

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

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Květen 2016

Jana Mikešová



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta biomedicínského inženýrství
Katedra přírodovědných oborů**

Metody a přístroje pro měření parametrů rohovky

Methods and instruments for measurements of corneal parameters

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Optika a optometrie

Autor bakalářské práce: Jana Mikešová

Vedoucí bakalářské práce: Prof. Ing. Jiří Novák, Ph.D.

Kladno, Květen 2016

Katedra přírodovědných oborů

Akademický rok: 2015/2016

Z a d á n í b a k a l á ř s k é p r á c e

Student: **Jana Mikešová**
Obor: Optika a optometrie
Téma: **Metody a přístroje pro měření parametrů rohovky**
Téma anglicky: Methods and instruments for measurements of corneal parameters

Zásady pro vypracování:

Student provede zpracování problematiky měření základních parametrů rohovky. Na základě odborné literatury se bude zabývat zpracováním popisu tvaru rohovky a jejích geometrických a optických parametrů. Bude se zabývat analýzou vlivu topografie rohovky na aberaci oka a refrakční vady. V praktické části práce provede srovnání měření základních parametrů rohovky Placidovým topografem a Scheimpflugovou kamerou (Pentacamem) a vyhodnocení tvaru předního a zadního povrchu rohovky pomocí Pentacamu na vybrané skupině jedinců.

Seznam odborné literatury:

- [1] AGARWAL, A., AGARWAL, A., JACOB, S., Dr. Agarwal's textbook on corneal topography: including Pentacam and Anterior Segment OCT, ed. 2nd, New Delhi: Jaypee Brothers, 2010, ISBN 978-8184488616
- [2] SINJAB, M. M., Corneal topography in clinical practice (Pentacam system): basics and clinical interpretation., ed. 2, New Delhi: Jaypee Bros. Medical Pub, 2012, ISBN 93-502-5575-8
- [3] KASCHKE, M., DONNERHACKE, K.-H., RILL, M. S., Optical Devices in Ophthalmology and Optometry: Technology, Design Principles and Clinical Applications, ed. 1, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2014, 638 s., ISBN 978-3-527-41068-2
- [4] BENJAMIN, W. J., BORISH, I. M., Borish's Clinical Refraction, ed. 2, Butterworth-Heinemann: Elsevier, 2006, 1255 s., ISBN 978-0-7506-7524-6

zadání platné do: 11.09.2017

Vedoucí: prof. Ing. Jiří Novák, Ph.D.


vedoucí katedry / pracoviště


děkan

V Kladně dne 23.02.2016

Název bakalářské práce: Metody a přístroje pro měření parametrů rohovky

Abstrakt:

V práci je uveden popis rohovky, jejích geometrických a optických parametrů a tvaru rohovky. Cílem teoretické části práce je popis možných metod měření parametrů rohovky. V textu jsou popsány principy vybraných přístrojů a jejich využití. Praktická část práce porovnává čtyři metody měření parametrů rohovky a analyzuje vliv zadní plochy rohovky na tyto parametry. Měřenými parametry jsou rohovkový astigmatismus a vrcholové zakřivení přední plochy rohovky. Dále je zkoumán vzájemný vztah mezi rohovkovým a celkovým astigmatismem. Na závěr praktické části jsou porovnány naměřené hodnoty celkového astigmatismu s hodnotami vypočítanými pomocí Javalova pravidla.

Klíčová slova:

rohovka, keratometrie, rohovková topografie, Scheimpflugův princip, Pentacam

Bachelor's Thesis title: Methods and instruments for measurements of corneal parameters

Abstract:

Description of the cornea, cornea's geometrical and optical parameters and the shape of cornea are listed in the thesis. The purpose of the theoretical part is to describe possible methods of measuring parameters of the cornea. Principles of selected devices and their applications are described in the text. The practical part of the thesis compares four methods of measuring parameters of the cornea and analyzes the influence the back surface of the cornea on these parameters. The measured parameters are the corneal astigmatism and the apex curvature of the front surface of the cornea. Moreover, the relationship between the corneal astigmatism and the total astigmatism is being investigated. At the end of the practical part the measured values of the total astigmatism are compared with the values calculated using the Javal's formula.

Key words:

cornea, keratometry, corneal topography, Scheimpflug principle, Pentacam

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala panu Prof. Ing. Jiřímu Novákovi, Ph.D. za poskytnutí odborné literatury, věcné rady a připomínky a za trpělivost a vstřícnost při konzultacích a odborném vedení mé bakalářské práce. Dále děkuji paní Mgr. Markétě Žákové a Ing. Šárce Dragounové za poučení v manipulaci s přístroji pro praktickou část a za spolupráci testovaných jedinců.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „*Metody a přístroje pro měření parametrů rohovky*“ vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

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

V dne

.....

podpis

Obsah

Úvod.....	11
1 Rohovka.....	12
1.1 Parametry rohovky.....	12
1.1.1 Geometrické parametry rohovky.....	12
1.1.2 Optické parametry rohovky.....	14
1.2 Tvar rohovky.....	14
1.2.1 Matematický popis tvaru rohovky.....	15
1.2.2 Excentricita rohovky.....	16
1.3 Rohovkový astigmatismus.....	17
1.3.1 Pravidelný astigmatismus.....	17
1.3.2 Nepravidelný astigmatismus.....	18
1.4 Metody měření rohovky.....	18
1.4.1 Reflexní metoda.....	18
1.4.2 Projekční metoda.....	19
2 Keratometrie.....	20
2.1 Historie.....	20
2.2 Princip keratometru.....	20
2.3 Postup měření.....	22
2.4 Druhy keratometrů.....	23
2.4.1 Helmholtzův keratometr.....	23
2.4.2 Littmannův keratometr.....	24
2.4.3 Javal-Schiötzův keratometr.....	24
2.4.4 Krahnův keratometr.....	25
2.4.5 Hartingerův keratometr.....	25
2.4.6 Suttclifův keratometr.....	25
2.5 Využití keratometrů.....	26
3 Topografie rohovky.....	27
3.1 Historie.....	27
3.2 Princip topografu.....	29
3.3 Aberometry.....	31
3.3.1 Shack – Hartmannův aberometr.....	31
3.3.2 LRT aberometr.....	32

3.4	Využití topografů	34
4	Pentacam	35
4.1	Scheimpflugův princip	35
4.2	Využití Pentacamu	37
4.3	Galileo G2	37
4.4	Orbscan	37
5	Analýza měření	39
5.1	Elevační mapa povrchu	40
5.2	Mapa zakřivení	41
5.3	Mapa optické mohutnosti	42
6	Praktická část	43
6.1	Porovnání měření parametrů rohovky čtyřmi metodami	43
6.1.1	Metodika měření	43
6.1.2	Analyzovaná data	46
6.1.3	Metoda statistické analýzy	47
6.1.4	Statistická analýza měření rohovkového astigmatismu	47
6.1.5	Statistická analýza měření vrcholového zakřivení přední plochy rohovky ...	50
6.1.6	Statistická analýza měření celkového astigmatismu	52
6.1.7	Statistická analýza měření rohovkového astigmatismu při použití TNP	54
6.1.8	Diskuse	57
6.2	Statistická analýza celkového a rohovkového astigmatismu	58
6.2.1	Metodika měření	58
6.2.2	Analyzovaná data	58
6.2.3	Metoda statistické analýzy	58
6.2.4	Korelace hodnot celkového a rohovkového astigmatismu	59
6.2.5	Statistické porovnání Javalova pravidla a naměřených hodnot	62
6.2.6	Diskuse	66
	Závěr	67
	Seznam použité literatury	69
	Seznam použitých obrázků	72
	Seznam použitých tabulek	74

Úvod

Lidské oko je sofistikovaný smyslový orgán, jenž představuje naše nejdůležitější spojení s okolním světem. Zrakem získáváme přibližně 80 % všech informací a jakékoliv snížení nebo ztráta zraku znamená zhoršení kvality života. Celková lámavost oka, která je 60 – 70 dioptrií v závislosti na akomodaci, je ze 75% ovlivňována rohovkou. Rohovka je tedy důležitý optický prvek lidského oka. Její optická mohutnost závisí na zakřivení přední a zadní plochy rohovky, na indexu lomu a tloušťce rohovky. Ke zjištění rohovkových parametrů lze využít různé metody a přístroje, které jsou popsány včetně jejich principů v teoretické části práce.

Měření parametrů rohovky jakoukoliv metodou (keratometrie, rohovková topografie či Scheimpflugova kamera) se používá především ke zjišťování rohovkového astigmatismu, který se nejvíce podílí na celkovém astigmatismu oka, a tudíž významně ovlivňuje i celkový refrakční stav oka. Dnes se využívá hlavně v kontaktologii k výběru vhodného typu designu a tvaru kontaktní čočky. Software přístroje dokáže navrhnout teoretickou korekční kontaktní čočku, pokud má k dispozici databázi sortimentu výrobců kontaktních čoček a hodnoty refrakční vady. Dále lze v současnosti topografii rohovky využít k diagnostice a sledování progresu různých očních onemocnění, např. rohovkové dystrofie, keratokonu, rohovkové ulcerace, keratopatie apod., a v případě Scheimpflugovy kamery, která navíc poskytuje i trojrozměrný obraz předního segmentu oka, i katarakty. Rohovková topografie bývá často spojována s aberometrií, což nachází mnohá uplatnění v klinické optometrii a oftalmologii, např. v refrakční chirurgii.

V teoretické části práce je popsána rohovka, její tvar a geometrické a optické parametry. Hlavním cílem teoretické části je vysvětlení principů metod měření parametrů rohovky a jejich využití. V praktické části práce je provedené srovnání čtyř metod měření parametrů rohovky a porovnání hodnot rohovkového astigmatismu měřeného pouze z přední plochy rohovky s hodnotami se zohledněním zadní plochy rohovky. V druhé části praktického výzkumu je analyzován vzájemný vztah rohovkového a celkového astigmatismu a jsou porovnány naměřené hodnoty celkového astigmatismu s hodnotami vypočítanými pomocí Javalova pravidla.

1 Rohovka

Rohovka je přední, více zakřivená část tunica fibrosa bulbi, která zaujímá přibližně 20 % povrchu oční koule. Spolu se sklérou tvoří vnější obal oka. Je bezbarvá a průhledná. Transparentnost rohovky zajišťuje její avaskularita a uspořádání kolagenních vláken. Kolagenní fibrily jsou uspořádány paralelně ve vrstvách a v dané vzdálenosti od sebe 50 nm. V takovém případě netvoří překážku viditelné části světelného spektra, avšak dlouhovlnná část ultrafialového záření a velká část infračerveného záření rohovkou neprochází. Pokud se fibrily od sebe oddálí nebo se překříží (např. v případě jizvy na rohovce), vytváří tak překážku i viditelnému záření. Rohovka tedy přestává být průhledná. Vzdálenost fibril je udržována při dané hydrataci rohovky 78 %, kterou zajišťuje endotel rohovky. Vnější povrch rohovky je krytý vrstvou slzného filmu o tloušťce 4-7 μ m, který prakticky neovlivňuje optickou mohutnost rohovky, ale hraje významnou roli v kvalitě vidění a je důležitý pro nošení kontaktních čoček. Mezi funkce slzného filmu patří zejména vytváření opticky hladkého povrchu rohovky, čímž značně ovlivňuje kvalitu vidění, dále má ochrannou funkci (odplavuje z oka nečistoty, odumřelé buňky epitelu, cizí tělíska, odpadní látky atd., má antibakteriální účinky). Slzný film umožňuje komfortní a netraumatizující mrkání a udržuje stále vlhké prostředí důležité pro fyziologický stav epitelu. Přes slzný film se transportuje atmosférický kyslík jako výživa pro rohovku. Při narušení nebo nedostatku slzného filmu vzniká tzv. syndrom suchého oka, při němž se sníží optická propustnost rohovky a kvalita vidění. Rohovka, v jejímž epitelu je obsaženo velké množství nervových zakončení, je nejcitlivější částí oka. Skládá se z pěti vrstev: již zmiňovaný epitel, Bowmanova membrána, stroma, Descemetova membrána a endotel. [1-6].

1.1 Parametry rohovky

Parametry rohovky lze rozdělit na geometrické a optické.

1.1.1 Geometrické parametry rohovky

Mezi geometrické parametry rohovky patří průměr rohovky, zakřivení přední a zadní plochy a její tloušťka. Tyto parametry jsou rozdílné v různých bodech rohovky, protože rohovka přesně neodpovídá tvaru kulového vrchlíku, není stejnoměrně zakřivená. To způsobuje vznik fyziologického astigmatismu, kdy ideální kulovitá plocha rohovky přechází v cylindrickou plochu. Prof. Radomír Čihák uvádí ve své publikaci Anatomie 3:

„Fyziologický astigmatismus, při němž rozdíl obou zakřivení je do $\frac{1}{2}$ dioptrie, správnému vidění nevadí, neboť mozková centra, která zrakové vzruchy dále zpracovávají, tuto vadu, jež by vedla k vidění předmětů protažených směrem menšího zakřivení rohovky, kompenzují. Je-li astigmatismus větší, koriguje se cylindricky zakřivenými skly.“ [1, 4]

Průměr rohovky

Horizontální průměr rohovky bývá o 1 mm větší než vertikální. Horizontální průměr rohovky činí 11 – 12 mm a vertikální 10 – 11 mm. Rohovka s průměrem pod 10 mm je označována jako mikrokornea a rohovka s průměrem nad 12,8 jako megalokornea, která bývá příznakem vrozeného glaukomu (zelený zákal). Jak je uvedeno ve skriptech České kontaktologické společnosti Základní kurz školení kontaktologů: „Měření průměru rohovky se většinou provádí aproximativním způsobem měření tzv. HVID (horizontal visible iris diameter), kde se měří vlastně průměr průhledné části rohovky, bez ohledu na její zakřivení. K měření lze použít běžné měřítko s milimetrovou škálou nebo některá zařízení, která minimalizují vzdálenost mezi měřítkem a rohovkou a zpřesňují tak měření např. Weselyho keratometr.“ Dalším způsobem měření průměru rohovky je W+W (white to white), kde se měří průměr rohovky od limbu k limbu. Rozdíl mezi HVID a W+W spočívá v tom, že způsob měření HVID měří pouze horizontální průměr rohovky. [1, 3, 4, 7]

Zakřivení rohovky

Zakřivení rohovky se uvádí buď v dioptriích, což je hodnota lámavosti rohovky, anebo jako poloměr zakřivení v mm. Rohovka se v centrální zóně (také nazývané optická zóna – průměr cca 4 mm) přibližuje sférickému povrchu se zakřivením 1-3 mm, směrem k periferii se postupně oplošťuje, paracentrální zóna je do 7-8 mm, a následně přechází do skléry v oblasti limbu, který je široký cca 0,7-1 mm. V periferní zóně, kde je větší oploštění a asféricita, se zakřivení blíží k 11 mm a v oblasti limbu k 12 mm. Nicméně jako poloměr zakřivení přední plochy rohovky se obecně uvádí 7,5-8 mm a poloměr zakřivení zadní plochy rohovky cca 6,5 mm. K měření zakřivení rohovky se používá keratometr, rohovkový topograf či Scheimpflugova kamera (např. Pentacam) (více viz kapitoly 2. a 3.). Mezi faktory ovlivňující zakřivení rohovky řadíme: kvalitu slzného filmu, tlak víček na rohovku, uzavření víček během spánku, nitrooční tlak apod. [1-4, 6-10]

Tloušťka rohovky

Jestliže je zakřivení rozdílné v různých bodech rohovky, tak je samozřejmě i tloušťka v různých místech rohovky odlišná. V centrální a paracentrální zóně se tloušťka rohovky

pohybuje v rozmezí 0,4-0,6 mm a směrem k periférii tloušťka narůstá 0,7-1,2 mm. Měření tloušťky rohovky označované slovem pachymetrie je přínosné pro interpretaci nitroočního tlaku a pro refrakční chirurgii. Při hypoxii, což je snížený obsah kyslíku ve tkáních, vzniká edém, zvětší se tloušťka rohovky. Tlustší rohovka klade větší odpor, více odolává deformaci a vyvolává zvýšení nitroočního tlaku. [1, 3, 4, 6, 7, 9, 10]

1.1.2 Optické parametry rohovky

Mezi optické parametry rohovky řadíme její lámavost a index lomu. Přestože má rohovka tvar rozptylky, což vyplývá z geometrických parametrů, její optická mohutnost se přibližně rovná +43 dpt. To je způsobené rozdílným indexem lomu před a za plochou rohovky. Před rohovkou se nachází vzduch s indexem lomu 1, střední index lomu rohovky se uvádí 1,376 a z vnitřní strany je rohovka ohraničena komorovou vodou o středním indexu lomu 1,336. Lámavost vrstvy rohovky lze vypočítat podle vzorce $\varphi_c = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1 \varphi_2 \frac{d}{n_c}$, kde φ_1 je lámavost přední plochy rohovky a φ_2 je lámavost zadní plochy rohovky, ty se rovnají podílu rozdílu indexů lomu za a před danou plochou a poloměru zakřivení dané plochy, d označuje tloušťku rohovky a n_c index lomu rohovky. Vrcholová lámavost přední plochy rohovky je 49 dpt, nicméně vrcholová lámavost zadní plochy rohovky je -6 dpt, tudíž celková lámavost rohovky vychází v průměru +43 dpt. Celková optická mohutnost oka, kterou nejvíce (asi ze 75 %) ovlivňuje právě rohovka, je 60 až 70 dpt v závislosti na akomodaci. [1, 3, 6-10]

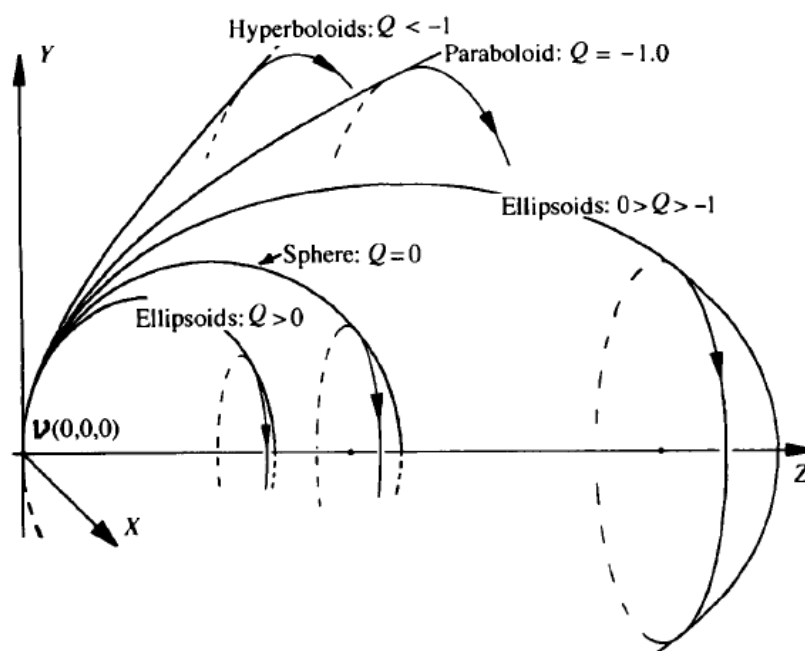
1.2 Tvar rohovky

Obecně má přední plocha zdravé rohovky dospělého jedince tvar asférické a nesymetrické plochy. Centrální část rohovky do průměru 4 mm, též nazývaná optická zóna, má téměř kulovitý tvar (tvar sféry), nicméně s rostoucí vzdáleností od centra rohovky se zvětšuje progrese oplošťování rohovky, tzn. s rostoucí vzdáleností od vrcholu rohovky se zvětšuje poloměr zakřivení přední plochy rohovky. Periferní oblast rohovky, která se oplošťuje více než periferie elipsoidu, nelze popsat žádným jednoduchým geometrickým vztahem, ani neodpovídá žádnému specifickému geometrickému tělesu. Toto oploštění směrem do periferie je jedním z faktorů, který kompenzuje sférickou aberaci oka, dalším faktorem je struktura oční čočky. Dalším smyslem oplošťování rohovky by mohla být snaha o co nejplynulejší a nejhladší napojení rohovky. Apex, nebo-li vrchol rohovky, což je bod

maximálního zakřivení přední plochy rohovky, leží v průměru v geometrickém středu přední plochy rohovky, ale oproti středu zornice se nachází lehce temporálně. Zraková osa, jež je spojnicí pozorovaného bodu s foveolou, protíná povrch rohovky průměrně 0,5 mm nazálně a níže od vrcholu rohovky. Průsečík zrakové osy s povrchem rohovky se nazývá vertex. Zajímavostí je, že tvar rohovky se zřejmě mění s časem. Brzy ráno je rohovka relativně plošší než večer. [1, 3, 10]

1.2.1 Matematický popis tvaru rohovky

Ačkoliv se jedná o individuální záležitost, rohovkovou asféricitu lze vyjádřit pomocí parametru asférické plochy Q . Asférická konstanta Q je pro sférickou plochu nulová, pro jakoukoliv asférickou plochu má asférická konstanta určitou nenulovou hodnotu. Na obrázku 1 je zobrazeno, jakých hodnot parametru asférické plochy Q nabývají různé geometrické útvary. [10, 12]



Obrázek 1: Parametry asférické plochy Q určitých geometrických útvarů [10]

U standardní zdravé rohovky je hodnota parametru asférické plochy rovna $Q = -0,26$. Záporné znaménko znamená oploštění rohovky směrem do periferie, kladné znaménko charakterizuje strmější přechod do periferie. Matematicky je tvar rohovky možné popsat jako obecnou asférickou plochu:
$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + Q_x)c_x^2 x^2 - (1 + Q_y)c_y^2 y^2}} + \sum A_k P_k(x, y)$$
, kde $c_x = \frac{1}{R_x}$ a

$c_y = \frac{1}{R_y}$. Ovšem velmi často se popis přední plochy rohovky zjednodušuje na eliptickou plochu: $z = \frac{c(x^2+y^2)}{1+\sqrt{1-(1+Q)(x^2+y^2)}}$, pro kterou platí $c_x = c_y = c = \frac{1}{R}$ a $Q_x = Q_y = Q$, kde Q je parametr asférické plochy, R jsou vrcholové poloměry křivosti, x a y jsou kartézské souřadnice v rovině kolmé k ose rotace, z je souřadnice ve směru rotace. [10, 12]

1.2.2 Excentricita rohovky

Rohovku lze chápat jako rotační plochu, kde jsou osové řezy ve všech meridiánech stejné a má jediné centrální zakřivení r_0 , anebo v případě astigmatické rohovky jako plochu druhého stupně, kde jsou řezy v různých meridiánech různé. Ve dvou na sebe kolmých řezech jsou hodnoty a tvary extrémní, centrální zakřivení se tedy mění od r_{0max} po r_{0min} . Osové řezy plochou (meridiány) jsou tedy křivky druhého stupně (kružnice, parabola, elipsa, hyperbola), které můžeme matematicky vyjádřit:

kružnice: $y^2 = 2px - x^2$

parabola: $y^2 = 2px$

elipsa: $y^2 = 2(b^2/a)x - (b^2/a^2)x^2$

hyperbola: $y^2 = 2px + (b^2/a^2)x^2$,

kde x je souřadnice ve směru osy rotace, y je souřadnice kolmá k ose, $p = r_0$ je poloměr zakřivení ve vrcholu, a je délka hlavní poloosy, b je délka vedlejší poloosy. [10, 12, 13]

Možné tvary řezů v meridiánech jsou charakterizované excentricitou, pro kružnici platí $e = 0$, pro parabolu $e = 1$, pro elipsu $0 < e < 1$ a pro hyperbolu $e > 1$. Excentricita je definovaná jako matematicky určená odlišnost asférické křivky od tvaru kružnice. Jak již víme, přední plocha rohovky je asférická a nesymetrická. Její periferní oploštění je možné vyjádřit pomocí excentricity rohovky. Průměrná excentricita se vypočítává ze vztahu:

$e = \sqrt{r_s - r_0}$, kde r_s je průměrné sagitální zakřivení rohovky, pro které platí

$r_s = \frac{r_{s,temp} + r_{s,nas} + r_{s,sup} + r_{s,inf}}{4}$ a r_0 je průměrné centrální zakřivení rohovky, pro které platí

$r_0 = \frac{r_{0max} + r_{0min}}{2}$. Strmost rohovky je nepřímo úměrná excentricitě, tzn. čím větší excentricita,

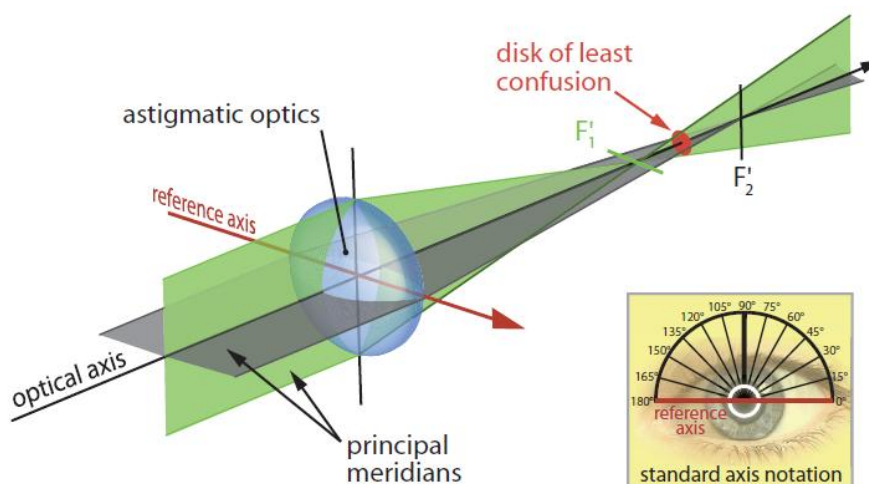
tím plošší je přední plocha rohovky. Standardně se hodnoty excentricity rohovky pohybují v rozmezí 0,3 – 0,5, takové rohovky je možné přirovnat k elipse. Vztah mezi parametrem asférické plochy a excentricitou rohovky lze vyjádřit rovnicí: $Q = -e^2$. [10, 12, 13]

1.3 Rohovkový astigmatismus

Astigmatismus je refrakční vada, kdy paprsky, které vstupují do oka rovnoběžně, nevytvoří v různých meridiánech své ohnisko ve stejné rovině. Rozlišujeme pravidelný a nepravidelný astigmatismus. [1, 2, 6, 12, 14]

