

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI  
KATEDRA OPTIKY

# **ABERACE VYŠŠÍCH ŘÁDŮ V POPULACI**

Diplomová práce

VYPRACOVAL:

Bc. David Chytil

obor 5345T008 OPTOMETRIE

studijní rok 2015/2016

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE:

RNDr. Mgr. František Pluháček, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vytvořil samostatně pod vedením RNDr. Mgr. Františka Pluháčka, Ph.D s použitím literatury, kterou uvádím v seznamu.

V Olomouci dne

.....

Bc. David Chytil

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu práce RNDr. Mgr. Františku Pluháčkovi, Ph.D za cenné rady, věcné připomínky, odborný dohled a vstřícnost při konzultaci diplomové práce. Tato práce byla vytvořena za podpory projektů IGA PřF UP v Olomouci s názvem "Optometrie a její aplikace", č. IGA\_PrF\_2015\_016 a č. IGA\_PrF\_2016\_015.

## Obsah

ÚVOD .....	6
1 Popis aberací z fyzikálního hlediska a jejich vliv na zrakový vjem.....	8
1.1 Paprskové aberace.....	8
1.1.1 Chromatické aberace.....	8
1.1.2 Monochromatické aberace.....	11
1.2 Vlnové aberace .....	15
1.2.1 Difrakce.....	15
1.2.2 Odchylna vlnoplochy od ideálního stavu .....	16
2 Popis a klasifikace aberací pomocí Zernikeho polynomů .....	18
2.1 Výpočet RMS .....	20
2.2 Zápis aberací pomocí magnitudy a úhlu .....	21
3 Aberace nižších a vyšších řádů .....	22
3.1 Aberace nižšího řádu .....	22
3.1.1 Piston.....	22
3.1.2 Tilt.....	22
3.1.3 Defocus .....	23
3.1.4 Astigmatismus .....	25
3.2 Aberace vyššího řádu.....	27
3.2.1 Trefoil.....	28
3.2.2 Koma .....	28
3.2.3 Sférická aberace.....	29
3.2.4 Sekundární astigmatismus .....	29
3.2.5 Quadrafoil.....	29
3.3 Vliv aberací na kvalitu obrazu .....	30
4 Měření aberací lidského oka pomocí Shack-Hartmanova senzoru .....	34
4.1 Historie měření aberací .....	34
4.2 Měření aberací pomocí aberometru i-profiler .....	35
5 Výskyt aberací oka v normální populaci .....	39
5.1 Subjekty a metody .....	39
5.2 Porovnání mezi datovými skupinami.....	40
5.3 Celkové průměrné hodnoty aberací .....	43
5.4 Korelace s věkem.....	46
5.5 Výsledky normálních hodnot HOA.....	47

5.6	Vztah mezi aberacemi vyšších řádů a refrakčními vadami .....	48
5.6.1	Analýza dat .....	49
5.6.2	Výsledky .....	49
6	Experimentální měření aberací vyšších řádů v populaci .....	50
6.1	Subjekty a metodika experimentálního měření.....	50
6.1.1	Subjekty.....	50
6.1.2	Metodika experimentálního měření .....	51
6.2	Metodika vyhodnocování výsledků .....	52
6.3	Výsledky .....	52
6.3.1	Průměrné hodnoty Zernikeho polynomů.....	53
6.3.2	Průměrné absolutní hodnoty Zernikeho koeficientů .....	54
6.3.3	Průměrné hodnoty RMS Zernikeho polynomů.....	57
6.4	Diskuse .....	60
	ZÁVĚR .....	66
	LITERATURA A JINÉ ZDROJE .....	67
	PŘÍLOHY .....	70

# ÚVOD

Aberace vyšších řádů (HOA) jsou často označovány jako vyšší stupně refrakčních vad, které vznikají díky nepravidelnostem povrchu očních medií, přes které prostupují světelné paprsky pozorovaných předmětů. Tyto vady negativně působí na zrakový vjem a ovlivňují kvalitu obrazu dopadajícího do sítnice oka. Velikost a míra zastoupení jednotlivých aberací je jiná u každé osoby, protože je závislá na jedinečné fyziologické stavbě optických komponentů, která se však oko od oka liší. Dalším faktorem ovlivňujícím vznik a účinek HOA jsou světelné podmínky daného prostředí, jelikož za šera a v podmínkách se sníženou světelnou intenzitou dochází k roztažení zornice a tím i k nárůstu vlivu jednotlivých aberací.

HOA představují jednu z novějších oblastí optometrie, která však v sobě skrývá velký potenciál, jak tento obor posunout někam dál a zároveň přináší pro širokou veřejnost nové možnosti v nabídce služeb péče o jejich zrak. Když k tomu přidáme osobní zájem o dané téma, tak dostaneme hlavní motivační aspekty, které vedou k sepsání této práce, po jejíž přečtení by měl každý čtenář nabýt základní povědomí o problematice HOA a porozumět zákonitostem a souvislostem, které s ní souvisí.

Teoretická pasáž této práce bude zaměřena na vysvětlení problematiky potřebné k správné interpretaci výsledků uveřejněných v rešerších a provedení praktického výzkumu. V práci se seznámíme s fyzikálními mechanismy stojícími za vznikem HOA a s jejich vlivem na kvalitu obrazu. Vysvětlíme si klasifikaci a rozdělení jednotlivých aberací na základě Zernikeho polynomů, způsoby výpočtu jejich velikostí a alternativní možnosti jejich značení. Ukážeme si rozdíly mezi aberacemi nižšího a vyššího řádu spolu s popisem jejich jednotlivých typů z hlediska optometrického pojetí. Dozvíme se možnosti a způsoby měření HOA spolu s rozložením jejich hodnot v normální (referenční) populaci a u konkrétních refrakčních skupin. Praktická pasáž bude na základě výzkumů uveřejněných v rešerších zaměřena na změření aberací u co nejpočetnějšího vzorku osob zastupujících běžnou populaci a porovnáním těchto údajů s referenčními hodnotami. Následně bude studována symetrie mezi pravým a levým okem spolu s existencí rozdílů v hodnotě HOA pro jednotlivé refrakční skupiny. Výsledky studie by mohly pomoc stanovit orientační normativní hodnoty HOA pro obyvatelstvo

ČR a potvrdit teorii o symetrii aberací mezi pravým a levým okem, spolu se zjištěním zda refrakční stav oka koreluje s mírou výskytu aberací.

# 1 Popis aberací z fyzikálního hlediska a jejich vliv na zrakový vjem

Oko můžeme považovat za složitý a citlivý optický přístroj, který má chyby a nedostatky jako každé zařízení a časem také dochází k jeho opotřebení. Slovo aberace znamená v přesném překladu odchylka nebo odklon. Optické aberace jsou odchylky, vady, chyby od ideálního (dokonalého) bodového (stigmatického) zobrazení. Aberace je možné rozdělit na:

- **Paprskové**, ty lze vysvětlit na základě paprskové optiky
- **Vlnové**, způsobené vlnovými vlastnostmi světla) – difrakcí

Všechny aberace se projevují poruchou vlnoplochy, z tohoto důvodu mohou být měřeny a popisovány z vlnového hlediska. Analýzou vlnoplochy se potom zabývá aberometrie. [4]

## 1.1 Paprskové aberace

Jelikož index lomu závisí na vlnové délce, lze paprskové aberace sledovat buď jen pro danou vlnovou délku, potom se jedná o monochromatické aberace nebo při působení více vlnových délek, kdy mluvíme o chromatické aberaci. [4]

### 1.1.1 Chromatické aberace

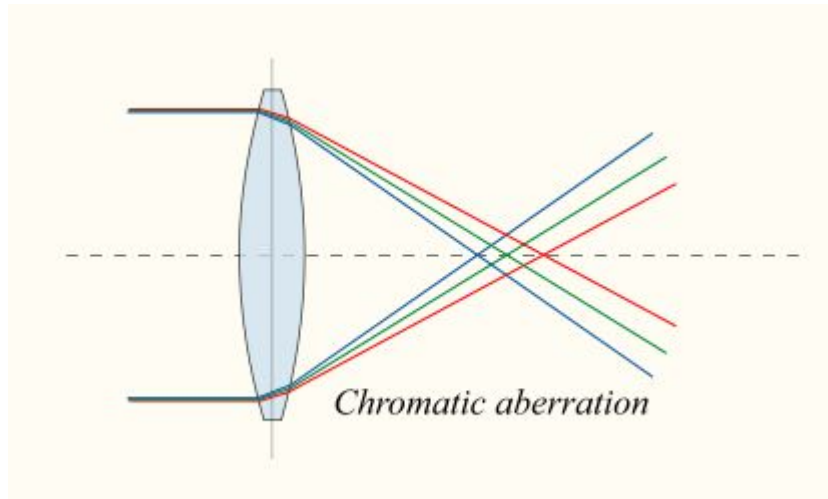
V optice se chromatická aberace nazývá také barevná vada neboli barevné zkreslení. Je to efekt, který vzniká v důsledku závislosti indexu lomu světla na vlnové délce světla. Této závislosti se říká disperze světla (rozklad světla), ke které dochází, dopadá-li na optické rozhraní dvou prostředí bílé světlo. Bílé světlo je světlo složené z paprsků s rozdílnou vlnovou délkou. Dochází k zvýšení hodnot indexu lomu se zkracující se vlnovou délkou, z tohoto důvodu optické rozhraní není schopné soustředit všechny barvy ke stejnému konvergenčnímu bodu a lomené světlo již není bílé, ale jeho okraje jsou zbarvené. Bílé světlo se tedy při lomu rozkládá na barevné složky, přičemž světelné paprsky krátkovlnné se lomí více než dlouhovlnné. Chromatická aberace se projevuje jako barevný okraj podél hranice, která odděluje tmavé a světlé části obrazu. [10, 11, 12, 13, 14]



Chromatické aberace mají velký význam v optických systémech, jako jsou:

- Dalekohledy, objektivy, mikroskopy
- Brýlové čočky (snášlivost klienta na chromatickou vadu)

[3]



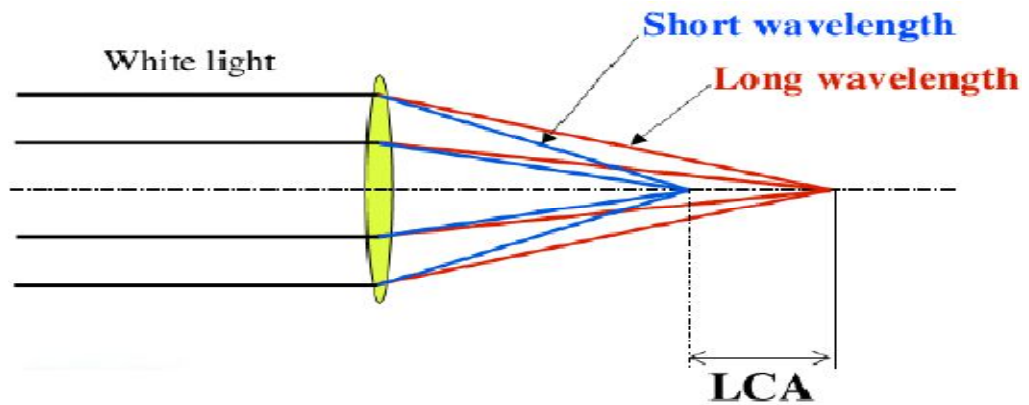
**Obr. č. 1 Projev chromatické aberace u spojně čočky [12]**

Vzhledem k tomu, že ohnisková vzdálenost  $f$  čočky je závislá na indexu lomu  $n$ , tak rozdílné vlnové délky světla budou fokusovány do různých pozic. Po lomu bílého světla je oko emetropické pro paprsky žlutého světla, myopické pro paprsky modrého světla a hypermetropické pro paprsky červeného světla. Ohnisko fialových paprsků leží o 0,6 mm blíže rohovce než ohnisko červených paprsků. Na základě těchto skutečností nelze dosáhnout toho, aby se v oku bílý bod zobrazil jako bílý bod. [10, 11, 12, 13, 14]

#### **1.1.1.1 Druhy chromatických aberací**

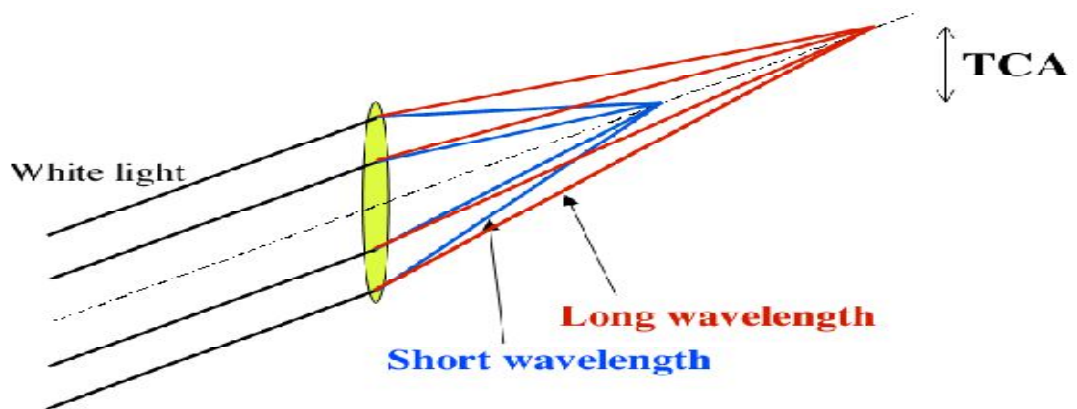
Existují dva typy chromatických aberací:

- **Axiální (podélné) - LCA**, dochází k nim, když různé vlnové délky světla jsou fokusovány do různých vzdáleností od optického rozhraní, to znamená do různých bodů na optické ose a vzniká barevná vada polohy. [3, 11, 12, 13,]



Obr. č. 2 LCA- barevná vada polohy [3]

- **Příčné (boční) - TCA** vznikají, když jsou různé vlnové délky světla fokusovány do různých míst v ohniskové rovině, protože zvětšení nebo zkreslení optického rozhraní se také mění v závislosti na vlnové délce a dává vzniknout barevné vadě velikosti. [ 3, 11, 12, 13]



Obr. č. 3 TCA-Barevná vada velikosti [3]

Tyto dva typy mají rozdílné vlastnosti, ale mohou se objevovat společně. LCA se vyskytuje v celém obrazu, TCA se nevyskytuje v centru a zvyšuje se směrem k okraji. Chromatické aberace lze odstranit kombinací spojky a rozptylky vyrobených ze skel různých druhů, které mají rozdílné relativní disperze. Dosahuje se toho např. kombinací spojky z korunového skla a rozptylky z flintového skla. Čočka s kompenzovanou chromatickou aberací je achromatická (achromát). [12, 13, 14]

### 1.1.1.2 Vliv chromatických aberací na zrak oka:

- TCA (barevná vada polohy) – nevýznamná
- LCA (barevná vada velikosti) – vliv na fokusaci světelných paprsků, nelze korigovat, pouze brát na zřetel při měření korekčních vad

[3]

### 1.1.2 Monochromatické aberace

Monochromatické aberace jsou způsobeny odchytkami lomivosti monochromatického světla na optických plochách a prostředích a vedou k deformaci obrazu. Při zobrazování předmětů paprsky, které svírají s optickou osou jen malé úhly ( $\alpha \leq 2^\circ$ ), dochází k paraxiálnímu zobrazení, neboli zobrazení v prostoru prvního řádu, který je bez aberací a předmět je zobrazován s dostatečnou přesností. Při přechodu k větším prostorovým úhlům a paprskům vzdálenějších od optické osy dojde k narušení homocentrického svazku paprsků po lomu na optické soustavě a obraz předmětu konečných rozměrů má mnoho chyb. [4, 10, 11, 14]

Na monochromatické aberace je možné pohlížet dvojitým způsobem a to buď z paprskového hlediska na základě Seidelova přístupu, který popisuje aberace až do prostoru třetího řádu ( $\alpha \leq 15^\circ$  Seidelova oblast) nebo pomocí vlnového přístupu, kdy jsou popisovány na základě deformace vlnoplochy, která je jimi způsobena (aberace se pak též označují jako vlnové), vlnové aberace jsou popsány v kapitole 1.2.

[4, 10, 11, 14]

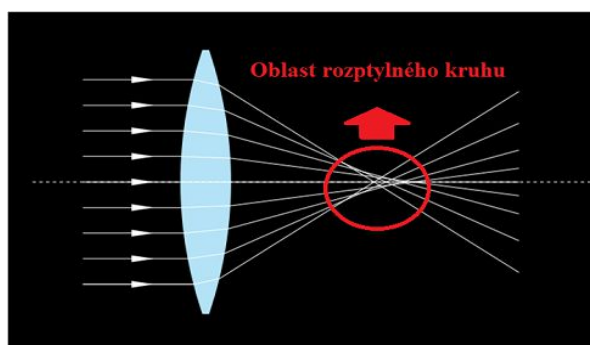
#### Mezi monochromatické aberace v Seidelově oblasti patří:

- Sférická vada (otvorová vada)
- Koma
- Astigmatismus
- Zkreslení
- Zklenutí pole

[4, 10, 11]

### 1.1.2.1 Sférická aberace

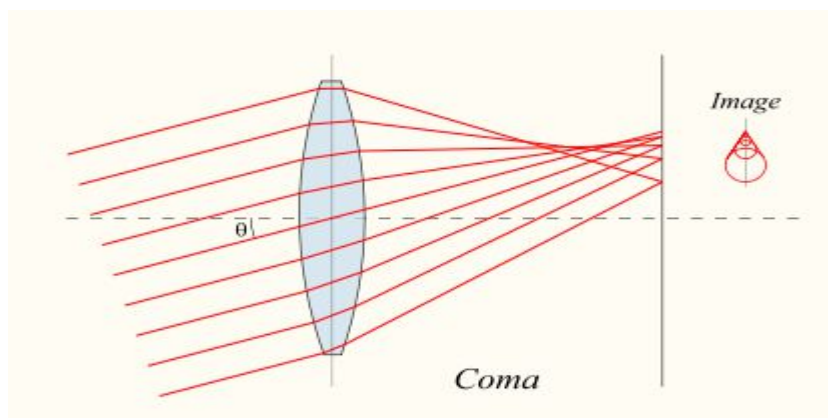
Sférická aberace (neboli otvorová vada) je způsobena kulovým tvarem optických medií oka. Tento kulovitý tvar má za následek, že neparaxiální paprsky (okrajové paprsky) se lámou více (jejich ohnisko leží blíže rohovce) než je tomu u paraxiálních paprsků (paprsků centrálních). Rozdíl mezi vzdálenostmi těchto ohniskových bodů nám udává velikost podélné sférické aberace. Tato optická vada způsobuje neostrost obrazů, protože při dopadu rovnoběžného svazku světelných paprsků do optické soustavy oka, dojde k protnutí optické osy okrajovým svazkem paprsků v jiném bodě na sítnici, než tomu bude v případě paprsků blízkých optické ose. Z tohoto důvodu i bod, který svítí monochromatickým světlem, nedává vznik bodovému obrazu, nýbrž rozptylnému kruhu (plošce). [4, 10, 11, 13, 14]



Obr. č. 3 Sférická aberace [23, upraveno]

### 1.1.2.2 Koma

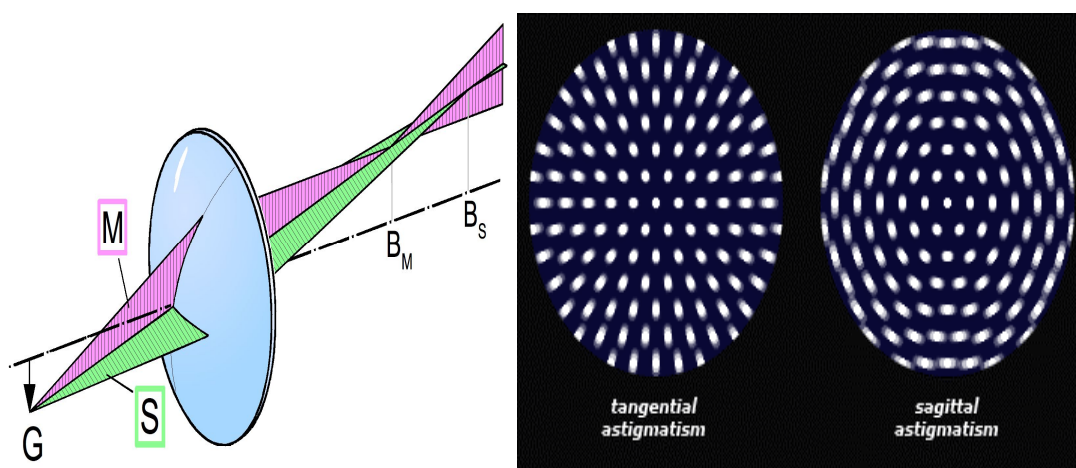
Koma je asymetrická aberace šikmých a širokých svazků paprsků vyskytujících se dále od optické osy. Při komě se svítící bod mimo optickou osu zobrazí ve tvaru komety s jasným jádrem, z něhož vychází široký ocas. Vzniká v důsledku toho, že paprskový svazek po lomu nemá osovou symetrii. Paprsky procházející různými částmi objektivu (v případě očí zornice) se setkávají v různých vzdálenostech od hlavního ohniska. Velikost komy roste úměrně se vzdáleností od optické osy a může dosahovat velkých hodnot. Vlivem tohoto mechanismu může dojít ke snížení rozlišovací schopnosti a ostrosti na okrajích zorného pole optické soustavy. [4, 10, 11, 13, 14]



Obr. č. 4 koma [4]

### 1.1.2.3 Astigmatismus

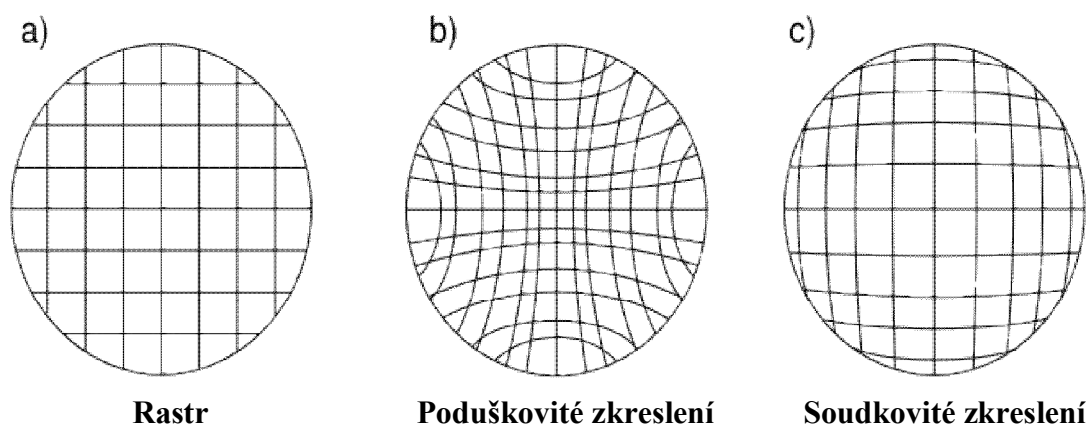
Astigmatismus je optická vada projevující se při velkých vzdálenostech od optické osy i při málo světelných soustavách, protože je přímo úměrný světelnosti a druhé mocnině odklonu od optické osy. Astigmatismus se vyskytuje i u úzkých svazků paprsků, pokud jsou tyto svazky výstřední. U astigmatických svazků dochází k protnutí ve dvou fokálech (nevytvářejí nikde bodové ohnisko) navzájem k sobě kolmých - jedná se o tzv. meridiální a sagitální řez. Vzdálenost mezi fokály se nazývá astigmatický rozdíl. Astigmatický obraz bodového zdroje má tvar krátké čárky (na fokálech) nebo rozostřeného kroužku (mezi fokály). [4, 10, 11, 13, 14]



