

PŘÍRODOVĚDĚCKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI  
KATEDRA OPTIKY

## **Periferní zraková ostrost**

Diplomová práce

VYPRACOVALA:

Bc. Klára Byrtusová

Obor 5345T008 OPTOMETRIE

Studijní rok: 2019/2020

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE:

RNDr. Mgr. František Pluháček, Ph.D.

**Čestné prohlášení:**

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

V Olomouci dne

.....

Bc. Klára Byrtusová

**Poděkování:**

Tímto bych chtěla poděkovat mému vedoucímu práce RNDr. Mgr. Františku Pluháčkovi, Ph.D za cenné rady, připomínky a pomoc při vypracování mé diplomové práce.

Tato práce byla vytvořena za podpory projektů IGA PřF UP v Olomouci s názvem “Optometrie a její aplikace“, č. IGA\_PrF\_2019\_005 a IGA\_PrF\_2020\_008.

# Obsah

Úvod.....	6
1. Anatomie sítnice.....	7
1. 1 Pars Optica.....	8
1. 1. 1. Sítnicový pigmentový epitel a fotoreceptory .....	9
1. 1. 2. Zevní plexiformní vrstva, bipolární buňky a horizontální buňky .....	10
1. 1. 3. Vnitřní plexiformní vrstva, amakrinní buňky, gangliové buňky .....	11
1. 1. 4. Gliární buňky sítnice.....	11
1. 2 Rozložení fotoreceptorů na sítnici .....	12
1. 3 Zraková dráha .....	13
1. 4 Receptivní pole .....	14
2. Zraková ostrost.....	17
2. 1 Minimální úhlové rozlišení oka, vízus .....	17
2. 2 Typy a konstrukce optotypů .....	18
2. 3 Psychometrická funkce.....	21
3. Periferní zraková ostrost.....	24
3. 1 Vliv excentricity na zrakovou ostrost.....	24
3. 2 Čitelnost znaků v závislosti na excentricitě.....	27
3. 3 Další vyšetření periferního vidění .....	28
3. 3. 1 Konfrontační metoda.....	28
3. 3. 2 Amslerova mřížka .....	28
3. 3. 3 Perimetrie .....	29
4. Nemoci vedoucí k porušení zrakové ostrosti .....	31
4. 1 Nemoci vedoucí k narušení centrální zrakové ostrosti .....	31
4. 1. 1 Věkem podmíněná makulární degenerace .....	31
4. 1. 2 Degenerativní myopie .....	33
4. 1. 3 Centrální serózní chorioretinopatie .....	35
4. 1. 4 Diabetická retinopatie .....	35
4. 2 Nemoci vedoucí k narušení periferní zrakové ostrosti .....	36
4. 2. 1 Glaukom.....	36
4. 2. 2 Pigmentová retinopatie .....	38
4. 2. 3 Neuropatie optiku a poškození zrakové dráhy .....	39
4. 2. 4 Poruchy zorného pole.....	40

5. Experimentální porovnání psychometrické funkce a zrakové ostrosti v centru a v periférii zorného pole .....	41
5. 1 Soubor a metodika .....	41
5. 2 Analýza dat .....	43
5. 3 Výsledky měření .....	44
5. 4 Diskuze .....	49
Závěr.....	51
Citovaná literatura .....	52

## Úvod

Periferní zrakové ostrosti se v klinické praxi nevěnuje taková pozornost jako měření centrální zrakové ostrosti a vyšetření dalších zrakových funkcí. Přitom periferní vnímání je důležitou součástí procesu vidění, které se podstatně podílí na tvorbě komplexního zrakového vjemu, a je významné při řadě činností, jako je řízení motorových vozidel a mnoho dalších. Navíc, v případě ztráty centrálního vidění například v důsledku oční choroby, může u postižené osoby do značné míry toto centrální vidění nahrazovat.

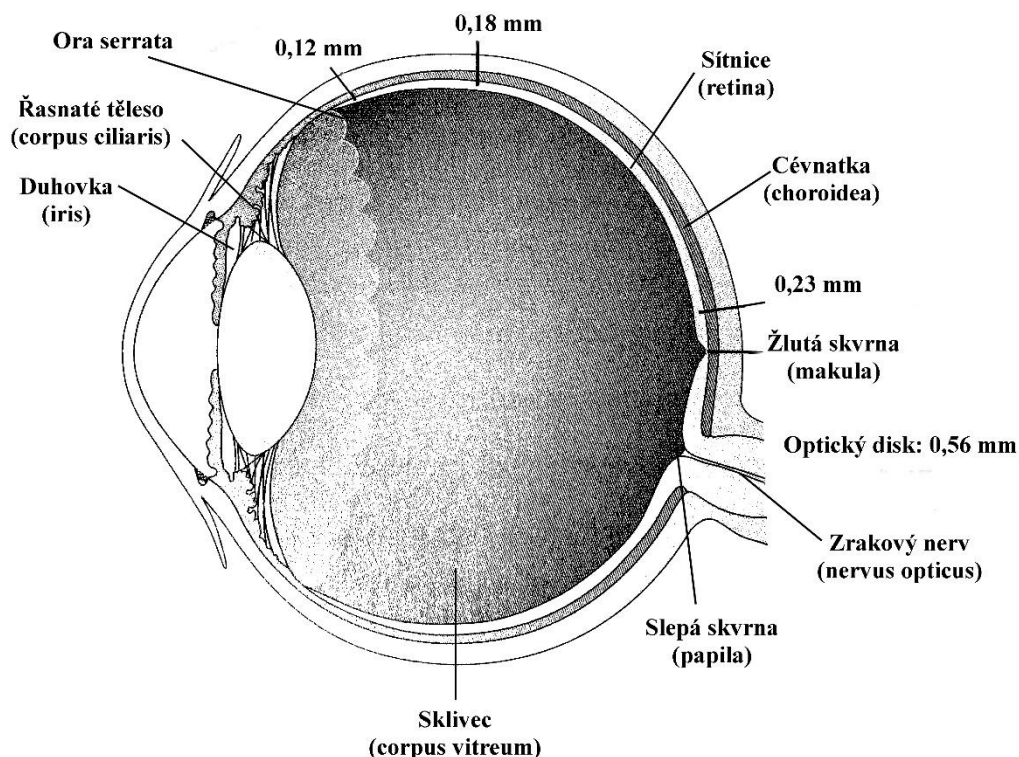
Stěžejním cílem teoretické části této práce je shrnutí problematiky periferního vidění se zaměřením na periferní zrakovou ostrost a její charakteristiky. Zraková ostrost je dána jednak optickým systémem, jednak fyziologickou strukturou oka, respektive sítnice. Pro pochopení chování zrakové ostrosti a jejich změn v závislosti na pozici v zorném poli je tedy nutné znát strukturu sítnice, zejména propojení jednotlivých nervových buněk a jejich receptivní pole. Na tuto problematiku cílí první kapitola, která se též věnuje zrakové dráze a rozmístění fotoreceptorů na sítnici. Dále se věnuji obecné problematice zrakové ostrosti a konstrukci optotypů. Těžištěm teoretické části je problematika periferní zrakové ostrosti. Jsou zde popsány rozdíly mezi zrakovou ostrostí v centru a periférii, závislost zrakové ostrosti na excentricitě v zorném poli a způsob, jak periferní zrakovou ostrost určit. Také se věnuji základním onemocněním, které mohou ovlivnit zrakovou ostrost, a je tedy důležití v těchto situacích umět vyšetřit zrakovou ostrost v periférii a předepsat pacientům vhodnou korekci, aby mohli využít alespoň zbytky zraku, která jim je nápomocná v jejich každodenním životě.

Cílem praktické části je experimentální porovnání centrálního a periferního vidění na základě tzv. psychometrické funkce a srovnání z ní odvozené zrakové ostrosti. Dalším cílem je ověření průběhu zrakové ostrosti jako funkce excentricity.

# 1. Anatomie sítnice

Sítnice (retina) tvoří vnitřní vrstvu oka. Nachází se mezi sklivcem (vitreus) a cévnatkou (choroideou), ke které je volně přiložena díky pigmentového epitelu. Retina je pevně fixovaná k terči zrakového nervu a ora serrata. Sítnice sahá právě od terče zrakového nervu k zubatí linii (ora serrata) a končí u epitelu řasnatého tělíska (corpus ciliaris) viz obrázek 1. Sítnice představuje jemnou tenkou transparentní blánu zbarvenou do růžova o ploše  $266 \text{ m}^2$  a tloušťce v rozmezí 0,125 až 0,560 mm. Nejtenčí část je v oblasti ora serrata a naopak nejsilnější je v okolí terče zrakového nervu. [1, 2, 3]

Částí sítnice je makula lutea, neboli žlutá skvrna, která je místem nejostřejšího vidění, díky velké hustotě čípků. Žlutá skvrna je umístěna lehce laterálně proti zadnímu pólu oka. Ve středu makuly se nachází fovea centralis, která je vrcholem optické osy. Nazálně od makuly je papila, která je místem výstupu zrakového nervu, a proto neobsahuje žádné fotoreceptory. Je to tedy fyziologická slepá skvrna. [4]



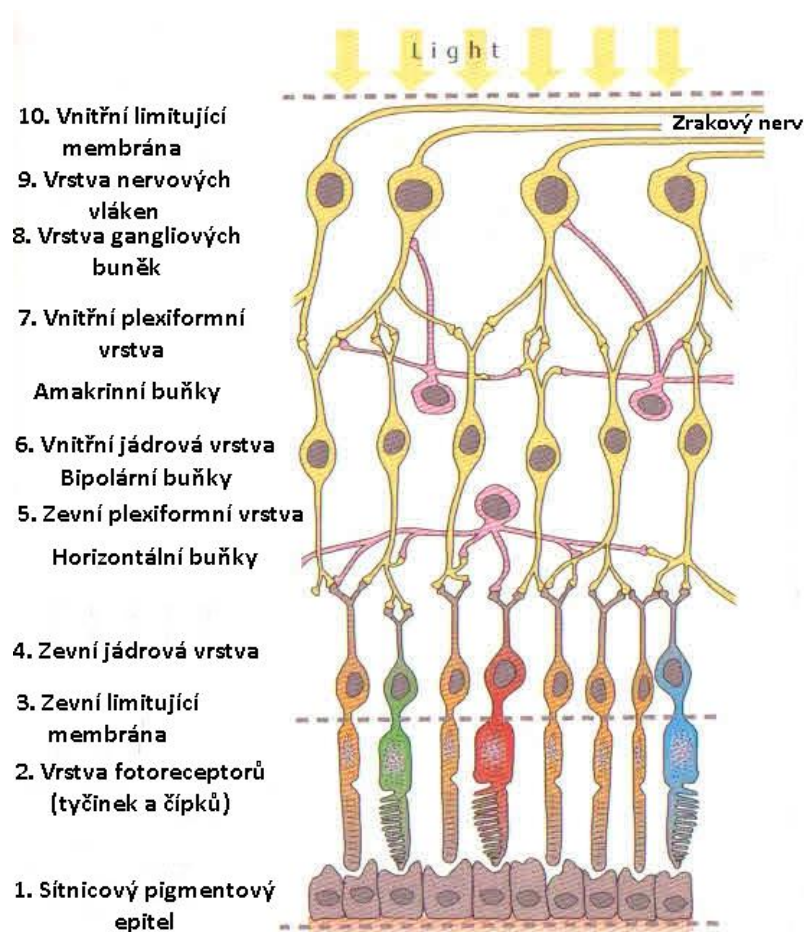
Obrázek 1.: Anatomie oka [1]

Sítnice se skládá ze dvou částí, optické (pars optica), která se rozprostírá od ora serrata ke slepé skvrně (papile) a neoptická (pars caeca), která pokračuje od ora serrata k epitelu corpus

ciliaris a duhovky (iris). Pars plana je často nazývána slepou oblastí sítnice, jelikož neobsahuje žádné nervové ani smyslové elementy. Pro tuto diplomovou práci je tedy podstatnější část optická. [5]

## 1. 1 Pars Optica

Jedná se o tenkou blánu naléhající na cévnatku. Její oranžová až červená barva je důsledkem prosvítání cév. Optická část sítnice se skládá z 10 vrstev, schéma těchto vrstev můžete vidět na obrázku 2. Zevně se nachází vrstva světločivných elementů, které jsou přiloženy k pigmentovému epitelu. Právě světločivné buňky jsou první neurony sítnice. Střední vrstvu tvoří bipolární nervové buňky, druhé neurony sítnice. Vnitřní vrstvu vyplňují gangliové buňky sítnice, třetí neurony sítnice, jejichž neurity se sbíhají do očního nervu. Tyto tři vrstvy sítnicových neuronů vytváří spojení ve formě synapsí. [1, 4, 6]



Obrázek 2.: Schéma vrstev sítnice [7]



### 1. 1. 1. Sítnicový pigmentový epitel a fotoreceptory

Jedná se o vnější vrstvu sítnice, která je složená z jednovrstevného kubického epitelu. Buňky tohoto epitelu mají sloupcovitý tvar a jsou hustě zastoupené zejména v oblasti makuly. Výběžky těchto buněk obsahují melanosomy a vstupují mezi tyčinky a čípky. V blízkosti ora serrata, pigmentový epitel sítnice přechází na pigmentový epitel ciliárního tělesa. Sítnicový pigmentový epitel zajišťuje výživu a transport kyslíku pro světločivé elementy, které se na něm nacházejí. [1, 6]

Fotoreceptory, tyčinky a čípky, jsou speciální senzorké buňky, obsahující fotopigmenty, které pohlcují fotony dopadajícího světla na sítnici. Jsou to bipolární neurony, které jsou složeny ze zevního a vnitřního segmentu. Vnitřní segment se skládá ze širšího vřetenového těla buňky, které obsahuje jádro a bazální výběžek, synapticky napojen na bipolární buňky sítnice. V apikální části vnitřního segmentu se nachází mitochondrie, které jsou energetickou zásobárnou pro fyzikální a chemické procesy fotoreakce. Zevní segment je tvořen membránou bohatou na fotosenzitivní pigmenty. Tento segment je v sítnici orientován paralelně směrem k dopadajícímu světelnému paprsku a lamely membrán, se kterých se skládá, jsou umístěny kolmo k paprsku světla. Tato struktura je důležitá pro optimální stimulaci fotonů, které jsou nasměrovány lomným aparátem oka. Tyčinky a čípky jsou nervové buňky sítnice, jejichž vnější část je v kontaktu s pigmentovým epitelem. Tyto fotoreceptory obsahují fotosenzitivní pigment a vnitřní synaptické konce přenášející signál, světlo dopadající na sítnici, bipolárními a horizontálními buňkami. [1, 3, 8]

Počet tyčinek na sítnici lidského oka je asi 130 milionů, což je asi 95 % celkových receptorů. Tyto fotoreceptory mají největší koncentraci 20° od fovey a zcela chybí právě v oblasti fovey. Tyčinky jsou rozděleny na vnější a vnitřní úsek. Světločivé elementy se nacházejí ve vnějším úseku, kdy můžeme nalézt také zrakový purpur (rhodopsin), substanci citlivou na světlo. Rhodopsinová molekula při osvětlení mění světelné impulsy na nervové vzruchy. Tyčinky zprostředkovávají noční vidění a obraz jimi vytvořený je monochromatický. Tyčinky jsou ovšem mnohem citlivější a registrují i zrakový vjem o nižší intenzitě. Ve vnitřním úseku je buněčné jádro a nervová vlákna, tyto vlákna vcházejí do nitra sítnice a spojují se s bipolárními buňkami. Na 1 bipolární buňku se může napojit asi 10 až 100 tyčinek, dále na 1 gangliovou buňku se napojí 100 bipolárních buněk. [3, 5, 8]