1.3.1 Pravidelný astigmatismus

Pravidelný astigmatismus způsobuje, že bod není vnímán jako bod, ale jako čárka protažená směrem menšího zakřivení rohovky. Určují se dva navzájem kolmé hlavní meridiány s minimálním a maximálním optickým účinkem. Dvě kolmé ohniskové linie mezi sebou svírají kroužek nejmenšího rozptylu, což je místo, kde je obraz nejméně deformovaný a stejnoměrně neostrý. Pravidelný astigmatismus je možné korigovat pomocí torických brýlových anebo kontaktních čoček. [1-3, 6, 7, 12-14]



Obrázek 2: Astigmatismus podle pravidla [2]

Dále se dělí na přímý astigmatismus neboli astigmatismus podle pravidla, kde, jak je vidět na obrázku 2, je více lámavější vertikální meridián než horizontální (bývá častější u dětí), a nepřímý neboli astigmatismus proti pravidlu, kdy je naopak lámavější horizontální řez (častější u starších lidí), a astigmatismus šikmých os, kdy jsou stále kolmé meridiány sklopeny pod úhlem v rozmezí $15^\circ - 75^\circ$ (nebo $105^\circ - 165^\circ$). Podle pozice ohniskových linií vůči sítnici rozlišujeme jednoduchý, složený a smíšený astigmatismus. Celkový astigmatismus oka je tvořen rohovkovým astigmatismem, který je způsobený změnou zakřivení přední a zadní plochy rohovky, čočkovým astigmatismem, na kterém se podílí

optické plochy čočky, a zbytkový astigmatismus sítnice, který je způsobený poruchami centrace optického systému oka a nepravidelnostmi zobrazení v oblasti žluté skvrny. Pro výpočet celkového astigmatismu oka můžeme použít vztah: $Ast_C = Ast_R + Ast_{\zeta} + Ast_S$, kde Ast_R je astigmatismus rohovky, Ast_C astigmatismus čočky a Ast_S astigmatismus sítnice. Rohovkový astigmatismus se nejvíce podílí na celkovém astigmatismu, zatímco astigmatismus sítnice je zanedbatelný. Čočkový astigmatismus může být orientován opačně než rohovkový a tím ho kompenzuje. *Javalova podmínka* určuje závislost celkového astigmatismu oka na rohovkovém astigmatismu. $Ast_C = 1,25Ast_R \pm 0,5 \text{ dpt}$, kde pro nepřímý rohovkový astigmatismus platí $Ast_C = 1,25Ast_R + 0,5 \text{ dpt}$ a pro přímý rohovkový astigmatismus platí $Ast_C = 1,25Ast_R - 0,5 \text{ dpt}$. Astigmatismus čočky lze vypočítat ze vztahu: $Ast_{\zeta} = 3/2(Ast_C - Ast_R)$. [1-3, 6, 7, 12-14]

1.3.2 Nepravidelný astigmatismus

Nepravidelný astigmatismus se vyznačuje různou optickou mohutností v různém meridiánu. Není možné určit hlavní řezy s minimálním a maximálním optickým účinkem. Důvodem vzniku nepravidelného astigmatismu je deformace rohovky nebo jiné optické plochy v oku. Tento typ astigmatismu není možné korigovat brýlovou čočkou, pouze nepravidelný astigmatismus zapříčiněný deformací přední plochy rohovky lze korigovat pomocí tvrdých kontaktních čoček. [1, 2, 6, 7, 12, 14]

1.4 Metody měření rohovky

Termín „topografie rohovky“ označuje měření a charakteristiku tvaru povrchu rohovky. Topografie rohovky je velmi důležitá, protože přední plocha rohovky má z celého oka nejvyšší hodnotu lámavosti. Své uplatnění najde jak v optometrii, tak v oftalmologii, např. při aplikaci kontaktních čoček, rohovkové chirurgii či operaci katarakty apod. Metody určení topografie rohovky rozdělujeme na reflexní a projekční. [2, 15]

1.4.1 Reflexní metoda

Reflexní metoda využívá rohovku jako konvexní zrcadlo s odrazivostí průměrně 2-4 %. Rohovkou je zobrazována testová značka, kdy se vytvoří přímý obraz až za rohovkou (tzn. neskutečný obraz), který bývá označován jako první Purkyňův obraz. Poloměr křivosti ovlivňuje jeho velikost. Pokud je tvar prvního Purkyňova obrazu specifický, může poskytnout

data o případných aberacích rohovky (oka). Mezi přístroje, které používají reflexní metodu, řadíme keratometry využívající různé testové značky, rohovkový topograf s Placido kotoučem, kde se na rohovku promítají kruhy, či štěrbinovou lampu. [2, 15]

1.4.2 Projekční metoda

Přístroje, které pracují na principu projekční metody, snímají strukturu vyšetřované tkáně pomocí úzkého svazku paprsků v určitých sekvencích. Obsahují kameru, která zachytí a následně kvantitativně vyhodnotí prostorový obraz předního segmentu oka. Neměří tedy jen přední plochu rohovky, ale také zadní plochu rohovky, přední plochu duhovky a obě plochy čočky. Z naměřených dat je možné dopočítat tloušťku rohovky, hloubku přední komory a úhel, který svírají rohovka a duhovka. Dle typu skenovacího systému rozlišujeme laterální skeny, např. Orbscan, a přístroje fungující na Scheimpflugově principu, který využívá rozptyl světla, např. Pentacam, Galilei G2 nebo OCT. [2, 15]

Výhody projekční metody oproti reflexní metodě jsou: měření přímé rohovkové výšky, schopnost měřit i nepravidelné a neodrazivé povrchy rohovky, vyšší rozlišení, jednotná přesnost napříč celou rohovkou a menší závislost na vyšetřujícím. Mezi nevýhody projekční metody měření rohovky oproti reflexní metodě se řadí: využití nestandardních přístrojů (většinou prototypy), které potřebují klinické ověření, a které poskytují nestandardní mapy; dlouhé vyšetření (měření a analýza); u některých přístrojů nutná instalace fluoresceinu. [8]

2 Keratometrie

Keratometrie je metoda měření zakřivení rohovky pomocí keratometru, zvaný též oftalmometr, což je přístroj, který měří poloměr zakřivení v centrální části přední plochy rohovky bezkontaktní metodou. Keratometry patří mezi historicky první přístroje, které charakterizovaly tvar plochy rohovky. [2, 6, 7, 11, 15]

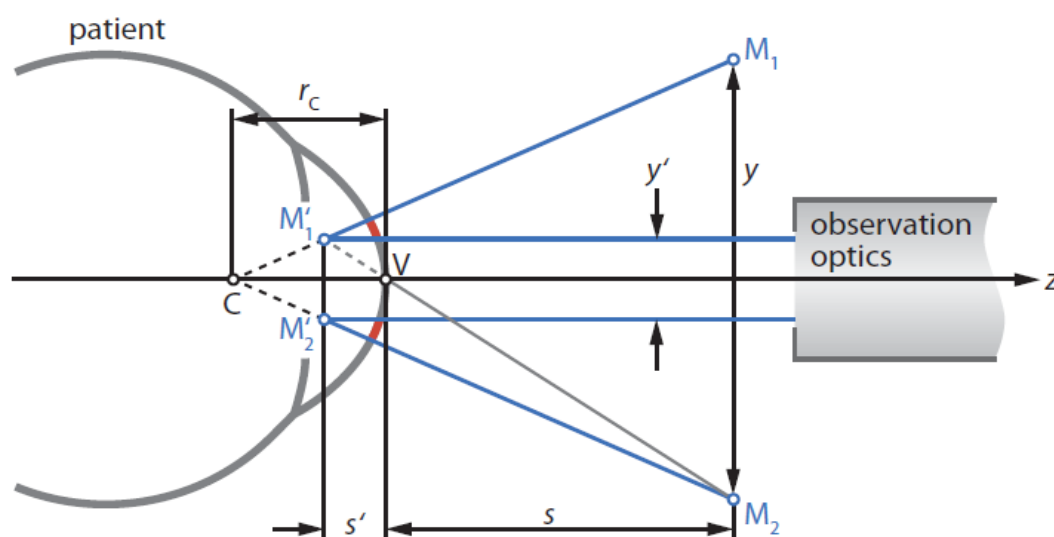
2.1 Historie

V roce 1854 byl Hermannem von Helmholtzem (1821 – 1894) sestrojen první keratometr, který ačkoliv měřil poloměry zakřivení překvapivě přesně, byl využíván jen pro vědecké účely. Pro běžnou praxi byl nevhodný umístěním testových značek tvořených petrolejovými lampami v pětimetrové vzdálenosti. Příslušné podmínky měření položily základ pro následující rozvoj vysoce přesného keratometru zkonstruovaného vědeckým pracovníkem firmy ZEISS Hansem Littmannem v roce 1950. Výsledky měření Helmholtzova keratometru nezávisí na vzdálenosti zákazníka oka od přístroje. V roce 1881 byl zkonstruován Emilem Javalem (1839 – 1907) a Hjalmar Augustem Schiötzem (1850 – 1927) nový keratometr, který se oproti Helmholtzovu keratometru více rozšířil, přestože vykazoval menší přesnost měření. Tento oftalmometr je mimořádně citlivý na dodržení vzdálenosti mezi rohovkou vyšetřovaného a samotným přístrojem. Jelikož je obtížné tuto vzdálenost dodržet, vznikají nepřesnosti v měření. Javalův keratometr byl primárně používán ke zjištění rohovkového astigmatismu. Keratometr navržený podle Johna Hamera Sutcliffa z roku 1907 je založen na stejných principech jako Javalův oftalmometr. Měření je rovněž závislé na přesném nastavení měřené rohovky a přístroje. Od Javalova keratometru se liší tím, že oba hlavní řezy astigmatické rohovky jsou měřeny současně z jedné polohy, není třeba otáčet měřící hlavu. Zdvojení testových značek vytváří čtyři prizmatické clony, které se nachází před dvěma objektivy, s bázemi v horizontálním a vertikálním směru. [1, 2, 16]

2.2 Princip keratometru

Na obrázku 3 je znázorněn princip všech keratometrů, který je založen na minimálně dvou testových značkách M_1 a M_2 , které jsou promítány na povrch rohovky. Testové značky M_1 a M_2 se nachází v určité vzdálenosti s od vrcholu přední plochy rohovky V a jsou

vertikálně oddělené o určitou vzdálenost y . Konstrukcí přístroje je již přednastaven úhel, který svírají testové značky s optickou osou keratometru. [1, 2, 6, 7, 11, 15, 16]



Obrázek 3: Princip keratometru [2]

Projekcí testových značek na povrch rohovky se vytvoří dva obrazy M_1' a M_2' , které jsou vertikálně oddělené vzdáleností y' , pro kterou platí $y' \neq y$. Pro určení poloměru zakřivení r_c je třeba změřit velikost y' příslušným pozorovacím a detekčním systémem. Jelikož v reflexní metodě měření je rohovka chápána jako vypuklé zrcadlo, pro výpočet r_c se vychází z paraxiální zobrazovací rovnice pro zrcadla: $\frac{1}{s'} = \frac{1}{s} + \frac{1}{f'}$ odvozené z Gaussovy rovnice a ze vztahu pro příčné zvětšení: $\frac{y'}{y} = \frac{s'}{s}$, kde f' je ohnisková vzdálenost přední plochy rohovky, pro kterou platí $f' = \frac{r_c}{2}$, a s' je vzdálenost obrazové roviny od vrcholu rohovky. Za předpokladu, že $y \gg y'$ lze vyjádřit vztah pro výpočet poloměru zakřivení přední plochy rohovky: $r_c = \frac{2sy'}{y}$. [1, 2, 11, 15, 16]

V praxi je rozhodující udržení fixní vzdálenosti s během měření. Od doby, kdy jsou při kalibraci keratometrů nastaveny fixní projekční vzdálenosti, mohou nastat chyby měření pouze změnou vzdálenosti s . Proto jsou k přístroji přidávány fixační pomůcky pro minimalizaci těchto chyb. V případě, že jsou testové značky umístěny do ohniskové roviny kolimátoru, je vzdálenost s rovna nekonečnu. Potom můžeme použít zjednodušený vztah $r_c = Cy'$, kde C je přístrojová konstanta. [1, 2, 15, 16]

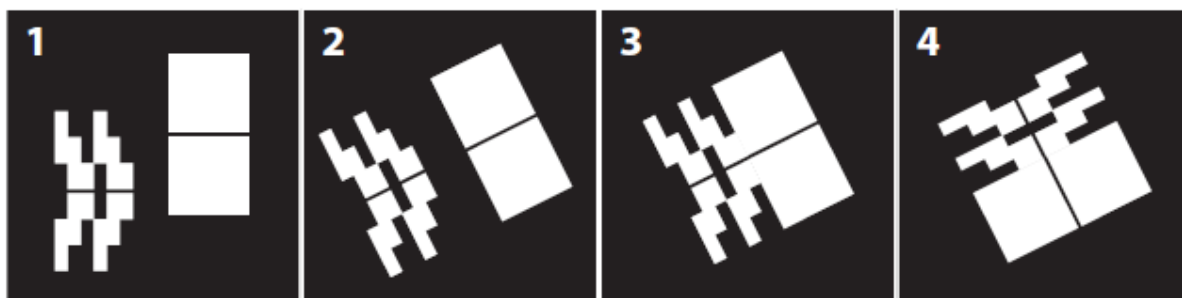
2.3 Postup měření

Nejprve se zapne přístroj, klient je usazen a křeslo nebo stolec se výškově upraví tak, aby se klientovi sedělo pohodlně. Pacient si opře bradu a čelo o příslušné opěrky. Vyšetřující si v případě keratometru Javalova typu, u kterého je měření citlivé na dodržení vzdálenosti přístroje od rohovky, nejprve nastaví okulár vůči svým refrakčním vadám z důvodu eliminace akomodace a dobré zrakové ostrosti. Vyšetřovaný fixuje svítící značku, zatímco vyšetřující pozoruje testové značky a snaží se je umístit do správné pozice, aby dosáhly koincidence, tzn. že testové značky se právě dotýkají, nikoliv překrývají. Na obrázku 4 jsou ukázky nejpoužívanějších vzorů koincidenčních postavení obrazů. [16-18]



Obrázek 4: Vzory koincidence různých keratometrů [2]

Na rohovce emetropického oka se testové značky zobrazí v koincidence, nicméně každý člověk má určitý, i když malý stupeň rohovkového astigmatismu, tzv. fyziologického astigmatismu, který ovšem nevyžaduje korekci, protože je vykompenzován fyziologickými mechanismy. Fyziologický astigmatismus nabývá hodnot do 0,5 dpt. V případě ametropického oka, tedy oka s refrakční vadou, testové značky nejsou v koincidence, ale jsou horizontálně i vertikálně posunuty. Pomalým otáčením projekčního systému kolem optické osy tak, že projekční rovina se shoduje s prvním meridiánem, a posunováním skutečných svítících testových značek na rameni keratometru, lze docílit koincidence. Ze stupnice se následně odečte poloměr křivosti, lámavost přední plochy rohovky a osa. Měření se provádí ve dvou řezech ve 180° a v 90°. Na obrázku 5 je zobrazen postup nalezení koincidence na astigmatické rohovce na Javalově keratometru. Hodnotu rohovkového astigmatismu lze získat odečtením hodnot lámavostí hlavních řezů a pomocí Javalovy podmínky (viz kapitola 1.3.1. Pravidelný astigmatismus) je možné vypočítat celkový astigmatismus oka. [15-18]



Obrázek 5: Postup nalezení koincidence na Javalově keratometru [2]

2.4 Druhy keratometrů

Keratometry rozdělujeme na manuální (ruční) a automatické. Pomocí manuálních keratometrů, mezi které patří např. Helmholtzův k., Littmannův k., Javal-Schiötzův k. či Suttclifův keratometr, není možné přímo změřit velikost obrazu y' kvůli mimovolným očním pohybům. Z toho důvodu obsahují ruční oftalmometry zdvojující soustavu, ve které kopie původních obrazů testových značek slouží jako měřicí stupnice. Manuální keratometry zajišťují koincidenční uspořádání testových značek pozorovacím dalekohledem. Autokeratometry nebo optoelektronické keratometry obsahují LED diody s vlnovými délkami blízkými se infračervenému záření, které fungují jako testové značky. Jsou umístěné kolem optické osy přístroje, přičemž dva protější páry diod jsou promítány na meridionální rovinu, kde se měří poloměry zakřivení, a další tři páry diod jsou používány k měření astigmatismu. Některé novější přístroje obsahují až 16 diod, což minimalizuje chyby měření. K zaznamenání odrazu testové značky a vyhodnocení výsledků slouží CCD kamera. Vyšetřující již nenastavuje koincidence a nehledá hlavní řezy, což vede k vyšší přesnosti a objektivnosti měření a k úspoře času. K měření stačí tak krátký čas, že ani pohyby očí během měření nemají vliv na výsledky. Není zapotřebí zdvojující soustavy. Autokeratometry se vyrábí jako samostatné přístroje anebo ve spojení s autorefraktometrem, tonometrem či pachymetrem. [2, 6, 12, 15]

2.4.1 Helmholtzův keratometr

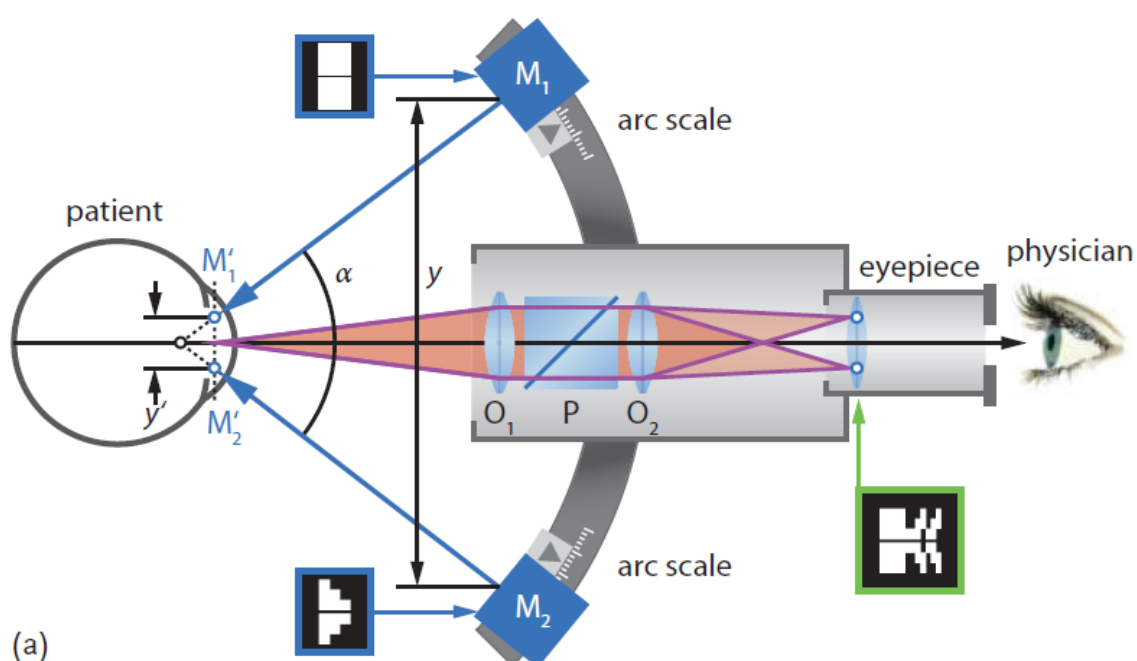
Helmholtzův keratometr byl historicky první sestrojený keratometr. Zdvojující soustavu u tohoto typu keratometru tvoří dvě planparalelní destičky, které se mohou nezávisle na sobě otáčet. Dalekohledem je pozorována velikost obrazu, kterou lze vypočítat

matematickým součtem obou posunutí. Ze vzájemné polohy destiček je možné získat hodnotu zakřivení rohovky. [1, 15, 16]

2.4.2 Littmannův keratometr

Littmannův keratometr byl odvozen a vylepšen od Helmholtzova keratometru, ale ke zdvojení obrazů používá prizma. I dnes se stále využívá a je považován za „zlatý standard“. [15]

2.4.3 Javal-Schiötzův keratometr



Obrázek 6: Princip Javal- Schiötzova keratometru [2]

Javal-Schiötzův keratometr obsahuje dvě světelné testové značky umístěné na otáčivém rameni v konvenční vzdálenosti 25 cm před rohovkou. Jedna má podobu (obvykle zeleného) půleného obdélníku a druhá (obvykle červené) půlené schodovité pyramidy, kde jeden schod odpovídá jedné dioptrii. Ke zdvojení svazku paprsků je zde přítomen Wollastonův hranol, vzniklé svazky svírají konstantní úhel přibližně 1° . Objektiv keratometru tvoří dvě čočky, mezi kterými je umístěn Wollastonův hranol (na obr. č. 5 je značen P) dělicí paralelní svazek paprsků. Částečné paprsky se navzájem polarizují a lámou se. První čočka (na obr. 6 značená O_1) zobrazuje odražené obrazy testových značek a druhá čočka objektivu (na obr. 6 značená O_2) fokusuje a zobrazuje obrazy testových značek do ohniska okuláru, kde

jsou pozorovány. Nevýhodou tohoto přístroje je mimořádná citlivost na dodržení vyšetřovací vzdálenosti, pokud je ovšem dodržena, vykazuje vysokou přesnost měření. Další výhodou je dlouhá životnost přístroje. [1, 2, 15, 16]

2.4.4 Krahnův keratometr

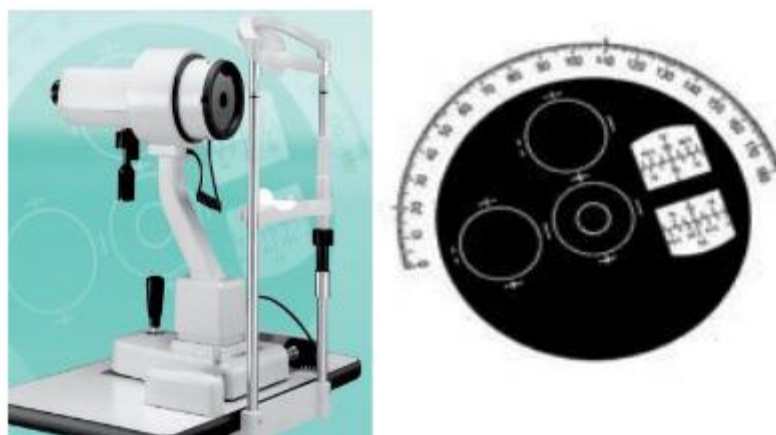
Krahnův keratometr vznikl modifikací Jval-Schiötzova oftalmometru. Odlišuje se akorát Wilmsovou zdvojující soustavou a tím, že má stejné testové značky fixně umístěny. [15, 16]

2.4.5 Hartingerův keratometr

Hartingerův keratometr používá nepohyblivé testové značky a ke zdvojení obrazů značek obsahuje dva diasporametry mezi čočkami objektivu, tzv. soustavu Herschelova otočného dvojprizmatu. [15, 16]

2.4.6 Suttclifův keratometr

Suttclifův keratometr se od ostatních manuálních keratometrů liší tím, že obsahuje pouze jednu testovou značku tvořenou třemi kružnicemi se znaménky + a -, jak vidíme na obrázku 7. Pracuje na principu ortogonálních rovin, to znamená, že při jednom měření lze ze stupnice odečíst hodnoty obou hlavních řezů. Ke zdvojení obrazu se před dvěma pozorovacími objektivy nachází 4 prizmatické clony. [1, 12, 15, 16]



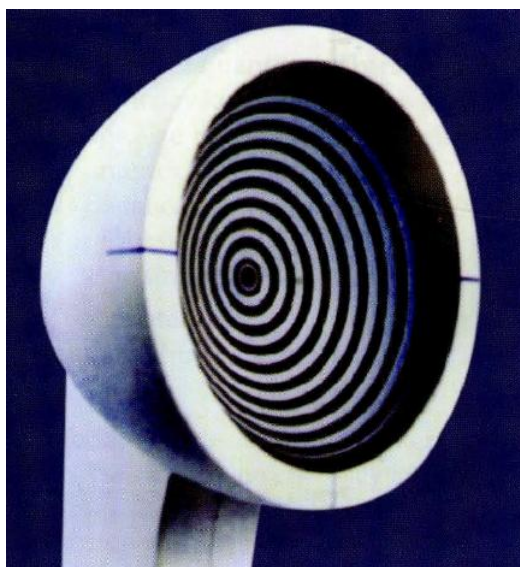
Obrázek 7: Suttclifův keratometr s testovou značkou [12]

2.5 Využití keratometrů

Keratometry se používají ke zjištění velikosti a orientaci hlavních řezů rohovkového astigmatismu, který má největší vliv na celkový astigmatismus oka, a tudíž ovlivňuje i celkový refrakční stav oka. Dříve se keratometry uplatňovaly k určování refrakce, ale dnes mají největší využití v kontaktologii. Podle keratometrem naměřených parametrů lze vybrat vhodný typ designu a tvaru kontaktní čočky a diagnostikovat případný keratokonus. Dále se využívají při předoperačních (popř. pooperačních) vyšetřeních. Zatímco pro aplikaci kontaktních čoček jsou důležité parametry jako poloměr zakřivení, velikost astigmatismu, průměr či excentricita rohovky, pro operaci katarakty se provádí měření parametrů rohovky pro výpočet optické mohutnosti implantované nitrooční čočky. [1, 6, 7, 15, 18]

3 Topografie rohovky

Topografie nebo také topometrie je metoda, kterou lze zjišťovat parametry rohovky pomocí topografu bezkontaktní metodou. Zatímco keratometry měří zakřivení jen v centrální části přední plochy rohovky, rohovkové topografy charakterizují celý povrch přední plochy rohovky, tzn. i včetně periferie. Zadní plochu rohovky nelze často změřit, nicméně její průběh lze odvodit z mapy zakřivení přední plochy rohovky a změření tloušťky rohovky (pachymetrie) v každém jejím bodě. Ale zadní plocha není tak významná, jelikož její lámavost je mnohem nižší než lámavost přední plochy, protože zadní plocha rohovky sousedí s komorovou vodou o indexu lomu 1,336, zatímco přední plocha rohovky sousedí se vzduchem o indexu lomu 1. Rohovkové topografy obsahují Placidův kotouč, který lze vidět na obrázku 8, což je soustava černých a bílých soustředných kruhů s pozorovací lupou uprostřed. [1, 3, 6, 8, 9, 11, 12, 15]

