

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

KATEDRA OPTIKY

VLIV JASU NA CROWDING FENOMÉN

Diplomová práce

VYPRACOVALA:

Bc. Jitka Ošřádalová

Obor 5345T008 OPTOMETRIE

Studijní rok 2017/2018

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE:

RNDr. František Pluháček, Ph.D.

Čestné prohlášení

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

V Olomouci dne 17. 4. 2018

.....

Bc. Jitka Ošťádalová

Poděkování

Chtěla bych poděkovat všem, kteří mi pomohli při psaní této diplomové práce, zejména pak RNDr. Františku Pluháčkovi, Ph. D., vedoucímu mé práce, za cenné rady a připomínky, které mi v průběhu psaní poskytl, a za čas strávený při konzultacích.

Tato práce vznikla za podpory projektů IGA PřF UP s názvem Optometrie a její aplikace, č. IGA_PrF_2017_003 a IGA_PrF_2018_007.

OBSAH

ÚVOD	5
1 KVANTITATIVNÍ HODNOCENÍ ZRAKOVÉHO VJEMU.....	7
1.1 Zraková ostrost	7
1.1.1 Rozlišovací mez oka optická	8
1.1.2 Rozlišovací mez oka fyziologická	9
1.2 Kontrastní citlivost	11
1.3 Standardizované optotypy	13
1.3.1 Snellův optotyp	13
1.3.2 LogMAR optotyp.....	15
1.3.3 ETDRS optotyp	18
2 ZRAKOVÉ VNÍMÁNÍ ZA RŮZNÝCH JASOVÝCH PODMÍNEK.....	20
2.1 Fotoreceptory a typy vidění.....	20
2.2 Proces adaptace oka na různou intenzitu světla	23
2.2.1 Adaptace na světlo	23
2.2.2. Adaptace na tmu	23
2.2.3 Role rodopsinu při adaptaci.....	25
2.3 Vztah jasu a kontrastu při měření zrakové ostrosti.....	26
2.3.1 Jas a zraková ostrost	26
2.3.2 Kontrast a zraková ostrost	27
2.4 Působení jasu na uspořádání receptivních polí.....	28
2.4.1 Anatomie sítnice	28

2.4.2 Typy receptivních polí	29
2.4.3 Receptivní pole za sníženého jasu	32
3 VLIV SEPARACE ZNAKŮ NA MĚŘENÍ ZRAKOVÉ OSTROSTI	34
3.1 Konturová interakce	34
3.1.1 Konturová interakce při snížených jasových podmínkách	36
3.2 Crowding fenomén	37
3.2.1 Charakteristické rysy crowdingu	38
3.2.2 Možná vysvětlení crowdingu	40
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	43
4.1 Subjekty a metodika	43
4.2 Výsledky	45
4.3 Diskuze	49
ZÁVĚR	52
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	54

ÚVOD

Crowding fenomén je popisován jako zhoršení rozlišitelnosti znaků, které se nacházejí v blízkosti jiných znaků. Pozorované znaky se jeví nezřetelné a zpřeházené „páté přes deváté“. Tento jev se vyskytuje v menší míře při centrálním vidění a výrazný je zejména při periferním vidění. Není tedy překvapivé, že tento fenomén má klinický význam zejména u lidí se ztrátou centrálního vidění, např. vlivem věkem podmíněné makulární degenerace, u lidí trpících amblyopií či dyslexií, kterým působí potíže při čtení. Crowding ale může představovat problém i pro správné stanovení zrakové ostrosti, pokud je tato měřena pomocí nestandardizovaných optotypů. Právě měření zrakové ostrosti a designu standardizovaných optotypů je věnována první kapitola této práce.

Mechanismus zpracování obrazu a vidění samotné je bezesporu složitý proces, který zahrnuje přeměnu světla jakožto elektromagnetického záření vstupujícího do oka přes rohovku a dopadajícího na světločivné buňky na sítnici. Ty ho potom mění na elektrochemické signály, které se šíří zrakovou dráhou a nakonec je zpracuje mozek. Jelikož jedna z teorií vysvětlujících vznik crowdingu se opírá právě o mechanismus zpracování obrazu, jsou tyto mechanismy popsány pro různé úrovně jasů ve druhé kapitole. Dále je zde objasněn vliv jasů na organizaci receptivních polí, které se podle další teorie také podílejí na vzniku crowdingu.

Ve třetí kapitole je kladen důraz na rozlišení crowdingu od konturové interakce, jevu crowdingu podobnému, který je jeho součástí. Oba jevy jsou definovány, jsou popsány jejich rysy a uvedena jejich možná vysvětlení. Zájem o problematiku crowdingu v posledních letech vzrostl a výzkumy přinesly cenné objevy, nové přístupy k problematice a větší porozumění jak fenoménu jako takovému, tak i principům rozpoznávání předmětů a čtení. Přes veškeré snahy vědců o objasnění crowdingu se ale stále ještě nedaří crowding vysvětlit komplexně. Jak shrnul Dennis M. Levi, profesor optometrie na University of California, Berkeley, „crowding je hlavolam obestřený paradoxem“ [1].

Tato diplomová práce navazuje na moji bakalářskou práci s názvem „Crowding fenomén“ a jejím cílem je poskytnout ucelený přehled o crowdingu, prohloubit poznatky o něm zahrnutím i novějších studií, charakterizovat jeho rysy a nastínit jeho možná vysvětlení. Praktická část této práce, která je věnovaná studii vlivu crowdingu na vízus za různých jasových podmínek, se opírá o fakta popsaná v části teoretické. Realizovaný výzkum přináší nové poznatky o problematice fenoménu.

1 KVANTITATIVNÍ HODNOCENÍ ZRAKOVÉHO VJEMU

Zrak je bezesporu pro člověka důležitý smysl a není tedy divu, že mu byla a stále je věnována značná pozornost. Otázka hodnocení zrakového vjemu je stará jako lidstvo samo. Je známo, že již staří Egypťané využívali schopnost rozlišení dvojhvězdy na noční obloze jako kritérium ke stanovení zrakové ostrosti před více než 5 000 lety. Dnes doba již značně pokročila a k hodnocení zrakového vjemu se používají poněkud sofistikovanější metody. Staletí studií, měření a analýz zrakové ostrosti jakožto zásadní meze vidění přinesla cenné poznatky. [2]

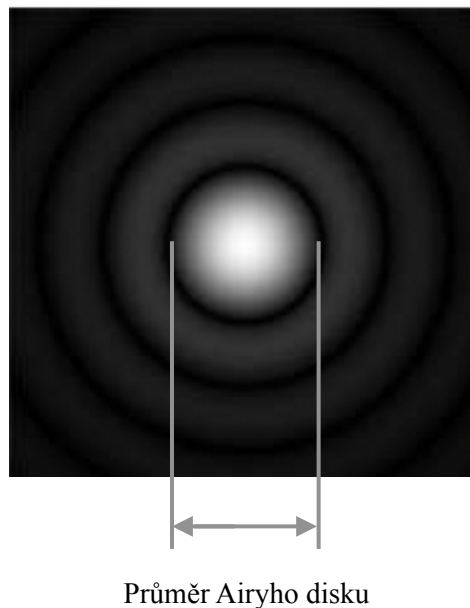
1.1 Zraková ostrost

Dva hlavní faktory limitující zrakovou ostrost jsou stav oka jako optického systému a anatomie a fyziologie zrakového systému. Normální zrakovou ostrost tedy ovlivňuje transparence optických prostředí oka a jejich fyziologická lomivost, normální funkce foveálních čípků, centrální fixace oka a normální činnost zrakového nervu, zrakových funkcí a zrakového korového centra. Dále zraková ostrost mimo jiné závisí na jasnosti pozorovaného předmětu, na vzdálenosti předmětu od sítnice, na kontrastu předmětu vůči okolnímu prostředí, na velikosti zornice a na refrakční vadě. [2, 3]

Stanovení zrakové ostrosti znamená změření pacientovy schopnosti rozlišit jemné detaily testového znaku a je klíčovým ukazatelem zdraví optického aparátu. Na jeho základě je potom možné posuzovat schopnost člověka provádět určité úkony jako řídit dopravní prostředky, vykonávat práci policejního příslušníka či vstoupit do armády nebo naopak získávat sociální benefity pro slabozraké či nevidomé. [2, 4]

1.1.1 Rozlišovací mez oka optická

Z fyzikálního hlediska je oko zatížené difrakcí (ohybem), což znamená, že bod se na sítnici vlivem vlnové povahy světla a jeho ohybu na zornici zobrazí jako ohybový (difrakční) kroužek, viz obr. 1. Intenzita světla v tomto obrazci se mění, maxima dosahuje v centru a následně klesá, přičemž se střídají minima a maxima. Centrální disk (tj. středová oblast obrazce po první minimum) se nazývá Airyho disk. Ohybový obrazec vzniká vždy, i v případě ideálního nastavení optické soustavy, jelikož je dán charakterem světla. Velikost tohoto ohybového obrazce nepřímo závisí na velikosti zornice. To znamená, že čím menší je zornice, tím větší je ohybový obrazec.



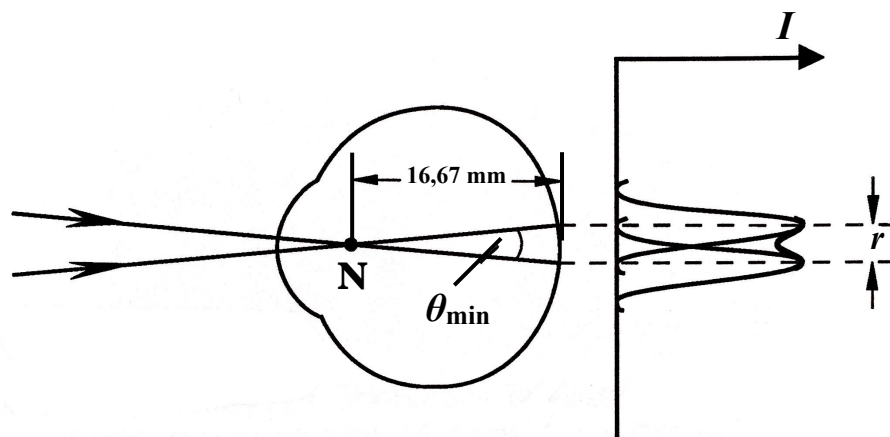
Obr. 1 - Ohybový (difrakční) kroužek a Airyho disk (upraveno dle [5])

Rayleighovo rozlišovací kritérium stanovuje mezní rozlišovací úhel pro vytvoření obrazu. Dle Rayleigha budou dva monochromatické bodové zdroje ještě od sebe rozlišeny, když centrální maximum intenzity ohybového obrazce jednoho bodu

padne do prvního minima intenzity ohybového obrazce druhého bodu. Pokud tuto mezní úhlovou vzdálenost dvou bodů označíme jako θ_{\min} , pak lze psát

$$\sin\theta_{\min} = \frac{1,22\lambda}{d},$$

kde d je průměr zornice a λ představuje vlnovou délku dopadajícího světla. Vezmeme-li v úvahu světlo o vlnové délce $\lambda = 555 \text{ nm}$, jelikož oko je na tuto vlnovou délku za fotopických podmínek nejvíce citlivé, a průměr zornice $d = 4 \text{ mm}$, pak nejmenší úhlová vzdálenost dvou bodů, při které jsou ještě rozlišeny, je $\theta_{\min} \approx 35''$. Úhlový poloměr Airyho disku odpovídá úhlu θ_{\min} z Rayleighova kritéria a z obr. 2. Pro výše uvedené typické hodnoty λ a d pak průměr Airyho disku v jednotkách délky vychází $2r = 5,7 \text{ }\mu\text{m}$. Jelikož průměr čípků ve fovee je asi $1,5 \text{ }\mu\text{m}$, pak Airyho disk v tomto příkladu pokrývá asi 4 čípky. [6, 7]



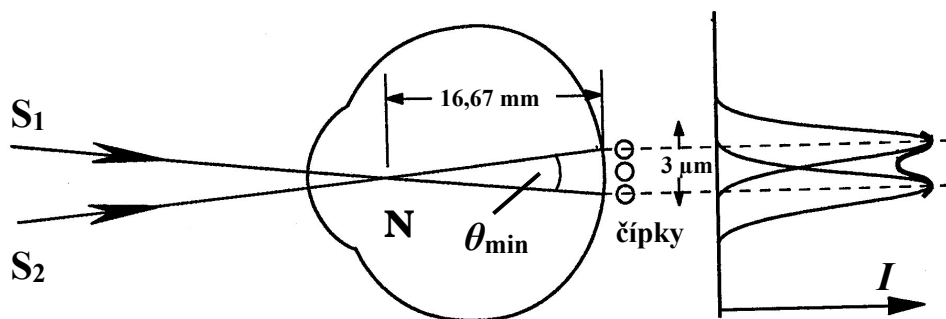
Obr. 2 - Velikost Airyho disku. Hodnota θ_{\min} odpovídá úhlovému poloměru Airyho disku a r je jeho poloměr (upraveno dle [6])

1.1.2 Rozlišovací mez oka fyziologická

Oblast makuly se rozkládá na ploše o průměru asi $5,5 \text{ mm}$ a fovea jako taková leží pod úhlem asi 5 stupňů. Je to oblast tvaru elipsy s horizontálním průměrem asi $1,5 \text{ mm}$ a hustota čípků zde dosahuje $200\,000$ na mm^2 . Vzdálenost mezi centry čípků

je asi $2 \mu\text{m}$, průměr jednotlivých čípků je asi $1,5 \mu\text{m}$ a mezi nimi je mezera asi $0,5 \mu\text{m}$. [2, 8]

Jak bylo zmíněno výše, minimální úhlové rozlišení (*MAR* z angl. minimum angle of resolution) je nejmenší úhlová vzdálenost dvou bodů, při které je oko ještě rozliší. Hartridgeovo kritérium říká, že maximální zrakové ostrosti bude dosaženo, pokud mezi dvěma podrážděnými čípkami zůstane alespoň jeden nepodrážděný. Ze známých parametrů optické soustavy oka (viz obr. 3) a velikosti čípků lze na základě tohoto kritéria stanovit fyziologické minimální úhlové rozlišení $MAR = 37''$.



Obr. 3 - Hartridgeovo kritérium (upraveno dle [6])

Minimální rozlišovací úhel dle Rayleigha byl $35''$, avšak vezmeme-li v potaz běžné polychromatické světlo, proměnlivou velikost zornice měnící se v závislosti na jasu a věk, pak můžeme říci, že Rayleighovo kritérium odpovídá Hartridgeovu. To nasvědčuje, že se optický systém oka vyvinul na vrchol možností daných vlnovou povahou světla a menší čípky blíže k sobě by byly zbytečné.

Hartridge byl první, kdo tvrdil, že detekce detailů obrazu na sítnici je dána detekcí prahového kontrastu. Představíme-li si, že dva body S_1 a S_2 z předcházejícího obrázku leží každý na jedné straně hned vedle černého pruhu na testovací sinusové mřížce, pak budou podrážděny dva čípky, mezi nimi bude jeden nepodrážděný a černý pruh bude rozlišen. [6, 9]

1.2 Kontrastní citlivost

Stanovená hodnota vízu není jedinou důležitou veličinou. Vzhledem k tomu, že vízus se stanovuje při vysokém kontrastu (0,85 a vyšším), nepodává toto vyšetření žádné informace o tom, jak vyšetřovaná osoba vidí za zhoršených zrakových podmínek, tj. při nižších kontrastech. Vidění za nižších kontrastů tvoří podstatnou část běžného života, podílí se např. při rozpoznávání obličejů nebo dopravních značek, a zjištění kontrastní citlivosti je tedy velmi důležitou součástí vyšetření. Za normálního stavu kontrastní citlivost souvisí s centrální zrakovou ostrostí, ale u některých patologických stavů, jako jsou např. mozkové léze, katarakta, diabetická retinopatie, glaukom, neuropatie optiku, oxidativní poškození vlivem kouření či roztroušená skleróza, případně stavy po refrakčních operacích, může být citlivost na kontrast snížena při zachování dobrého vízu. [4, 8]

Tzv. Michelsonův kontrast C mezi plochami o jasů L_{\max} a L_{\min} , $L_{\max} > L_{\min}$, je definován vztahem

$$C = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}.$$

Kontrastní citlivost (C_s) je definována jako převrácená hodnota kontrastního prahu (C_t),

$$C_s = \frac{1}{C_t}.$$

Přitom kontrastní práh je minimální kontrast, při kterém od sebe právě rozlišíme plochy o různém jasů. Při hodnocení kontrastu např. v případě znaků (optotypů) se obvykle používá tzv. Weberův kontrast, C_w ,

$$C_w = \frac{L - L_b}{L_b},$$

kde L je jas uvažovaného znaku a L_b je jas pozadí. Pokud jsou prezentovány černé znaky na světlém pozadí, je hodnota tohoto kontrastu záporná.