Počet čípků na sítnici je asi 7 milionů, tedy 5 % celkového počtu receptorů. Jsou větší než tyčinky a mají největší zastoupení v makulární oblasti a směrem od ní se jejich počet

snižuje. Tyto fotoreceptory slouží k vnímání barev, jsou účinné hlavně za denního světla, kdy je nadbytek fotonů a vytváří nám kvalitní barevný vjem. Čípky jsou rozděleny na 3 druhy, rozlišují se podle barevného spektra, které jsou schopny vnímat, na červenou, zelenou a modrou. Stejně jako tyčinky i čípky se skládají s vnějšího a vnitřního úseku. Ve vnějším úseku můžeme nalézt mitochondrie a substanci citlivou na světlo, jodopsin. Vnitřní úsek obsahuje jádro a nervové výběžky, vytvářející synapse s bipolárními buňkami, obvykle se na jednu bipolární buňku napojuje jeden či 6-7 čípků. V oblasti papily nejsou přítomny žádné fotoreceptory. [3, 5]

#### 1. 1. 2. Zevní plexiformní vrstva, bipolární buňky a horizontální buňky

V zevní plexiformní vrstvě se sbíhají axony fotoreceptorů s bipolárními a horizontálními buňkami, a dochází tak k propojení a výměně signálů. Probíhá zde rozdělení vidoesignálů, detekce objektů světlejších nebo tmavších než pozadí a dochází také k vyvážení kontrastu vlastního sledovaného objektu. [3]

Bipolární buňky jsou nervové buňky, tvořící první neuron zrakové dráhy. Těchto buněk je 11 typů, deset pro čípky a jeden typ pro tyčinky. Bipolární buňky mají lineární průběh a skládají se z dendritů, buněčného těla a jádra. Tyto buňky spojují fotoreceptory s gangliovými buňkami, toto spojení je buď individuální nebo difúzní. Individuální přepojení, je spojení, kdy se napojí několik smyslových buněk na jednu bipolární, probíhá pouze v centru fovey. Při difúzní propojení se několik bipolárních buněk napojí na jednu nebo více gangliových buněk. Ve vertikálním propojení se vyskytují 3 typy těchto buněk, čípkové (midget), plošné (flat) a tyčinkové (rod). Čípkové bipolární buňky se pojí pouze na jeden čípek naopak plošná bipolární buňka se pojí se 6-7 čípků. Tyčinková bipolární buňka se pak může pojit až s 50 tyčinkami. Z toho vyplývá, že bipolární buňka se nemůže spojit zároveň s tyčinkami a čípků. [3, 5, 8]

Horizontální buňky, tvoří synapse svými dendrity s koncem čípků. S fotoreceptory je spojen vybíhajícími neurity. Tyto vzruchy jsou vedeny horizontálně, kolmo na svislé vedení mezi neurity. [5]

### 1. 1. 3. Vnitřní plexiformní vrstva, amakrinní buňky, gangliové buňky

Zevní plexiformní vrstva přináší do své husté sítě informace, přenesené axony bipolárních buněk. Probíhá zde propojení mezi různými funkčně specializovanými typy amakrinních buněk a s dendrity gangliových buněk. Amakrinní buňky zde plní podobnou úlohu pro bipolární buňky jako horizontální buňky pro fotoreceptory. Amakrinních buněk můžeme rozlišit až 25 typů. Klasifikují se podle velikosti dendritického větvení, podle charakteru větvení a stratifikace dendritického větvení. Dendrity amakrinních buněk mohou spojovat i větší množství gangliových buněk. [3, 5]

Gangliové buňky představují svými výběžky druhý neuron zrakové dráhy. Tyto buňky jsou největší a svými dlouhými axony sbírají elektrické impulzy, které procházejí sítnicí horizontálně a vertikálně a vede je zrakovým nervem do primárního zrakového centra, zevního kolínkovitého tělíska (corpus geniculatum laterae). [3, 5]

### 1. 1. 4. Gliální buňky sítnice

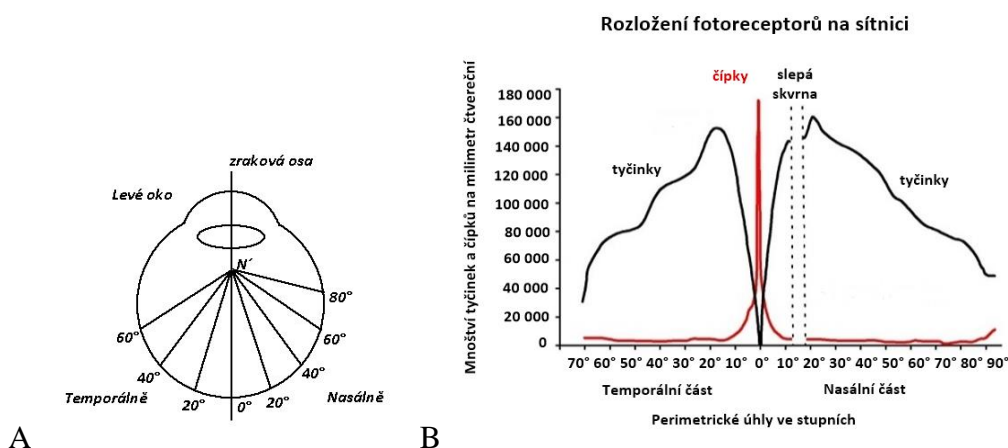
Mezi gliální neboli podpůrné buňky řadíme Müllerovy buňky, mikroglie a astrocyty. Podpůrné buňky mají zejména vyživovací úlohu. [5]

Müllerovy buňky jsou uspořádány do síťoviny. Jejich jádro je uloženo ve vnitřní jaderné vrstvě stejně jako jádra bipolárních buněk a jejich výběžky jsou zde sestaveny do proděravěných lamel, ve vrstvách vláken mají ale hustou fibrální strukturu. Silné výběžky vybíhají směrem k oběma limitujícím membránám a obklopují ostatní buněčné a vláknité vrstvy sítnice. [3, 5]

Mikroglie jsou podpůrnou tkání mezodermálního původu schopné fagocytózy. Nacházíme je ve všech vrstvách sítnice. Jsou to malé buňky s malými výběžky. Astrocyty nepatří mezi gliální tkáň sítnicového neuroepitelu, ale během vývoje postupují z mozku do zrakového nervu a poté se šíří do periferie. Zprostředkovávají látkovou výměnu mezi nervovou tkání a cévami. [3, 5]

## 1. 2 Rozložení fotoreceptorů na sítnici

Různé části sítnice jsou jinak funkčně specializované a tato specializace je spojená právě s rozložením fotoreceptorů na sítnici. V centru, kde je největší hustota čípků, dosahuje zraková ostrost svých maximálních hodnot, k čemuž dochází při fotopickém vidění. Čím vyšší je hustota tyčinek, tím citlivější je sítnice na detekci tlumeného světla při skotopickém vidění. Hustota tyčinek a čípků jsou vykresleny na obrázku 3 pro levé oko. Úhly se vztahují k poloze na sítnici, kdy  $0^\circ$  je střed fovey. Tento způsob stanovení polohy na sítnici se v klinické praxi používá ke značení defektů v zorném poli. V nejostřejší oblasti, v oblasti makuly, může hustota čípků narůst až na 146 tisíc čípků na  $\text{mm}^2$ . Oblast žluté skvrny je široká asi 5,5 mm a obsahuje žlutý pigment. Ve středu makuly se nachází jamka fovea centralis, která je široká asi 1,5 mm a v jejím centru se nachází foveola. V tomto místě je četnost čípků největší,  $10^\circ$  od centra se četnost sníží na 10 tisíc čípků na  $\text{mm}^2$  a směrem do periferie stále klesá. Hustota tyčinek je naopak největší ve  $20^\circ$  od fovey a činí přibližně 150-160 tisíc tyčinek na  $\text{mm}^2$ , jejich hustota klesá jak směrem do periferie, tak do centra, kde se tyčinky téměř nevyskytují. Rozložení fotoreceptorů na sítnici ovlivňuje periferní zrakovou ostrost, této souvislosti se bude dále zabývat kapitola 3. [8]

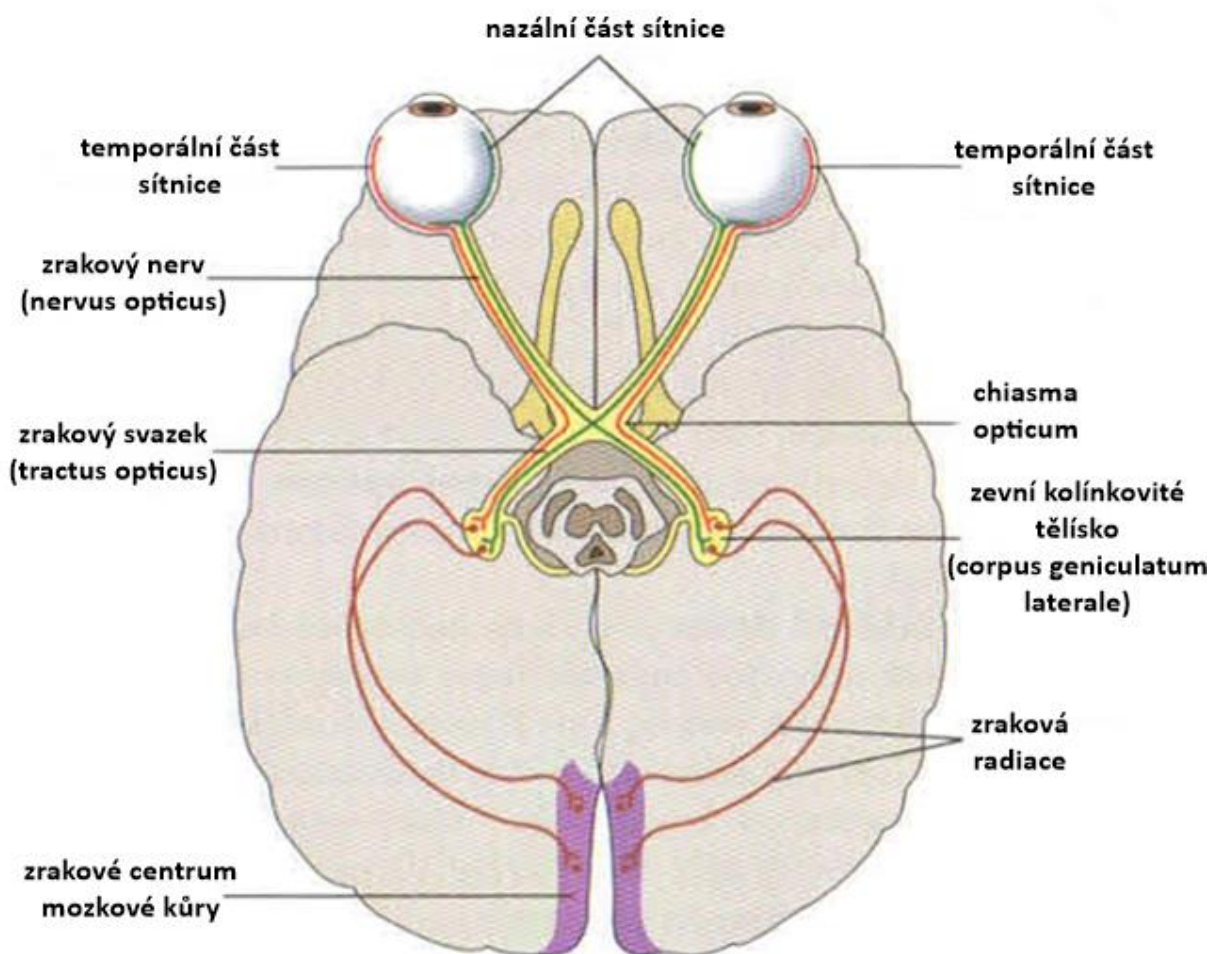


Obrázek 3.: A) Úhly vztahující se k poloze na sítnici, B) Rozložení fotoreceptorů na sítnici [8]

### 1. 3 Zraková dráha

Zraková dráha zajišťuje převod signálu z oka do mozkové kůry. Tato dráha se skládá ze tří neuronů, spojení začíná podrážděním fotoreceptorů na sítnici a končí ve zrakovém centru v mozkové kůře, viz obrázek 4. Nervová buňka se skládá z těla a výběžků. Krátké výběžky, dendrity, přivádí vzruchy tělu buňky a dlouhý výběžek, neurit (axon), odvádí vzruch od buňky. [9]

Fotoreceptory mění světelné impulsy na elektrické, výběžky těchto fotoreceptorů jsou nepojeny na dendrity bipolárních buněk, prvního neuronu zrakové dráhy. Bipolární nervové buňky tvoří na sítnici ganlion retinae. Neurity těchto buněk se pojí s dendrity gangliových buněk, druhého neuronu zrakové dráhy, a tvoří ganglion opticum. Problematika tohoto propojení bude v rámci receptivních polí zmíněna v následující kapitole 1. 4. Neurity gangliových buněk opouští oko jako nervus opticus přes kanál zrakového nervu do střední jámy lebeční, chiasma opticus, kde dochází k částečnému křížení nervových vláken. Nazální vlákna tvořící 60 % vláken obou očí se kříží a temporální vlákna jsou vedena dál nezkřížená. Vlákna vedou přes optický trakt do zevního kolínkovitého tělísko (corpus geniculatum laterale) v mezencefalu, primárního zrakového centra. Třetím neuronem zrakové dráhy jsou nervové buňky v corpus geniculatum laterale. Neurity těchto buněk tvoří zrakovou radiaci neboli Gatioletův svazek, a končí na vnitřní ploše týlního laloku, kde vzniká zrakový vjem. [9]

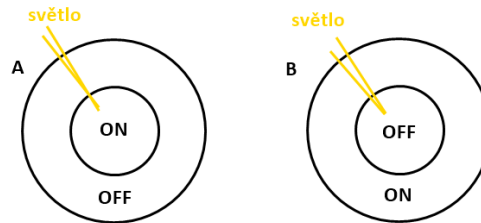


Obrázek 4: Zřaková dráha [9]

#### 1. 4 Receptivní pole

Jak již bylo uvedeno výše, jedna bipolární buňka může být napojena až na několik fotoreceptorů. V případě čípků se jedná o propojení na 1 nebo 6-7 čípků, u tyčinek je to až několik desítek. Obdobně gangliová buňka může být provázána s jednou nebo několika bipolárními buňkami. Tato struktura pokračuje i ve vyšších částech zřakové dráhy. Důsledkem těchto propojení jsou tzv. receptivní pole. Receptivní pole zřakového neuronu je ta část sítnice, která při stimulaci vyvolá odpověď neuronu. Receptivní pole lze přiřadit každé buňce v jakékoli části zřakové dráhy (viz kapitola 1.3) od receptoru až ke kortikálním či subkortikálním jádrům. Části receptivních polí se mohou překrývat díky propojení horizontálními buňkami. Fotoreceptory, bipolární a horizontální buňky se aktivují hyperpolarizací, transmittery receptorů jsou tedy uvolňovány za tmy ve větším množství. Gangliové a amakrinní buňky naopak

depolarizací. Receptivní pole má přibližně kruhový tvar a má protichůdný charakter v centru a v jeho okolí. Buňky dle receptivního pole rozdělujeme na buňky ON-centre a OFF-centre viz obrázek 5. Dopadne-li světlo do ON části, buňka se aktivuje, při dopadu do OFF části dojde k útlumu buňky. [1, 8]



Obrázek 5.: Typy buněk dle receptivních polí: A) ON-centre, B) OFF-centre [8]

