

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI
KATEDRA OPTIKY



METODY A PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ PARAMETRŮ ROHOVKY

Bakalářská práce

VYPRACOVALA:

Šárka Hubáčková

obor 5345R008 OPTOMETRIE

Studijní rok: 2015/2016

VEDOUCÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE:

RNDr. Mgr. František Pluháček, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením RNDr. Mgr. Františka Pluháčka, Ph.D. za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci 4. 5. 2016

.....

Šárka Hubáčková

Poděkování:

Touto cestou děkuji RNDr. Mgr. Františkovi Pluháčkovi, Ph.D. vedoucímu mé bakalářské práce za poskytnuté rady a připomínky k jejímu sepsání.

Obsah

| | |
|--|----|
| 1. Úvod..... | 5 |
| 2. Rohovka..... | 6 |
| 2.1 Anatomie..... | 6 |
| 2.1.1 Vrstvy rohovky..... | 6 |
| 2.2 Základní popisné charakteristiky rohovky..... | 8 |
| 2.2.1 Rohovkový optický systém – popis podle Gullstranda | 8 |
| 2.2.2 Excentricita rohovky..... | 9 |
| 2.3 Změny velikosti a zakřivení rohovky | 10 |
| 2.3.1 Mikrokornea..... | 10 |
| 2.3.2 Megalokornea | 10 |
| 2.3.3 Rohovkový astigmatismus | 11 |
| 2.3.4 Keratoconus posterior | 13 |
| 2.3.5 Keratoglobus | 13 |
| 2.3.6 Cornea plana | 14 |
| 2.3.7 Cornea ovalia | 15 |
| 3. Keratometrie | 16 |
| 3.1 Vývoj keratometru | 16 |
| 3.2 Optický princip keratometrů | 17 |
| 3.3 Mechanické keratometry..... | 19 |
| 3.3.1 Helmholtzův keratometr | 19 |
| 3.3.2 Javal-Schiötzův keratometr..... | 19 |
| 3.3.3 Krahnův keratometr | 21 |
| 3.3.4 Hartingerův keratomet | 21 |
| 3.3.5 Sutcliffův keratometr | 21 |
| 3.3.6 Littmannův keratometr | 22 |
| 3.4 Autokeratometrie | 23 |
| 4. Rohovková topografie..... | 24 |
| 4.1 Topografické technologie..... | 24 |
| 4.1.1 Placidův disk..... | 24 |
| 4.1.2 Rasterstereografie | 26 |
| 4.1.3 Systém slit-imaging | 26 |
| 4.1.4 Scheimpflugovo zobrazení | 27 |
| 4.1.5 Laserová interferometrie..... | 28 |
| 4.2 Topografické mapy | 29 |
| 4.2.1 Topografické mapy lomivosti a křivosti | 29 |
| 4.2.2 Topografické mapy průběhu rohovky | 30 |

| | |
|--|----|
| 5. Srovnání Javal-Schiötzůva keratometru a rohovkového topografu | 31 |
| 6. Závěr | 32 |
| Použitá literatura | 33 |
| Internetové zdroje | 33 |

1. Úvod

Zjištění parametrů rohovky je důležité a nepostradatelné pro korekci refrakčních vad a rohovkových anomálií. K detekci a screeningu možných degenerativních změn nejen na rohovce, ale i na předním segmentu oka slouží nejen pro refrakční chirurgii celá řada přístrojů, zařízení a pomůcek, využívajících k diagnostice. Metody a přístroje pro měření parametrů rohovky prošly v průběhu historie dlouhodobým vývojem. Díky velké konkurenci, výrobců těchto přístrojů, je možné základní metody rozšiřovat a toto vyšetření tím zkvalitnit. Dnes jsou měřicí přístroje vybaveny softwary, které proces zrychlí a analyzovaná data jsou přesnější. Klient je minimálně zatěžován.

Tato práce nejprve popisuje rohovku jako celek, následně její parametry a anomálie rohovky. Následuje popis principu keratometrie a přístrojů keratometrů, které mohou být mechanické nebo automatické. Také se zabývá topografií rohovky, topografickou technologií a analýzou dat pomocí topografických map. V neposlední řadě srovnává vybraná zařízení.

2. Rohovka

Rohovka je latinsky nazývaná cornea. Jedním z úkolů rohovky je propustnost a lom světla a tím vyvolat zrakový vjem na sítnici.

2.1 Anatomie

Rohovka, která zaujímá asi 1/5 plochy, je bezbarvá, zcela průhledná a bezcévná přední část oční koule. Společně se spojivkou, bělimou a slzným filmem tvoří mechanickou a chemicky nepropustnou bariéru mezi zevním prostředím a nitrem oka. Přejichod mezi rohovkou a bělimou se nazývá limbus corneae. Jsou dvě možnosti přechodu rohovky v bělimu. Buď je okraj rohovky zasazen do žlábků v bělimě, nebo se okraj rohovky v periferii ztenčuje a bělima ho překrývá. Tvar rohovky je mírně eliptický s horizontálním poloměrem zakřivení asi 6,8 – 8,5 mm. Vertikální zakřivení je o něco větší než horizontální. Různým zakřivením rohovky vzniká tzv. fyziologický astigmatismus. Pokud je rozdíl obou zakřivení do 1/2 dioptrie, správnému vidění nevadí, neboť ho kompenzuje mozkové centrum. Větší astigmatismus korigujeme cylindricky zakřivenými skly. Centrální tloušťka rohovky je kolem 560 μm a v periferii se ztlušťuje na 650 – 1000 μm . [1, 2, 3]

2.1.1 Vrstvy rohovky

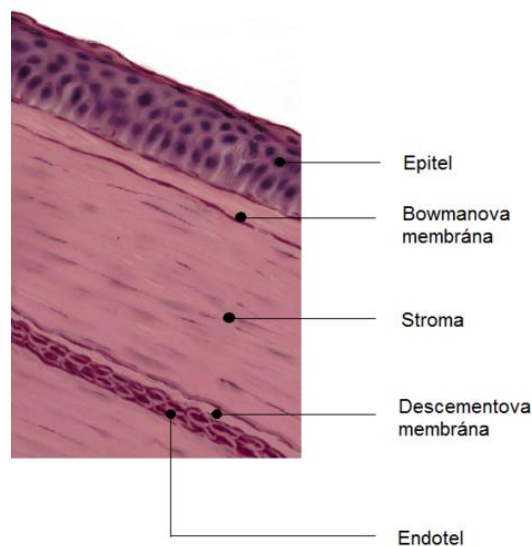
Rohovka se skládá z pěti vrstev. Povrch rohovky tvoří nekeratinizující skvamózní epitel a má pět až sedm vrstev, které představují asi 10 % tloušťky rohovky. V epitelu nalezneme tři typy buněk. První vrstvu tvoří tři vrstvy squamózních buněk, následují dvě vrstvy polygonálních buněk a u bazální membrány se nachází vrstva cylindrických buněk. Epitel se obměňuje přibližně v šestidenním cyklu, tak že se vrchní vrstva odlučuje a stává se příměsí slz. Díky slznému filmu dochází k výživě rohovky, kdy kyslík proniká přes vrstvy rohovky až ke komorové tekutině.

Bowmanova membrána je bazální membrána, která odděluje epitel rohovky od stromatu. Její tloušťka je kolem 8 – 12 μm a skládá se z jemných kolagenních fibril, které tvoří nepravidelným křížením síť. Při porušení Bowmanovy membrány vzniká rohovková jizva, protože membrána nemá schopnost regenerace.

Stroma tvoří 90% celkové tloušťky rohovky. Pravidelnou strukturou kolagenních fibril, uspořádaných do rovnoběžných lamel, je stroma vysoce transparentní. Dále má funkci ochranou a určuje zakřivení rohovky. Schopnost regenerace je malá.

Descementová membrána je produktem endotelové vrstvy rohovky a odděluje stroma rohovky od endotelu. Pomocí funkčních endotelových buněk může regenerovat. Endotelové buňky, při porušení membrány, migrují do defektu a formují novou membránu.