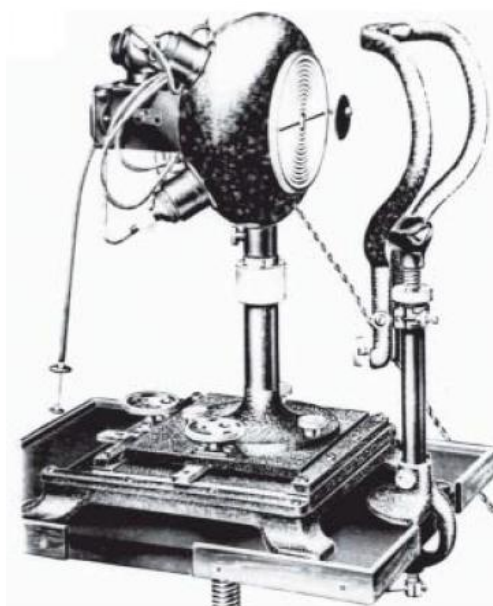


Obrázek 8: Placidovy soustředné kruhy [8]

3.1 Historie

Již v roce 1880 António Plácido (1848 – 1916) používal stejný vzor koncentrických kružnic (obr. č. 7), jaký využívají rohovkové topografy dnes, ke kvalitativnímu zhodnocení povrchu rohovky. V té době se před pacienta předkládal podsvětlený, neprůhledný disk se střídajícími se černými a bílými kruhy. Obraz soustředných kruhů odražený na rohovce byl pozorován skrz malou clonu uprostřed disku. V případě deformovaného povrchu rohovky, vidí vyšetřující zdeformovaný obraz koncentrických kruhů, díky tomu mohou být topografy

využity pro kvalitativní vyšetření povrchu rohovky. První úspěšné kvantitativní hodnocení rohovky představil v roce 1896 Alvar Gullstrand. Pomocí mikroskopu změřil vzdálenosti mezi jednotlivými kruhy a vytvořil příslušný algoritmus pro rekonstrukci tvaru rohovky, který se používá i v dnešních moderních topografech. První komerční přístroj, který mohl zaznamenat deformované struktury kruhů, a který je zobrazen na obrázku 9, byl foto-topograf vyvinutý firmou ZEISS společně s Marcem Amsterem (1891 – 1961) v roce 1930. Ve stejném roce Henri Dekking (1902 – 1966) navrhl topograf s Placidovými kruhy umístěnými uvnitř kónického těla přístroje místo na disku, což vedlo ke snazšímu hodnocení periferií rohovky. [1, 2, 12, 13, 15]

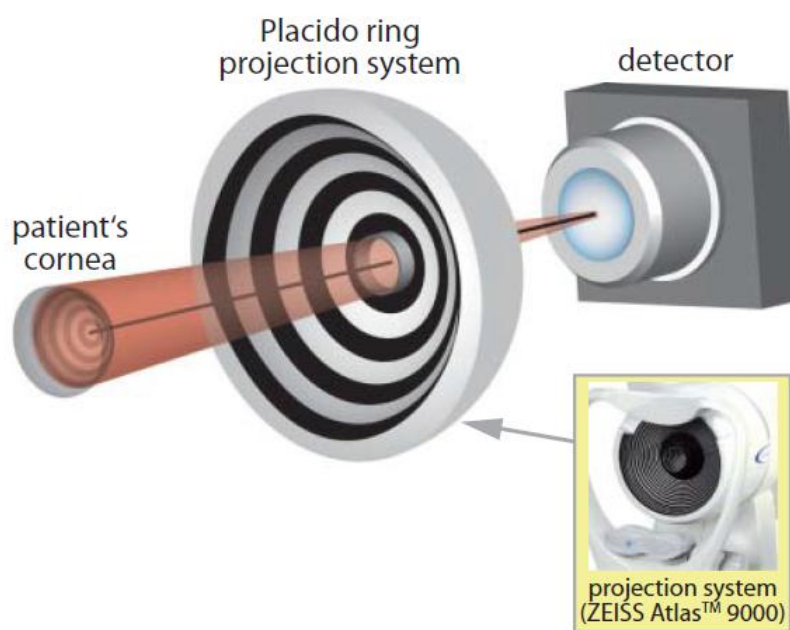


Obrázek 9: První komerční topograf [2]

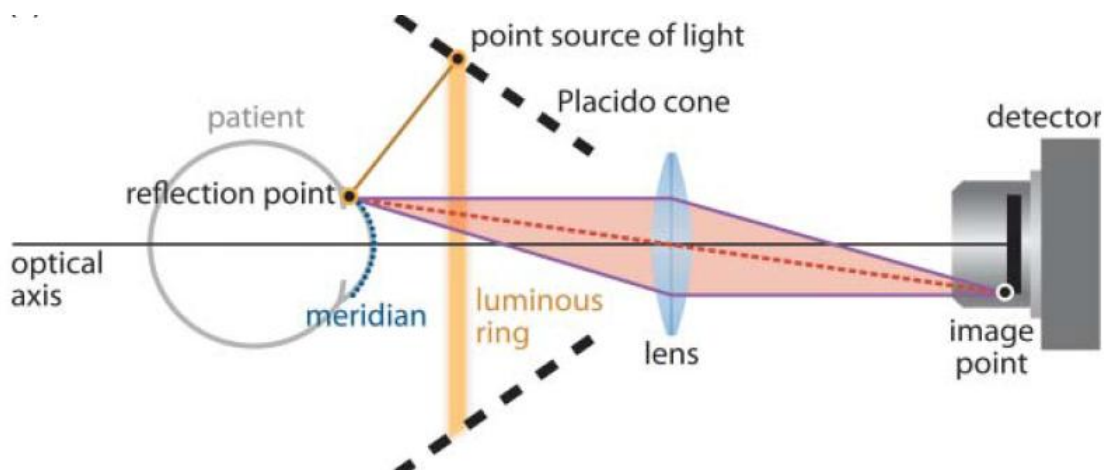
Z počátku se foto-topografy na trhu neujaly z důvodu náročnosti ručního hodnocení obrazu Placidových kruhů a časové náročnosti rekonstrukce rohovkového tvaru. To se ovšem změnilo s příchodem video-technologie a počítačové techniky. V roce 1987 byl uveden první moderní topograf s video-technologií a počítačem Corneal Modeling System, který jako první prezentoval naměřená data ve formě barevně kódovaných rohovkových map. Další vývoj nastal s příchodem laserových refrakčních zákroků, pro které bylo nutností znát přesný tvar asférické rohovky. Jenomže algoritmy rekonstrukce tvaru rohovky předpokládaly sférický povrch, proto byly vynalezeny algoritmy rekonstrukce tvaru rohovky založené na asférické ploše rohovky, což umožňuje dostatečnou přesnost měření a reprodukovatelnost. [1, 2, 12, 13, 15]

3.2 Princip topografu

Rohovková topografie se řadí mezi reflexní metody, které jsou založeny na zobrazení testové značky rohovkou, od které se odráží světlo jako od konvexního zrcadla. V případě rohovkového topografu jsou testovou značkou Placidovy kruhy, které jsou zobrazovány povrchem rohovky, jak ukazuje obrázek 10. Uprostřed kónické hlavy topografu je umístěna CCD kamera, která snímá neskutečný obraz soustředných kružnic. Pomocí počítačového programu je obraz digitalizován a příslušný algoritmus vyhodnotí povrch rohovky. [1-3, 6, 8, 9, 11, 15]

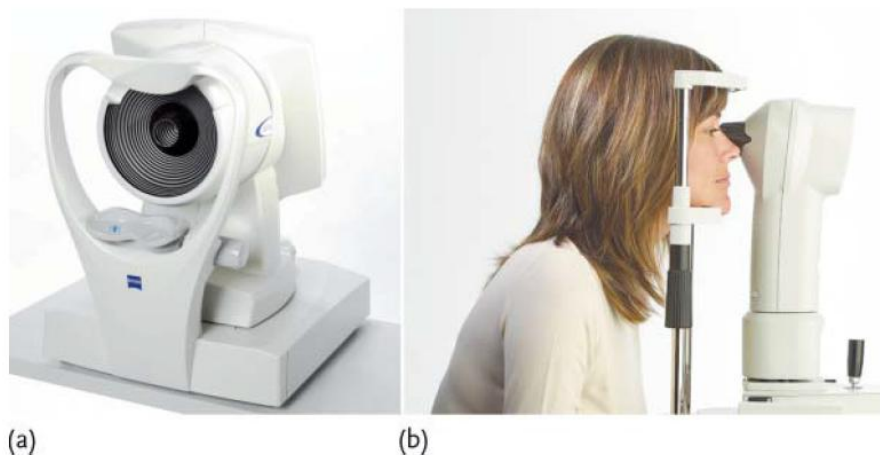


Obrázek 10: Promítání Placidových kruhů na rohovku [2]



Obrázek 11: Princip rohovkového topografu s Placido kotoučem [2]

Většina rohovkových topografů využívá Placidův kotouč obsahující 20-30 většinou černobílých koncentrických kruhů, které emitují světelné paprsky dopadající na povrch rohovky, jak je možné vidět na obrázku 11. Některé výjimky mají barevné kruhy, které jsou pro pacienty s vysokou nepravidelností rohovky lépe identifikovatelné. Podobné je to i u světelných zdrojů, kdy většina přístrojů používá bílé světlo k podsvícení kruhů, ale jsou i přístroje s infračerveným zdrojem světla. Zachycení kompletního tvaru rohovky umožňuje umístění Placidových kruhů do sférické nebo rotačně symetrické asférické plochy. Aby byla co nejvíce zaznamenána i periferie rohovky, je třeba kruhové značky promítnout na rohovku do co nejširších úhlů. Proto jsou strmé rohovky měřeny na kratší pracovní vzdálenost, zatímco plošší rohovky mají delší pracovní vzdálenost. Rozlišujeme dva typy Placidových systémů: volný (zvaný též velký terč) na obrázku 12a a těsný (zvaný též malý terč) na obrázku 12b, kdy topograf s volným terčem měří na delší pracovní vzdálenost, a naopak topograf s těsným terčem měří na krátkou vzdálenost od rohovky. [1-3, 8, 9, 11, 15]



Obrázek 12: (a) topograf s volným Placidovým terčem, (b) topograf s těsným Placidovým terčem [2]

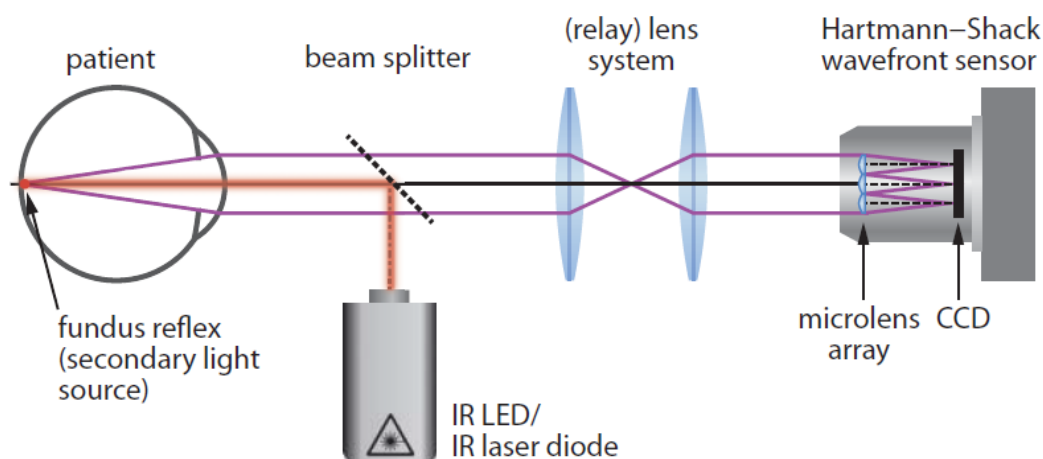
Nevýhodou těsného terče je jeho citlivost na nastavení zaostření, nicméně výhodou je velké pokrytí plochy rohovky a nižší požadavky na kvalitu osvětlení. Analogicky volný terč vyžaduje více osvětlení a má menší rohovkové pokrytí, ale výhodou je menší citlivost na nastavení zaostření a snadnější manipulace. Většina rohovkových topografů je centrována automaticky, případně je lze manuálně doostřit. V případě ideálního měření je možné změřit celý povrch přední plochy rohovky až do 12mm, nicméně v běžných přístrojích se používají zóny 3mm, 5mm a 7mm. [1-3, 8, 15]

3.3 Aberometry

Rohovkové topografy existují jako samostatné přístroje, ale čím dál tím více se stávají součástí jiných modifikovanějších přístrojů, jako např. aberometr. Aberometr na rozdíl od autorefraktometru či skiaskopu měří kromě aberací nižších řádů (defokusace a astigmatismus) také aberace vyšších řádů, díky čemuž má velký potenciál v oboru refrakční chirurgie. Aberace vyšších řádů nejsou korigovatelné brýlovými či kontaktními čočkami, ale lze je minimalizovat aplikací refrakční chirurgie. Aberometry se tedy využívají v rámci předoperačního a pooperačního vyšetření u refrakčních operací. Součástí aberometru je kromě analyzátoru vlnoploch často také rohovkový topograf, tudíž dokáže určit, jaký je příspěvek přední plochy rohovky z celkové aberace oka. Data z aberometru slouží jako základ pro výpočet ablačního profilu a k optimalizaci nitroočních čoček. [20, 21]

3.3.1 Shack – Hartmannův aberometr

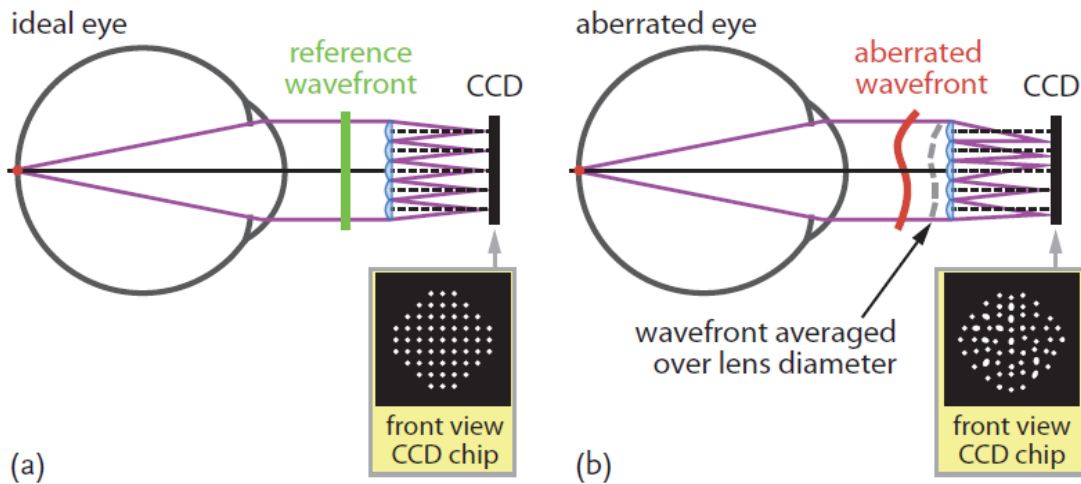
Na obrázku č. 13 je možné vidět systém Shack – Hartmannova aberometru.



Obrázek 13: Systém Shack – Hartmannova aberometru [2]

LED dioda vysílá blízké infračervené záření do oka a vytváří sítnicový reflex, který se stává sekundárním bodovým zdrojem záření emitujícím sférické vlnoplochy. Původně sférické vlnoplochy jsou po průchodu optickými prostředími oka více či méně deformovány v závislosti na velikosti aberací oka. Principem Shack – Hartmannova aberometru je změření odchylek deformované vlnoplochy od referenční rovinné vlnoplochy pomocí Shack – Hartmannova senzoru, jenž je tvořen sadou mikročoček a CCD kamerou, která se nachází v ohniskové rovině mikročoček. Mikročočky rozdělí celkovou vlnoplochu na menší oblasti stejného průměru, jaký mají

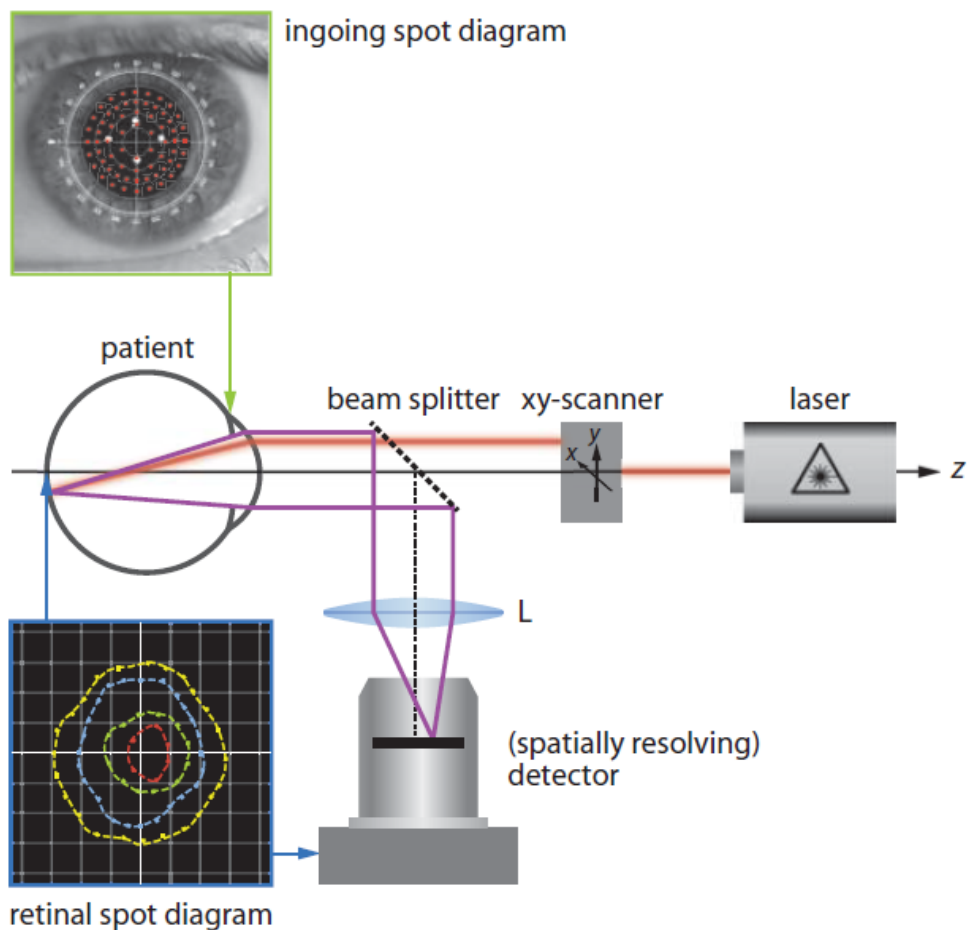
mikročočky, a zobrazí je na CCD kameře jako difrakční body. Pokud se difrakční body zobrazí v pravidelném uspořádání jako na obrázku 14(a), znamená to, že se jedná o ideální optickou soustavu oka bez aberací, a naopak v případě nepravidelného uspořádání bodů jako na obrázku 14(b) je měřená optická soustava oka zatížena aberacemi. [20, 21]



Obrázek 14: (a) – Detekce vlnoplochy na CCD kameře u ideálního oka; (b) – Detekce vlnoplochy na CCD kameře u oka s aberacemi [2]

3.3.2 LRT aberometr

LRT aberometr (angl. Laser Ray Tracing Aberrometer) je založen na principu skenování laserovým svazkem. Úzký svazek infračervených paralelních paprsků vstupuje do oka vstupní pupilou a je porovnáván vůči referenčnímu svazku paprsků, který vstupuje do oka paralelně s osou vidění a láme se tak, že protíná sítnici ve stejném bodě jako osa vidění. Průsečík daného paprsku se sítnicí se více či méně odlišuje od pozice průsečíku sítnice s referenčním paprskem v závislosti na velikosti aberací oka. [20,22]



Obrázek 15: Schéma LRT aberometru [2]

Na obrázku 15 lze vidět schéma LRT aberometru. Laserový svazek paprsků vstupuje do oka různými místy vstupní pupily (na obr. 15 ingoing spot diagram). Pokud optická soustava oka není zatížena aberacemi, protože svazek paprsků sítnici vždy na stejném místě bez ohledu na to, kterým místem do oka vstupoval. V opačném případě vznikají deviace zaznamenané a analyzované CCD kamerou (na obr. 15 retinal spot diagram). Dle odchýlení bodů obrazce od referenčních bodů je vypočítán sklon vlnoplochy v každém bodě pupily. [19, 21]

Tento typ aberometru ovšem předpokládá jednotné odrazení světla od sítnice, proto určitá nehomogenita či nepravidelnost tvaru povrchu může vést k chybám měření. Další nevýhodou je delší doba měření. [19, 21]

3.4 Využití topografů

Z rohovkové mapy pořízené topografem lze kromě poloměru křivosti vyčíst i polohu a dioptrickou hodnotu jakéhokoliv libovolného bodu rohovky. Topografie rohovky slouží k monitorování změn zakřivení rohovky, k přesnému určení pravidelného i nepravidelného astigmatismu a je součástí předoperačních a pooperačních vyšetření. Dále se používá k diagnostice a sledování různých očních onemocnění, např. rohovkové dystrofie, keratokonu, keratopatie, abscesu či rohovkové ulcerace. Software přístroje může navrhnout teoretickou korekční kontaktní čočku, která by kompenzovala deformaci přední plochy rohovky v případě, že software obsahuje databázi sortimentu výrobců kontaktních čoček a má k dispozici hodnoty z autorefraktometru. Nutností zůstává vybranou čočku aplikovat a prakticky ověřit. Rohovková topografie se také využívá ke kvalitativnímu vyhodnocení slzného filmu (měření break-up time) a měření výšky slzného menisku. [1-3, 6, 8, 9, 12, 13]

4 Pentacam

Pentacam, který je zobrazen na obrázku 16, je přístroj, který pracuje na principu projekční metody, tzn. pomocí úzkého svazku paprsků, konkrétně využívá LED diody vyzařující modré světlo o vlnové délce 475 nm, snímá v určitých sekvencích strukturu vyšetřované tkáně. Stejně jako rohovkové topografy s Placido kotoučem, tak i Pentacam měří celý povrch rohovky, ale navíc poskytuje prostorový obraz celého předního segmentu oka. Prostorový obraz předního segmentu oka je zachycován a kvalitativně vyhodnocován CCD kamerou. Pentacam obsahuje ještě druhou kameru, která zachycuje mimovolní pohyby očí během měření, které jsou následně srovnány s axiálním umístěním pořízených snímků k referenčnímu bodu. Během sekvence, která trvá necelé 2 sekundy a při které Pentacam detekuje 25 000 bodů, lze pořídit až 100 snímků. Pentacam pracuje na Scheimpflugově principu, který využívá rozptylu světla. [2, 3, 8, 15]

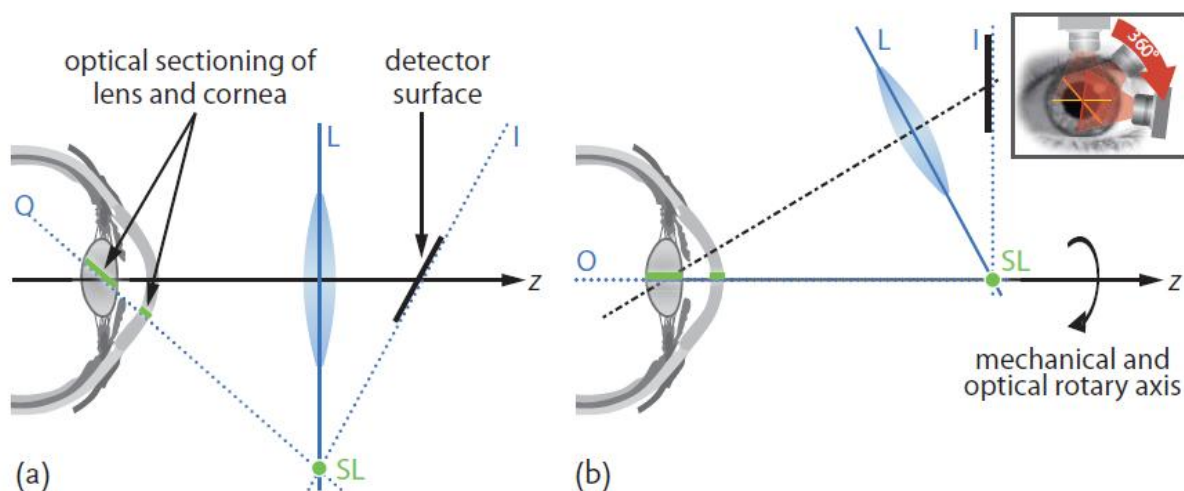


Obrázek 16: Oculus pentacam [2]

4.1 Scheimpflugův princip

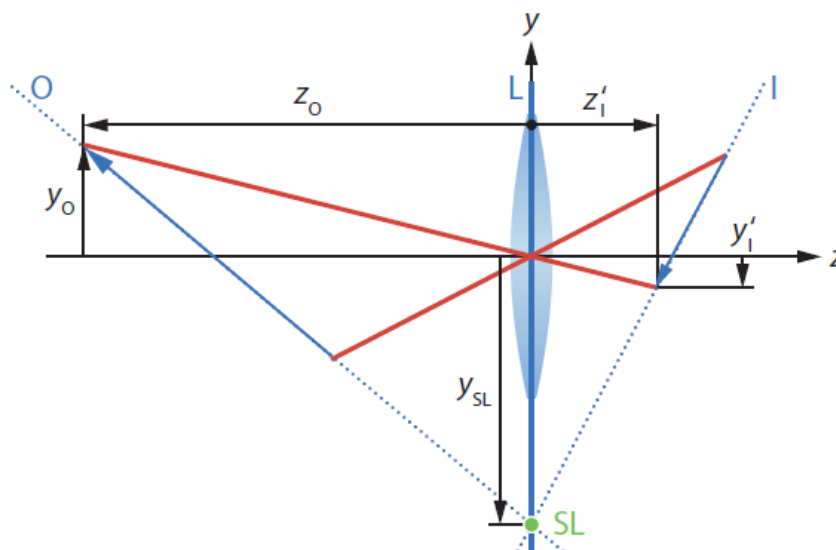
Osvětlení jednotlivých sektorových částí, které se využívá např. ve štěrbinové lampě nebo právě v Pentacamu, je nejčastější zobrazování předního segmentu oka v oftalmologii. Během měření předního segmentu oka je štěrbinový paprsek relativně nakloněný k optické ose mikroskopu. Různě nakloněné rovinné předměty mohou být v tzv. Scheimpflugově uspořádání zobrazeny zcela ostře. Obrazová rovina na obrázku č. 17 označená písmenem I a rovina čočky, která je na obrázku 17 označená L, jsou tak nakloněné, že protínají

předmětovou rovinu značenou O v jediné Scheimpflugově přímce. Zobrazení, kdy obrazová rovina a rovina čočky jsou paralelní, tzn. Scheimpflugova přímka leží v nekonečnu, považujeme za „normální“. Na obrázku 17 b je zobrazeno uspořádání s laterálně rotující Scheimpflugovou kamerou a centrálním šterbinovým osvětlením. [2, 3, 8, 11, 15]