K měření kontrastní citlivosti slouží sinusové mřížky o různé prostorové frekvenci (v počtech cyklů na stupeň) a proměnném kontrastu či optotypy s proměnným kontrastem, popř. proměnným kontrastem a vízem. Příkladem optotypu s proměnným kontrastem při pevném vízu je Pelli-Robsonův test na obr. 4. Test obsahuje 16 trojic písmen velkých 4,9 cm s postupně klesajícím kontrastem, přičemž znaky odpovídají poměrně nízkým prostorovým frekvencím asi od 0,5 do 1 cyklu/stupeň při standardní vzdálenosti 1 m. Test může být použit i ve větších vzdálenostech, např. 3 m, pro měření na vyšších prostorových frekvencích. Všechna písmena ve trojicích mají stejný kontrast a kontrast sousedních trojic klesá o 0,15 logaritmických jednotek $\log C_s$ (tj. o $1/\sqrt{2}$). Kontrast na celé tabuli klesá od 0,05 do 2,30 $\log C_s$. Test se vyznačuje větší mírou opakovatelnosti než výše zmíněné testy využívající sinusové mřížky. Z počtu znaků a změny kontrastu mezi každou trojicí lze každému písmenu přiřadit hodnotu 0,05 logaritmu kontrastní citlivosti. [3, 4, 6, 9]



Obr. 4 - Pelli - Robsonův test [10]

1.3 Standardizované optotypy

Měření zrakové ostrosti se provádí pomocí optotypů. Optotyp je soubor testových znaků (písmena, čísla, obrázky, E háky, Pflügerovy háky, Landoltovy prstence) o různé velikosti, pomocí kterých měříme vízus. Vízus je definován jako

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

kde $1'$ je referenční hodnota MAR a MAR je minimální úhlové rozlišení definované dříve. MAR normálního oka je 30 vteřin až 1 minuta. Testové znaky jsou vepsány do čtverce 5×5 , příp. mřížky 5×4 , a jejich detail tvoří $1/5$ výšky znaku. Jelikož znak je právě rozlišen, když MAR je roven úhlové velikosti detailu, je i vízus dán úhlovou velikostí detailů znaku na právě rozlišeném řádku. Takže pokud je celý znak viděn pod úhlem $5'$, jeho detail je viděn pod úhlem $1'$. Důležité je, aby všechny znaky na optotypu měly stejnou čitelnost. Proto se nevyužívá celá abeceda, ale pouze vybrané znaky, např. British Standard letters D, E, F, H, N, P, R, U, V a Z. [3, 9, 11]

1.3.1 Snellův optotyp

Roku 1862 německý oftalmolog profesor Hermann Snellen z Utrechtu zkonstruoval první optotypovou tabuli s písmeny, viz obr. 5, která je od té doby hojně využívána. Výhodou těchto optotypů je značná dostupnost a všeobecná známost zápisu zrakové ostrosti ve tvaru Snellova zlomku,

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

Číslo řádku představuje vzdálenost, ze které je řádek vidět pod úhlem $5'$, tj. ze které je rozlišen okem o vízu 1.

Tyto optotypy většinou obsahují jedno velké písmeno o hodnotě zrakové ostrosti $6/60$ ($0,1 \log MAR$) a postupně více písmen menších, nejmenší řádek většinou o hodnotě $6/5$ ($\approx -0,1 \log MAR$). V rozmezí asi $6/5$ až $6/12$ poskytují tyto optotypy dobrý podnět

pro vyšetření pacientů s dobrou zrakovou ostrostí, jelikož mají obvykle stejný počet písmen jako logaritmické optotypy. Problém ovšem představuje konstrukce optotypu jako celku:

1. Množství znaků na řádcích je nepravidelné. Počet znaků na jednotlivých řádcích optotypu vzrůstá od 1 na největším řádku až po 8 znaků na nejmenším řádku.
2. Rozestup mezi znaky i řádky je nejednotný. Separace mezi znaky na řádcích se pohybuje od 40 % až po 120 %.
3. Sled zmenšování velikostí znaků je nesystematický. Tato posloupnost sleduje empirickou řadu, která byla stanovena na základě zkušeností. Zvětšení znaků mezi řádkem 6/5 a 6/6 je 120 %, ale mezi řádkem 6/36 a 6/60 je to 167 %.

6/60	E	1
6/30	F P	2
6/24	T O Z	3
6/19	L P E D	4
6/15	P E C F D	5
6/12	E D F C Z P	6
6/9,5	F E L O P Z D	7
6/7,5	D E F P O T E C	8
6/6	L E F O D P C T	9

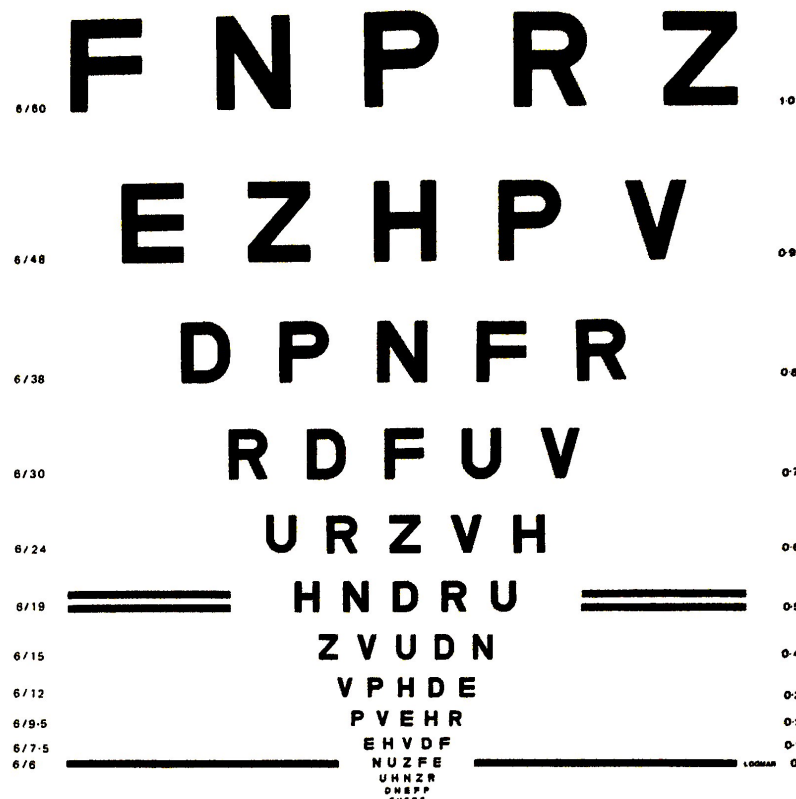
Obr. 5 - Snellův optotyp (upraveno dle [12])

Snellovy optotypy také vykazují nižší míru opakovatelnosti a jsou až 3krát méně citlivé na nitrooční změny než logaritmické optotypy, takže jsou i méně citlivé na amblyopii a další příčiny monokulární ztráty zrakové ostrosti. [4, 11, 13, 14]

1.3.2 LogMAR optotyp

U logaritmických optotypů, viz obr. 6, se využívá design navržený roku 1976 australskými optometristy Ianem Baileym a Jan Lovie-Kitchinovou, kteří se zaměřili na to, aby přečtení každého řádku optotypu představovalo stejně těžký úkol nehladě na velikost znaků. Úhlová velikost znaků potom bude představovat jediný parametr určující hodnotu zrakové ostrosti. Zraková ostrost pak není hodnocena ve formě vízu, ale jako logaritmus minimálního úhlového rozlišení, logMAR. Z definice vízu platí

$$\log V = -\log \text{MAR}.$$



Obr. 6 - Logaritmický optotyp [15]

Mezi přednosti logaritmických optotypů patří především:

1. Stejný počet znaků (většinou bezpatkové British Standard letters) na všech řádcích, obvykle jich je 5.
2. Pravidelné rozestupy mezi písmeny (o šířce znaku a více) i mezi řádky (o výšce menšího řádku a více, což téměř přesně odpovídá šířce znaku z většího řádku). Spolu s konstantním počtem znaků na řádcích získává takovýto optotyp typický tvar převráceného trojúhelníku. Toto uspořádání se snaží eliminovat vliv tzv. crowding efektu, viz kapitola 3.2.
3. Velikost znaků optotypu mezi jednotlivými řádky se mění podle geometrické posloupnosti s kvocientem $q = 10\sqrt{10} = 1,2589$, což odpovídá změně 0,1 logMAR (26 %). Takové dělení respektuje Weber-Fechnerův psychofyzikální zákon, který říká, že „intenzita smyslového vjemu je rovna logaritmu intenzity vyvolávajícího stimulu“. [16]
4. Přesné prahové stanovení vízu na základě počtu právě přečtených znaků. Jelikož je na všech řádcích stejný počet znaků, můžeme každému znaku přiřadit jeho hodnotu. Při nárůstu velikostí znaků mezi řádky o 0,1 logMAR a pěti znacích na řádku je hodnota každého znaku $1/5 \times 0,1 = 0,02$ logaritmické jednotky.
5. Možné přizpůsobení odečítání vízu při nestandardních vyšetřovacích vzdálenostech. Díky stejné obtížnosti rozlišitelnosti řádků a logaritmické progresi mezi nimi je možno zachovat standardní podmínky vyšetření, i pokud je vzdálenost vyšetření vybrána z hodnot sledující geometrickou progresi a je ve stejném poměru jako progrese velikosti znaků. Pokud je mezi velikostmi řádků kvocient 0,1 logMAR, potom možné vzdálenosti v metrech jsou 6, 4,8, 3,8, 3,0, 2,4, 1,9 atd., což odpovídá číslu řádku násobenému číslem 10 (60, 48, 38, atd.). Pokud vzdálenost změním tak, že nová vzdálenost je oproti výchozí menší o hodnotu, jejíž logaritmus je 0,1 násobek logaritmu výchozí vzdálenosti, pak dochází ke zvětšení úhlové velikosti znaků o 0,1 logMAR a je nutné patřičně upravit logaritmickou stupnici hodnot.

6. Větší přesnost a až dvojnásobná míra opakovatelnosti oproti Snellovu optotypu.

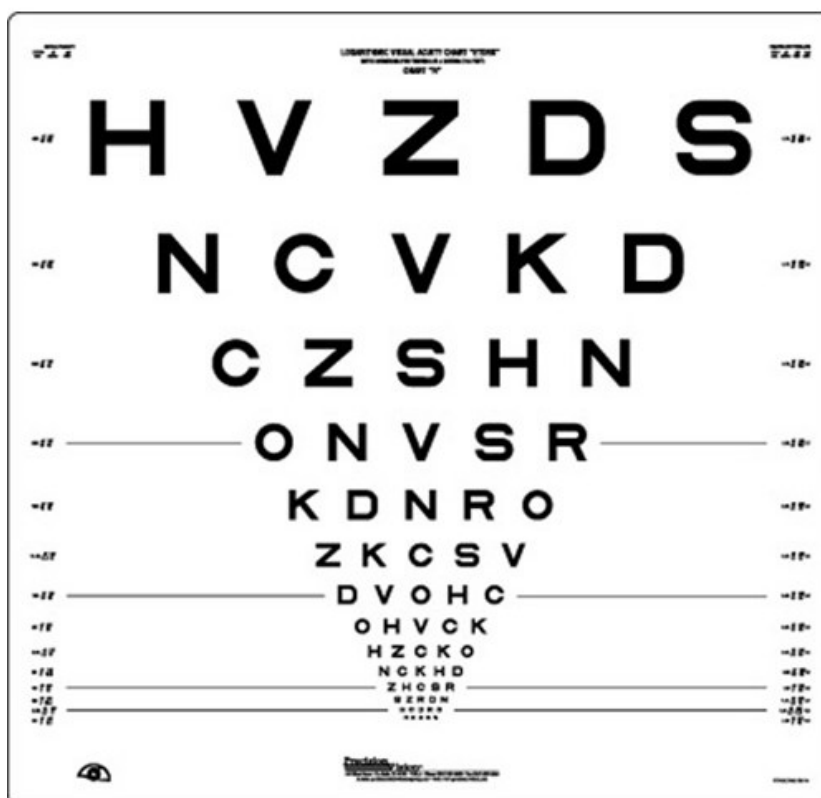
Logaritmické optotypy zpravidla disponují větším počtem řádků, především v oblasti nízkého vízu. Nejmenší řádek má obvykle hodnotu $-0,3 \log\text{MAR}$ (6/3) a největší $1,0 \log\text{MAR}$ (6/60). Vízus může být udáván v logaritmických jednotkách $\log\text{MAR}$, pomocí tzv. Visual Acuity Rating (*VAR*) v podobě $VAR = 100 - 50(\log\text{MAR})$ nebo může být přepočítán na Snellův zlomek. Všechny možnosti zápisu vizů jsou pro přehlednost uvedeny v tabulce 1. [4, 11, 13, 14, 17, 18]

Tab. 1 - Tabulka pro převod vizů do dálky (upraveno dle [4])

<i>MAR</i>	$\log\text{MAR}$	<i>VAR</i>	Snellův zlomek	Desetinné číslo
0,50	-0,30	115	6/3	2,0
0,63	-0,20	110	6/3,8	1,60
0,80	-0,10	105	6/4,8	1,25
1,00	0,00	100	6/6	1,00
1,25	0,10	95	6/7,5	0,80
1,60	0,20	90	6/9,5	0,63
2,00	0,30	85	6/12	0,50
2,5	0,40	80	6/15	0,40
3,2	0,50	75	6/19	0,32
4,0	0,60	70	6/24	0,25
5,0	0,70	65	6/30	0,20
6,3	0,80	60	6/38	0,16
8,0	0,90	55	6/48	0,125
10	1,00	50	6/60	0,10

1.3.3 ETDRS optotyp

Roku 1982 Frederick L. Ferris s kolegy převzali principy konstrukce logaritmických optotypů dle Baileyho a Lovie-Kitchinové a pro svou studii zabývající se diabetickou retinopatií vytvořili tzv. ETDRS optotyp (podle Early Treatment of Diabetic Retinopathy Study), viz obr. 7. Ten obsahuje sadu deseti bezpatkových písmen (C, D, H, K, N, O, R, S, V, Z), která roku 1959 navrhla Dr. Louise Sloanová, a je nejpoužívanějším optotypem pro klinické studie. ETDRS optotyp se skládá z několika částí – tabulí označených R, 1 a 2. Tabule R slouží k určení optimální korekce pravého a levého oka, tabule 1 k určení zrakové ostrosti pravého oka a tabule 2 k určení zrakové ostrosti levého oka. ETDRS optotypy nejsou konstruovány na obvyklou vyšetřovací vzdálenost 6 m, ale na 4 m. [2, 17]



Obr. 7 - ETDRS optotyp [20]

Dle studie [19] zabývající se srovnáním dosažené hodnoty zrakové ostrosti měřené na Snellově optotypu a ETDRS optotypu vyplývá, že lepších výsledků bylo

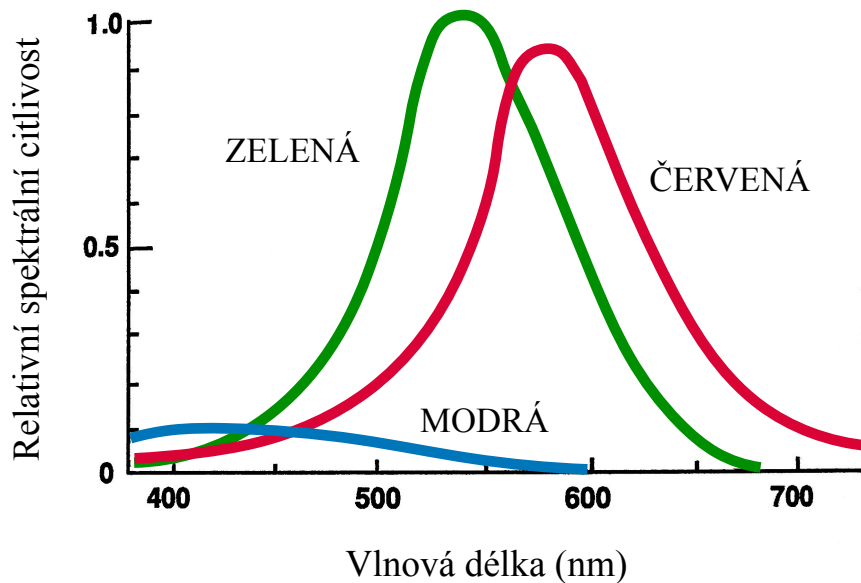
dosaženo u ETDRS optotypu a to jak u zdravých očí, tak i u očí se sníženou zrakovou ostroší. Průměrná hodnota zrakové ostroší naměřená u Snellova optotypu byla 0,78 logMAR ($\approx 6/38$) a průměrná hodnota zrakové ostroší u ETDRS optotypu byla 0,54 logMAR ($\approx 6/24$), což představuje v průměru rozlišení o 2,5 řádku více za použití ETDRS optotypu. U očí se sníženou zrakovou ostroší (6/60 a horší) byla průměrná hodnota zrakové ostroší u Snellova optotypu 1,34 logMAR ($\approx 6/120$) a 0,93 logMAR ($\approx 6/48$) u ETDRS optotypu a bylo dosaženo výrazného zlepšení rozlišitelnosti znaků v průměru o 4 řádky.