Čípek se může vázat jak na kanál ON, tak na kanál OFF, proto se signál zachycený čípkem dále váže na jakoukoli bipolární buňku. Naopak tyčinky se mohou spojit pouze s bipolární buňkou typu ON-center a protichůdný (OFF) kanál je tedy zprostředkován propojením přes amakrinní buňky. Dle receptivních polí lze popsat procesy na sítnici. Receptivní pole pro konkrétní bipolární buňku se skládá z fotoreceptorů, s nimiž je v přímém kontaktu, a se všemi dalšími fotoreceptory a horizontálními buňkami, které ji mohou ovlivnit. Pokud se buňky v okolí aktivují, signál vycházející z centra buňky mění svou odpověď na opačnou. K odpovědi z okolí centra částečně dochází z důvodu laterální inhibice horizontálních buněk a aktivity amakrinních buněk na bipolární axony. Konfigurace okolí centra umožňuje neuronu nejen reagovat na přímou zprávu, ale také shromažďovat informace ze sousedních oblastí a poskytovat tak podrobnosti o větším celku, které poté ovlivňují i daný neuron. Uvedená struktura receptivních polí a případně jejich složitější struktury u buněk hlouběji ve zrakové dráze, dané kombinací jednotlivých receptivních polí např. gangliových buněk, napomáhá k detekci hran, rozpoznávání kontrastu, maximalizuje kontrastní citlivost sítnice, určuje směr pohybu a mnoho dalšího. [1]

Buňky se tedy mohou dělit podle toho, na jaký podnět jejich receptivní pole reagují. Nejvíce zastoupeny jsou buňky typu X, které reagují na trvalý podnět. Jejich receptivní pole je nejmenší, mají středně rychlé reakce a vyskytují se zejména v oblasti fovey. Buňky typu Y, neboli buňky přechodné tvoří jen 4% a reagují pouze na počátku či odstranění stimulu, detekují tedy pouze dočasné, časově proměnné podněty. Mají ovšem největší receptivní pole, jejich reakce jsou mnohem rychlejší a objevují se zejména v periférii sítnice. Posledním typem jsou

buňky typu W, kterých je přibližně 40 % z celkového počtu a jsou citlivé na směr pohybu v receptivním poli. Tyto buňky vedou signály poměrně pomalu. [8]

Obecně se velikost receptivních polí směrem z centra do periferie zvětšují, ovšem jak již bylo řečeno mohou se překrývat s jinými receptivními poli různých velikostí. Určité gangliové buňky přijímají signál z periferní části sítnice, aktivací tyčinek při tlumeném osvětlení nebo čípky za fotopických podmínek, ne však oběma zároveň. Gangliové buňky jsou stimulovány sumací depolarizovaných tyčinek. Tato sumace umožňuje detekci světla nízké intenzity, díky stimulaci velkého počtu tyčinek na relativně velké ploše sítnice. Díky propojení bipolární buňky s fotoreceptory a následnému propojení bipolární buňky s gangliovou, může jedna gangliová buňka vytvářet spojení s větším množstvím tyčinek a čípků v periferii sítnice. V kapitole 3 bude dále popsána souvislost receptivního pole a propojení neuronu v periferii na periferní zrakovou ostrost. [8]



## 2. Zraková ostrost

Vyšetření zrakové ostrosti patří mezi základní vyšetření zrakových funkcí. Tímto vyšetřením zjišťujeme schopnost zrakového systému rozlišit jemné detaily, obvykle pacient identifikuje znaky v určité vzdálenosti, které jsou postupně zmenšovány. Zraková ostrost je podmíněna nejen rozlišovací schopností, ale důležitý je také refrakční stav oka. Pro správnou zrakovou ostrost musí mít oko transparentní optické prostředí, fyziologickou lomivost, normální funkce foveálních čípků a centrální fixaci, neporušenou funkci zrakového nervu, zrakových funkcí a zrakového korového centra.

### 2. 1 Minimální úhlové rozlišení oka, vízus

Rozlišovací schopnost oka (minimum separabile) představuje schopnost rozlišit od sebe dva body. Úhel vytvořený mezi těmito body se nazývá minimální úhlové rozlišení (*MAR* – Minimal Angle of Resolution). Tento úhel by měl být za fyziologických podmínek roven alespoň 1', což přibližně odpovídá stimulaci dvou čípků, mezi nimiž leží jeden nepodrážděný čípek. Mimo *MAR* se též zavádí tzv. noniová rozlišovací mez, která udává nejmenší vzdálenost dvou na sebe zdánlivě navazujících úseček, kdy tyto úsečky ještě nejsou vnímány jako jediná dlouhá úsečka. Zraková ostrost je dána jasem a kontrastem předmětů, velikostí zornice, vadami oka a dalšími podmínkami. Dále významně závisí na poloze pozorovaného objektu vzhledem k oku, zda je v centru nebo v periférii. [4, 10, 11, 12]

Vzhledem k tomu, že lidské vnímání včetně zrakového má nelineární, logaritmický charakter, bývá někdy, zejména při přesném měření v rámci klinických či výzkumných studií, místo *MAR* použit desítkový logaritmus této veličiny,  $\log MAR$ . V klinické praxi se často využívá relativní veličiny vízus *V*, který je definován podílem jedné úhlové minuty a minimálního úhlového rozlišení [4, 13, 14]

$$V = \frac{1'}{MAR}$$

K vyšetření zrakové ostrosti využíváme standardizované speciální znaky zvané optotypy a měříme ji jak do dálky na vzdálenost 5 nebo 6 metrů, kdy je akomodace menší než 0,25 dioptrie, tak do blízka zpravidla na 40 cm. Mimo zápis vízu pomocí desetinného čísla lze

vyjádřit též pomocí zlomku, který udává poměr vyšetřovací vzdálenosti a tzv. čísla řádku, [3, 4, 13]

$$V = \frac{\text{vyšetřovací vzdálenost}}{\text{číslo řádku}}.$$

Číslo řádku představuje vzdálenost, ze které by použitý testový znak byl právě rozlišen okem s vízem 1. Tento zápis lze odvodit z výše uvedené definice vízu a souvisí se staršími konstrukcemi testů zrakové ostrosti (viz níže). Srovnání jednotlivých vybraných hodnot zrakové ostrosti v jednotlivých typech zápisu poskytuje tabulka 1. [14]

Tabulka 1: Vztah mezi různými zápisy zrakové ostrosti [14]

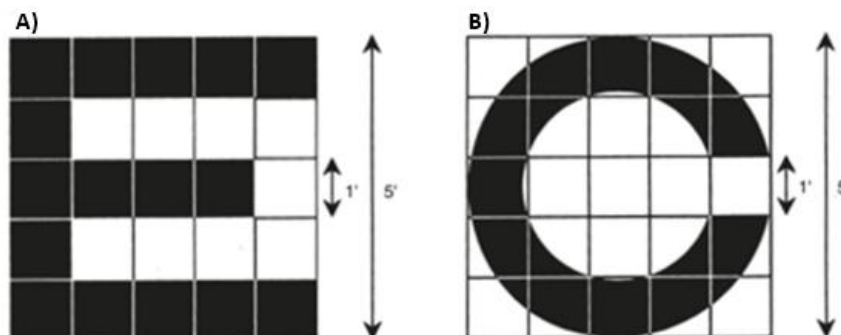
Snellen	Decimal	LogMAR
6/60	0,10	1,000
6/24	0,25	0,602
6/12	0,50	0,301
6/6	1,00	0,000
6/4	1,50	-0,176

## 2. 2 Typy a konstrukce optotypů

Optotyp je soubor znaků s proměnnou velikostí, tyto znaky jsou obvykle uspořádány do řádků s postupně se snižující velikostí. Tato konstrukce je typická především pro vyšetření centrální zrakové ostrosti. Jelikož periferní zraková ostrost výrazně závisí na pozici předmětu v zorném poli, je nutné této konstrukci optotypů, respektive celé měření zrakové ostrosti vhodně přizpůsobit. Perifernímu měření zrakové ostrosti je věnována samostatná kapitola 3.

Obvyklé konstrukce optotypů jsou určeny především pro vyšetření zrakové ostrosti do dálky, tedy na 5 až 6 m, za fotopických podmínek. Pokud vyšetřujeme zrakovou ostrost v menších prostorách, kde není možné dodržet vyšetřovací vzdálenost alespoň 5 metrů, může se optotyp promítat přes zrcadlo, čímž se zdvojnásobí pracovní vzdálenost. Zraková ostrost je určena na základě nejmenšího řádku optotypu, který oko ještě rozliší. Přitom řádek je považován za rozlišený, je-li rozlišeno alespoň 60 % jeho znaků. MAR, resp. logMAR či

odpovídající hodnota  $V$  jsou pak určeny z velikosti detailu optotypového znaku. Případně může být pro daný řádek určena výše uvedená číslo řádku, ze kterého se stanoví v'izus. Při klasické konstrukci dle Snella je velikost detailu rovna  $1/5$  výšky znaku, viz obrázek 6. Je-li znak vidět pod úhlem  $5'$ , je jeho detail  $1'$ . Alternativou k tomuto přístupu může být měření tzv. psychometrické funkce, ze které se pak interpolací určí velikost znaku (resp. odpovídající  $\log MAR$ ), při které je identifikován s danou pravděpodobností. Psychometrické funkci se věnuje kapitola 2.3. [11, 15]



Obrázek 6: A) E háky, B) Landoltův prstenec (12)

V ideálním případě by všechny znaky optotypu měly být čitelné se stejnou obtížností. Ne vždy je tento požadavek zcela splněn. Obvykle se používají velká písmena latinské abecedy, například tzv. Sloan letters, British letters, E háky nebo jim podobné Pflügerovy háky, Landoltovy prstence (obrázek 6B), čísla a jednoduché obrázky jako například Lea Symbols. Sloan letters představují sadu deseti velkých bezpatkových písmen (H V Z D S N C K R O) vepsaných do rastru  $5 \times 5$ . British letters jsou písmena v rastru  $5 \times 4$ . Pro jednoduchost komunikace s vyšetřovaným jsou v praxi často používána Sloan letters či British letters, a to i přes to, že jednotlivá písmena mají různou čitelnost. Sloan letters jsou použita i v experimentální části této práce. Pflügerovy háky a E háky (obrázek 6A) představují písmeno E (u Pflügerových háků je prostřední nožička stejně dlouhá jako dvě krajní), prezentovaného ve čtyřech různých pozicích – nahoru, dolů, vlevo a vpravo. Landoltův prstenec (obrázek 6B) je přerušovaný kruh (písmeno C), přičemž velikost přerušování se rovná tloušťce písmene a zároveň je to  $1/5$  výšky písmene C. Může být prezentován ve čtyřech základních pozicích s mezerou nahoře, dole, vlevo či vpravo, případně je možné využít i šikmé pozice. Landoltův prstenec se užívá jako standard při porovnání dalších testů ostrosti, ale v praxi jeho užití pro zhoršenou komunikaci s vyšetřovaným není příliš rozšířené. [3, 4, 11, 12, 15, 16]

Dalším důležitým parametrem je vzájemný rozestup jednotlivých znaků a jejich řádků. Při nesprávném uspořádání může být vjem optotypů ovlivněn tzv. crowding fenoménem. Jedná se o stav, kdy přítomnost okolních znaků v těsné blízkosti znaku pozorovaného výrazně zhoršuje jeho čitelnost. Tento fenomén se výrazně projevuje u lidí s poškozením zrakové ostrosti jako je například amblyopie či věkem podmíněná makulární degenerace. Velký vliv má také v periférii, v centrálním vidění je zřetelně slabší a pro jeho eliminaci je postačující, aby vzájemný rozestup znaků odpovídal jejich velikosti. Pro zachování stejné přesnosti pro každou hodnotu zrakové ostrosti by měl každý řádek obsahovat stejný počet znaků o stejné velikosti. V návaznosti na tzv. Weber-Fechnerův zákon, který říká, že roste-li podnět řadou geometrickou, roste vjem řadou aritmetickou, by se měla velikost řádků, udaná v odpovídající hodnotě  $\log MAR$ , měnit vždy o stejnou hodnotu, standartě 0,1  $\log MAR$ , což odpovídá asi 26 % velikosti. Vízus  $V$  se pak mění geometrickou řadou. Další důležitou roli při vyšetření zrakové ostrosti hraje jas optotypu, který by měl být mezi 85 až 300  $cd/m^2$ . Nejpoužívanější hodnotou je rozmezí mezi 150 až 200  $cd/m^2$ , kdy u horní hranice tohoto rozmezí dochází u pacientů s věkem podmíněnou makulární degenerací k nejlepší zrakové ostrosti. Optotyp může být klasický papírový nástěnný optotyp (obrázek 7), podsvícený, projekční či LCD. Výhodou LCD optotypů je, že díky počítačovým programům lze řetězec písmen stále měnit, a proto máme jistotu, že pacient nehlásí znaky zpaměti. [3, 4, 11, 12, 15, 16]



Obrázek 7: Optotypy – A) Snellův optotyp, B) LogMAR optotyp (14)

Hlavním pokrokem pro návrh optotypů bylo zavedení Bailey-Loviho optotypu (obrázek 7B). Tento optotyp zahrnuje všechna výše uvedená pravidla s cílem standardizovat

zásady pro měření zrakové ostrosti. Bailey a Lovie přijali 10 písmen (D E F H N P R U V Z) s poměrem stran 5:4, u nichž se prokázalo, že mají téměř stejnou čitelnost. Optotyp má na každém řádku konstantní počet písmen, konkrétně pět. Velikost znaků se konstantně snižuje stejně geometrickou řadou s kvocientem  $\sqrt[10]{10}$ ,  $\log MAR$  se tedy mění aritmetickou řadou s diferencí 0,1 ( $\log \sqrt[10]{10} = 0,1$ ). Pro eliminaci crowding fenoménu je mezera mezi písmeny v řádku velká jako šířka písmene v daném řádku a mezera mezi řádky je opět rovna výšce písmene na spodním řádku dle již uvedených standardů. Tento typ optotypu je často modifikován. Příkladem je optotyp ETDRS (early treatment diabetic retinopathy study), který obsahuje sadu znaků Sloan letters s poměrem stran 5:5. Další modifikací je např. tzv. Waterloo optotyp, kde se znaky zmenšují v řádcích zleva doprava. Jednou z výhod těchto optotypů je též možnost určit přesněji zrakovou ostrost. Každému znaku na řádku je možné přiřadit změnu zrakové ostrosti rovnou podílu 0,1  $\log MAR$  a počtu znaků na řádek, pro pět znaků tedy 0,02  $\log MAR$ . Jestliže pacient přečte všechny znaky například v řádku 0,3 a z dalšího řádku přečte již jen dva znaky, je jeho zraková ostrost  $0,3 \log MAR - 2 \times 0,02 \log MAR = 0,26 \log MAR$ . [11, 13, 14, 15, 16]

Pro pacienty s horší zrakovou ostroší či zbytky zraku, kteří nedokážou přečíst ani největší písmeno na optotypu, se volí jiné metody vyšetření zrakové ostrosti. Jednou z metod je počet prstů, kdy se pacient z půl metru snaží spočítat kolik prstů mu ukazuje vyšetřující. Dále se může zkrátit vyšetřovací vzdálenost, aby pacient byl schopen přečíst aspoň největší písmeno. Pokud je zraková ostrost na tolik slabá, že pacient není schopen rozlišit znak z jakékoli vzdálenosti, využívá se pohyb ruky, kdy lékař mávne před vyšetřovaným okem nebo se testuje projekce světla, zda pacient vnímá alespoň světlo. [11]

## 2. 3 Psychometrická funkce

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 2.2, zrakovou ostrost lze určit též na základě tzv. psychometrické funkce. Vzhledem k tomu, že tento přístup je přesnější a poskytuje více informací, byl využit v experimentální části této práce. Psychometrická funkce je základním nástrojem pro psychofyzikální měření, přičemž popisuje závislost subjektivní odpovědi  $P$  na síle fyzikálního stimulu  $x$ . Konkrétní psychometrická funkce  $P(x)$  je matematicky vyjádřena pomocí vzorce