Obrázek 17: Scheimpflugův princip a – statické uspořádání, b – laterálně rotující Scheimpflugova kamera [2]

Na obrázku č. 18 lze vidět schematické zobrazení Scheimpflugova principu. Budeme vycházet z toho, že předmětová rovina (O) a rovina čočky (L) protínají obrazovou rovinu (I) v bodech $(x, y, z) = (0, -y_{SL}, 0)$, potom můžeme předmětovou rovinu (O) popsat pomocí lineární funkce: $y_O = -az_O - y_{SL}$, kde a představuje sklon roviny. [2, 15]



Obrázek 18: Scheimpflugův princip schematicky [2]

Ze zobrazující rovnice tenké čočky: $\frac{1}{z_1'} - \frac{1}{z_0} = \frac{1}{f}$ a z rovnice pro přímé zvětšení: $\frac{y_1'}{y_0} = \frac{z_1'}{z_0}$

lze získat lineární funkci pro obrazovou rovinu (I): $y_1' = -\left(\alpha - \frac{y_{SL}}{f}\right) z_1' - y_{SL}$. Když porovnáme lineární funkce pro obrazovou a předmětovou rovinu, je zřejmé, že obrazová rovina (I) protíná rovinu čočky (L) ve společném bodě $(0, -y_{SL}, 0)$. Takto byla vytvořena Scheimpflugova přímka SL. [2, 15]

4.2 Využití Pentacamu

Pentacam oproti topografům s Placido kotoučem a keratometrům poskytuje trojrozměrný obraz předního segmentu oka, možnost snímky porovnávat a vytvářet virtuální model předního segmentu oka. Pomocí Pentacamu je možné vybrat vhodné parametry intraokulární čočky, diagnostikovat a analyzovat progresi katarakty (šedý zákal) a keratokonu. Velký význam má pro screening glaukomu (zelený zákal). Pentacam se společně s aberometrií využívá při předoperačních a pooperačních vyšetřeních v refrakční chirurgii. Mimo to lze Pentacam použít pro stejné účely jako keratometr nebo topograf s Placido kotoučem. [2, 3, 8, 15]

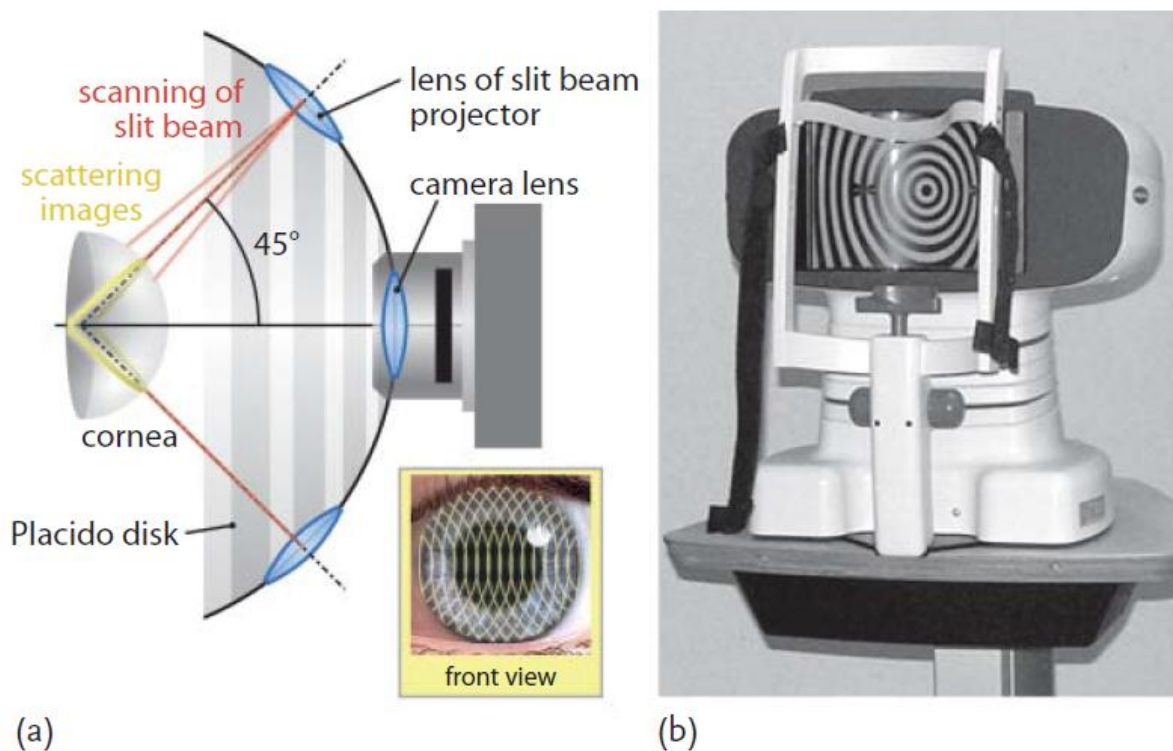
4.3 Galileo G2

Na principu Scheimpflugovy kamery jsou založené i další přístroje, např. Galileo G2 od firmy Ziemer, který se od Pentacamu liší tím, že obrazy jsou současně zachycovány dvěma rotujícími Scheimpflugovy systémy, což přináší určité výhody. První výhodou je, že měření tloušťky rohovky není ovlivněno možnou decentrací optické osy ve vztahu k vrcholu rohovky, protože dvě Scheimpflugovy kamery jsou citlivější na správné vycentrování. Další výhodou je urychlení doby měření. Navíc Galileo G2 narozdíl od Pentacamu obsahuje rohovkový topograf s Placidovým diskem, tudíž dokáže určit vrcholové zakřivení přední plochy rohovky přesněji než samotná Scheimpflugova kamera. [2]

4.4 Orbscan

Orbscan je rovněž založen na projekční metodě (podrobněji popsána v kapitole 1.4.2), ale od Pentacamu či Galileo G2 se liší skenovacím systémem, tzn. neobsahuje Scheimpflugovu kameru, ale laterální sken. Orbscan, jenž je zobrazen na obrázku 19(b) je tvořen Placidovým kotoučem, kde se ve stejné vzdálenosti od středu vpravo a vlevo nachází

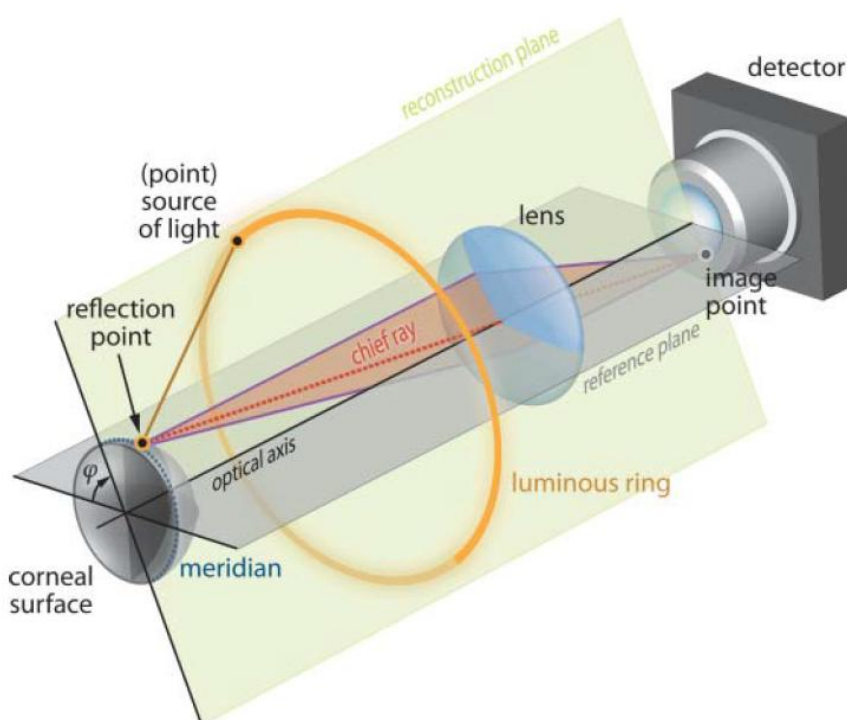
projektor úzkého svazku paprsků. Každý projektor sekvenčně zobrazí 20 úzkých svazků paprsků na rohovku pod úhlem 45° od přístrojové osy, jak je vidět na obrázku 19(a), což umožňuje změření celého povrchu přední plochy rohovky. Rozptýlené obrazy dvou úzkých svazků paprsků jsou zaznamenávány videokamerou otvorem uprostřed Placidova kotouče a jsou porovnávány vůči referenční ploše, ve které se protínají optické osy projektoru a videokamery, a která se zobrazuje do roviny kamerového senzoru. Podle odchylek od obrazu referenční plochy lze odvodit zakřivený povrch rohovky. [2]



Obrázek 19: (a) – Princip Orbšanu, (b) – Orbscan od firmy Bausch and Lomb [2]

5 Analýza měření

K tomu, aby byl pro naměřená data určen systém polárních souřadnic, je potřeba stanovit centrální referenční bod v obrazové rovině. Pro tyto účely se obvykle používá buď střed nejmenší kruhové značky, anebo rohovkový odraz fixačního světla. Poté je identifikována přesná poloha Placidových kruhů v digitálním obrazu. Naměřená data se porovnávají s definovanými semi-meridiány rohovky směrem od středu. Lokace bodů naměřených dat je stanovena průsečíky zkoumaného semi-meridiánu s Placidovými kruhy. Ve skutečnosti mohou být některá data ztracena kvůli stínovým efektům nebo některé oblasti nemohou být z různých důvodů vyhodnoceny, v takových případech jsou chybějící data automaticky doplněna pomocí interpolace. Tvar rohovky je softwarem pomocí algoritmů zpracován a vyhodnocen. Každý semi-meridián leží, jako na obrázku 20, v odpovídající dvojdimenzionální rekonstrukční rovině, která je vůči referenční rovině nakloněna o úhel φ . [2, 3, 8, 15]



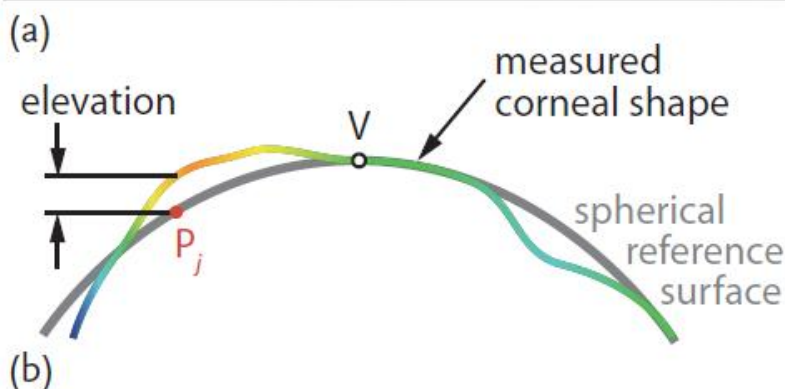
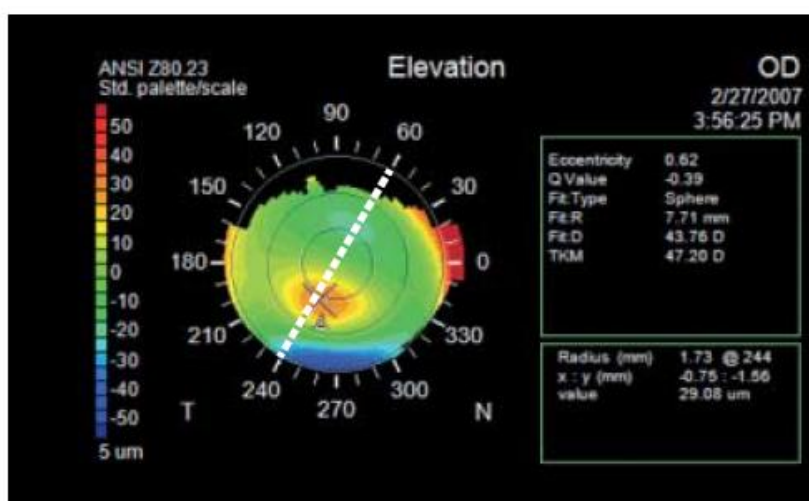
Obrázek 20: Geometrické uspořádání rohovkové topografie [2]

Celkový 3D obraz povrchu rohovky lze poskládat z dílčích 2D profilů každého semi-meridiánu. Velké množství dat generovaných z rohovkových topografií je shrnuto ve formě barevných map, které znázorňují odchylku povrchu rohovky od referenční plochy (nejčastěji sféra nebo elipsa), což můžeme vidět na obrázku 21(b). Nejpoužívanější jsou elevační mapy

povrchu rohovky, mapy zakřivení a mapy optické mohutnosti. Na topografických mapách vyjadřují „teplé“ barvy (červená, oranžová...) nižší hodnoty poloměru zakřivení, to znamená strmější rohovku, a tudíž i vyšší lomivost v daném místě. A naopak „studené“ barvy (modrá, fialová...) odpovídají vyšším hodnotám poloměru zakřivení, to znamená plošší rohovce, a tudíž charakterizují nižší lomivost. Standardní hodnoty zakřivení rohovky bývají zobrazovány zelenou a žlutou barvou na topografických mapách. [2, 3, 8, 15]

5.1 Elevační mapa povrchu

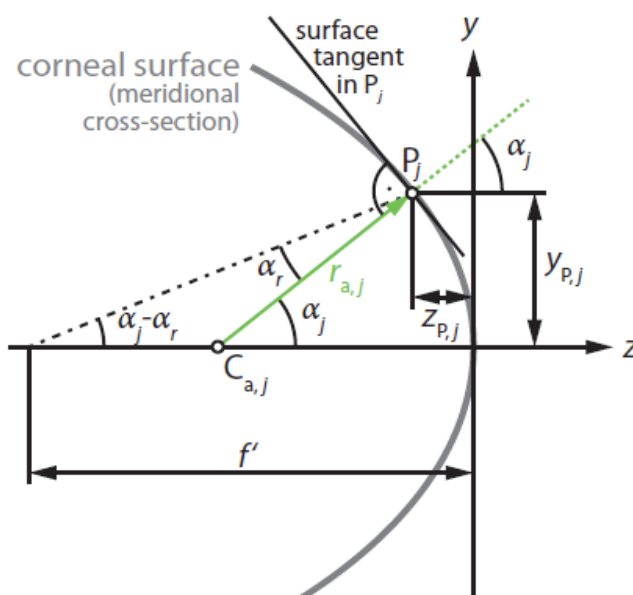
Elevační mapa je topografická mapa, která charakterizuje celkový tvar přední plochy rohovky vzhledem k referenční rovině. Bývá často využívána pro svou celkovou přehlednost a názornost, nicméně nezobrazuje detaily povrchu rohovky. Pokud chceme zobrazit i malé odchylky, je potřeba aplikovat nejpřesnější referenční povrchy (sférické, asférické, či tórické). Na obrázku 21(a) je zobrazena elevační mapa povrchu rohovky pacienta s podezřením na keratokonus. [2, 3, 8, 15]



Obrázek 21: (a) – elevační mapa povrchu rohovky s podezřením na keratokonus, (b) – geometrické znázornění povrchu měřené rohovky a sférické referenční ploše [2]

5.2 Mapa zakřivení

Zakřivení rohovkového povrchu v daném bodě určitého meridiánu může být vyjádřeno buď pomocí axiálního (též sagitálního) poloměru zakřivení r_a , anebo pomocí meridionálního (též tangenciálního) poloměru zakřivení r_m . Povrch rohovky bývá často popisován reciprokovou hodnotou poloměru zakřivení $K_a = \frac{1}{r_a}$ respektive $K_m = \frac{1}{r_m}$ (tzn. křivosti plochy rohovky). Podle obrázku 22 lze z pravoúhlého trojúhelníku vyjádřit axiální poloměr zakřivení, což je vzdálenost daného bodu P_j povrchu rohovky od optické osy, takto: $r_{a,j} = \frac{y_{P,j}}{\sin \alpha_j}$. [2, 3, 8, 15]



Obrázek 22: Axiální poloměr zakřivení [2]

Axiální poloměr zakřivení může být určen jen pro symetrické povrchy. Proto lze axiálním poloměrem zakřivení adekvátně popsat pouze centrální téměř sférickou část povrchu rohovky, zatímco meridionální poloměr zakřivení je vhodnější pro charakterizaci periferních oblastí povrchu rohovky. V nejjednodušším případě lze meridionální poloměr zakřivení v daném bodě semi-meridiánu P_j určit střední hodnotou poloměrů zakřivení dvou sousedících oblouků, které protínají bod P_j . Obvykle je tvar povrchu rohovky vyjádřen pomocí polynommické funkce $y(z)$. Meridionální poloměr zakřivení lze vyjádřit vztahem:

$$r_{m,j} = \frac{(\sqrt{1+(dy_j/dz_j)^2})^3}{d^2 y_j/dz_j^2}. [2, 3, 8, 15]$$

Mapa axiálního zakřivení je vhodnější pro celkový přehled a sledování změn zakřivení, zatímco mapa meridionálního zakřivení poskytuje přesnější a detailnější zobrazení zakřivení. [2, 3, 8, 15]

5.3 Mapa optické mohutnosti

Alternativní možností, jak popsat povrch rohovky, je pomocí mapy optické mohutnosti. Ke zjištění korespondujících dat lze principiálně použít paraxiální rovnici $\varphi = \frac{n'-n}{r_c}$, nicméně z keratometru či rohovkového topografu je možné zjistit pouze poloměr zakřivení přední plochy rohovky, z toho důvodu je nutné nahradit index lomu rohovky keratometrickým indexem, což je vypočítaná efektivní hodnota. Dostáváme obecnou keratometrickou rovnici: $\varphi = \frac{n_k - 1}{r_c}$. Pro výpočet celkové optické mohutnosti rohovky se používá keratometrický index 1,3315, ale pro výpočet vrcholové lámavosti zadní plochy rohovky se využívá keratometrický index 1,3377. Tyto hodnoty byly získány na základě hodnot Gullstrandova modelu oka. Ovšem někteří výrobci keratometrů a rohovkových topografů používají keratometrický index 1,3320 nebo 1,3375. [2, 3, 8, 15]

Směrem k periferii se hodnoty optické mohutnosti snižují, zatímco sférická aberace narůstá. Proto nemůžeme použít hodnoty optické mohutnosti rohovky z paraxiální rovnice pro celou rohovku. Vhodnější popis optické mohutnosti rohovky vychází z propočtů tvaru povrchu, kdy se aplikuje zákon lomu na každý bod povrchu rohovky. [2, 3, 8, 15]

6 Praktická část

Praktická část bakalářské práce obsahuje srovnání vybraných metod měření parametrů rohovky. V první části je uvedena analýza porovnání měření parametrů rohovky pomocí Javalova keratometru, aberometru, Pentacamu a autokeratorefraktotonometru. Dále byly porovnány hodnoty rohovkového astigmatismu měřeného pouze z přední plochy rohovky s hodnotami rohovkového astigmatismu, které zohledňují i zadní plochu a tloušťku rohovky. V druhé polovině praktické části byl analyzován vztah mezi celkovým astigmatismem oka a rohovkovým astigmatismem. Hodnoty celkového a rohovkového astigmatismu byly měřeny na aberometru a autokeratorefraktotonometru. Dále bylo provedeno srovnání hodnot celkového astigmatismu oka naměřených aberometrem a autokeratorefraktotonometrem s hodnotami celkového astigmatismu oka zjištěnými výpočtem podle Javalova pravidla.

6.1 Porovnání měření parametrů rohovky čtyřmi metodami

V této praktické části bylo provedeno měření parametrů rohovky (vrcholové zakřivení přední plochy rohovky, rohovkový astigmatismus přední plochy rohovky) pomocí čtyř metod, které bylo analyzováno a následně vyhodnoceno. Pokud byly přístroje správně kalibrovány, výsledky měření by se neměly lišit. Naměřené parametry rohovky lze využít pro různé účely, což je popsáno v teoretické části bakalářské práce.

6.1.1 Metodika měření

Všechna měření se konala v Kladně v optometristických vyšetřovnách Fakulty biomedicínského inženýrství Českého vysokého učení technického v Praze. Výzkum byl proveden na souboru 100 očí 50 jedinců ve věku 19 – 26 let na čtyřech přístrojích: Javalově keratometru, aberometru i-Profilér od firmy Zeiss [26], Pentacamu od firmy Oculus [25] a autokeratorefraktotonometru TRK-1P od firmy Topcon [27]. Ve sledovaném souboru se vyskytovali pouze jedinci bez očních patologií a bez předchozích chirurgických či refrakčních zákroků.

V následujících odstavcích jsou popsány postupy měření s jednotlivými typy přístrojů.

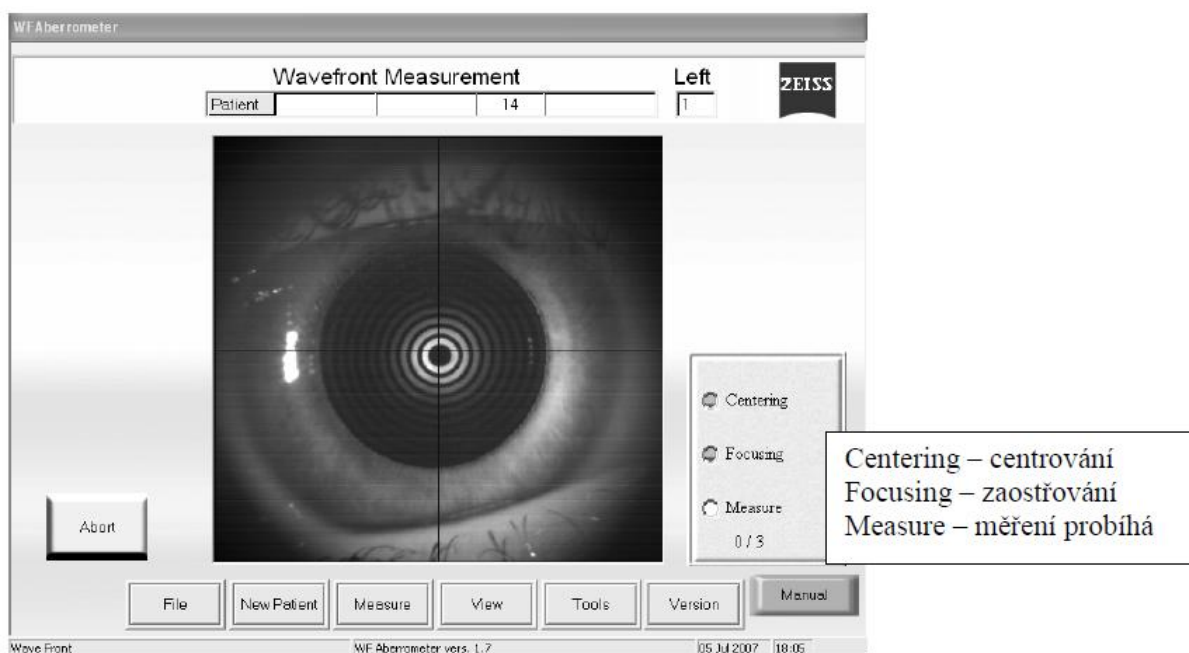
Postup měření keratometrem

Měření parametrů rohovky pomocí Javalova keratometru probíhalo za běžných fotopických podmínek podle postupu měření uvedeného v kapitole 2.3.

Postup měření aberometrem

Rovněž za běžných fotopických podmínek bylo provedeno měření parametrů rohovky na aberometru i-Profiler, jehož součástí je i rohovkový topograf.