2 ZRAKOVÉ VNÍMÁNÍ ZA RŮZNÝCH JASOVÝCH PODMÍNEK

Lidské oko dokáže vnímat podněty za značně různých jasových podmínek. Za jasné noci jsme schopni pozorovat i slabě svítící hvězdy a stejně tak jsme schopni pozorovat ledního medvěda kráčícího po sněhu či ledu za jasného slunečného dne. Toto je umožněno díky čtyřem mechanismům: (1) vrstvě dvou typů fotoreceptorů na sítnici, odkud se vzniklý zrakový vjem šíří neurony až do korového centra v týlním laloku mozku, (2) změně velikosti zornice, (3) změně koncentrace vybělených a nevybělených fotopigmentů a (4) změně nervové citlivosti. [15, 21]

2.1 Fotoreceptory a typy vidění

Vrstva fotoreceptorů, tyčinek a čípků, tvoří až předposlední vrstvu sítnice a díky tomu jí dosáhne jen asi 10 % intenzity světla dopadající do oka. Zbylých 90 % je pohlceno nebo odraženo. Jsou to právě fotoreceptory, které mění světelné stimuly na elektrochemické signály. Čípky, kterých je asi 5 - 7 milionů, slouží k vidění za denního světla, k rozlišování detailů a barev. Maximální citlivost čípků je na žlutozelené světlo o vlnové délce 555 nm. Jednotlivé typy čípků jsou pak nejcitlivější konkrétně na modré (445 nm), zelené (535 nm) a červené (570 nm) části spektra, viz obr. 8. Nejvíce čípků, a to až 10 % všech čípků sítnice, se nachází ve fovee, místě nejostřejšího vidění, a směrem do periferie čípků ubývá. Vnímání pomocí čípků při vyšší intenzitě světla, konkrétně při jasů vyšším než 10^2 cd/m², je nazýváno jako fotopické vidění. [8, 22]

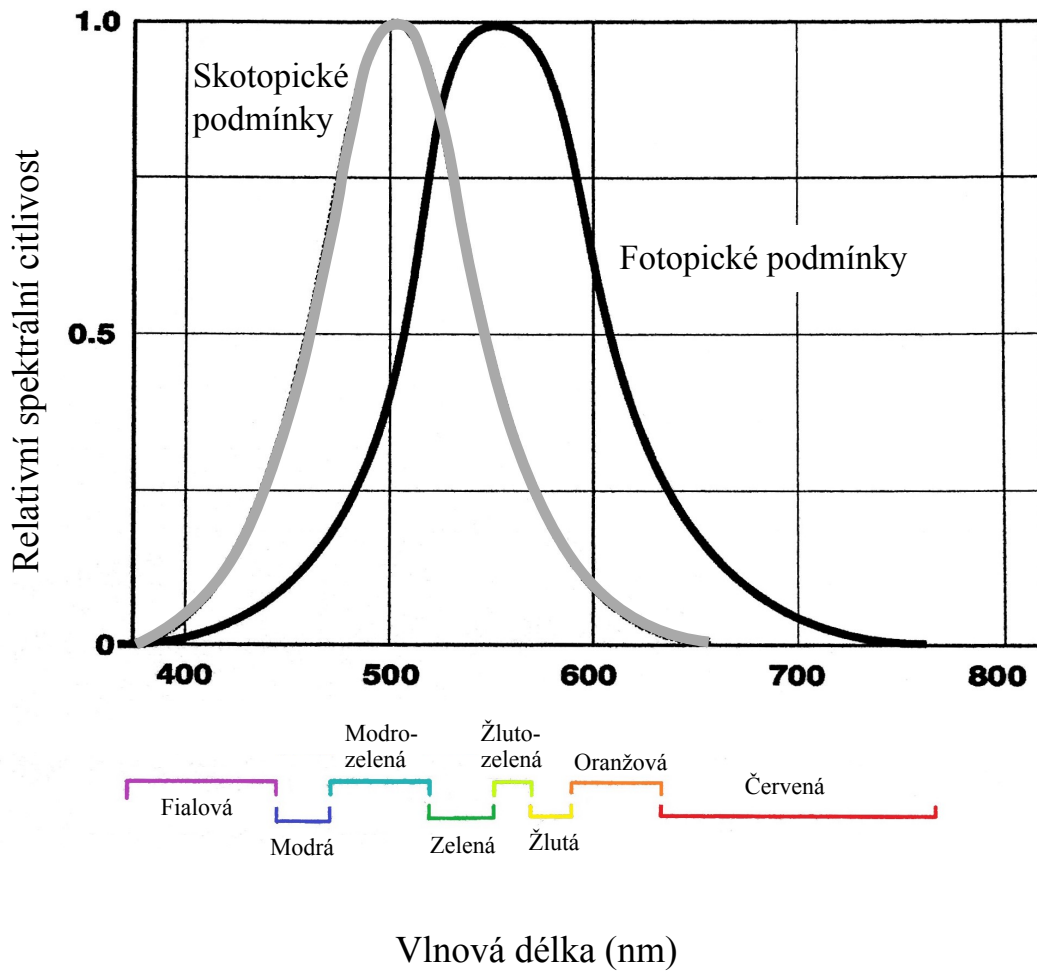


Obr. 8 - Spektrální citlivost čípků (upraveno dle [6])

Tyčinek je podstatně více a to asi 120 - 140 milionů a podílejí se na vidění za snížené intenzity světla - za šera a v noci. Maximální citlivost tyčinek je na zelenomodré světlo o vlnové délce 500 nm. Tyčinky se v maximální míře nacházejí v okruhu asi 20° od žluté skvrny a ubývá jich jak směrem do periferie, tak směrem k makule. V podmínkách za nižšího jasu, asi od 10^{-6} do 10^{-3} cd/m², nastává tzv. skotopické vidění, při kterém již čípky nereagují a aktivní jsou pouze tyčinky. Skotopické vidění je achromatické (bezbarvé) a nejlepší zraková ostrost při skotopickém vidění dosahuje pouze jedné osminy nejlepší zrakové ostrosti za fotopického vidění. Protože čípky, které se nacházejí převážně ve žluté skvrně (makule), nejsou aktivní, vzniká centrální skotom a je znemožněno např. čtení, avšak prostorová orientace je zachována i při nízké hladině osvětlení. [6, 8, 22, 23]

V pásmu hodnot mezi 10^{-3} cd/m² a 10^2 cd/m², tzn. v oblasti mezi viděním skotopickým a fotopickým, existuje ještě vidění mezopické. Pro lepší představu hodnota jasu 10^{-2} cd/m² odpovídá situaci, kdy je list bílého papíru osvětlen měsíčním světlem. Při mezopickém vidění pracují v určité interakci jak tyčinky, tak čípky. Jak již bylo uvedeno, čípky mají maximální hodnotu citlivosti odlišnou od maximální hodnoty citlivosti tyčinek a tento posun v citlivosti směrem ke kratším vlnovým délkám, který

nese jméno podle svého objevitele Jana Evangelisty Purkyněho - Purkyňův posun, je zobrazen na obr. 9. [6, 22]



Obr. 9 - Purkyňův posun (upraveno dle [6])

2.2 Proces adaptace oka na různou intenzitu světla

Z uvedených hodnot vyplývá, že lidské oko je schopné vnímat viditelné záření značně různých intenzit. Pokud se však osvětlení změní o větší hodnotu v krátkém časovém intervalu, oko se musí na tuto změnu adaptovat. Adaptace na světlo popisuje proces snížení citlivosti (zvýšení prahu vidění) zrakového systému na světlo a naopak adaptace na tmu představuje zvýšení citlivosti (snížení prahu vidění). [15]

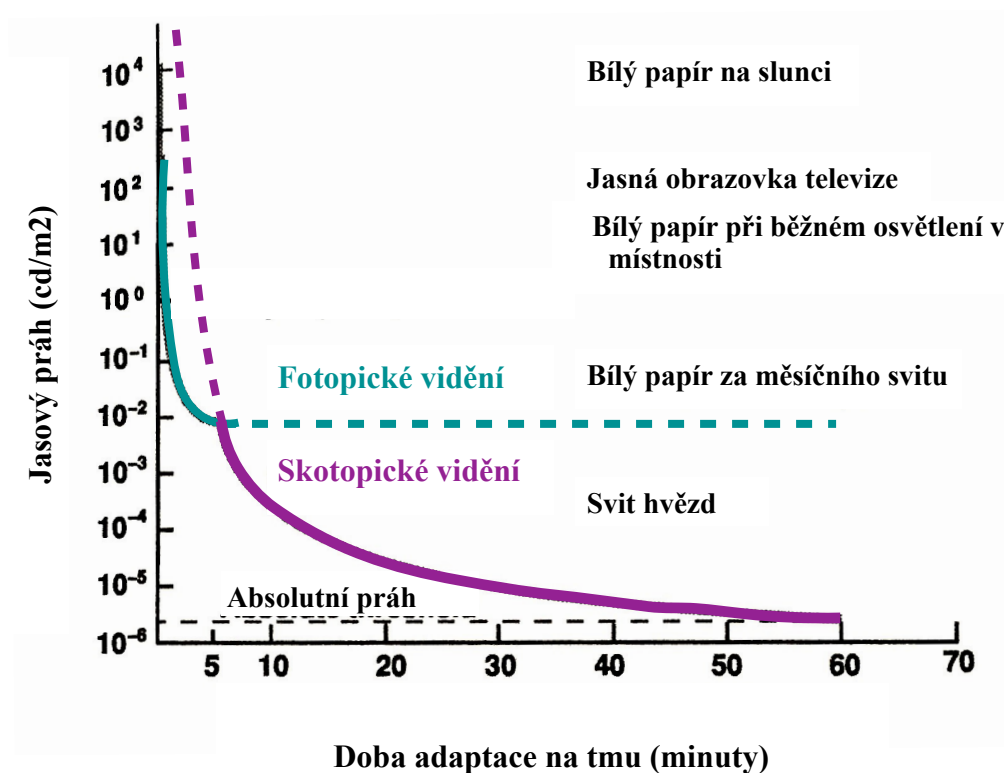
2.2.1 Adaptace na světlo

Adaptace na světlo je velmi rychlá, trvá několik sekund (maxima dosahuje již za 20 - 60 sekund). Oko se adaptuje na světlo při přechodu z temné místnosti do prudkého světla. Nejprve dochází k oslnění, ale zornice okamžitě reagují stažením, tzn. omezují množství světla, které do oka dopadá. Zornice je schopna měnit velikost od zhruba 8 mm do 2 mm během méně než jedné sekundy a snížit tak osvětlení sítnice 16krát. Pokud toto omezení nestačí, dochází k reflexnímu sevření očních víček, příp. i zaclonění očí. Reakce zornic je jen pomocný mechanismus, vlastní adaptační proces se odehrává na sítnici. Tyčinky jsou citlivé na velmi malé množství světla, ale čípky nejsou nízkou intenzitou jasu aktivovány. Při zvýšení jasu jsou tyčinky saturovány a nejsou již nad určitou hranicí schopny reagovat na změny jasu a vidění zprostředkovávají čípky. Jestliže se intenzita světla zvyšuje pomalu, pak probíhá adaptační proces, který je opačným procesem k adaptaci na tmu. [15, 23, 24]

2.2.2. Adaptace na tmu

Adaptace na tmu, např. při přechodu z ulice za denního světla do temné místnosti kinosálu, kdy nejprve oko není schopno rozlišovat předměty, je proces o poznání pomalejší. Jak je vidět z adaptační křivky na obr. 10, skládá se ze dvou částí - čípkové a tyčinkové. Čípková fáze je kratší, trvá asi 5 - 10 minut a během této doby se citlivost sítnice zvýší 100krát. Podněty jsou stále vnímány barevně pomocí čípků, protože

tyčinky se adaptují pomaleji a jejich práh vnímání jasu je vyšší než práh čípků. Během prvních přibližně tří minut čípková část křivky prudce klesá, následně pokles již není tak prudký a nakonec plně adaptované čípky dosáhnou svého jasového prahu. Po přibližně 7 - 10 minutách nastává moment, kdy jsou tyčinky více citlivé než čípky, jasový práh opět klesá a nastává tyčinková fáze. Tyčinková fáze je pomalá, trvá až 45 minut, a citlivost sítnice se zvýší 100 000krát. Podněty se v této fázi jeví v odstínech šedé. Po přibližně 30 minutách dosahuje tyčinková část křivky bodu, kde další snížení jasového prahu je minimální a tyčinky jsou plně adaptované. Z adaptační křivky vyplývá, že tyčinky i čípky se začínají adaptovat ve stejný moment, ale čípky se adaptují rychleji a nejnižší jasový práh čípků je mnohem vyšší než nejnižší práh tyčinek, protože ty jsou nakonec více citlivé. Zapojení dvou různých mechanismů, tj. tyčinek a čípků, je podkladem pro duplicitní teorii vidění, kterou roku 1866 vyslovil Max Schultze. [3, 15, 25]

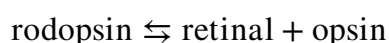


Obr. 10 - Křivka adaptace na tmu (upraveno dle [6]). Zelená barva znázorňuje adaptaci čípků, fialová tyčinek a plné křivky adaptaci sítnice jako celku.

2.2.3 Role rodopsinu při adaptaci

Rodopsin popsal roku 1876 německý fyziolog Franz Christian Boll, který si povšiml, že normálně červeno-fialová retina žáby po osvětlení světlem zbělá. Rodopsin neboli zrakový purpur nacházející se v zevním segmentu tyčinek je chromoprotein skládající se z bezbarvého proteinu opsinu a na něj napojeného chromoforu, molekuly obsahující barevný pigment a umožňující absorpci světla viditelné části spektra. Chromofor v podobě 11-cis-retinal (taktéž 11-cis-retinaldehyd) je látka, která vzniká oxidací vitamínu A. Přítomnost světla způsobí, že se 11-cis-retinal postupně přes různé přechodné formy (barthorodopsin, lumirodopsin, metarodopsin I, metarodopsin II) přemění až na all-trans-retinal, což výrazně změní uspořádání molekuly rodopsinu. Tato změna uspořádání, izomerizace, zahájí proces fototransdukce v tyčinkách, pomocí níž je světlo přeměněno na elektrický signál, který je optickým nervem dopraven až do zrakové kůry v mozku.