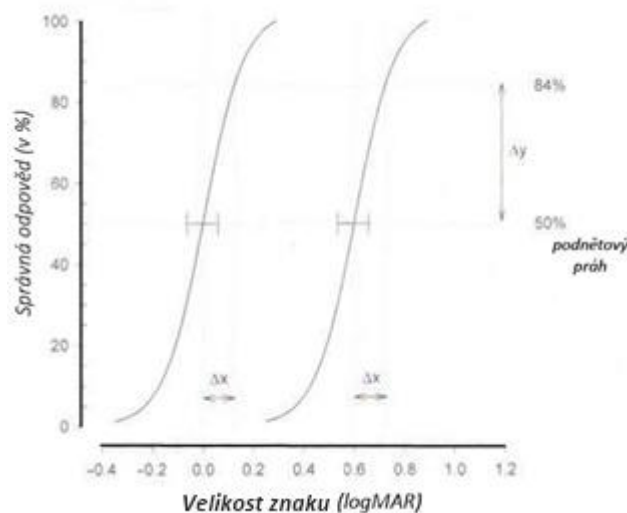
$$P(x) = \gamma + (1 - \lambda - \gamma) p(x),$$

kde  $\gamma$  je dolní asymptota a  $1-\lambda$  je asymptota horní. Parametry  $\gamma$  a  $\lambda$  odráží konkrétní podmínky daného experimentu ( $\lambda$  představuje chyby v odezvě subjektu při nadprahové hodnotě stimulu,  $\gamma$  odpovídá pravděpodobnosti náhodného uhodnutí stimulu při jeho výrazně podprahové hodnotě) a  $p(x)$  je obecnou psychometrickou funkcí nabývající hodnot od 0 % do 100 %. Obvyklý průběh  $p(x)$  obecné psychometrické funkce lze dobře aproximovat distribuční funkcí normálního rozdělení

$$p(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-s_0)^2}{2\sigma^2}} dt,$$

kde  $\sigma$  představuje směrodatnou odchylku tohoto rozdělení a  $s_0$  je jeho střední hodnota. [17]

V případě zrakové ostrosti vystihuje psychometrická funkce závislost pravděpodobnosti  $P$  správné identifikace prezentovaného znaku na jeho velikosti udané v odpovídajících hodnotách  $\log MAR$ . Příklad uvádí obrázek 8. Velikost znaku v  $\log MAR$  je vynesena na ose  $x$ , úspěšnost správných odpovědí v procentech určuje osa  $y$ . Z obrázku je patrné, že v obou případech úspěšnost správných odpovědí roste z velikostí znaku a hodnota  $\lambda$  se v tomto případě blíží k nule. Dolní asymptota  $\gamma$  je závislá na počtu znaků. Jestliže měřený subjekt zná celkovou škálu prezentovaných znaků  $N$ , lze tuto hranici určit jako  $1/N$ . Pro analýzu psychometrické funkce je důležité stanovit sklon křivky. Sklon funkce lze charakterizovat poměrem  $\Delta y/\Delta x$ , přičemž obvykle se vychází z takové změny  $\Delta x$ , která odpovídá změně  $\Delta y$  od 84 % do 50 %. Zraková ostrost definovaná na základě 60% pravděpodobnosti rozlišení znaku spadá právě do tohoto intervalu. [18]



Obrázek 8: Křivka psychometrické funkce [18]

Křivka psychometrické funkce nám může poskytnout mnoho dalších informací o zrakovém systému. Plošší křivka, tedy menší sklon křivky může odpovídat špatné korekci, nekorigovanému astigmatismu, nepravidelné akomodaci či jiné anomálii. Vyšetření zrakové ostrosti může být také poněkud obtížnější než u pacienta, jehož psychometrická funkce je naopak strmá – v tomto případě bude vyšetřovaný velmi citlivý na změnu velikosti znaku a obvyklá škála s krokem 0,1 logMAR může být příliš hrubá. Se strmostí křivky roste například opakovatelnost měření. [18]

### 3. Periferní zraková ostrost

Periferní zraková ostrost je oproti centrální mnohem nižší, i přesto je velice důležitá. Periferní vidění nám podává informace o prostoru a pomáhá nám tak orientovat se při chůzi, pohybovat se v našem okolí, proto je pro periferní vidění podstatnější jeho rozsah, který označujeme jako zorné pole. Zorné pole je část prostoru, které vidíme okem, aniž bychom pozměnili pohledový směr. Jedná se o zevní projekci všech bodů, které se zobrazují na sítnici přímým i nepřímým viděním při fixaci jednoho oka. Obrazy v zorném poli se promítají na sítnici převráceně, temporální zorné pole se promítá na nazální sítnici a obráceně. Hranice normálního zorného pole je temporálně 90°, nasálně 60°, směrem nahoru 60° a dolů 70°. Tyto hranice jsou ovlivněny tvarem obličeje, čela a nosu. Při pohledu oběma očima se zorné pole překrývá. Slepá skvrna neboli Marriotův bod, vytváří v zorném poli slepé místo, které se nachází v horizontálním meridiánu 18° temporálně od fixovaného bodu. [19]

#### 3. 1 Vliv excentricity na zrakovou ostrost

Zraková ostrost se mění v závislosti na excentricitě, je tedy ovlivněna místem, kde dochází ke stimulaci sítnice. Nejostřejším místem vidění, jak už bylo řečeno, je fovea a od ní směrem do periferie se zraková ostrost snižuje. Změna zrakové ostrosti není stejná ve všech meridiánech sítnice. Ostrost se zhoršuje pomaleji podél osy vodorovné než osy svislé a podle publikace [18] je ostrost lepší v temporální oblasti než nazální. Fyziologický důvod tohoto rychlého zhoršení zrakové ostrosti spočívá především v rozmístění čípků a jejich nervových spojení. Čím blíže jsou čípky u sebe, tím menší je *MAR* a tím lepší je zraková ostrost. Abychom tedy docílili stejné úspěšnosti v identifikaci optotypových znaků, měly by se tyto znaky směrem do periferie zvětšovat, jak je vyobrazeno na obrázku 9. Optimální zvětšení znaků by bylo takové, aby při pohledu do středu testu neurální obraz každého písmene v mozku měl stejnou kortikální velikost. [18, 20, 21]

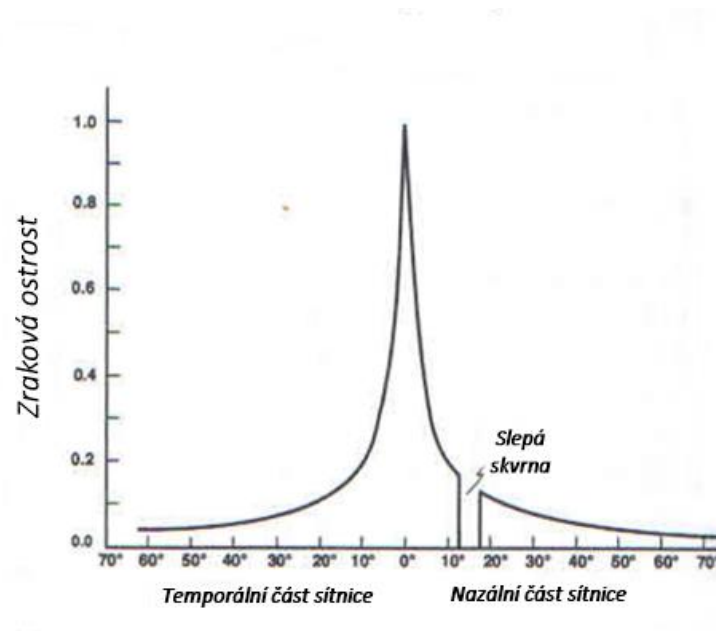


Obrázek 9: Písmena odpovídající stejné kortikální velikosti jejich neurálních obrazů [21]



Dalším důvodem periferního poklesu zrakové ostrosti je propojení mezi fotoreceptory a bipolárními a gangliovými buňkami. V oblasti fovey jsou jeden až dva čípky spojeny přes bipolární buňku s jednou gangliovou buňkou. V periferní části sítnice může být jedna gangliová buňka napojena na větší počet fotoreceptorů. Díky sumaci signálu z více fotoreceptorů tedy může být zaznamenán i menší světelný podnět, ale detail obrazu není tak zřetelný jako při centrálním vidění. [8]

Pokles zrakové ostrosti (vízu) směrem do periferie je vyobrazen na obrázku 10. Tato závislost přibližně odpovídá grafu hustoty čípků na sítnici na obrázku 3B v první kapitole této diplomové práce. Můžeme pozorovat, že v různých excentricitách je zraková ostrost různá, přičemž největší pokles nastává v oblasti excentricit od  $0^\circ$  do  $5^\circ$ , a to zhruba na jednu třetinu. Při excentricitě  $10^\circ$  dosahuje vízus pouze pětiny centrální hodnoty a při  $20^\circ$  jen desetiny. V excentricitě  $70^\circ$  je zraková ostrost téměř nulová. [8, 22]



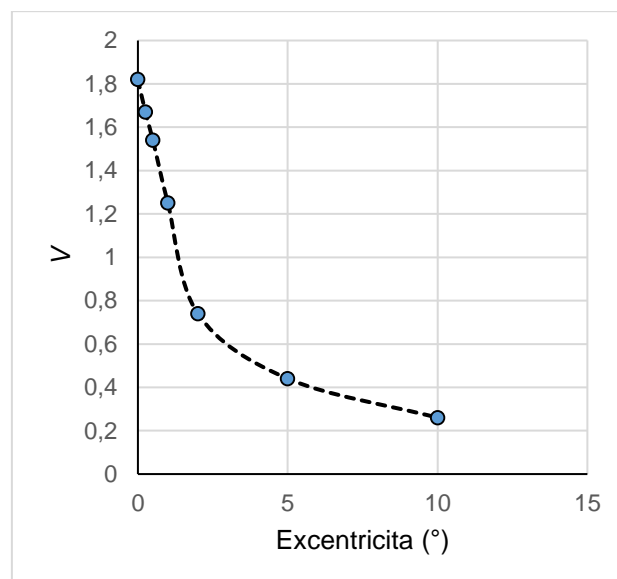
Obrázek 10: Vízus v různé excentricitě sítnice [8]

Podrobněji se závislostí vízu na excentricitě zabývala studie [23]. Pro testování bylo vybráno 5 písmen (F, E, C, L, T) s konstrukcí dle Snella, která byla pozorována při excentricitách  $15'$ ,  $30'$ ,  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $5^\circ$  a  $10^\circ$  od fovey v horizontálním meridiánu sítnice. Úkolem pozorovatele bylo fixovat černý bod a hlásit písmeno v periférii. Zraková ostrost byla stanovena libovolně z hlediska velikosti písmen, která byla vyžadována k 60 % správných úsudků. Průměrné výsledné hodnoty jsou v tabulce na obrázku 11. Pokles zrakové ostrosti byl v této

studii odůvodněn opět různou hustotou čípků napříč sítnicí, dalším předpokladem byla změna refrakčního stavu oka pro periferní zorné pole kvůli astigmatismu a nedokonalou korekcí zakřivení pole. Studie se dále zabývala čitelností znaků v periférii, z jejichž výsledků vyplývá, že v periférii jsou kulaté znaky, například C, lépe čitelné než v centru. V grafu na obrázku 12 je průměrný pokles zrakové ostrosti směrem do periférie.

Excentrická fixace (°)	1. subjekt	2. subjekt	3. subjekt	Průměr
0,00	1,67	1,67	2,00	1,82
0,25	1,54	1,54	1,82	1,67
0,50	1,54	1,43	1,82	1,54
1,00	1,11	1,18	1,43	1,25
2,00	0,67	0,80	0,77	0,74
5,00	0,51	0,41	0,43	0,44
10,00	0,24	0,26	0,29	0,26

Obrázek 11: Vízus v různých excentricitách pro jednotlivé subjekty přepočten na desetinná čísla podle studie [23]



Obrázek 12: Pokles průměrné hodnoty zrakové ostrosti na excentricitě podle studie [23]

### 3. 2 Čitelnost znaků v závislosti na excentricitě

Rozdílná struktura sítnice a zrakové dráhy v periférii se projevuje nejen poklesem zrakové ostrosti, ale též změnou čitelnosti znaků a jiným typem záměn, ke kterým při identifikaci znaků dochází. Toto svědčí o odlišném mechanismu zpracování signálu v periférii a v centru. Odlišná čitelnost v periférii může ovlivnit měření zrakové ostrosti. Touto problematikou se blíže zabývala studie Lewise a Bedella [20]. Konkrétně se zabývaly rozdíly mezi centrem a periférií při excentricitě  $10^\circ$  temporálně, v horní části zorného pole a v temporálně-horní oblasti. Cílem bylo porovnání čitelnosti jednotlivých znaků a jejich záměn. Uvažovány byly všechna písmena latinské abecedy s výjimkou písmene „I“, dále samostatně Sloan letters. V centrální a horní části zorného pole byly navíc použity Landoltovy prstence. Studie se zúčastnilo 9 zdravých jedinců, měřeno bylo vždy pravé oko s nejlepší možnou korekcí. Promítán byl vždy jeden znak z dané sady, přičemž byl sledován centrálně nebo periferně. Při periferním sledování znaku bylo centrálně fixováno pomocné červené světélko v příslušné vzdálenosti a pozici vůči prezentovanému znaku. Prezentace znaku byla omezena na 1 s. Na základě opakované prezentace znaků při jejich proměnné velikosti byla pro všechny testované podmínky stanovena psychometrická funkce. Z ní byla stanovena zraková ostrost a relativní čitelnost znaků. Relativní čitelnost byla definována jako rozdíl zrakové ostrosti (v  $\log MAR$ ) stanovené pro dané písmeno a průměrné zrakové ostrosti pro celou uvažovanou sadu znaků. Studie potvrdila pokles průměrné zrakové ostrosti s excentricitou ( $-0,1 \log MAR$  centrálně,  $0,78 \log MAR$   $10^\circ$  temporálně,  $1,01 \log MAR$   $10^\circ$  temporálně-nahoře a  $1,08 \log MAR$   $10^\circ$  nahoře). Stěžejním výsledkem bylo zjištění změny rozptylu v relativní čitelnosti jak pro všechny znaky abecedy, tak pro subsadu Sloan letters, při změně pozice v zorném poli. Konkrétně byl rozptyl v centrální, temporálně-horní a v horní části zorného pole po řadě  $0,5 \log MAR$ ,  $0,43 \log MAR$ ,  $0,79 \log MAR$  a  $1,01 \log MAR$  pro všechna sledovaná písmena a  $0,17 \log MAR$ ,  $0,194 \log MAR$ ,  $0,45 \log MAR$  a  $0,194 \log MAR$  pro Sloan letters. Obecně se rozsah čitelnosti do periférie nežádoucně zvětšuje, což může vést k problémům se stanovením periferní zrakové ostrosti oproti centrální zrakové ostrosti. Největší rozptyl je v horním zorném poli, které většinou využívají pacienti s makulární degenerací. Autoři doporučují použití tzv. letter- by-letter scoring metody, tedy zohledňování jednotlivých písmen při měření zrakové ostrosti. Dokonce při stejné excentricitě vykazují odlišná místa zorného pole různý rozsah čitelností. Periferie také vyazuje některé záměny písmen, které nebyly pozorovány v centru.

### 3. 3 Další vyšetření periferního vidění

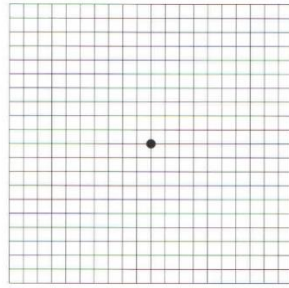
Další informace o stavu periferního vidění nám dává vyšetření zorného pole či zhodnocení stavu sítnice. Pro vyšetření periferní zrakové ostrosti je důležité vědět, kde v zorném poli se výpadky nachází, abychom se mohli věnovat té části sítnice, kde je možno zrakovou ostrost vyšetřit. Díky lokalizaci defektů můžeme od sebe odlišit různé druhy chorob. Onemocnění, které způsobují defekty v zorném poli budou dále popsány v kapitole 4. V závěru čtvrté kapitoly jsou charakterizovány druhy skotomů, které můžeme při vyšetření zorného pole pozorovat. Vyšetření zorného pole lze provést konfrontační metodou nebo Amslerovou mřížkou. Tyto metody jsou jednoduché a lze je použít bez náročnějšího vybavení. Detailnější popis zorného pole nám poskytne perimetrie.