Nejprve byl dotykovým perem zadán nový pacient (jméno, příjmení, datum narození ve formátu den/měsíc/rok). Po návratu do obrazovky měření byl zvolen typ měření: měření vlnových aberací + topografie rohovky. Začátek měření probíhal obdobně jako u keratometru, bylo třeba správně usadit klienta, tzn. byla upravena výška stolu nebo křesla tak, aby se pacientovi sedělo pohodlně. Poté si měřený opřel bradu a čelo o příslušné opěrky. Pro samotné měření bylo důležité upozornit zákazníka, aby se nehýbal a pokud možno nemrkal. Pacient se díval na pevný bod v přístroji (balon na konci cesty) volně, aby nedocházelo k akomodaci. Na obrázku 23 je ukázka okna Zobrazení měření, které se objevilo po zahájení měření. [22, 26]



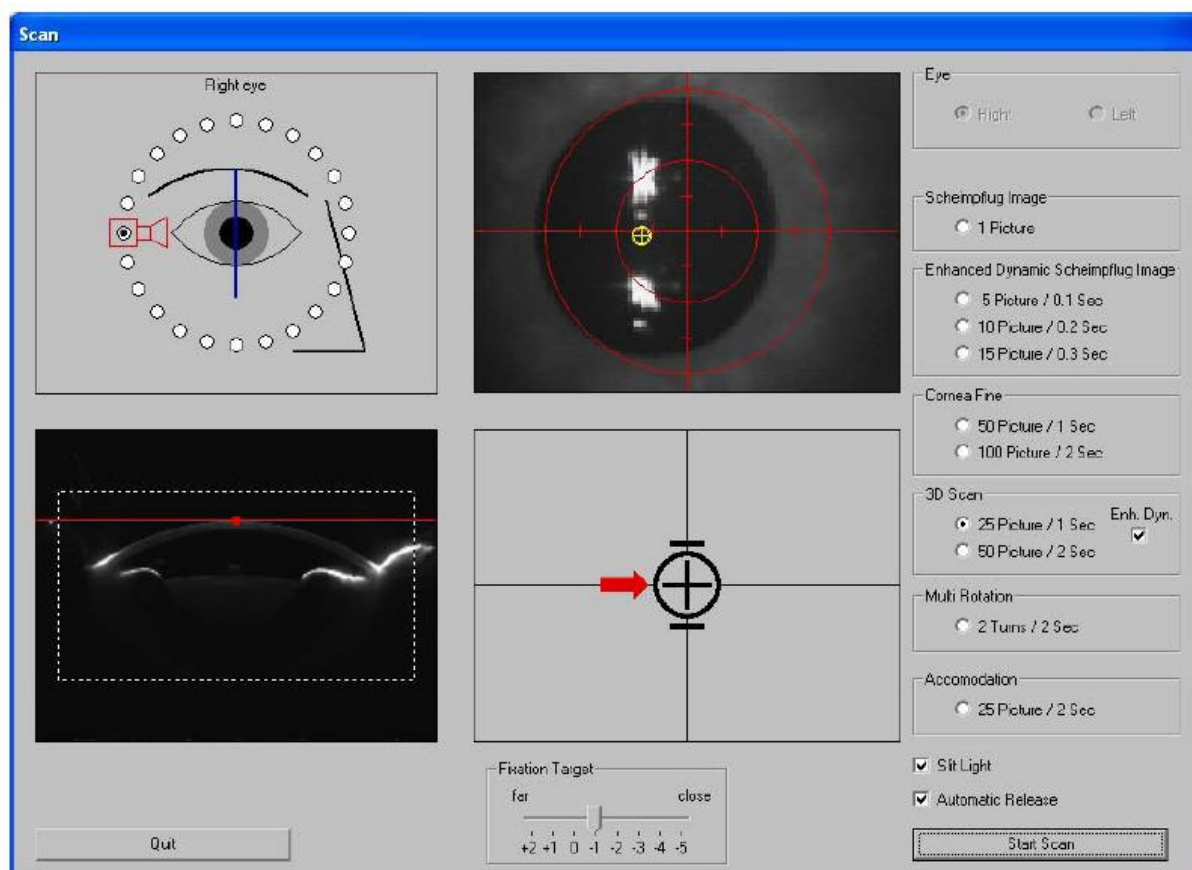
Obrázek 23: Zobrazení měření [22]

Aberometr automaticky změřil i oko druhé. Po ukončení měření se otevřela obrazovka Kruhy, kde je oko zobrazeno pomocí 24 červených a zelených kruhů. Aby aberometr nezapočítával aberace navíc, bylo potřeba vymazat kruhy, které byly deformované horním či dolním víčkem při mrkání. [22]

Postup měření Pentacamem

V první řadě byl zadán nový pacient do databáze pomocí tlačítka „New“ (jméno, příjmení a datum narození). Po výběru pacienta a vyšetření ze systému pro správu dat

pacientů, který byl potvrzen tlačítkem „Pentacam“, byl načten vyšetřovací program. Vlevo nahoře se zobrazily data pacienta a lišta k řízení programu. Byla upravena výška stolu a opěrky brady tak, aby se zákazníkovi s opřeným čelem a bradou sedělo pohodlně. Vyšetření pomocí Pentacamu probíhalo za skotopických podmínek, aby se zabránilo nežádoucím odrazům světla. V případě nedostatečně ztlumeného světla byl přes pacienta a Pentacam přehozen látkový přehoz. Po veškerém nastavení a správném usazení klienta bylo v menu „Examination“ zvoleno „Scan“. Přístroj automaticky rozpoznal a zaznamenal, které oko bude měřeno. V orientačním zobrazení byla ukazována aktuální poloha kamery vůči vyšetřovanému oku. Pentacam byl nastaven tak, aby modré štěrbinové světlo osvětlovalo oko pacienta a aby byla vidět pacientova zornice. V zaměřovacím okénku (na obrázku 24) byl vyšetřující pomocí šipek naváděn, kterým směrem je třeba posunout Pentacam. Jakmile byl Pentacam správně vycentrovaný, aktivovalo se automatické měření. [23, 25]

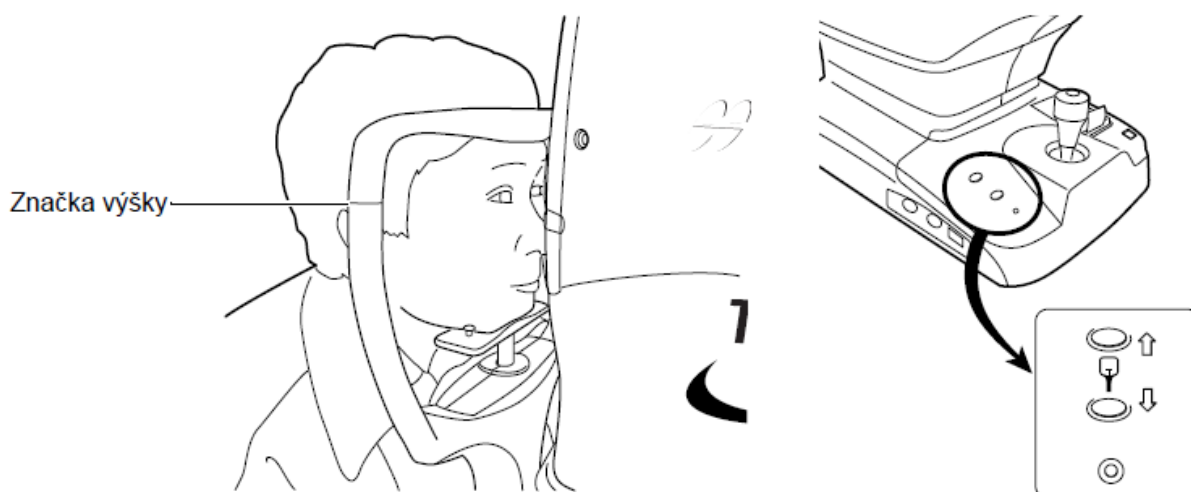


Obrázek 24: Zaměřovací okénko Pentacamu [23]

Dále bylo možné nastavit, kolik snímků má kamera z jedné polohy pořídit. Systém nasnímané obrázky zprůměroval, aby se minimalizovaly chyby. Bylo možné nastavit i 3D analýzu. [23]

Postup měření autokeratorefraktotonomem

Nejprve byla nastavena výška stolku či křesla, aby klient pohodlně dosáhl bradou na opěrku. Opěrka byla rovněž upravena tak, aby bylo oko zarovnané se značkou výšky opěrky brady jako na obrázku 25. Byl zvolen režim měření R/K, který současně měří jak refrakci, tak i poloměr zakřivení přední plochy rohovky. Poté byl přístroj vycentrován, aby se pacientovo oko zobrazilo do středu obrazovky LCD monitoru, pomocí joysticku. Měření se provádělo automaticky pro pravé i levé oko. [24]



Obrázek 25: Úprava opěrky brady autokeratorefraktotonomem [24]

6.1.2 Analyzovaná data

Naměřená data, která byla analyzována a statisticky vyhodnocována, jsou uvedena v prvních 4 tabulkách v příloze. Naměřené hodnoty bývají vyjádřeny ve sférocylindrickém zápisu $S[D] / C[D] \times Ax[^\circ]$, nicméně tyto hodnoty nejsou pro statistické analýzy vzájemně nezávislé, z toho důvodu musí být převedeny na vektory lámavosti M , J_0 , J_{45} , které již jsou vzájemně nezávislé. Proto i v této bakalářské práci bylo třeba převést hodnoty astigmatismů, ať už celkových či rohovkových, na složky vektorů lámavosti J_0 a J_{45} . Převod byl proveden podle následujících vztahů: [1, 19]

$$J_0 = -0,5 \cdot C \cdot \cos(2Ax)$$

$$J_{45} = -0,5 \cdot C \cdot \sin(2Ax)$$

6.1.3 Metoda statistické analýzy

Pro statistickou analýzu naměřených dat byl zvolen párový t-test. Bylo provedeno měření stejných parametrů na stejném souboru jedinců za stejných podmínek čtyřmi metodami, které byly vzájemně porovnávány pomocí párového t-testu. Pro každou dvojici přístrojů byla předpokládána nulová hypotéza. Tedy každá veličina měřená jedním přístrojem μ_1 se neliší od stejné veličiny měřené druhým přístrojem μ_2 ($\mu_1 = \mu_2$). Byla stanovena hladina statistické významnosti $\alpha = 0,05$. V případě hodnoty statistické významnosti p menší než 0,05, je nulová hypotéza zamítnuta. Pravděpodobnost, že jsou vzniklé rozdíly pouze náhodné, je menší než 5%. Pro zpracování statistické analýzy byl použit Microsoft Excel. [28, 29]

6.1.4 Statistická analýza měření rohovkového astigmatismu

V první části statistické analýzy byly porovnány výsledky měření rohovkového astigmatismu přední plochy rohovky. Základní charakteristiky souboru pro složky rohovkového astigmatismu J_0 a J_{45} jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2.

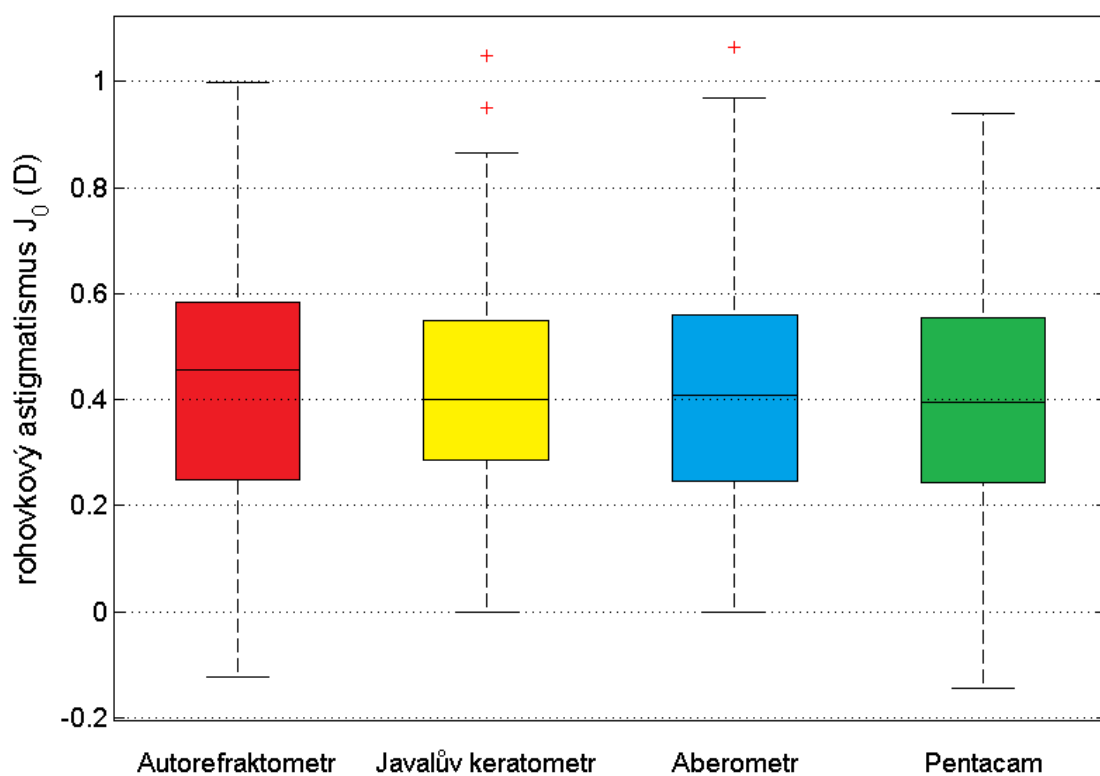
Tabulka 1: Základní charakteristika souboru pro rohovkový astigmatismus J_0

rohovkový astigmatismus J_0				
	autorefraktometr	Javalův keratometr	aberometr	Pentacam
počet pozorování	100	100	100	100
střední hodnota	0,45	0,4	0,41	0,39
rozptyl výběru	0,047	0,046	0,052	0,046
směrodatná odchylka	0,22	0,21	0,23	0,21

Tabulka 2: Základní charakteristika souboru pro rohovkový astigmatismus J_{45}

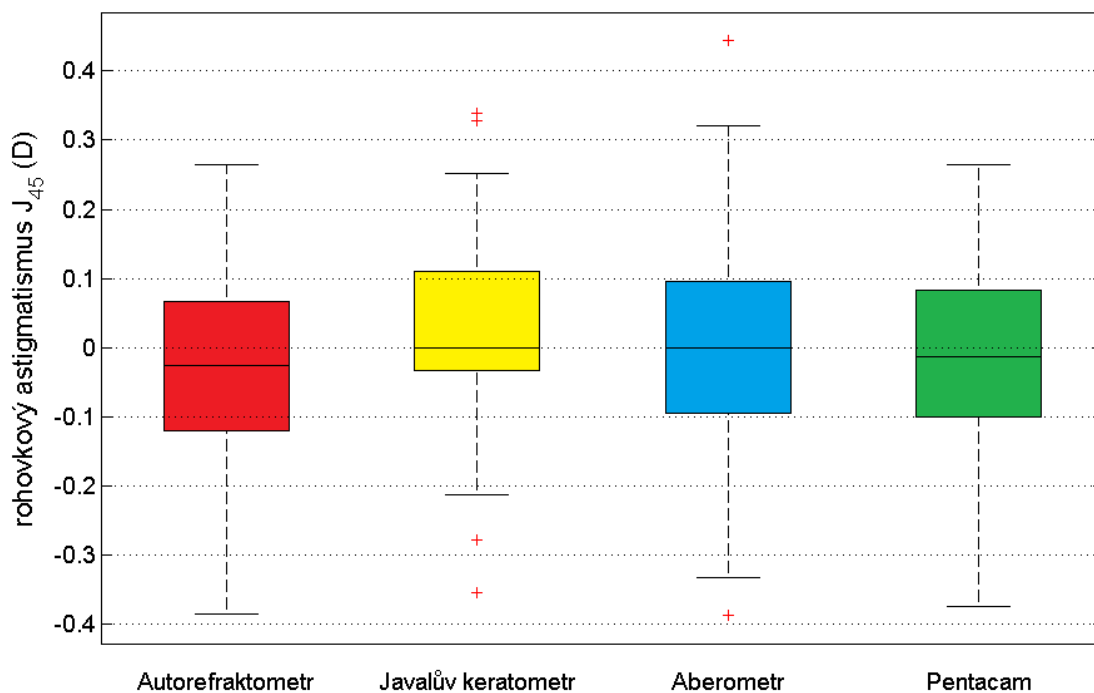
rohovkový astigmatismus J_{45}				
	autorefraktometr	Javalův keratometr	aberometr	Pentacam
počet pozorování	100	100	100	100
střední hodnota	-0,03	0	0	-0,01
rozptyl výběru	0,017	0,015	0,024	0,018
směrodatná odchylka	0,13	0,12	0,15	0,13

Na obrázku 26 jsou zobrazeny výsledky měření složky J_0 rohovkového astigmatismu. Barevné sloupce ukazují interval mezi prvním a třetím kvantilem, prostřední linka znázorňuje střední hodnotu. Úsečky od minimálních až po maximální hodnoty zobrazují směrodatné odchylky.



Obrázek 26: Graf měření složky J_0 rohovkového astigmatismu

Na obrázku 27 jsou zobrazeny výsledky měření složky J_{45} rohovkového astigmatismu. Barevné sloupce ukazují interval mezi prvním a třetím kvartilem, prostřední linka znázorňuje střední hodnotu. Úsečky od minimálních až po maximální hodnoty zobrazují směrodatné odchylky.



Obrázek 27: Graf měření složky J_{45} rohovkového astigmatismu

Byly stanoveny následující nulové a alternativní hypotézy:

$H_{0,1}$: Rozdíl středních hodnot měření na autokeratorefraktometru a na Javalově keratometru je nulový.

$H_{A,1}$: Rozdíl středních hodnot měření na autokeratorefraktometru a na Javalově keratometru není nulový.

$H_{0,2}$: Rozdíl středních hodnot měření na autokeratorefraktometru a na aberometru je nulový.

$H_{A,2}$: Rozdíl středních hodnot měření na autokeratorefraktometru a na aberometru není nulový.

$H_{0,3}$: Rozdíl středních hodnot měření na autokeratorefraktometru a na Pentacamu je nulový.

$H_{A,3}$: Rozdíl středních hodnot měření na autokeratorefraktometru a na Pentacamu není nulový.

$H_{0,4}$: Rozdíl středních hodnot měření na Javalově keratometru a na aberometru je nulový.

$H_{A,4}$: Rozdíl středních hodnot měření na Javalově keratometru a na aberometru není nulový.

$H_{0,5}$: Rozdíl středních hodnot měření na Javalově keratometru a na Pentacamu je nulový.

$H_{A,5}$: Rozdíl středních hodnot měření na Javalově keratometru a na Pentacamu není nulový.

$H_{0,6}$: Rozdíl středních hodnot měření na aberometru a na Pentacamu je nulový.

$H_{A,6}$: Rozdíl středních hodnot měření na aberometru a na Pentacamu není nulový.

Výsledky nulových hypotéz na stanovené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ jsou uvedeny v tabulce 3. Ve stavu přijetí 0 znamená přijetí nulové hypotézy a zamítnutí alternativní hypotézy, zatímco 1 znamená zamítnutí nulové hypotézy a přijetí alternativní hypotézy.

Tabulka 3: Výsledky nulových hypotéz pro složky J_0 a J_{45} rohovkového astigmatismu

Hypotézy	rohovkový astigmatismus J_0		rohovkový astigmatismus J_{45}	
	stav přijetí	statistická významnost P	stav přijetí	statistická významnost P
$H_{0,1}$	0	0,67	1	2,07E-12
$H_{0,2}$	0	0,69	0	0,21
$H_{0,3}$	1	0,00	0	0,27
$H_{0,4}$	0	0,96	1	4,23E-05
$H_{0,5}$	1	0,01	1	0
$H_{0,6}$	1	0,04	0	0,94

Jak spolu jednotlivé metody korelují, je popsáno pomocí korelačních koeficientů v tabulce 4. Pro složku J_0 rohovkového astigmatismu se korelační koeficienty pohybují v rozmezí od 0,83 do 0,89 a pro složku J_{45} rohovkového astigmatismu se pohybují v rozmezí od 0,54 do 0,86. Nejvyšší korelaci vykazují porovnávané hodnoty vrcholového zakřivení v rozmezí 0,98-1,0.

Tabulka 4: Korelační koeficienty mezi metodami

	rohovkový astigmatismus J_0	rohovkový astigmatismus J_{45}	vrcholové zakřivení
autoref./Javal.keratometr	0,87	0,86	0,98
autoref./aberometr	0,83	0,82	0,99
autoref./Pentacam	0,88	0,66	1,00
Javal.keratometr/aberometr	0,87	0,76	0,98
Javal.keratometr/Pentacam	0,89	0,61	0,98
aberometr/Pentacam	0,83	0,54	0,99

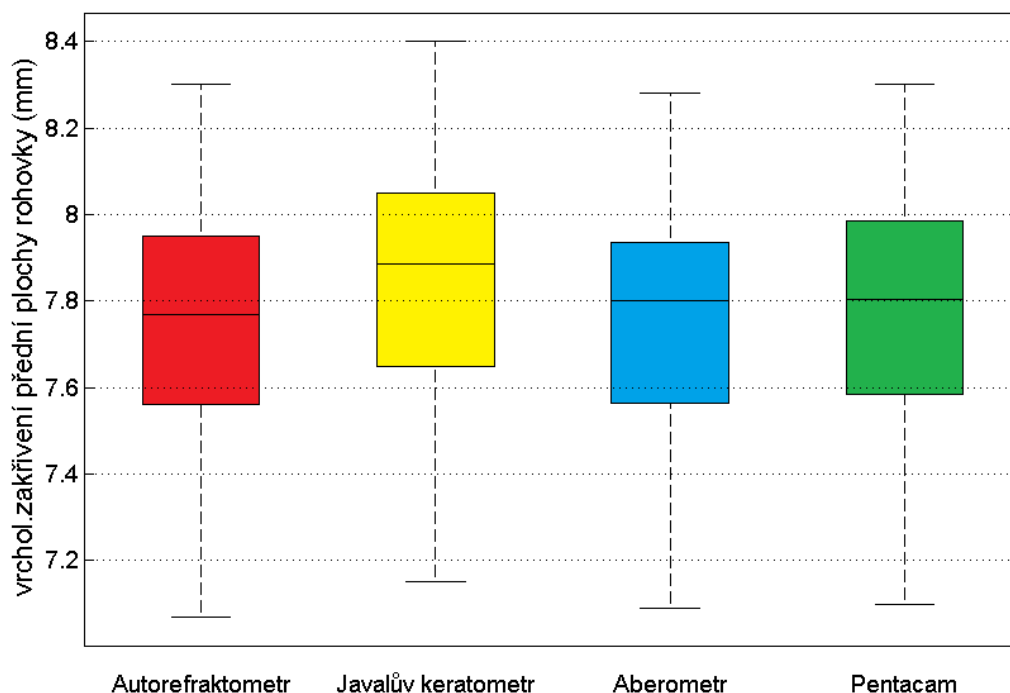
6.1.5 Statistická analýza měření vrcholového zakřivení přední plochy rohovky

Statistická analýza pokračuje porovnáním měření vrcholového zakřivení přední plochy rohovky. V tabulce 5 je uvedena základní charakteristika výběru jedinců pro vrcholové zakřivení přední plochy rohovky.

Tabulka 5: Základní charakteristika souboru pro vrcholové zakřivení přední plochy rohovky

vrcholové zakřivení přední plochy rohovky				
	autorefraktometr	Javalův keratometr	aberometr	Pentacam
počet pozorování	100	100	100	100
střední hodnota	7,77	7,89	7,8	7,81
rozptyl výběru	0,071	0,079	0,067	0,066
směrodatná odchylka	0,26	0,28	0,26	0,26

Na obrázku 28 jsou zobrazeny výsledky měření vrcholového zakřivení přední plochy rohovky. Barevné sloupce ukazují interval mezi prvním a třetím kvantilem, prostřední linka znázorňuje střední hodnotu. Úsečky od minimálních až po maximální hodnoty zobrazují směrodatné odchylky.



Obrázek 28: Graf měření vrcholového zakřivení přední plochy rohovky

Byly stanoveny stejné nulové a alternativní hypotézy jako v kapitole 6.1.4. Výsledky nulových hypotéz na stanovené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ jsou uvedeny v tabulce 6. Rovněž jako v předchozí kapitole ve stavu přijetí 0 znamená přijetí nulové hypotézy a zamítnutí alternativní hypotézy, zatímco 1 znamená zamítnutí nulové hypotézy a přijetí alternativní hypotézy.

Tabulka 6: Výsledky nulových hypotéz pro vrcholové zakřivení přední plochy rohovky

vrcholové zakřivení přední plochy rohovky		
hypotézy	stav přijetí	statistická významnost P
$H_{0,1}$	1	1,90E-29
$H_{0,2}$	0	0,90
$H_{0,3}$	1	8,61E-24
$H_{0,4}$	1	1,05E-27
$H_{0,5}$	1	5,32E-17
$H_{0,6}$	1	5,46E-12

Korelace mezi jednotlivými metodami je vyjádřena pomocí korelačních koeficientů v tabulce 4.

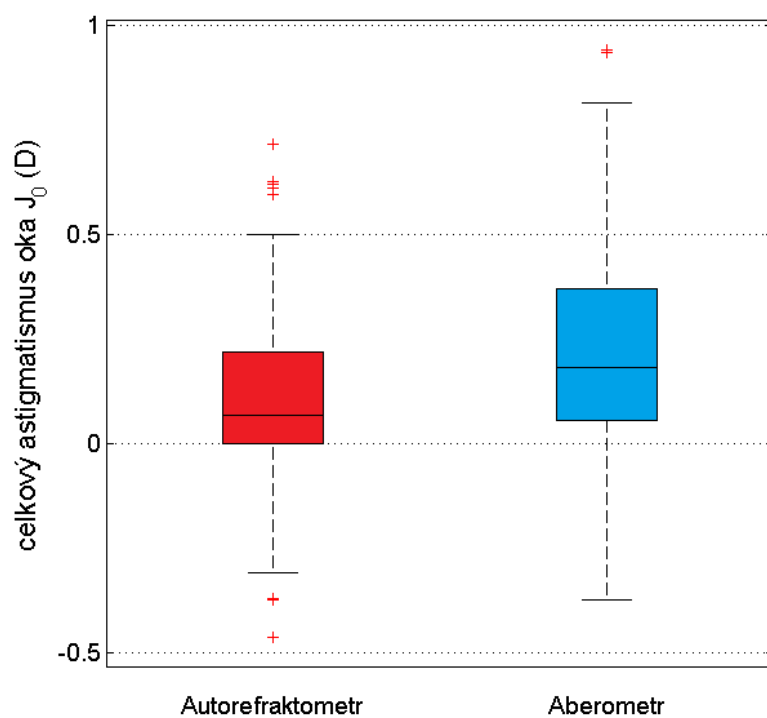
6.1.6 Statistická analýza měření celkového astigmatismu

Aberometr a autokeratorefraktometr jsou přístroje, které kromě parametrů rohovky měří i refrakční vady celého oka, díky čemuž mohla být provedena statistická analýza měření celkového astigmatismu oka. Základní charakteristiky souboru pro složky celkového astigmatismu J_0 a J_{45} jsou uvedeny v tabulce 7.