Změna v uspořádání molekuly rodopsinu též způsobí, že se opsin oddělí od retinalu a nastává chemický proces zvaný vybělování (rodopsin postupně mění barvu z fialové, přes oranžovou a žlutou až do bílé). Vybělování stanovuje, do jaké míry mohou být tyčinky stimulovány, a to tím, že snižuje jejich citlivost na jasné světlo a tím pádem umožňuje čípkům zprostředkovávat vizuální vjem za jasných podmínek. Pokud ve fotoreceptorech nejsou přítomny žádné nevybělené molekuly, fotoreceptory nejsou schopny zachytit žádné množství světla a zrakový systém je zcela necitlivý na světlo. All-trans-retinal, který se uvolní během vybělování, je buď uložen, nebo přeměněn zpět na 11-cis-retinal a transportován do tyčinek. Tento proces je znám jako regenerace rodopsinu, který se odehrává bez přítomnosti světla a je podstatou adaptace na tmu, kdy se množství rodopsinu, které bylo spotřebováno během vybělení za světla, pomalu zvětšuje a tyčinky zvyšují svou citlivost v šeru. Skutečnost, že se rodopsin působením světla rozpadá a ve tmě se regeneruje zpět, může být zapsána následovně:



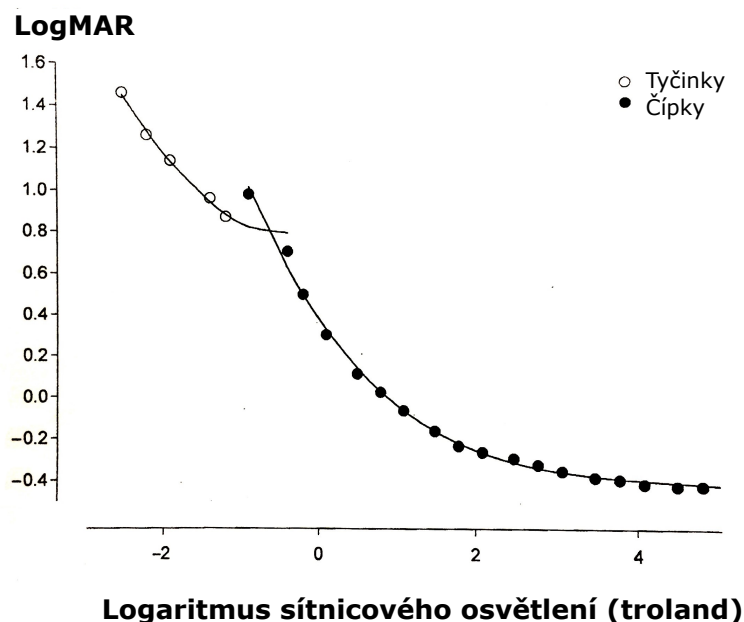
Světlo působí pouze jako spouštěč přeměny cis-formy na trans-formu, následující etapy se dějí automaticky. [6, 8, 15, 26, 27]

2.3 Vztah jasů a kontrastu při měření zrakové ostrosti

Řada zrakových funkcí, mezi nimi i zraková ostrost a kontrastní citlivost, je závislá na jasů podnětu. Zraková ostrost i kontrastní citlivost se snižujícím se jasem klesají, jelikož snížení osvětlení sítnice má za následek zhoršení prostorového rozlišení.

2.3.1 Jas a zraková ostrost

Se vzrůstajícím osvětlením sítnice (za fotopických podmínek) se zraková ostrost zlepšuje zprvu výrazně a později, v oblasti asi 80 - 320 cd/m² (což jsou běžné hodnoty jasů optotypu pro vyšetření zrakové ostrosti), zůstává hladina zrakové ostrosti víceméně konstantní, viz obr. 11. Při skotopických podmínkách, jak již bylo řečeno, jsou aktivní pouze tyčinky a se zvýšením jasů se zraková ostrost taktéž zlepšuje, avšak svého maxima dosahuje u zdravých jedinců asi při 0,7 - 1,0 logMAR, což je asi pouze 1/8 nejlepší zrakové ostrosti za fotopických podmínek. Tyto hodnoty odpovídají



Obr. 11 - Zraková ostrost při různých hladinách sítnicového osvětlení (upraveno dle [15]). Hodnota logaritmu 3 trolandů zhruba odpovídá jasů asi 100 cd/m² pozorovaného znaku, při průměru zornice 3,5 mm.

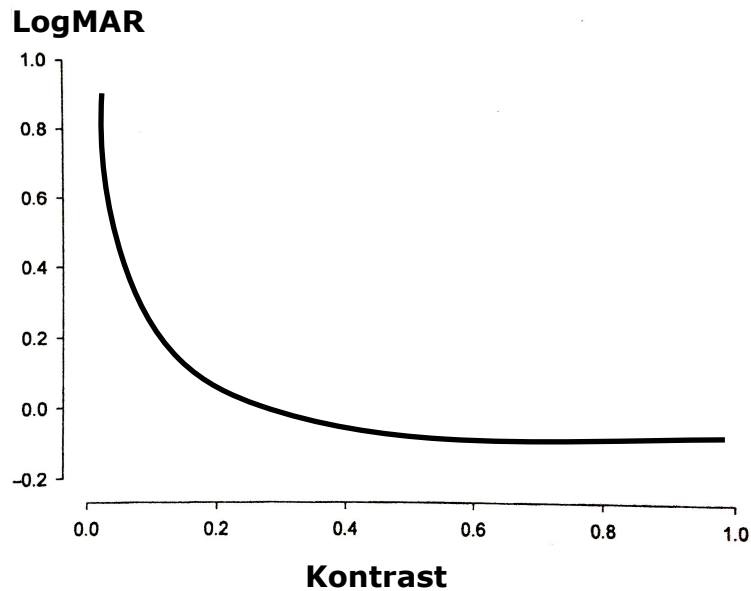
zrakové ostrosti tyčinkových monochromatů, což jsou jedinci, jejichž sítnice neobsahuje čípky. Takto nízká hodnota zrakové ostrosti je vysvětlena faktem, že ve fovee nejsou přítomny tyčinky, tudíž nejlepší zrakové ostrosti je dosaženo, pokud subjekt nefixuje přímo pozorovaný podnět, ale místo vedle něj. Zároveň ale excentricita nesmí přesáhnout 20°, i když paradoxně právě v této oblasti je největší hustota tyčinek. Skotopická zraková ostrost silně závisí na nervovém zpracování za úrovní fotoreceptorů, tj. na konvergenci tyčinek na bipolární buňky a na receptivních polích (viz kapitola 2.4). Konvergence tyčinek v periférii je rozsáhlejší než konvergence čípků, což vysvětluje, proč je periferní zraková ostrost za skotopických podmínek horší než za fotopických i přesto, že tyčinky mají v periférii menší rozestup než čípky. [2, 15, 28]

Rabin se ve svém výzkumu [28] zaměřil na srovnání vlivu jasu na zrakovou ostrost a kontrastní citlivost a zjistil, že dvojnásobné zvýšení jasu má za následek 10% zlepšení zrakové ostrosti (což odpovídá zlepšení asi o dvě písmena na optotypu), ale 40% zlepšení kontrastní citlivosti (což odpovídá zlepšení asi o 1,5 řádku na optotypu pro vyšetření kontrastu). Z jeho výzkumu vyplývá, že jas má mnohem větší vliv na kontrastní citlivost než na zrakovou ostrost.

2.3.2 Kontrast a zraková ostrost

Se snižujícím se kontrastem stimulů zraková ostrost klesá. Dle British Standards je doporučený kontrast znaků pro vyšetřování zrakové ostrosti minimálně 0,9 (90 %). Jak je vidět z obr. 12, k výraznému zhoršení zrakové ostrosti dochází, když kontrast klesne pod přibližně 0,2. S dalším klesáním se zraková ostrost dále zhoršuje a při 10% kontrastu je zraková ostrost snížena asi na polovinu hodnot dosažených při vysokém kontrastu. Z výzkumu Linové a kol. [29] vyplývá podobnost mezi zrakovou ostrostití za různých kontrastů a zrakovou ostrostití za různých jasových podmínek. Linová uvádí, že rozdíl mezi zrakovou ostrostití za vysokého a nízkého kontrastu činí 0,21 logMAR a je velmi podobný rozdílu mezi zrakovou ostrostití za fotopických a mezopických (0,75 cd/m²) podmínek, který činí 0,24 logMAR. Jelikož zatím nejsou stanoveny standardy pro měření zrakové ostrosti za mezopických podmínek, Linová pro taková měření navrhuje stanovit hodnotu jasu 0,75 cd/m²

nebo hodnotu přibližně o 2,0 logaritmické jednotky nižší než je úroveň fotopického jasu. Za této podmínky výsledky odpovídají zavedené normě pro měření zrakové ostrosti nízkokontrastních znaků za fotopických podmínek. [6, 15]



Obr. 12 - Zraková ostrost v závislosti na měnícím se kontrastu (upraveno dle [15])

2.4 Působení jasu na uspořádání receptivních polí

Pro pochopení způsobu zpracování obrazů a vidění jako takového nestačí jen znalost funkce fotoreceptorů jakožto převodníků světelných signálů na elektrické impulzy, které jsou dále vedeny do mozku, kde jsou zpracovány do vjemů. Důležité je i vědět, co se děje právě mezi fotoreceptory a mozkiem, konkrétně pak znalost funkce a uspořádání receptivních polí.

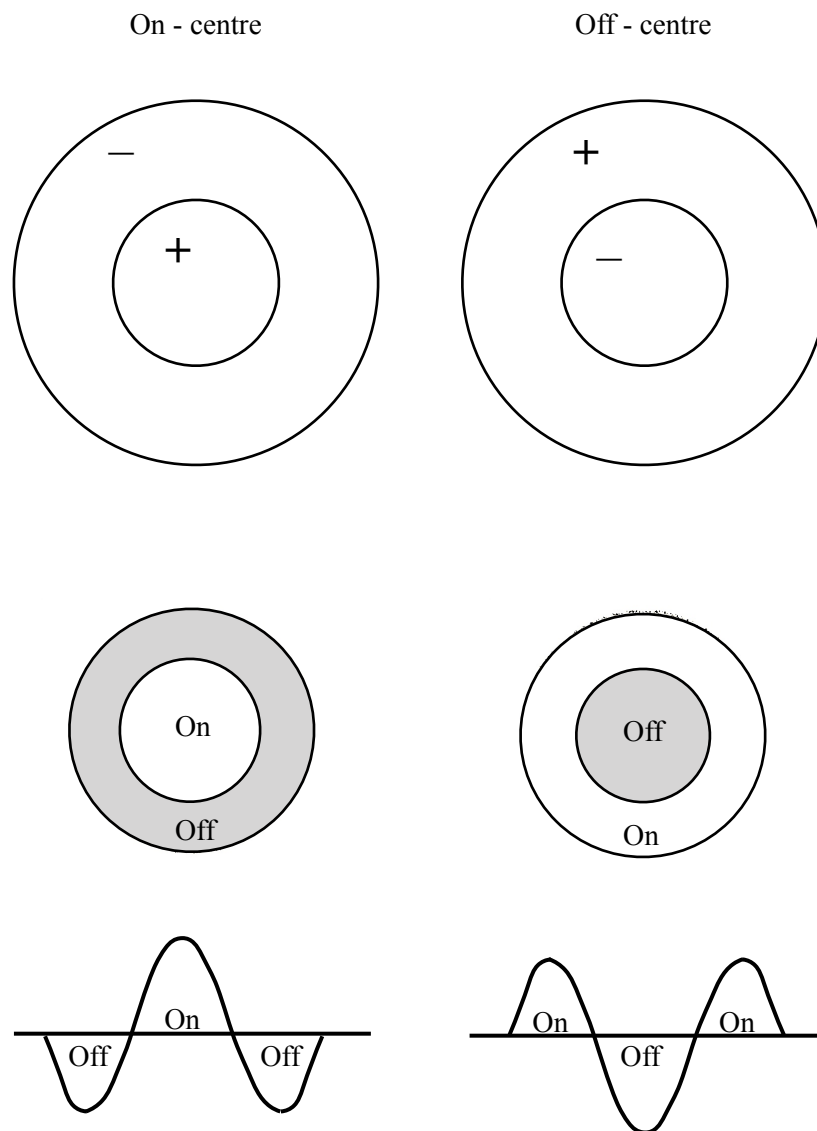
2.4.1 Anatomie sítnice

Mezi vnější vrstvou sítnice (vrstvou fotoreceptorů) a vnitřní vrstvou (vrstvou gangliových buněk) leží střední vrstva tvořená bipolárními, horizontálními

a amakrinními buňkami. Bipolární buňky přijímají signály od fotoreceptorů a mnohé z nich se pojí přímo na gangliové buňky. Horizontální buňky spojují fotoreceptory a bipolární buňky, amakrinní buňky spojují bipolární buňky s gangliovými. Axony gangliových buněk tvoří optický nerv. V oku je přibližně 125 milionů fotoreceptorů, ale pouze 1 milion gangliových buněk. Tento nepoměr lze vysvětlit pomocí konvergence fotoreceptorů. Existují dvě cesty, kterými se může světelný signál z fotoreceptorů šířit, jde o tzv. přímou a nepřímou dráhu. Přímá dráha vede z fotoreceptorů, přes bipolární buňky rovnou do gangliových. Tato cesta je více kompaktní ve smyslu, že jeden fotoreceptor se pojí na jednu bipolární buňku a jedna bipolární buňka se pojí na jednu gangliovou. Takové uspořádání se nachází ve fovee a jejím blízkém okolí. Nepřímá dráha, která zahrnuje i horizontální a amakrinní buňky, je díky postranním (laterálním) spojením více rozptýlená a umožňuje napojení více fotoreceptorů na bipolární buňku a více bipolárních buněk na buňku gangliovou. Takové uspořádání se nachází na většině plochy sítnice. [8, 30]

2.4.2 Typy receptivních polí

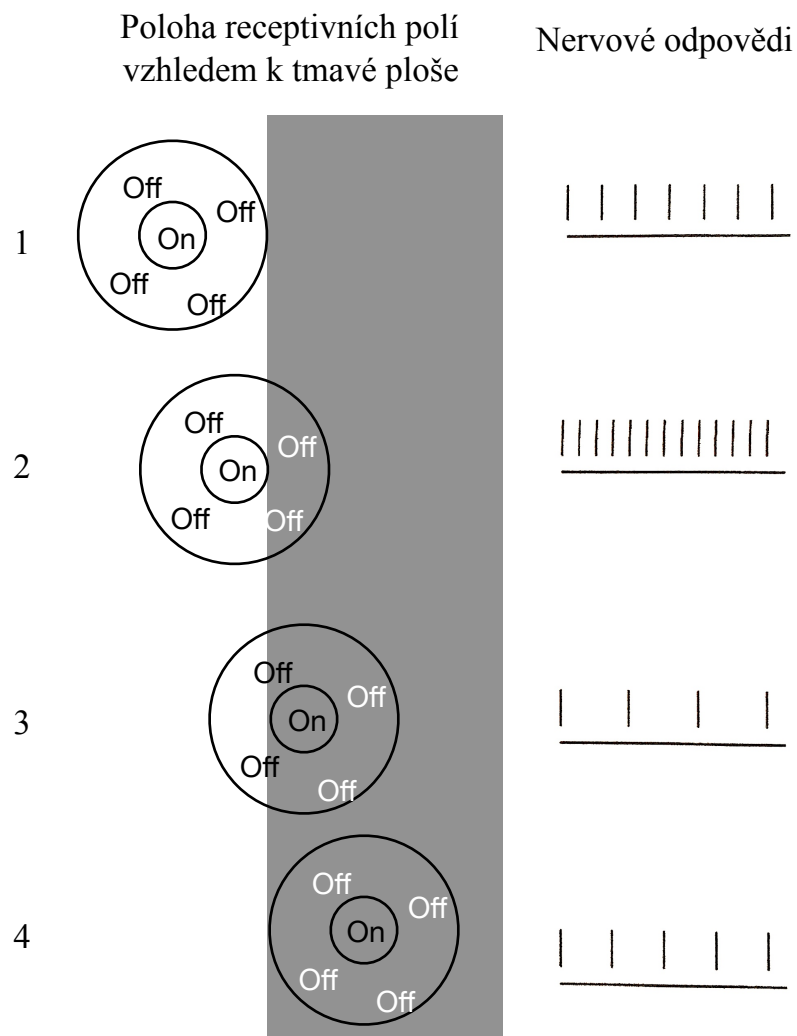
Celková plocha zabíraná fotoreceptory, které se přímo či nepřímo pojí na jednu bipolární nebo gangliovou buňku, tvoří tzv. receptivní pole. Receptivní pole nervové buňky je definováno jako „část zorného pole, kde stimulace světlem způsobuje buď excitaci, nebo inhibici buňky“. [8] Bipolární a gangliové buňky mají receptivní pole s koncentrickým uspořádáním, jelikož světelný bod projektovaný na sítnici způsobí excitaci (nebo inhibici) bipolárních a gangliových buněk, které leží v jeho dráze, a inhibici (nebo excitaci) buněk mimo jeho dráhu. Koncentrická receptivní pole jsou dvojího typu: on-centre a off-centre. U obou typů se nachází centrum a jeho periferie (jsou to tzv. centre-surround receptivní pole), které jsou vzájemně v antagonistickém (protichůdném) vztahu. Pokud světlo dopadající na buňky v centru receptivního pole způsobí jeho excitaci a inhibici periferie, mluvíme o on-centre receptivním poli. Naopak pokud světlo způsobí inhibici centra a excitaci periferie, jde o off-centre receptivní pole. Oba typy centre-surround receptivních polí jsou znázorněny na obr. 13.