Endotel se skládá z hexagonálních buněk v jedné vrstvě o tloušťce 4 – 6 μm . Je zodpovědný za hydrataci rohovky a tím udržuje konstantní optickou mohutnost rohovky. Průměrná hustota buněk endotelu od narození postupně klesá. Při úbytku nebo defektu buněk, dochází ke zvětšování povrchu stávajících buněk. Pokud klesne počet na 800 buněk na mm^2 a méně, sníží se transparentnost rohovky a nastává otok rohovkového stromatu. [2]



Obr. 1 – Vrstvy rohovky

2.2 Základní popisné charakteristiky rohovky

Mezi základní popisné charakteristiky můžeme zařadit např. zakřivení rohovky a její optickou mohutnost.

2.2.1 Rohovkový optický systém – popis podle Gullstranda

Švédský oftalmolog Allvar Gullstrand vytvořil dosud užívaný a nejpodrobnější optický model oka, tzv. Gullstrandovo schematické oko. Tento model se používá pro teoretické optické výpočty. Model předpokládá, že jednotlivé prvky optické soustavy oka jsou kulové plochy, obklopené prostředím o známém indexu lomu. Celkem uvažuje 6 optických ploch (přední plocha rohovky, zadní plocha rohovky, přední plocha čočky, přední plocha jádra čočky, zadní plocha jádra čočky, zadní plocha čočky). Konkrétní parametry rohovky, dle tohoto modelu, jsou uvedeny v tab. 1. Rohovka je obklopena ze přední strany vzduchem o indexu lomu $n = 1$, ze zadní strany komorovou vodou o indexu lomu $n = 1,336$. Pomocí indexu lomu komorové vody lze vypočítat celková optická mohutnost rohovky podle vzorce

$$\varphi = \frac{n-1}{r}. \quad (1)$$

| | Poloměr křivosti (mm) | Vzdálenost od vrcholu rohovky (mm) | Optická mohutnost (D) | Index lomu |
|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|------------|
| Přední plocha rohovky | 7,70 | 0,00 | 48,83 | |
| Zadní plocha rohovky | 6,80 | 0,50 | -5,88 | |
| Rhovka jako celek | | | 43,05 | 1,38 |

Tab. 1 – Hodnoty rohovky podle Gullstranda

Další optický model oka je Emsleyova-Graffova modifikace zjednodušeného Gullstrandova schématického oka, kdy je přední a zadní plocha rohovky nahrazena pouze jednou lámavou plochou o poloměru křivosti 7,8 mm. U Standardního redukovaného oka je plocha rohovky, přední plocha čočky a zadní plocha čočky nahrazena pouze jednou plochou o poloměru zakřivení 5,55 mm. [2, 4]

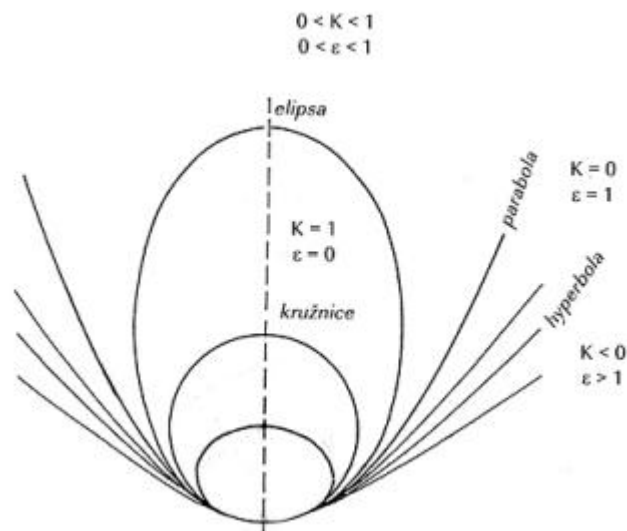
2.2.2 Excentricita rohovky

Z matematického hlediska můžeme rohovku chápat jako rotační plochu nebo obecnou plochu druhého stupně. U rotační plochy jsou řezy i křivky ve všech meridiánech stejné. Má jediné centrální zakřivení r_0 . Jde-li o obecnou plochu druhého stupně, jsou řezy v různých meridiánech různé (astigmatická rohovka). Centrální zakřivení se mění od $r_{0,\max}$ po $r_{0,\min}$. Meridiány s $r_{0,\max}$ a $r_{0,\min}$ jsou navzájem kolmé (hlavní meridiány).

Rohovka není v reálném oku tvořena sférickými plochami, ale její zakřivení se směrem k periférii mění. Toto lze číselně charakterizovat pomocí excentricity ε . Platí, že čím větší excentricita, tím plošší je rohovka v periférii. Běžné hodnoty excentricity jsou kolem 0,35 – 0,55.

Možné tvary řezů v meridiánech, které charakterizuje excentricita ε :

- kružnice $\varepsilon = 0$
- elipsa $0 < \varepsilon < 1$
- parabola $\varepsilon = 1$
- hyperbola $\varepsilon > 1$



Obr. 2 – Možné tvary řezů v meridiánech
(K – tvarová konstanta a ε – excentricita rohovky)

Přibližně můžeme excentricitu spočítat dle vztahu

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\bar{r}_s - \bar{r}_0}, \quad (2)$$

kde \bar{r}_0 je průměrné centrální zakřivení,

$$\bar{r}_0 = \frac{r_{0,max} + r_{0,min}}{2}, \quad (3)$$

a \bar{r}_s je průměrné sagitální zakřivení

$$\bar{r}_s = \frac{r_{s,temp} + r_{s,nas} + r_{s,sup} + r_{s,inf}}{4}. \quad (4)$$

Do vztahu pro $\bar{\varepsilon}$ je nutné dosazovat poloměry v mm. [8]

2.3 Změny velikosti a zakřivení rohovky

Mezi rohovkové anomálie velikosti patří mikrokornea a megalokornea. K anomáliím zakřivení rohovky řadíme astigmatismus, keratokonus, keratoglobus, cornea plana, cornea ovalia.

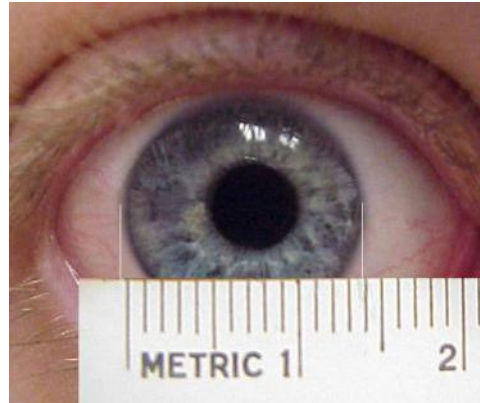
2.3.1 Mikrokornea

Mikrokornea představuje rohovku s průměrem menším než 10 mm, kdy oko je normálních rozměrů a normální histologickou strukturou. Může se vyskytovat jako jednostranné, častěji jako oboustranné postižení. Vzniká zastavením růstu rohovky po 5. měsíci embryonálního vývoje. Zraková ostrost není ovlivněna, pokud se vyskytuje samostatně. Někdy je mikrokornea doprovázena i jinými anomáliemi předního segmentu oka nebo se systémovými chorobami. V dospělosti může u pacientů s mikrokorneou vzniknout glaukom uzavřeného úhlu. [2,7]

2.3.2 Megalokornea

U megalokorney je průměr rohovky větší než 12,8 mm a normální histologická struktura. Je to neprogresivní onemocnění, kdy celý přední segment oka je disproportionálně větší než zbytek oka. Převážně se vyskytuje oboustranně. Megakornea se v 90 % vyskytuje u mužů a je geneticky vázaný na chromozom X. Může se vyskytovat s jinými anomáliemi. Nejčastěji je to zadní embryotoxon, mozaiková rohovková dystrofie, infatilní či juvenilní glaukom a syndrom disperze pigmentu. Megalokornea se může vyskytovat společně s genetickými syndromy: Downovým,

Alportovým či Marfanovým syndromem. Anomálie se projevuje vznikem myopie a astigmatismu, popřípadě může v dospělosti dojít i k rozvoji katarakty. Komplikace se můžou vyskytnout v podobě glaukomu a subluxace čočky. Terapie megalokornej je korekce refrakční vady a při vzniku katarakty její odstranění. [2,7]



Obr. 3 – Megalokornea

2.3.3 Rohovkový astigmatismus

Rohovkový astigmatismus je asférická refrakční vada, kdy optický systém oka má v různých meridiánech různou optickou mohutnost. Paprsky vstupující rovnoběžně do oka nevytvoří v různých meridiánech ohnisko ve stejné rovině. [5]

Rozdělení astigmatismu

Pro jednodušší interpretaci se rohovkový astigmatismus dělí na pravidelný (regularis) a nepravidelný (irregularis).