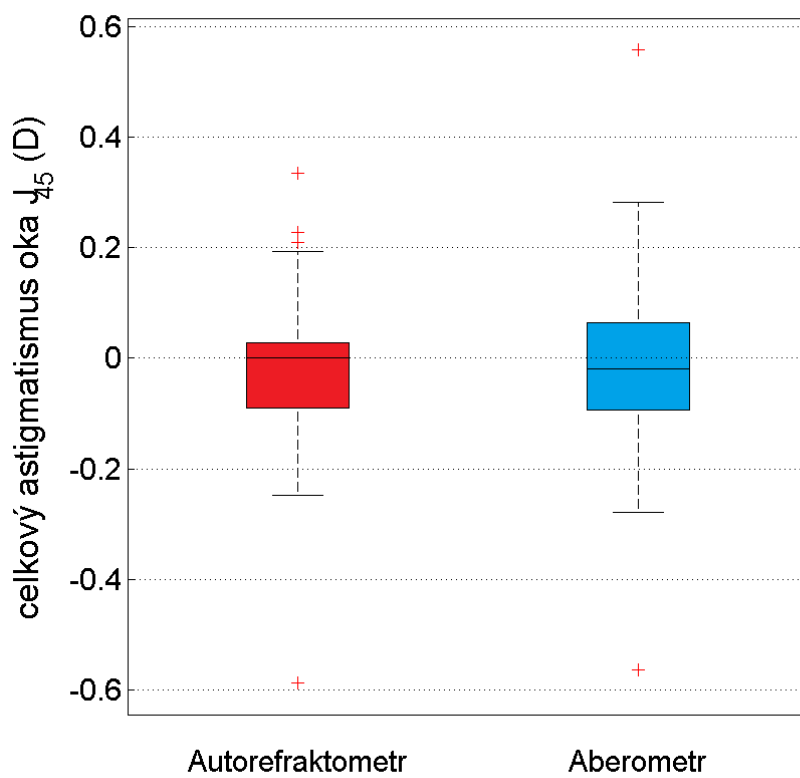
Tabulka 7: Základní charakteristiky souboru pro složky J_0 a J_{45} celkového astigmatismu oka

	celkový astigmatismus J_0		celkový astigmatismus J_{45}	
	autorefraktometr	aberometr	autorefraktometr	aberometr
počet pozorování	100	100	100	100
střední hodnota	0,07	0,18	0	-0,02
rozptyl výběru	0,052	0,062	0,014	0,019
směrodatná odchylka	0,23	0,25	0,12	0,14

Na obrázcích 29 a 30 jsou zobrazeny výsledky měření celkového astigmatismu rohovky. Barevné sloupce ukazují interval mezi prvním a třetím kvantilem, prostřední linka znázorňuje střední hodnotu. Úsečky od minimálních až po maximální hodnoty zobrazují směrodatné odchylky.



Obrázek 29: Graf měření složky J_0 celkového astigmatismu



Obrázek 30: Měření složky J_{45} celkového astigmatismu

Byla stanovena nulová a k ní alternativní hypotéza:

$H_{0,1}$: Rozdíl středních hodnot měření na autokeratorefraktometru a na aberometru je nulový.

$H_{A,1}$: Rozdíl středních hodnot měření na autokeratorefraktometru a na aberometru není nulový.

Výsledky nulové hypotézy pro vektor lámavosti J_0 i pro vektor lámavosti J_{45} na stanovené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ jsou uvedeny v tabulce 8. Opět ve stavu přijetí 0 znamená přijetí nulové hypotézy a zamítnutí alternativní hypotézy, zatímco 1 znamená zamítnutí nulové hypotézy a přijetí alternativní hypotézy.

Tabulka 8: Výsledky nulové hypotézy složek J_0 a J_{45} celkového astigmatismu

hypotéza	celkový astigmatismus J_0		celkový astigmatismus J_{45}	
	stav přijetí	statistická významnost P	stav přijetí	statistická významnost P
$H_{0,1}$	1	1,02E-16	0	0,20

Autokeratorefraktometr a aberometr spolu lépe korelují v případě složky J_0 celkového astigmatismu (korelační koeficient je roven 0,86) než v případě složky J_{45} (korelační koeficient se rovná 0,70).

6.1.7 Statistická analýza měření rohovkového astigmatismu při použití TNP

U Pentacamu je možné nastavit „ True Net Power Map“ (TNP) - mapu, která zohledňuje při výpočtech a měřeních i zadní plochu rohovky. Hodnotu True Net Power lze vypočítat podle vztahu:

$$TNP = \frac{1,376-1}{r_{asurf}} \times 1000 + \frac{1,336-1,376}{r_{psurf}} \times 1000,$$

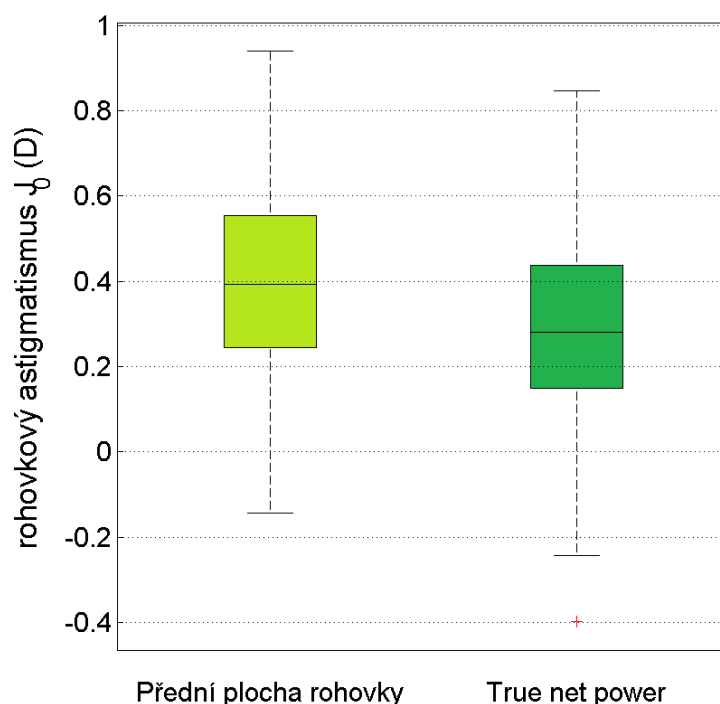
kde r_{asurf} značí poloměr zakřivení přední plochy rohovky a r_{psurf} vyjadřuje poloměr zakřivení zadní plochy rohovky. [25]

Pomocí párového t-testu bylo provedeno srovnání hodnot vektorů lámavosti J_0 a J_{45} rohovkového astigmatismu měřeného pouze z přední plochy rohovky a při použití TNP. V tabulce 9 jsou zobrazeny základní charakteristiky výběru pro jednotlivé složky rohovkového astigmatismu měřeného pouze z přední plochy rohovky a při použití TNP.

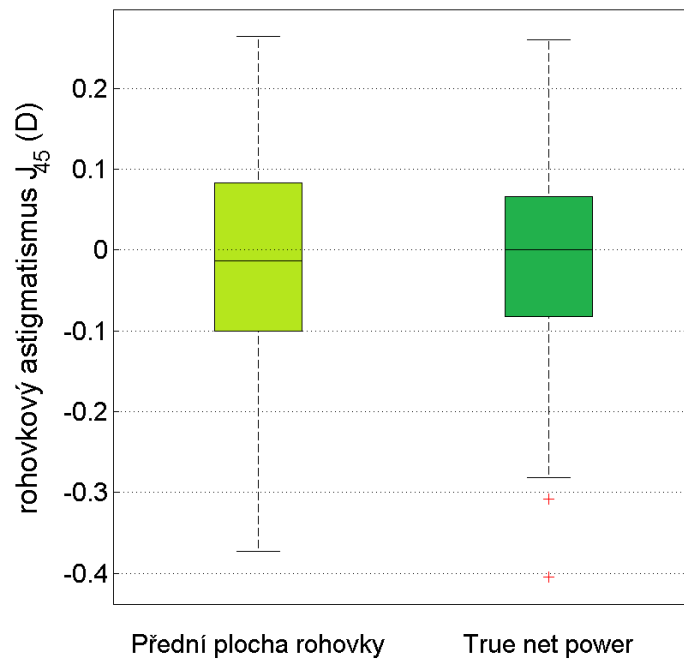
Tabulka 9: Základní charakteristika souboru pro složky rohovkového astigmatismu J_0 a J_{45}

	rohovkový astigmatismus J_0		rohovkový astigmatismus J_{45}	
	přední plocha rohovky	TNP	přední plocha rohovky	TNP
počet pozorování	100	100	100	100
střední hodnota	0,39	0,28	-0,01	-6,13E-17
rozptyl výběru	0,046	0,046	0,018	0,015
směrodatná odchylka	0,21	0,21	0,13	0,12

Na obrázcích 31 a 32 jsou zobrazeny výsledné hodnoty rohovkového astigmatismu měřené z přední plochy rohovky a při započtení zadní plochy rohovky. Stejně jako u předchozích grafů barevné sloupce ukazují interval mezi prvním a třetím kvantilem, prostřední linka znázorňuje střední hodnotu. Úsečky od minimálních až po maximální hodnoty zobrazují směrodatné odchylky.



Obrázek 31: Graf měření vektoru lámavosti J_0 rohovkového astigmatismu pro přední plochu rohovky a při započtení zadní plochy rohovky (TNP)



Obrázek 32: Graf měření vektoru lámavosti J_{45} rohovkového astigmatismu pro přední plochu rohovky a při započtení zadní plochy rohovky (TNP)

Byla stanovena nulová a alternativní hypotéza:

H_0 : Rozdíl středních hodnot měření rohovkového astigmatismu měřeného pouze z přední plochy rohovky a měřeného z přední i zadní plochy rohovky je nulový.

H_A : Rozdíl středních hodnot měření rohovkového astigmatismu měřeného pouze z přední plochy rohovky a měřeného z přední i zadní plochy rohovky není nulový.

V tabulce 10 jsou uvedeny výsledky nulové hypotézy pro vektor lámavosti J_0 i pro vektor lámavosti J_{45} rohovkového astigmatismu měřeného z přední a z přední i zadní plochy rohovky na stanovené hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Rovněž jako v předchozích statistických analýzách, 0 ve stavu přijetí znamená přijetí nulové hypotézy a zamítnutí alternativní hypotézy, zatímco 1 znamená zamítnutí nulové hypotézy a přijetí alternativní hypotézy.

Tabulka 10: Výsledky nulové hypotézy složek J_0 a J_{45} rohovkového astigmatismu měřeného z přední plochy rohovky a měřeného z přední i zadní plochy rohovky

hypotéza	rohovkový astigmatismus J_0		rohovkový astigmatismus J_{45}	
	stav přijetí	statistická významnost P	stav přijetí	statistická významnost P
H_0	1	9,17E-18	0	0,86

Byla zjištěna korelace mezi daty naměřenými z přední plochy rohovky a daty vypočítané přes hodnotu „True Net Power“, kdy pro složku J_0 rohovkového astigmatismu vychází korelační koeficient 0,87 a pro složku J_{45} rohovkového astigmatismu 0,94.

6.1.8 Diskuse

Z výše uvedených výsledků bylo zjištěno, že při porovnávání čtyř metod měření rohovkového astigmatismu je pro vektor lámavosti J_0 statisticky významný rozdíl mezi měřeními na Pentacamu firmy Oculus a autokeratorefraktometru firmy Topcon, mezi měřeními na Pentacamu a Javalově keratometru a mezi měřeními na Pentacamu a aberometru od firmy Zeiss. Přesto spolu výsledky těchto přístrojů korelují na 80 – 90 %. Zatímco pro vektor lámavosti J_{45} rohovkového astigmatismu vychází statisticky významný rozdíl mezi měřeními na Javalově keratometru a autokeratorefraktometru, mezi měřeními na Javalově keratometru a aberometru a mezi měřeními na Javalově keratometru a Pentacamu. Javalův keratometr s autokeratorefraktometrem koreluje na 86 %, ale mezi zbylými přístroji jsou korelační koeficienty nižší - 0,76 a 0,61.

Při porovnávání čtyř metod měření vrcholového zakřivení přední plochy rohovky není statisticky významný rozdíl pouze mezi měřeními na autokeratorefraktometru a aberometru. Přitom pro vrcholové zakřivení přední plochy rohovky spolu všechny metody nejlépe korelují (na 98-100%).

Bylo provedeno srovnání měření celkového astigmatismu na přístrojích autokeratorefraktometr a aberometr. Kde pro složku J_0 celkového astigmatismu vznikl statisticky významný rozdíl mezi těmito metodami, přesto že spolu korelují na 86 %. Pro složku J_{45} celkového astigmatismu nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi těmito metodami. Korelační koeficient vyšel 0,7.

Při porovnávání měření rohovkového astigmatismu z přední plochy rohovky a při započtení zadní plochy rohovky (TNP) vycházel pro vektor lámavosti J_0 statisticky významný rozdíl, zatímco pro vektor lámavosti J_{45} nikoliv. Byly vypočteny korelační koeficienty pro J_0 0,87 a pro J_{45} 0,94.

Nepřesnosti měření na Javalově keratometru mohly být způsobeny nepřesností ručního měření. Výsledky měření mohlo ovlivnit v případě Pentacamu firmy Oculus použití látkového přehození pro vytvoření mezopických podmínek. Nicméně v bakalářské práci „Srovnání vybraných objektivních metod měření refrakčních vad“ nebyl prokázán statisticky významný rozdíl měření za fotopických podmínek oproti mezopickým podmínkám osvětlení.[19] Je

zarážející, že se výsledky liší pro různé parametry. Proto vzniklo podezření na chybné statistické zpracování. Pro kontrolu byly provedeny statistické testy kromě programu Microsoft Excel také v MATLABU. Výsledky se shodovaly. Hlavním zdrojem nepřesností tedy byla pravděpodobně asféricita rohovky, která se mohla projevit při měření v různých zónách o různých průměrech. Výsledky rohovkového astigmatismu zjišťované pouze z přední plochy rohovky a počítané přes hodnotu True Net Power se odlišují vlivem různého indexu lomu použitého pro výpočet. Jak je uvedeno v bakalářské práci „Srovnání vybraných objektivních metod měření refrakčních vad“, Pentacam používá pro výpočet astigmatismu z přední plochy rohovky index lomu 1,3375, zatímco při započtení zadní plochy rohovky pomocí hodnoty True Net Power index lomu 1,376. [19]

6.2 Statistická analýza celkového a rohovkového astigmatismu

V druhé polovině praktické části byl analyzován vztah mezi celkovým astigmatismem oka a rohovkovým astigmatismem. Hodnoty celkového a rohovkového astigmatismu byly měřeny na aberometru a autokeratorefratotonometru. Dále bylo provedeno srovnání hodnot celkového astigmatismu oka naměřených aberometrem a autokeratorefraktotonometrem s hodnotami celkového astigmatismu oka zjištěnými výpočtem podle Javalova pravidla.

6.2.1 Metodika měření

Metodika měření je shodná s metodikou pro porovnání měření parametrů rohovky čtyřmi metodami, která je popsána v kapitole 6.1.1, tzn. byl měřen stejný soubor jedinců na stejném místě. Měření bylo provedeno na přístrojích aberometr i-Profiler od firmy Zeiss a autokeratorefraktotonometru TRK-1P od firmy Topcon.

6.2.2 Analyzovaná data

Naměřená data, která byla analyzována a statisticky vyhodnocována, jsou uvedena v první a třetí tabulce v příloze. Hodnoty astigmatismů byly rovněž převedeny na vektory lámavosti J_0 a J_{45} podle vztahů uvedených v kapitole 6.1.2.

6.2.3 Metoda statistické analýzy

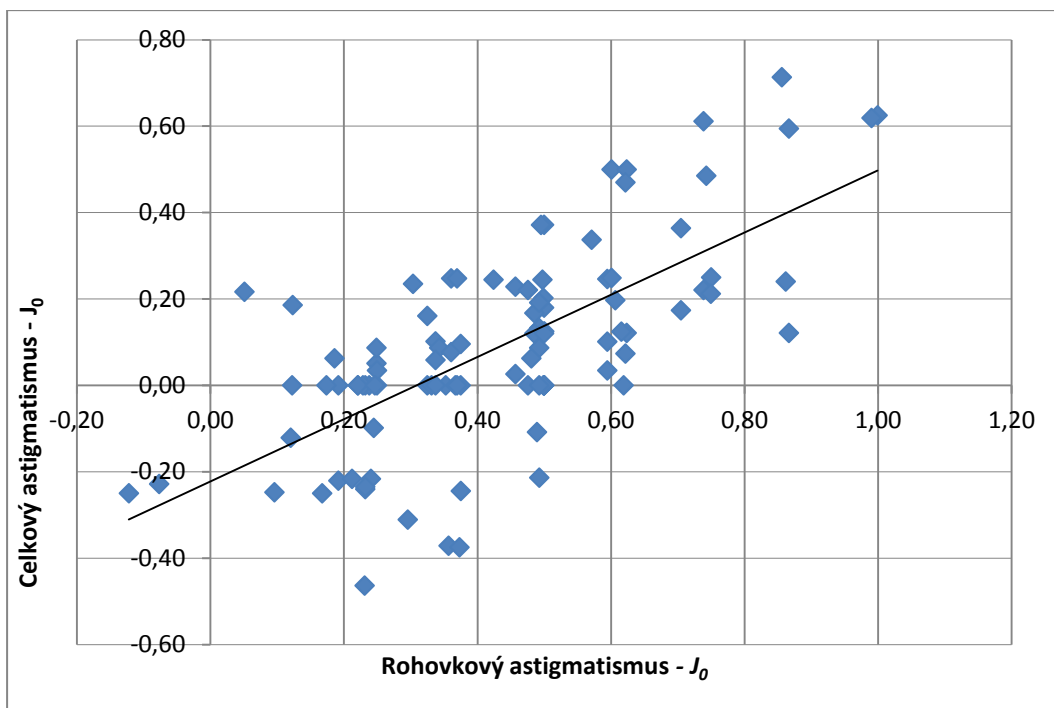
Pro statistické zpracování vztahu rohovkového a celkového astigmatismu byla zvolena korelační analýza, která prostřednictvím korelačního koeficientu vyjadřuje typ a velikost

závislosti. V případě, že se korelační koeficient blíží hodnotě 1, vyjadřuje silnou přímou závislost. V případě, že se korelační koeficient rovná 0, není přítomna žádná závislost. V případě, že se korelační koeficient blíží hodnotě -1, znamená to silnou nepřímou závislost. K zhodnocení porovnání naměřených dat celkového astigmatismu a hodnot celkového astigmatismu z Javalovy podmínky byl použit párový t-test, který byl popsán již v kapitole 6.1.3. [28, 29]

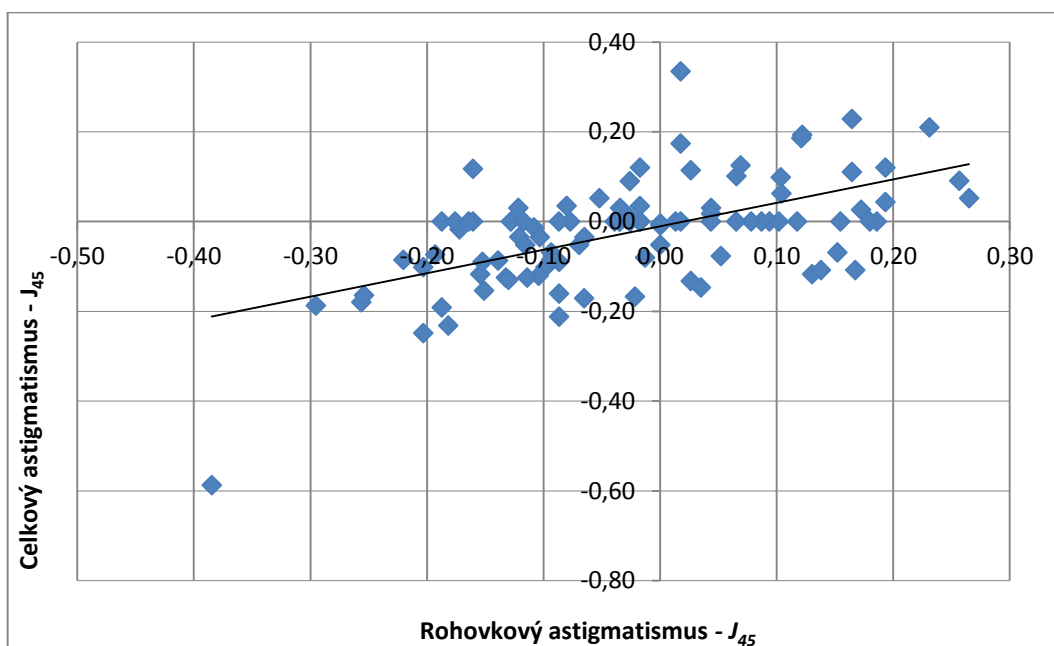
6.2.4 Korelace hodnot celkového a rohovkového astigmatismu

Byla provedena korelace hodnot celkového a rohovkového astigmatismu. Obrázek 33 zobrazuje závislost mezi složkami J_0 celkového a rohovkového astigmatismu přední plochy rohovky měřené na autokeratorefraktometru. Korelační koeficient pro J_0 se rovná 0,686. Na obrázku 34 je znázorněna závislost mezi složkami J_{45} celkového a rohovkového astigmatismu přední plochy rohovky měřené na autokeratorefraktometru. Korelační koeficient pro J_{45} se rovná 0,578.

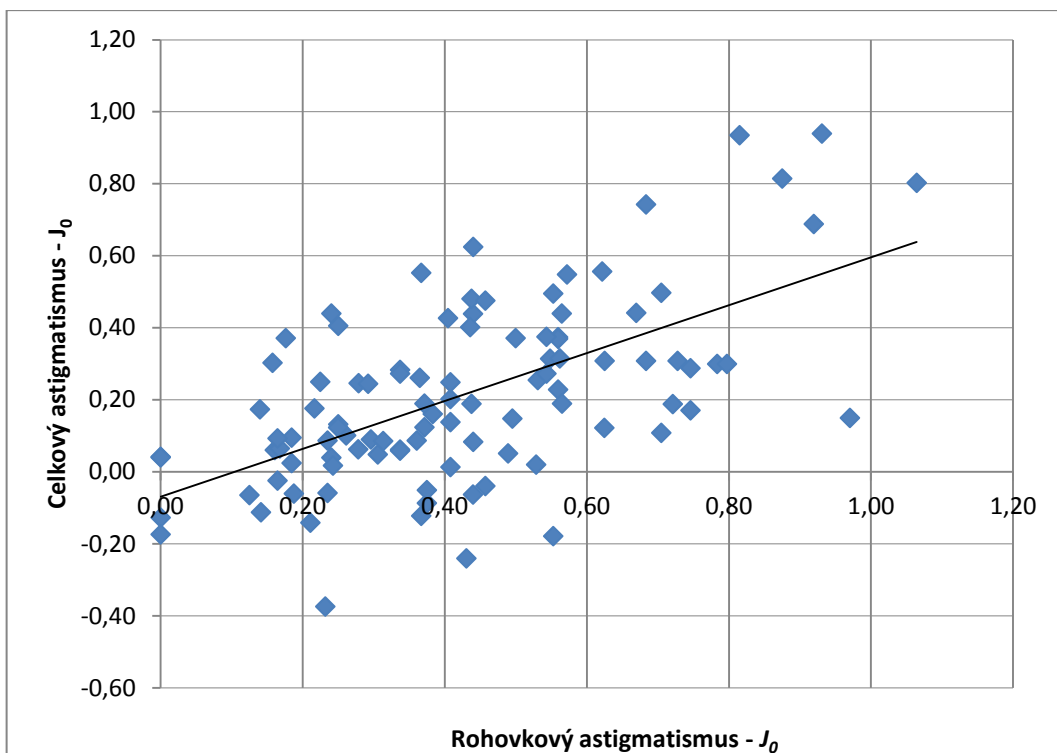
Na obrázku 35 je zobrazena závislost mezi složkami J_0 celkového a rohovkového astigmatismu přední plochy rohovky měřené na aberometru. Korelační koeficient pro J_0 se rovná 0,607. Na obrázku 36 lze pozorovat závislost mezi složkami J_{45} celkového a rohovkového astigmatismu přední plochy rohovky měřené na aberometru. Korelační koeficient pro J_{45} se rovná 0,444.



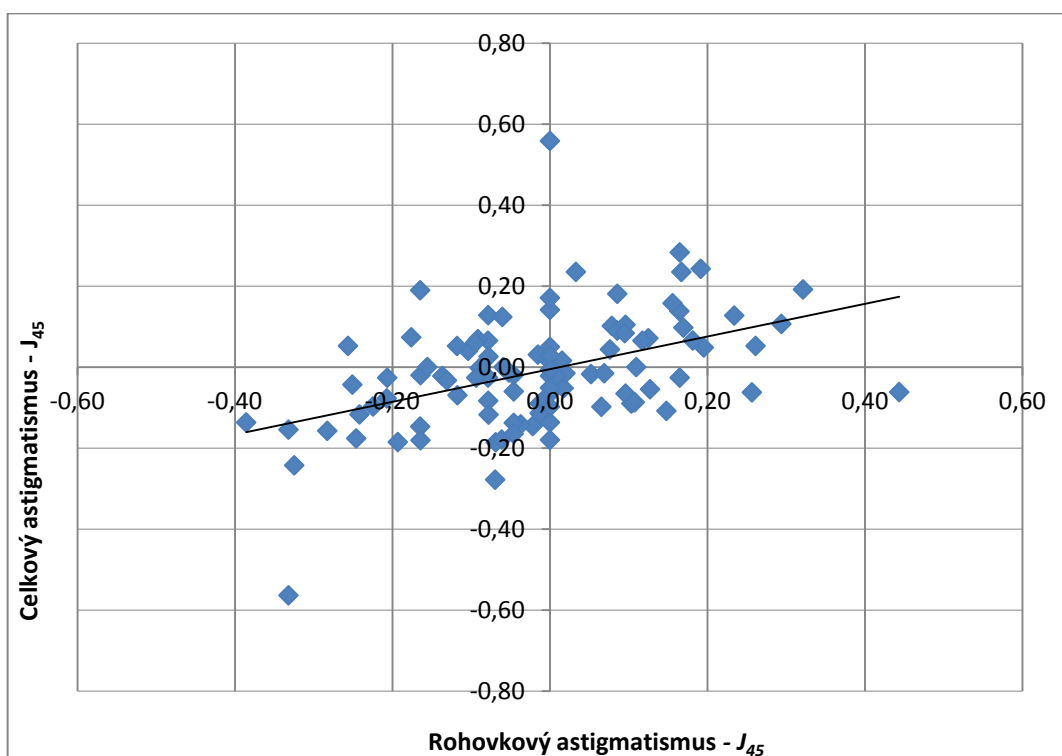
Obrázek 33: Graf závislosti mezi složkami J_0 celkového a rohovkového astigmatismu na autokeratorefraktotonometru



Obrázek 34: Graf závislosti mezi složkami J_{45} celkového a rohovkového astigmatismu na autokeratorefraktotonometru



Obrázek 35: Graf závislosti mezi složkami J_0 celkového a rohovkového astigmatismu v případě aberometru



Obrázek 36: Graf závislosti mezi složkami J_{45} celkového a rohovkového astigmatismu v případě aberometru

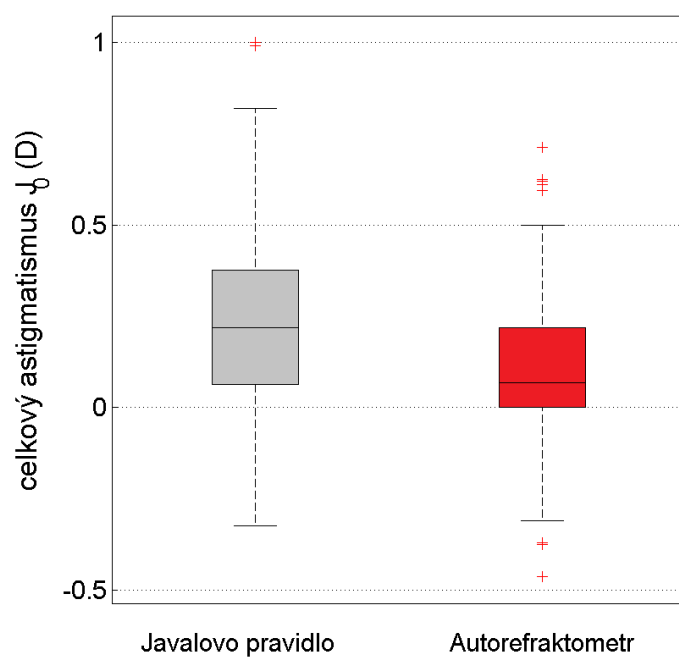
6.2.5 Statistické porovnání Javalova pravidla a naměřených hodnot

Jak již bylo popsáno v kapitole 1.3.1, celkový astigmatismus oka lze vypočítat podle Javalova pravidla, které zároveň popisuje závislost mezi celkovým a rohovkovým astigmatismem. Bylo provedeno porovnání naměřených hodnot celkového astigmatismu z přístrojů autokeratorefraktometru a aberometru s hodnotami celkového astigmatismu vypočtenými pomocí Javalova pravidla. V tabulce 11 je uvedena základní charakteristika souboru pro složky J_0 a J_{45} celkového astigmatismu pro naměřená data z autokeratorefraktometru (zkráceně z autorefraktometru) a pro vypočítané hodnoty Javalovým pravidlem.