Obr. 13 - Centre - surround receptivní pole a jejich odpovědi na světlo
(upraveno dle [15, 30])

Čím větší plochu světelný stimul zabírá, tím větší odezvu působí. Zvětšuje-li se velikost stimulu působícího na centrum receptivního pole (v případě on-centre receptivního pole), odezva se postupně zlepšuje až do okamžiku, kdy velikost stimulu odpovídá velikosti centra. Poté odezva klesá, jelikož stimul nyní začíná zahrnovat i opačně působící periferii. Pokud stimul osvětluje celé receptivní pole, pak odezva centra buď těsně vítězí, nebo je efekt nulový. Jelikož centre-surround receptivní pole gangliových buněk nevyvolávají za těchto podmínek odezvu, nejsou pravděpodobně

citlivá na jas, ale na kontrast. Na obr. 14 jsou znázorněna receptivní pole gangliových buněk v různé pozici na pomezí světlé a tmavé plochy. Receptivní pole 1 je celé umístěno na světlé ploše a jelikož je vysokým jasnem stimulována i antagonistická periferie, je nervová odezva středně vysoká. Naproti tomu receptivní pole 4 je celé na tmavé ploše, slabá odpověď centra je inhibována periferií a celková odpověď je slabší než u receptivního pole 1. Receptivní pole 2 má nejsilnější odpověď, protože silná odpověď centra je jen částečně tlumena periferií. Receptivní pole 3 má nejslabší odpověď, protože jeho centrum je celé v tmavé ploše, kde podává slabou odpověď,



Obr. 14 - Nervové odpovědi on - centre receptivních polí vzhledem k hranici mezi světlou a tmavou plochou (upraveno dle [15])

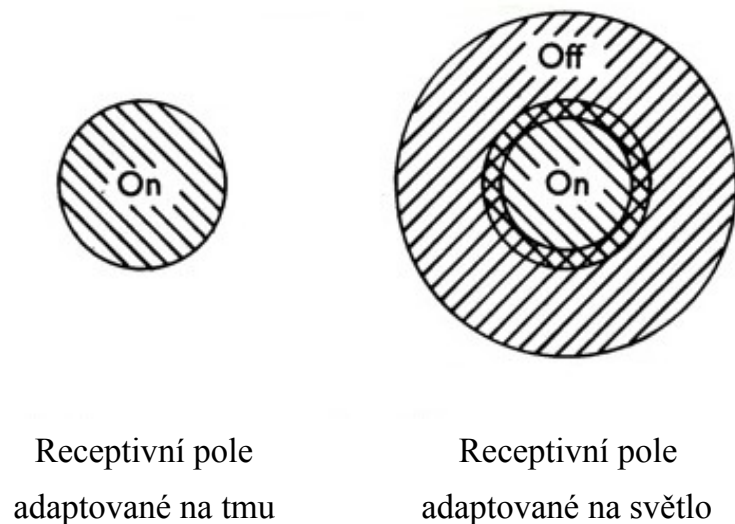
a ta je navíc ještě utlumena částí periferie, která je ve světlé ploše. Uspořádání on-centre a off-centre receptivních polí s antagonistickou periferií dává odpovědi, které zvýrazňují hranici, kde se ostře mění hladiny jasu. Naopak pokud se intenzita jasu mění pozvolna, zrakový systém má tendence tyto změny osvětlení sítnice ignorovat. On- i off-centre receptivní pole jsou vzájemně promíchána a vyskytují se ve stejném množství. Receptivní pole dvou sousedních gangliových buněk se většinou i překrývají. [6, 30]

Velikost receptivních polí se směrem do periferie sítnice zvětšuje. Blízko fovey se rozkládají na ploše o velikosti jednoho až několika málo čípků. V periférii sítnice jsou receptivní pole tvořena i tisíci tyčinkami a mohou v průměru dosahovat velikosti až 1 mm. Směrem k periférii sítnice také klesá zraková ostrost a existuje teorie, že v centru receptivních polí (on-centre i off-centre) se vzruchy šíří přímou dráhou, která stanovuje mez zrakové ostrosti, a v antagonistické periférii nepřímou dráhou. Je to právě nepřímé napojení buněk, které způsobuje laterální inhibici, tj. bipolární buňka reaguje na světelný stimul protichůdně v periférii receptivního pole a v jeho centru. Některé gangliové buňky v periférii mohou být stimulovány tyčinkami za nízkého jasu a čípkami za vysokého jasu, ale ne oběma fotoreceptory zároveň. Ve vzdálenosti až do 10° od centra sítnice je většina gangliových buněk napojena na jeden čípek, ale neexistuje důkaz, že by gangliové buňky byly napojeny na jednu tyčinku. Gangliové buňky napojené na tyčinky sčítají jejich signály, nastává tzv. prostorová sumace. Prostorová sumace excitací velkého množství tyčinek na poměrně velké ploše sítnice umožňuje detekci i slabého světla za skotopických podmínek. [6, 15, 30]

2.4.3 Receptivní pole za sníženého jasu

Byl prokázán vliv změny v uvolňování neurotransmiteru dopaminu na změnu v uspořádání receptivních polí některých skupin gangliových buněk. Jestliže je sítnice plně adaptovaná na tmu, centrum receptivního pole se může mírně zvětšit a antagonistická periferie mizí, viz obr. 15. Vliv periferie ale ustává až v blízkosti prahu fotoreceptorů, který je u čípků kolem 10^{-2} a u tyčinek (v periférii) kolem 10^{-6} . Jak bylo popsáno výše, velký světelný stimul dopadající i do periferie on-centre receptivního

pole snižuje jeho odpověď jako celku. Pokud ale periferie při adaptaci na tmou není aktivní, účinná velikost centra receptivního pole je větší a gangliové buňky jsou citlivější na světelný stimul jakékoli velikosti, což je výhodné za podmínek, kdy je potřebná detekce jakéhokoli světelného stimulu. Prostorová sumace se tedy zvýší, ovšem na úkor zrakové ostrosti a kontrastu. Barlow, Fitzhugh a Kuffler [31] na základě pokusů prováděných na sítnicových buňkách koček dále uvádí, že změna v uspořádání receptivních polí zřejmě nastává, až když je adaptační proces téměř ukončen a nemusí se tudíž odehrávat ve stejném čase jako adaptační přechod z čípků na tyčinky. Změna v uspořádání receptivních polí taktéž nesouvisí s rozdílným napojením tyčinek a čípků. [15, 21, 32, 33]



Obr. 15 - Změna v uspořádání on - centre receptivního pole adaptovaného na tmou a na světlo (upraveno dle [31])

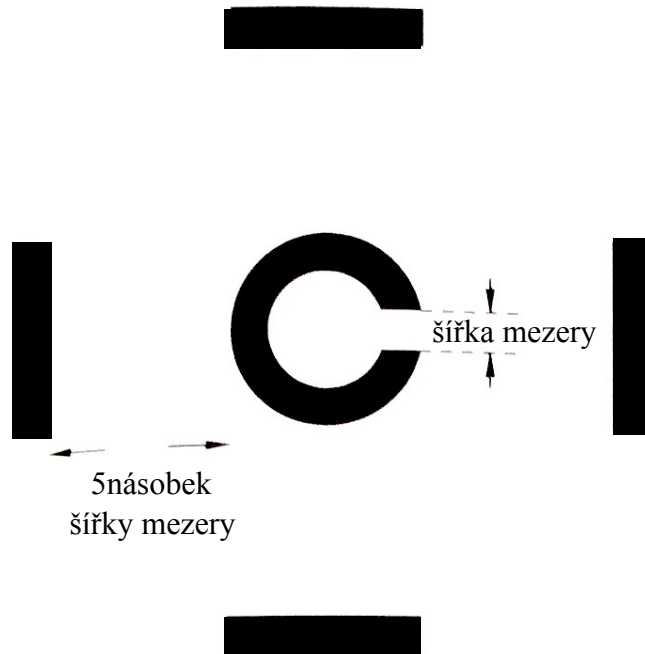
3 VLIV SEPARACE ZNAKŮ NA MĚŘENÍ ZRAKOVÉ OSTROSTI

Konstrukce optotypů jakožto prostředků k měření zrakové ostrosti byla popsána v kapitole 1.3, kde jako jeden z parametrů byla uvedena i separace znaků. Důraz na dostatečnou a konstantní vzdálenost mezi znaky i řádky na optotypech zdaleka není pouhou otázkou moderního designu podléhajícímu módním trendům. Vzdálenost mezi znaky a okolí znaku obecně mají zásadní vliv na jeho rozlišitelnost jako takovou, jeho správné přečtení a tím i na správné stanovení zrakové ostrosti. Problematiku separace mezi znaky popisuje konturová interakce a poněkud složitější crowding fenomén. Hned v úvodu je nutno podotknout, že někteří autoři tyto dva fenomény ve svých studiích nerozlišují a používají tyto pojmy jako synonyma, takže porovnání těchto jevů a vysvětlení mechanismů jejich vzniku je značně obtížné.

3.1 Konturová interakce

Konturová interakce je typ prostorového postranního maskování a nejjednodušeji může být demonstrována na jednom znaku obklopeném čtyřmi konturami, jako to ve svém dnes již klasickém výzkumu udělal Merton C. Flom [34], viz obr.16. Ten zjistil, že pokud byly kontury dostatečně separovány od pozorovaného znaku (v jeho pokusu Landoltova prstence), zraková ostrost se nesnížila. Ovšem zraková ostrost se začala snižovat, když se kontury přiblížily do vzdálenosti asi 2 - 4 úhlových minut, což odpovídá vzdálenosti o velikosti 5násobku šířky kontury (šířka kontury odpovídá velikosti mezery Landoltova prstence). V tomto případě byla orientace Landoltova prstence určena správně v 80 % případů. Když kontury přiblížil do vzdálenosti šířky kontury (asi 1 minuta), byla správná orientace prstence stanovena pouze v 25 % případů a bylo dosaženo maximálního efektu. Poněkud překvapivé je, že pokud byly kontury velmi blízko znaku nebo se ho dotýkaly, zraková ostrost

se zlepšila a v některých případech byla stejně dobrá, jako když žádné kontury nebyly přítomny. [6]



Obr. 16 - Konturová interakce (upraveno dle [6])

Rozsah konturové interakce je maximální vzdálenost od znaku, při které kontury snižují rozpoznání znaku. Tato kritická vzdálenost je přibližně 1 - 2x větší, než je minimální úhel rozlišení (MAR) znaku bez kontur, což odpovídá vzdálenosti pětinasobku MAR (velikosti znaku). Intenzita konturové interakce je míra poklesu zrakové ostrosti při maximální konturové interakci. Jak rozsah, tak intenzita konturové interakce v periferii sítnice (do asi 10°) dosahují vyšších hodnot než v centru.

Přesný mechanismus vzniku konturové interakce dosud není plně objasněn. Principy optického šíření sítnicového obrazu a nestálé fixační pohyby očí jsou jen jednou částí fenoménu a nutnost rozdělení pozornosti mezi oddělení kontur a rozpoznání znaku se zdá být spíše sekundárním efektem, který vykazuje jinou míru vlivu v centru a v periferii sítnice. Rozlišitelnost znaku fixovaného v centru sítnice je ovlivněna především konturovou interakcí danou konturami bezprostředně obklopujícími znak ve vzdálenosti přibližně o šířce fixovaného znaku. Vzdálenější

kontury a rozdělení pozornosti vliv nemají. Oproti tomu rozlišitelnost znaku fixovaného periferií sítnice je značně ovlivněna i vzdálenými konturami. Konturová interakce se projevuje i ve vzdálenostech pěti až desetinásobku šířky znaku a rozdělení pozornosti zde hraje důležitou roli. [34]

Hlavní příčina snížení zrakové ostrosti při konturové interakci se zdá být nervového původu. Jak ve svých výzkumech potvrdili Flom a kol. i Westheimer a Hauske [34], konturová interakce nastává i za dichoptických podmínek, tzn. nezáleží, zda jsou kontury a znak prezentovány stejnému oku nebo kontury jednomu a znak druhému oku. V obou případech interakce dosahuje stejné intenzity i rozsahu, z čehož lze vyvodit, že se celý fenomén musí odehrávat na takovém místě zrakové dráhy, kde již došlo ke spojení informací z obou očí. Takovým místem je pravděpodobně až týlní lalok mozku.

3.1.1 Konturová interakce při snížených jasových podmínkách

Drtivá většina výzkumů byla až do nedávna prováděna při fotopických podmínkách. Jelikož vidění je za mezopických a skotopických podmínek zprostředkováno funkčně i strukturně zcela jinak než za fotopických podmínek (i když vyšší nervové zpracování je stejné), dá se předpokládat, že konturová interakce, respektive i crowding, za těchto podmínek může být do jisté míry odlišná. Fotopické vidění na rozdíl od skotopického má relativně vysoké prostorové rozlišení, je barevné a citlivé na blikání a pohyb. Čípky také vykazují mnohem menší míru konvergence než tyčinky. Adaptace na tmu s sebou přináší také změny v uspořádání receptivních polí - centrum se lehce zvětší a periferie přestává reagovat. Změny nastávající za gangliemi ještě nejsou plně popsány.

Jedna z mála studií zabývajících se touto problematikou je od Simunovice a Calvera [35]. Ti zjistili, že konturová interakce za skotopických podmínek nastává také a to v rozsahu maximálně $0,6^\circ$ při excentricitě 10° . Simunovic a Calver ze srovnání svých výsledků s fotopickými výsledky studie [36], která prezentuje rozsah 3° při excentricitě $9,2^\circ$, došli k závěru, že skotopická konturová interakce má oproti fotopické výrazně menší rozsah. Dále zjistili, že rozsah lehce vzrostl, když se velikost

stimulu zmenšila. Z uvedeného vyvodili, že mechanismus vzniku konturové interakce je adaptací na tmu změněn. Tato změna může souviset s reorganizací laterálních nervových spojů zrakové kůry či se zmíněnou změnou vlastností receptivních polí. Skotopická konturová interakce se nemění s velikostí podnětů, takže místo vzniku může být stejné jako u fotopické konturové interakce. Jejich závěry však mohou být mylné, protože srovnávají skotopickou konturovou interakci s fotopickým crowding efektem. Navíc měřili separaci mezi hranami znaků, přičemž Tripathy s Cavanaghem [36] měřili separaci od středu znaků.

Další studií na konturovou interakci za nižších jasových podmínek je od Bedella a kol. [37]. Ti uvádí postupné snížení intenzity konturové interakce se snížením jasu pozadí (nejnižší hodnota jasu byla v pásmu mezopického vidění), ale rozsah se v jejich výzkumu neměnil a dosahoval maxima při separaci asi 0,8 úhlových minut. Ani v tomto výzkumu se rozsah konturové interakce s velikostí stimulu nemění, což značí, že tento rozsah konturové interakce je vlastností určitého testovaného místa na sítnici. Snížení intenzity konturové interakce při sníženém jasu nemůže být přičteno snížení zrakové ostrosti za těchto podmínek, jelikož Siderov, Waugh a Bedell [38] prokázali, že snížení zrakové ostrosti při sníženém kontrastu znaků nechává intenzitu konturové interakce nezměněnou.

