechanics and wound healing in the cornea. *Experimental eye research*, 2006, 83.4: 709-720.
- [41] MEEK, Keith M.; BOOTE, Craig. The organization of collagen in the corneal stroma. *Experimental eye research*, 2004, 78.3: 503-512.

- [42] SKORKOVSKÁ, Karolína. *Perimetrie*. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5282-2.
- [43] Trendy soudobé oftalmologie. Praha: Galén, 2000. ISBN 8072623265.
- [44] Nepřímá goioskopie-schéma. *Wikiskripta* [online]. 2012 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Soubor:Goniosk.png#>
- [45] Gonioskopická čočka. In: *Úvod do speciální kontaktologie* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/do/1499/el/estud/lf/js10/kontakt/web/img/prevobr02a.jpg>
- [46] <https://image.slidesharecdn.com/gdx-151030053548-lva1-app6892/95/gdx-10-638.jpg?cb=1446183530>
- [47] Použití optické koherenční tomografie u roztroušené sklerózy. *Česká a Slovenská neurologie a neurochirurgie* [online]. 2016(79/112), 33-40 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: [http://www.csnn.eu/ceska-slovenska-neurologie-clanek/pouziti-opticke-koherencni-tomografie-u-roztrousene-sklerozy-57237?confirm\\_rules=1](http://www.csnn.eu/ceska-slovenska-neurologie-clanek/pouziti-opticke-koherencni-tomografie-u-roztrousene-sklerozy-57237?confirm_rules=1)
- [48] OGBUEHI, Kelechi C.; ALMUBRAD, Turki M. Evaluation of the intraocular pressure measured with the ocular response analyzer. *Current eye research*, 2010, 35.7: 587-596.
- [49] Lopez-De La Fuente, Carmen et al. "Comparison of Keeler Pulsair EasyEye Tonometer and Ocular Response Analyzer for Measuring Intraocular Pressure in Healthy Eyes." *Journal of Optometry* 5.3 (2012): 139–146. *PMC*. Web. 10 May 2017.
- [50] YAOEDA, Kiyoshi, et al. Comparison of intraocular pressure adjusted by central corneal thickness or corneal biomechanical properties as measured in glaucomatous eyes using noncontact tonometers and the goldmann applanation tonometer. *Clinical ophthalmology (Auckland, NZ)*, 2016, 10: 829.
- [51] PERUCHO-GONZÁLEZ, Lucía, et al. Intraocular pressure and biomechanical corneal properties measure by ocular response analyser in patients with primary congenital glaucoma. *Acta ophthalmologica*, 2015.
- [52] ABITBOL, Olivia, et al. Corneal hysteresis measured with the Ocular Response Analyzer® in normal and glaucomatous eyes. *Acta ophthalmologica*, 2010, 88.1: 116-119.

- [53] EL-MALAH, Mohamed A., et al. Evaluation of corneal biomechanics using ocular response analyzer for normal and primary open angle glaucoma eyes. *Journal of the Egyptian Ophthalmological Society*, 2013, 106.4: 249.



---

ORA	-	Ocular Response Analyzer
CH	-	Hystereze
CRF	-	Faktor rohovkové rezistence
IOPcc	-	Nitrooční tlak zohledňující hysterezi rohovky
IOPg	-	Nitrooční tlak srovnatelný s Goldmannovou aplanační tonometrií
IOPnc	-	Nitrooční tlak naměřený bezkontaktním tonometrem
NT	-	Nitrooční tlak
CCT	-	Centrální tloušťka rohovky
POAG	-	Primární glaukom otevřeného úhlu
NTG	-	Normotenzní glaukom
PACG	-	Primární glaukom uzavřeného úhlu
mmHG-		Torr, milimetr rtuťového sloupce, jednotka hydrostatického tlaku
PSD	-	pattern standart deviation, vzorová směrodatná odchylka ztrát zorného pole

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Složení epitelu rohovky [5].....	2
Obrázek 2: Vrstvy rohovky [6].....	4
Obrázek 3: Hysterezní křivka [12] .....	6
Obrázek 4: Organizace fibril v zadní části stromatu [8].....	8
Obrázek 5a,b: Anatomie komorového úhlu, odtok nitrooční tekutiny [17] .....	10
Obrázek 6: Schiøtzův impressní tonometr [24].....	16
Obrázek 7: Goldmannův aplanační tonometr [28] .....	19
Obrázek 8: Obraz rohovky štěrbinovou lampou [29].....	20
Obrázek 9: Tonopen [35].....	21
Obrázek 10: Bezkontaktní tonometr [30] .....	22
Obrázek 11: Ocular response analyzer [33] .....	23
Obrázek 13a: Gonioskopická čočka [45],Obrázek 13b: Princip zobrazení přes gonioskopickou čočku [44].....	31
Obrázek 14: Princip fázové retardace při měření [46] .....	35
Obrázek 15: Princip OCT [47] .....	36

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Složení nitrooční tekutiny .....	9
Tabulka 2: Převodní tabulka hodnot, Schiøtzův impressní tonometr [26] .....	17
Tabulka 3: Klasifikace glaukomu [1] .....	26
Tabulka 4: Rozdělení kategorií dle velikosti úhlu podle Shaffera [1] .....	32
Tabulka 5: Charakteristika souboru pacientů zahrnutých do analýzy .....	38
Tabulka 6: Průměrné hodnoty naměřené u souboru pacientů .....	40
Tabulka 7: Naměřené hodnoty hystereze u tří skupin rozdělených podle nitroočního tlaku ...	41
Tabulka 8: Výsledné odchylky dvou metod měření .....	45

## Seznam grafů

Graf 1: Zraková ostrost do dálky s korekcí.....	38
Graf 2: Typy korekce do dálky u vyšetřených očí.....	39
Graf 3: Typy medikací v souboru pacientů.....	39
Graf 4: Závislost hystereze na centrální tloušťce rohovky u skupiny 1.....	41
Graf 5: Závislost hystereze na centrální tloušťce rohovky u skupiny 2.....	42
Graf 6: Závislost hystereze na centrální tloušťce rohovky u skupiny 3.....	42
Graf 7: Závislost nitroočního tlaku na hysterezi OP.....	43
Graf 8: Závislost nitroočního tlaku na centrální tloušťce rohovky OP.....	43
Graf 9: Závislost nitroočního tlaku na hysterezi OL.....	44
Graf 10: Závislost nitroočního tlaku na centrální tloušťce rohovky OL.....	44

**Příloha 1: Seznam účinných látek**

<b>Název léku</b>	<b>Učinné látky</b>
<b>Monoterapie</b>	
Bimacan	Bimatoprost
Xalatan	Latanoprost
Monoprost	Latanoprost
Betoptic	Betaxolol
Carteol	Karteol
Timolol	Timolol
<b>Dvojkombinace</b>	
Azarga	Timolol + Brinzolamid
Ganfort	Timolol + Bimatoprost
Xalacom	Timolol + Latanoprost
Cosopt	Timolol + Dorzolamid
Simbrinza	Brimonidin + Brinzolamid
<b>Trojkombinace</b>	
Cosopt + Xalatan	Timolol + Dorzolamid + Latanoprost
Xalacom+Oftidor	Timolol + Latanoprost + Dorzolamid
Dorzotim + Xalatan	Timolol + Drozolamid + Latanoprost
<b>Čtyřkombinace</b>	
Simbrinza + Xalacom	Brimonidin + Brinzolamid + Timolol + Latanoprost