Obr. č. 5 a č. 6 Astigmatismus [4]

### 1.1.2.4 Zkreslení

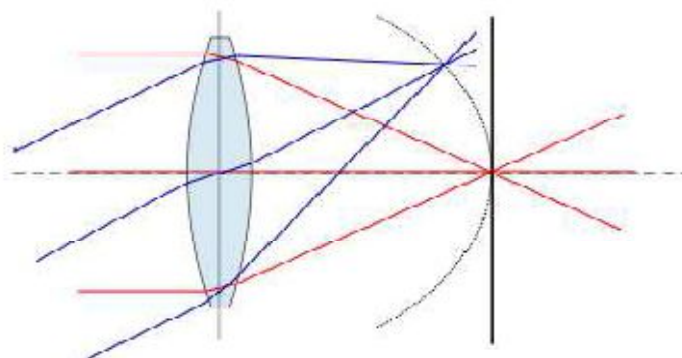
Zkreslení neboli distorze je aberace, která je zapříčiněna tím, že příčné zvětšení není po celém obrazovém poli stejné, a tak dochází k poruše geometrické podobnosti mezi předmětem a jeho obrazem. Není zkresleno zobrazení samostatných bodů, nýbrž jejich konfigurace. Pokud jsou vnější části předmětu zvětšeny více, mluvíme o poduškovitém zkreslení, jsou-li naopak zvětšeny méně než vnitřní části, pak se jedná o zkreslení soudkovité. [4, 10, 11, 13, 14]



Obr. č. 7 Zkreslení [11]

### 1.1.2.5 Zklenutí

Zklenutí zorného pole je vada, která je zapříčiněna skutečností, že body vyskytující se v rovině kolmé k optické ose, se nezobrazují v rovině kolmé k ose, ale na zakřivené ploše. V rovině kolmé k optické ose tak nelze získat obraz, který by byl v celé jeho šíři stejně ostrý. [4, 10, 11, 13, 14]



Obr. č. 8 Zklenutí pole [4]

## 1.2 Vlnové aberace

Vlnová optika pohlíží na světlo jako na elektromagnetické vlnění. Vlnění je jev, který probíhá současně v čase i v prostoru. Při šíření vln v prostoru se uplatňuje tzv. Huygensův princip, ze kterého vyplývá, že všechny body na vlnoploše slouží jako sekundární zdroj nového elementárního vlnění. [3, 4, 13]

Vlnové aberace můžeme chápat ve dvojím pojetí, a to jako:

- Aberace způsobené vlnovou povahou světla (difrakce)
- Aberace způsobené odchylkou vlnoplochy od ideálního stavu (tento popis zahrnuje též popis paprskových aberací)

[3, 4, 13]

### 1.2.1 Difrakce

Difrakce je jev, u kterého se vlnění dostává do oblasti geometrického stínu, čili dochází k ohybu světla na jakékoliv překážce. K ohybu dochází na základě Huygensova principu, tedy jevu, kdy každý bod vlnoplochy záření se znovu stává všesměrovým zdrojem vlnění. V případě štěrbin to znamená, že každý její bod, do kterého se vlnoplocha dostane, včetně jejích okrajů se stane opět bodovým zdrojem světleného vlnění, ze kterých se světlo šíří každým směrem. Proto se může dostat i za hranici geometrického stínu. Tuto skutečnost lze obzvlášť dobře sledovat, když světlo prochází štěrbinou, jejíž šířka je srovnatelná s vlnovou délkou světla. Vlivem následného složení (interference) se za štěrbinou na stínítku zobrazí tzv. difrakční neboli ohybové obrazce, tj. světlé a tmavé proužky různé šířky. [3, 4, 13]

V dokonalém oku (oku nezatíženém žádnými odchylkami vlnoplochy od ideálního stavu) představuje difrakce fyzikální omezení rozlišovací schopnosti optické soustavy oka. Funkce PSF (bodová rozptylová funkce oka), vlivem difrakce nedá vzniknout bodu, ale malému, plošnému, jasnému disku, obklopenému velmi slabým halo efektem světelné energie. Proto rozlišovací mez oka  $\psi$  (nezatíženého jinými aberacemi kromě difrakce) by byla dána Rayleighovým rozlišovacím kritériem:

$$\psi = 1,22 \frac{\lambda}{D} = \frac{120''}{D[\text{mm}]},$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka světla a  $D$  je průměr zornice.

Z uvedeného vyplývá, že se sice vliv zornicové difrakce sníží, když se zornice rozšíří, nicméně celkově jsou vlnové aberace ve smyslu difrakce světla neodstranitelné!

[3, 4, 13]

### 1.2.2 Odchylka vlnoplochy od ideálního stavu

Vlnoplochou označujeme množinu bodů, které během vlnění kmitají v prostoru se stejnou fází. Vlnová aberace je odchylka skutečné a ideální vlnoplochy. Aberace v optickém systému oka se obecně hodnotí na základě změny vlnoplochy optického vlnění po průchodu sledovaným optickým prostorem od uvažovaného referenčního tvaru (nejčastěji rovinného nebo sférického).

- V ideálním oku se vstupní rovinná vlnoplocha po průchodu okem stává čistě sférickou a na sítnici se zobrazí jako bod. Referenční (vstupní) a měřená (výstupní) vlnoplocha z oka se shodují.
- V ideálním oku pouze se sférickou vadou se vlnoplocha zobrazí jako ryze sférická plocha, ale ohnisko neleží na sítnici. Na sítnici se potom tato vlnoplocha zobrazí jako kruh.
- V reálném oku dojde po průchodu vlnoplochy optickou soustavou k jejímu zkreslení vlivem aberací, tato vlnoplocha již není sférická a nemá jednoznačné ohnisko. Na sítnici se zobrazí jako neforemný obrazec. Na výstupu tedy sledujeme odchylky od vstupní (referenční) rovinné vlnoplochy.

[2, 3, 4, 13]

Tyto odchylky (zkreslení) většinou udáváme v mikrometrech a můžeme je v daném bodě popsat pomocí aberační funkce  $W(r, \theta)$ , která charakterizuje vzájemné odchylky obou uvažovaných vlnoploch. Pro oko je ji třeba definovat na kruhovém otvoru - zornici, využíváme proto polárních souřadnic  $r$  a  $\theta$ . [2]

Uspořádaná dvojice  $(r, \theta)$  zastupuje polární souřadnice sledovaného bodu ve zvolené polární vztažné soustavě. Parametr  $r$  představuje vzdálenost bodu od počátku soustavy a  $\theta$  udává úhel mezi polohovým vektorem bodu a vztažným směrem,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ .



Jako počátek obvykle určíme střed zornice oka, přičemž se běžně omezujeme na její kruhovou oblast o daném poloměru  $R$ , takže  $0 \leq r \leq R$ . Průběh aberační funkce  $W(r, \theta)$  ve všech bodech v dané zornicové oblasti pak udává tzv. aberační mapu oka. Celková hodnota aberační funkce  $W(r, \theta)$  určená pro  $N$  měřených bodů s průměrnou hodnotou  $\overline{W}$  je charakterizována pomocí směrodatné odchytky  $RMS$  definované vztahem:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{r,\theta} (W(r, \theta) - \overline{W})^2},$$

kde

$$\overline{W} = \frac{\sum_{r,\theta} W(r, \theta)}{N}.$$

Na základě matematického rozkladu aberační mapy je možné provést klasifikaci vlnových aberací. [2]

## 2 Popis a klasifikace aberací pomocí Zernikeho polynomů

Aberační funkci lze matematicky popisovat pomocí dvourozměrných funkcí, které reprezentují tvar vlnoplochy odpovídající působení dané aberace. Je nutné uvažovat takovou soustavu funkcí, jimiž lze jakoukoliv reálnou vlnoplochu vyjádřit jako jejich vážený součet, přičemž jednotlivé funkce musí být na sobě nezávislé (ortogonální), tj. jedna funkce nelze vyjádřit jako vážený součet ostatních. Tyto základní funkce si tedy lze představit jako jednotkové vektory v prostoru funkcí, jejichž složením lze získat libovolný další bod (funkci) v tomto prostoru. [2, 3, 4, 19]

Uvedené vlastnosti splňují např. tzv. Zernikeho polynomy. Zernikeho polynomy jsou navíc definovány na jednotkové kružnici, takže je lze s výhodou použít pro popis aberační funkce oka, definované na kruhové zornici. Tyto polynomy je pak vhodné zapsat jako funkce polárních souřadnic  $\rho$  a  $\theta$ , kde  $\rho = r/R$ . Aberační funkci pak lze zapsat vztahem

$$W(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n C_n^m Z_n^m(\rho, \theta) = C_0^0 Z_0^0 + C_1^{-1} Z_1^{-1} + C_1^1 Z_1^1 + C_2^{-2} Z_2^{-2} + C_2^2 Z_2^2 + \dots,$$

kde  $C_n^m$  jsou Zernikeho koeficienty uvažovaného rozvoje, které udávají, jakou váhu má každý Zernikeho polynom v popisované aberační vlnoploše a proměnná  $\rho = r/R$ ,  $0 \leq \rho \leq 1$ , je normovaný poloměr. Každý Zernikeho polynom  $Z_n^m$  je charakterizován dvěma parametry:  $m$  a  $n$ , kde

- $n$  je hlavní index (pozitivní celé číslo) s názvem radiální stupeň (řád polynomu)
- $m$  je vedlejší index (negativní nebo pozitivní celé číslo) se nazývá azimutální frekvence,  $m$  určuje úhlovou frekvenci (četnost) maxim a minim

Tyto dva parametry je možné nahradit jediným indexem  $j$  (modové číslo)

$$j = \frac{n \cdot (n+2) + m}{2}.$$

[2, 3, 4, 19]

Potom pro radiální číslo (řád)  $n$  platí

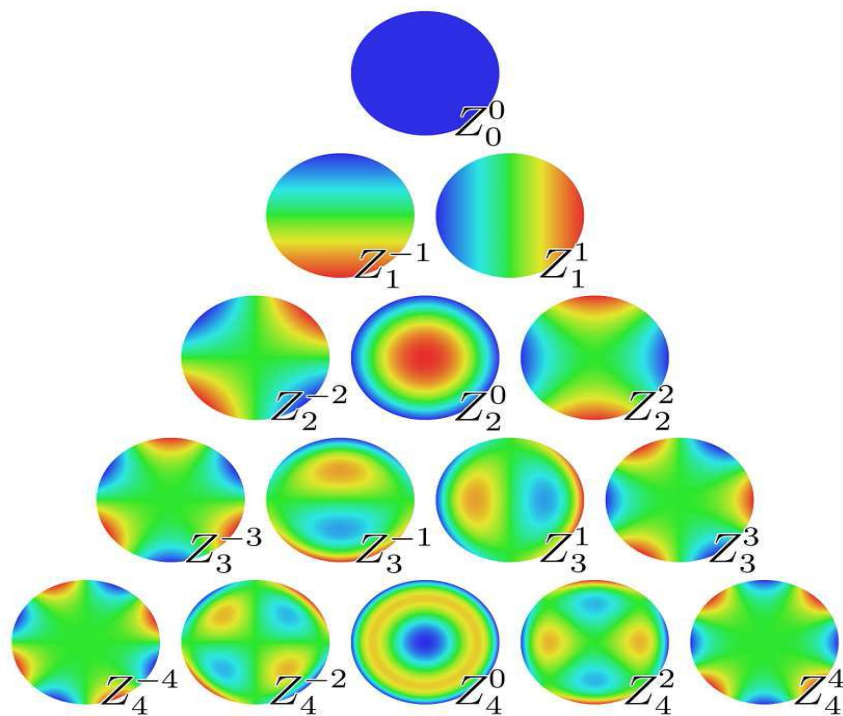
$$n = \left\lfloor \frac{-1 + \sqrt{1 + 8j}}{2} \right\rfloor \text{ zaokrouhleno dolů}$$

a pro úhlové číslo (frekvenci)  $m$  platí

$$m = 2j - n(n+2).$$

[2, 3, 4, 19]

Obvykle se uvažují tzv. normované Zernikeho polynomy, jejichž výhodou je jednoduchá možnost výpočtu RMS pomocí těchto polynomů, viz kapitola 2.1. Každý Zernikeho polynom lze interpretovat jako aberační funkci odpovídající konkrétní vlnové aberaci a lze tak provést klasifikaci těchto aberací. Pro účely grafické klasifikace jsou obvykle tyto polynomy prezentovány ve formě tzv. Zernikeho pyramidy. Osově symetricky rozložené dvojice map na daném řádku pyramidy charakterizují vždy jeden typ aberace, přičemž představují jeho jednotlivé složky. Přehled některých těchto polynomů je uveden v tabulce níže. [2, 3, 4, 19]



Obr. č. 9 Zernikeho pyramida [3]

<b>0. a 1. řád</b>	
$Z_0^0 = 1$	Píst
$Z_1^{-1} = 2\rho \sin \theta$	Náklon vertikální
$Z_1^1 = 2\rho \cos \theta$	Náklon horizontální
<b>2. řád</b>	
$Z_2^{-2} = \sqrt{6} \rho^2 \sin 2\theta$	Astigmatismus (šikmý)
$Z_0^2 = \sqrt{3} (2\rho^2 - 1)$	Defokus (roztření)
$Z_2^2 = \sqrt{6} \rho^2 \cos 2\theta$	Astigmatismus (vertikální)
<b>3. řád</b>	
$Z_3^{-3} = \sqrt{8} \rho^3 \sin 3\theta$	Trojlistek (trefoil)
$Z_3^{-1} = \sqrt{8} (3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta$	Koma vertikální
$Z_3^1 = \sqrt{8} (3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta$	Koma horizontální
$Z_3^3 = \sqrt{8} \rho^3 \cos 3\theta$	Trojlistek (trefoil)
<b>4. řádu</b>	
$Z_4^{-4} = \sqrt{10} \rho^4 \sin 4\theta$	Čtyřlístek (quadrafoi)
$Z_4^{-2} = \sqrt{10} (4\rho^4 - 3\rho^2) \sin 2\theta$	Sekundární astigmatismus vertikální
$Z_0^4 = \sqrt{5} (6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Sférická aberace
$Z_4^2 = \sqrt{10} (4\rho^4 - 3\rho^2) \cos 2\theta$	Sekundární astigmatismus horizontální
$Z_4^4 = \sqrt{10} \rho^4 \cos 4\theta$	Čtyřlístek (quadrafoi)

Tabulka č. 1 výpis jednotlivých Zernikeho polynomů do 4. řádu

## 2.1 Výpočet RMS

Celkovou RMS lze zjednodušeně určit pomocí Zernikeho koeficientů získaných pro normalizované polynomy pomocí vztahu

$$RMS = \sqrt{\sum_n \sum_m (C_n^m)^2}.$$

[2, 3, 4, 19]

Obdobným způsobem je možné stanovit dílčí RMS pro jednotlivé typy aberací, např. pro aberaci odpovídající  $n = 3, m = \pm 1$

$$RMS_{31} = \sqrt{(C_3^{-1})^2 + (C_3^{+1})^2},$$

popř. pro jednotlivé řády aberací, např. pro aberace třetího řádu lze souhrnně spočítat RMS jako

$$RMS_3 = \sqrt{(C_3^{-3})^2 + (C_3^{-1})^2 + (C_3^{+1})^2 + (C_3^{+3})^2}.$$

[2, 3, 4, 19]

## 2.2 Zápisy aberací pomocí magnitudy a úhlu

Jak je výše uvedeno, některé typy aberací jsou při Zernikeho klasifikaci popsány dvěma složkami, symetricky umístěnými v Zernikeho pyramidě. Tyto aberace jsou popsány stejnou radiální hodnotou indexu  $n$  a azimutální hodnotou indexu  $m$  a  $-m$  stejné velikosti. Jednotlivé azimutální složky vypadají stejně, s výjimkou, že jedna se otáčí s ohledem na druhou v určité ose. Takový zápis je možné nahradit jediným zápisem pomocí magnitudy (= RMS pro daný typ aberace) a úhlu. Tohoto zápisu dosáhneme tím, že azimutální složky změníme tak, aby byla pouze jedna forma namísto dvou, kdy jsou uvedeny ve tvaru,

$$A(n, m) = \cos[m(\theta - \alpha_{nm})],$$

kde mohou  $m$  nabývat pouze kladné hodnoty. Novou proměnnou je  $\alpha_{nm}$ , která má charakter osy. Říká nám, jak je Zernikeho polynom orientovaný vzhledem k vodorovné rovině. Hodnotu  $\alpha_{nm}$  můžeme získat z koeficientů používaných u standardního zápisu  $Z_n^m, Z_n^{-m}$ .

$$\alpha_{nm} = \frac{a \tan\left(\frac{C_n^{-m}}{C_n^m}\right)}{|m|}$$

Koeficient pro zjednodušené vyjádření Zernikeho povrchu, který je určen svojí velikostí (magnitudou) a je dán

$$C_{nm} = \sqrt{(C_n^{-m})^2 + (C_n^m)^2}$$

a takto zjednodušený Zernikeho povrch je určen

$$S_{nm}(C_{nm}, \alpha_{nm}) = C_{nm} N_n^m R_n^m \cos[m(\theta - \alpha_{nm})].$$

Tento výstup poskytují pro uživatele některé aberometry, umožňují zhodnotit velikost daného typu aberace, která je při běžné klasifikaci pomocí Zernikeho koeficientu rozložena na dvě složky, např. koma - složky  $Z_3^{-1}$  a  $Z_3^1$ .

[24]

### 3 Aberace nižších a vyšších řádů

V systému klasifikace aberací podle Zernikeho bývá zvykem aberace dělit do dvou skupin:

- Aberace nižšího řádu
- Aberace vyššího řádu

Z pohledu korekce optické soustavy oka představují aberace nižšího řádu část aberací, kterou lze plně korigovat brýlovou korekcí. Naopak aberace vyššího řádu již nelze plně korigovat pomocí brýlových čoček, tyto aberace pouze mohou být do jisté míry v korekci zohledněné. [3, 19]

#### 3.1 Aberace nižšího řádu

Aberace nižšího řádu (LOA) jsou aberace nultého, prvního a druhého řádu Zernikeho pyramid a tvoří 80 % všech aberací lidského oka. [3, 19]

##### 3.1.1 Piston

Je jedinou aberací nultého řádu, jeho označení v Zernikeho řadě je  $Z_0^0$ . Představuje bezchybné zobrazení, výsledná vlnoplocha je optimální (dokonalou) rovinou, tzn. bez jakýchkoli aberací, u modelu ideálního oka by se jednalo o oko emetropické, v případě reálných očí neexistuje. Z pohledu aberací nižšího řádu je nevýznamný. [3, 19]

##### 3.1.2 Tilt

Aberace prvního řádu jsou dvě a obě se jmenují tilt a značíme je jako  $Z_1^{-1}$  nebo  $Z_1^1$ . Představují nakloněnou rovinu neboli prizma. Toto prizma je vztažené k náklonu odražené vlnoplochy v oku, ale nemá vůbec žádnou souvislost s binokulární prizmatickou korekcí. V grafickém vyobrazení je fáze vlny za ideální rovinou v barevné škále označena červeně, pokud je fáze vlny před ideální rovinou, tak ji značíme modře. Z pohledu aberací vyšších řádů však tilt nemá praktický význam. [3, 19]

### 3.1.3 Defocus

Defocus neboli rozostření je rotačně symetrická aberace druhého řádu, která se značí  $Z_0^2$ . Tato vada je způsobená tím, že paprsky po průchodu optickým systémem nejsou fokusovány na sítnici, ale jejich ohnisko leží před nebo za ní a dochází k rozmazání obrazu (obraz bodu je rozmazán ve všech směrech stejně). V případě neakomodovaného oka tato aberace tedy odpovídá sférické refrakční vadě oka a její aberační vlnoplochou je kulový vrchlík. Sférická vada může být dvojího typu a to buď myopická a nebo hypermetropická, oba tyto typy se však od sebe liší a mají rozdílné příčiny vzniku, společně se však dají korigovat sférickou dioptrickou čočkou. [3, 19]

#### 3.1.3.1 Myopie

Myopie je sférická refrakční vada, která vzniká, když vstupní rovnoběžné paprsky po průchodu neakomodovaným okem jsou fokusovány před sítnicí. Na sítnici se pak bod zobrazí jako tzv. rozptylový kroužek. [15, 16, 17, 18]

Základními znaky myopických očí je vjem rozostřeného vidění do dálky, ale ostrého vidění do blízka. Myopové bez korekce přivírají oči do dálky a tím navozují stenopeické vidění, jehož vlivem dochází ke zmenšení rozptylového kroužku na sítnici, a tím k ostřejšímu vidění.

. Krátkozraké oči v neakomodovaném stavu mohou vidět ostře jen předměty umístěné v dalekém bodě (*punctum remotum*). *Punctum proximum* neboli blízký bod oka leží blíže k oku než u emetropického oka, potom při sledování předmětů vyskytujících se mezi dalekým bodem *R* (*punctum remotum*) a okem dochází k menšímu zapojení akomodace, než je tomu u emetropických očí. Vlivem větších sítnicových obrazů dochází k částečné kompenzaci rozostření. Myopii vždy korigujeme nejslabší rozptylnou čočkou, se kterou je dosaženo ostrého vidění. [15, 16, 17, 18]

Myopii můžeme rozdělit dle původu vzniku na:

- **Axiální myopie** je nejčastějším typem, který je způsobený tím, že délka očního bulbu je větší, než je tomu u oka emetropického. Při prodloužení bulbu o 1 mm vzniká myopie o dioptrické hodnotě přibližně -3 D.

- **Refrakční (kurvatorní) myopie** se objevuje v důsledku zvýšené lomivosti optických médií. Změna poloměru zakřivení rohovky o 1 mm způsobí myopizaci o optické mohutnosti přibližně -6 D. Refrakční myopie může také vzniknout při zvětšení čočkového zakřivení.
- **Indexová myopie** nastává, když dojde ke změně indexu lomu v očních médiích. Tato změna vzniká vlivem diabetu, během kterého kolísá hladina cukru v krvi a tím se mění index lomu v optických médiích oka. Indexová myopie se může objevovat také při šedém zákalu, kdy dochází ke zvýšení lomivosti jádra čočky.

[15, 16, 17, 18]

Myopii můžeme rozdělit dle dioptrické hodnoty na:

- **lehkou** (*myopia simplex*) od -0,25 D až -3D
- **střední** (*myopiamodica*) od -3,25 D až -6 D
- **vysokou** (*myopia gravis*) od -6,25 D až -10 D
- **těžkou** (*myopiadegenerativa*) nad -10 D.

[15, 16, 17, 18]

### 3.1.3.2 Hypermetropie

Hypermetropie neboli dalekozrakost je sférická refrakční vada, která vzniká, když vstupní rovnoběžné paprsky vzdáleného předmětu prostoupí okem pozorovatele a střetnou se v ohniskovém bodě, který leží za sítnicí, tedy daleký bod hypermetropického oka leží za okem, nebo „mimo“ nekonečno. [15, 16, 17, 18]

Nejčastější příčinou vzniku těchto skutečností je malá délka oka neboli axiální metropie. U hypermetropického oka by v klidovém stavu na sítnici dopadal kuželovitý svazek sbíhavých paprsků, který by vytvořil rozmazaný zrakový vjem. Na toto rozmazání oko s akceschopnou akomodací zareaguje sepnutím ciliárního svalu a zapojením akomodace tak, aby došlo k posunutí ohniska na sítnici, nebo alespoň jeho přiblížení k sítnici (dle možností akomodačního systému daného jedince). Hypermetropii na základě zapojení akomodace lze klasifikovat do různých složek:

- **Totální (celková):** Udává nám celkovou velikost vady.



