

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra optiky



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Praktické dopady mezopického vidění  
pro přístroje nočního vidění  
při přechodových jevech**

Autor:	<b>Kateřina Lišková</b>
Vedoucí práce:	<b>Mgr. Filip Chlup</b>
Studijní obor:	<b>Digitální a přístrojová optika</b>
Forma studia:	<b>Prezenční</b>
Rok:	<b>2017</b>

# Bibliografická identifikace

<b>Jméno a příjmení autora</b>	Kateřina Lišková
<b>Název práce</b>	Praktické dopady mezopického vidění pro přístroje nočního vidění při přechodových jevech
<b>Typ práce</b>	Bakalářská
<b>Pracoviště</b>	Katedra optiky
<b>Vedoucí práce</b>	Mgr. Filip Chlup
<b>Rok obhajoby práce</b>	2017
<b>Počet stran</b>	46
<b>Počet příloh</b>	0
<b>Jazyk</b>	Český
<b>Abstrakt</b>	Tato práce se zabývá určením vlivu mezopického vidění, které značně ovlivňuje pozorování za šera. A konkrétně jak se mezopické vidění projevuje v souvislosti s přístroji nočního vidění v praxi. V rámci měření bylo tedy využito několika typů přístrojů nočního vidění a také měřící sestavy umožňující nastavení nízkých úrovní osvětlení k simulaci nočního pozorování, která byla doplněna o čárový test USAF – 1951. V experimentech byla posuzována rozlišovací schopnost lidského oka při oslnění přístroji nočního vidění a také adaptace a oční dominance. V měřeních byl určován rozdíl mezi binokulárním a monokulárním noktovizorem a také mezi monokulárními noktovizory, kde jeden byl s bílým a druhý se zeleným typem fosforového stínítka. Měření probíhala za účasti čtyř pozorovatelů. Z výsledných dat je patrné, že použití různých typů přístrojů nočního vidění ovlivní mezopické vidění pozorovatele a tudíž jeho rozlišovací schopnost, která byla mimo jiné vyhodnocována i pro různé kontrasty testu.
<b>Klíčová slova</b>	Mezopické vidění, technologie nočního vidění, adaptace lidského oka, rozlišovací schopnost, jas, osvětlení, USAF – 1951.

# Bibliographical identification

<b>Author's first name and surname</b>	Kateřina Liřková
<b>Title</b>	Practical effects for mesopic vision in cooperation with Night Vision Systems under transitional conditions
<b>Type of thesis</b>	Bachelor
<b>Department</b>	Department of Optics
<b>Supervisor</b>	Mgr. Filip Chlup
<b>Year of presentation</b>	2017
<b>Number of pages</b>	46
<b>Number of appendices</b>	0
<b>Language</b>	Czech
<b>Abstract</b>	<p>This thesis is focused on the mesopic vision and its influence on the observation at semidarkness. Specifically, the mesopic vision practical impact in cooperation with night vision systems. The experiments were conducted with different types of night vision devices and measuring systems that enabled the use low levels of illumination to simulate the night-sight. It contained USAF – 1951 resolution test target. The resolution of the human eye glared by night vision systems and the eye adaptation and dominance were investigated. The difference between binocular and monocular night vision devices and the monocular night vision devices with white or green phosphorus screen were identified. The experiments were conducted under four observers. The results show that the usage of different types of night vision devices influences negatively the mesopic vision of the observer and therefore his resolution abilities. This resolution ability was evaluated for different test contrasts.</p>
<b>Keywords</b>	Mesopic vision, night vision systems, human eye adaptation, the resolution, luminance and illuminance, USAF – 1951.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou bakalářskou práci napsala samostatně pod vedením Mgr. Filipa Chlupa a výhradně s použitím citovaných pramenů a uvedených zdrojů.

V Olomouci dne 16. května 2017

.....  
Podpis

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu práce panu Mgr. Filipu Chlupovi a firmě Pramacom-HT, spol. s.r.o., kde mi bylo umožněno všechna měření realizovat. Dále Bc. Nikol Coufalové za věcné připomínky a pomoc při realizaci práce a v neposlední řadě Bc. Martinu Ochmannovi, za pomoc a pevné nervy, bez kterých by tato práce nikdy nebyla dokončena.