Pravidelný astigmatismus

U pravidelného astigmatismu se bod nezobrazí jako bod, ale jako dvě navzájem kolmé úsečky ležící v různých rovinách. Existuje jeden meridián s maximální lomivostí a jeden s minimální lomivostí, které jsou navzájem kolmé. Tento astigmatismus lze korigovat brýlemi nebo kontaktními čočkami.

Podle toho, který meridián má větší nebo menší lomivost, rozdělujeme dále pravidelný astigmatismus na:

- rectus (přímý, podle pravidla) – vertikální meridián má větší lomivost (ohnisková linie blíže k rohovce) než horizontální meridián (ohnisková linie dále od rohovky)

- inversus (nepřímý, proti pravidlu) – vertikální meridián má menší lomivost než horizontální meridián
- obliquus (šikmých os) – nelze rozhodnout, zda je lomivost větší u vertikálního nebo horizontálního meridiánu

Z těchto tří druhů astigmatismu můžeme dále každý rozdělit na:

- simplex (jednoduchý) – myopicus – vertikální meridián leží před sítnicí a horizontální meridián na sítnici, hypermetropicus – vertikální meridián leží na sítnici a horizontální meridián za sítnicí
- compositus (složený) – myopicus – oba meridiány leží před sítnicí, hypermetropicus – oba meridiány leží za sítnicí
- mixtus (smíšený) – jeden meridián je před sítnicí a druhý za sítnicí

Platí v případě astigmatismu podle pravidla. U astigmatismu proti pravidlu je prohozený vertikální s horizontálním meridiánem. [5]

Nepravidelný astigmatismus

V každém meridiánu má jinou optickou mohutnost. Často nelze určit meridián s maximální a minimální lomivostí. Je způsoben například deformací rohovky.

Nelze plně korigovat brýlovými čočkami. Obvykle můžeme nalézt větší (menší) pravidelnou složku, kterou lze korigovat brýlovou čočkou. [5]

Celkový astigmatismus dělíme na:

- rohovkový – asférické zakřivení rohovky, většinou vrozené nebo získané, např. tlakem horního očního víčka, obvykle podle pravidla
- čočkový – asférické zakřivení ploch čočky, decentrace čočky, obvykle proti pravidlu, bývá v menší míře než rohovkový
- zbytkový – zanedbatelný, způsoben nepravidelností očního pozadí

Celkový astigmatismus můžeme vypočítat podle vztahu $Ast_C = Ast_R + Ast_Č + Ast_Z$ (Ast_C – astigmatismus celkový, $Ast_Č$ – astigmatismus čočkový, Ast_Z – astigmatismus zbytkový). [5]

Vliv rohovkového astigmatismu na celkový oční astigmatismus vyjadřuje Javalova podmínka:

$$Ast_c = 1,25 Ast_R \pm 0,5 D. \quad (5)$$

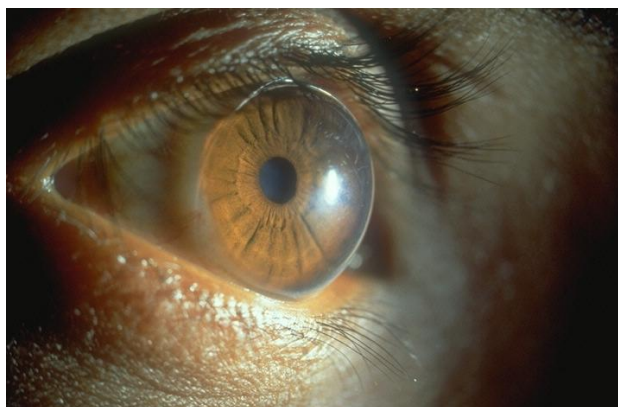
Hodnota 0,5 D představuje v rovnici očekávaný kompenzační nebo zesilující podíl čočkového astigmatismu. U přímého rohovkového astigmatismu (podle pravidla), použijeme znaménko mínus a u nepřímého rohovkového astigmatismu (proti pravidlu), použijeme znaménko plus. [9]

2.3.4 Keratoconus posterior

Zadní keratokonus nemá vztah k přednímu keratokonu a je to vzácné vývojové onemocnění. Zpravidla jednostranné, neprogresivní, nezánětlivé onemocnění. Neovlivňuje zrakovou ostrost, ale může způsobit myopický astigmatismus. U zadního keratokonu existují dvě formy – generalizovaný a ohraničený. Je-li vnitřní rohovkové zakřivení je vyšší než přední a zároveň přední zakřivení rohovky má fyziologické hodnoty, jde o generalizovaný keratokonus, kdy centrální rohovka je protenčená, ale transparentní. Výskyt ohraničeného keratokonu je častější. Charakterizujeme ho jedním nebo více lokalizovanými krátery v centrální či paracentrální zóně rohovky. Na zadní ploše vytváří rohovkový defekt ohraničený pigmentovou linií. V oblasti defektů můžeme histopatologicky pozorovat narušenou descemetickou membránu a endotel. Zadní keratokonus může být provázeno očními i systémovými anomáliemi. Léčbu obvykle zadní keratokonus nevyžaduje. Chirurgický zásah v podobě perforující keratoplastiky je prováděn jen u netransparentní rohovky ovlivňující zrakovou ostrost. [2]

2.3.5 Keratoglobus

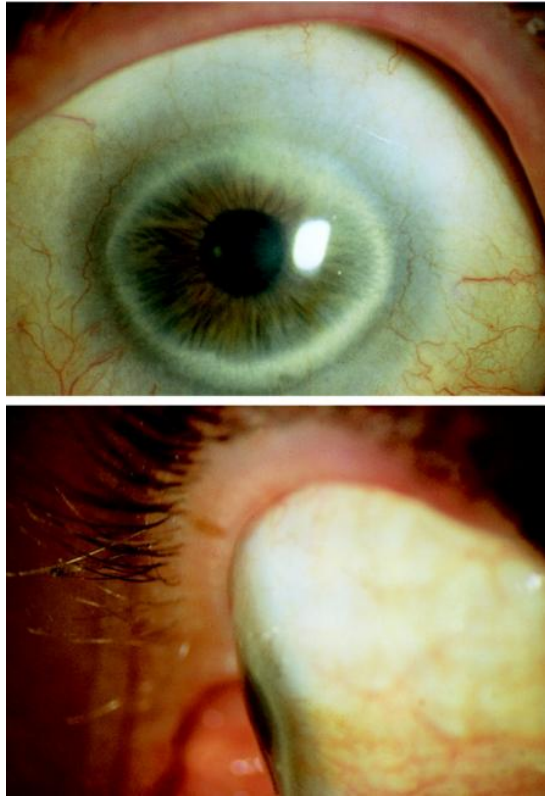
Keratoglobus je vrozené oboustranné onemocnění, které se často projevuje hned po narození. Rohovka je celá protenčená a má kulovité zakřivení. Rohovka má normální velikost, je transparentní a optickou mohutnost má mezi 60-70 D. Keratoglobus se vyskytuje samostatně nebo se systémovými chorobami (Ehlersův-Danlosův syndrom, systémové kolagenózy, Leberova kongenitální amauroza). Léčba spočívá v korekci refrakční vady. Keratoplastika je vzhledem k většímu rozsahu ztenčení jen vzácně indikovaná. [2,7]