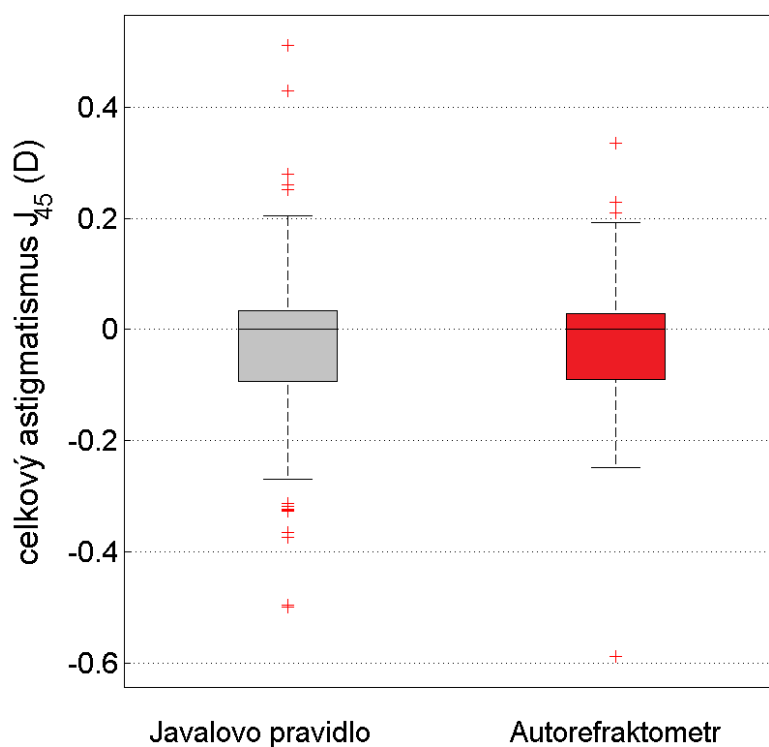
Tabulka 11: Základní charakteristika souboru pro složky J_0 a J_{45} celkového astigmatismu z Javalova pravidla a autorefraktometru

	celkový astigmatismus J_0		celkový astigmatismus J_{45}	
	Javalovo pravidlo	autorefraktometr	Javalovo pravidlo	autorefraktometr
počet pozorování	100	100	100	100
střední hodnota	0,22	0,068	0	0
rozptyl výběru	0,077	0,052	0,029	0,014
směrodatná odchylka	0,28	0,23	0,17	0,12

Na obrázcích 37 a 38 jsou zobrazeny výsledky měření na autorefraktometru a výpočtů celkového astigmatismu. Barevné sloupce ukazují interval mezi prvním a třetím kvantilem, prostřední linka znázorňuje střední hodnotu. Úsečky od minimálních až po maximální hodnoty zobrazují směrodatné odchylky.



Obrázek 37: Graf výsledků měření na autorefraktometru a výpočtů pomocí Javalova pravidla složky J_0 celkového astigmatismu



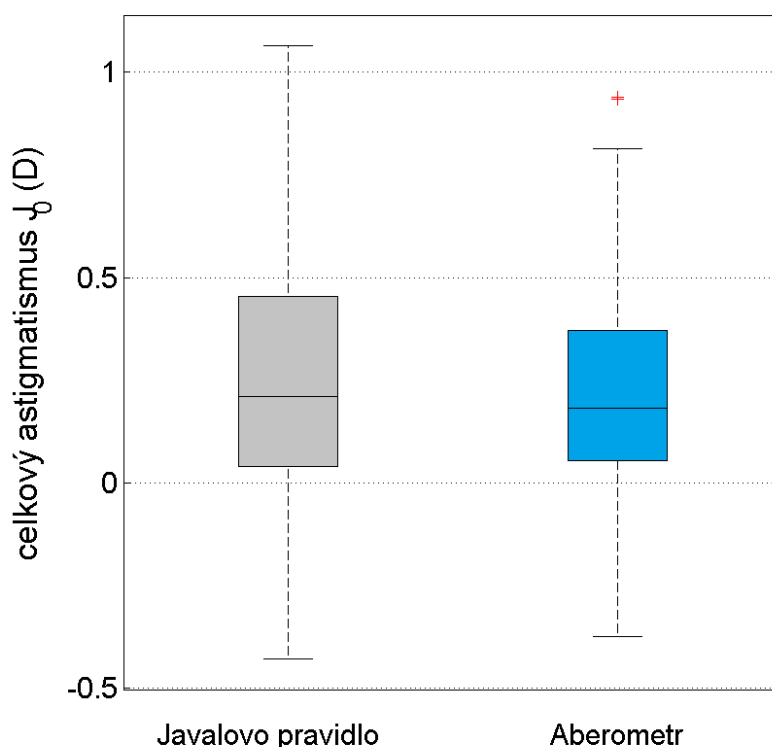
Obrázek 38: Výsledky měření na autorefraktometru a výpočtů pomocí Javalova pravidla složky J_{45} celkového astigmatismu

V tabulce 12 je uvedena základní charakteristika souboru pro složky J_0 a J_{45} celkového astigmatismu pro naměřená data z aberometru a pro vypočítané hodnoty Javalovým pravidlem.

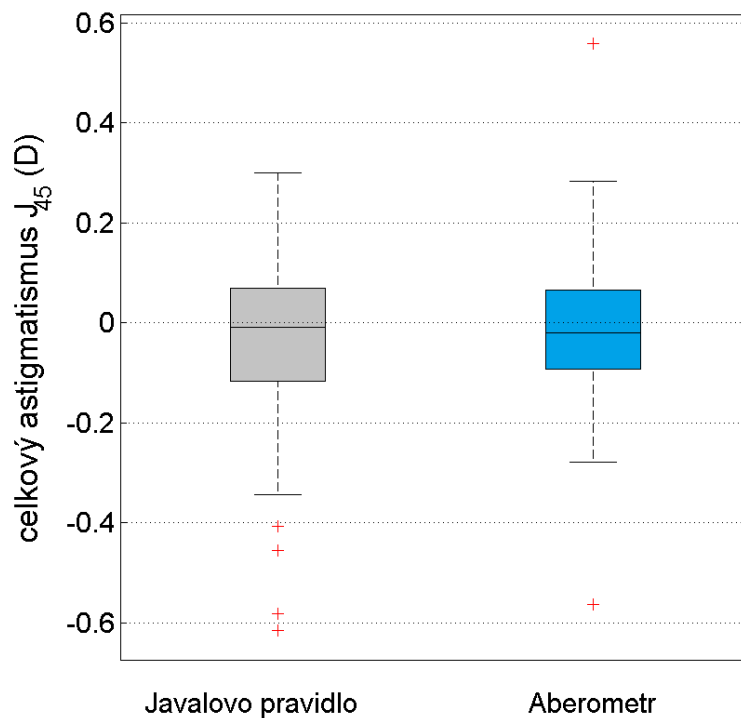
Tabulka 12: Základní charakteristika souboru pro složky J_0 a J_{45} celkového astigmatismu z Javalova pravidla a aberometru

	celkový astigmatismus J_0		celkový astigmatismus J_{45}	
	Javalovo pravidlo	aberometr	Javalovo pravidlo	aberometr
počet pozorování	100	100	100	100
střední hodnota	0,21	0,18	-0,01	-0,02
rozptyl výběru	0,087	0,062	0,029	0,019
směrodatná odchylka	0,29	0,25	0,17	0,14

Na obrázcích 39 a 40 jsou zobrazeny výsledky měření na aberometru a výpočtů celkového astigmatismu. Barevné sloupce ukazují interval mezi prvním a třetím kvantilem, prostřední linka znázorňuje střední hodnotu. Úsečky od minimálních až po maximální hodnoty zobrazují směrodatné odchylky.



Obrázek 39: Graf výsledků měření na aberometru a výpočtů pomocí Javalova pravidla složky J_0 celkového astigmatismu



Obrázek 40: Graf výsledků měření na aberometru a výpočtů pomocí Javalova pravidla složky J_{45} celkového astigmatismu

Byly stanoveny nulové a k nim alternativní hypotézy:

$H_{0,1}$: Rozdíl středních hodnot měření celkového astigmatismu měřeného na autokeratorefraktotonometru a hodnot vypočítaných pomocí Javalova pravidla je nulový.

$H_{A,1}$: Rozdíl středních hodnot měření celkového astigmatismu měřeného na autokeratorefraktotonometru a hodnot vypočítaných pomocí Javalova pravidla není nulový.

$H_{0,2}$: Rozdíl středních hodnot měření celkového astigmatismu měřeného na aberometru a hodnot vypočítaných pomocí Javalova pravidla je nulový.

$H_{A,2}$: Rozdíl středních hodnot měření celkového astigmatismu měřeného na aberometru a hodnot vypočítaných pomocí Javalova pravidla není nulový.

V tabulce 13 jsou uvedeny výsledky nulových hypotéz pro vektory lámavosti J_0 a J_{45} celkového astigmatismu. Rovněž jako v předchozích statistických analýzách, 0 ve stavu přijetí znamená přijetí nulové hypotézy a zamítnutí alternativní hypotézy, zatímco 1 znamená zamítnutí nulové hypotézy a přijetí alternativní hypotézy.

Tabulka 13: Výsledky nulových hypotéz složek J_0 a J_{45} celkového astigmatismu

hypotéza	celkový astigmatismus J_0		celkový astigmatismus J_{45}	
	stav přijetí	statistická významnost P	stav přijetí	statistická významnost P
$H_{0,1}$	1	1,23E-15	0	0,66
$H_{0,2}$	0	0,06	0	0,24

Hodnoty celkového astigmatismu naměřené autokeratorefraktotometrem a vypočítané pomocí Javalova pravidla spolu korelují v případě složky J_0 s korelačním koeficientem 0,79 a v případě složky J_{45} s korelačním koeficientem 0,81. Zatímco hodnoty celkového astigmatismu naměřené aberometrem a vypočítané pomocí Javalova pravidla spolu korelují v případě složky J_0 s korelačním koeficientem 0,76 a v případě složky J_{45} s korelačním koeficientem 0,66.

6.2.6 Diskuse

Byla provedena korelace hodnot celkového a rohovkového astigmatismu. Z výše uvedených výsledků vyplývá, že celkový astigmatismus je přímo úměrný rohovkovému astigmatismu. Pro oba vektory lámavosti J_0 a J_{45} celkového a rohovkového astigmatismu měřené jak na autokeratorefraktotometru tak na aberometru vychází kladný korelační koeficient, tzn. platí přímá úměrnost. Přičemž pro složku J_0 celkového astigmatismu platí silnější závislost na rohovkovém astigmatismu než pro složku J_{45} celkového astigmatismu.

Dále byly porovnány hodnoty celkového astigmatismu vypočítané pomocí Javalova pravidla s hodnotami naměřenými autokeratorefraktotometrem a aberometrem. Pro vektor lámavosti J_0 celkového astigmatismu byl v případě autokeratorefraktotometru zjištěn statisticky významný rozdíl, ale pro vektor lámavosti J_{45} nikoliv. Tato nepřesnost mohla být způsobena asféricitou rohovky již zmíněnou v první diskuzi. Nicméně výsledky naměřené autokeratorefraktotometrem a vypočítané z Javalova pravidla v případě vektoru lámavosti J_0 spolu korelují na 79 %. V případě aberometru vycházely rozdíly pro oba dva vektory lámavosti J_0 a J_{45} statisticky nevýznamné.

Závěr

Teoretická část bakalářské práce se věnovala popisu rohovky, rohovkových parametrů, a především popisu tvaru rohovky, který lze matematicky zapsat jako obecnou asférickou plochu charakterizovanou excentricitou. Rohovka svou nepravidelností způsobuje rohovkový astigmatismus, který nejvíce ovlivňuje celkový astigmatismus oka. Hlavním cílem teoretické části bakalářské práce bylo seznámit se s možnými metodami zjišťování parametrů rohovky a jejich principy. Důraz byl kladen na keratometrii, rohovkovou topografii a Scheimpflugovo zobrazování rohovky, neboť přístroje využívající těchto metod byly používány v praktické části bakalářské práce.

Součástí praktické části bakalářské práce byla experimentální měření a jejich statistické zpracování a vyhodnocení. Byla popsána metodika měření, postupy měření na jednotlivých přístrojích a statistické metody použité pro vyhodnocení měření.

Cílem první části experimentálního výzkumu bylo porovnání čtyř metod měření rohovkového astigmatismu a vrcholového zakřivení přední plochy rohovky. Ze statistické analýzy vyplývá statisticky významný rozdíl pro vektor lámavosti J_0 rohovkového astigmatismu mezi měřeními na Pentacamu a ostatních přístrojích, přesto že spolu korelují na 80 – 90 %. Zatímco pro vektor lámavosti J_{45} rohovkového astigmatismu byl zjištěn pro daný soubor jedinců statisticky významný rozdíl mezi měřeními na Javalově keratometru a ostatních přístrojích, jejichž korelace se pohybovala v rozmezí 61 – 86 %. Nejlepší korelace dosahovaly hodnoty vrcholového zakřivení přední plochy rohovky 98 - 100 %. Nicméně všechny dvojice přístrojů kromě porovnání autokeratorefraktometru a aberometru se statisticky významně lišily. Statisticky významné rozdíly byly nalezeny i v porovnávání složek J_0 celkového astigmatismu měřeného autokeratorefraktometrem a aberometrem s korelačním koeficientem 0,86 a v porovnávání měření složek J_0 rohovkového astigmatismu při započítání zadní plochy rohovky a při zanedbání zadní plochy rohovky s korelačním koeficientem 0,87. V obou případech pro složky J_{45} celkového i rohovkového astigmatismu nebyly zjištěny statisticky významné rozdíly.

V druhé části experimentálního výzkumu byla na daném souboru jedinců provedena korelace hodnot celkového a rohovkového astigmatismu, na základě které bylo potvrzeno, že oba vektory lámavosti J_0 a J_{45} celkového astigmatismu jsou přímo úměrné složkám J_0 a J_{45} rohovkového astigmatismu. Přičemž pro složku J_0 celkového astigmatismu platí silnější závislost na rohovkovém astigmatismu než pro složku J_{45} celkového astigmatismu. Na závěr

praktického výzkumu byly porovnány hodnoty celkového astigmatismu vypočítané pomocí Javalova pravidla s hodnotami naměřenými autokeratorefraktotometrem a aberometrem. Statisticky významně se lišily pouze výsledky složky J_0 celkového astigmatismu, a to v případě autokeratorefraktotometru, ve zbylých případech nebyly nalezeny statisticky významné rozdíly.

Seznam použité literatury

- [1] BENJAMIN, William J a Irvin M BORISH. *Borish's clinical refraction*. 2nd ed. St. Louis Mo.: Butterworth Heinemann/Elsevier, 2006.
- [2] KASCHKE, Michael, Karl-Heinz DONNERHACKE a Michael Stefan RILL. *Optical devices in ophthalmology and optometry: technology, design principles, and clinical applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2014.
- [3] SINJAB., Mazen M. *Corneal topography in clinical practice (Pentacam system): basics and clinical interpretation*. 2nd ed. New Delhi: Jaypee Bros. Medical Pub, 2012.
- [4] ČIHÁK, Radomír, Rastislav DRUGA (ed.) a Miloš GRIM (ed.). *Anatomie. 2., upr. a dopl. vyd.* Praha: Grada, 2004.
- [5] CENDELÍN, Jiří, Blanka BRŮNOVÁ, , Pavel GIACINTOV a Richard BAŠTECKÝ. *Nadstavbový kurz školení kontaktologů. Česká kontaktologická společnost*. Praha, 2004.
- [6] RABBETTS, Ronald B. Bennett & Rabbetts' clinical visual optics. 4th ed. New York: Elsevier/Butterworth Heinemann, 2007.
- [7] TUNNACLIFFE, Alan H. *Introduction to visual optics*. 4th ed. Godmersham Park: Association of British Dispensing Opticians, 1993.
- [8] AGARWAL, Amar, Athiya AGARWAL a Soosan JACOB. *Dr. Agarwal's textbook on corneal topography: including Pentacam and Anterior Segment OCT*. 2nd ed. New Delhi: Jaypee Brothers, 2010.
- [9] SCHANZLIN, David J. (ed.) a Jeffrey B. ROBIN (ed.). *Corneal topography: measuring and modifying the cornea*. S.l.: Springer, 2012.
- [10] GEORGE SMITH; DAVID ATCHISON. *Optics of the human eye*. Oxford [u.a.]: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [11] SCHWIEGERLING, Jim. *Field guide to visual and ophthalmic optics*. Bellingham, Wash: SPIE Press, 2004.

- [12] BENEŠ, Pavel. Keratometrie - princip, měření, rozvržení a excentricita keratometrických hodnot v populaci. Brno, 2012. Disertační práce. Masarykova univerzita v Brně. Vedoucí práce Doc. MUDr. Svatopluk Synek, CSc.
- [13] DOSTÁLOVÁ, Lenka. Topografie rohovky. Olomouc, 2009. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí práce Mgr. František Pluháček Ph.D.
- [14] MIKŠ, Antonín. *Aplikovaná optika*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009.
- [15] BENEŠ, Pavel. *Přístroje pro optometrii a oftalmologii*. Vydání první. Brno: Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2015.
- [16] RUTRLE, Miloš. *Přístrojová optika: učební texty pro oční optiky a oční techniky, optometry a oftalmology*. Vyd. 1. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2000.
- [17] *Keratometer 300: Gebrauchsanweisung*. Rodenstock. Düsseldorf.
- [18] ŠEBESTOVÁ, Michaela. *Vývoj metod pro stanovení objektivní refrakce*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Masarykova univerzita v Brně. Vedoucí práce MUDr. Terézie Cesneková.
- [19] KAHOUNOVÁ, Tereza. Srovnání vybraných objektivních metod měření refrakčních vad. Kladno, 2015. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Novák, Ph.D.
- [20] MAEDA, N. Clinical applications of wavefront aberrometry- a review. *Clinical & experimental ophthalmology*, 2009.
- [21] DAI, Guang-ming. Wavefront optics for vision correction: technology, design principles and clinical applications. Bellingham: SPIE Press, 2008. [17] *Keratometer 300: Gebrauchsanweisung*. Rodenstock. Düsseldorf.
- [22] *I. Profiler návod k použití v 1.1*. Zeiss. 2007.
- [23] *Pentacam HR Návod k použití: Měřicí a vyhodnocovací systém pro přední segment oka*. Oculus. 2003.
- [24] *Návod k použití Auto Kerato-Refrakto-Tonometr TRK-1P*. Topcon. Tokyo, 2008.

- [25] *Webové stránky Pentacam: Calculation of corneal power* [online]. Dostupné z:
http://www.pentacam.com/sites/calc_corneal_power.php#ptop
- [26] *Webové stránky ZEISS* [online]. Dostupné z:
http://www.zeiss.com/corporate/en_de/global/home.html
- [27] *Webové stránky Topcon* [online]. Dostupné z: <http://global.topcon.com/>
- [28] GIBILISCO, Stan. *Statistika bez předchozích znalostí*. Brno: Computer Press, 2009.
- [29] ZVÁROVÁ, Jana. *Biomedicínská statistika I.: Základy statistiky pro biomedicínské obory*. Praha: Karolinum, 2007.

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Parametry asférické plochy Q určitých geometrických útvarů [10]	15
Obrázek 2: Astigmatismus podle pravidla [2]	17
Obrázek 3: Princip keratometru [2]	21
Obrázek 4: Vzory koincidence různých keratometrů [2]	22
Obrázek 5: Postup nalezení koincidence na Javalově keratometru [2]	23
Obrázek 6: Princip Javal- Schiötzova keratometru [2]	24
Obrázek 7: Suttclifův keratometr s testovou značkou [12]	25
Obrázek 8: Placidovy soustředné kruhy [8]	27
Obrázek 9: První komerční topograf [2]	28
Obrázek 10: Promítání Placidových kruhů na rohovku [2]	29
Obrázek 11: Princip rohovkového topografu s Placido kotoučem [2]	29
Obrázek 12: (a) topograf s volným Placidovým terčem, (b) topograf s těsným Placidovým terčem [2]	30
Obrázek 13: Systém Shack – Hartmannova aberometru [2]	31
Obrázek 14: (a) – Detekce vlnoplochy na CCD kameře u ideálního oka; (b) – Detekce vlnoplochy na CCD kameře u oka s aberacemi [2]	32
Obrázek 15: Schéma LRT aberometru [2]	33
Obrázek 16: Oculus pentacam [2]	35
Obrázek 17: Scheimpflugův princip a – statické uspořádání, b – laterálně rotující Scheimpflugova kamera [2]	36
Obrázek 18: Scheimpflugův princip schematicky [2]	36
Obrázek 19: (a) – Princip Orbscanu, (b) – Orbscan od firmy Bausch and Lomb [2]	38
Obrázek 20: Geometrické uspořádání rohovkové topografie [2]	39
Obrázek 21: (a) – elevační mapa povrchu rohovky s podezřením na keratokonus, (b) – geometrické znázornění povrchu měřené rohovky a sférické referenční ploše [2]	40
Obrázek 22: Axiální poloměr zakřivení [2]	41
Obrázek 23: Zobrazení měření [22]	44
Obrázek 24: Zaměřovací okénko Pentacamu [23]	45
Obrázek 25: Úprava opěrky brady autokeratorefraktometru [24]	46
Obrázek 26: Graf měření složky J_0 rohovkového astigmatismu	48
Obrázek 27: Graf měření složky J_{45} rohovkového astigmatismu	49
Obrázek 28: Graf měření vrcholového zakřivení přední plochy rohovky	51
Obrázek 29: Graf měření složky J_0 celkového astigmatismu	53
Obrázek 30: Měření složky J_{45} celkového astigmatismu	53
Obrázek 31: Graf měření vektoru lámavosti J_0 rohovkového astigmatismu pro přední plochu rohovky a při započtení zadní plochy rohovky (TNP)	55
Obrázek 32: Graf měření vektoru lámavosti J_{45} rohovkového astigmatismu pro přední plochu rohovky a při započtení zadní plochy rohovky (TNP)	56
Obrázek 33: Graf závislosti mezi složkami J_0 celkového a rohovkového astigmatismu na autokeratorefraktometru	60

Obrázek 34: Graf závislosti mezi složkami J_{45} celkového a rohovkového astigmatismu na autokeratorefraktometru	60
Obrázek 35: Graf závislosti mezi složkami J_0 celkového a rohovkového astigmatismu v případě aberometru	61
Obrázek 36: Graf závislosti mezi složkami J_{45} celkového a rohovkového astigmatismu v případě aberometru	61
Obrázek 37: Graf výsledků měření na autorefraktometru a výpočtů pomocí Javalova pravidla složky J_0 celkového astigmatismu	63
Obrázek 38: Výsledky měření na autorefraktometru a výpočtů pomocí Javalova pravidla složky J_{45} celkového astigmatismu	63
Obrázek 39: Graf výsledků měření na aberometru a výpočtů pomocí Javalova pravidla složky J_0 celkového astigmatismu	64
Obrázek 40: Graf výsledků měření na aberometru a výpočtů pomocí Javalova pravidla složky J_{45} celkového astigmatismu	65

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1: Základní charakteristika souboru pro rohovkový astigmatismus J_0	47
Tabulka 2: Základní charakteristika souboru pro rohovkový astigmatismus J_{45}	47
Tabulka 3: Výsledky nulových hypotéz pro složky J_0 a J_{45} rohovkového astigmatismu.....	50
Tabulka 4: Korelační koeficienty mezi metodami	50
Tabulka 5: Základní charakteristika souboru pro vrcholové zakřivení přední plochy rohovky	51
Tabulka 6: Výsledky nulových hypotéz pro vrcholové zakřivení přední plochy rohovky	52
Tabulka 7: Základní charakteristiky souboru pro složky J_0 a J_{45} celkového astigmatismu oka	52
Tabulka 8: Výsledky nulové hypotézy složek J_0 a J_{45} celkového astigmatismu.....	54
Tabulka 9: Základní charakteristika souboru pro složky rohovkového astigmatismu J_0 a J_{45}	55
Tabulka 10: Výsledky nulové hypotézy složek J_0 a J_{45} rohovkového astigmatismu měřeného z přední plochy rohovky a měřeného z přední i zadní plochy rohovky	56
Tabulka 11: Základní charakteristika souboru pro složky J_0 a J_{45} celkového astigmatismu z Javalova pravidla a autorefraktometru	62
Tabulka 12: Základní charakteristika souboru pro složky J_0 a J_{45} celkového astigmatismu z Javalova pravidla a aberometru	64
Tabulka 13: Výsledky nulových hypotéz složek J_0 a J_{45} celkového astigmatismu.....	66

Příloha: Naměřená data praktické části bakalářské práce

Vysvětlivky k přiloženým tabulkám:

V první tabulce jsou uvedené naměřené hodnoty z autokeratorefraktometru TRK-1P od firmy Topcon, v druhé tabulce jsou naměřené hodnoty z Javalova keratometru, třetí tabulka obsahuje naměřené hodnoty z aberometru i-Profilér od firmy Zeiss a ve čtvrté tabulce jsou zobrazeny naměřená data z Pentacamu firmy Oculus. Hodnoty rohovkového i celkového astigmatismu oka a v případě Pentacamu také hodnoty astigmatismu zadní plochy rohovky a hodnoty rohovkového astigmatismu počítané přes hodnotu True Net Power (TNP) jsou uvedeny v dioptriích. Stejně tak osy všech astigmatismů (rohovkových i celkových) jsou uvedeny ve stupních. Vrcholové zakřivení přední plochy rohovky v případě Pentacamu také vrcholové zakřivení zadní plochy rohovky je uváděno v jednotce mm.