3.2 Crowding fenomén

Schopnost rozlišit písmeno je podstatně lepší, pokud je toto prezentováno samostatně. Když je obklopeno jinými znaky či písmeny, rozlišitelnost písmene klesá, jelikož je nutné rozlišit jednoho písmene od druhého, než může dojít k rozlišení jeho detailů a správné identifikaci písmene. Tento fenomén je označován jako crowding (z angl. to crowd = stísnit se). Crowding nepředstavuje problém jen pro noniové rozlišení, identifikaci písmen a čtení, ale je zásadní překážkou zrakového vnímání jako takového, stanovuje limit i pro vnímání obličejů, celých předmětů, jejich rysů a kontur, stereopsi a dalších zrakových funkcí především periferního a amblyopického vidění. Omezení vidění vlivem crowdingu v běžném životě je vidět na obr. 17. Crowding

v sobě zahrnuje: (1) konturovou interakci - inhibici nervového původu, (2) rozdělení pozornosti mezi znaky na optotypu a (3) fixační pohyby očí - schopnost udržet fixaci na pozorovaném znaku a následně přesně přefixovat na další znak. [34]



Obr. 17 - Příklad efektu crowdingu v každodenním životě. Při fixaci terče uprostřed obrázku je dítě napravo zřetelně vidět, ovšem to vlevo je snadno přehlédnutelné. [1]

3.2.1 Charakteristické rysy crowdingu

Crowding zhoršuje identifikaci, ne detekci znaku. Nahuštěné znaky či předměty jednoduše nezmizí, jak by se mohlo očekávat, pokud by crowding byl způsoben rušivými procesy potlačujícími signály znaků či předmětů, jako je tomu například u obyčejného maskování („ordinary masking“). Nahuštěné objekty jsou vnímány s vysokým kontrastem, ale jsou nezřetelné a těžko rozlišitelné, jakoby na sebe braly rysy okolních znaků. Pokud je pozorovaný znak podobný okolním, testované subjekty často jako pozorovaný cílový znak označí jeden z okolních znaků. Naopak pokud se pozorovaný znak liší od okolních, např. v barvě, velikosti či orientaci, pozorovaný

znak z nich může „vykouknout“ a být naopak lépe rozpoznatelný. Herzog a Manassi [39] dokonce tvrdí, že přidání více okolních úseček při použití noniového stimulu (Vernier stimulus) vede k lepším výsledkům, než když jsou na každé straně od pozorovaných úseček jen dvě další úsečky. Zlepšení nastalo ovšem jen v případě, kdy okolní úsečky byly kratší nebo delší než centrální testové úsečky. Svůj výsledek vysvětlují tvrzením, že pokud se přidají další okolní značky, seskupí se tyto k sobě a ne k testové značce, která potom snáze vynikne. Silný crowding nastává právě v případě, kdy se testový znak a znaky okolní seskupí k sobě. Tento fenomén je nazýván jako „grouping“. [1, 40]

Rozsah crowdingu závisí na excentricitě podnětu a na jeho vzdálenosti od okolních znaků. Při dané excentricitě se identifikace znaku se zvětšující vzdáleností od okolních znaků zlepšuje. V dnes již klasické práci Bouma stanovil, že znak v periférii při excentricitě e je ještě ovlivněn okolními znaky ve vzdálenosti přibližně $0,5 \times e$, ačkoli existují i studie tvrdící, že za jistých okolností crowding může nastat i za touto vzdáleností. Kritický rozestup, tj. vzdálenost, ve které okolní znaky působí zhoršení vidění, je tedy úměrný excentricitě a nezávisí na velikosti pozorovaného znaku. Tato hodnota kritického rozestupu byla stanovena pro separaci znaků měřenou od středu centrálního znaku po střed okolních znaků, tzv. centre-to-centre. Pokud je separace stanovena jako vzdálenost mezi nejbližšími okraji znaků, tzv. edge-to-edge, je kritický rozestup $0,1 \times e$. Stejně jako u konturové interakce je rozsah i intenzita crowdingu v periférii větší. Při foveálním vidění je rozsah crowdingu malý, přibližně 4-6 úhlových minut, a je na rozdíl od periferie úměrný velikosti stimulu a to v poměrně širokém, až 50násobném, rozpětí velikostí stimulu. Zmíněné platí kromě případu v blízkosti rozlišovací meze. [1, 40, 41]

Crowding v periférii je asymetrický. Je silnější, pokud je jeden rušivý znak při stejné úhlové separaci od pozorovaného znaku prezentován s větší excentricitou, než když je takový znak blíže fovee. Může se zdát zvláštní, že vzdálenější znak je rušivější než ten centrálnější, avšak tento jev může být vysvětlen pomocí uspořádání zrakové kůry. Při zobrazení ve zrakové kůře je pozorovaný prostor postupně s větší excentricitou více nahuštěn a vzdálenější znak je tak ve výsledku zobrazen blíže tomu pozorovanému. Navíc je kritický rozestup úměrný excentricitě. Kritický rozestup

je tedy větší ve směru do periferie než směrem do centra. Je také větší při radiálním uspořádání znaků (do centra i do periferie) než při uspořádání po obvodu. Je větší v horním zorném poli než v tom dolním. [1, 40]

3.2.2 Možná vysvětlení crowdingu

Existuje hned několik teorií snažících se vysvětlit crowding, ale doposud žádná není s to jej vysvětlit beze zbytků za všech podmínek. V posledních letech se věnuje pozornost dvoustupňovému modelu rozpoznávání objektů. První stupeň je poměrně dobře pochopený proces nezávislé detekce jednoduchých rysů objektu (nejspíše v oblasti V1 zrakové kůry mozku). Rysem objektu se zde myslí jeho základní komponenta. Potom následuje dosud poněkud záhadný druhý stupeň integrace (neboli interpretace) rysů jako celku v dalších oblastech mozku. Při crowdingu pozorovaný znak (signál) i znaky okolní (masky) stimulují různé detektory rysů a jsou pomocí receptivních polí detekovány každý zvlášť. Pokud ale padnou do stejného „integračního pole“, tzn. stimulují stejný integrátor (místo, kde jsou jednotlivé rysy zkombinovány a kde dochází k rozpoznání předmětu), jsou sloučeny dohromady a výsledný obraz je nejasný. Integrační pole je oblast ohraničená velikostí kritického rozestupu okolo signálu, je určena excentricitou signálu, nezávislá na samotném signálu a velikosti masky. Zrakový systém má pravděpodobně mnoho překrývajících se integračních polí různých velikostí. Pokud je to možné, používá integrační pole stejné velikosti a polohy jako předmět, který má být identifikován. Tento způsob je běžný ve fovee, v periférii však nejspíše chybí malá integrační pole a zrakový systém tak používá nepřiměřeně velká integrační pole. Integrační pole jsou centrována na signál a nemusí být pevně daná a statická jako receptivní pole. [40, 41]

Všechny úkoly náchylné ke crowdingu jsou takové, které vyžadují více než pouhou detekci jednoduchého signálu, tj. signálu, pro který detekce jediného rysu stačí jako správná odpověď. Detekce jednoduchého signálu je na crowding (téměř) imunní. Naproti tomu identifikace (neboli detekce složitějšího signálu) vyžaduje kombinaci správných informací z několika detektorů. A jelikož pozorované předměty zatížené crowdingem jednoduše nezmizí, dá se s velkou pravděpodobností

předpokládat, že crowding nastává až po prvotní fázi detekce rysů a před nebo během druhé fáze integrace rysů. Jednoduchá detekce rysu nepotřebuje integraci, kdežto rozmanité informace z mnohonásobných detekcí již ano, a existují silné důkazy o tom, že je to právě integrace informací, která je citlivá na crowding. [40, 41]

Pro pochopení mechanismů v pozadí crowdingu je nutné objasnit samotný proces zpracování obrazu. Doposud se mělo za to, že zpracování vizuálního obrazu postupuje hierarchicky s dopřednou vazbou od zpracování jednoduchých znaků (jako linie a okraje) po komplexní znaky (předměty, obličeje), a že proces vidění lze rozepsat na sérii jednoduchých a na sobě nezávislých stádií. Například vertikální čára je potom zpracována úplně stejně, pokud je prezentována samostatně či v kontextu jiných znaků. Informace o kontextu se zpracují později. Pokud je vizuální informace ztracena hned v počátku procesu, je ztracena nadobro. Zpracování vjemu na každé z úrovní je ovlivněno výsledkem zpracování na předchozí úrovni. Proces zpracování je stereotypní v tom smyslu, že neurony pracují jako filtry, které analyzují pozorované prostředí pokaždé stejným způsobem, tj. nezávisle na vyšších a komplexnějších znacích. Zpracování na nižší úrovni ovlivňuje to na vyšší a ne opačně. Velikost receptivních polí se ve zrakové dráze postupně zvětšuje, protože pro rozpoznání předmětů je potřebné sjednocení rozsáhlejších částí pozorovaného prostředí. [1, 39]

Herzog a Manassi [39] ale nedávno přišli s tvrzením, že je to spíše celkové uspořádání obrazu a ne lokální interakce na nižší úrovni, které udává crowding, a přiklání se k vysvětlení crowdingu pomocí seskupování (grouping), viz výše. Podle nich crowding nastává až v pozdějších fázích zrakového zpracování a ne na jeho počátku. Jestliže je totiž noniový stimul jakožto dvě úsečky zpracován již v počátku při zpracování linií a okrajů a neexistuje žádná zpětná vazba, ale jen dopředná, potom přítomnost složitějších znaků nemůže ovlivnit zpracování jednoduchého znaku. Je tedy zjevné, že buď hierarchické zpracování, nebo dopředné vazby neplatí. Výzkumy posledních let ukazují, že crowding je složitější fenomén a zdá se, že seskupování (grouping) se nelze vyhnout. Je tedy nutné zjistit princip seskupování, abychom věděli, které znaky interferují se kterými. Seskupování znaků je flexibilní, i malé změny v uspořádání mohou vést k velkým změnám intenzity crowdingu, takže zpracování komplexnějších znaků ovlivňuje zpracování těch jednodušších stejně jako zpracování

jednodušších ovlivňuje komplexnější. Teorie seskupování ovšem nevysvětluje, proč by mělo seskupování za nižších jasových podmínek poklesnout a proč je intenzita konturové interakce či crowdingu za těchto podmínek menší. [1, 37, 39]

Místem vzniku crowdingu je pravděpodobně zraková kůra mozku, ale přesné místo zatím nelze určit. S narůstající excentricitou je každý čtvereční stupeň zorného pole tvořený menším počtem korových neuronů. Kritický rozstup crowdingu je úměrný poloviční excentricitě ($0,5 \times e$) a to odpovídá konstantnímu počtu milimetrů ve zrakové kůře, což zase zhruba odpovídá délce horizontálních propojení neuronů v oblasti V1 zrakové kůry. Tato inhibiční či excitační propojení mohou být 1 až 2 mm dlouhá a teoreticky jim tak lze přiřknout zhruba 0,1 až 0,2 ϕ rozsahu crowdingu. Jenže kritický rozstup $0,5 \times e$ stejně tak dobře odpovídá i poloměru receptivních polí neuronů oblasti V4. Lze tak předpokládat, že crowding se nejspíše odehrává na několika místech nezávisle na sobě během zrakového zpracování. K tomuto tvrzení přispívá i fakt, že v pozorovaném prostředí nastává crowding mezi rysy předmětů, jejich částmi i mezi celými objekty. Je tedy nepravděpodobné, že by za crowding bylo zodpovědné jen jediné místo někde na zrakové dráze, kam se všechny informace shlukují. [1, 40, 41]

Další možné teorie o příčinách vzniku crowdingu stejně jako doplňující informace o crowdingu u dětí, dyslektiků a amblyopiů jsou popsány v mé bakalářské práci na toto téma [42].

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části této práce bylo sledování vlivu crowdingu za různých jasů na vízus. Jak bylo popsáno v teoretické části, okolí pozorovaného znaku, tzn. i jeho separace od ostatních znaků v okolí, ovlivňuje čitelnost tohoto znaku a vízus tak může být snížen. Dále je prokázána změna v uspořádání receptivních polí, pokud jsou tato podrobena adaptaci na snížený jas. Jelikož jedna z teorií vysvětlujících mechanismus vzniku crowdingu pracuje právě s receptivními poli, je tato studie zaměřená na crowding za snížených jasových podmínek. Dá se totiž očekávat, že se změnou v uspořádání receptivních polí dojde i ke změně v chování samotného crowdingu.

Na základě již provedených studií, např. od Rabina [28] a Linové a kol. [29], se předpokládá pokles vízu při snížení jasů. Jelikož ale doposud nebyl foveální crowding za nízkého jasů studován, neexistuje žádná odpovídající studie pro porovnání výsledků. Byly ale provedeny studie zabývající se konturovou interakcí za nízkých jasů, a protože konturová interakce je považována za jednu ze součástí crowding fenoménu, je možné do jisté míry porovnat výsledky s takovými studiemi. Jednou z nich je studie od Bedella a kol. [37]. Podle této studie se dá předpokládat, že se efekt crowdingu bude s jasnem snižovat.

4.1 Subjekty a metodika

Studie se zúčastnilo celkem 20 probandů, z toho 18 žen a 2 muži. Věk probandů se pohyboval od 18 do 28 let. Všichni probandi byli bez očního onemocnění či abnormality ovlivňující zrakovou ostrost. Byla požadována normální zraková ostrost, probandi s refrakční vadou měli nasazenou svoji korekci, se kterou přišli, takže vízus účastníků byl nejméně 6/6. Účastníci byli před začátkem výzkumu seznámeni s průběhem měření a případnými riziky a podepsali informovaný souhlas.

Vizuální podnět se skládal ze 3 vodorovných řádků písmen dle Sloanové (C, D, H, K, N, O, R, S, V, Z) o rozložení 5x5 a detailu 1/5 výšky znaku. Na každém řádku bylo 5 písmen stejné velikosti, velikost řádků se zmenšovala odshora dolů dle logaritmické stupnice. Jednotlivé řádky se od sebe lišily o 0,05 logMAR. Vzdálenost mezi znaky měřená jako edge-to-edge a mezi řádky byla proměnlivá, viz níže. Vizuální podnět byl promítán ve středu LCD monitoru s úhlopříčkou 56 cm a rozlišením 1680 x 1050 pixelů. Jas pozadí byl 228 cd/m² a Weberův kontrast písmen byl 98 %. Řádky písmen byly generovány náhodně pomocí softwarového programu.

Výzkum byl realizován na katedře optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci. Měření probíhalo monokulárně s centrální fixací znaků za použití stenopické clony o průměru asi 2,5 mm před měřeným vedoucím okem usazené ve světlotěsných brýlích, aby bylo zajištěno stabilní osvětlení sítnice. Druhé oko bylo zakryto okluzorem a hlava probandů fixovaná na opěrce. Probandi měli za úkol nahlas přečíst písmena prostředního řádku zleva do prava. Měření začínalo na takové velikosti písmen, kterou proband bez problémů přečetl. Řádek byl považován za přečtený, pokud byla alespoň 3 písmena přečtena správně. V takovém případě byla potom výška každého řádku zmenšena o 0,05 logMAR a měření pokračovalo. Doba prezentace písmen byla neomezená. Pokud už byla písmena příliš malá, probandi měli hádat. Výsledná hodnota zrakové ostrosti byla stanovena na základě přiřazení vlastní hodnoty (0,01 logaritmických jednotek) každému písmenu.

První část experimentu byla prováděna za normálních fotopických (228 cd/m²) jasových podmínek. Probandi s nasazenými světlotěsnými brýlemi četli písmena na LCD monitoru vzdáleném 12 m. Pro zobrazení v dané vzdálenosti bylo použito zrcadlo. Úkolem probandů bylo přečíst co nejmenší řádek písmen. Separace písmen na řádcích se měnila od 100 %, 50 %, 20 % po 10 % šířky znaku. Různé separace byly prezentovány v náhodném pořadí.

Druhá část experimentu se odehrávala za snížených jasových podmínek. Před oko se stenopickou clonou byl předložen kalibrovaný filtr Thorlabs, který snížil jas o 3,14 logaritmických jednotek na mezopickou úroveň (0,164 cd/m²). Před začátkem měření zrakové ostrosti v druhé části experimentu probandi podstoupili adaptaci na tmu po dobu 30 minut. Následně byli opět vyzváni, aby přečetli co nejmenší prostřední

řádek prezentovaný na monitoru pro všechny čtyři náhodně určené separace. V tomto případě byl monitor posunut do vzdálenosti 6 m a byl opět zobrazen pomocí zrcadla. Při obou měřeních byla zatemněná okna a rozsvícena všechna světla ve vyšetřovně. Před začátkem měření byli probandi seznámeni s optotypovými znaky a průběhem měření a proběhlo zkušební měření za fotopických podmínek a separace 100 %.