Obr. 4 – Keratoglobus

2.3.6 Cornea plana

U této anomálie má rohovka plochý meridián zakřivení pouze kolem 20-30 D. Často je doprovázena znaky skleralizace (v periferii a často i v centru je rohovka opaktní až zcela neprůhledná). Cornea plana doprovází řadu očních i systémových onemocnění. Je to neprogresivní onemocnění často oboustranné s asymetrickým nálezem. Vyskytuje se výjimečně, ale i jako geneticky vázané. Horší prognózu má autozomálně recesivní forma. U mužů a žen je stejná incidence. Histopatologické studie prokazují skleratizaci rohovky – iregulární epitel, fragmentaci či úplné chybění Bowmanovy membrány. Kolagenní lamely, typické pro skléru, bývají nepravidelně uspořádány. Může být i vaskularizace rohovky. Rohovkový úhel je u opaktní rohovky abnormální se sklonem ke vzniku glaukomu. Přítomny bývají i mnohočetné oční abnormality (kongenitální přední synechie, aniridie, glaukom různého typu, retinální aplazie, retinální a uveální kolobom). Cornea plana může být spojena ze systémových onemocnění s cerebelárními anomáliemi, syndromem Hurlerové, osteogenesis imperfecta, trizomií 13. a 18. chromozomu a mnoha dalšími. [2,7]



Obr. 4 – Cornea plana

2.3.7 Cornea ovalia

Vrozené onemocnění zakřivení rohovky, kdy jeden z rozměrů, horizontální nebo vertikální, se liší od fyziologických. Cornea ovalia rozdělujeme na:

- horizontální cornea ovalia – vyskytuje se u cornea plana a s dalšími anomáliemi není spojena,
- vertikální cornea ovalia – je přítomna u kolobomů duhovky, kongenitální keratitidy, mikrokorney, Riegerovy anomálie a Turnerova syndromu. [2]

3. Keratometrie

Keratometrie je metoda, která se zabývá měřením poloměru křivosti zrcadlíci se přední plochy rohovky pomocí keratometru, který je buď mechanický, nebo automatický. Poloměr křivosti je udáván v milimetrech a dioptriích.

Keratometry tvoří skupinu přístrojů, které jsou určeny k měření zakřivení první plochy rohovky. Tyto údaje o zakřivení rohovky zajímají zejména kontaktology při aplikaci kontaktních čoček. Zjištění anomálie tvaru rohovky má zásadní hodnotu také pro oftalmologa. Keratometrem můžeme přesně určit orientaci hlavních řezů, odhad a celkový stupeň pravidelného rohovkového astigmatismu.

Všechny keratometry využívají první zrcadlíci plochu rohovky jako konvexní zrcadlo, kterým zobrazují vhodné koincidenční testy. Ze zákonitostí optického zobrazování na konvexním zrcadle, pak při použití zobrazovací rovnice dospívají k vyjádření měřeného poloměru křivosti první plochy rohovky. [9]

3.1 Vývoj keratometru

Již roku 1619 byla první zmínka o zrcadlení přední plochy rohovky, kterou vyslovil Christopher Scheiner. Počátkem roku 1832 prováděl Karl Friedrich Theodor Krause měření rohovek u extrahovaných očí, kde popisoval přední plochu rohovky jako sférickou plochu a zadní plochu rohovky jako parabolickou plochu. Měření na živých očích pomocí odražených obrazů od určitého předmětu prováděl Rudolf Kohlrausch roku 1840, které pozoroval dalekohledem z dané vzdálenosti od měřeného oka. V roce 1846 pozoroval Dr. Karl E. Senff oploštění rohovky směrem do periferie. Popisoval eliptický vzhled a tvrdil, že apex rohovky není s optickou osou vždy v koincidenci. [10]

První keratometr zkonstruoval v roce 1856 Hermann von Helmholtz. Byl to spíše laboratorní přístroj s testovými značkami v pětimetrové vzdálenosti, který nebyl vhodný pro praktické použití, i když vykazoval překvapivou přesnost měření a značnou nezávislost na změně vzdálenosti rohovky od přístroje.

Více se rozšířil keratometr zkonstruovaný roku 1881 Emilem Javalem a Hjalmar Augustem Schiötzem. Přístroj se ukázal jako mimořádně citlivý na dodržení vzdálenosti měřící hlavy od rohovky.

Největšího rozšíření se u nás dočkal keratometr zkonstruovaný Hansem Hartingerem, z jenské produkce firmy Zeiss a v novější době pak keratometr Johna Hamera Sutcliffea z roku 1907 od firmy Bausch & Lomb. Oba keratometry vykazují

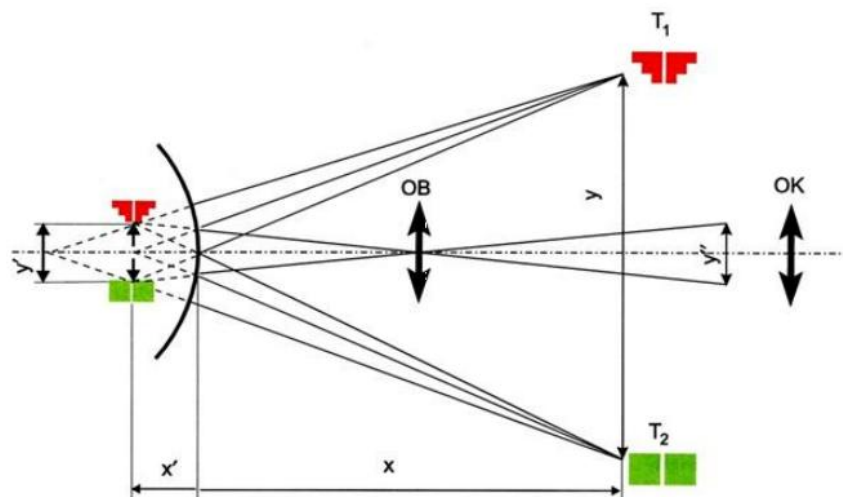
podobné parametry, i když používají každý poněkud odlišného principu zdvojení základních značek.

Známý je i princip keratometru vyráběný firmou Rodenstock navržený Krahnem. Dalo by se o tomto keratometru hovořit jako o hybridu, který využívá a kříží koncepci původního Helmholtzova a Javal-Schiötzova přístroje, jenž je nezávislý na vzdálenosti od měřené rohovky.

Za nejdokonalejší přístroj svého druhu se považuje Littmannova konstrukce keratometru z roku 1950. Umožnila sestavit přístroj, který je též značně nezávislý při běžných vyšetřovacích podmínkách na změnu vzdálenosti od měřené rohovky. V inovovaných verzích je po desetiletí stále vyráběn firmou Zeiss v Oberkochenu. [9]

3.2 Optický princip keratometrů

Optický princip zobrazení keratometru vyplývá ze schématu na obr. 5. Před zrcadlicí konvexní plochu rohovky o určitém poloměru křivosti r se umístí dvě koincidenční testové značky T_1 a T_2 , jejichž vzdálenost představuje vhodný předmět o velikosti y , umístěný ve vzdálenosti x od rohovky, rohovka vytvoří obraz o velikosti y' a obrazové vzdálenosti x' . Z podmínek optického zobrazení můžeme vyjádřit velikost rádiusu rohovky r .



Obr. 5 – Schéma optického principu keratometru

Pro poměr velikosti obrazu a předmětu v porovnání s obrazovou a předmětovou vzdáleností platí v paraxiálním zobrazení rovnice

$$\frac{y'}{y} = -\frac{x'}{x}. \quad (6)$$

Odtud

$$x' = \frac{-y'x}{y}, \quad (7)$$

chápeme-li odraz jako zvláštní případ lomu za podmínky, že

$$n' = -n \quad (8)$$

a dosadíme do Gaussovy rovnice

$$\frac{n'}{x'} + \frac{n}{x} = \frac{n'-n}{r}, \quad (9)$$

získáme zobrazovací rovnici na zrcadle

$$\frac{1}{x'} + \frac{1}{x} = \frac{2}{r}. \quad (10)$$

Pro poloměr r pak platí

$$r = \frac{2xx'}{x+x'}. \quad (11)$$

Substitucí x' (z rovnice, vyjadřující příčné zvětšení) do výsledného tvaru této zrcadlové rovnice obdržíme

$$r = \frac{\frac{-2x^2y'}{y}}{x + \frac{(-y'x)}{y}} = \frac{-2x^2y'}{x(y-y')}, \quad (12)$$

resp. keratometrickou rovnici ve tvaru

$$|r| = \frac{2xy'}{y-y'}. \quad (13)$$

Tato rovnice je základem pro keratometry s konečnou vzdáleností uvažovaných testových značek. Obrazy testových značek jsou na povrchu rohovky zvětšeny a pozorovány dalekohledovým systémem.