- **Latentní (skrytá):** Tato složka je trvale kompenzovaná trvalým klidovým napětím ciliárního svalu. S věkem se snižuje a přechází do fakultativní složky, je ji možné vyšetřit pouze v cykloplegii.
- **Manifestní (zjevná):** Je možné ji vyšetřit pomocí čoček bez cykloplegie, její hodnota je rovna maximální spojce, se kterou oko vidí ještě ostře.
- **Fakultativní:** Tuto složku je oko schopno cíleně vykorigovat zvýšeným akomodačním úsilím. Její velikost je maximálně rovna amplitudě akomodace. Může způsobovat astenopické potíže (potíže způsobené zrakem), které se projevují: bolestí hlavy, bolestí šíje, celková nevolnost až zvracení. Nezpůsobuje rozmazané vidění, potíže jsou způsobené zvýšeným akomodačním úsilím. Pro pohodlné vidění je obvykle třeba, aby dlouhodobá akomodace nepřesáhla 2/3 akomodační šíře.
- **Absolutní:** Tuhle složku nelze vykorigovat ani pomocí zvýšeného akomodačního úsilí, pokud manifestní složka překročí amplitudu akomodace, není oko schopno vadu vykorigovat ve formě fakultativní hypermetropie a způsobuje zhoršení vidění a neostrost obrazu.

[15, 16, 17, 18]

Dalekozraké oko při nižší vadě přibližně do + 3 D vidí ostře do dálky i do blízka, kde se ovšem mohou vyskytovat astenopické potíže. S přibývajícím věkem dochází ke snížení akomodační schopnosti a začnou se vyskytovat potíže do blízka dříve než u emetropické populace. Při vyšších vadách přibližně nad + 5 D se může objevit rozmazané vidění již do dálky, které je do blízka ještě horší. Dalekozrakost vždy korigujeme nejsilnější spojnou čočkou, se kterou je ještě dosaženo ostrého a komfortního vidění. [15, 16, 17, 18]

### 3.1.4 Astigmatismus

Z pohledu klasifikace dle Zernikeho pyramidu je astigmatismus chápán jako aberace reprezentovaná koeficienty je  $Z^{-2}_2$  a  $Z^2_2$ . Takto chápáný astigmatismus odpovídá z pohledu klasifikace refrakčních vad oka tzv. pravidelnému astigmatismu (*astigmatismus regularis*), který patří do skupiny aberací druhého řádu. Jeho aberační vlnoplocha má válcovitý tvar, jedná se o rotačně asymetrickou funkci, protože existuje vždy v nějaké ose. V oblasti refrakčních vad rozeznáváme ještě astigmatismus

nepravidelný (*astigmatismusi irregularis*), který je dán dalšími nepravidelnostmi oka a koresponduje se Zernikeho aberacemi dalších řádů. [15, 16, 17, 18]

### 3.1.4.1 Pravidelný astigmatismus

U pravidelného astigmatismu je bod zobrazen na dvě navzájem kolmé úsečky ležící v různých rovinách. U astigmatického oka se vyskytují meridiány s maximální a minimální lomivostí, lomivost mezi nimi se mění monotónně. Vždy existuje jeden meridián s maximální a jeden s minimální lomivostí, tyto řezy se nazývají hlavní řezy astigmatismu a oba jsou navzájem na sebe kolmé. Vzdálenost mezi těmito fokálami je označena jako Sturnův konoid a uprostřed tohoto konoidu leží kroužek nejmenšího rozptylu, kde je obraz rozmazaný rovnoměrně ve všech směrech. Astigmatismus lze korigovat brýlovými torickými čočkami. [15, 16, 17, 18]

Pravidelný astigmatismus se dělí na:

- **Jednoduchý** (*simplex*) jeden meridián je emetropický, druhý ametropický.
- **Složený** (*compositus*) oba meridiány jsou buď myopické a nebo hypermetropické.
- **Mixtus** (*smíšený*) jeden meridián je myopický a druhý hypermetropický.

[15, 16, 17, 18]

Dále je možné astigmatismus rozdělit na:

- **Astigmatismus podle pravidla** (*rectus*) kdy vertikální meridián je více lomivý.
- **Astigmatismus proti pravidlu** (*inversus*) kdy horizontální meridián je více lomivý.
- **Astigmatismus šikmých os**, u kterého nelze rozhodnout, který meridián je více lomivý.

[15, 16, 17, 18]

Astigmatismus podle a proti pravidlu odpovídá Zernikeho koeficientu  $Z_2^{-2}$  a navzájem se liší znaménkem. Astigmatismus šikmých os odpovídá Zernikeho koeficient  $Z_2^2$ . [3, 19]

Mezi základní symptomy astigmatického oka patří rozmazané vidění, které nelze plně korigovat sférickou korekcí, může převažovat rozmazání v určitém směru. Dochází k mhouření očí a náklonům hlavy, někdy i k monokulární diplopii. V populaci do 5. roku života převažuje astigmatismus proti pravidlu, potom podle pravidla. Od osmého roku dochází jen k velmi malým změnám, ale ve stáří dochází k posunu opět proti pravidlu. Celkový výsledný astigmatismus v oku je složen z astigmatismu rohovkového, astigmatismu čočkového a astigmatismu zbytkového. [15, 16, 17, 18]

- **Astigmatismus rohovkový** je dán asférickým zakřivením rohovky, toto zakřivení může být vrozené nebo získané, většinou bývá podle pravidla.
- **Astigmatismus čočkový** je způsoben asfericitou nebo decentrací čočky, nerovnoměrnou změnou indexu lomu vyvolanou například kataraktou. Astigmatismus čočkový bývá obvykle proti pravidlu.
- **Astigmatismus zbytkový** obvykle dosahuje zanedbatelné hodnoty, je indikován nepravidelnostmi očního pozadí.

[15, 16, 17, 18]

#### **3.1.4.2 Astigmatismus nepravidelný**

Nejedná se o sférickou ametropii ani o pravidelný astigmatismus. Jedná se o zobrazení nepravidelně zakřivenými optickými plochami, kdy bod se nezobrazuje jako bod, ale jinak než u pravidelného astigmatismu. Nejčastější příčinou vzniku je nepravidelnost rohovky vzniklá onemocněním (např. keratokonem), úrazem, poleptáním, nebo operací. Nelze jej dobře korigovat brýlovými čočkami, může však mít pravidelnou složku, kterou lze vykorigovat brýlemi, ale z jeho větší části zůstane. Nejčastěji korigujeme pomocí pevné kontaktní čočky nebo refrakčních operací. [15, 16, 17, 18]

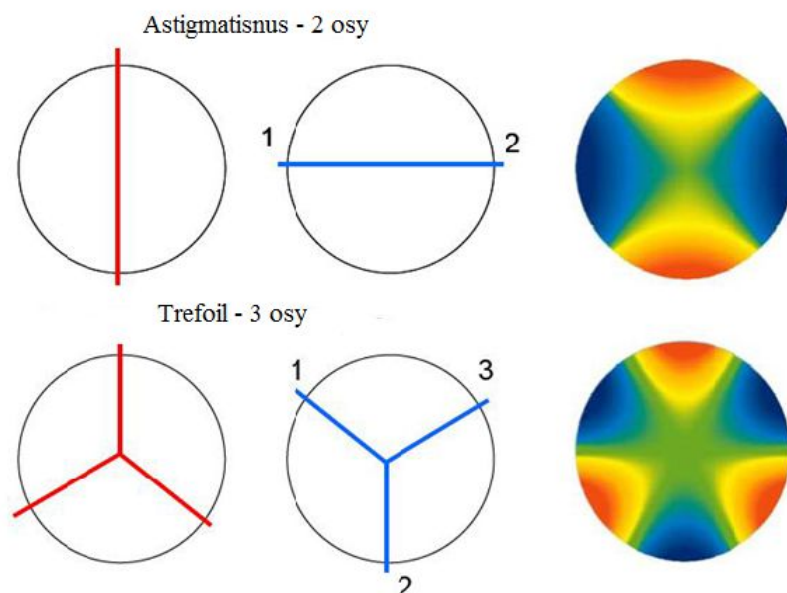
### **3.2 Aberace vyššího řádu**

Aberace vyššího řádu jsou všechny aberace třetího a vyššího řádu, které tvoří přibližně 15 % všech aberací lidského oka. Aberací vyšších řádů může být teoreticky nekonečně mnoho, ale v praxi se však nejčastěji používá jen přesné vyhodnocení do 6. řádu, protože absolutní většina aberací vyššího než 6. řádu dosahuje tak malých hodnot, že

jejich vliv na zrakovou kvalitu a klinický význam je prakticky zanedbatelný. Největší vliv mají aberace 3. a 4. řádu, které také dosahují největších hodnot, a proto se jim budeme hlouběji věnovat v následující pasáži. [3, 19]

### 3.2.1 Trefoil

Trefoil je rotačně asymetrická aberace třetího řádu Zernikeho pyramid, která nese označení  $Z_3^{-3}$  nebo  $Z_3^3$ . Prakticky se jedná o tříosý astigmatismus, který je definován třemi body v každém směru místo dvou bodů, jako je tomu u klasického astigmatismu. V praxi tato aberace ztěžuje určování osy cylindru při subjektivní refrakci. Trefoil působí na zrakovou ostrost tak, že obraz se nám jeví neostrý ve více směrech a způsobuje paprskovité vnímání světelných zdrojů. [3, 19]



Obr. č. 10 Astigmatismus a trefoil [upraveno, 3]

### 3.2.2 Koma

Koma je rotačně asymetrická aberace, kterou řadíme mezi aberace třetího řádu Zernikeho pyramid. Nese označení  $Z_3^{-1}$  pro vertikální koma a  $Z_3^1$  pro horizontální koma. Typickým rysem vlnoplochy je tvar připomínající „dvojitou lžici“. Na aberační topografické mapě je tato lžice zobrazena jako blízko sebe ležící místa s rozdílnou výškovou hodnotou, vždy jedno je strmější a jedno plošší. Čím je tento výškový rozdíl větší, tím koma nabývá větších hodnot. Nejčastěji se vyskytuje v případech, kdy optické

centrum není umístěno přesně na optické ose oka, ale je decentrováno. Na zrak působí neostrostí a rozmazáním zrakového vjemu. Může nastat až rozdvojení obrazů, dochází k vidění tzv. „duchů“ (monokulární diplopii), nejčastěji se jedná o nekorigovaný cylindr. Fyzikální podstata této aberace byla popsána v kapitole 1.1.2.2. [3, 19]

### 3.2.3 Sférická aberace

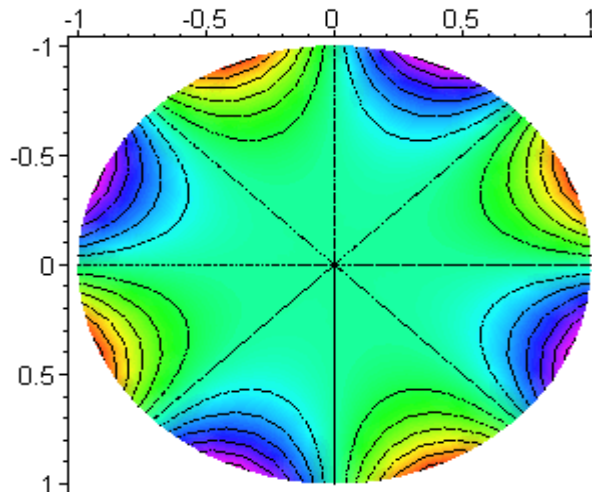
Sférická aberace neboli otvorová vada je rotačně symetrická aberace, která patří mezi aberace čtvrtého řádu Zernikeho pyramid. Značíme ji  $Z_0^4$ , tato aberace vzniká, protože optický systém oka fokusuje více ne-paraxiální paprsky (paprsky vzdálenější od optické osy) než paprsky paraxiální (paprsky bližší optické ose), vlivem tohoto mechanismu nevzniká v ohnisku ostrý obrazový bod, ale rozmazaná ploška. Sférická aberace výrazně posouvá sférickou část korekce do „plusu“ nebo do „mínusu“ při subjektivní, i objektivní refrakci. Na zrak působí neostrou kvalitou obrazů v závislosti na vnějším osvětlení, mění se s průměrem pupily (čím větší zornice, tím větší sférická aberace a rozostření), je jednou z příčin vzniku noční myopie. Fyzikální zákonitosti otvorové vady jsou popsány v kapitole 1.1.2.1. [3, 19]

### 3.2.4 Sekundární astigmatismus

Sekundární astigmatismus je rotačně asymetrická aberace čtvrtého řádu Zernikeho pyramid, která je označena  $Z_4^{-2}$  pro vertikální variantu a  $Z_4^2$  pro horizontální variantu. Je ho možné popsat jako klasický astigmatismus s rozdílem, že hodnoty hlavních řezů se mění se šířkou zornice, hodnoty cylindru jsou ovlivněny v závislosti na průměru pupily. [3, 19]

### 3.2.5 Quadrafoil

Quadrafoil neboli čtyřlístek je rotačně asymetrická aberace čtvrtého řádu Zernikeho pyramid, která se značí  $Z_4^{-4}$  nebo  $Z_4^4$ . V podstatě se jedná o čtyřosý astigmatismus, který je určen čtyřmi body v každém směru namísto dvou bodů, jak je tomu u běžného astigmatismu. U subjektivní refrakce tato aberace ztěžuje určení osy cylindru. Quadrafoil ovlivňuje zrakovou ostrost tak, že obraz je vidět neostrý ve více směrech a způsobuje paprskovité vnímání světelných zdrojů, zhoršuje kontrast a zvyšuje sensibilitu na světlo. [3, 19]



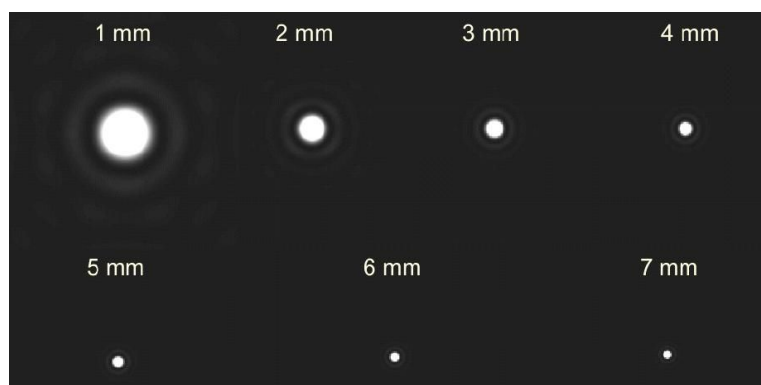
Obr. č 11 Quadrafoil [3]

### 3.3 Vliv aberací na kvalitu obrazu

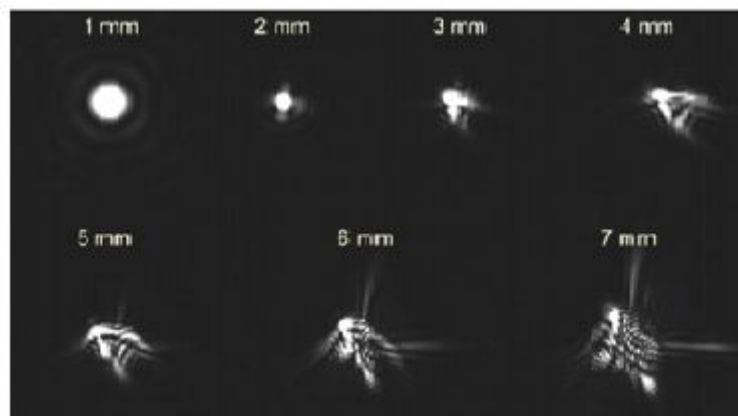
Vliv jednotlivých aberací na zrak byl již popsán v kapitole 3.1 a 3.2, nyní se budeme obecně věnovat číselnému popisu vlivu na kvalitu obrazu. Každá z aberací vyšších řádů určitým způsobem ovlivňuje vidění, tento vliv však úměrně roste s velikostí pupily. Čím je širka zornice větší, tím dochází ke zvětšení vlivu jednotlivých aberací na zrakový vjem. Aberace vyšších řádů (HOA) působí hned na několik parametrů jako je: vísus, kontrastní citlivost, barevné vidění, vidění za šera, vidění v mlze a noční vidění. Proto, aby se dalo zjistit, jaký vliv budou mít jednotlivé aberace na deformaci, přenos a vnímání obrazu pozorovaného bodu na sítnici, se používá matematicko - fyzikálních funkcí, které nám dokážou tyto zákonitosti popsat a vymodelovat 2 D grafický obraz sítnicových bodů ovlivněných HOA. Mezi tyto funkce patří funkce PSF, MTF a Strehlov poměr. [3, 19]

- **Funkce PSF** (*point spread function*) je bodovou rozptylovou funkcí, která dokáže vytvořit simulaci, jak bude vypadat libovolný bodový obraz na sítnici po ovlivnění libovolnou aberací, či skupinou aberací. Tato funkce je tedy závislá na šíři zornice a míře zastoupení jednotlivých aberací pro daný optický systém oka. U ideálního oka by byl obrazem na sítnici bod, u malých průměrů pupil bude na sítnici obrazem bodu difrakční obrazec, pro větší průměry se zase projeví vliv aberací.

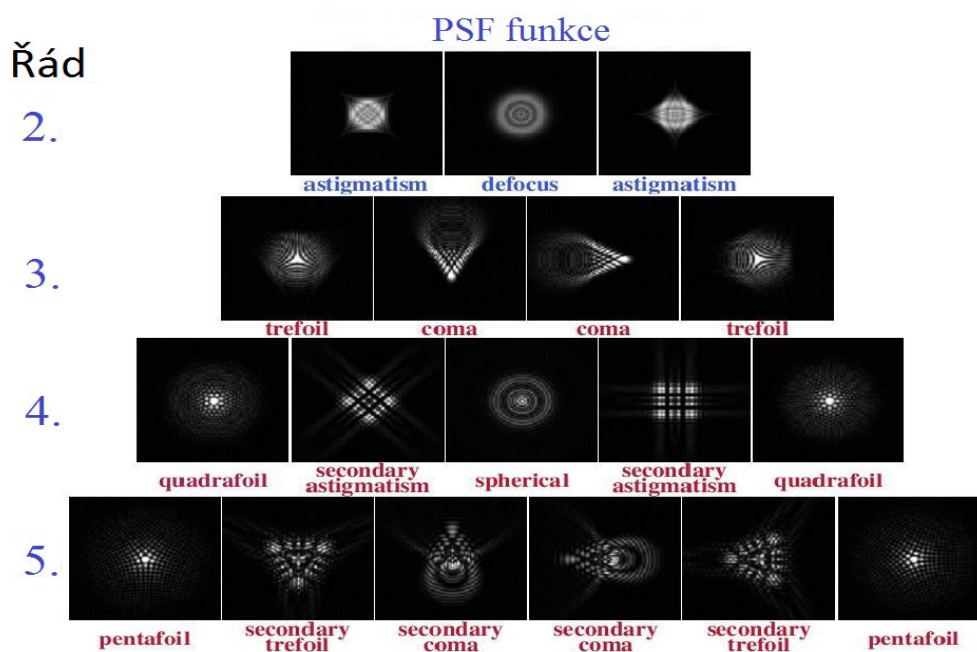
[3, 19]



Obr. č. 12 PSF funkce ideálního oka [4]



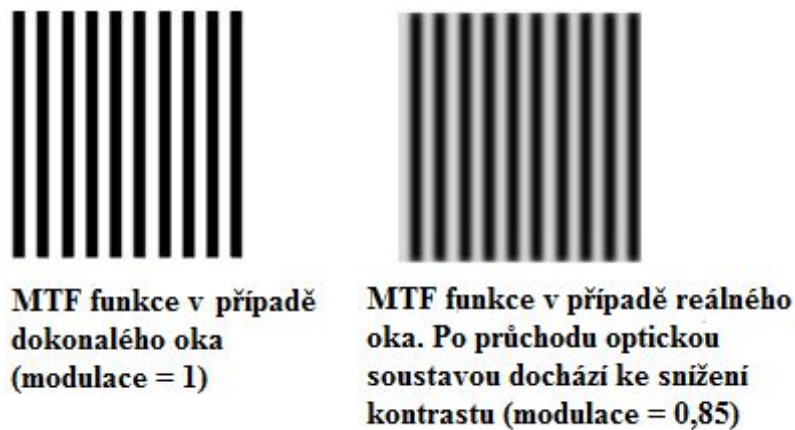
Obr. č. 13 PSF funkce reálného oka [4]



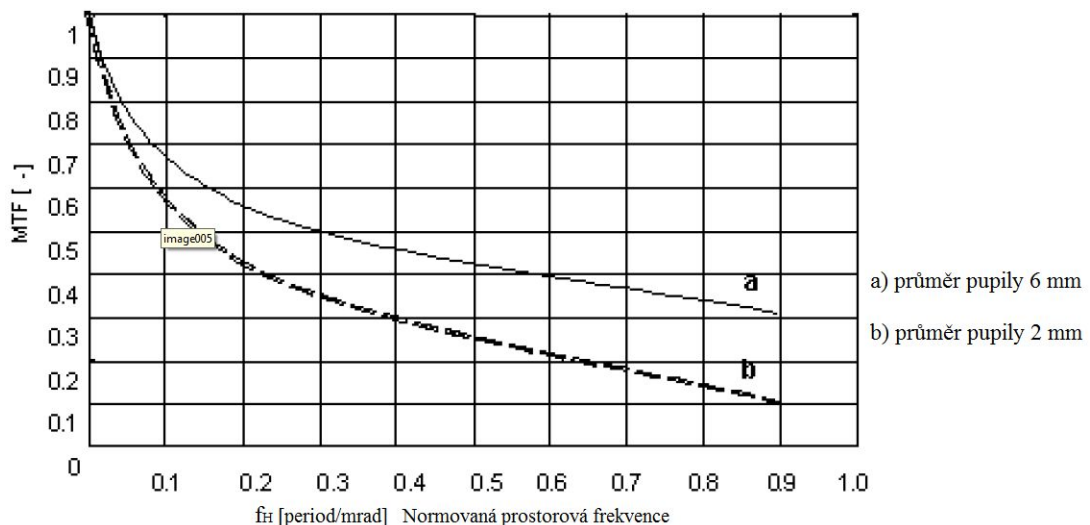
Obr. č. 14 PSF funkce jednotlivých aberací do 5. řádu [3]

- **Funkce MTF** (*modulation transfer function*) je modulovanou přenosovou funkcí lidského oka. Je dána vztahem  $MTF = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$ , kde  $I_{max}$  je maximální intenzita a  $I_{min}$  minimální intenzita. Popisuje účinnost přenosu kontrastu mezi vnějším pozorovaným bodem a bodem zobrazeným a vnímaným na sítnici. Její hodnota se mění v závislosti na šíři zornice, aberacích daného optického systému oka a světelných podmínkách okolí. Její krajní mez je určena hustotou čípků v oblasti žluté skvrny a tím i dosaženým vízem. U očí se správně stanovenou sféro - cylindrickou korekcí má na MTF funkci největší vliv aberace vyššího řádu.

[3, 19]



**Obr. č. 15 MTF funkce při 100% přenosu nalevo a při 85% přenosu napravo [upraveno, 3]**



**Graf č. 1 znázorňuje MTF funkci reálného oka pro různé průměry zornic [upraveno, 3]**



- **Strehlův poměr** se používá pro hodnocení kvality vytvořeného obrazu přes optickou soustavu oka. Je dán vztahem  $S = \frac{I}{I_0}$ , kde  $I$  je maximum reálné intenzity PSF a  $I_0$  je maximum ideální intenzity PSF. Jeho hodnoty se pohybují v rozmezí od 0 do 1, kde 0 představuje soustavu nezobrazující obraz a 1 ideální soustavu nezatíženou žádnými vadami. Jako prakticky dokonalé zobrazení se bere  $S > 0,8$ , v optometrii je obvykle  $S \ll 1$ .