Pro zpracování výsledků měření zrakové ostrosti za různých jasových podmínek a různých separací byla použita analýza rozptylu s opakováním měření ANOVA s hladinou významnosti 5 %. Kde bylo třeba, tam hladina významnosti zahrnovala Huynh-Feldt korekci sféricity.

4.2 Výsledky

Zraková ostrost za mezopických podmínek byla výrazně horší než za fotopických podmínek. V průměru dosahovala mezopická zraková ostrost nehladě na separace o 0,47 logMAR vyšších hodnot než fotopická zraková ostrost. Hodnoty dosažených zrakových ostrostí pro všechny 4 separace za obou jasových podmínek jsou uvedeny v tabulce č. 2.

Tab. 2 - Dosažené hodnoty zrakové ostrosti a jejich směrodatné odchylky pro všechny 4 separace a obě úrovně jasu.

Separace [%]	Fotopické podmínky				Mezopické podmínky			
	10	20	50	100	10	20	50	100
Dosažená zraková ostrost [logMAR]	-0,004	-0,069	-0,128	-0,203	0,421	0,39	0,324	0,33
Směrodatná odchylka	0,090	0,070	0,077	0,083	0,054	0,12	0,084	0,10

Tabulka č. 3 potom ukazuje rozdíl naměřených hodnot zrakových ostrostí za fotopických a mezopických podmínek pro jednotlivé separace. Největší rozdíl (0,533) je u separace 100 %, nejmenší (0,425) u separace 10 %.

Tab. 3 - Rozdíly v hodnotách dosažené zrakové ostrosti za fotopických a mezopických podmínek.

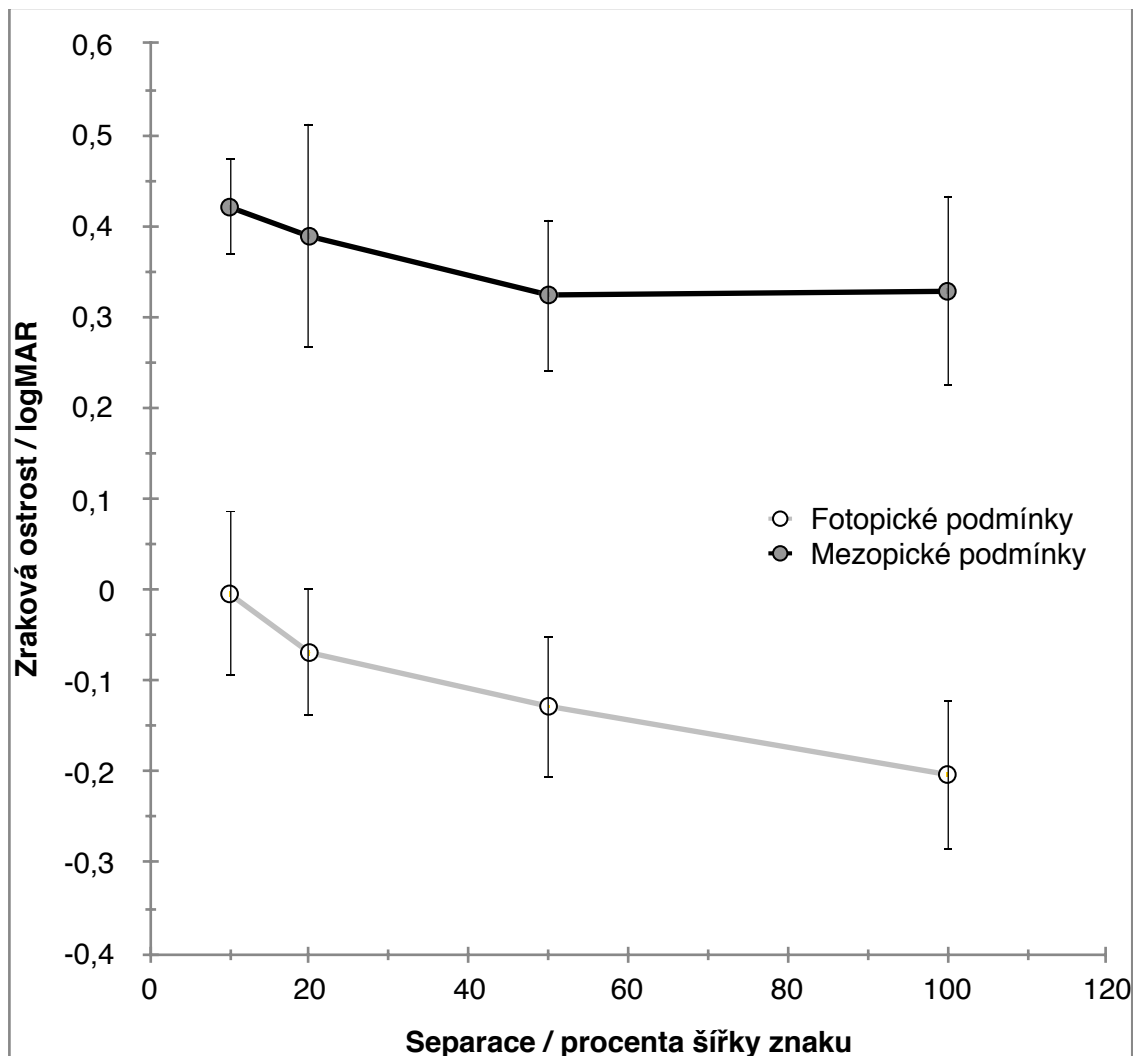
Separace [%]	10	20	50	100
Rozdíl dosažené zrakové ostrosti [logMAR] mezi jasy	0,425	0,459	0,452	0,533

Graf č. 1 znázorňuje průměrnou hodnotu zrakové ostrosti všech probandů jako funkci separace znaků v procentech šířky znaku. Z grafu je vidět, že hodnota zrakové ostrosti se zvětšuje, tzn. zraková ostrost je horší, se snižujícím se jasem a zmenšující se separací, tzn. narůstajícím crowdingem. Nejvyšší dosažený vízus (-0,203 logMAR) je za fotopických podmínek pro separaci 100 %, nejnižší vízus (-0,004 logMAR) pro separaci 10 %. Situace je podobná i pro mezopické podmínky. Při těch je hodnota vízu pro separace 100 % a 50 % téměř shodná (0,33 logMAR a 0,324 logMAR), nejnižší vízus (0,421 logMAR) je opět pro separaci 10 %. Zhoršování zrakové ostrosti za většího crowdingu je více patrné pro fotopické podmínky, tzn. crowding má za vysokého jasu větší vliv. Při nejmenší separaci znaků, tj. 10 % šířky znaků, narostla hodnota fotopické zrakové ostrosti téměř 2krát tolik jako mezopická zraková ostrost při stejné separaci.

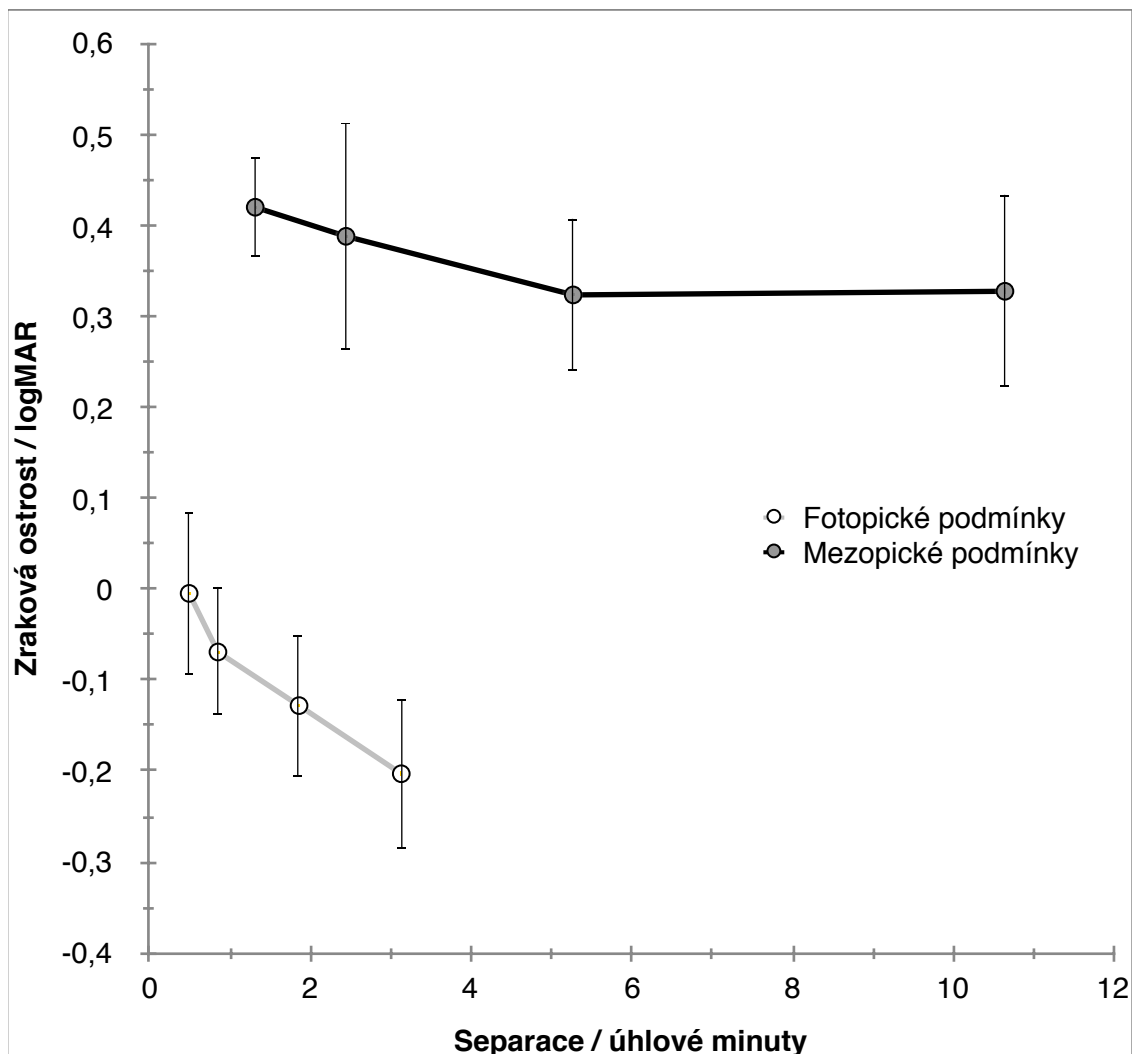
Graf č. 2 taktéž znázorňuje průměrnou hodnotu zrakové ostrosti všech probandů jako funkci separace znaků, avšak tentokrát je separace znaků vyjádřena v úhlových minutách. Z grafu je vidět, že se v tomto případě rozsah crowdingu s klesajícím jasem nemění. Úhlová vzdálenost, při které se crowding začíná výrazně projevovat, je tedy při všech jasech přibližně stejná, a to asi 3 - 4 úhlové minuty. Navíc je průběh závislosti zrakové ostrosti na separaci (udané v úhlových minutách) pro všechny jasy přibližně

stejný, pouze vertikálně posunutý. Crowding tedy, je-li jako míra separace použito úhlových minut, není závislý na jasu.

Graf č. 1 - Závislost zrakové ostrosti [logMAR] na separaci znaků [procenta šířky znaku] pro fotopické a mezopické podmínky. Bílá kolečka reprezentují měření za fotopických podmínek, šedá kolečka za mezopických podmínek. Velikost úseček v grafech odpovídá dvojnásobku směrodatné odchylky měřených dat.



Graf č. 2 - Závislost zrakové ostrosti [logMAR] na separaci znaků [úhlové minuty] pro fotopické a mezopické podmínky. Bílá kolečka reprezentují měření za fotopických podmínek, šedá kolečka za mezopických podmínek. Velikost úseček v grafech odpovídá dvojnásobku směrodatné odchylky měřených dat.



Výsledky z grafu 1 podporuje statistická analýza. Pro zpracování výsledků byla použita metoda ANOVA pro opakovaná měření. Měření probíhala opakovaně pro různé hodnoty separace (uvažované v procentech šířky znaku) a různé hodnoty jasu ve vzájemné kombinaci. Byl zjištěn statisticky významný vliv jasu na hodnoty vízu ($p < 10^{-6}$). Dále byl zjištěn významný vliv separace znaků na vízus ($p < 10^{-6}$). Statisticky významná byla též interakce jasu a separace ($p = 6,3 \times 10^{-5}$), která se projevila snížením vlivu separace znaků při nižším jasu.

4.3 Diskuze

Výsledky této studie potvrzují, že centrální zraková ostrost se snižujícím se jasem klesá. Za fotopických podmínek je vidění zprostředkováno pomocí čípků, které disponují citlivostí na modré, zelené a červené části spektra a umožňují barevné vidění. Ve fovee, místě nejostřejšího vidění, jsou přítomny pouze čípkové. Za snížených jasových podmínek se zapojuje druhý typ fotoreceptorů, tyčinky. Ty vynikají v sumaci slabých světelných signálů, takže i velmi slabý světelný stimul může být detekován, ovšem tyčinky nejsou vůbec zastoupeny ve fovee. Postupné snižování citlivosti čípků až jejich následné vypínání, přičemž nejsou nahrazeny funkcí tyčinek, tedy vede ke snížení zrakové ostrosti. Obdobné snížené zrakové ostrosti potvrdily též další studie [29,43]. Linová a kol. ve své studii [29] měřili zrakovou ostrost za fotopického jasu (94 cd/m^2) a 3 úrovně mezopického jasu (3, $0,75$ a $0,38 \text{ cd/m}^2$). Jejich pokles zrakové ostrosti s jasem však nebyl tak výrazný (pokles zrakové ostrosti za nejvyššího jasu oproti nejnižšímu činil $0,35 \text{ logMAR}$, pokles v této diplomové práci byl $0,533 \text{ logMAR}$), protože jejich nejnižší mezopický jas ($0,38 \text{ cd/m}^2$) byl vyšší než jas v této diplomové práci ($0,164 \text{ cd/m}^2$). Ke srovnatelné hodnotě dosažené zrakové ostrosti za stejného jasu ($0,75 \text{ cd/m}^2$) jako Linová dospěla i Barriová a kol. ve studii [43].

Na zrakovou ostrost má také vliv hodnota separace znaků. Čím menší separace je, tzn. čím větší je crowding, tím nižší hodnoty zraková ostrost dosahuje. Výsledky studie tak jasně ukazují, že okolí pozorovaných znaků má zásadní vliv na jejich čitelnost. Na intenzitu crowdingu má zase vliv hodnota jasu. Crowding dosahuje za mezopického jasu menší intenzity, ovšem zřetelně patrný menší účinek byl jen pro malé separace. Menší vliv crowdingu za mezopických podmínek je patrně způsoben jiným zpracováním obrazu. Jak bylo uvedeno v kapitole 2.4, snížená hodnota jasu má vliv na uspořádání receptivních polí. Vymizení inhibiční oblasti receptivních polí nastává až v blízkosti prahu fotoreceptorů (u čípků kolem 10^{-2} , u tyčinek kolem 10^{-6}). V tomto okamžiku by tedy mělo dojít k vymizení či alespoň snížení vlivu konturové interakce a crowdingu. Experimenty konturové interakce prováděné v oblasti fovey, viz [37] níže, vykazují snížení konturové interakce, jelikož bylo dosaženo prahové hodnoty čípků.

Experimenty pro periferní vidění tento pokles nepotvrdily, jelikož byly prováděny v oblasti maximálně 10^{-5} a prahové hodnoty tyčinek (10^{-6}) nebyly dosaženy.