Keratometry musí být vybaveny zdvojující soustavou, protože se oko fyziologicky chvěje, což je příčinou neklidného obrazu v rovině stupnice a znemožňuje jeho objektivní vyhodnocení. Při zdvojení se hodnotí vzájemná pozice rozdvojených obrazů. Princip optického zdvojení je u jednotlivých keratometrů různý. [9]

3.3 Mechanické keratometry

Mezi mechanické keratometry řadíme: Helmholtzův keratometr, Javal-Schiötzův keratometr, Krahnův keratometr, Hartingerův keratometr, Sutcliffův keratometr, Littmannův keratometr.

3.3.1 Helmholtzův keratometr

Helmholtzův keratometr byl zkonstruován roku 1856 a byl prvním keratometrem. Testové značky, určené pro vyšetřovací vzdálenost 5 m, představovaly dvě petrolejové lampy, umístěné v rozích zkušební místnosti. Na rohovce se pozorovaly pomocí astronomického dalekohledu zrcadlové obrazy lamp. Jako zdvojující soustavu využíval planparalelní destičky, které byly vertikálně přesazené a vyplňovaly každá polovinu vstupní pupily. Z naklonění a postavení testových značek se pak poměrně složitým způsobem vypočítal rádius rohovky.

Helmholtzův keratometr splňoval dva ze tří Littmannových požadavků, které předurčují konstrukci nejkvalitnějších keratometrů:

- nekonečná vzdálenost testových značek, resp. Jejich zobrazení optickou cestou do nekonečna,
- měření velikosti y' rovnoběžným posouváním paprskových svazků,
- energetické dělení paprskového svazku. [9]

3.3.2 Javal-Schiötzův keratometr

Testové značky v podobě děleného obdélníku a stupňovité pyramidy jsou umístěné pohyblivě na obloukovitém a otáčivém rameni přístroje ve vzdálenosti asi 25 cm před rohovkou. Zdvojení paprskového svazku je vyvoláno průchodem přes tzv. Wollastonův hranol (složen ze dvou klínů dvojlomného islandského vápence slepených kanadským balzámem v subtraktivní poloze).

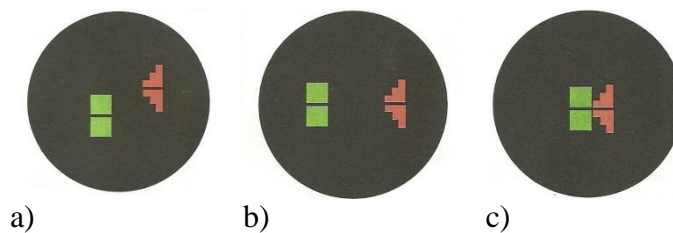
Princip měření je u přístroje obrácený než u Helmholtzova keratometru. Zde se používá konstantního zdvojení obrazu pohyblivými testovými značkami v poměrně přesně definované vzdálenosti před rohovkou. Zdvojené obrazy značek se umísťují do standardního vzájemného postavení, čímž je vždy zajištěna konstantní velikost rohovkového obrazu y' . Stačí tedy odečíst vzdálenost značek y a r pak určíme ze vztahu (13).



Obr. 6 – Javal-Schiötzův keratometr

Hlava se při měření fixuje na bradové a čelní opěrce. Keratometr se nastaví do přesné vzdálenosti vůči měřenému oku. Nacentruje se přístroj pomocí hrubých zaměřovacích značek v podobě hledí a mušky. Měřená osoba fixuje malé světélko umístěné pod středovým tubusem s měřicí optikou. V okuláru keratometru vidíme testové značky v obecně definované poloze (viz obr. 7 a)). U astigmatické rohovky nejsou půlící a dělicí linie obou značek v koincidenčním postavení (obr. 7 a)). Málo pravděpodobné je, že by se testové značky vzájemně dotýkaly.

Nejprve je nutno dosáhnout koincidenčního postavení dělicí středové linie značek (obr. 7 b)) a to otáčením celého ramene přístroje, které unáší i testové značky. Tak je umožněno vyjádřit orientaci jednoho hlavního řezu rohovky. Pak je mechanickým převodem měněna rozteč značek na obloukovitém rameni, dokud nejsou obě testové značky vnímány v koincidenci (obr. 7 c)). V prostředí o indexu lomu $n = 1,376$ průměrné Gullstrandovy rohovky, lze na třech stupnicích odečítat úhel měřeného směru, poloměr křivosti rohovky a lámavost tohoto rohovkového řezu. U pravidelného rohovkového astigmatismu je možno dosáhnou opět stavu koincidence střední dělicí linie značek ovládním jejich posuvu a vyhodnotit parametry druhého hlavního řezu první plochy rohovky tím, že otočíme měřicí hlavu přístroje s testovými značkami o 90° .



Obr. 7 – Postavení koincidenčních značek Javal-Schiötzůva keratometru v jednotlivých fázích měření rohovkového astigmatismu

Protože je Javal-Schiötzův keratometr závislý na vzdálenosti ustavení vůči měřené rohovce, při práci s přístrojem je nutno dbát, aby obrazy testových značek byly ostré, včetně eventuální čárové struktury použitých refrakčních značek. [9]

3.3.3 Krahnův keratometr

Krahnův keratometr má stejné testové značky jako Javal-Schiötzův keratometr, s tím rozdílem, že jsou pevně umístěny po stranách měřicí hlavy přístroje. Jelikož jsou testové značky umístěny relativně blízko před rohovkou, je měření závislé na vzdálenosti od ní. Používá Wilmsovu zdvojující soustavu, čímž bylo následně možné zvýšit přesnost měření. Užitý princip zdvojení obrazu nezvyšuje závislost přesnosti měření na vzdálenosti od rohovky. [9]

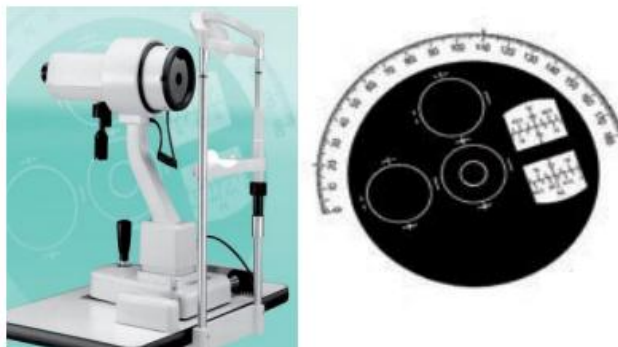
3.3.4 Hartingerův keratomet

Keratometr používá pevné testové značky a výsledek měření je závislý na přesné vzdálenosti vůči měřené rohovce. Zdvojení a posouvání testových značek se uskutečňuje použitím soustav dvou diasporametrů mezi čočkami objektivu. [9]

3.3.5 Sutcliffův keratometr

U Sutcliffova keratometru je výsledek měření závislý na přesném nastavení vůči vrcholu rohovky. Při měření keratometrem se nemusí měřicí hlava otáčet a můžeme z jednoho nastavení přístroje proměřovat oba parametry hlavních řezů astigmatického oka. Zdvojení kruhové testové značky se uskuteční ve dvou na sebe navzájem kolmých směrech pomocí párů klínů s bázemi ve vertikálním a horizontálním směru. Při vyšetřování vnímáme tři testové kružnice. Dosažení koincidenčního postavení všech

kružnic můžeme určit i odchylky lámavosti rohovky v příslušném směru. Nepravidelnosti rohovky se projeví zřetelně, neboť lidské oko je ve značném stupni vnímavé a citlivé na tvarové porušení kružnice. Aby bylo dosaženo správné pracovní vzdálenosti, je keratometr vybaven projekčními značkami, které je nutné v rovině rohovky spojit na principu Scheinerovy štěrbin. [9]

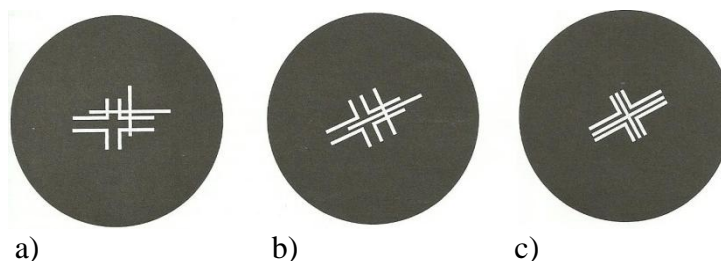


Obr. 8 – Sutcliffův keratometr OM-4, včetně testové značky

3.3.6 Littmannův keratometr

Littmannův keratometr je v současnosti považován za nejpřesnější přístroj pro měření parametrů rohovky. Je to přístroj Helmholtzova typu, který je necitlivý na změny polohy vůči rohovce a využívá energetického dělení paprskového svazku.