[3, 4, 19]

Změna zrakové ostrosti vlivem působení HOA při přirozeném denním osvětlení se projeví jen při jejich velmi vysokých hodnotách, ovšem za šera, mlhy nebo v deštivém počasí, kdy intenzita osvětlení klesá, dochází k fyziologickému rozšíření zornice, a tím k nárůstu vlivu aberací vyšších řádů. [3]

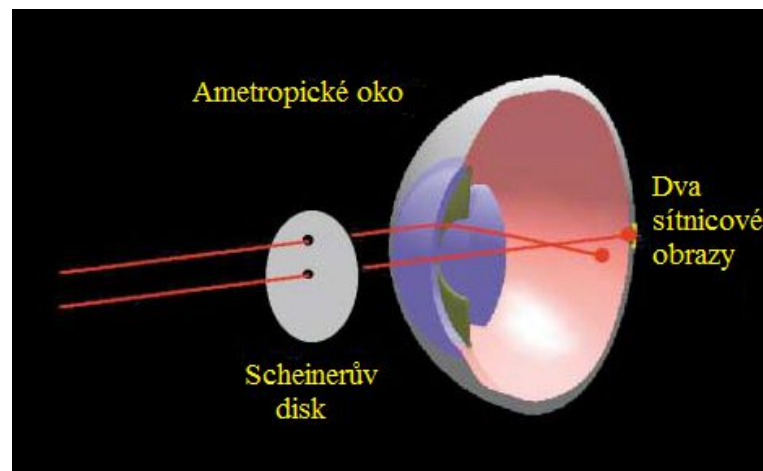
Aberace vyšších řádů také snižují kontrastní senzitivitu, která souvisí s MTF funkcí. Vlivem HOA také dochází k nepřesnému stimulu čípků na sítnici, což má za následek zhoršené vnímání barev. Je dokázáno, že zohledněním HOA v korekci dochází k lepšímu zaostření obrazu a přesnějšímu stimulu fotosensitivních buněk sítnice, což způsobuje zlepšení kvality barevného vidění a zvyšuje prokreslenost a sytost obrazu. Největší vliv HOA na zrak se projevuje v noci, kdy je zornička maximálně dilatovaná, může dojít ke sníženému vnímání kontrastu a neostrému vidění, venkovní světelné zdroje (pouliční osvětlení, světla aut) mohou být obklopeny rušivými svatozářemi („halo“ efekty), HOA se také podílí na vzniku noční myopie. [3]

## 4 Měření aberací lidského oka pomocí Shack-Hartmanova senzoru

Aberometr je přístroj, který slouží k měření aberací lidského oka, existuje hned několik typů aberometrů, které fungují na odlišných principech. My však v této práci používáme aberometr i-profiler od firmy Carl Zeiss, který pracuje na základě Shack-Hartmanova senzoru, proto se budeme zabývat tímto typem.

### 4.1 Historie měření aberací

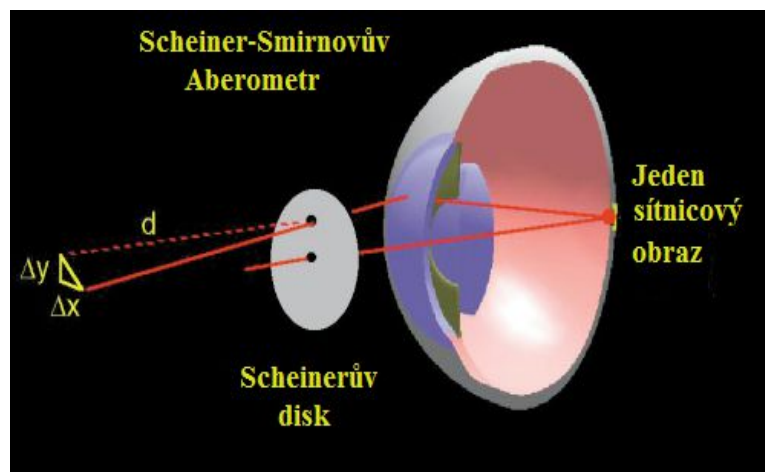
Téměř před čtyřmi sty roky slavný jezuitský filozof a astronom Christopher Scheiner, který byl profesorem na univerzitě v Ingolstadtu, demonstroval zaostřovací schopnost lidského oka pomocí jednoduchého zařízení známého jako Scheinerův disk. Scheiner ukázal, že v případě opticky nedokonalého oka dochází při pohledu skrze neprůhledný disk se dvěma otvory na jeden vzdálený bod světla, jako je například hvězda na nebi, k vytvoření dvou sítnicových obrazů, jak je znázorněno na obrázku č. 16. [ 9]



Obr. č. 16 Pohled přes Scheinerův disk [upraveno, 9]

Pokud je optická nedokonalost oka jednoduchý případ rozostření, pak dva sítnicové obrazy mohou být zarovnány do jedné polohy jako jeden zobrazením přes brýlové čočky příslušné optické mohutnosti. U optických aberací jiných než je rozostření však jednoduchá čočka nezobrazí dva obrázky do koincidence. V takových případech je třeba zavést obecnou metodu pro kvantifikaci refrakční vady oka na každém místě zornice. Toho je dosaženo použitím pevného světelného zdroje pro centrální referenční otvor a pohyblivý zdroj světla pro vnější otvor. Pomocí nastavení pohyblivého zdroje horizontálně a vertikálně je izolovaný paprsek světla posouván tak dlouho, dokud

neprotne fixní paprsek světla na sítnici a vyšetřovaná osoba nyní hlásí, že vidí jediný bod světla. Po nastavení posunu vzdálenosti  $y$  jsou měřeny  $\Delta x$  a  $\Delta y$  paprskové aberace oka pro daný pupilární bod. Tento subjektivní Aberometr byl poprvé popsán Smirnovem a byl používán značně ve vizuálních optických výzkumech posledních 40 let minulého století. [9]

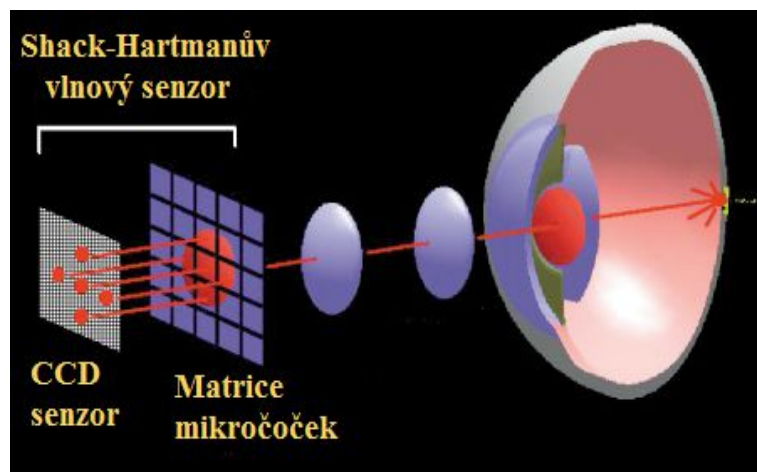


Obr. č. 17 Scheiner-Smirnovův subjektivní aberometr [upraveno, 9]

Chceme-li přetvořit Scheiner-Smirnovův subjektivní aberometr na objektivní aberometr, je potřeba obrátit směr šíření světla umístěním bodu světla na sítnici. Toto místo se pak stává bodovým zdrojem, který vyzařuje světlo zpět z oka. Astronomičtí a optičtí návrháři přidali další otvory do Scheinerova disku a takto nově vzniklý disk nazvali Hartmannovým diskem. [9]

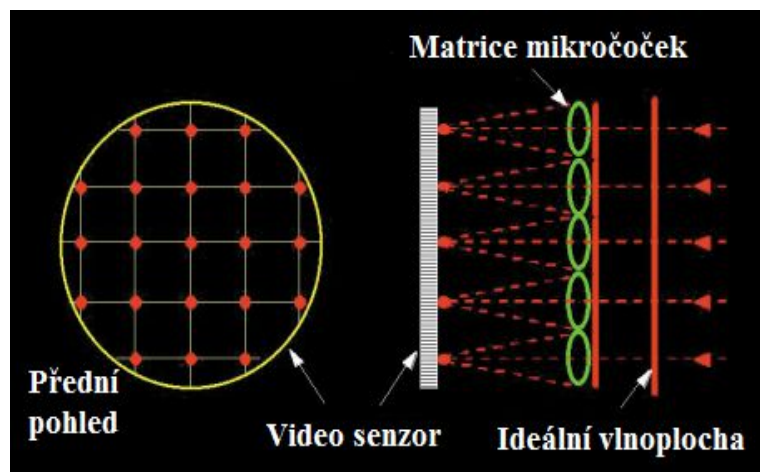
#### 4.2 Měření aberací pomocí aberometru i-profiler

Základní princip by se dal vysvětlit tak, že pomocí laserové diody je generováno laserové záření, které je usměrněno do úzkého svazku, který na sítnici vytvoří bodový zdroj světla, ze kterého se odražené vlnění šíří okem směrem k zornici. Po průchodu optickými očními medii je vlnoplocha vystupující zornicí detekována pomocí Shack-Hartmannova senzoru (S-H senzoru). V případě ideálního oka by se jednalo o rovinnou vlnoplochu. Vlnoplocha skutečného oka je deformovaná vlivem aberací jeho optického systému. Po detekci této vlnoplochy je možné ji na základě např. Zernikeho analýzy vyhodnotit a zjistit výskyt a míru zastoupení jednotlivých aberací. [3, 9]



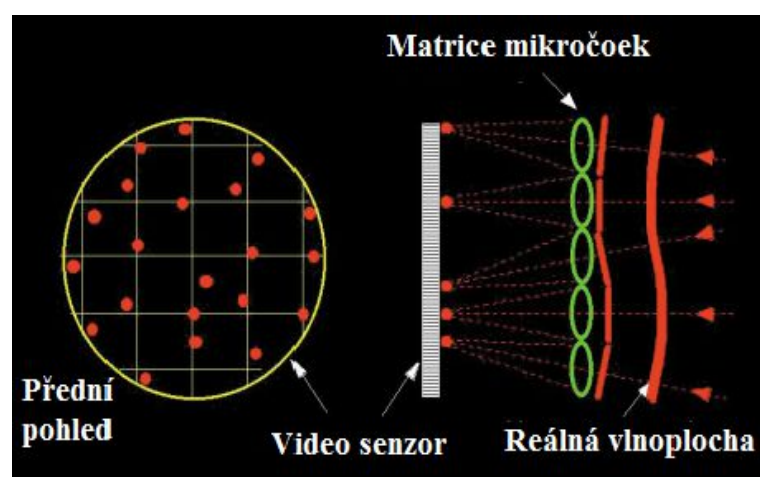
**Obr. č. 18 Schéma principu detekce aberací pomocí S-H senzoru [upraveno, 9]**

Základním stavebním prvkem tedy tohoto aberometru je S-H senzor. S-H senzor je senzor tvořený diskem, který jak již bylo uvedeno, konstrukčně vyšel ze Scheinerova disku, ale došlo u něho k přidání dalších otvorů, na které následně přesně navozuje matrice mikročoček. Každý otvor v tomto disku potom izoluje úzké svazky paprsků vystupující z oka přes různé části zornice. Další důležitou součástí S-H senzoru je video senzor, na který dopadají paprsky izolované diskem a dochází k detekci jejich horizontálního a vertikálního posunutí od odpovídající, neaberační, referenční polohy. Senzor je tedy tvořen matricí stejnoměrně rozložených mikročoček (něco jako složené oko hmyzu), v jejichž ohniskové rovině leží CCD detektor. CCD detektor je plošný detektor, který následně tyto jemné odklony zaznamenává. Měření lze provádět pro různé průměry pupily v celém jejím rozsahu. Když senzor zaregistruje vlnoplochu rovnoběžnou s matricí mikročoček, pak je na detektoru tato vlnoplocha zobrazena jako soustava bodů ležících přesně v osách mikročoček, jak je vidět na obrázku č. 19. [3, 9]



**Obr. č. 19** Zobrazení ideální vlnplochy na Shack-Hartmanově senzoru [ upraveno, 9]

V případě deformované vlnplochy, např. vlivem aberací, bude lokální sklon vlnplochy rozdílný pro každou mikročočku. Bodové obrazy budou potom ležet mimo optické osy mikročoček a dají vzniknout neuspořádané kolekci složené právě z těchto bodových obrazů, jak je znázorněno na obrázku č. 20. Na základě měření posuvu každého z bodů od pravidelné struktury mřížky (odklonu od odpovídající osy čočky) můžeme odvodit sklon aberované vlnplochy, když vstoupí na odpovídající čočku. Matematickou integrací informací sklonu v daném bodě lze zrekonstruovat danou vlnplochu a následně analyzovat, např. rozkladem do Zernikeho polynomů, jak je tomu užito v operačním systému aberometru i-profiler. I-profiler tedy umožňuje měřit aberace (LOA, HOA) a topografii rohovky. [3, 9]



**Obr. č. 20** Zobrazení reálné vlnplochy na Shack-Hartmanově senzoru [upraveno, 9]

Mezi další známé typy aberometrů patří:

- Laser Ray Tracing aberometr
- Tscherningův aberoskop

[3]

## 5 Výskyt aberací oka v normální populaci

Od ledna roku 2000 více než 200 optometrických a oftalmologických článků psalo o měření očí pomocí Shack-Hartmannova aberometru. Z těchto článků bylo 5 studií zaměřených na výzkum velké populace normálních, zdravých dospělých očí, které neprodělaly refrakční operaci, a průměr jejich zorniček byl nejméně 5,0 mm. Tito autoři byli kontaktováni a byla vyžádána kopie jejich dat Northeasternskou státní univerzitou v Oklahomě pod vedením profesorů Thomase O. Salmona a Corina van de Pola, kde právě probíhal výzkum normálních hodnot Zernikeho koeficientů a RMS pro lidské oči. Kromě toho byly posbírány údaje i z univerzitních přidružených laboratoří: U.S. Armádní Letecko-lékařské výzkumné laboratoře ve Fort Ruckeru v Alabamě a U.S. Námořnického refrakčního a operačního centra v San Diegu v Kalifornii. Všechna data byla souhrnně vyhodnocena v publikaci [1], která je popsána v této kapitole. [1]

### 5.1 Subjekty a metody

Celkem byly posbírány data očí od 1433 měřených subjektů. Data obsahovala průměr zorniček a Zernikeho koeficienty až do 5. nebo 6. řádu pro každé jednotlivé oko. Zernikeho koeficienty obdržené od každé laboratoře byly analyzovány a většina zorniček měla průměr 6,0 mm a následně byly tyto koeficienty přepočítány pro zorničky s průměry 5 mm, 4 mm a 3 mm pomocí programu MATLAB (The MathWorks, Inc.). U 355 očí byly průměry zornice menší než 6 mm a proto tyto oči byly vyloučeny z šesti - milimetrové analýzy. Všechny oči byly použity pro analýzu 5,0 mm a menší. [1]

Pokud byly původní data naměřeny pomocí odlišné vlnové délky než 550 nm, tak došlo k jejich přepočítání na odpovídajících 550 nm za použitím chromatických korekčních postupů popsaných v publikaci [8]. Poté co byly údaje upraveny na společnou velikost zornice a společnou vlnovou délku byly vypočítány:

- Průměrné hodnoty Zernikeho koeficienty (včetně znamének) a jejich směrodatné odchylky pro zorničky o průměru 6 mm, 5 mm, 4 mm a 3mm.
- Průměrné hodnoty absolutních Zernikeho koeficientů a jejich směrodatné odchylky pro zorničky o průměru 6 mm, 5 mm, 4 mm a 3mm.

- Průměrné RMS hodnoty pro vybrané kombinované aberace jako je koma ( $Z_3^{-1}, Z_3^1, Z_5^{-1}, Z_5^1$ ), sférická aberace ( $Z_4^0$  a  $Z_6^0$ ) a pro jednotlivé aberace 3. až 6. řádu včetně příslušných směrodatných odchylek.
- Průměrné RMS hodnoty pro jednotlivé řády aberací (3. až 6. řád) a celkovou průměrnou hodnotu RMS z aberací 3. až 6. řádu včetně odpovídajících směrodatných odchylek

RMS hodnota byla vždy spočítaná pro každé oko zvlášť a následně byla spočítána její průměrná hodnota pro kompletní sadu dat. [1]

## 5.2 Porovnání mezi datovými skupinami

Tabulka č. 2 shrnuje charakteristiky datových souborů zahrnutých v analýze. Celkem byly údaje posbírány z 2560 normálních dospělých očí (1334 pravých očí, 1226 levých očí) od 1433 subjektů. Subjekty zahrnovaly různý věk, refrakční vady, zkušební podmínky, pohlaví, národnost a byly použity různé varianty Shack-Hartmannova aberometru. Vlnový Skenovací přístroj (Visx) byl použit u 3 skupin, které představovaly 1322 očí, neboli 52 % z celkového množství dat. Dále bylo použito několik dalších klinických aberometrů (COAS, Wavefront Science, Topcon, Zywave, Bausch&Lomb), a 4 pracoviště používaly jejich vlastní laboratorní Shack-Hartmannův přístroj. [1]

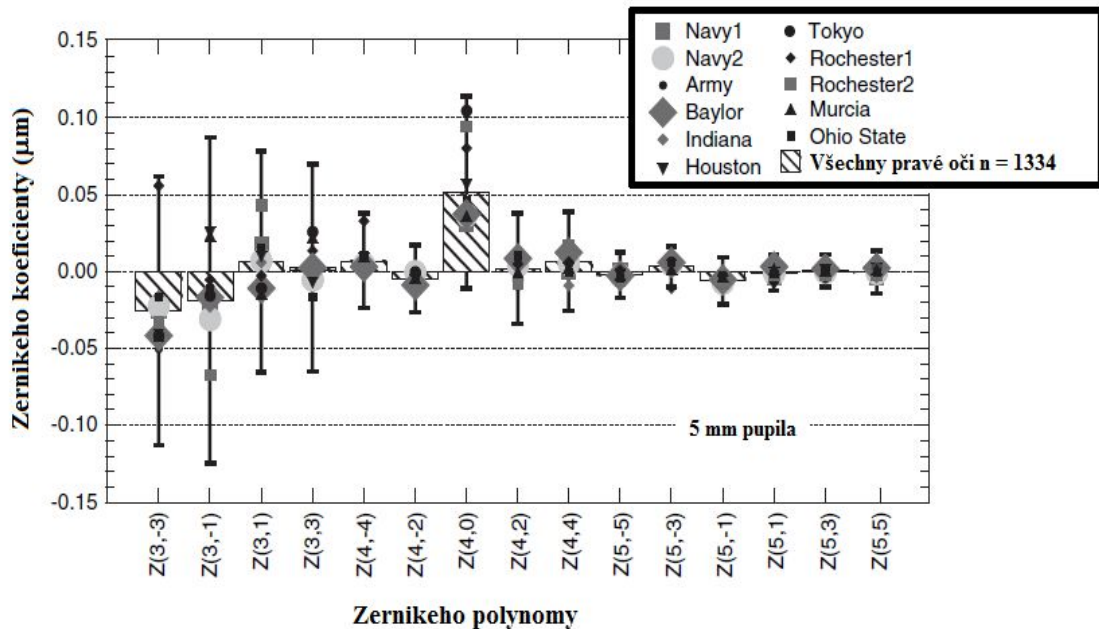
Data set	Počet očí P/L celkově	Průměrný věk (y) ± SD (rozpětí)	Průměrná sférická korekce (D) ± SD (rozpětí)	Komentář (použitý aberometr)
Navy1	186/188 (374)	32.8 ± 6.9	-3.21 ± 1.54	Preop patients (WaveScan)
Navy2	207/209 (416)	30.6 ± 4.8	0.09 ± 0.59	Navy pilots (WaveScan)
Army	47/47 (94)	29.9 ± 7.6	-0.58 ± 0.98	5.0 mm pupil, Army pilots (COAS)
Baylor	283/249 (532)	41.3 ± 10.2	-2.94 ± 2.87	Preop patients (WaveScan)
Indiana	100/100 (200)	26.1 ± 5.6	-3.1 ± 3	Cyclopentolate (laboratory device)
Houston	67/0 (67)	24.8 ± 4.2	-2.50 ± 2.25	Phenylephrine (laboratory device)
Tokyo	66/68 (134)	46.7 ± 13.8	-2.40 ± 2.98	Topcon
Rochester1	109/109 (218)	40.8 ± 10.6	-2.20 ± 2.95	5.7 mm pupil (laboratory device)
Rochester2	160/154 (314)	33.1 ± 8.2	-3.36 ± 1.54	Zywave
Murcia (Spain)	89/82 (171)	26 ± 6	-0.50 ± 3.00	Laboratory device
Ohio State	20/20 (40)	24 ± 5	-3.11 ± 0.96	5.0 mm pupil (COAS)
<b>Kompletní data set</b>	<b>1334/1226 (2560)</b>	<b>33.8 ± 7.8</b>	<b>-2.20 ± 2.06</b>	—

Tabulka č. 2 Porovnání jednotlivých data setů [upraveno, 1]

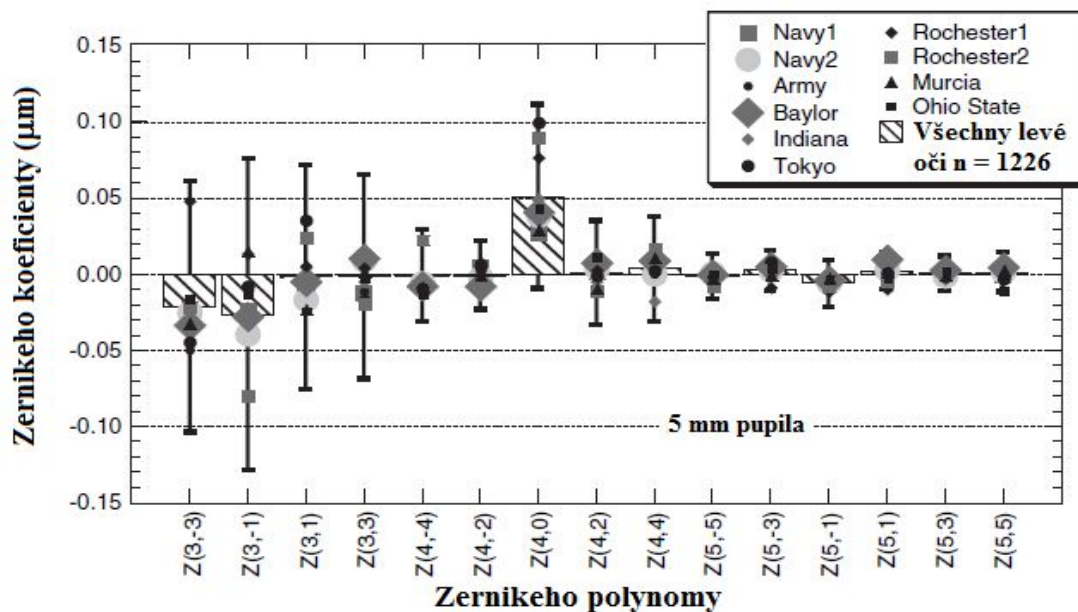
Na úvod této studie proběhlo porovnání průměrných hodnot Zernikeho koeficientů (se znaménky) z různých datových souborů pro zornici o průměru 5 mm, což byla největší šíře zornice společná pro všechny oči. Tyto výsledky jsou prezentovány na grafu č. 2 pro pravé oči a na grafu č. 3 pro levé oči. Kromě tří typů aberací  $Z_3^{-3}$  (trefoil),