Tato studie zabývající se vlivem jasu na foveální crowding je první svého druhu, takže porovnání výsledků s jinými studii je nemožné. Existují ovšem studie zabývající se vlivem jasu na konturovou interakci. První z nich je studie Bedella a kol. [37]. Ti měřili procentuální správnost identifikace znaků obklopených čtyřmi konturami v pěti různých edge-to-edge separacích za různých jasových podmínek. Tato studie byla prováděna na dvou různých měřicích stanovištích, hodnoty fotopického jasu byly 108 a 195 cd/m^2 a nejnižší hodnoty mezopického jasu $0,09$ a $0,21$ cd/m^2 . Vzdálenost kontur byla absolutní, tzn. stejná pro všechny jasové podmínky, nehledě na případnou změnu velikostí pozorovaného znaku při nižších jasových podmínkách. Z jejich výsledků vyplývá, že úhlový rozsah konturové interakce, který činí asi 4 úhlové minuty, zůstává za všech jasů nezměněný a nemění se s velikostí stimulu. Naproti tomu velikost neboli intenzita konturové interakce klesá s klesajícím jasnem pozadí. Výsledky této studie se shodují s výsledky studie v rámci této diplomové práce, tj. rozsah konturové interakce ani crowdingu vyjádřený v úhlových minutách se s jasnem nemění. Intenzita konturové interakce i crowdingu je za mezopických podmínek menší.

Druhá studie na téma vlivu jasu na konturovou interakci je od Simunovic a Calvera [35]. Jasové podmínky v tomto experimentu byly skotopické, nikoli mezopické. Jejich probandi měli za úkol určit orientaci Landoltova prstence obklopeného čtyřmi konturami. Fixace stimulů nebyla foveální, nýbrž excentrická, asi 10° temporálně. Kontury byly prezentovány v šesti různých vzdálenostech, měřených jako šířka mezery Landoltova prstence, tzn. $1/5$ velikosti prstence. Z jejich výsledků vyplývá, že konturová interakce za skotopických podmínek také nastává a statistické významnosti efekt dosahuje, když se kontury přímo dotýkají prstence a když jsou od něj vzdáleny o šířku mezery prstence. Při srovnání s výsledky publikace [36] došli k závěru, že rozsah konturové interakce je menší za skotopických podmínek než za fotopických při stejné excentricitě. Simunovic a Calver argumentují, že nižší rozsah konturové interakce za skotopických podmínek může být způsoben poklesem prostorového rozsahu antagonistické periferie receptivních polí adaptovaných

na tmu. Výsledky této studie se neshodují s výsledky v této práci, kde se rozsah crowdingu s jasnem neměnil. Závěr Simunovice a Calvera může být přisuzovaný nepatřičnému srovnání skotopické konturové interakce a fotopického crowdingu, jelikož tyto dva pojmy se často zaměňují.

Z výsledků studie v rámci této diplomové práce je patrné, že vliv crowdingu při měření zrakové ostrosti za mezopických podmínek je menší. Jelikož ale toto snížení vlivu bylo patrné pouze pro malé separace mezi znaky, dá se předpokládat, že vliv crowdingu na měření zrakové ostrosti za sníženého jasu pomocí ETDRS optotypů či jiných standardizovaných optotypů, kde je separace mezi znaky 100 % neboli stejná jako šířka znaků, bude malý nebo dokonce žádný. Jiná situace ovšem nastává pro rozpoznávání nestandardizovaných objektů, které jsou na crowding náchylné (např. obličeje), nebo v patologických případech. Tam je vliv sníženého jasu už patrný.

ZÁVĚR

Cílem teoretické části diplomové práce bylo shrnout dosavadní poznatky týkající se crowding fenoménu. Úvod práce se zabýval kvantitativním hodnocením zrakového vjemu, byla definována zraková ostrost a stanovena optická a fyziologická rozlišovací mez oka. Jelikož vysoká hodnota vízu ještě sama o sobě nezaručuje dobré vidění za běžných každodenních podmínek, bylo třeba věnovat pozornost i kontrastní citlivosti, která poskytuje důležité informace o zrakovém aparátu, zvláště pokud je tento zatížen patologickým stavem. Nejdůležitější část úvodní kapitoly se zabírala designem standardizovaných optotypů, protože správná separace mezi znaky na optotypových tabulích je klíčová pro zamezení vlivu crowdingu při měření zrakové ostrosti.

Druhá kapitola se věnovala zrakovému vnímání za různých jasových podmínek. Byla podrobně popsána role fotoreceptorů jako detektorů světelných stimulů, dále byly definovány rozličné typy vidění zprostředkované různými typy fotoreceptorů a objasněny mechanismy procesu adaptace na světlo a na tmu. Jedna část kapitoly pojednávala o vlivu jasu a kontrastu na měření zrakové ostrosti, což bylo důležité pro měření v praktické části této práce. V neposlední řadě se objasnila změna v uspořádání receptivních polí při sníženém jasu, protože jedna z teorií, které vysvětlují crowding, využívá právě receptivních polí.

Poslední kapitola teoretické části pojednávala již o samotném crowdingu a konturové interakci, dvou podobných jevech majících vliv na rozlišitelnost pozorovaných znaků a jejich čitelnost. Oba fenomény byly popsány a byly jasně stanoveny jejich společné rysy i rozdílnosti. Značná část kapitoly se zaměřovala na možná vysvětlení crowdingu, příčiny a místa jeho vzniku. Ve snaze poskytnout co nejkomplexnější pohled na danou problematiku zde byly zahrnuty klasické studie i některé poněkud překvapivé závěry studií novějších.

Stěžejní část textu představoval experiment zaměřený na sledování vlivu crowdingu na vízus za různých jasů. Při experimentu byly použity optotypy s konstrukcí obvyklou v klinické praxi. Výzkum byl realizován pro fotopické a mezopické

podmínky, vždy pro čtyři různé separace prezentovaných znaků. Z výsledků provedeného výzkumu vyplynula závislost vízu na jasů a separaci. Výsledky demonstrují, že se crowding vyskytuje jen v malé oblasti v okolí pozorovaného znaku, jejíž velikost se nemění s velikostí znaku ani s jasem. Intenzita crowdingu s jasem ale mírně klesá. Uvedená data podporují teorii vysvětlení tohoto jevu na základě receptivních polí.

I když jsou dopady konturové interakce a crowdingu na vidění dobře zdokumentované, mechanismy ležící v pozadí crowdingu zůstávají nadále nejasné. Studie crowdingu nejsou jednotné, výsledky studií jednotlivých autorů se liší a často se dokonce i vzájemně popírají. Další problém v analýze výsledků studií představuje fakt, že autoři často crowding a konturovou interakci vzájemně zaměňují. Crowding je složitý fenomén a je na místě ještě dalších výzkumů pro jeho úplné vysvětlení. Principy vzniku crowdingu stejně jako princip zpracování obrazu jsou klinicky významné pro pacienty se ztrátou centrálního vidění, kteří jsou odkázáni na čtení pomocí zbytků periferního vidění. Pokud by byly odhaleny mechanismy ležící v pozadí crowdingu, bylo by možné vyvinout i metody na minimalizaci vlivu crowdingu v textu a tím zlepšit nebo dokonce umožnit čtení lidem, kteří ztratili centrální vidění.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] WHITNEY D., LEVI D.M. *Visual crowding: a fundamental limit on conscious perception and object recognition*. Trends in Cognitive Sciences. Elsevier, 2011, vol. 15, no. 4, pp. 160 - 168. DOI: 10.1016/j.tics.2011.02.005. ISSN 13646613.

[2] LEVIN, L. A., KAUFMAN, P. L. *Adler's physiology of the eye*. 11th ed. New York: Saunders/Elsevier, 2011. ISBN 978-0-323-05714-1.

[3] SYNEK, S., SKORKOVSKÁ, Š. *Fyziologie oka a vidění. 2.*, dopl. a přeprac. vyd. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3992-2.

[4] ELLIOTT, D. B. *Clinical Procedures in Primary Eye Care*. 3rd ed. Butterworth Heinemann/Elsevier, 2007. ISBN 13: 9780750688963.

[5] 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.

[6] TUNNACLIFFE, A. H. *Introduction to visual optics*. 4th ed. Godmersham Park: Association of British Dispensing Opticians, 1993. ISBN 0-9009-928-3.

[7] PLUHÁČEK, F. *Vliv zornice na optické zobrazení v oku - výukové materiály k předmětu Fyziologická optika*, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc, 2011.

[8] KUCHYNKA, P. a kol. *Oční lékařství*. Praha: Grada Publishing, 2007. ISBN 978-80-247-1163-8.

[9] PLUHÁČEK, F. *Zraková ostrost a její měření - výukové materiály k předmětu Fyziologická optika*, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc, 2011.

- [10] PELLI, D., ROBSON, J. Pelli-Robson Contrast Sensitivity Chart. *Department of Psychology, New York University* [online]. 2014 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: <http://www.psych.nyu.edu/pelli/pellirobson/>
- [11] PLUHÁČEK, F. *Zraková ostrost a refrakce - výukové materiály k předmětu Oftalmologické a optometrické přístroje II*, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc, 2013.
- [12] SEGRE, L. What's An Eye Test? Eye Charts And Visual Acuity Explained. *All about vision* [online]. 2018 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: <http://www.allaboutvision.com/eye-test/>
- [13] REID, L. Functional Assessment of Vision. *Scottish Sensory Centre, Moray House School of Education, University of Edinburgh* [online]. 2006 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <http://www.ssc.education.ed.ac.uk/courses/vi&multi/vmay06a.html>
- [14] ANTON, M. Nové poznatky o zrakové ostrosti. *Česká oční optika* [online]. Brno: EXPO DATA spol. s r.o., 2006, roč. 47, č. 4, str. 16 - 17 [cit. 2017-11-29]. ISSN 1211-233X. Dostupné z: http://www.4oci.cz/dokumenty/pdf/4oci_2006_04.pdf
- [15] NORTON, T. T., CORLISS, D. A., BAILEY, J. E. *The psychophysical measurement of visual function*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 0-7506-9935-3.
- [16] Weberův-Fechnerův zákon. *Velký lékařský slovník* [online]. Maxdorf, 1998 - 2018 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: <http://lekarske.slovniky.cz/pojem/weberuv-fechneruv-zakon>
- [17] KOLÁŘ, P. *Věkem podmíněná makulární degenerace*. Vyd. 1. Praha: Grada Publishing, 2008, 160 s. ISBN 978-80-247-2605-2.

- [18] BAILEY, I. L., LOVIE, J. E. *New Design Principles for Visual Acuity Letter Charts*. American Journal of Optometry and Physiological Optics. American Academy of Optometry, 1976, vol. 53, no. 11, pp. 740 - 745. DOI 10.1097/00006324-197611000-00006.
- [19] FALKENSTEIN, I. A., COCHRAN, D. E., AZEN, S. P., DUSTIN, L., TAMMEWAR, A. M., KOZAK, I., FREEMAN, W. R. *Comparison of Visual Acuity in Macular Degeneration Patients Measured with Snellen and Early Treatment Diabetic Retinopathy Study Charts*. Ophthalmology: American Academy of Ophthalmology. Elsevier, 2008, vol. 115, issue 2, pp. 319 - 323. DOI: 10.1016/j.ophtha.2007.05.028.
- [20] LogMar Charts. *Sussex Vision International* [online]. 2018 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: <http://www.sussex-vision.co.uk/distance-tests/logmar-charts/4-metre/logmar-4m-etdrs-chart-r-original>
- [21] SILBERNAGL, S., DESPOPOULOS, A. *Atlas fyziologie člověka*. Vyd. 6., zcela přepracované a rozšířené. Praha: Grada, 2003, 448 s. ISBN 80-247-0630-X.
- [22] HRAZDIRA, I., MORNSTEIN, V. *Lékařská biofyzika a přístrojová technika*. Brno: Neptun, 2001. ISBN 80-902896-1-4.
- [23] AUTRATA, R., ČERNÁ, J. *Nauka o zraku*. Brno: Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2006. ISBN 80-7013-362-7.
- [24] ROZSÍVAL, P. et al. *Oční lékařství*. 1. vyd. Praha: Galén Karolinum, 2006. ISBN 80-246-1213-5.
- [25] FEE, R. Dark Adaptation. *University of Calgary* [online]. 2018 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://www.ucalgary.ca/pip369/mod3/brightness/darkadaptation>
- [26] DAVSON, H. Human eye. *Encyclopædia Britannica* [online]. 2017 [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/human-eye>

- [27] ROGERS, K. Rhodopsin. *Encyclopædia Britannica* [online]. 2015 [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/rhodopsin>
- [28] RABIN, J. *Luminance Effects on Visual Acuity and Small Letter Contrast Sensitivity*. Optometry and Vision Science. American Academy of Optometry, 1994, vol. 71, no. 11, pp. 685 - 688.
- [29] LINN, R. J., NG, J. S., NGUYEN, A. L. *Determinants and Standardization of Mesopic Visual Acuity*. Optometry and Vision Science. American Academy of Optometry, 2015, vol. 92, no. 5, pp. 559 - 565. DOI: 1040-5488/15/9205-0559/0.
- [30] HUBEL, D. H. *Eye, Brain, and Vision*. Scientific American Library, 1995, 240 pp. ISBN 978- 0-7167-6009-2
- [31] BARLOW, H. B., FITZHUGH, R., KUFFLER, S. W. *Change of organization in the receptive fields of the cat's retina during dark adaptation*. Journal of Physiology. 1957, vol. 137, no. 3, pp. 338 - 354. DOI: 10.1113/jphysiol.1957.sp005817.
- [32] DERRINGTON, A. M., LENNIE, P. *The influence of temporal frequency and adaptation level on receptive field organization of retinal ganglion cells in cat*. Journal of Physiology. 1982, vol. 333, pp. 343 - 366.
- [33] DUFFY, K. R., HUBEL, D. H. *Receptive field properties of neurons in the primary visual cortex under photopic and scotopic lighting conditions*. Vision Research. Elsevier, 2007, vol. 47, pp. 2569 - 2574. DOI: 10.1016/j.visres.2007.06.009.
- [34] FLOM, M. C. *Contour Interaction and the Crowding Effect*. Problems in Optometry. J. B. Lippincott Co., 1991, vol. 3, no. 2, pp. 237 - 257.
- [35] SIMUNOVIC, M. P., CALVER, R. *Crowding under scotopic conditions*. Vision Research. Elsevier, 2004, vol. 44, pp. 963 - 969. DOI:10.1016/j.visres.2003.11.019

- [36] TRIPATHY, S. P., CAVANAGH, P. *The extent of crowding in peripheral vision does not scale with target size*. Vision Research. Elsevier, 2002, vol. 42, pp. 2357 - 2369.
- [37] BEDELL, H. E., SIDEROV, J., WAUGH, S. J., ZEMANOVÁ, R., PLUHÁČEK, F., MUSILOVÁ, L. *Contour interaction for foveal acuity targets at different luminances*. Vision Research. Elsevier, 2013, vol. 89, pp. 90 - 95. DOI: 10.1016/j.visres.2013.07.009.
- [38] SIDEROV, J., WAUGH, S. J., BEDELL, H. E. *Foveal contour interaction for low contrast acuity targets*. Vision Research. Elsevier, 2013, vol. 77, pp. 10 - 13. DOI: 10.1016/j.visres.2012.11.008.
- [39] HERZOG, M. H., MANASSI, M. *Uncorking the bottleneck of crowding: a fresh look at object recognition*. Current Opinion in Behavioral Sciences. Elsevier, 2015, vol. 1, pp. 86 - 93. DOI: 10.1016/j.cobeha.2014.10.006.
- [40] PELLI, D. G., PALOMARES, M., MAJAJ, N. J. *Crowding is unlike ordinary masking: Distinguishing feature integration from detection*. Journal of Vision. 2004, vol. 4, pp. 1136 - 1169. DOI: 10.1167/4.12.12. ISSN 1534-7362.
- [41] LEVI, D. M. *Crowding—An essential bottleneck for object recognition: A mini-review*. Vision Research. Elsevier, 2008, vol. 48, pp. 635 - 654. DOI: 10.1016/j.visres.2007.12.009.
- [42] OŠŤÁDALOVÁ, J. *Crowding fenomén: bakalářská práce*. Olomouc: Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, 2014
- [43] BARRIO, A., ANTONA, B., PUELL, M. C. *Repeatability of mesopic visual acuity measurements using high- and low-contrast ETDRS letter charts*. Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015, vol. 253, pp. 791 - 795. DOI: 10.1007/s00417-014-2876-z.