#### 3. 3. 1 Konfrontační metoda

Konfrontační metoda slouží k základnímu vyšetření zorného pole. Toto vyšetření probíhá tak, že pacient sedí naproti vyšetřujícího a monokulárně fixuje jeho nos nebo oko, nevyšetřované oko pacienta je zavřeno. Vyšetřující předkládá do zorného pole stimul například tužku a pohybuje s ní alespoň v 8 základních směrech. Úkolem pacienta je hlásit kdy tužku v oblastech vlastního zorného pole vidí a kdy ne. Vyšetřující tak porovnává zorné pole své se zorným polem pacienta, proto je podmínkou, aby vyšetřující měl zorné pole v pořádku. Pokud pacient tužku nevidí a má vidět, může se jednat o defekt a pacient je poslán na další vyšetření na perimetr. [15]

#### 3. 3. 2 Amslerova mřížka

Pomocí Amslerovy mřížky lze odhalit centrální skotomy a metamorfopsii obrazu. Jedná se o černou mřížku na bílém pozadí, či naopak s černým bodem o poloměru 3 mm uprostřed viz obrázek 13. Mřížka má velikost 10 x 10 centimetrů, kdy jeden čtvereček má 0,5 x 0,5 centimetrů. Vyšetření probíhá monokulárně při zakrytí nevyšetřovaného oka. Pacient drží Amslerovu mřížku ve vzdálenosti 30 cm od oka, fixuje bod uprostřed a snaží se určit, jestli linie, které vidí v periférii jsou rovnoběžné a nikde se nepřerušují. Pokud pacient vnímá výpadek určité části mřížky, jedná se o defekt v zorném poli a pacient je indikován k vyšetření na perimetru. Pokud vnímá linie deformované jedná se o metamorfopsii, která bývá často spojená s defektem makuly. [25]



Obrázek 13: Amslerova Mřížka

### 3. 3. 3 Perimetrie

Perimetrické vyšetření je pro pacienta náročnější, vyžaduje jeho pozornost a stálou fixaci, důležitá je správná refrakce, jasná optická média a vhodná fyziologická zornice. Vyšetřující by měl být zkušený a umět vhodně vysvětlit průběh vyšetření a správně interpretovat výsledná data. Perimetr dělíme na kinetický nebo statický. Menší centrální skotomy lze vyšetřit kampimetrií. Toto vyšetření probíhá v zatemněné místnosti na jeden až dva metry. Na černé matné látce o rozměrech 2 x 2 metry je červené světýlko, vyšetřující má černou tyč s bílým světýlkem, které pokládá na černou síť na látce. Úkolem pacienta je hlásit bílé světýlko při fixaci červeného světla uprostřed. Vyšetřování opět probíhá monokulárně, při zakrytí nevyšetřovaného oka. [25, 26]

Kinetický perimetr (obrázek 14) promítá značku postupně pohybem z periferie směrem k centru podél daného poledníku. Tento proces se opakuje se stejným stimulem podél dalších poledníků převážně v intervalu 15 stupňů. Pro zmapování oblasti s různou citlivostí na světlo měníme jas a velikost značky. Vyšetřovaný má hlavu opřenou v opěrci a nevyšetřované oko je zakryto. Pacient má za úkol při stále fixaci centrálního bodu hlásit, kdy se v jeho zorném poli značka objeví. Většinou se odpověď dokumentuje manuálně zmáčknutím tlačítka. [15, 26]

Statická perimetrie má velikost a umístění značky konstantní. Citlivost sítnice a její práh v daném místě se určuje změnou jasu značky. Výsledné data získáváme opakovatelným měřením v různých místech zorného pole. Jedná se o přístroj řízený počítačem, obsahující velké množství strategií, například speciální typ pro vyšetření glaukomu, binokulární vyšetření pro řidiče a podobně. [26]



Obrázek 14: Kinetický perimetr [15]

## 4. Nemoci vedoucí k porušení zrakové ostrosti

Je-li vyraženo centrální vidění, může být částečně suplováno periferním viděním. Tato situace nastává v případech některých chorob, které postihují centrální vidění, jako jsou věkem podmíněná makulární degenerace, degenerativní myopie, centrální serózní chorioretinopatie, diabetická retinopatie a další. Naopak některé choroby postihují především periferní vidění. Jestliže je periferní vidění výrazně omezeno, může dojít k výraznému snížení kvality zrakového vjemu až k praktické slepotě, a to i přesto, že centrální vidění je zcela v pořádku. Následující text poskytne přehled nejvýznamnějších chorob, které postihují centrální a periferní vidění.

### 4. 1 Nemoci vedoucí k narušení centrální zrakové ostrosti

Při vyšetření zrakové ostrosti vyšetřujeme zejména centrální zrakovou ostrost v místě nejostřejšího vidění, které se nachází v oblasti žluté skvrny na sítnici. Jestliže je tato část sítnice narušena, stává se vyšetření vizu složitější, a právě proto je důležité nalézt způsob, jak vyšetřit zrakovou ostrost periferní části sítnice, respektive umět korigovat alespoň zbytky zraku, které pacientům co nejvíce pomůžou v každodenním životě. Je mnoho nemocí, které mohou narušit centrální zrakovou ostrost a v této podkapitole jsou některé z nich popsány.

#### 4. 1. 1 Věkem podmíněná makulární degenerace

Jedná se o chronické degenerativní onemocnění postihující vrstvy cévnatky (choriokapiláris a Bruchovu membránu) a vrstvu retinálního pigmentového epitelu (RPE). Vznik věkem podmíněná makulární degenerace (VPMD) je multifaktoriální, může vznikat tedy buď na základě genetických faktorů nebo se mohou na jejím vzniku podílet faktory vnějšího prostředí, mezi které patří špatný životní styl, nezdravá strava, kouření tabákových výrobků, pobyt ve znečištěném prostředí, zvýšená expozice světla. [3, 26]

VPMD se projevuje zhoršením viděním nejdříve do blízka, v podobě deformovaného obrazu tzv. metamorfopsie (obrázek 15B) s výpadky písmen na čteném textu. Malé skotomy v zorném poli splynou v centrální skotom viz obrázek 15A. Horší zraková ostrost se projeví také do dálky, kdy v pozdějších stádiích pacient centrální vidění ztrácí úplně. Tento stav pacient kompenzuje natočením hlavy, aby obraz dopadal na nepoškozená místa sítnice, tedy na periferii

sítnice, kterou využívá také k prostorové orientaci. Toto onemocnění většinou probíhá asymetricky na obou očích, druhé oko bývá postiženo v průběhu několika let. [26]



Obrázek 15: A) Centrální skotom; B) Metamorfopsie

VPMD lze rozdělit na formu suchou, která je charakteristická tvorbou atrofií a vlhkou neboli exsudativní. U atrofické formy dochází k poklesu vizu pozvolna, naopak u exsudativního typu v důsledku rostoucí subretinální membrány se vizes zhoršuje podstatně rychleji. VPMD se také může dělit na formu časnou, tzv. věkem podmíněnou makulopatii (VPM) a formu pozdní, vlastní věkem podmíněnou makulární degeneraci. Při VPM se na sítnici tvoří měkké drúzy (obrázek 16A), které vypadají jako okrouhlá žlutá tělíska, na retinálním epitelu se vyskytují různé abnormality jako je hypopigmentace nebo fokální hypotrofie, která spolu s měkkými drúzami zvyšuje riziko progresu do pokročilejších stádií. Pozdní formu charakterizují geografická atrofie retinálního epitelu (obrázek 16B) a exsudativní změny, například odchlípení retinálního pigmentového epitelu, choroidální neovaskularizace (obrázek 16C) či fibrózní jizvení tkáně. [26]



Obrázek 16: Věkem podmíněná makulární degenerace: A) Měkké drúzy, B) Geografická atrofie, C) Choroidální neovaskularizace [26]



VPMD lze jako první pozorovat vyšetřením pomocí Amslerovy mřížky, kde se toto onemocnění projevuje metamorfosií. Pro celkové zhodnocení stavu a progresu dále využíváme další vyšetření. Pomocí kampimetrie a perimetrie, jsme schopni pozorovat výpadky v zorném poli zejména centrální skotom a jeho rozsah. Další informace nám poskytne oftalmoskopie, kdy zjišťujeme celkový stav očního pozadí, při exsudativních změnách se často využívá kontrastní vyšetření jako je fluorescenční či indocyaninovou angiografii, která může odhalit ablace pigmentového epitelu a charakter a lokalizovat subretinální neovaskularizaci membrány. Dle optické koherentní tomografie se na základě vytvoření obrazu příčného řezu sítnicí hodnotí jednotlivé vrstvy sítnice. [26]

Věkem podmíněnou makulární degeneraci zatím nelze úplně vyléčit. Léčba tedy spočívá zejména v pozorování progresu, obou očí, jelikož jak už bylo zmíněno, se toto onemocnění může postupem času projevit i na dosud nepostiženém oku. Ke zpomalení průběhu, se využívají chirurgické postupy jako například extrakce neovaskulární membrány pars plana vitrektomií. Cílem této i dalších technik je zmenšení rozsahu jizvy v makule, aby pacientovi bylo alespoň do určité míry zachováno použitelné vidění na blízko. K progresi a tvorbě nových rizikových drúz a novotvořených cév mohou pomoci i určitá farmaka. [26]

#### 4. 1. 2 Degenerativní myopie

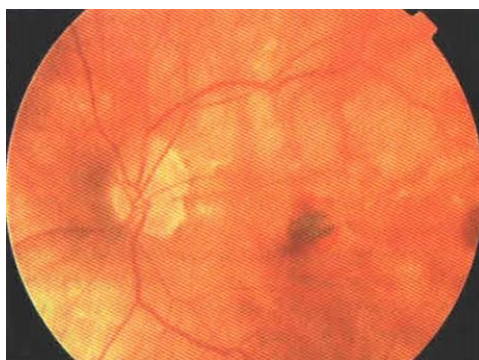
Mezi další častou příčinou slepoty ve světě je degenerativní myopie, která je charakteristická právě vysokou myopií, nad – 6 dioptrií. Při tak vysoké myopii je axiální délka bulbu větší (více jak 26 mm) a může docházet k sekundárním degenerativním změnám skléry, choroidey, Bruchovy membrány, RPE a sítnice. Hlavním rysem je zadní stafylom vyskytující se na zadním pólu. Zhoršení centrální zrakové ostrosti dochází také vlivem trhlin Bruchovy membrány často doprovázené hemoragiemi. [26]

Toto onemocnění může vzniknout na základě heredodegenerativních faktorů nebo se může jednat o biologické abnormality. Dle heredodegenerativního faktoru vznikají chorioretinální degenerativní změny na genetickém podkladu, které jsou nezávislé na anatomických změnách sklerální stěny. Nadměrná délka bulbu může způsobit mnoho chorioretinálních změn. Napínáním zadního pólu, které způsobuje napřímení temporálních retinálních cév, srpkovité peripapilární atrofie a ztenčení sítnice a choroidey. Ztenčení postihuje kolagenní svazečky, choriokapiláris, skléru, na které vznikají lokalizované ektázie či choroideu,

na které mohou v určitých místech chybět cévy a melanocyty. Buňky retinálního pigmentového epitelu jsou ploší a větší a na některých místech jsou fotoreceptory nahrazeny buňkami Mullerovými. Bruchova membrána se vlivem ztenčení může popraskat či úplně roztrhnout. Šíře a počet těchto ruptur se postupem času zvyšuje, což se spojuje s hemoragiemi v makule. Ztenčením senzorní části sítnice v makule způsobuje částečnou ztrátu vrstvy gangliových buněk. Na očním pozadí jsou pozorovatelné například depigmentace kolem terče zrakového nervu nebo atrofie. Tyto žlutobělavé oblasti mohou být okrouhlé či nepravidelné, různě velké a četné. V případě, že se atrofie šíří až k oblasti fovey, je centrální zraková ostrost výrazně poškozena. [26]

Vysoká myopie je jednou z nejčastějších příčin choroidální neovaskularizace (obrázek 17), která spolu se subretinální nebo interretinální migrací retinálního pigmentového epitelu je dříve nazývaná pigmentovaná Fuchsova skvrna v makule. Novotvoření cév se může šířit až do centra avaskulární zóny fovey a způsobuje tak opět zhoršení centrální zrakové ostrosti často doprovázeno mlhavým viděním a metamorfopsií. [26]

Pomocí optické koherentní tomografie lze pozorovat ablaci sítnice. Fluorescenční angiografie zobrazuje novotvořené cévy a signalizuje jejich prosakování. Myopické změny RPE nejsou ovlivnitelné, proto se léčí pouze komplikace jako je choroidální neovaskularizace nebo makulární díra. Léčba choroidální neovaskularizace spočívá v intravitreální aplikaci ranibizumabu a afliberceptu nebo lze použít fotodynamickou terapii. Pars plana vitrectomie řeší komplikace jako jsou makulární díry, odchlípení sítnice, epiretinální membránu i rozštěp makuly spojenou s trakcí. [26, 27]



Obrázek 17: Choroidální neovaskularizace u vysoké myopii [26]

#### 4. 1. 3 Centrální serózní chorioretinopatie

Centrální serózní chorioretinopatie je onemocnění postihující zejména muže a předcházet jej může zejména emocionální stres. V makule nebo paramakulární oblasti dochází k drobným serózním odchlípením retinálního pigmentového epitelu eventuelně sítnice. Pacient udává potíže až v případě, kdy se odchlípení začne šířit až do centra makuly, což se opět projevuje metamorfosií, pozitivním skotomem a mikropsií pozorovatelné na Amslerově mřížce. [26]

Na očním pozadí je pozorována ohraničená oválná nízká elevace sítnice v oblasti makuly lehce tmavší barvy než její okolí. Na zadním pólu se mohou vyskytnout drobné černé či žlutavé sraženiny. Chronická přítomnost subretinální tekutiny může způsobit rozsáhlé poškození retinálního pigmentového epitelu, tento nález se uvádí pod názvem difúzní retinální pigmentové epitelopatie. Pro tuto formu onemocnění je charakteristický atrofický pruh šířící se od zadního pólu až k ekvátoru orra serrata. Z důvodu zvýšeného hydrostatického tlaku může dojít k exudaci pod sítnicí, propuštění cévnatky a poruše Bruchovy membrány. Na OCT lze pozorovat odchlípení neuroretiny, další komplikace tohoto onemocnění můžeme vidět při vyšetření fluorescenční nebo indocyaninové angiografii. [26, 27]

Toto onemocnění je pozorováno u pacientů léčených steroidy a kortikosteroidy. Například právě při stresových situacích dochází nejen ke zvýšení adrenalinových mediátorů, ale také kortikosteroidů, a právě u těchto pacientů, se mohou projevit těžší formy tohoto onemocnění. V terapii se užívá laserová koagulace. Indikací pro operaci je dlouhotrvající zhoršený vizeus. [26]

#### 4. 1. 4 Diabetická retinopatie

Jedná se o cévní onemocnění sítnice spojené s vytvořením makulárního edému a poruchou hematoretinální bariéry, která je následkem narušení metabolismu glukózy u pacientů s diabetem. Diabetická retinopatie je buď neproliferativní (NPDR) nebo proliferativní (PDR). Proliferativní forma způsobuje akutní poškození vedoucí ke ztrátě zraku. Neproliferativní dále dělíme dle fáze poškození na počínající, středně pokročilou a pokročilou. Pokles zraku dochází v souvislosti s proliferativní formou, jedná se o krvácení do sklivce a trakční odchlípení sítnice. Další příčina ztráty zraku souvisí se vznikem diabetické makulopatie.