$Z_3^{-1}$  (vertikální koma), a  $Z_4^0$  (sférické aberace) byla většina ostatních polynomů seskupených blízko nuly. Průměrné a střední hodnoty pro tyto 3 typy aberací se výrazně lišily od nuly a byly sledovány pomocí Dvou-párového studentova t-testu ( $\alpha < 0,1$ ) a neparametrického testu. [1]

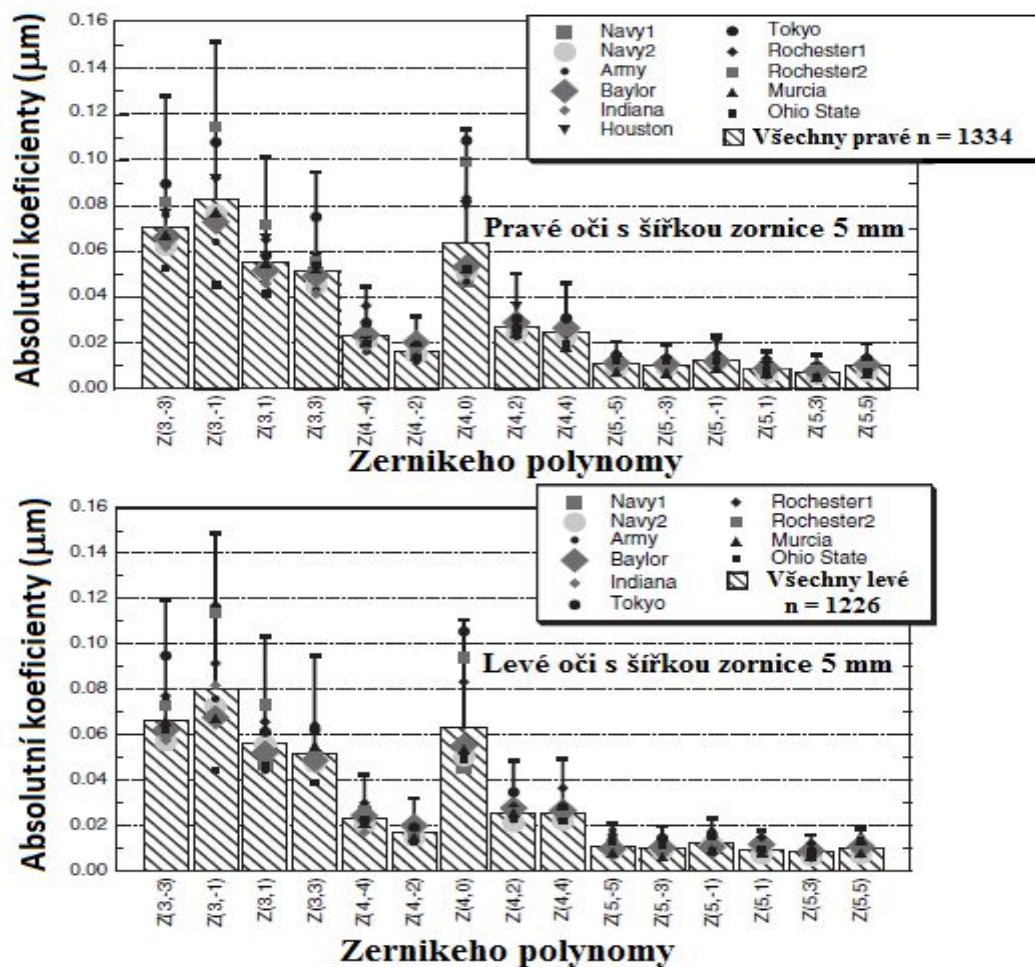


**Graf č. 2** Závislost velikosti Zernikeho koeficientů pro sledované Zernikeho polynomy u pravých očí. Na grafu jsou různými symboly znázorněny střední hodnoty z každého souboru dat, přitom velikosti symbolů odpovídají relativnímu počtu očí v každé sadě. Pruhované boxy s chybovou úsečkou zobrazují průměrnou a standardní odchylku pro data sjednocená ze všech pracovišť. [upraveno, 1]



Graf č. 3 Závislost velikosti Zernikeho koeficientů pro sledované Zernikeho polynomy u levých očí. Na grafu jsou různými symboly znázorněny střední hodnoty z každého souboru dat, přitom velikosti symbolů odpovídají relativnímu počtu očí v každé sadě. Pruhované boxy s chybovou úsečkou zobrazují průměrnou a standardní odchylku pro data sjednocená ze všech pracovišť. [upraveno, 1]

Výsledky pro absolutní Zernikeho koeficienty pro zorničky široké 5 mm jsou prezentovány na Grafu č. 4 (pro pravé oči nahoře a pro levé oči dole). V oblasti absolutních hodnot byly nejvýznamnější Zernikeho polynomy pro:  $Z_3^{-1}$  (vertikální koma),  $Z_3^{-3}$  (šikmý trefoil),  $Z_4^0$  (sférická vada),  $Z_3^1$  (horizontální koma) a  $Z_3^{-3}$  (horizontální trojlístek), všechny tyto polynomy měly průměrné hodnoty v rozsahu 0,05  $\mu\text{m}$  až 0,08  $\mu\text{m}$ . Ostatní polynomy vyšších řádů vykazovaly průměrné hodnoty menší než 0,03  $\mu\text{m}$  s klesajícími hodnotami pro vyšší řády. [1]



Graf č. 4 Závislost velikosti absolutních Zernikeho koeficientů pro sledované Zernikeho polynomy. Na grafu jsou různými symboly znázorněny střední hodnoty z každého souboru dat, přitom velikosti symbolů odpovídají relativnímu počtu očí v každé sadě. Pruhované boxy s chybovou úsečkou zobrazují průměrnou a standardní odchylku pro data sjednocená ze všech pracovišť. [upraveno, 1]

### 5.3 Celkové průměrné hodnoty aberací

Celkové průměrné hodnoty a standardní odchylky pro absolutní Zernikeho koeficienty shromážděné ze všech datových souborů pro zorničky o průměrech 6,0 mm, 5,0 mm, 4,0 mm a 3,0 mm jsou prezentovány v tabulce č. 3. Z důvodu, že průměrné hodnoty pravých a levých očí byly podobné, tak jejich absolutní koeficienty byly spojeny, stejné souřadnicové rozsahy usnadňují srovnání mezi velikostmi zornic. Standardní odchylky se rovnají přibližně 85 % velikosti příslušné průměrné absolutní hodnoty. [1]

Zernikeho polynomy	průměr zornice (mm)			
	6.0	5.0	4.0	3.0
$Z_3^{-3}$	0.106 ± 0.088	0.069 ± 0.056	0.040 ± 0.033	0.019 ± 0.016
$Z_3^{-1}$	0.143 ± 0.118	0.082 ± 0.069	0.045 ± 0.038	0.021 ± 0.018
$Z_3^1$	0.090 ± 0.076	0.056 ± 0.047	0.033 ± 0.027	0.015 ± 0.013
$Z_3^3$	0.081 ± 0.066	0.052 ± 0.043	0.030 ± 0.026	0.014 ± 0.013
$Z_4^{-4}$	0.038 ± 0.033	0.023 ± 0.020	0.012 ± 0.011	0.005 ± 0.004
$Z_4^{-2}$	0.027 ± 0.023	0.017 ± 0.015	0.009 ± 0.008	0.003 ± 0.003
$Z_4^0$	0.128 ± 0.096	0.064 ± 0.049	0.028 ± 0.022	0.010 ± 0.008
$Z_4^2$	0.048 ± 0.039	0.026 ± 0.023	0.013 ± 0.013	0.005 ± 0.005
$Z_4^4$	0.043 ± 0.038	0.025 ± 0.022	0.013 ± 0.012	0.005 ± 0.005
$Z_5^{-5}$	0.025 ± 0.022	0.011 ± 0.010	0.004 ± 0.003	0.001 ± 0.001
$Z_5^{-3}$	0.024 ± 0.021	0.010 ± 0.009	0.003 ± 0.003	0.001 ± 0.001
$Z_5^{-1}$	0.028 ± 0.024	0.012 ± 0.011	0.004 ± 0.004	0.001 ± 0.001
$Z_5^1$	0.020 ± 0.018	0.009 ± 0.008	0.003 ± 0.003	0.001 ± 0.001
$Z_5^3$	0.018 ± 0.016	0.008 ± 0.007	0.003 ± 0.002	0.001 ± 0.001
$Z_5^5$	0.023 ± 0.021	0.010 ± 0.009	0.003 ± 0.003	0.001 ± 0.001
$Z_6^{-6}$	0.019 ± 0.018	0.007 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
$Z_6^{-4}$	0.014 ± 0.014	0.005 ± 0.005	0.001 ± 0.001	0.000 ± 0.000
$Z_6^{-2}$	0.012 ± 0.011	0.004 ± 0.004	0.001 ± 0.001	0.000 ± 0.000
$Z_6^0$	0.024 ± 0.020	0.008 ± 0.007	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
$Z_6^2$	0.016 ± 0.016	0.006 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
$Z_6^4$	0.017 ± 0.016	0.006 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
$Z_6^6$	0.020 ± 0.018	0.007 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000

Aberace od 3. do 5. řádu byly změřeny pro 6 mm širokou zornici u 2205 očí, pro 5, 4 a 3 mm širokou zornici u 2560 očí. Aberace 6. řádu byly změřeny pro 6 mm širokou zornici u 1871 očí a pro 5, 4 a 3 mm širokou zornici u 2008 očí.

**Tabulka č. 3 Průměrné hodnoty absolutních Zernikeho koeficientů od 3. do 6. řádu a jejich směrodatné odchylky v mikrometrech pro 4 různé průměry zornice. [upraveno, 1]**

Celkovou průměrnou velikost RMS polárních Zernikeho polynomů pro zornice o průměru 6 mm, 5 mm, 4 mm a 3 mm zobrazuje tabulka č. 4 a graf č. 5. Polynomy dosahující nejvyšších hodnot pro 6 mm širokou pupilu jsou:

- $Z_3^1$  koma s hodnotou 0,19  $\mu\text{m}$
- $Z_3^3$  trefoil o velikosti 0,15  $\mu\text{m}$
- $Z_4^0$  sférická aberace inklinující k 0,13  $\mu\text{m}$

Ostatní polynomy vyššího řádu ukázaly progresivní pokles. Standardní odchylky byly kolem 70 % příslušné průměrné hodnoty. Tabulka č. 4 také ukazuje průměrné RMS hodnoty (pravých a levých očí dohromady) pro kombinovanou komu ( $Z_3^{-1}$ ,  $Z_3^1$ ,  $Z_3^3$  a  $Z_5^{-1}$ ) kombinovanou sférickou aberaci ( $Z_4^0$  a  $Z_6^0$ ) a všechny Zernikeho polynomy 3. až 6. řádu u zorniček s průměrem 6 mm. Na grafu č. 6 je znázorněna změna RMS hodnoty u aberací vyššího řádu jako funkce průměru zornice. [1]



Průměrná hodnota RMS byla:

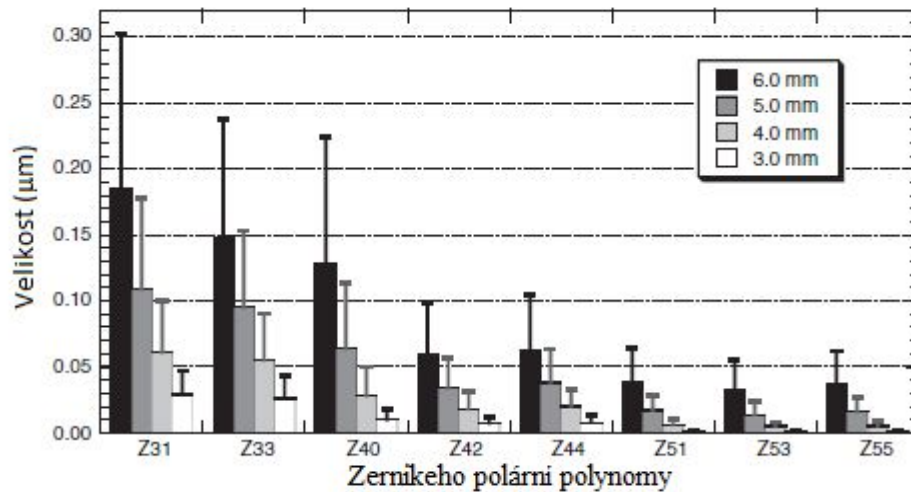
- Pro aberace třetího řádu = 0,25  $\mu\text{m}$
- Pro aberace čtvrtého řádu = 0,17  $\mu\text{m}$
- Pro celkové aberace vyššího řádu (3. - 6. řád) = 0,33  $\mu\text{m}$

[1]

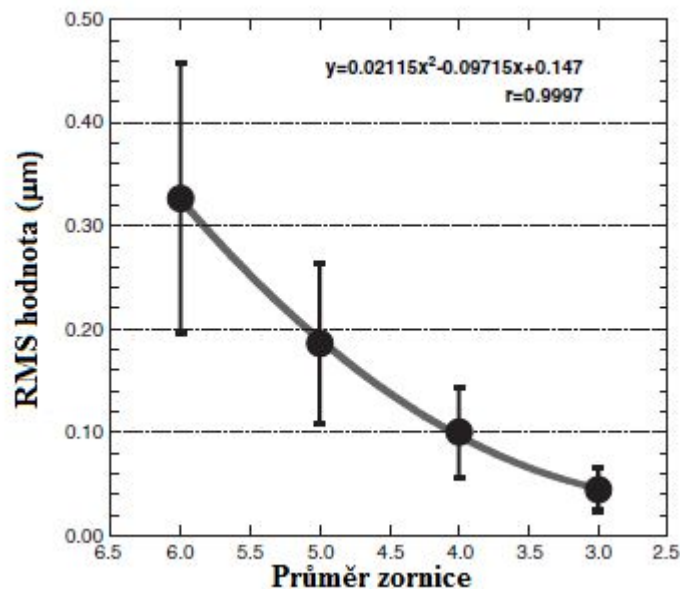
Směrodatná odchylka	Pupilární průměr (mm)			
	6.0	5.0	4.0	3.0
<b>Polární polynomy</b>				
Z <sub>31</sub>	0.185 ± 0.118	0.109 ± 0.069	0.061 ± 0.039	0.029 ± 0.018
Z <sub>33</sub>	0.147 ± 0.091	0.095 ± 0.058	0.055 ± 0.035	0.026 ± 0.017
Z <sub>40</sub>	0.128 ± 0.096	0.064 ± 0.049	0.028 ± 0.022	0.010 ± 0.008
Z <sub>42</sub>	0.060 ± 0.039	0.034 ± 0.023	0.018 ± 0.013	0.007 ± 0.005
Z <sub>44</sub>	0.063 ± 0.042	0.038 ± 0.025	0.020 ± 0.013	0.008 ± 0.005
Z <sub>51</sub>	0.039 ± 0.025	0.017 ± 0.011	0.006 ± 0.004	0.001 ± 0.001
Z <sub>53</sub>	0.033 ± 0.022	0.014 ± 0.010	0.005 ± 0.003	0.001 ± 0.001
Z <sub>55</sub>	0.037 ± 0.025	0.016 ± 0.011	0.005 ± 0.004	0.001 ± 0.001
Z <sub>60</sub>	0.024 ± 0.020	0.008 ± 0.007	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
Z <sub>62</sub>	0.023 ± 0.017	0.008 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
Z <sub>64</sub>	0.025 ± 0.018	0.009 ± 0.007	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
Z <sub>66</sub>	0.030 ± 0.022	0.010 ± 0.008	0.003 ± 0.002	0.000 ± 0.000
<b>Kombinované polynomy</b>				
Smišená koma (Z <sub>3<sup>±1</sup></sub> + Z <sub>5<sup>±1</sup></sub> )	0.192 ± 0.115	0.112 ± 0.068	0.062 ± 0.039	0.029 ± 0.018
Smišená sférická aberace (Z <sub>4<sup>0</sup></sub> + Z <sub>6<sup>0</sup></sub> )	0.133 ± 0.094	0.065 ± 0.048	0.029 ± 0.021	0.010 ± 0.008
<b>Zernikeho řády</b>				
3	0.251 ± 0.123	0.153 ± 0.075	0.087 ± 0.043	0.041 ± 0.021
4	0.169 ± 0.090	0.090 ± 0.046	0.043 ± 0.022	0.016 ± 0.008
5	0.067 ± 0.034	0.030 ± 0.016	0.010 ± 0.005	0.002 ± 0.001
6	0.057 ± 0.030	0.020 ± 0.011	0.005 ± 0.003	0.001 ± 0.001
Celkové aberace vyšších řádů (řádu 3-6)	0.327 ± 0.130	0.186 ± 0.078	0.100 ± 0.044	0.045 ± 0.021

Aberace od 3. do 5. řádu byly změřeny pro 6 mm širokou pupilu u 2205 očí a pro 5, 4 a 3 mm širokou zornici u 2560 očí. Aberace 6. řádu byly změřeny pro 6 mm širokou zornici u 1871 očí a pro 5, 4 a 3 mm širokou zornici u 2008 očí.

Tabulka č. 4 Průměrné RMS hodnoty s příslušnými směrodatnými odchylkami v mikrometrech pro polární a kombinované Zernikeho polynomy, jednotlivé Zernikeho řády a celkovou hodnotu aberací vyššího řádu. [upraveno, 1]



Graf č. 5 Závislosti šíře zornice na průměrné celkové hodnotě RMS polárních Zernikeho polynomů v mikrometrech, chybové úsečky ukazují směrodatnou odchylku. [upraveno, 1]



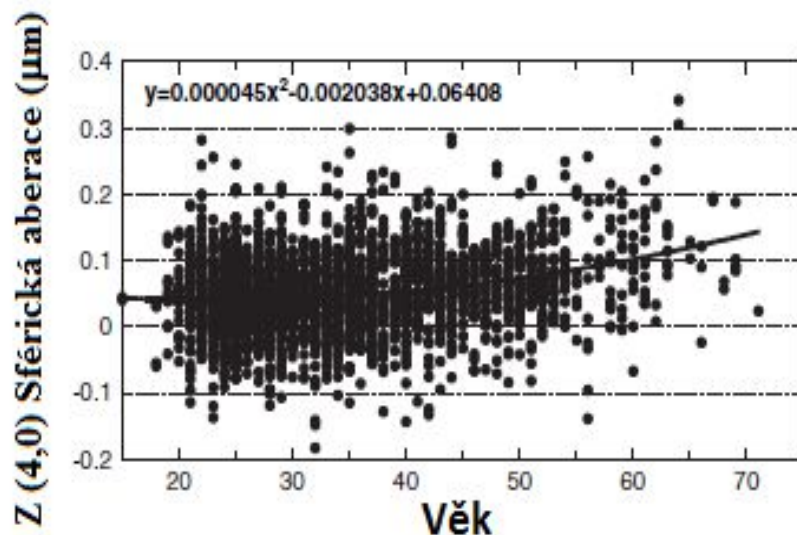
Graf č. 6 Závislost průměru zornice na hodnotě RMS. Polynomická křivka druhého řádu, popisuje vztah mezi průměrem zornice v milimetrech a hodnotou RMS pro celkové aberace vyššího řádu s korelačním koeficientem  $r = 0,9997$ . [upraveno, 1]

#### 5.4 Korelace s věkem

Podrobnější analýza s ohledem na proměnné, jako je věk nebo refrakční vady byla mimo primární rozsah této studie, nicméně omezená analýza závislosti HOA na věku je prezentována na Grafu č. 7, který znázorňuje rozložení  $Z_4^0$  hodnoty pro 5,0 mm zorničku vnesenou jako funkci věku. Postupné zvýšení hodnoty  $Z_4^0$  s věkem bylo patrné, stejně tak pro Zernikeho polynomy  $Z_3^{-1}$ ,  $Z_3^1$ ,  $Z_4^2$  a  $Z_4^4$  a všechny RMS kategorie

v tabulce č. 4 také ukázaly významnou korelaci s věkem. Nicméně, korelační koeficienty byly malé a hodnoty HOA jsou rozloženy přes široké zastoupení ve všech věkových skupinách. Z toho vyplývá, že i když věk je významný činitel, tak ostatní faktory hrají významnější roli v určování HOA jednotlivce. [1]

Ostatní studie, které zkoumaly vliv věku na HOA [6, 7] také zaznamenaly velký rozptyl u všech věkových kategorií. Z těchto výzkumů plyne, že obvykle během procesu emetropizace dochází k poklesu aberací až do dospělosti, kdy rohovko - čočkové vztahy a refrakční vady oka dosahují optimální rovnováhy. Ve středním věku změny čočky postupně ovlivňují vnitřní rovnováhu, což vede ke zvýšení HOA u starších očí. Mezi nejvýznamnější aberace vyvolané čočkovými změnami patří koma  $Z_4^0$ . [1]



Graf č. 7 závislost věku na hodnotě sférické aberace  $Z_4^0$  [upraveno, 1]

## 5.5 Výsledky normálních hodnot HOA

Statistické údaje znázorněné v tabulce č. 3 a 4 mohou být použity jako referenční hodnoty zdravých očí, užitečné pro diagnostiku a detekci očí s abnormálními optickými vlastnostmi. Přibližně 96 % očí má hodnoty Zernikeho koeficientů, sledované v tabulce č. 3, menší nebo stejné než součet průměrné hodnoty a dvojnásobku příslušné směrodatné odchylky. Stejně procentuelní zastoupení se vztahuje na rozložení RMS hodnot, které jsou uvedené v tabulce č. 4. Pokud tedy údaje, naměřené u konkrétního oka, přesahují uvedený součet průměru a dvojnásobku směrodatné odchylky, lze je považovat za podezřelé. [1]

Nejvýznamnější Zernikeho polynomy a jejich průměrné absolutní hodnoty pro 6,0 mm zorničku jsou:

- $Z_3^{-1} = 0,14 \mu\text{m}$
- $Z_4^0 = 0,13 \mu\text{m}$
- $Z_3^{-3} = 0,11 \mu\text{m}$

Průměr koeficientů  $Z_3^{-3}$  a  $Z_3^{-1}$  inklinuje k záporným hodnotám, ale  $Z_4^0$  je pozitivní. Všechny aberace třetího řádu  $Z_3^{-3}$ ,  $Z_3^{-1}$ ,  $Z_3^1$ ,  $Z_3^3$  mají významnou nenulovou průměrnou absolutní hodnotu. Průměrná celková hodnota RMS aberací vyššího řádu (3. - 6. řádu) je 0,33  $\mu\text{m}$  pro 6 mm širokou zornici. [1]

## 5.6 Vztah mezi aberacemi vyšších řádů a refrakčními vadami

V roce 2003 proběhla v Indii rozsáhlá studie očních vad a jejich vliv na vidění [5], kdy aberace očí byly měřeny pomocí Shack-Hartmannova aberometru u 100 mladých, zdravých, dospělých pacientů s širokým rozsahem refrakčních vad. Akomodace u každého jedince byla paralyzovaná a zornice byla rozšířena se středním průměrem 7,58 mm. [5]

Průměrný věk probandů byl  $26,1 \pm 5,6$  roku. Sférická složka refrakčních vad byla zjištěna pomocí subjektivní refrakce, a refrakční vady se pohybovaly v rozmezí od + 5,25 do -9.50 D, a astigmatismus se pohyboval v rozmezí od 0 do - 3,5 D. Pro výzkumné účely byly rozděleny refrakční vady do šesti skupin v závislosti na průměru sférického ekvivalentu v cykloplegii. [5]

	PSE (D)	Cylindr (D)	Počet očí
High myopia	-10.00 to -6.00	$\leq -1.00$	25
Moderate myopia	-6.00 to -3.00	$\leq -1.00$	45
Low myopia	-3.00 to -0.75	$\leq -1.00$	54
Emmetropia	-0.75 to +0.75	$\leq -1.00$	19
Hyperopia	+0.75 to +5.50	$\leq -1.00$	19
Astigmatism	-10.13 to +3.50	-1.25 to -3.50	38

**PSE = průměrný sférický ekvivalent**

Tabulka č. 5 Rozložení refrakčních vad [upraveno, 5]



### 5.6.1 Analýza dat

Analýza byla založena na datech, které byly naměřeny u očí se zorničkami s průměrem minimálně 6 mm. Ze získaných Zernikeho koeficientů (průměr ze tří měření) byla vypočítána celková RMS (s výjimkou prvního a druhého řádu aberací). Rovněž byla vypočítána RMS hodnota pro aberace třetího a čtvrtého řádu, která zahrnovala analýzu sférické aberace samostatně. Každé z očí probandů bylo zpracováno odděleně. Distribuce těchto různých měření napříč refrakčními skupinami byly vyhodnoceny statisticky s lineární regresí a jednostrannou analýzou odchylky ( $p < 0,05$  na hladině významnosti). [5]

### 5.6.2 Výsledky

Průměrná standardní odchylka ze tří opakovaných měření pro  $N = 200$  očí byla  $0,041 \mu\text{m}$  ( $0,065 \mu\text{m}$  pro vlnovou délku  $632.8 \text{ nm}$ ). Vztahy mezi velikostí aberací (RMS daného řádu aberací) a sférické refrakční vady jsou uvedeny v tabulce č. 6.