Tabulka p.1: Naměřená data z autokeratorefraktometru

	oko	rohovkový astigmatismus	osa r. astigmatismu	vrcholové zakřivení přední plochy rohovky	celkový astigmatismus oka	osa cel. astigmatismu oka
1	P	-1,00	179	7,68	0,00	
	L	-1,00	179	7,68	0,00	
2	P	-1,50	170	8,04	-0,50	157
	L	-1,50	5	8,05	-0,50	166
3	P	-1,00	1	7,11	-1,00	21
	L	-0,75	154	7,12	-1,00	101
4	P	-0,75	165	7,88	0,00	
	L	-0,75	1	7,87	0,00	
5	P	-0,50	160	7,84	0,00	
	L	-0,50	11	7,92	0,00	
6	P	-1,50	180	8,30	-0,50	179
	L	-2,00	179	8,23	-1,25	
7	P	-1,00	179	7,67	0,00	
	L	-1,00	1	7,62	0,00	
8	P	-1,00	177	7,67	-0,50	6
	L	-1,25	9	7,61	-0,50	5
9	P	-1,00	1	7,55	-0,50	22
	L	-1,00	175	7,53	-0,50	151
10	P	-0,50	160	7,71	-0,50	76
	L	-0,75	13	7,61	-0,50	33
11	P	-1,25	161	7,87	-1,25	125
	L	-0,75	19	8,01	-0,75	73
12	P	-1,75	4	7,57	-1,25	9
	L	-1,25	171	7,53	-0,25	162
13	P	-1,25	3	7,83	-0,25	27
	L	-1,00	175	7,83	-0,25	157
14	P	-0,50	3	7,98	-0,25	33
	L	-0,50	178	7,89	0,00	
15	P	-1,00	7	7,46	-0,50	24
	L	-0,75	168	7,49	-0,25	157

	oko	rohovkový astigmatismus	osa r. astigmatismu	vrcholové zakřivení přední plochy rohovky	celkový astigmatismus oka	osa cel. astigmatismu oka
16	P	-0,25	172	7,70	-0,25	83
	L	-0,50	169	7,76	-0,50	98
17	P	-1,00	168	7,47	-0,50	168
	L	-0,25	175	7,48	-0,50	159
18	P	-1,25	2	7,40	-0,25	7
	L	-1,50	1	7,34	-0,50	164
19	P	-0,75	180	7,87	-0,50	96
	L	-0,50	171	7,85	0,00	
20	P	-1,25	172	7,77	-1,00	179
	L	-1,25	2	7,74	-1,00	1
21	P	-0,50	6	8,09	-0,25	109
	L	-0,75	13	8,02	-0,25	31
22	P	-1,00	178	8,03	0,00	
	L	-1,00	9	8,02	0,00	
23	P	-1,00	5	8,08	0,00	
	L	-0,75	170	8,15	0,00	
24	P	-1,00	2	7,66	-0,50	162
	L	-1,00	173	7,67	-0,25	172
25	P	-0,25	96	7,76	-0,50	89
	L	-0,25	116	7,84	-0,50	102
26	P	-0,75	165	7,93	-0,50	155
	L	-1,00	8	7,90	-0,25	150
27	P	-0,75	166	7,83	0,00	
	L	-0,75	8	7,82	-0,25	26
28	P	-1,25	168	7,16	-0,75	167
	L	-1,00	16	7,07	-0,50	6
29	P	-1,50	10	7,67	-0,75	7
	L	-1,00	168	7,68	-0,50	138
30	P	-1,00	176	7,57	-0,75	176
	L	-1,00	175	7,59	-0,50	160

	oko	rohovkový astigmatismus	osa r. astigmatismu	vrcholové zakřivení přední plochy rohovky	celkový astigmatismus oka	osa cel. astigmatismu oka
31	P	-1,25	175	7,99	-0,25	177
	L	-1,25	8	7,88	-0,50	3
32	P	-1,75	176	7,20	-0,25	7
	L	-1,75	5	7,19	-0,50	172
33	P	-0,75	171	7,41	-0,75	94
	L	-0,75	177	7,37	-0,75	90
34	P	-1,25	177	7,77	-1,00	170
	L	-0,75	162	7,88	-0,50	170
35	P	-1,50	176	7,90	-1,00	173
	L	-0,75	172	7,97	-0,50	176
36	P	-0,50	8	7,53	-0,50	75
	L	-1,00	6	7,50	-0,25	75
37	P	-1,00	171	7,47	-0,50	166
	L	-1,00	180	7,47	-0,25	179
38	P	-0,50	169	7,65	-0,50	100
	L	-1,25	9	8,09	-0,25	37
39	P	-0,50	166	7,50	0,00	
	L	-0,75	6	7,43	0,00	
40	P	-0,50	21	7,55	-0,25	150
	L	-0,50	178	7,52	-0,25	37
41	P	-2,00	176	7,95	-1,25	176
	L	-1,75	174	7,99	-1,50	171
42	P	-0,75	179	7,66	-0,25	160
	L	-0,75	5	7,78	0,00	
43	P	-1,25	176	7,71	0,00	
	L	-0,50	12	7,77	0,00	
44	P	-0,25	160	7,93	-0,50	86
	L	-0,50	14	7,87	0,00	
45	P	-0,50	24	7,99	-0,50	90
	L	-0,50	164	8,03	-0,50	105

	oko	rohovkový astigmatismus	osa r. astigmatismu	vrcholové zakřivení přední plochy rohovky	celkový astigmatismus oka	osa cel. astigmatismu oka
46	P	-1,50	175	7,78	-1,25	174
	L	-1,25	173	7,68	-0,50	161
47	P	-0,50	23	8,12	0,00	
	L	-0,25	147	8,12	-0,50	165
48	P	-0,25	174	7,97	0,00	
	L	-0,50	177	7,95	-0,25	23
49	P	-0,50	5	8,18	0,00	
	L	-0,75	167	8,17	0,00	
50	P	-0,75	175	7,99	-0,50	176
	L	-1,00	179	7,95	-0,25	8

Tabulka p. 2: Naměřená data z Javalova keratometru

	oko	rohovkový astigmatismus	osa r. astigmatismu	vrcholové zakřivení přední plochy rohovky
1	P	-1,27	180	7,88
	L	-1,05	5	7,77
2	P	-1,50	175	8,05
	L	-1,50	3	8,02
3	P	-0,90	10	7,17
	L	-1,10	160	7,15
4	P	-1,00	170	8,05
	L	-0,60	1	7,99
5	P	-0,45	170	7,97
	L	-0,51	10	7,99
6	P	-1,25	180	8,40
	L	-2,10	179	8,32
7	P	-0,80	2	7,82
	L	-1,00	5	7,73
8	P	-1,00	180	7,71
	L	-1,15	13	7,70
9	P	-0,94	2	7,63
	L	-1,30	180	7,65
10	P	0,00		7,84
	L	-0,40	21	7,76
11	P	-1,05	164	8,05
	L	-0,70	21	8,10
12	P	-1,79	8	7,66
	L	-1,40	175	7,47
13	P	-1,30	5	7,92
	L	-1,40	180	7,89
14	P	-0,55	1	8,09
	L	-0,49	180	8,06
15	P	-0,95	16	7,54
	L	-0,85	165	7,56

	oko	rohovkový astigmatismus	osa r. astigmatismu	vrcholové zakřivení přední plochy rohovky
16	P	-0,75	172	7,81
	L	-0,50	178	7,85
17	P	-1,26	172	7,58
	L	-0,80	176	7,63
18	P	-1,73	5	7,55
	L	-1,10	180	7,50
19	P	-0,50	10	7,95
	L	-0,52	177	7,98
20	P	-1,35	174	7,96
	L	-1,30	8	7,93
21	P	-0,25	10	8,16
	L	-1,10	19	8,19
22	P	-0,77	10	8,13
	L	-1,05	12	8,11
23	P	-0,70	9	8,17
	L	-0,63	177	8,24
24	P	-0,80	3	7,75
	L	-0,65	180	7,76
25	P	0,00		7,82
	L	0,00		7,90
26	P	-1,10	177	8,10
	L	-0,70	15	8,05
27	P	-0,65	171	7,93
	L	-0,85	17	7,91
28	P	-1,15	175	7,22
	L	-0,94	14	7,16
29	P	-1,24	16	7,73
	L	-0,95	176	7,72
30	P	-1,00	180	7,60
	L	-0,86	179	7,65
31	P	-1,15	175	8,03
	L	-1,05	5	7,95

	oko	rohovkový astigmatismus	osa r. astigmatismu	vrcholové zakřivení přední plochy rohovky
32	P	-1,50	0	7,22
	L	-1,65	8	7,22
33	P	-0,95	170	7,39
	L	-0,65	1	7,45
34	P	-0,90	180	7,87
	L	-0,60	168	7,96
35	P	-1,05	179	7,97
	L	-0,85	180	8,00
36	P	-0,45	5	7,61
	L	-0,75	10	7,68
37	P	-1,15	175	7,52
	L	-0,91	3	7,52
38	P	-0,65	177	7,69
	L	-1,30	7	8,09
39	P	-0,70	170	7,50
	L	-1,00	8	7,45
40	P	-0,55	20	7,62
	L	-0,45	178	7,64
41	P	-1,90	180	7,89
	L	-1,90	179	7,93
42	P	-0,75	15	7,78
	L	-0,75	12	7,84
43	P	-0,60	175	7,82
	L	-0,50	11	7,89
44	P	-0,20	176	8,06
	L	-0,31	16	8,03
45	P	-0,40	26	8,15
	L	-0,46	180	8,15
46	P	-1,75	4	7,79
	L	-1,25	180	7,84
47	P	-0,25	17	8,26
	L	-0,15	150	8,27

	oko	rohovkový astigmatismus	osa r. astigmatismu	vrcholové zakřivení přední plochy rohovky
48	P	-0,65	2	8,08
	L	-0,65	180	8,09
49	P	-0,55	7	8,33
	L	-0,80	174	8,31
50	P	-0,74	4	8,16
	L	-0,75	2	8,12

Tabulka p. 3: Naměřená data z aberometru

	oko	rohovkový astigmatismus	osa r. astigmatismu	vrcholové zakřivení přední plochy rohovky	celkový astigmatismus oka	osa cel. astigmatismu oka
1	P	-0,75	179	7,71	-0,25	113
	L	-1,25	179	7,65	-0,38	155
2	P	-1,63	172	8,03	-0,63	171
	L	-1,50	7	8,05	-0,63	6
3	P	-0,50	180	7,12	-1,38	27
	L	-0,75	150	7,13	-0,50	128
4	P	-0,88	169	7,86	-0,38	43
	L	-0,75	8	7,85	-0,25	157
5	P	-0,63	163	7,79	-0,25	18
	L	-0,50	15	7,90	-0,38	11
6	P	-1,63	6	8,28	-0,63	9
	L	-2,13	179	8,22	-1,63	175
7	P	-0,88	179	7,70	-0,88	2
	L	-1,00	1	7,54	-0,75	176
8	P	-1,13	176	7,69	-0,75	178
	L	-1,00	18	7,57	-0,88	7
9	P	-1,38	20	7,53	-0,13	144
	L	-2,00	173	7,45	-0,38	161
10	P	0,00		7,75	-0,38	66
	L	-0,50	25	7,71	-0,50	38
11	P	-1,13	162	7,86	-1,13	133
	L	-0,63	24	7,96	-0,38	69
12	P	-1,88	6	7,59	-1,38	2
	L	-1,50	172	7,47	-0,38	176
13	P	-1,13	4	7,81	-0,50	12
	L	-1,13	180	7,83	-0,38	2
14	P	-0,50	10	8,02	-0,25	23
	L	-0,50	180	7,91	-0,38	157
15	P	-0,88	11	7,48	-0,63	32
	L	-0,88	169	7,51	-0,50	162

	oko	rohovkový astigmatismus	osa r. astigmatismu	vrcholové zakřivení přední plochy rohovky	celkový astigmatismus oka	osa cel. astigmatismu oka
16	P	-1,13	6	7,66	-0,38	80
	L	-0,50	172	7,75	-0,38	141
17	P	-0,88	176	7,47	-0,88	168
	L	-0,88	177	7,50	-1,00	172
18	P	-1,50	10	7,42	-0,25	165
	L	-1,50	177	7,37	-0,38	167
19	P	-0,88	1	7,82	-0,13	83
	L	-0,38	166	7,88	-0,13	179
20	P	-1,50	170	7,82	-1,00	3
	L	-1,38	4	7,80	-1,50	4
21	P	-0,38	173	8,07	-0,38	150
	L	-1,00	20	8,01	-0,50	25
22	P	-0,88	180	8,00	-0,38	32
	L	-0,63	14	8,07	-0,25	150
23	P	-1,00	174	8,10	-0,13	19
	L	-0,75	179	8,15	-0,25	123
24	P	-1,25	180	7,61	-0,63	174
	L	-1,13	173	7,64	-0,63	178
25	P	0,00		7,72	-0,50	113
	L	0,00		7,81	-0,13	25
26	P	-1,13	170	7,90	-0,63	162
	L	-0,88	11	7,89	-0,50	177
27	P	-0,75	167	7,85	-0,13	171
	L	-0,75	13	7,84	-0,63	13
28	P	-1,13	162	7,24	-1,00	171
	L	-0,63	28	7,09	-0,75	4
29	P	-1,38	7	7,68	-1,00	14
	L	-0,88	160	7,65	-0,63	165
30	P	-0,88	180	7,55	-1,25	179
	L	-0,75	174	7,58	-1,13	174

	oko	rohovkový astigmatismus	osa r. astigmatismu	vrcholové zakřivení přední plochy rohovky	celkový astigmatismus oka	osa cel. astigmatismu oka
31	P	-1,13	176	7,99	-0,75	5
	L	-1,13	1	7,88	-0,88	179
32	P	-1,50	177	7,21	-0,63	12
	L	-1,38	4	7,26	-0,63	174
33	P	-0,50	169	7,35	-0,75	92
	L	-0,88	174	7,35	-0,50	82
34	P	-1,13	177	7,80	-0,63	0
	L	-0,75	159	7,87	-0,50	175
35	P	-1,13	174	7,90	-1,00	176
	L	-1,13	172	7,91	-0,75	0
36	P	-0,50	10	7,56	-0,38	54
	L	-0,63	10	7,70	-0,25	158
37	P	-1,38	163	7,48	-1,13	173
	L	-1,25	3	7,46	-1,13	175
38	P	-0,38	165	7,67	-0,13	56
	L	-1,13	8	8,02	-0,63	15
39	P	-0,63	169	7,48	-0,50	6
	L	-0,75	4	7,47	-0,25	176
40	P	-0,63	7	7,56	-0,13	21
	L	0,00		7,57	-0,13	154
41	P	-1,63	180	7,95	-1,88	177
	L	-1,75	180	7,95	-1,63	1
42	P	-0,50	1	7,63	-0,25	175
	L	-0,25	180	7,82	-0,13	93
43	P	-0,88	163	7,79	-0,63	163
	L	-0,50	13	7,82	-0,50	0
44	P	-0,38	173	7,95	-0,13	146
	L	-0,38	15	7,87	-0,25	21
45	P	-0,38	21	8,01	-0,25	103
	L	-0,75	174	8,00	-0,25	84

	oko	rohovkový astigmatismus	osa r. astigmatismu	vrcholové zakřivení přední plochy rohovky	celkový astigmatismus oka	osa cel. astigmatismu oka
46	P	-1,88	176	7,64	-1,88	179
	L	-1,00	176	7,67	-0,63	149
47	P	-0,38	17	8,13	-0,63	172
	L	-0,50	152	8,13	-0,38	168
48	P	-0,50	173	7,82	-0,25	41
	L	-0,50	8	7,92	-0,88	179
49	P	-0,63	3	8,19	-0,50	35
	L	-0,75	167	8,15	-0,38	144
50	P	-0,88	177	8,02	-0,38	177
	L	-0,75	176	8,01	-0,38	178

Tabulka p. 4: Naměřená data z Pentacamu

	oko	astigmat přední plochy rohovky	osa astigmat přední plochy r.	vrchol. zakřivení přední plochy rohovky	astigmat zadní plochy rohovky	osa astigmat zadní plochy r.	vrchol. zakřivení zadní plochy rohovky	TNP - r.astig.	TNP - osa r. astigmat
1	P	-0,90	5	7,74	-0,30	180	6,43	-0,70	6
	L	-1,20	168	7,71	-0,10	173	6,43	-1,20	171
2	P	-1,40	175	8,06	-0,60	176	6,39	-0,90	174
	L	-1,30	5	8,07	-0,60	7	6,34	-0,90	4
3	P	-0,80	11	7,18	-0,20	8	5,81	-0,60	9
	L	-0,70	149	7,18	-0,20	159	5,75	-0,60	145
4	P	-0,90	175	7,91	-0,30	176	6,40	-0,60	172
	L	-0,40	168	7,89	-0,20	165	6,39	-0,30	168
5	P	-0,40	155	7,87	-0,20	9	6,48	-0,40	145
	L	-0,60	8	7,94	-0,30	4	6,48	-0,40	14
6	P	-1,40	2	8,30	-0,40	180	6,88	-1,10	3
	L	-2,00	170	8,25	-0,40	172	6,83	-1,80	170
7	P	-1,00	178	7,73	-0,40	175	6,30	-0,70	0
	L	-1,10	175	7,69	-0,40	175	6,21	-0,80	175
8	P	-1,20	11	7,69	-0,40	12	6,18	-0,90	9
	L	-1,20	177	7,65	-0,30	174	6,12	-1,10	179
9	P	-0,80	10	7,56	-0,40	7	6,11	-0,50	11
	L	-0,70	178	7,57	-0,30	9	6,13	-0,60	173
10	P	-0,30	145	7,75	-0,10	7	6,34	-0,50	135
	L	-0,70	19	7,69	-0,10	164	6,29	-0,70	24
11	P	-0,90	168	7,91	-0,20	4	6,42	-0,70	162
	L	-0,50	13	8,03	-0,20	7	6,49	-0,30	21
12	P	-1,70	4	7,70	-0,50	11	6,17	-1,40	2
	L	-1,30	168	7,55	-0,50	166	6,13	-1,00	169
13	P	-1,30	174	7,84	-0,20	171	6,39	-1,20	178
	L	-1,40	178	7,83	-0,30	7	6,35	-1,20	175
14	P	-0,50	2	7,99	-0,10	7	6,70	-0,40	3
	L	-0,40	166	7,94	-0,20	2	6,61	-0,30	164

	oko	astigmat přední plochy rohovky	osa astigmat přední plochy r.	vrchol. zakřivení přední plochy rohovky	astigmat zadní plochy rohovky	osa astigmat zadní plochy r.	vrchol. zakřivení zadní plochy rohovky	TNP - r.astig.	TNP - osa r. astigmat
15	P	-1,10	14	7,51	-0,30	11	6,22	-0,90	14
	L	-0,90	152	7,52	-0,20	0	6,25	-1,00	153
16	P	-0,40	2	7,72	-0,20	2	6,37	-0,30	4
	L	-0,20	165	7,83	-0,20	174	6,40	-0,10	168
17	P	-1,20	173	7,49	-0,40	2	5,97	-0,80	168
	L	-0,80	180	7,51	-0,30	9	6,03	-0,50	177
18	P	-0,90	1	7,45	-0,40	11	6,07	-0,60	179
	L	-1,20	180	7,40	-0,40	179	6,01	-0,90	1
19	P	-0,70	1	7,90	-0,50	8	6,41	-0,30	175
	L	-0,60	162	7,89	-0,30	167	6,38	-0,30	161
20	P	-1,20	174	7,78	-0,40	175	6,37	-0,90	174
	L	-1,40	2	7,79	-0,30	4	6,38	-1,30	1
21	P	-0,50	4	8,08	-0,20	9	6,58	-0,40	178
	L	-0,90	5	8,02	-0,40	1	6,53	-0,50	8
22	P	-1,00	179	8,07	-0,30	5	6,65	-0,90	176
	L	-0,80	7	8,06	-0,30	174	6,65	-0,70	15
23	P	-0,80	19	8,09	-0,30	9	6,56	-0,70	20
	L	-0,50	163	8,16	-0,20	171	6,63	-0,40	155
24	P	-0,90	8	7,70	-0,30	6	6,35	-0,70	9
	L	-0,50	179	7,73	-0,20	8	6,47	-0,50	177
25	P	-0,30	82	7,78	-0,10	177	6,25	-0,50	83
	L	-0,20	82	7,85	-0,20	173	6,27	-0,40	85
26	P	-1,00	171	7,94	-0,50	5	6,31	-0,60	160
	L	-0,70	7	7,94	-0,40	173	6,32	-0,50	18
27	P	-0,80	173	7,86	-0,30	3	6,26	-0,60	167
	L	-0,80	6	7,91	-0,40	179	6,39	-0,60	9
28	P	-1,10	176	7,23	-0,40	175	5,84	-0,80	178
	L	-0,60	14	7,10	-0,10	172	5,81	-0,60	16
29	P	-1,30	12	7,71	-0,30	11	6,21	-1,10	13
	L	-1,10	173	7,71	-0,30	174	6,23	-1,00	172

	oko	astigmat přední plochy rohovky	osa astigmat přední plochy r.	vrchol. zakřivení přední plochy rohovky	astigmat zadní plochy rohovky	osa astigmat zadní plochy r.	vrchol. zakřivení zadní plochy rohovky	TNP - r.astig.	TNP - osa r. astigmat
30	P	-1,10	7	7,60	-0,40	6	6,19	-0,90	7
	L	-0,70	171	7,64	-0,20	169	6,18	-0,60	173
31	P	-1,40	9	8,01	-0,30	11	6,71	-1,30	8
	L	-1,20	5	7,96	-0,20	175	6,66	-1,10	7
32	P	-1,40	180	7,26	-0,60	177	5,73	-1,00	3
	L	-1,80	5	7,25	-0,60	1	5,70	-1,50	5
33	P	-0,80	177	7,43	-0,50	180	6,14	-0,50	173
	L	-0,90	174	7,39	-0,40	176	6,12	-0,70	172
34	P	-1,00	2	7,81	-0,20	1	6,27	-1,00	3
	L	-0,70	164	7,91	-0,10	166	6,32	-0,70	163
35	P	-1,10	177	7,92	-0,40	1	6,37	-0,80	175
	L	-0,80	176	8,01	-0,30	166	6,41	-0,70	180
36	P	-0,40	15	7,54	-0,20	2	6,16	-0,30	25
	L	-0,50	1	7,52	-0,10	180	6,18	-0,40	6
37	P	-1,20	0	7,51	-0,50	4	5,88	-0,80	177
	L	-1,30	178	7,49	-0,50	169	5,91	-1,00	2
38	P	-0,50	6	7,67	-0,20	3	6,31	-0,40	6
	L	-1,10	4	8,10	-0,60	180	6,70	-0,60	11
39	P	-0,60	178	7,55	-0,20	4	6,17	-0,40	178
	L	-0,70	0	7,47	-0,20	177	6,10	-0,60	3
40	P	-0,50	27	7,57	-0,40	22	6,00	-0,20	22
	L	-0,30	176	7,57	-0,10	166	5,99	-0,20	8
41	P	-1,60	174	7,97	-0,50	2	6,52	-1,20	173
	L	-1,80	177	7,98	-0,40	178	6,49	-1,60	177
42	P	-0,50	26	7,71	-0,20	7	6,28	-0,40	34
	L	-0,80	176	7,82	-0,30	168	6,43	-0,60	0
43	P	-0,60	1	7,80	-0,30	175	6,24	-0,30	180
	L	-0,50	174	7,80	-0,20	170	6,28	-0,30	180
44	P	-0,30	171	7,97	-0,30	174	6,47	0,00	153
	L	-0,40	174	7,93	-0,30	10	6,37	0,20	162

	oko	astigmat přední plochy rohovky	osa astigmat přední plochy r.	vrchol. zakřivení přední plochy rohovky	astigmat zadní plochy rohovky	osa astigmat zadní plochy r.	vrchol. zakřivení zadní plochy rohovky	TNP - r.astig.	TNP - osa r. astigmat
45	P	-0,20	26	8,03	-0,20	19	6,72	0,10	75
	L	-0,90	171	8,04	-0,50	164	6,69	-0,50	174
46	P	-1,20	175	7,71	-0,50	1	6,33	-0,80	1173
	L	-1,20	175	7,71	-0,40	175	6,41	-0,90	176
47	P	-0,50	24	8,16	-0,30	15	6,55	-0,20	38
	L	-0,40	143	8,14	-0,30	173	6,55	-0,40	121
48	P	-0,40	170	8,00	-0,20	12	6,59	-0,30	152
	L	-0,40	2	7,99	-0,20	177	6,54	-0,20	4
49	P	-0,60	14	8,21	-0,30	16	6,78	-0,30	12
	L	-0,90	167	8,18	-0,30	179	6,79	-0,70	161
50	P	-0,50	10	8,01	-0,20	25	6,63	-0,40	1
	L	-0,60	166	7,99	-0,20	170	6,66	-0,40	168