Má testové značky v podobě zdvojené kontury dutého kříže, do kterého se zasouvá vnitřní plný kříž (obr. 9). Pomocí hranolových systémů jsou paprsky děleny. Zdvojení testových značek umožňuje dvojce slabých rozptylek, které je možno decentrovat mezi hranolovými soustavami. V cílové pozici by měly zdvojené obrazy splynout a současně by měl být jako na obr. 9 c). [9]



Obr. 9 – Postavení koincidenčních značek Littmanova keratometru v jednotlivých fázích měření rohovkového astigmatismu

3.4 Autokeratometrie

Princip u autokeratometrie je obdobný jako u klasické keratometrie, jen k provedení centrace a měření poloměru křivosti rohovky využívá počítač. Přístroj musí zohledňovat, že objekt se neustále hýbe. U přístroje je výhodou možnost měření v průměru až 7,5 mm. Při měření se využívá přirozeného odrazu na povrchu rohovky a osvětlení musí splňovat bezpečnostní limity.

Měření se sestává z několika kroků. Za prvé je promítána testová značka na rohovku s využitím roviny polarizovaného záření. Jedná se o oblast vlnové délky blízkou infračervené laserové diody (830 nm). Za druhé se porovnávají testové značky s odraženým obrazem. Nejen na přední ploše rohovky dochází k odrazu, ale i od zadní plochy rohovky a čočky, které je nutné odstranit filtrováním. CCD kamera se využívá jako detektor záření, na to se informace převede do digitální podoby. Odchyšky poloměru křivosti vůči referenční rovině následně vyhodnotí počítač. Přístroje jsou vybaveny monitorem nebo displayem. Odpadá zdvojení, protože je hodnocen statický snímek a není nutné eliminovat třes rohovky.

Dalším stupněm vývoje je metoda, kdy přestává hodnotit koincidenci značek lidské oko, tím se zvyšuje přesnost a objektivnost měření. Vyšetřovací čas se krátí, protože odpadá nutnost hledání hlavních řezů. Autokeratometr často výrobci spojují s autorefraktometrem, tonometrem a aberometrem. [11]



Obr. 10 – Autorefraktometr/Autokeratometr TOPCON KR-800

4. Rohovková topografie

Topografie rohovky je neinvazivní zobrazovací metoda, která podrobně popisuje povrch rohovky. Využívá analýzu obrazu vhodných značek promítaných na téměř celou rohovku při aplikaci vzorce (13).

Tato metoda měří dioptrickou mohutnost a monitoruje změny zakřivení rohovky. Z topografické mapy rohovky jsme schopni vyčíst polohu, poloměr křivosti a dioptrickou hodnotu kteréhokoliv bodu na rohovce. Metoda se také využívá při refrakční chirurgii. Poskytuje informace pro předoperační screening, plánování operace, vyhodnocení výsledků operace a možných komplikací. Dále se využívá u diagnostiky a monitoringu keratokonu, operace katarakty a pooperační péči u keratoplastiky. [9]

4.1 Topografické technologie

Principy topografie jsou založeny na odrazu soustředných kruhů na rohovce. Jako nesouměrnost keratografického modelu jsou představovány změny v zakřivení a astigmatismu. Součástí moderních keratoskopů je sada obrázků k analýze rohovkových anomálií. Propagací refrakční chirurgie a požadavky na rostoucí přesnost je zaměřen vývoj topografie. [12]

4.1.1 Placidův disk

Jedná se o soustavu soustředných kružnice promítaných na rohovku, jejich vizuálním či početním vyhodnocením se vyhodnocuje topografie rohovky. Přímé pozorování osvětlených značek na rohovce představujících Placidův disk umožňují keratoskopy. Bližší kruhy značí strmější osu, kruhy vzdálenější od sebe plošší osu. S kombinací počítačovou analýzou byla tato technologie používána k vyhodnocení tvaru rohovky. Systémy obsahují prosvěcovaný Placidův terč ve tvaru kužele nebo disku, zobrazovací systém objektivu a kamery, počítač pro obrazovou analýzu. U různých systémů se liší číslo, pozice, barva a hustota kruhů. Při analýze se srovnává poloměr vzorové kružnice, který ve vztahu (13) zastupuje vzdálenost značek y , s poloměrem jejího obrazu (ve vztahu (13) se dosadí za y'). Odtud se spočítá r pro každý bod promítané kružnice.

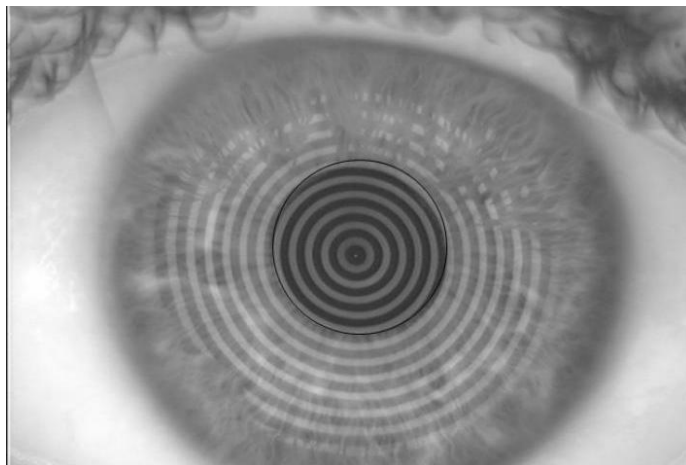
Placidovy systémy se dělí na těsný a volný. Těsný terč, nazýván také malý terč, umožňuje zobrazení s nižší kvalitou osvětlení, ale má větší rohovkové pokrytí. Je citlivý

na nastavení zaostření. Anatomie obličej je bývá k tomuto měření překážkou. Volný terč, nazývaný velký terč, vyžaduje větší osvětlení a menší citlivost na nepřesnost zaostření. Obsluha je snadnější a celkově pokryje menší část rohovky.

Většina systémů promítá obrazy osvětlených keratopických kruhů na povrch rohovky k vytvoření zdánlivého obrazu Placidova disku 4 mm za vrcholem rohovky. Měří přímo zakřivení rohovky a zkruslení vyvýšení použitím dat zakřivení, které vyžaduje znalost geometrie rohovky. Vyvýšení rohovky je vytvořeno rozdílem ve sklonu k předem definovanému matematickému modelu v topografu, který může být sférický, asférický, nebo částečně kuželovitý. Topograf ho vybírá automaticky. Srovnání touto možností může být rozhodující při odhalení odchylek očních onemocnění nebo změn u očí pacientů, kteří podstoupili refrakční operaci nebo keratoplastiku. [12]



Obr. 12 – Placidův disk



Obr. 13 – Placidův disk promítaný na rohovku

4.1.2 Rasterstereografie

Rasterstereografie využívá rozptylu světla na rozhraní vzduchu a slzného filmu. Pro zvýraznění tohoto jevu se používá fluoresceinu k obarvení slz. Na rohovku je promítána pravidelná struktura mřížky. Tvar rohovky je vypočítán ze zachycené dvourozměrné struktury. Analýza se zabývá křížením jednotlivých úseček mřížky, které v tomto představují testové značky.

Tento systém může zobrazit nepravidelnosti a jizvy rohovky. Systém je vhodný u rohovek odrážejících málo světla. Vykazuje relativně malé chyby centrace a měření v periférii dosahuje vysoké přesnosti.