Průměr $\pm$ směr. odchylka	Všechny HOA	Třetího řádu	Čtvrtého řádu	Sférická aberace
Vysoká myopie	$0.316 \pm 0.123$	$0.225 \pm 0.125$	$0.174 \pm 0.099$	$0.108 \pm 0.133$
Střední myopie	$0.269 \pm 0.085$	$0.217 \pm 0.082$	$0.128 \pm 0.062$	$0.078 \pm 0.086$
Nízká myopie	$0.266 \pm 0.079$	$0.209 \pm 0.083$	$0.134 \pm 0.051$	$0.080 \pm 0.076$
Emetropie	$0.284 \pm 0.095$	$0.217 \pm 0.097$	$0.150 \pm 0.065$	$0.084 \pm 0.113$
Hypermetropie	$0.310 \pm 0.116$	$0.248 \pm 0.102$	$0.159 \pm 0.084$	$0.115 \pm 0.111$
Astigmatismus	$0.346 \pm 0.189^a$	$0.277 \pm 0.180$	$0.166 \pm 0.086$	$0.119 \pm 0.097$

**Tabulka č. 6 Průměrné RMS hodnoty s příslušnou směrodatnou odchylkou pro konkrétní řády aberací a refrakční skupiny [upraveno, 5]**

Sférická aberace očí ametropických se významně nelišila od očí emetropických. RMS hodnota aberací třetího řádu, čtvrtého řádu a všech aberací dohromady (3. až 10. řádu), u krátkozrakých a hypermetropických očí nekorelovala s refrakčními vadami. U astigmatických očí (astigmatismus  $>1 \text{ D}$ ), byla vyšší míra výskytu aberací vyššího řádu, než je vidět u očí s nízkým nebo žádným astigmatismem. Nezávislý t-test ukázal, že tento celkový rozdíl pro celkové aberace vyššího řádu byl statisticky významný ( $p < 0,05$ ). [5]

## 6 Experimentální měření aberací vyšších řádů v populaci

Experimentální část této práce byla věnována výzkumu aberací vyšších řádů v populaci. Základním cílem bylo změřit co nejpočetnější vzorek očí a zjistit rozložení hodnot aberací vyšších řádů ve studovaném vzorku včetně jeho závislosti na velikosti zornice. Naměřená data byla následně analyzována a srovnána s referenčními hodnotami normální populace uvedenými v rešerších. Dále jsme se zabývali symetrií pro rozložení aberací mezi pravým a levým okem a porovnáním výskytu jednotlivých typů aberací mezi různými refrakčními skupinami vybranými z celkového vzorku na základě předem stanovených kritérií.

### 6.1 Subjekty a metodika experimentálního měření

Experimentální měření populace probíhalo od začátku září roku 2015 do konce února roku 2016 v laboratoři optometrie na Katedře optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci.

#### 6.1.1 Subjekty

Výzkumu se zúčastnilo 121 osob, od kterých byly získány údaje pro 242 normálních zdravých očí, u kterých nebyly provedeny žádné chirurgické operativní zákroky, které by mohly poznamenat fyziologickou topografii povrchu oka. Průměrný věk vyšetřovaných osob byl 29 let  $\pm$  13 roků. Muži tvořili 27,3 % měřeného vzorku a ženy 72,7 %. Refrakční vady subjektů se pohybovaly od - 9,5 D do + 4,5 D ve sférické složce a od 0 do - 2,5 D v cylindrické složce, přičemž byl vždy uvažován zápis korekce ve tvaru se záporným cylindrem. Pro různá testovací kritéria byla populace dále rozdělena podle průměru zornice do 3 kategorií a podle refrakčních vad do 4 základních skupin. Podmínky pro stanovení skupin a kategorií vycházely z členění uvedeného v literatuře [1, 5], ale byly s ohledem na charakteristiky našeho zkoumaného vzorku mírně upraveny. Podle průměru zornice jsou subjekty rozděleny do těchto kategorií:

- **První kategorii**, která je tvořena subjekty, u kterých bylo dosaženo 3 mm průměru zornice (označujeme jako „3 mm průměr zornice“). Tuto podmínku splňovalo všech 242 očí.

- **Druhou kategorií**, která je tvořena osobami, u nichž bylo dosaženo průměru zornice od 4,9 mm do 5 mm. Tuto kategorii dále jednotně označujeme jako „5 mm průměr zornice“ a tvořilo ji 195 očí.
- **Třetí kategorií**, která obsahuje osoby, u nichž bylo dosaženo průměru zornice 5,88 mm a vyššího. Tuto kategorii dále jednotně označujeme jako „6 mm průměr zornice“ a tvořilo ji 120 očí.

Na základě refrakčních vad byly subjekty rozděleny do 4 skupin:

- **Emetropické oči**, tuto skupinu tvoří oči, u nichž hodnota sférického ekvivalentu dosahovala od + 0,5 D do - 0,75 D.
- **Astigmatické oči**, tuto skupinu tvoří oči, u kterých hodnota cylindru dosahuje hodnot  $\geq - 0,75$  D a současně tato cylindrická složka byla větší než sférická složka refrakční vady. Dále zde byly zařazeny všechny oči, u nichž hodnota cylindru byla  $> 1$  D bez ohledu na sférickou část korekce.
- **Nízko myopické oči**, tato skupina je tvořena oči, kde hodnota sférického ekvivalentu byla v rozmezí od - 1 D do - 3 D.
- **Středně myopické oči**, tato skupina se skládá z očí, u kterých hodnota sférického ekvivalentu byla v rozmezí od - 3,25 D do - 6 D.

Hypermetropické oči (sférický ekvivalent  $> + 0,5$  D) a vysoce myopické oči (sférický ekvivalent  $> - 6$  D) byly také součástí vzorku, ale jejich počet dosahoval tak malých hodnot, že tyto údaje mohly být použity jen pro vyhodnocení a analýzu celkových aberací, nikoliv však jako samostatných refrakčních skupin.

### 6.1.2 Metodika experimentálního měření

Všechna měření byla prováděna v přirozeném stavu, tj. bez cykloplegie. U každého probanda nejprve proběhlo subjektivní stanovení refrakce metodou nejlepší sféry a zkřížených cylindrů. Celková optická vyšetřovací vzdálenost byla 6 m, při měření byl použit LCD optotyp pozorovaný přes zrcadlo ze vzdálenosti 3 m. Světelné podmínky odpovídaly normálním denním podmínkám. Po monokulární korekci obou očí následovalo refrakční vyvážení Humphrissovou metodou. HOA byly měřeny pomocí objektivního aberometru i-profiler za skotopických podmínek, aby bylo dosaženo co největšího průměru zornice. Vždy proběhlo 6 sekvenčních snímaní pro každé oko pro 3

různé průměry zornice. Pro každý průměr zornice byly stanoveny průměrné hodnoty odpovídajících Zernikeho koeficientů pro aberace až do 6. řádu Zernikeho pyramidy.

## 6.2 Metodika vyhodnocování výsledků

Pro každé oko byly zjištěny jednotlivé Zernikeho polynomy a příslušné Zernikeho koeficienty od 0. do 6. řádů pro každý ze tří průměrů zornice. Z těchto hodnot byly vypočítány pro jednotlivé zornicové kategorie:

- průměrné hodnoty jednotlivých Zernikeho koeficientů od 0. do 6. řádu a jejich směrodatné odchyly (SD),
- průměrné absolutní hodnoty jednotlivých Zernikeho koeficientů od 0. do 6. řádu a jejich SD,
- průměrné RMS hodnoty Zernikeho polynomů pro dílčí aberace od 3. do 6. řádu a jejich SD; RMS hodnoty pro jednotlivé řády aberací (3., 4., 5., a 6. řád) a jejich SD a celkovou hodnotu RMS (3. až 6. řádu) s příslušnou SD,
- všechny uvedené RMS kategorie byly také vypočítány pro jednotlivé refrakční skupiny.

Symetrie HOA mezi pravými a levými očmi (tj. rovnost odpovídajících Zernikeho koeficientů) byla statisticky testována t-testem na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ ; u výsledků je též uvedena mezní hladina významnosti  $\alpha$ , při které by právě došlo k zamítnutí hypotézy rovnosti dat.

Vzhledem k minimu statisticky významných rozdílů mezi levým a pravým okem (viz kap. Výsledky 6.3.2) bylo možné pro určité analýzy průměrných hodnot sloučit pravé a levé oči dohromady. Mezi jednotlivými refrakčními skupinami byly porovnávány průměrné RMS hodnoty, a u aberací dosahujících největších hodnot (koma, trefoil a sférická aberace) byla sledována jejich velikost a rozložení v závislosti na sférickém ekvivalentu napříč celým měřeným vzorkem pro 3 mm a 6 mm zornicové kategorie vždy s příslušným korelačním koeficientem  $r$ .

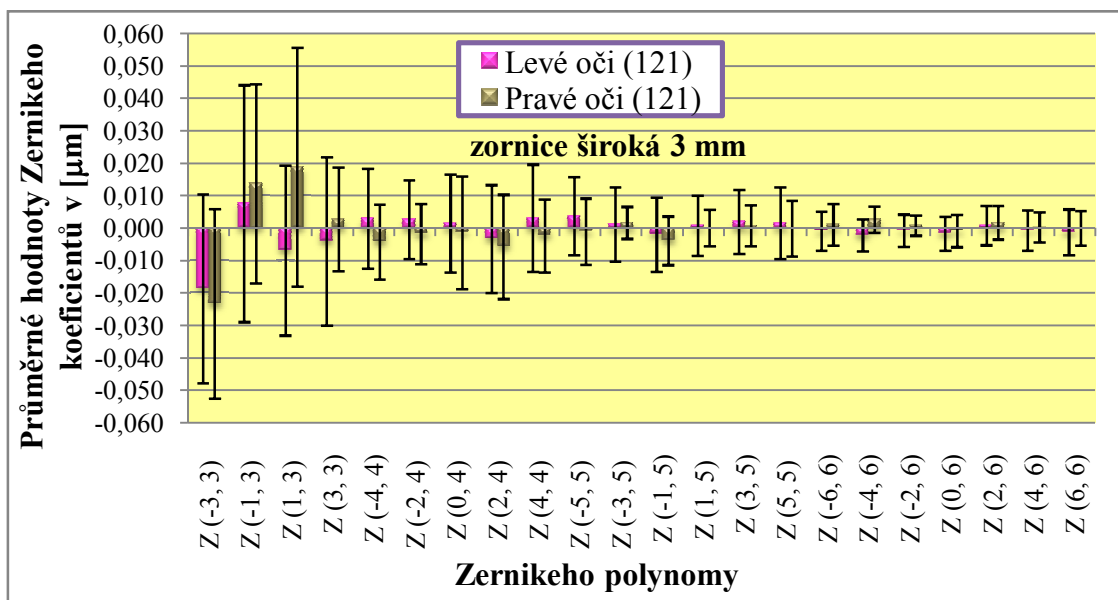
## 6.3 Výsledky

V této kapitole si shrneme stěžejní výsledky experimentálního měření, které budou graficky znázorněny.

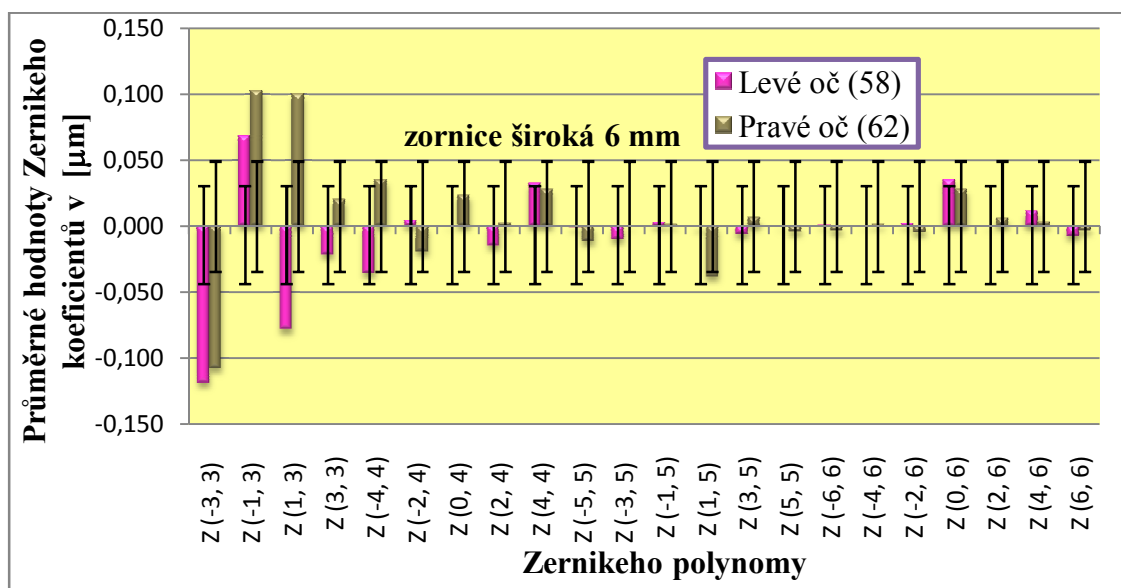
### 6.3.1 Průměrné hodnoty Zernikeho polynomů

Grafy č. 8 a 9 ukazují získané průměrné hodnoty Zernikeho koeficientů pro různé průměry zornice. Je vidět, že s průměrem zornice velikosti Zernikeho koeficientů vždy rostou. Nejvyšších hodnot dosahují koeficienty aberací do 3. řádu pro 3 mm, pro 6 mm až do 4. řádu. U všech průměrů zornice s rostoucím řádem aberací klesá jejich průměrná hodnota až po zanedbatelné velikosti.

Na základě grafické analýzy je patrné, že u aberací  $Z(1,3)$ ,  $Z(3,3)$ ,  $Z(-4,4)$ ,  $Z(-2,4)$  a  $Z(4,4)$  pro 3 mm zornici a  $Z(1,3)$ ,  $Z(3,3)$ ,  $Z(-4,4)$  a  $Z(-2,4)$  pro 6 mm zornici je rozdíl v hodnotě Zernikeho koeficientů ve znaménku mezi levým a pravým okem. Tato skutečnost byla potvrzena pro aberace  $Z(-4,4)$ ,  $Z(2,4)$  u 3 mm zornice a  $Z(-4,4)$ ,  $Z(2,4)$ ,  $(4,4)$ ,  $Z(-5,5)$  a  $(5,5)$  u 6 mm zornice provedenou statistickou analýzou pomocí t-testu, který stanovil mezní hladiny významnosti pro tyto aberace  $\alpha < 0,0000043 \%$ ,  $\alpha = 0,4 \%$  (jdoucí v pořadí) pro 3 mm zornici a  $\alpha < 0,0061 \%$ ,  $\alpha = 3,2 \%$ ,  $\alpha = 1,7 \%$ ,  $\alpha = 1,9 \%$  a  $\alpha < 0,0000052 \%$  pro 6 mm zornici (jdoucí v pořadí). I navzdory grafické analýze nebyl t-testem prokázán statisticky významný rozdíl v hodnotě znaménka Zernikeho koeficientů mezi levým a pravým okem u ostatních aberací. Příčinou mohou být vysoké směrodatné odchylky měřených dat.



Graf č. 8 Závislost velikosti průměrných hodnot Zernikeho koeficientů na daném typu aberace pro 3 mm širokou zornici u pravých a levých očí. Chybové úsečky zobrazují směrodatnou odchylku každé z aberací.

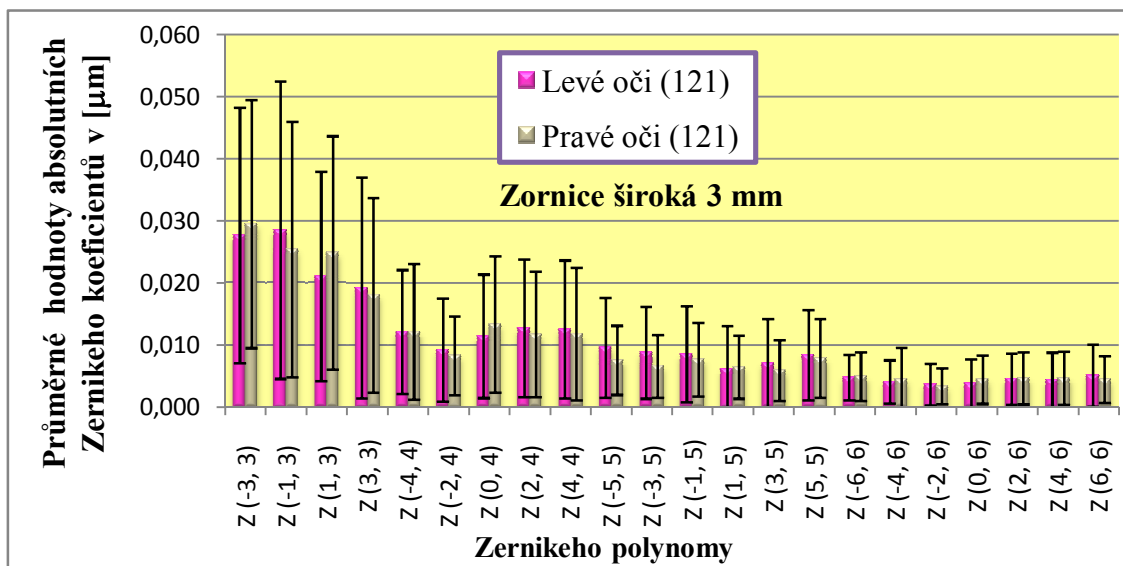


Graf č. 9 Závislost velikosti průměrných hodnot Zernikeho koeficientů na daném typu aberace pro 6 mm širokou zornici u pravých a levých očí. Chybové úsečky zobrazují směrodatnou odchylku každé z aberací.

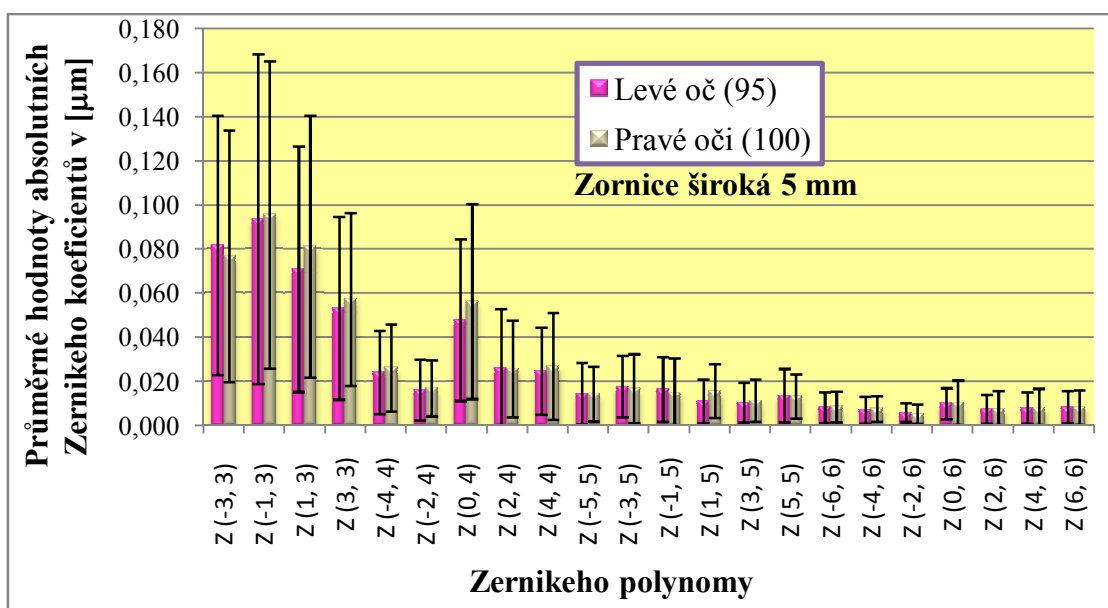
### 6.3.2 Průměrné absolutní hodnoty Zernikeho koeficientů

Grafy č. 10, 11 a 12 znázorňují průměrné absolutní hodnoty Zernikeho koeficientů levých a pravých očí pro 3 různé zornicové kategorie. Z výsledků grafů je možné usuzovat, že nejvýraznějšími aberacemi byly aberace třetího a čtvrtého řádu, z nichž nejvyšších hodnot dosahovala koma, trefoil a sférická aberace. Se stoupajícím řádem aberací je možné pozorovat trend v poklesu jejich průměrných hodnot. Z grafické analýzy těchto grafů je možné vyvodit, že rozdíly v průměrných hodnotách absolutních Zernikeho koeficientů mezi pravými a levými oči byly pro stejné typy aberací minimální. Tato hypotéza byla i statisticky ověřena pomocí t-testu a byla prokázána symetrie mezi pravými a levými oči u všech zornicových kategorií pro aberace od 3. do 6. řádu. Menší statistické rozdíly byly zjištěny pouze v těchto případech:

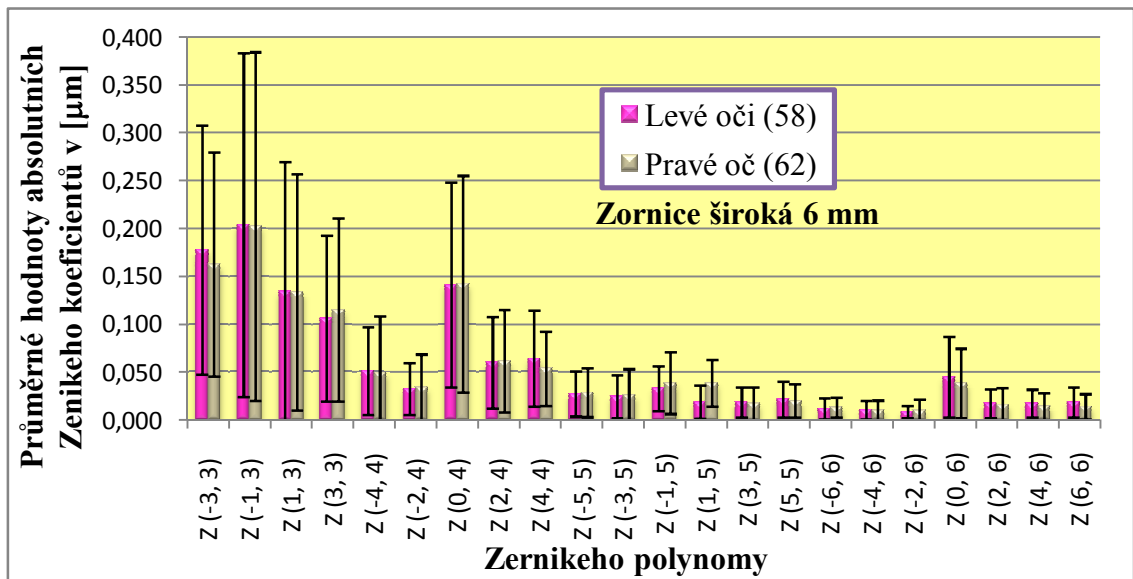
- u zornic s průměrem 3 mm pro  $Z_5^{-5} (\alpha = 2,4 \%)$  a  $Z_5^{-3} (\alpha = 0,8 \%)$ ,
- u zornic s průměrem 5 mm pro  $Z_5^1 (\alpha = 0,4 \%)$ ,
- u zornic s průměrem 6 mm pro  $Z_5^1 (\alpha < 0,0001 \%)$ .