Na sítnici dochází k poškození cévní stěny, zejména kapilárního řečiště. Tvoří se tvrdé exudáty, dochází k hypoxii na určitých okřscích sítnicové tkáně a dochází k neovaskularizaci. Tyto novovořené cévy často krvácejí a vlivem jejich přerůstání do sklivce mohou způsobit odchlípení sítnice. [26, 28]

Počínající fáze NPDR se charakterizuje tvorbou mikroaneuryzmat, tečkovitých hemoragií a tvrdými exudáty na očním pozadí. Progrese těchto změn po celé sítnici popisujeme jako středně pokročilou formu NPDR. Pokud dochází k masivnímu poškození sítnice a tvoří se již měkké exudáty mluvíme o pokročilé formě NPDR, která prograduje do formy proliferativní. Právě v této fázi již dochází k neovaskularizaci, která kriticky ohrožuje vidění pacienta. [28]

Léčba diabetické retinopatie spočívá zejména v chirurgickém výkonu, kdy hlavním cílem je zastavit progresi tohoto onemocnění a eliminovat škody pro zlepšení zrakové ostrosti. Fotokoagulace je metoda využívající fokální laserovou koagulaci prosakujících mikroaneuryzmat a mřížkovou fotokoagulaci difúzního prosakování. Další chirurgickou léčbou může být také pars plana vitrectomie. Důležitou roli pro zpomalení či zastavení progresu jsou intravitreálně aplikované protilátky anti-VEGF. [3, 28]

## 4. 2 Nemoci vedoucí k narušení periferní zrakové ostrosti

Často namísto poškození centrální části, bývá narušena periferní část zorného pole. Nejznámějším a nejčastějším onemocněním poškozující periferní část sítnice, kdy konečnou fází může být i úplné oslepnutí je zelený zákal. Dalším onemocněním, kdy oko ztrácí periferní vidění je také například pigmentová retinopatie.

### 4. 2. 1 Glaukom

Glaukom neboli zelený zákal je skupina očních chorob vedoucí k poškození zrakového nervu v důsledku dlouhodobého zvýšeného nitroočního tlaku. Samostatný projev má více forem v závislosti na tom, zda se jedná o glaukom s otevřeným či uzavřeným úhlem nebo zda se jedná o formu chronickou nebo akutní. Déle můžeme glaukom dělit na primární a sekundární nebo glaukom v dětském věku. Toto onemocnění může vést k nezvratným změnám v zorném poli vedoucí až k úplné slepotě. [24, 26]

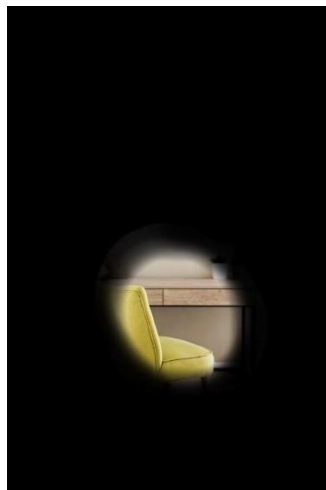
Zvýšený nitrooční tlak je pouze jeden z faktorů, mezi další faktory spojené se vznikem tohoto onemocnění jsou například genetické predispozice, špatný životní styl jako je například konzumace kofeinu nebo tabáku, aplikace kortikosteroidů či vaskulární poruchy. Tyto rizikové faktory mohou způsobit poškození zrakového nervu a doposud jedinou léčbou je snížení nitroočního tlaku, který poškozená místa sítnice nevyлéčí, ale zabrání progresi nebo alespoň zpomalí průběh tohoto onemocnění. Hlavní význam pro glaukom mají anatomické struktury předního segmentu oka jako je řasnaté těleso, duhovko-rohovkový úhel, přední a zadní komora a terč zrakového nervu. Tyto struktury jsou pozorovány při diagnostice a sledování průběhu onemocnění. Důležité je také sledovat hodnoty nitroočního tlaku a jeho cirkulaci a stav cévního zásobení. Významná pro průtok nitrooční tekutiny ze zadní do přední komory je zornice. Nitrooční tekutina proudí zornicí do přední komory a většina odtéká trámčinou úhlu přední komory, z části také řasnatým tělesem a duhovkou. Tato tekutina přispívá k udržování vnitřního prostředí a objemu oka. Nitrooční tlak určuje vztah mezi tvorbou a odtokem nitrooční tekutiny. Změna nitroočního tlaku závisí na produkci komorové vody z ciliárního tělíska a na tom, jak snadno odteče do Schlemmova kanálu nacházející se v duhovko-rohovkovém úhlu. Pro překonání odporu odtokových cest musí být nitrooční tekutina produkována v určitém množství. Odtok nitrooční tekutiny negativně ovlivňuje úraz, věk, zánět, ischemie nebo právě porušení funkce trámčiny, což způsobí zvýšení nitroočního tlaku. [29]

U tohoto onemocnění dochází k poškození retinálních gangliových buněk, které je následně doprovázeno defekty v zorném poli. Nepoškozená zůstává centrální část (obrázek 18), kde se onemocnění projeví až v pozdních stádiích. Pacient si zpravidla skotomy v zorném poli nejdříve neuvědomuje kvůli překrytí zorného pole pravého a levého oka. Výpadky zorného pole se kumulují a často bývají nesprávně popisovány jako nepozornost nebo porucha koordinace či hybnosti. [29]

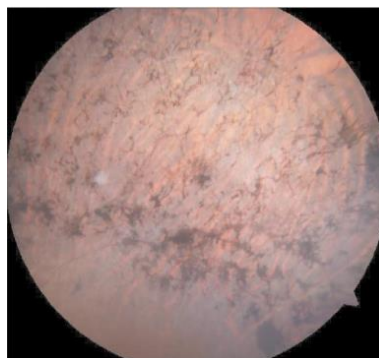
Ke správné a časně diagnóze vede řada vyšetření začínající podrobnou anamnézou, kdy pacient může popisovat například častou bolest hlavy a očí. Dále probíhá vyšetření zrakové ostrosti, nitroočního tlaku, zorného pole, na šterbinové lampě se pozoruje hloubka a obsah přední komory, duhovky, velikost zornice a čočka. Pomocí gonioskopie zhodnocujeme stav komorového úhlu, zda je otevřený, uzavřený nebo částečně uzavřený, a tak můžeme určit o jaký typ glaukomu se jedná. Oftalmoskopií vyšetřujeme stav zrakového terče, kde hodnotíme jeho barvu a exkavaci, tvar terče a celkový stav sítnice. Dále kontrolujeme klinický vzhled retinálních nervových vláken, které mohou být asymetrické a nařasené a později může dojít až k úplné ztrátě těchto vláken. [29]

#### 4. 2. 2 Pigmentová retinopatie

Jedná se o onemocnění způsobující vážné, nevratné změny na sítnici. Pigmentová retinopatie vzniká na podkladě více genetických typů, a proto ji řadíme do různých forem. Onemocnění primárně poškozuje tyčinky, následně dochází k degeneraci čípků. Nález se může lišit, vyskytuje se buď samostatně, nebo jako součást syndromových onemocnění s postižením jiného senzorieurálního systému, anebo je spojena s postižením mnoho různých tkání. Většinou se onemocnění šíří pomalu, kdy pacient prvně popisuje snížené vnímání jasu, poté dochází postupnému zúžení zorného pole takzvanému trubicovitému vidění (obrázek 18), kdy zraková ostrost je zachována pouze v oblasti žluté skvrny. Později začíná klesat také centrální zraková ostrost, dochází k útlumu vnímání barev vedoucí k achromapsii, úplné barvosleposti. V konečné fázi dochází k úplnému oslepnutí. Na fundu lze pozorovat pigmentové uložení viz obrázek 19. Sekundární komplikací pigmentové retinopatie může být katarakta či amoce sklivce. [24]



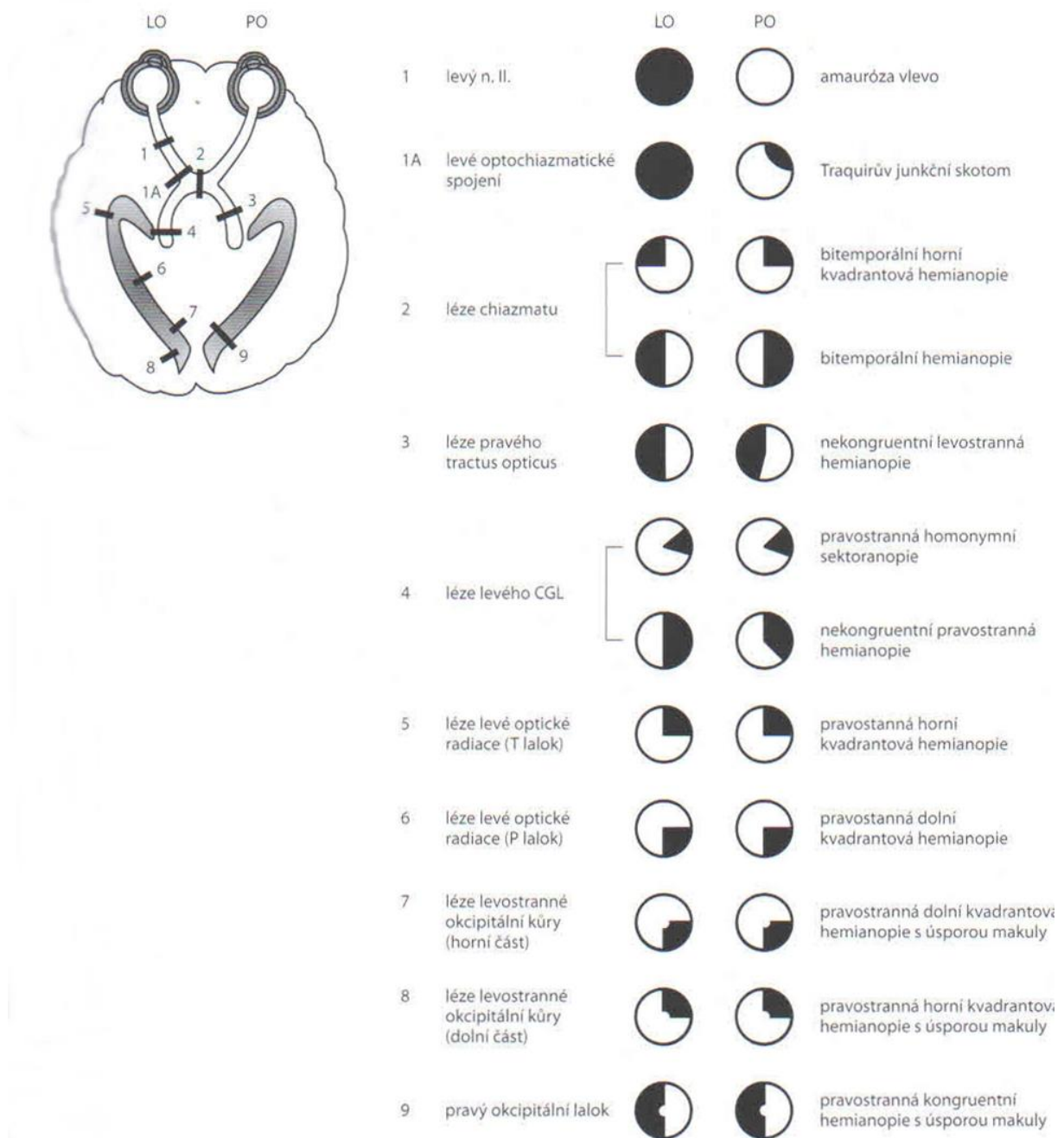
Obrázek 18: Trubicovité vidění



Obrázek 19: Oční pozadí při pigmentové retinopatii [24]

#### 4. 2. 3 Neuropatie optiku a poškození zrakové dráhy

Poškození zrakového nervu mívá často toxický původ, jako je konzumace tabáku, alkoholu, léků nebo požití jiné nebezpečné látky. Mohou mít například zánětlivý původ, vaskulární charakter nebo tlakovou povahu. Ztráta zraku bývá často náhlá a může odeznít po odstranění účinku toxické látky a dalších příčin. Ztráta zraku může být celková nebo částečná, v závislosti na tom, v jaké části zrakové dráhy došlo k poškození či útlaku viz obrázek 20. [24, 26]



Obrázek 20: Defekty zorného pole při poškození jednotlivých částí zrakové dráhy [26]

#### 4. 2. 4 Poruchy zorného pole

Pro správnou diagnózu je důležité vědět průběh zrakové dráhy, umět popsat charakter zrakových poruch a určit a lokalizovat defekty zorného pole a abnormality ve zrakové dráze. K tomu nám pomůže detailní anamnéza a komplexní vyšetření zraku, kde patří kromě stanovení zrakové ostrosti také například měření nitroočního tlaku, vyšetření předního a zadního segmentu oka a měření, či zjišťování zorného pole monokulárně i binokulárně. Zrakové poruchy mohou mít projev pozitivní nebo negativní. [26]

Mezi pozitivní zrakové projevy patří vnímání světla, barvy nebo geometrické tvary. Pacienti mohou popisovat scintilační skotom, jedná se o subjektivní jiskřivé záblesky či střídající se světlé a tmavé čáry. Dále si mohou stěžovat na pulzující barevná světla, pohybující se geometrické tvary nebo složitější vjemy jako jsou halucinace. Negativní zrakové projevy se vyznačují skotomem, ostrůvkovitým výpadkem v normálním zorném poli. Skotom rozeznáváme podle lokalizace a tvaru. Centrální skotom postihuje fixaci, centrocekální zaujímá centrum a slepu skvrnu, pericentrální postihuje periferní oblast bez narušení centrálního vidění a paracentrální postihuje oblast vedle fixace. Tyto výpadky mohou být vnímány jako pozitivní černé, tmavohnědé, fialové či bílé skvrny nebo negativní, kdy pacient výpadek vůbec nevnímá jako je to například u slepé skvrny. Skotom dále dělíme na absolutní, dochází k úplné ztrátě vnímání, a relativní, pokud je porušeno vnímání podnětů nižších intenzit. Místo výpadku neboli vytvoření skotomu v zorném poli závisí na lokalizaci porušení zrakové dráhy či části sítnice, nejčastější pozorované výpadky jsou na obrázku 20. Pozorujeme-li výpadek jednoho z kvadrantů zorného pole hovoříme o kvadrantanopii, postižení celých polovin se nazývá hemianopii. Pro popis bilaterálních defektů zorného pole používáme termíny popsány v tabulce 2. Zraková dráha je popsána v kapitole 1. 3. [26]

Tabulka 2: Typy defektu a jejich lokalizace [26]

Typ bilaterálního defektu	Lokalizace
Homonymní	Výpadek na stejné straně zorného pole u obou očí
Heteronymní	Výpadek na opačné straně zorného pole obou očí (temporální nebo nazální)
Kompletní	Výpadek celé oblasti zorného pole
Nekompletní	Výpadek části zorného pole



## 5. Experimentální porovnání psychometrické funkce a zrakové ostrosti v centru a v periférii zorného pole

Cílem praktické části této diplomové práce bylo experimentálně srovnat zrakovou ostrost v centru a v různých částech periferie pomocí určení příslušných psychometrických funkcí. V oblastech periferie jsem se konkrétně zaměřila na nazální část zorného pole při excentricitě  $6^\circ$  a  $12^\circ$  a na temporální část zorného pole při excentricitě  $6^\circ$ . Motivací experimentu bylo ověřit, jak se mění zraková ostrost směrem do periferie a porovnání temporální a nazální části sítnice ve stejné excentricitě ( $6^\circ$ ). Na základě stávajících studií bylo předpokládáno, že zraková ostrost bude od fovey, tedy centrální zrakové ostrosti směrem do periferie klesat.