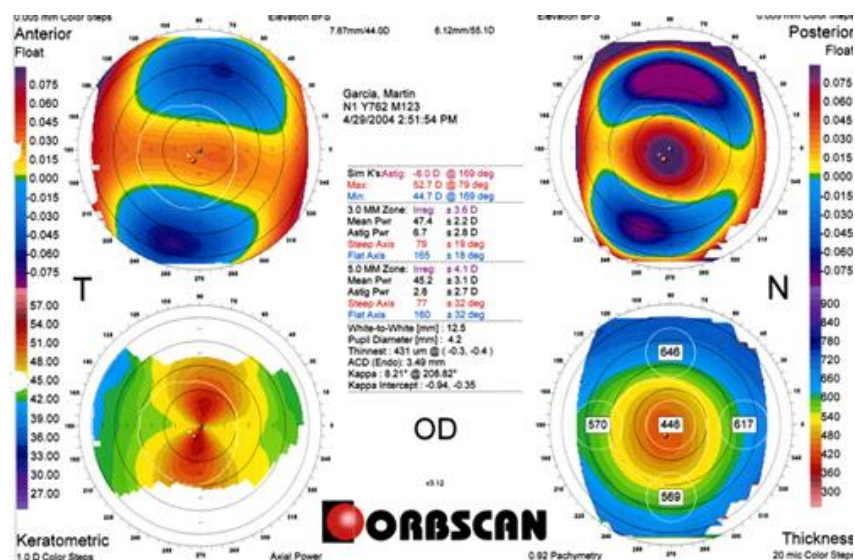
Nevýhodou tohoto přístupu je nutnost barvení fluoresceinem. Pro pacienta tato metoda znamená zátěž, možné riziko infekce nebo alergické reakce. Omezení měřených bodů na 1400 je nevýhodou, protože jiné přístroje dosahují daleko vyšších možností. Tato metoda zůstala jen teoretickou. [13]

4.1.3 Systém slit-imaging

Princip tohoto systému je obdobný jako u štěrbinové lampy. Svazek monochromatického světla prochází přes štěrbinu a dále pak k oku. Odrazem světelného svazku na rozhraní přední, zadní plochy rohovky a dalších částí je získán obraz rohovky. Přístroj využívá dvou štěrbin orientovaných v úhlu 45° od osy registračního přístroje a v každém směru je zachyceno 20 obrazů. Pro zvýšení přesnosti v centrální části rohovky dochází k překrytí pole obou štěrbin.

Měření z přední a zadní plochy rohovky zachycuje několik tisíc datových bodů. Za pomoci matematických algoritmů a počítače z jednotlivých zachycených obrazů je složen model rohovky. Tuto výhodu lze využít u refrakční chirurgie, kdy je počítána optická mohutnost rohovky. Není proto nutné rohovku zjednodušeně považovat za jednu plochu, ale s vyšší přesností počítat s přední a zadní plochou rohovky. Tato metoda je vhodnější u pacientů s poruchami slzného filmu, epitelu a jizvami rohovky. Musíme zde počítat s nižší přesností měření.

Nevýhodou je relativně dlouhý měřicí čas asi 1,5 s. Přesnost měření narušují mimovolní oční pohyby, proto se výrobci zaměřují na vývoj softwaru pro monitoring a minimalizaci vlivů pohybů na měření. Tento princip je využit u přístroje Orbscan. [13]

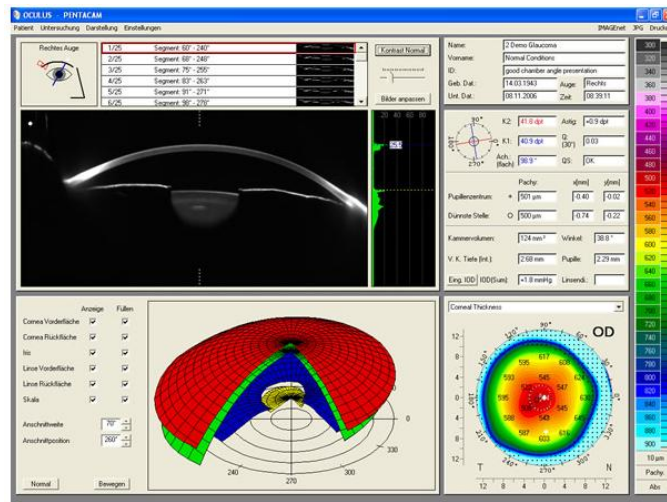


Obr. 14 – Zobrazení topografických map na přístroji Orbscan

4.1.4 Scheimpflugovo zobrazení

K zachycení obrazů rohovky se využívá Scheimpflugova kamera. Od ostatních kamer je zobrazování Scheimpflugovou kamerou odlišné. Je dosaženo velké hloubky ostrosti, která umožňuje zobrazení řezu celého předního segmentu oka. Z tohoto je pak jeho analýzou stanoven průběh tvaru rohovky v daném směru. Kamera během jednoho měření rotuje a zachytí asi 50 obrazů s rozlišením 500 bodů. U obou ploch rohovky se dohromady analyzuje 25 000 datových bodů.

Tato metoda má výhody v zobrazení většího množství informací najednou, při kterém lze během jednoho měření získat data z celého předního segmentu oka. Nevýhodou je delší čas měření. Výrobci se snaží mimovolné pohyby očí minimalizovat sledovací kamerou očních pohybů. Při sledování malých detailů je problém přesně nastavit kameru. Tento systém využívá Pentacam firmy Oculus a Galileo firmy Ziemer. [13]



Obr. 15 – Zobrazení přístrojem Oculus Pentacam

4.1.5 Laserová interferometrie

K vyobrazení deviací rohovkového povrchu se využívá laserová interferometrie, která využít principu interference světelných vln. Interference je jev, který nastává při setkání dvou vln v prostoru. Setkají-li se dvě vlny koherentní monochromatické, záleží na jejich relativní fázi a podle toho, v jaké fázi se vlny setkají, nastane buď maximum, nebo minimum. Pro účely interferometr se dva skládané svazky vytvoří rozdělením původního svazku. Následně dojde k jejich odrazům od různých optických ploch. Každý ze svazků projde jinou optickou plochou a vznikne mezi nimi dráhový a odpovídající fázový rozdíl, ze kterého je možno určit měřené parametry prostředí, kterým svazky prochází (např. rozdíl vzdálenosti). Fázový rozdíl určíme vyhodnocením interferenčního obrazu. Typickým zařízením je tzv. Michelsonův interferometr. Využívá se monochromatický zdroj záření.

Při měření rohovky se jeden svazek odráží od referenčního zrcadla, druhý od rohovky. Rohovka je skenována bod po bodu a v každém bodě je určen příslušný dráhový rozdíl na základě interference. Porovnáním drah rozdílů mezi všemi body se určí trojrozměrná mapa rohovky. [13]

4.2 Topografické mapy

Rohovkovou topografií zjištěná data jsou znázorňovány dvourozměrnými mapami, barevným schématem je vyjádřen třetí rozměr, kdy bodům se stejnými hodnotami odpovídá stejná barva. Teplé odstíny odpovídají strmějším místům a chladnější odstíny znázorňují plošší místa. Středním hodnotám odpovídá zelená barva střední zóny barevné škály. Je nutné zjistit, o jakou mapu se jedná, neboť interpretace pouze podle barev je zavádějící.

4.2.1 Topografické mapy lomivosti a křivosti

Zobrazují skutečnou lomivost v konkrétních bodech rohovky. Normální lomivost je značena škálou od zelené po žlutou, modrá určuje nižší lomivost a větší poloměr křivosti. Naopak červená a oranžová znázorňuje vyšší lomivost a menší poloměr křivosti. Škály těchto barev pomáhají k orientaci a interpretaci informací.

Axiální (sagitální) mapa křivosti ukazuje poloměr křivosti v určitém bodě ve srovnání s centrem rohovky. V centru rohovky se bod měří samostatně. Poloměr křivosti vzhledem k dalšímu bodu na stejné kružnici se středem apexu rohovky zobrazuje tangenciální (meridionální) mapa. Na lokální změny křivosti je toto měření citlivější a přesnější. Tato mapa může být podle jednotky buď mapou křivosti rohovky (mm) nebo mapou optické mohutnosti (D).