Graf č. 10 Závislost velikosti průměrných hodnot absolutních Zernikeho koeficientů na daném typu aberace pro 3 mm širokou zornici u pravých a levých očí. Chybové úsečky zobrazují směrodatnou odchylku každé z aberací.



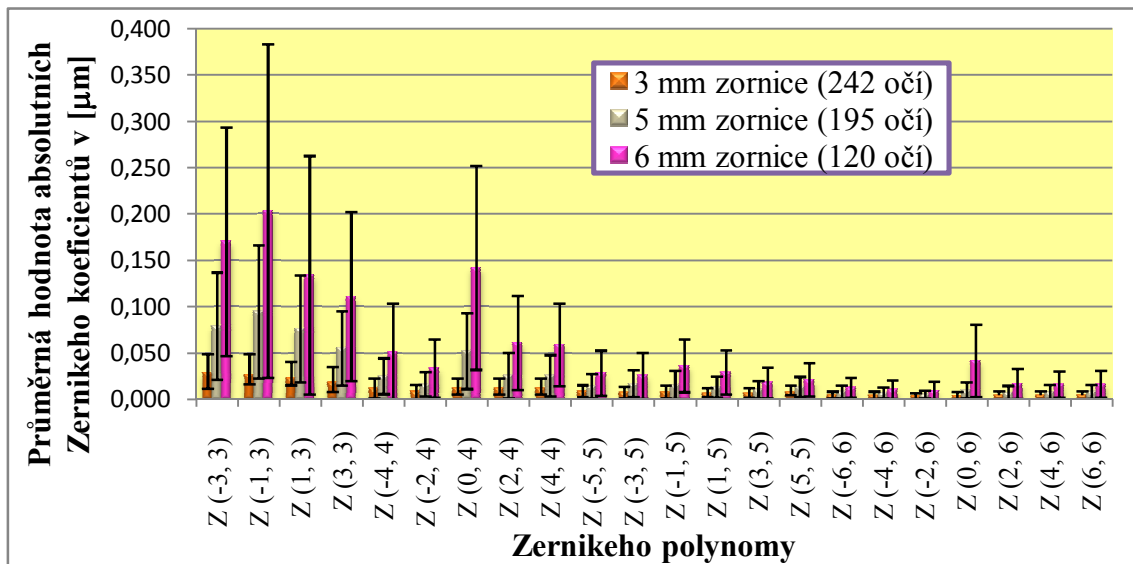
Graf č. 11 Závislost velikosti průměrných hodnot absolutních Zernikeho koeficientů na daném typu aberace pro 5 mm širokou zornici u pravých a levých očí. Chybové úsečky zobrazují směrodatnou odchylku každé z aberací.



**Graf č. 12** Závislost velikosti průměrných hodnot absolutních Zernikeho koeficientů na daném typu aberace pro 6 mm širokou zornici u pravých a levých očí. Chybové úsečky zobrazují směrodatnou odchylku každé z aberací.

Na grafu č. 13 byla sledována závislost průměrných hodnot absolutních Zernikeho koeficientů na šíři zornice. Na základě statistického ověření symetrie bylo možné sloučit hodnoty pravých a levých očí dohromady, a proto byla tato závislost sledována pro obě oči společně. Z naměřených dat plyne, že s rostoucím průměrem zornice dochází i k prudkému nárůstu velikosti všech aberací. Tento nárůst byl i statisticky potvrzen pomocí t-testu pro jednotlivé hodnoty aberací mezi 3 mm a 6 mm zornicí, protože mezní hladina významnosti ( $\alpha$ ) tohoto srovnání byla u všech aberací (3. až 6. řádu)  $< 6,22797E^{-28} \%$ .

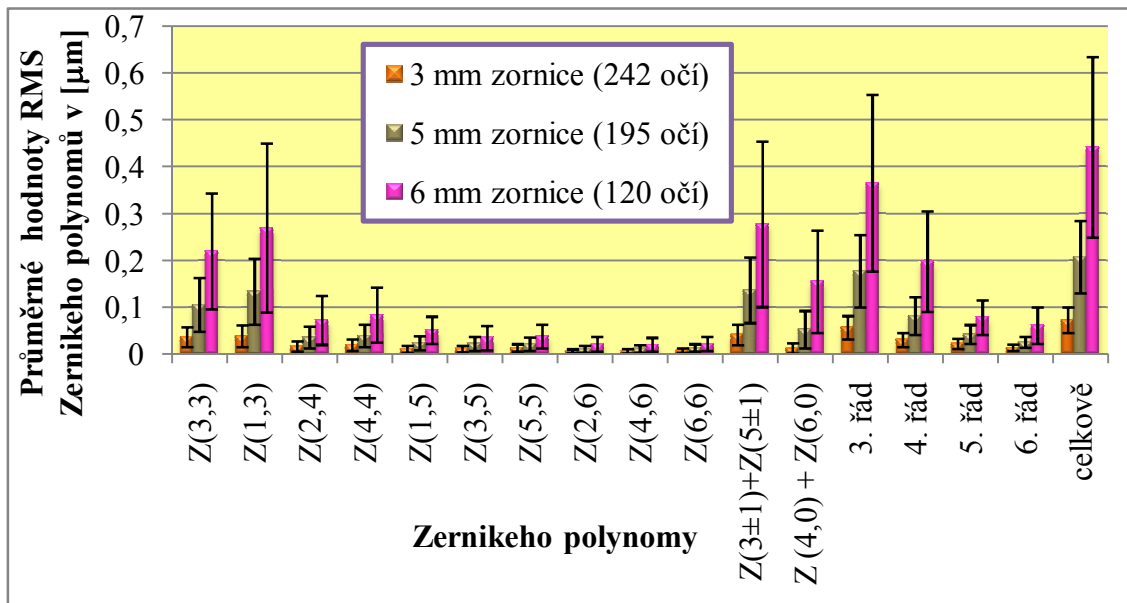




Graf č. 13 Závislost velikosti průměrných hodnot absolutních Zernikeho koeficientů na daném typu aberace pro 3 mm, 5 mm a 6 mm širokou zornici u pravých a levých očí, když jsou údaje pro pravé i levé oči spojeny dohromady. Chybové úsečky zobrazují směrodatnou odchylku každé z aberací.

### 6.3.3 Průměrné hodnoty RMS Zernikeho polynomů

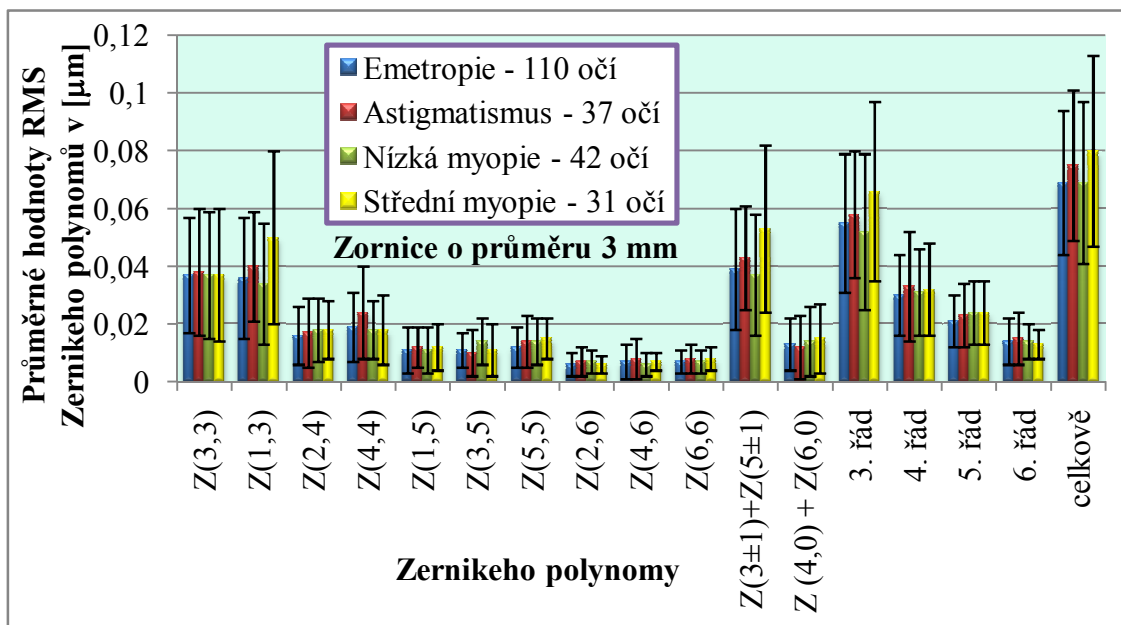
Průměrné hodnoty RMS Zernikeho polynomů byly sledovány (vzhledem k předchozím výsledkům) opět pro obě oči současně, protože případný rozdíl znamének mezi levým a pravým okem zde nehraje roli. Opět je patrný nárůst dílčích aberací s rostoucím průměrem zornice, stejně tak i u RMS hodnot jednotlivých řádů a celkové RMS.



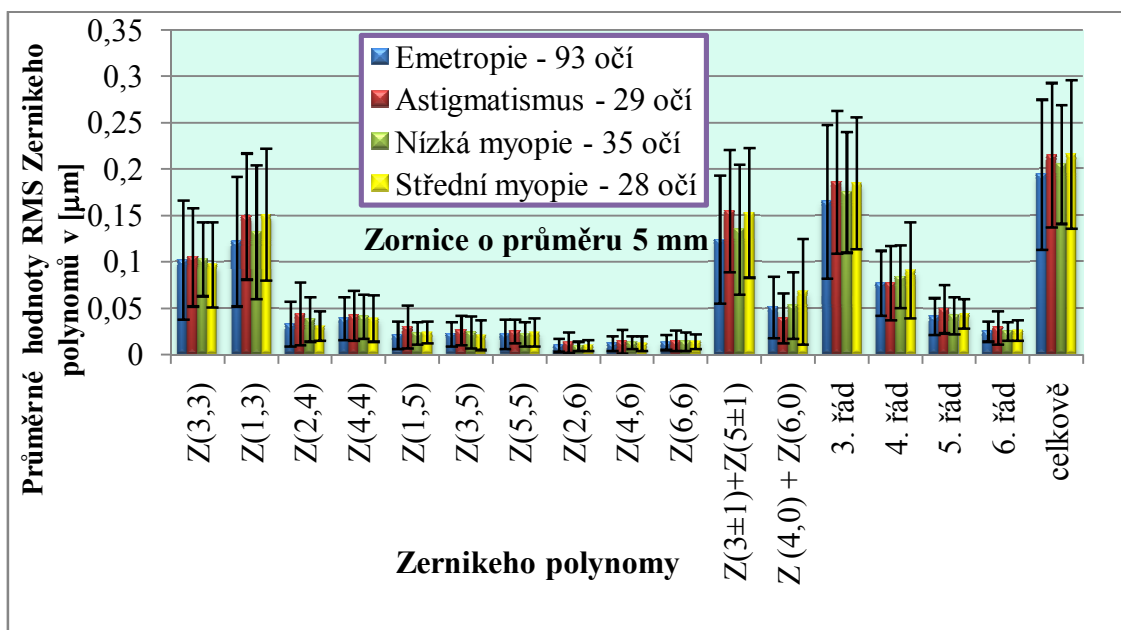
**Graf č. 14** Závislost velikosti průměrných hodnot RMS Zernikeho polynomů na daném typu aberace pro 3 mm, 5 mm a 6 mm širokou zornici, když jsou údaje pro pravé i levé oči spojeny dohromady. Chybové úsečky zobrazují směrodatnou odchylku každé z aberací.

Na grafech č. 15, 16 a 17 jsou zobrazeny průměrné RMS hodnoty pro jednotlivé refrakční skupiny. Mírně nižší hodnoty vykazují emetropické oči, ostatní skupiny dosahují přibližně stejné velikosti. Tyto jemné rozdíly jsou nejvíce patrné u zornice široké 6 mm a u celkových RMS. Všeobecně je však možné říci, že mezi jednotlivými refrakčními skupinami nejsou žádné významné rozdíly.

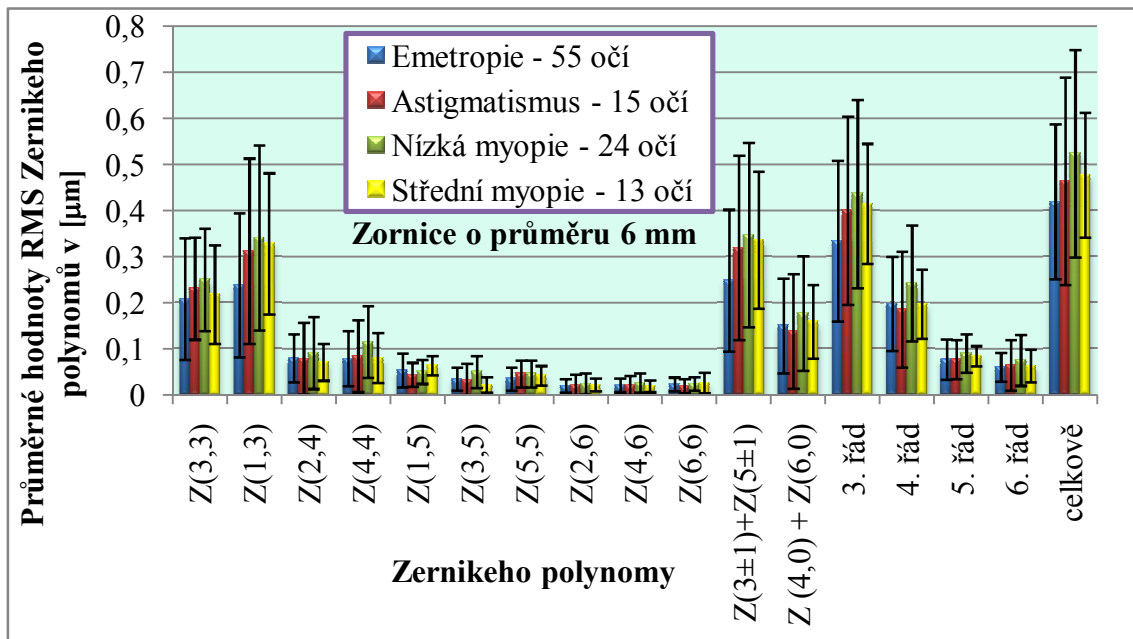
Velikost RMS u nejčastěji zastoupených aberací (koma, trefoil a sférická aberace) byla sledována metodou korelační analýzy v závislosti na hodnotě sférického ekvivalentu pro průměr zornice 3 a 6 mm. Tato závislost byla statisticky významná pouze pro aberaci koma ( $r = 0,170$ , t-test, hladina významnosti 5 %) u 3 mm zornice. Ve všech ostatních případech nebyla prokázána žádná statisticky významná závislost ( $r = 0,000$  pro trefoil,  $r = 0,084$  pro sférickou aberaci u 3 mm zornice a  $r = 0,089$  pro trefoil,  $r = 0,063$  pro koma,  $r = 0,000$  pro sférickou aberaci u 6 mm zornice).



Graf č. 15 Závislost velikosti průměrných hodnot RMS Zernikeho polynomů na daném typu aberace u různých refrakčních skupin pro 3 mm širokou zornici, když jsou údaje pro pravé i levé oči spojeny dohromady. Chybové úsečky zobrazují směrodatnou odchylku každé z aberací.



Graf č. 16 Závislost velikosti průměrných hodnot RMS Zernikeho polynomů na daném typu aberace u různých refrakčních skupin pro 5 mm širokou zornici, když jsou údaje pro pravé i levé oči spojeny dohromady. Chybové úsečky zobrazují směrodatnou odchylku každé z aberací.



Graf č. 17 Závislost velikosti průměrných hodnot RMS Zernikeho polynomů na daném typu aberace u různých refrakčních skupin pro 6 mm širokou zornici, když jsou údaje pro pravé i levé oči spojeny dohromady. Chybové úsečky zobrazují směrodatnou odchylku každé z aberací.

#### 6.4 Diskuse

Z výsledků studie je zřetelné, že míra velikosti jednotlivých aberací, jak předpovídala literatura, roste úměrně se šíří zornice. Tato závislost je dobře patrná na grafu č. 13 pro průměrné absolutní hodnoty Zernikeho koeficientů a na grafu č. 14 pro průměrné hodnoty RMS Zernikeho polynomů. Tento nárůst aberací byl navíc i statisticky ověřen pomocí t-testu pro údaje na grafu č. 13 mezi 3 mm a 6 mm zornicemi.

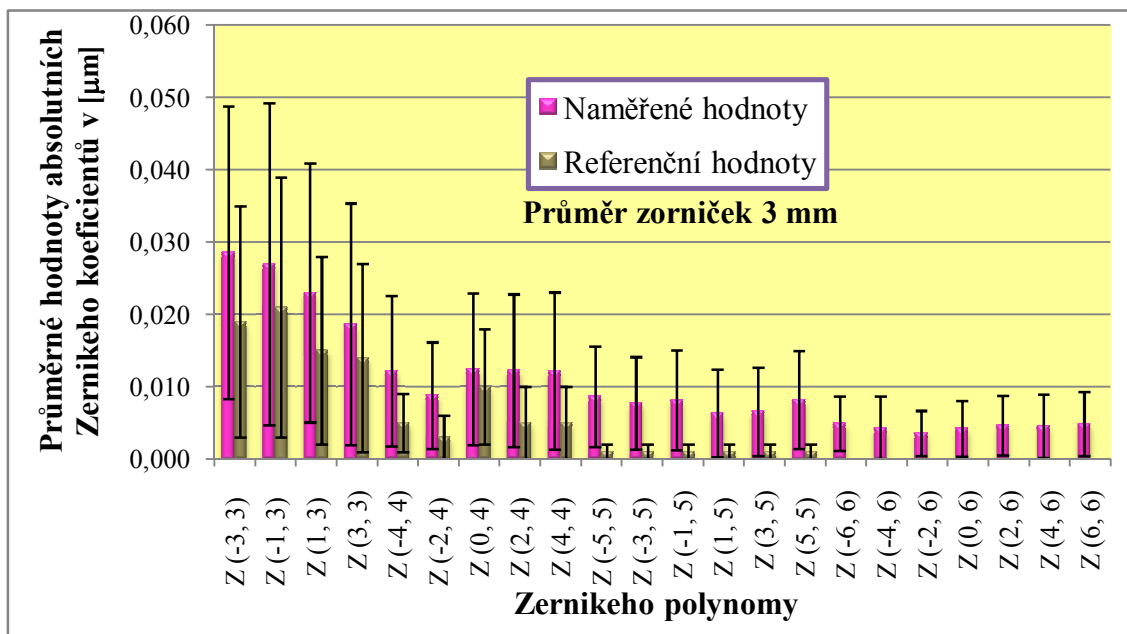
Z grafů č. 10, 11 a 12 vyplývá, že aberace dosahující průměrně nejvyšších velikostí, byly koma, trefoil a sférická aberace, a to u všech tří zornicových kategorií. Jejich průměrné absolutní hodnoty pro jednotlivé zornicové kategorie jsou uvedeny v tabulce č. 7. Pro tyto tři aberace byla vypočítána jejich RMS hodnota a sledována její velikost v závislosti na sférickém ekvivalentu. Z výsledků korelační analýzy je patrné, že ve studovaném vzorku je míra závislosti těchto aberací na sférickém ekvivalentu velmi malá a pro drtivou většinu aberací statisticky nevýznamná. Z grafů č. 15, 16 a 17 můžeme usuzovat, že i dosažené velikosti ostatních aberací mají jen velmi malou spojitost s hodnotou sférického ekvivalentu, tudíž nesouvisí s refrakčním stavem oka, protože mezi jednotlivými refrakčními skupinami je možné vidět poměrně dobrou shodu ve velikosti RMS hodnot pro stejné typy aberací.

Typy aberací	3 mm zornice	5 mm zornice	6 mm zornice
$Z_3^{-3}$	0,029 $\mu\text{m}$	0,079 $\mu\text{m}$	0,170 $\mu\text{m}$
$Z_3^3$	0,027 $\mu\text{m}$	0,095 $\mu\text{m}$	0,203 $\mu\text{m}$
$Z_3^{-1}$	0,023 $\mu\text{m}$	0,076 $\mu\text{m}$	0,134 $\mu\text{m}$
$Z_3^1$	0,019 $\mu\text{m}$	0,055 $\mu\text{m}$	0,111 $\mu\text{m}$
$Z_4^0$	0,012 $\mu\text{m}$	0,052 $\mu\text{m}$	0,142 $\mu\text{m}$

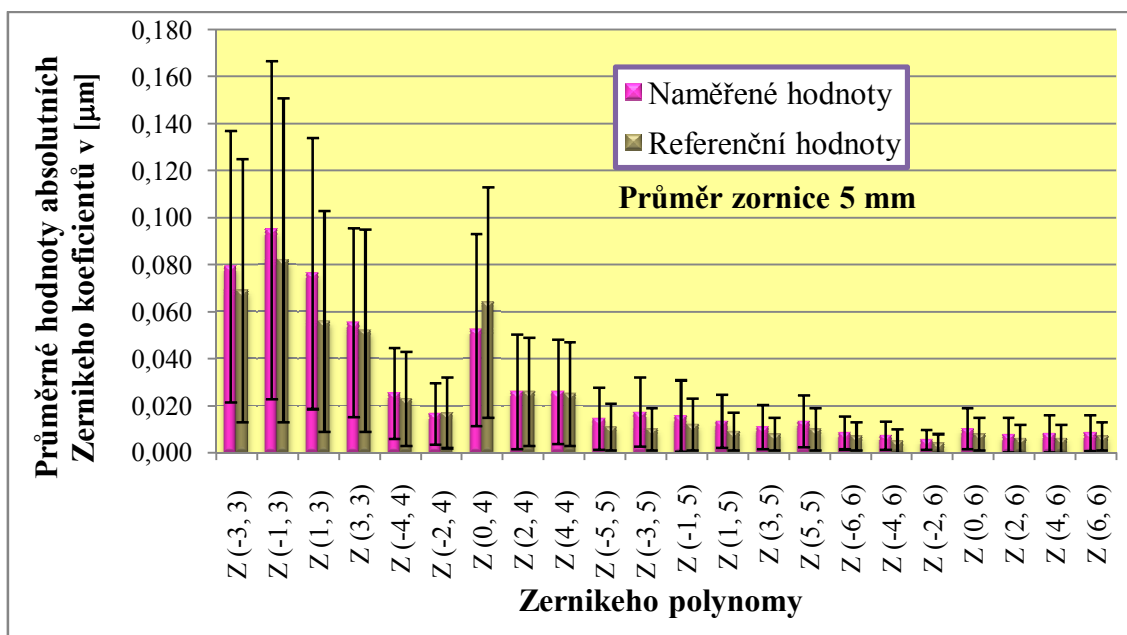
**Tabulka č. 7 Průměrné hodnoty vybraných absolutních Zernikeho polynomů pro různé zornicové kategorie**

Naše studie také potvrdila, že absolutní hodnoty Zernikeho koeficientů se mezi levým a pravým okem výrazně neliší. U koeficientů uvažovaných včetně znaménka lze pozorovat určitou míru symetrie – aberace, které jsou symetrické podle svislé osy, vykazují v průměru stejné znaménko. Naopak aberace bez této symetrie vykazují znaménko opačné. Tato skutečnost byla též částečně potvrzena statistickou analýzou. Uvedený trend se výrazně neliší mezi jednotlivými zornicovými kategoriemi. Uvedené výsledky jsou v souladu s publikacemi [20, 21, 22]. Z toho mimo jiné vyplývá i doporučení, že při studiích, kde jsou srovnávány změřené aberace levého a pravého oka, je nutné tuto skutečnost zohlednit např. tak, že se v případě každého subjektu u příslušných aberací např. levého oka změníme znaménko tak, aby byly porovnatelné s hodnotami pravého oka.