# Obsah

Úvod	8
<b>1 Teoretická část</b>	<b>9</b>
1.1 Fyziologie lidského oka . . . . .	9
1.2 Popis druhů vidění s ohledem na fotometrii . . . . .	11
1.2.1 Fotopické vidění . . . . .	11
1.2.2 Skotopické vidění . . . . .	11
1.2.3 Mezopické vidění . . . . .	11
1.3 Adaptace a oční dominance . . . . .	13
1.4 Úvod do technologií nočního vidění . . . . .	14
1.4.1 Typy fosforového stínítka v přístrojích nočního vidění . . . . .	15
1.4.2 Typy noktovizorů . . . . .	16
1.5 Definování parametrů pro určení kvality přístrojů nočního vidění . . . . .	17
1.5.1 Rozlišovací schopnost . . . . .	17
1.5.2 Kontrast . . . . .	18
1.5.3 Definování fotometrických veličin – jas, osvětlení . . . . .	19
<b>2 Experimentální část</b>	<b>21</b>
2.1 Měření 1 – Určení rozlišovací schopnosti oka v závislosti na osvětlení . . . . .	21
2.2 Měření 2 – Reakční doba lidského oka na silný zdroj záření při simulaci nočního pozorování . . . . .	23
2.3 Měření 3 – Určení vlivu mezopického vidění při pozorování monokulárním a binokulárním noktovizorem . . . . .	24
2.4 Měření 4 – Určení vlivu mezopického vidění při pozorování monokulárním noktovizorem s různými typy fosforového stínítka . . . . .	25
2.5 Měření 5 – Porovnání rozlišovací schopnosti monokulárního noktovizoru s různými typy fosforového stínítka a lidského oka při mezopickém vidění . . . . .	26
<b>3 Výsledky a diskuze</b>	<b>28</b>
3.1 Měření 1 – Určení rozlišovací schopnosti oka v závislosti na osvětlení . . . . .	28
3.2 Měření 2 – Reakční doba lidského oka na silný zdroj záření při simulaci nočního pozorování . . . . .	29
3.3 Měření 3 – Určení vlivu mezopického vidění při pozorování monokulárním a binokulárním noktovizorem . . . . .	30

3.4	Měření 4 – Určení vlivu mezopického vidění při pozorování monokulárním noktovizorem s různými typy fosforového stínítka . . . . .	33
3.5	Měření 5 – Porovnání rozlišovací schopnosti monokulárního noktovizoru s různými typy fosforového stínítka a lidského oka při mezopickém vidění	37
	<b>Závěr</b>	<b>41</b>
	<b>Seznam použitých zdrojů</b>	<b>41</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>42</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>44</b>
	<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b>	<b>46</b>

# Úvod

Mezopické vidění patří dnes ještě stále k nepříliš probádaným oblastem, které popisují funkci lidského zraku. V obecném případě bývají všechny měřicí přístroje kalibrované pro oblast fotopického vidění, které prezentuje vidění za dne. O skotopickém neboli nočním vidění také vzniklo již mnoho prací, např. články [1, 2, 3]. V souvislosti s viděním za šera a tudíž s mezopickým viděním je dostupných méně zdrojů, než v předchozích dvou případech. Základním rysem mezopického vidění je, že oko pracuje v oblasti mezi viděním fotopickým a skotopickým a účelem této práce je určit jeho vliv na pozorovatele.

Tato práce však nemá určit vliv mezopického vidění při každodenním pozorování, ale při pozorování přístroji nočního vidění. V praxi dochází při pozorování scény pomocí přístrojů nočního vidění k oslnění zraku těmito přístroji a také k občasnému odložení přístroje. Lidské oko je nuceno se v krátkém čase adaptovat na rozdílné podmínky osvětlení. Dochází tak k časovým prodlevám, kdy pozorovatel není schopen rozlišit předměty okolní scény a to nehledě na vzdálenost objektů.

V rámci experimentální části se práce zabývá simulacemi nočního pozorování a za účasti dobrovolných pozorovatelů je snaha určit, který typ přístrojů nočního vidění je pro pozorovatele výhodnější. Porovnávají se monokulární a binokulární typy nočního vidění, dále monokulární typ noktovizoru se zeleným a bílým typem fosforového stínítka a také rozdíl mezi pozorováním dokonale zadaptovaného oka na tmou a pozorováním noktovizorem. Nezanedbává se ani vliv oční dominance pozorovatele při pozorování okolní scény pomocí monokulárního noktovizoru. To vše za nízkých úrovní osvětlení, které odpovídají mezopické oblasti. Samotná měření probíhala v laboratoři firmy Pramacom-HT, spol. s.r.o. a s pomocí měřících zařízení zapůjčených tamtéž.