Nejprve se používaly stupnice od 9,0 do 101,5 D po stupních o velikosti 1,5 D. Na stupně po 5,0 D se přecházelo při velmi extrémních hodnotách. V těchto případech docházelo, zvláště u menších hodnot lomivosti, ke ztrátě přesnosti. Postupem času, se přešlo k menším stupňům velikosti 1,0 D. Tato přesnost je dostatečná pro zjištění všech stádií keratokonu, rohovkových změn způsobených kontaktní čočkou, hodnocení keratoplastiky a využití pro plánování laserové refrakční chirurgii.

Dnes používané rohovkové topografy nemají pro barevně kódované mapy jednotný standart. Proto nemůžeme srovnávat měření různých přístrojů. [13]

4.2.2 Topografické mapy průběhu rohovky

Průběh rohovky v každém jejím bodě srovnává topografická mapa s referenční kulovou plochou. Tyto mapy, na rozdíl od barevně kódovaných map lomivosti, poskytují základní informace o tvaru rohovky. Ve srovnání s referenční kulovou plochou znázorňují teplé odstíny (červená a oranžová) větší poloměr křivosti a chladné odstíny (modrá) menší poloměr křivosti.

Pro každé měření je zvláště vybírána nejvhodnější referenční mapa počítačovým systémem. Proto jsou omezené možnosti srovnávání těchto map.

Tato možnost zobrazení mapy je původním cílem rohovkové topografie a nesmí být zaměňována s mapou lomivosti. Mapy mohou vypadat odlišně. Na mapě průběhu se znázorní poloměr křivosti odstínem chladné modré, naopak na mapě lomivosti je zobrazení v teplejších odstínech. [13]

5. Srovnání Javal-Schiötzova keratometru a rohovkového topografu

Oba přístroje fungují na principu keratometrie. Podávají informace o poloměru zakřivení přední plochy rohovky, její optické mohutnosti, poloze hlavních meridiánů a o hodnotě rohovkového astigmatismu. U obou přístrojů zaměřujeme manuálně vzdálenost x či podobným způsobem zaostřit obrazy značek.

Jinak se liší svým provedením, způsobem zpracování dat a tvarem značek. Javal-Schiötzův keratometr inklinuje k metodám keratometrickým, topograf náleží k metodám keratoskopickým. Rozdíly najdeme také v rozsahu měřené povrchu rohovky. Javal-Schiötzův keratometr měří poloměr zakřivení jen ve dvou bodech, rohovkový topograf umožňuje stanovit parametry jak v centru, tak i v periferii rohovky a data dokáže zobrazit ve formě topografických map. Topografické měření probíhá zároveň v horizontálním i vertikálním směru a je přesnější, protože není ovlivněn pohybem hlavy klienta. Obsluha přístrojů se liší. Pozici značek u Javal-Schiötzova keratometru hodnotí subjektivně vyšetřující, proto mohou být výsledky ovlivněny chybou vyšetřujícího. U topografu odpadá subjektivní hodnocení značek, tím odpadá možná chyba v měření a data se ukládají v paměti počítače, kdy lze zpětně vyhledat a porovnat několik měření provedených v různých časech. Doba měření u Javal-Schiötzova keratometru je delší než u topografu.

Podle výzkumu Mgr. Glogarové jsou výsledky získané při použití obou metod docela srovnatelné. Velikosti rohovkového astigmatismu u keratometru a rohovkového topografu se moc neliší. Odchyšky mají rozsah do $\pm 0,5$ D. Největší odchyšky vykazuje především stanovení polohy hlavních meridiánů. [14]

6. Závěr

Tato práce byla věnována metodám a přístrojům pro měření parametrů rohovky, jejím cílem bylo srozumitelné shrnutí a ucelený přehled dané problematiky.

Nejprve se v této práci popisuje anatomie rohovky, její vrstvy a základní popisné charakteristiky, jako její optickou mohutnost, zakřivení a index lomu. Dále zmiňuje rohovkové anomálie. Práce následně vysvětluje keratometrii, stručně popisuje její historii, optický princip a keratometry využívající tuto metodu. Práce pokračuje rohovkovou topografií, její technologií a analýzou topografických map. Na závěr srovnává Javal-Schiötzův keratometr s topografem.

Měřicí přístroje prošly dlouholetým vývojem a stále se zdokonalují. Často jsou propojovány s počítači, které práci upřesní a zrychlí. Keratometry měří většinou jen centrální oblast s průměrem 2-4 mm. Pro přesnější měření je vhodnější využít rohovkový topograf, kdy topografie je stále rozšířenější a přesnější.

Použitá literatura

1. NAŇKA, Ondřej, Miloslava ELIŠKOVÁ a Oldřich ELIŠKA. *Přehled anatomie*. 2., dopl. a přeprac. vyd. Praha: Galén, c2009. ISBN 978-80-7262-612-0.
2. KUCHYNKA, Pavel. *Oční lékařství*. 1.vyd. Praha: Grada, 2007. ISBN 978-80-247-1163-8.
3. ČIHÁK, Radomír. *Anatomie 3*. Třetí, upravené a doplněné vydání. Praha: Grada Publishing, 2016. ISBN 978-80-247-5636-3.
4. POLÁŠEK, Jaroslav (ed.). *Technický sborník oční optiky*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1974.
5. PLUHÁČEK, F. *Astigmatismus – výukové materiály k předmětu: Korekce zraku I*, 2013, Katedra optiky, PřF UP v Olomouci.
6. ROZSÍVAL, Pavel. *Oční lékařství*. 1. vyd. Praha: Galén, c2006. ISBN 80-7262-404-0.
7. KRAUS, Hanuš. *Kompendium očního lékařství*. Vyd. 1. Praha: Grada, 1997. ISBN 80-7169-079-1.
8. PLUHÁČEK, F. *Měření a analýza parametrů rohovky – výukové materiály k předmětu: Oftalmologické a optometristické přístroje*, 2014, Katedra optiky, PřF UP v Olomouci.
9. RUTRLE, M. *Přístrojová optika*. 1. vydání. Brno: IDVPZ, 2000, 189 s. ISBN 80-7013-301-5.
10. RUBEN, M., GUILLON, M. *Contact Lens Practice*. 1. vydání. London: Chapman a Hall, 1994. 1155 s. ISBN 0-412-35120-X.
12. WANG, Ming X. *Corneal topography in the wavefront era: a guide for clinical application*. Thorofare, NJ: SLACK Inc., c2006. ISBN 1556427182.
13. LEAD EDITOR, Frederick S a Peter J CO-EDITORS. *Corneal surgery: theory, technique, and tissue*. 4th ed. Illustrated by Laurel Cook Lhowe. St. Louis, Mo.: Mosby/Elsevier, 2009. ISBN 9780323048354.
14. GLOGAROVÁ, Lucie. *Porovnání keratometrie Javalovým keratometrem a rohovkovou topografií*. 2010.

Internetové zdroje

11. <http://www.freepatentsonline.com>

Použité obrázky

- Obr. 1 <http://www.cocky-kontaktni.cz>
- Obr. 2 <http://is.muni.cz>
- Obr. 3 <http://emedicine.medscape.com>
- Obr. 4 <http://www.bausch.co>
- Obr. 5 <http://iovs.arvojournals.org>
- Obr. 6 RUTRLE, M. *Přístrojová optika*. 1. vydání. Brno: IDVPZ, 2000, 189 s. ISBN 80-7013-301-5.
- Obr. 7 <http://is.muni.cz>
- Obr. 8 <http://obchod.geodis.cz>
- Obr. 9 RUTRLE, M. *Přístrojová optika*. 1. vydání. Brno: IDVPZ, 2000, 189 s. ISBN 80-7013-301-5.
- Obr. 10 RUTRLE, M. *Přístrojová optika*. 1. vydání. Brno: IDVPZ, 2000, 189 s. ISBN 80-7013-301-5.
- Obr. 11 <http://lombartinstrument.com>
- Obr. 12 RUTRLE, M. *Přístrojová optika*. 1. vydání. Brno: IDVPZ, 2000, 189 s. ISBN 80-7013-301-5.
- Obr. 13 <http://www.associazionecheratocono.it>
- Obr. 14 <http://www.la-sight.com>
- Obr. 15 <http://www.pentacam.com>