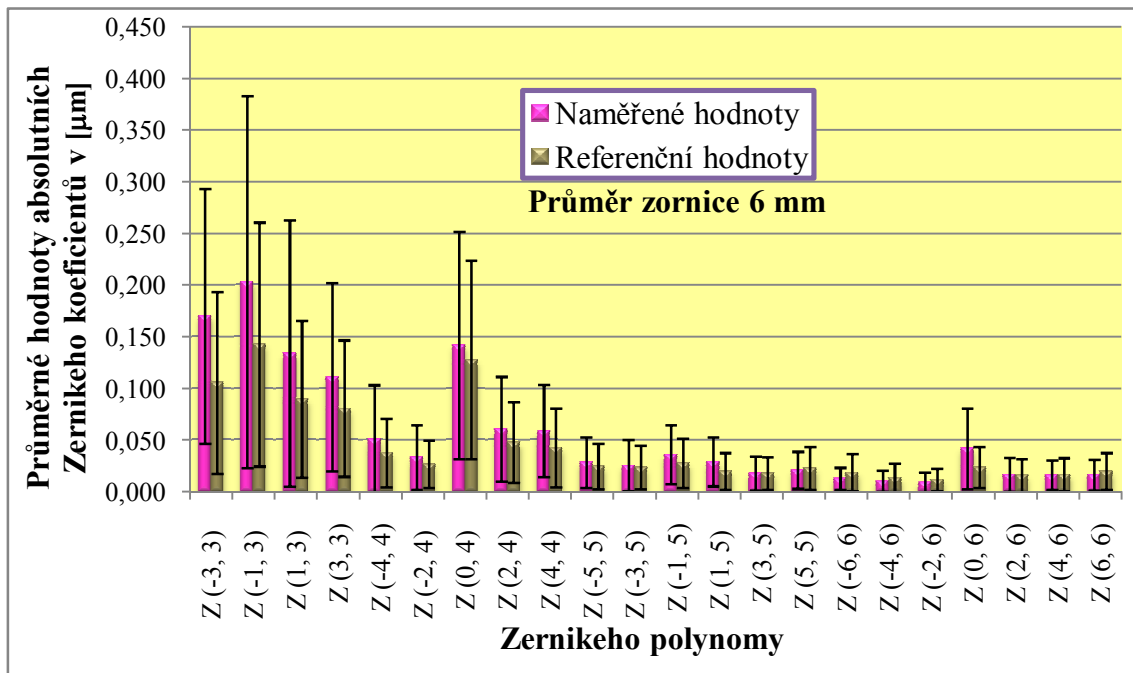
Celkové průměrné absolutní hodnoty aberací vyšších řádů našeho změřeného populačního vzorku jsme porovnali s referenčními hodnotami pro normální populaci dle rešerší (viz kapitola 5.3, [1]) pro všechny zornicové kategorie. Výsledky těchto srovnání můžeme vidět na grafech č. 18, 19 a 20.



Graf č. 18 Porovnání velikosti průměrných hodnot absolutních Zernikeho koeficientů pro jednotlivé typy aberací mezi námi naměřenými hodnotami a referenčními hodnotami [1] u 3 mm široké zornice, kdy hodnoty pro pravé i levé oči jsou spojeny dohromady. Chybové úsečky zobrazují směrodatnou odchylku každé z aberací.



Graf č. 19 Porovnání velikosti průměrných hodnot absolutních Zernikeho koeficientů pro jednotlivé typy aberací mezi námi naměřenými hodnotami a referenčními hodnotami [1] u 5 mm široké zornice, kdy hodnoty pro pravé i levé oči jsou spojeny dohromady. Chybové úsečky zobrazují směrodatnou odchylku každé z aberací.



**Graf č. 20** Porovnání velikosti průměrných hodnot absolutních Zernikeho koeficientů pro jednotlivé typy aberací mezi námi naměřenými hodnotami a referenčními hodnotami [1] u 6 mm široké zornice, kdy hodnoty pro pravé i levé oči jsou spojeny dohromady. Chybové úsečky zobrazují směrodatnou odchylku každé z aberací.

Aberace pro námi změřený vzorek populace vykazovali mírně vyšší hodnoty oproti referenčním hodnotám. Tento rozdíl byl nejvíce patrný u 3 mm průměru zornice pro všechny aberace 5. a 6. řádu, výraznějších hodnot dosahovala i koma ( $Z_3^{-1}$ ,  $Z_3^1$ ) a trefoil ( $Z_3^{-3}$ ,  $Z_3^3$ ) u všech zornicových kategorií. Naše populace měla i vyšší celkovou hodnotu RMS (3. až 6. řádu), která dosahovala velikosti pro 6 mm širokou zornici 0,442 μm oproti referenčním 0,327 μm. Rozdíly pro velikost jednotlivých RMS hodnot jsou znázorněny v tabulce č. 8.

Přestože naše populace vykazovala vyšší hodnoty aberací, tak byl dodržen trend pro jednotlivé jejich typy. Rozdíl ve velikosti průměrných hodnot může být způsoben vlivem použití jiného typu aberometru, jelikož referenční údaje byly získány z různých pracovišť za užití různých typů aberometrů. Dalším faktorem, který by mohl způsobit tyto rozdíly je rozdílný počet testovaných osob. Naše studie zahrnovala 121 subjektů (242 očí), kdežto referenční hodnoty byly stanoveny na základě měření 1433 osob (2560 očí). Zohlednit je nutné též poměrně vysoký rozptyl dat. Jistý vliv by mohl sehrát i rozdílný etnický původ mezi osobami zapojenými do obou studií, ale nad mírou vlivu tohoto faktoru můžeme jen spekulovat.

Naměřené hodnoty	3 mm	5 mm	6 mm	Referenční hodnoty	3 mm	5 mm	6 mm
RMS	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	RMS	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$
Z(3,3)	0,037	0,106	0,220	Z(3,3)	0,026	0,095	0,147
Z(1,3)	0,039	0,134	0,270	Z(1,3)	0,029	0,109	0,185
Z(2,4)	0,017	0,036	0,073	Z(2,4)	0,007	0,034	0,060
Z(4,4)	0,020	0,040	0,084	Z(4,4)	0,008	0,038	0,063
Z(1,5)	0,011	0,024	0,052	Z(1,5)	0,001	0,017	0,039
Z(3,5)	0,012	0,023	0,035	Z(3,5)	0,001	0,014	0,033
Z(5,5)	0,014	0,022	0,039	Z(5,5)	0,001	0,016	0,037
Z(2,6)	0,007	0,011	0,021	Z(2,6)	0,000	0,008	0,023
Z(4,6)	0,007	0,012	0,021	Z(4,6)	0,000	0,009	0,025
Z(6,6)	0,008	0,014	0,022	Z(6,6)	0,000	0,010	0,030
Z(3 $\pm$ 1) + Z(5 $\pm$ 1)	0,042	0,137	0,278	Z(3 $\pm$ 1) + Z(5 $\pm$ 1)	0,029	0,112	0,192
Z(4,0) + Z(6,0)	0,013	0,053	0,155	Z(4,0) + Z(6,0)	0,010	0,065	0,133
3. řád	0,057	0,178	0,366	3. řád	0,041	0,153	0,251
4. řád	0,031	0,082	0,198	4. řád	0,016	0,090	0,169
5. řád	0,023	0,043	0,079	5. řád	0,002	0,030	0,067
6. řád	0,014	0,026	0,062	6. řád	0,001	0,020	0,057
<b>Celkově</b>	0,073	0,208	0,442	<b>Celkově</b>	0,045	0,186	0,327

Tabulka č. 8 Průměrné hodnoty RMS Zernikeho polynomů pro změřené údaje a referenční údaje.



Prům. abs. koef.	3 mm	5 mm	6 mm	Prům. abs. koef.	3 mm	5 mm	6 mm
Změřené hod.	mm	mm	mm	Referenční hod.	mm	mm	mm
Z (-3, 3)	0,029	0,079	0,170	Z (-3, 3)	0,019	0,069	0,106
Z (-1, 3)	0,027	0,095	0,203	Z (-1, 3)	0,021	0,082	0,143
Z (1, 3)	0,023	0,076	0,134	Z (1, 3)	0,015	0,056	0,090
Z (3, 3)	0,019	0,055	0,111	Z (3, 3)	0,014	0,052	0,081
Z (-4, 4)	0,012	0,025	0,051	Z (-4, 4)	0,005	0,023	0,038
Z (-2, 4)	0,009	0,017	0,034	Z (-2, 4)	0,003	0,017	0,027
Z (0, 4)	0,012	0,052	0,142	Z (0, 4)	0,010	0,064	0,128
Z (2, 4)	0,012	0,026	0,061	Z (2, 4)	0,005	0,026	0,048
Z (4, 4)	0,012	0,026	0,059	Z (4, 4)	0,005	0,025	0,043
Z (-5, 5)	0,009	0,014	0,028	Z (-5, 5)	0,001	0,011	0,025
Z (-3, 5)	0,008	0,017	0,026	Z (-3, 5)	0,001	0,010	0,024
Z (-1, 5)	0,008	0,016	0,036	Z (-1, 5)	0,001	0,012	0,028
Z (1, 5)	0,006	0,013	0,029	Z (1, 5)	0,001	0,009	0,020
Z (3, 5)	0,007	0,011	0,018	Z (3, 5)	0,001	0,008	0,018
Z (5, 5)	0,008	0,013	0,021	Z (5, 5)	0,001	0,010	0,023
Z (-6, 6)	0,005	0,008	0,013	Z (-6, 6)	0,000	0,007	0,019
Z (-4, 6)	0,004	0,007	0,011	Z (-4, 6)	0,000	0,005	0,014
Z (-2, 6)	0,004	0,006	0,009	Z (-2, 6)	0,000	0,004	0,012
Z (0, 6)	0,004	0,010	0,042	Z (0, 6)	0,000	0,008	0,024
Z (2, 6)	0,005	0,008	0,017	Z (2, 6)	0,000	0,006	0,016
Z (4, 6)	0,005	0,008	0,016	Z (4, 6)	0,000	0,006	0,017
Z (6, 6)	0,005	0,008	0,017	Z (6, 6)	0,000	0,007	0,020

Tabulka č. 9 Průměrné hodnoty absolutních Zernikeho koeficientů pro změřené údaje a referenční údaje.

# ZÁVĚR

Přestože aberace vyšších řádů představují poměrně složité téma, tak snahou naší práce bylo vytvořit ucelený text, který by vedl k pochopení této problematiky. V teoretické části jsme si vysvětlili mechanismy a zákonitosti, které stojí za podstatou vzniku tohoto jevu. Ukázali jsme si také možnosti značení a klasifikace aberací spolu s pravidly pro jejich výpočty. Součástí práce bylo i seznámení s vlivem jednotlivých aberací na lidský zrak spolu s metodikou a způsoby měření jejich hodnot pomocí aberometru i-profiler. Závěrečná pasáž je věnována distribuci průměrných normálních (referenčních) hodnot HOA u zdravé populace, včetně jejich korelace v závislosti na refrakčním stavu oka.

Praktická pasáž byla zaměřená na změření 121 osob, u kterých byly zjištěny průměrné hodnoty HOA, které v porovnání s referenčními údaji vykazovaly mírný nárůst, nicméně držely stanovený trend. Podařilo se nám také graficky i statisticky prokázat dobrou symetrii mezi pravým a levým okem osob zařazených do výzkumu spolu s ověřením, že s rostoucí šíří zornice roste i velikost HOA. Mezi další zajímavá zjištění patří i skutečnost, že míra zastoupení jednotlivých aberací nemá významnou spojitost s refrakčním stavem oka. V rámci studie byla také zjištěna asymetrie v hodnotě znaménka Zernikeho koeficientů pro určité typy aberací mezi pravým a levým okem. Celkové průměrné hodnoty aberací získané na základě měření studovaného vzorku, které jsou znázorněny v tabulce č. 8 a 9 by mohly sloužit jako orientační normativní hodnoty pro obyvatelstvo ČR.

# LITERATURA A JINÉ ZDROJE

- [1] SALMON, THOMAS O. and CORINA VAN DE POL. *Normal-eye Zernike coefficients and root-mean-square wavefront errors*. Journal of Cataract & Refractive Surgery [online]. 2006, 32(12), page 2064-2074 [cit. 2016-03-26]. DOI: 10.1016/j.jcrs.2006.07.022. ISSN 08863350. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0886335006011199>
- [2] PLUHÁČEK F., HLADÍKOVÁ E., BAJER J., TAVANZDI U. *Změny aberací vyšších řádů oka po prémiové fotorefrakční keratektomii*. Jemná mech. a optika, roč. 56, 2012, č. 2, page. 47-50.
- [3] SUDER, M. *Aberace oka v optometrické praxi - výukové materiály k předmětu Aberace oka v optometrické praxi*, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc, 2014.
- [4] BAJER, J. *Aberace oka z vlnového hlediska - výukové materiály k předmětu Aberace oka v optometrické praxi*. Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc, 2013.
- [5] CHENG X., BRADLEY A., HONG X., and THIBOS L. N. *Relationship between refractive error and monochromatic aberrations of the eye.*, Optom. Vis. Sci., vol. 80, no. 1, page. 43–49, 2003.
- [6] BRUNETTE ISABELLE, BUENO M. JUAN, PARENT MIREILLE, HAMAM HABIB and SIMONET PIERRE. *Monochromatic Aberrations as a Function of Age, from Childhood to Advanced Age*. Investigative Ophthalmology & Visual Science [online]. 2003, 44(12), 5438- [cit. 2016-03-26]. DOI: 10.1167/iovs.02-1042. ISSN 15525783. Dostupné z: <http://iovs.arvojournals.org/article.aspx?doi=10.1167/iovs.02-1042>
- [7] ARTAL PABLO, FERRO MANUEL, NAVARRO RAFAEL and MIRANDA ISMAEL. *Effects of aging in retinal image quality*. Journal of the Optical Society of America A [online]. 1993, 10(7), 1656- [cit. 2016-03-26]. DOI: 10.1364/JOSAA.10.001656. ISSN 1084-7529. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josaa-10-7-1656>

- [8] THIBOS LARRY N., YE MING, ZHANG XIAOXIAO and BRADLEY ARTHUR. *The chromatic eye: a new reduced-eye model of ocular chromatic aberration in humans*. Applied Optics [online]. 1992, 31(19), 3594- [cit. 2016-03-26]. DOI: 10.1364/AO.31.003594. ISSN 0003-6935. Dostupné z <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-31-19-3594>
- [9] THIBOS LARRY N. *Principles of Hartmann-Shack Aberrometry*. Journal of Refractive Surgery [online]. the School of Optometry, Indiana University, Bloomington, IN, 2000, (16), page 1-3 [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: [http://www.carlomasci.it/biblio/aberrazioni\\_7.pdf](http://www.carlomasci.it/biblio/aberrazioni_7.pdf)
- [10] NAVRÁTIL, L. a ROSINA, J. *Medicínská biofyzika*. 1. vyd. Praha: Grada, 2005. ISBN 978-80-247-1152-2.
- [11] LEPIL, O. a ŠEDIVÝ, P. *Fyzika pro gymnázia*. 6. vyd. Praha: Prometheus, 2010. ISBN 978-80-7196-385-1.
- [12] CHROMATICKÁ ABERACE. *Wikipedie* [online]. 2015 [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Chromatická\\_aberace](https://cs.wikipedia.org/wiki/Chromatická_aberace)
- [13] ANTON, MILAN. *Refrakční vady a jejich vyšetřovací metody*. Vyd. 3., přeprac. Brno: Národní centrum ošetrovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2004. 96 s. ISBN 80-7013-402-X.
- [14] SÝKORA, MILAN. *Vady zobrazení*. In: Paladix [online]. [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: <http://www.x-pozice.cz/clanky/vady-zobrazeni.html>
- [15] KOLÍN, JAN. *Oční lékařství*. 2., přeprac. vyd. Praha: Karolinum, 2007. 109 s. Učební texty Univerzity Karlovy v Praze. ISBN 978-80-246-1325-3.
- [16] KRAUS, HANUŠ A KOLEKTIV: *Kompendium očního lékařství*, Praha, Grada Publishing 1997, ISBN 80-7169-079-1
- [17] KUCHYNKA, P. a kol. *Oční lékařství*, Praha, Grada Publishing 2007, ISBN 978-80-247-1163-8
- [18] PLUHÁČEK, F. *Normální binokulární vidění – výukové materiály k předmětu Korekce zraku I*, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc
- [19] ZERNIKE POLYNOMIALS. *Gatinel* [online]. 2015 [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://www.gatinel.com/recherche-formation/aberrometrie/zernike-polynomials/>

- [20] ARBELAEZ MARIA CLARA, VIDAL CAMILA a ARBA-MOSQUERA SAMUEL. *Bilateral Symmetry before and Six Months after Aberration-Free™ Correction with the SCHWIND AMARIS TotalTech Laser: Clinical Outcomes*. *Journal of Optometry* [online]. 2010, 3(1), page 20-28 [cit. 2016-03-29]. DOI: 10.3921/joptom.2010.20. ISSN 18884296. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1888429610700030>
- [21] BAO, JINHUA RONGRONG LE, WU JIANGXIU, SHEN YEYU, LU FAN a JI C. HE. *Higher-Order Wavefront Aberrations for Populations of Young Emmetropes and Myopes*. *Journal of Optometry* [online]. 2009, 2(1), 51-58 [cit. 2016-03-29]. DOI: 10.3921/joptom.2009.51. ISSN 18884296. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1888429609700238>
- [22] EE, SANG-DEOK, MIN-HYUK KIM a CHANG-GYU KIM. *Similarity of Aberrations between Right and Left Eyes*. *Indian Journal of Science and Technology* [online]. 2015, 8(S8), 79- [cit. 2016-03-29]. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8iS8/71492. ISSN 0974-5645. Dostupné z: <http://www.indjst.org/index.php/indjst/article/view/71492>
- [23] SFÉRICKÁ ABERACE. *Wikipedia* [online]. [cit. 2016-01-30]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Sf%C3%A9rick%C3%A1\\_aberace](https://cs.wikipedia.org/wiki/Sf%C3%A9rick%C3%A1_aberace)
- [24] CAMPBELL CHARLES E. *A New Method for Describing the Aberrations of the Eye Using Zernike Polynomials*. *Optometry and Vision Science* [online]. 2003, 80(1), 79-83 [cit. 2016-03-30]. DOI: 10.1097/00006324-200301000-00011. ISSN 1040-5488. Dostupné z: <http://content.wkhealth.com/linkback/openurl?sid=WKPTLP:landingpage&an=00006324-200301000-00011>

# PŘÍLOHY

## Příloha 1 – Informovaný souhlas

### *Informace a informovaný souhlas pro účastníky výzkumné studie*

<b>Název výzkumné studie:</b>	Aberace vyšších řádů v populaci
<b>Vedoucí výzkumné studie:</b>	RNDr. Mgr. František Pluháček, Ph.D. Katedra optiky, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc e-mail: frantisek.pluhacek@upol.cz
<b>Řešitel:</b>	David Chytil Katedra optiky, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc

### *Informace o výzkumné studii:*

Měření je zaměřené na získání hodnot refrakčního stavu očí vyšetřovaných osob, dále jsou měřeny aberace vyšších řádů.

**Kritéria pro výběr subjektů (účastníků výzkumu)** – Výzkumu se mohou zúčastnit zájemci, kteří nebyli na laserové operaci očí nebo nedošlo k narušení topografie povrchu oka vlivem onemocnění nebo úrazu.

**Výhody:** Účastník výzkumné studie přispívá k rozvoji poznatků v oblasti optometrie, které mohou v budoucnu přispět ke zkvalitnění péče o zrak. Informace získané v této studii slouží jako materiál pro výzkumnou část studentské diplomové práce s názvem Aberace vyšších řádů v populaci zpracovávané Davidem Chytillem.

Výsledky prováděné studie budou zveřejněny v rámci této práce, popř. v odborné literatuře a mohou být prezentovány na odborných konferencích. Dále budou sloužit

jako podklady pro další výzkum. Všechna výzkumem zjištěná data budou vždy prezentována anonymně, tedy bez uvedení identity účastníka.

**Popis výzkumných procedur:**

Výzkum každé osoby bude jednorázově trvat přibližně 30 minut. Objektívni měření refrakčního stavu očí se provádí pomocí autorefraktometru Nidek a subjektivní měření pomocí tzv. skličkování. Dále jsou měřeny aberace vyšších řádů pomocí aberometru i-profiler. Všechna měření probíhají bezkontaktně s povrchem oka.

**Rizika účasti ve studii:** Pro tuto studii nejsou známy žádné rizika ani možnosti výskytu vedlejších účinků.

K této *informaci* je přiložen *formulář Informovaného souhlasu účastníka s účastí na studii*. Souhlas s Vaší účastí ve studii výzkumu vyjádřený Vaším podpisem tohoto dokumentu před zahájením testování je především prohlášením o **dobrovolnosti** účasti a o vědomí práva kdykoliv souhlas s další účastí ve studii odmítnout. Toto případné odmítnutí neovlivní jakkoli negativně další vztah mezi vedoucím či řešitelem studie a Vámi. Tato zásada platí i v případě, že nebudete souhlasit ani s Vaším vstupem do výzkumné studie.

**Informovaný souhlas s účastí na výzkumné studii**

**Jméno:** \_\_\_\_\_  
**Příjmení:** \_\_\_\_\_  
**Pohlaví:** \_\_\_\_\_  
**Věk:** \_\_\_\_\_

- 1) Tímto **souhlasím** s účastí na výzkumné studii Aberace vyšších řádů v populaci
- 2) Byl(a) jsem informován(a) o cílech výzkumu, o vyšetřovacích metodách a vyšetřeních, které mi budou prováděny a o náročnosti výzkumné metody zvolené pro toto měření.
- 3) Byl(a) jsem informován(a) o fyzické náročnosti a případných rizicích metody výzkumu.
- 4) Byla jsem informována, že moje účast ve výzkumu je zcela dobrovolná a může být kdykoli zrušena bez jakýchkoliv sankcí.

- 5) Všechny údaje získané v rámci tohoto výzkumu budou zpracovávány, prezentovány či publikovány bez uvedení osobních dat účastníka (tj. anonymně). Tyto údaje mohou být využity pouze pro studijní, publikační a výzkumné účely pověřeným studentům a pracovníkům katedry optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci.

V Olomouci dne: .....

podpis: .....