### 5. 1 Soubor a metodika

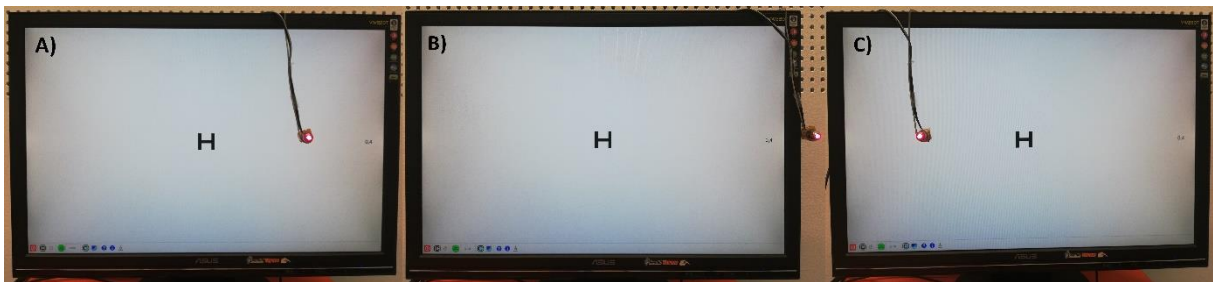
V rámci výzkumu bylo proměřeno 10 figurantů (devět žen a jeden muž) ve věku 22 až 24 let. Požadavkem při výběru figurantů bylo normální zdravé pravé oko s naturálním či korigovaným vize 1,00 či 1,25. Důležitá byla také dobrá fyzická i psychická kondice v den měření kvůli časové náročnosti samotného měření.

Výzkum byl proveden v laboratoři katedry optiky na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého v Olomouci. Před měřením byl každý figurant dostatečně a srozumitelně seznámen s průběhem experimentu a následně podepsal informovaný souhlas, kde byl seznámen s cílem metodikou a riziky výzkumu. Každý figurant byl také před měřením seznámen se sadou písmen Sloan letters (C, D, H, K, N, O, R, S, V, Z, viz podkapitola 2.2), která byla použita v experimentu.

Měření bylo provedeno vždy pouze na pravém oku, levé oko bylo přikryto páskou. Figurant měl opřenou bradu a čelo, aby byl stále ve stejné pozici. Experiment byl prováděn vždy za stejných podmínek, světla v místnosti byla rozsvícena a okna zatemněna. Znaky byly prezentovány ve speciálním programu pro projekci Sloan letters poskytnutém pro tento účel vedoucím práce, který je jeho autorem, na širokoúhlém 22palcovém monitoru značky ASUS VW220T s rozlišením 1680 x 1050 pixelů. Na bílém pozadí o jasu  $208 \text{ cd/m}^2$  byla použita černá písmena o Weberově kontrastu -99 %. Kontrast byl určen jako rozdíl jasu písmene a pozadí dělený jasem pozadí, záporné znaménko udává, že jas pozadí je vyšší než jas písmene. Písmena byla zobrazena vždy jednotlivě uprostřed monitoru, viz obrázek 22. Měření tedy probíhalo za

fotopických podmínek při vysokém kontrastu znaků. Měření jednoho figuranta probíhalo přibližně 3 až 4 hodiny.

Pro vyšetření periferie byl monitor umístěn ve vzdálenosti 1,2 metrů od vyšetřovaného, který centrálním viděním sledoval fixační světýlko umístěné podle testovaného místa zorného pole v úhlové vzdálenosti  $6^\circ$  a  $12^\circ$  nasálně a  $6^\circ$  temporálně (viz obrázek 21). Testový znak byl sledován periferním viděním. Měření centrální části bylo prováděno na optickou vzdálenost 12 metrů, kdy test byl pozorován přes zrcadlo. V tomto případě figurant sledoval přímo testový znak, viz obrázek 23. Pro měření v centru a periferii bylo potřeba odlišného nastavené programu a následně i provedení kalibrace.



Obrázek 21: Postavení světýlka – A)  $6^\circ$  nasálně; B)  $12^\circ$  nasálně; C)  $6^\circ$  nasálně



Obrázek 22: Stanoviště pro měření periferie: A – pohled figuranta. B – stanoviště vyšetřujícího



Obrázek 23: Stanoviště pro vyšetření centrální části

Sledovaným parametrem byla úspěšnost identifikace prezentovaného písmene při jeho pevně dané velikosti odpovídající příslušné zvolené hodnotě  $\log MAR$ , určená na základě série 100 dílčích prezentací. Pro každou dílčí prezentaci byl znak náhodně vybrán z použité sady písmen, přičemž nikdy nebyly přímo po sobě prezentovány dva shodné znaky. Viděný znak figurant verbálně hlásil experimentátorovi, který jej pomocí klávesnice zaznamenal do měřicího programu. Úspěšnost identifikace byla vyhodnocena na základě zaznamenaných správných a špatných odpovědí po každé sérii. V centru bylo testováno vždy 8 nebo 9 hodnot  $\log MAR$ , v periférii 7 nebo 8 hodnot  $\log MAR$ . V centrální části byly hodnoty  $\log MAR$  měněny s krokem 0,05  $\log MAR$  a v periférii s krokem 0,1  $\log MAR$ . Tyto hladiny a kroky byly stanoveny na základě pilotního měření a jsou patrné z tabulek 3, 4 a 5. Hodnoty byly voleny tak, aby pokryly většinu úrovní úspěšnosti od 100 % do 10 %, přičemž spodní hranice 10 % představuje úroveň, kdy znak již nebyl rozpoznán, ale byl pouze hádán. Pořadí excentricit a hladin  $\log MAR$  bylo náhodné. Před každým jednotlivým experimentem či během něj probíhaly náhodná kontrolní měření  $\log MAR$  pro vyloučení vlivu učebního efektu či únavy.

## 5. 2 Analýza dat

Pro každou podmínku byla závislost úspěšnosti identifikace písmen  $P$  na  $\log MAR$  u každého figuranta aproximována psychometrickou funkcí (viz kapitola 2.3) ve tvaru distribuční funkce normálního rozdělení s modifikovaným rozsahem od 0,1 (což odpovídá úrovni hádání) do 1,

$$P(\log MAR) = 0,1 + 0,9 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^s e^{-\frac{(t-s_0)^2}{2\sigma^2}} dt,$$

kde  $\sigma$  a  $s_0$  představují směrodatnou odchylku a průměrnou hodnotu příslušného normálního rozdělení. Hodnota  $s_0$  odpovídá úspěšnosti identifikace 55 % a představuje střed symetrie křivky,  $\sigma$  reprezentuje sklon křivky (čím menší hodnota, tím strmější křivka). Parametry  $\sigma$  a  $s_0$  byly nalezeny pomocí metody nejmenších čtverců numerickým algoritmem v programu MS Excel. Pro účely sledování změn zrakové ostrosti s excentricitou byla zraková ostrost u každého figuranta stanovena jako hodnota  $\log MAR$ , při které dosáhla příslušná psychometrická funkce hodnoty 60 %.

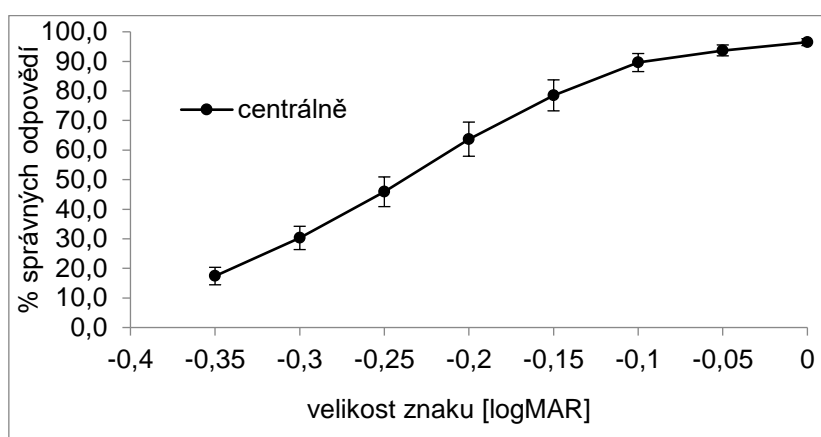
Hodnoty úspěšnosti identifikace pozorovaného písmene při různých excentricitách a jednotlivých hladinách  $\log MAR$  byly porovnávány pomocí dvoufaktorové analýzy rozptylu (ANOVA) pro opakovaná měření s faktory excentricita a  $\log MAR$  na hladině významnosti 0,05. Parametry  $\sigma$  a  $s_0$  byly navzájem srovnávány opět pomocí jednofaktorové metody ANOVA pro opakovaná měření s faktorem excentricita na hladině významnosti 0,05. Dílčí párová porovnání byla provedena pomocí post-hoc Tukeyova HSD testu. Jednotlivé hladiny významnosti  $p$ , pro které by právě došlo k zamítnutí testované hypotézy o rovnosti dat jsou v textu též uvedeny.

### 5.3 Výsledky měření

Z výsledků dílčích měření pro jednotlivé excentricity a hodnoty  $\log MAR$  jsem v programu EXCEL spočítala průměrné hodnoty a příslušné standardní chyby těchto průměrů. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 3, 4 a 5 a v grafech na obrázku 24 a 25.

Tabulka 3: Průměrné úspěšnosti identifikace písmene pro vyšetření v centru a jejich standardní chyby SE

$\log MAR$	Průměrná úspěšnost (%)	SE (%)
-0,35	17,4	3,0
-0,30	30,3	3,0
-0,25	45,9	5,0
-0,20	63,7	5,8
-0,15	78,5	5,2
-0,10	89,6	3,1
-0,05	93,7	1,8
0,00	96,5	1,2



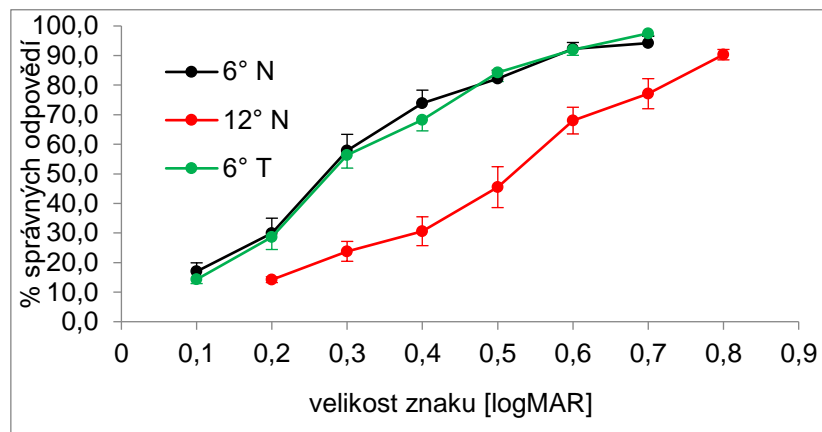
Obrázek 24: Závislost průměrné úspěšnosti identifikace písmen v závislosti na velikosti písmene udané v odpovídající  $\log MAR$  při centrálním vidění: Kroužky vyznačují průměrné hodnoty pro danou velikost písmene, chybové úsečky reprezentují dvojnásobek standardní chyby průměru.

Tabulka 4: Průměrné úspěšnosti identifikace písmene pro vyšetření v  $6^\circ$  nasálně ( $6^\circ N$ ) a  $6^\circ$  temporálně ( $6^\circ T$ ) a jejich standardní chyby SE

logMAR	Pro $6^\circ N$		Pro $6^\circ T$	
	Průměrná úspěšnost (%)	SE (%)	Průměrná úspěšnost (%)	SE (%)
0,1	17,0	2,9	14,3	1,4
0,2	29,9	5,1	28,6	4,2
0,3	57,9	5,5	56,3	4,3
0,4	73,9	4,4	68,2	3,7
0,5	82,2	2,8	84,3	3,1
0,6	92,3	2,1	92,0	1,9
0,7	94,2	2,3	97,5	0,7

Tabulka 5: Průměrné úspěšnosti identifikace písmene pro vyšetření ve 12° nasálně a jejich standardní chyby SE

logMAR	Průměrná úspěšnost (%)	SE (%)
0,2	14,2	1,0
0,3	23,8	3,4
0,4	30,6	4,9
0,5	45,5	6,9
0,6	68,0	4,5
0,7	77,1	5,1
0,8	90,3	1,8



Obrázek 25: Závislost průměrné úspěšnosti identifikace písmen v závislosti na velikosti písmene udané v odpovídající logMAR při periferním vidění: Kroužky vyznačují průměrné hodnoty pro danou velikost písmene, černé a zelené chybové úsečky reprezentují standardní chyby průměru, červené představují jejich dvojnásobek. Černá křivka vyznačuje úspěšnost pro excentricitu 6° nazálně, červená křivka pro 12° nazálně a zelená pro 6° temporálně.

Z grafů vyplývá, že zraková ostrost je pro centrální vidění výrazně vyšší než v periférii, přičemž sklon průběhu dat (s ohledem na použité měřítko v grafech) je při centrálním vidění také větší než v periférii. Při periferním vidění je průběh psychometrické funkce pro excentricitu 6° téměř shodný v temporální i nazální oblasti, ale je výrazně posunutý k horším hodnotám zrakové ostrosti při excentricitě 12°. Sklon grafu pro excentricitu 12° se zdá být mírně menší než při excentricitách 6°.

Statistická analýza naměřených periferních dat metodou ANOVA potvrdila jak vliv excentricity ( $p < 0,0001$ ), tak velikosti znaku ( $p < 0,0001$ ) na úspěšnost identifikace písmene. Dále byl prokázán signifikantní vliv interakce excentricity a velikosti znaku ( $p = 0,0002$ ). Interakce může být dána jednak odlišným tvarem křivek (sklonem) nebo pouze jejich vzájemným posunem. Porovnání pomocí post-hoc Tukeyova HSD testu ukázalo, že data měřená v excentricitě  $6^\circ$  se v temporálním ani nazálním poli neliší ( $p = 0,93$ ), naopak data pro  $12^\circ$  nazálně se od obou předchozích výrazně liší (v obou případech  $p = 0,00017$ ).

Průměrné hodnoty parametrů (průměrováno přes jednotlivé figuranty) hledaných psychometrických funkcí pro jednotlivé excentricity a jejich směrodatné odchylky a standardní chyby nalezneme v tabulce 6. Korelační koeficient aproximovaných funkcí se pohyboval v rozmezí 0,938 až 0,995 centrálně, 0,881 až 0,990 při excentricitě  $6^\circ$  nazálně, 0,997 až 0,918 pro  $12^\circ$  nazálně a 0,992 až 0,931 pro  $6^\circ$  temporálně. Statistická analýza parametru  $s_0$  metodou ANOVA prokázala, že se jeho hodnoty významně liší pro jednotlivé pozice v zorném poli ( $p < 0,0001$ ), přičemž post-hoc test prokázal rozdíl mezi jeho hodnotou pro centrální vidění a ostatními periferními hodnotami (vždy  $p < 0,0002$ ) a mezi hodnotami pro  $12^\circ$  a  $6^\circ$  (vždy  $p < 0,0002$ ). Naopak oba údaje pro  $6^\circ$  se významně nelišily ( $p = 0,93$ ). Parametr sigma také vykázal výraznou závislost na pozici v zorném poli ( $p = 0,001$ ), avšak lišil se pouze mezi centrem a periferií (vždy  $p < 0,018$ ). U všech periferních hodnot nebyl zjištěn signifikantní rozdíl (vždy  $p > 0,63$ ). Výše zjištěná interakce excentricity a velikosti znaku tedy reprezentuje pouze vzájemný posun křivek mezi excentricitami  $6^\circ$  a  $12^\circ$ , nikoliv jejich odlišný tvar.

Tabulka 6: Průměrné hodnoty parametrů získané z psychometrické funkce pro jednotlivé excentricity, jejich směrodatné odchyly (STD) a standartní chyby (SE)

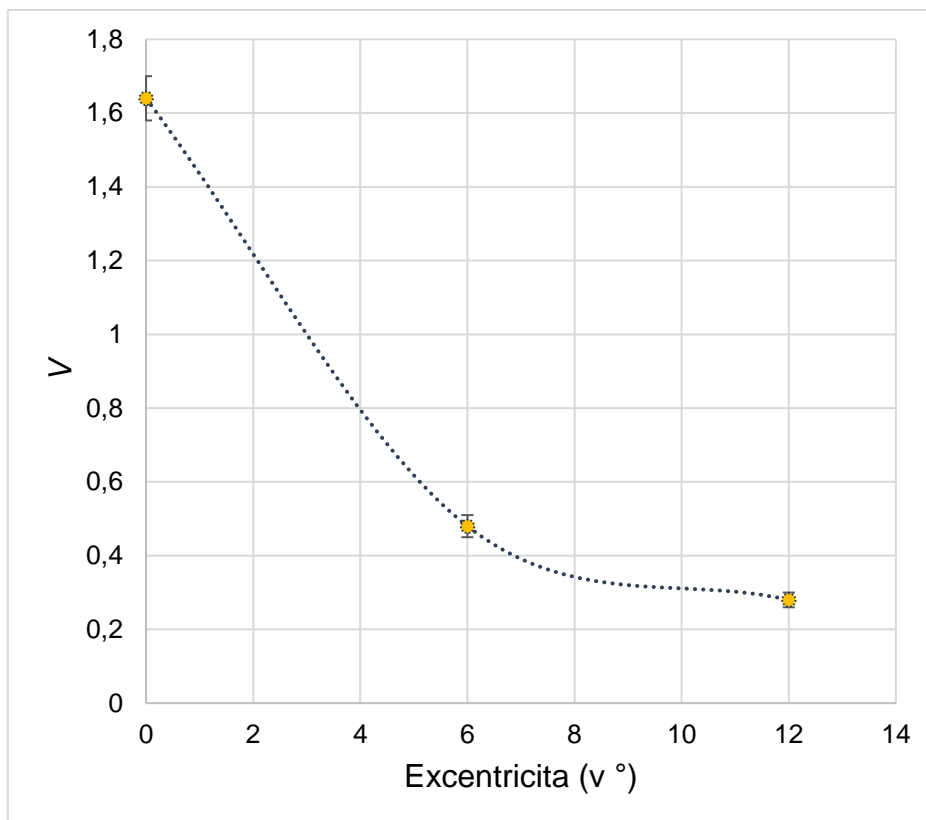
excentricita		průměr	STD	SE
centrálně	$s_0$	-0,221	0,046	0,015
	$\sigma$	0,093	0,018	0,006
6° nasálně	$s_0$	0,313	0,069	0,022
	$\sigma$	0,161	0,090	0,028
12° nasálně	$s_0$	0,543	0,092	0,029
	$\sigma$	0,187	0,051	0,016
6° temporálně	$s_0$	0,328	0,048	0,015
	$\sigma$	0,166	0,067	0,021

Průměrné hodnoty zrakové ostrosti, určené na základě individuálních hodnot jednotlivých figurantů stanovených odečtem z průběhu psychometrické funkce (viz metodika), a jejich standartní chyby uvádí pro všechny sledované pozice v zorném poli v tabulce 7. Z tabulky je vidět, že se hodnoty mezi centrem a periferií výrazně liší, přičemž v periferii je rozdíl pouze mezi odlišnými excentricitami. Graficky tuto závislost pro nazální zorné pole zachycuje obrázek 26.

Tabulka 7: Průměrné hodnoty zrakové ostrosti ( $\log MAR$  a  $V$ ) a jejich standartní chyby SE

pozice		0°	6°N	12°N	6°T
$\log MAR$	průměr	-0,21	0,33	0,56	0,34
	SE	0,02	0,02	0,03	0,02
$V$	průměr	1,64	0,48	0,28	0,46
	SE	0,06	0,03	0,02	0,02





Obrázek 26: Vízus z centra do periferie (nazálně): Oranžové body vyznačují průměrné hodnoty vízu pro dané excentricity, chybové úsečky reprezentují dvojnásobek standardní chyby průměru.

#### 5. 4 Diskuze

Výsledky získané vlastním měřením prokázaly významný rozdíl v psychometrických funkcích mezi periferií zorného pole a centrem. Přitom funkce byla výrazně strmější v periferii oproti centru, naopak mezi všemi sledovanými periferními lokacemi se strmost výrazně neměnila. Psychometrické funkce též vykazovaly výrazný vzájemný posun mezi centrem a periferií a mezi excentricitou 6° a 12°. Tomuto posunu odpovídal též rozdíl ve zrakové ostrosti. Při stejné excentricitě nebyl nalezen rozdíl mezi nazálním a temporálním zorným polem. V centrální části byla zraková ostrost nejvyšší, následně prudce klesala s excentricitou. Mezi temporálním a nazálním zorným polem opět nebyl nalezen rozdíl.

Sklon křivky psychometrické funkce může dle některých publikací, např. [30], souviset s opakovatelností měření zrakové ostrosti – strmější křivka odpovídá větší opakovatelnosti. V tabulce 6 můžeme pozorovat, že parametr sigma, udávající sklon, se směrem do periferie

výrazně zvěstuje (tj. sklon klesá), z toho vyplývá, že opakovatelnost měření by měla být lepší při měření centrální zrakové ostrosti. V periférii by opakovatelnost měla být přibližně stejná nezávisle na excentricitě a na tom, zda se testuje nazální nebo temporální zorné pole. Odlišný tvar psychometrické funkce v centrální a periferní části zorného pole také může vypovídat o odlišných mechanismech zpracování zrakového vjemu. Na tuto skutečnost poukazují též výsledky studie Lewise a Bedella [20], které udávají odlišnosti v pozorovaných vzájemných záměnách testovaných znaků mezi centrem a periférií.

Zraková ostrost se při porovnání mezi centrem a  $6^\circ$  výrazně snížila, snížení mezi zrakovou ostrostí mezi  $6^\circ$  a  $12^\circ$  už nebylo tak výrazné, lze tedy předpokládat, že následný pokles zrakové ostrosti bude mírnější. Naše výsledky se tedy shodují s údaji z literatury, která udává výrazný pokles mezi  $0^\circ$  a  $5^\circ$ , který se následně zmenšuje, viz kapitola 3.1 a publikace [8]. K obdobným výsledkům dospěla i práce L. Eleka [23], viz kapitola 3.1. a obrázek 12. Pokles zrakové ostrosti může být ovlivněn rozložením čípků na sítnici. Směrem do periferie klesá nejenom počet čípků, ale také jejich hustota. Pokud jsou čípky od sebe rozmístěny dál, zvětšuje se rozlišovací úhel a snižuje se tedy zraková ostrost. V klinické praxi bychom měli standardy pro vyšetření centrální zrakové ostrosti pro vyšetření periferie upravit, zejména by se měl zohlednit pokles zrakové ostrosti z centra do periferie a předpokládat tak odlišné hodnoty zrakové ostrosti v různých místech zorného pole.

Naše práce neprokázala rozdíl mezi zrakovou ostrostí v temporálním a nazálním zorném poli, oproti tomu Lewis a Bedell [20] udávají zřetelný rozdíl mezi temporálním a horním zorným polem, přičemž zrakovou ostrost v horním zorném poli vyhodnotili jako horší. S ohledem na tyto výsledky lze tedy pacientům se ztrátou centrálního vidění doporučit využití temporálního nebo nazálního zorného pole, kde je zraková ostrost téměř stejná než horní zorné pole, kde je zřetelně nižší.

## Závěr

Teoretická část diplomové práce shrnula dosavadní znalosti a studie zabývající se periferní zrakovou ostrostí při denních podmínkách. Pro správné pochopení různých mechanismů zrakového vnímání napříč sítnicí se první kapitola věnovala anatomii sítnice včetně rozmístění fotoreceptorů a vzájemného propojení jednotlivých nervových buněk. Déle byla zmíněna zraková ostrost obecně. Těžištěm textu byl popis periferní zrakové ostrosti, přičemž jsem se zaměřila především na odlišnosti mezi centrální a periferní zrakovou ostrostí včetně stručné rešerše vybraných stávajících studií. Tyto studie byly současně inspirací pro navazující praktickou část práce. V souvislosti s vyšetřením periferní zrakové ostrosti se déle věnuji různým onemocněním sítnice, při kterých může být postižena zraková ostrost v různých částech zorného pole a může tak být ztíženo např. vyšetření refrakce při výpadku centrálního vidění. V tomto případě je tedy důležité umět stanovit zrakovou ostrost i v periférii.

Praktická část se zaměřila na experimentální srovnání psychometrické funkce v centru a ve vybraných periferních oblastech. Z výsledků vyplývá výrazný pokles zrakové ostrosti s excentricitou, přičemž nejsou rozdíly mezi temporálním a nazálním zorným polem. Nalezené změny ve zrakové ostrosti kopírují změny v rozložení sítnicových fotoreceptorů. Získané výsledky se vztahují pouze k dennímu vidění. Vzhledem k tomu, že při nočním vidění je funkční jiný typ fotoreceptorů s jiným rozložením na sítnici, je pro skotopické vidění nutné provést samostatnou analýzu. Z analýzy sklonu křivek dále vyplynulo, že v periférii by měla být horší opakovatelnost měření zrakové ostrosti než v centru, nicméně je stejná ve všech sledovaných periferních lokacích. Na základě srovnání našich výsledků s údaji z dalších studií lze pacientům se ztrátou centrálního vidění doporučit používání nazálního nebo temporálního zorného pole při co nejmenší excentricitě, naopak horní zorné pole se z pohledu zrakové ostrosti jeví jako nevýhodné. Z průběhu psychometrických křivek a na základě znalostí stávající literatury lze též odvodit, že mechanismus zpracování zrakového signálu v centru a v periférii bude odlišný. Zraková ostrost může být ovlivněna také vlastní refrakční vadou vyšetřovaného, například astigmatismem, který může být odlišný při měření zrakové ostrosti v různých úhlech a může také ovlivnit periferní měření.

## Citovaná literatura

- [1.] REMINGTON, L. A. *Clinical Anatomy and Physiology of the Visual System, 3rd Edition*. St. Louis, Missouri: Elsevier/Butterworth Heinemann, 2012. ISBN: 978 - 1- 4377- 1926-0.
- [2.] MILLODOT, M. *Dictionary of Optometry and Visual Science 7th Edition*. Edinburgh, London, New York : ELSEVIER, 2009. ISBN: 978-0-7020-2958-5.
- [3.] KOLÁŘ, P. a kolektiv. *Věkem podmíněná makulární degenerace*. Praha: GRADA Publishing, a. s., 2008. ISBN: 978-80-247-2605-2.
- [4.] SYNEK, S., SKORKOVSKÁ, Š. *Fyziologie vidění, 2., doplněné a přepracované vydání*. Praha : Grada Punlishnig, a. s. , 2014. 978-80-247-3992-2.
- [5.] KVAPILÍKOVÁ, K. *Anatomie a embryologie oka*. Brno: Institut pro další vzdělání praovníků ve zdravotnictví v Brně, 2000. ISBN:80-7013-313-9.
- [6.] ČÍHÁK, R. *Anatomie 3, druhé, upravené a doplněné vydání*. Praha : Grada Publishing, a. s., 2004. ISBN: 80-247-1132-X.
- [7.] LANG, G. K. *Ophthalmology, A Pocket Textbook Atlas, 2nd edition*. Stuttgart, New York : Thiema, 2007. ISBN: 3-13-126162-5.
- [8.] TUNNAcliffe, A. H. *Introduction to visual optics. 4th ed*. London : Association of British Dispensing Opticians, 1993. ISBN 978-0-90009-928-1.
- [9.] ŠROFOVÁ, H. *Praktická Oftalmologie*. Praha: Mladá fronta a. s., 2018. ISBN: 978- 0- 04- 888-0.
- [10.] ANTON, M. *Refrakční vady a jejich vyštrřovací metody*. Brno : Národní centrum ošetrřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů v Brně, 2004. ISBN: 80-7013-402-X.
- [11.] ZADNIK, K. *The Ocular Examination Measurements and Finding*. Philadelphia : W.B. Saunders, 1997. ISBN: 0-7216\_5209-3.
- [12.] LEE, J-S. *Primary Eye Examination: A Comprehensive Guide to Diagnosis*. New York: Springer Berlin Haidelberg, 2019. ISBN: 978-981-10-6939-0
- [13.] PLUHÁČEK, F. *Výukové materiály z předmětu Fyziologická optika*. Olomouc: Univerzita Palackého, katedra optiky

- [14.] HARVEY, B. a FRANKLIN, A. *Eye essentials: Routine Eye Examination*. Edinburg : Elsevier Butterworth Heinmann, 2005. ISBN: 0-7506-8852-1.
- [15.] VESELÝ, P. a BENEŠ, P. *Vyšetřovací metody v optometrii a interpretace jejich výsledků*. Praha : Grada Publishing, a.s. , 2019. ISBN: 978-80-271-2071-0.
- [16.] RYAN, S. J. *Retina. 5th ed.* London: Saunders/Elsevier, 2013. ISBN: 9781455707379
- [17.] KLEIN, S. A. *Measuring, estimating, and understanding the psychometric function: A commentary*. Sv. *Perception & Psychophysics*, 63, 1421 – 1455.
- [18.] NORTON, T. T., CORLISS, D. A., BAILEY, J. E. *The Psychophysical Measurement of Visual Function*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN: 0-7506-9935-3.
- [19.] AUTRATA, R. a J., ČERNÁ, J. *Nauka o zraku*. Brno : Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů v Brně, 2006. ISBN: 80-7013-362-7.
- [20.] REICH, L. N. a Bedell, H. E. *Relative Legibility and Confusions of Letter Acuity Targets in the Peripheral and Central Retina*. *Optometry and Vision Science*, květen 2000 (vol. 77, 5. vydání, strana 270-275)
- [21.] LEVIN, Leonard A. a Paul L. KAUFMAN. *Adler's Physiology Of The Eye: Clinical Application, 11th edition*. New York : Elsevier/Sounders, 2011. ISBN: 978-0-323-05714-1.
- [22.] FEINBERG, R. *A study of some aspects of peripheral visual acuity*. *American Journal of Optometry (Archives of American Academy of Optometry)*, únor 1949 (vol. 26, 2. vydání, strana 49-56)
- [23.] ELEK, L. *Extrafoveal Visual Acuity As Measured With Snellen Test-Letters*. Boston. *American Journal of Ophthalmology*, březen 1941 (vol. 24, 3. vydání, strana 303-310)
- [24.] BENEŠ, P. *Zraková postižení: behaviorální přístupy při edukaci s pomůckami*. Praha: Grada, 2019. ISBN: 978-80-271-2110-6
- [25.] NAJMANOVÁ, E. *Výukové materiály z předmětu Optické a optometrické přístroje*. Olomouc: Univerzita Palackého, katedra optiky
- [26.] KUČYŇKA, P. a kolektiv. *Oční lékařství*. Praha : Grada Publishing, a. s., 2007. ISBN: 978-80-247-1163-8.
- [27.] STUDNIČKA, J. *Onemocnění sítnice a cévnatky v praxi*. Praha: Mladá fronta a. s., 2018. ISBN: 978-80-204-4945-0.

- [28.] ROZSÍVAL, P. *Oční lékařství*. Praha : Galén, 2006. ISBN: 978-80-7492-316-6.
- [29.] ROZSÍVAL, P. *Oční lékařství, druhé přepracované vydání*. Praha : Galén, 2017. ISBN: 978- 80- 7492-316-6.
- [30.] REICH, L.; HOYT, K.: *Crowding Can Steepen The Psychometric function For Visual Acuity*. 2002. Poster 58. Optometry and Vision Science. 79, 233