# 1 Teoretická část

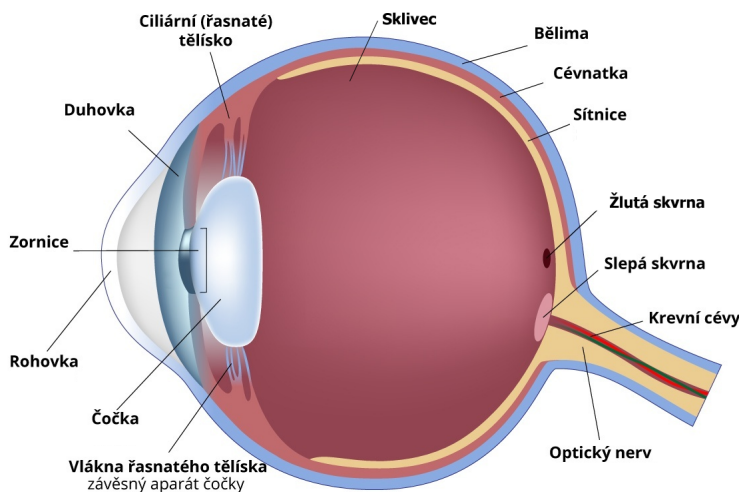
## 1.1 Fyziologie lidského oka

Lidské oko můžeme chápat jako optickou soustavu, která pracuje na stejném principu jako fotoaparát. Na sítnici se vytváří skutečný, převrácený a zmenšený obraz, který je potom pomocí nervových vláken přenášen do mozku.

Oko si můžeme představit jako kouli o průměru přibližně 24 mm, která je tvořena několika částmi:

- bělma – bílá vazivová blána, na kterou se upínají okoohybné svaly
- rohovka – první člen jímž vstupuje do oka světlo
- cévnatka – obsahuje velké množství cév a pigmentových buněk
- řasnaté tělísko – svalovina, na které je zavěšena čočka zajišťující akomodaci oka
- duhovka – hladká svalovina způsobující rozšiřování/zužování zornice
- zornice – kruhový otvor uprostřed duhovky
- čočka – bikonvexní spojka
- sklivec – rosolovitá hmota vyplňující oko
- sítnice – obsahuje světlocitlivé buňky, žlutou a slepou skvrnu.

Řez pravým okem a umístění jednotlivých částí oka je vidět na obrázku 1. Každý optický člen oka je charakterizován svým indexem lomu, poloměrem a tloušťkou. Tyto parametry nalezneme v tabulce 1.



Obrázek 1: Řez lidským okem. Převzato z [4].

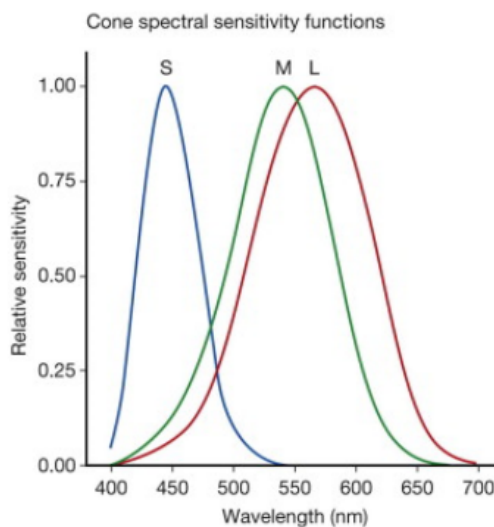
**Tabulka 1:** Parametry optických členů. Převzato a upraveno z [5].

	Index lomu	Poloměr [mm]	Tloušťka [mm]
Rohovka	1,3760	7,7	0,5
Oční mok	1,3360	6,8	3,1
Čočka	1,4085	10,0	3,6
Sklivec	1,3360	– 6,0	17,2

## Světlocitlivé buňky

### Čípky

Jedná se o světlocitlivé receptory, které umožňují barevné vidění. Na sítnici jich nalezneme přibližně 7 miliónů a jejich největší zastoupení na sítnici je v oblasti žluté skvrny. S rostoucí vzdáleností od této skvrny čípků ubývá. Rozlišujeme tři základní druhy čípků. Tak zvaný „typ m“, jehož zastoupení na sítnici je cca 32 %, jedná se o čípky, které jsou nejcitlivější na záření o vlnové délce 535 nm. Nazývávat je můžeme též „green“ nebo „zelené“ čípky. Dále „typ s“, jehož zastoupení na sítnici jsou cca 2 %, je nejcitlivější na záření o vlnové délce 440 nm. Jiný název může být i „blue“ či „modré“ čípky. A poslední „typ l“, jehož zastoupení na sítnici je 64 %, je nejcitlivější na záření o vlnové délce 565 nm. Tyto čípky se označují jako „red“ nebo „červené“. Citlivost jednotlivých typů čípků je znázorněna na následujícím obrázku 2.



**Obrázek 2:** Relativní citlivost čípků v závislosti na vlnové délce. Převzato z [6].

### Tyčinky

Zde se jedná o světlocitlivé receptory, které na rozdíl od čípků, umožňují vidění černobílé. Na sítnici jich nalezneme přibližně 130 miliónů a vyskytují se ve větší vzdálenosti od žluté skvrny, tj. směrem k okrajům sítnice. O tyčinkách můžeme říct, že slouží především k vidění za šera. Obecně potom platí, že se snižujícím se osvětlením, přechází spektrální citlivost oka ke kratším vlnovým délkám. Na sítnici jsou aktivované především tyčinky, které jsou mnohem citlivější na světlo než čípky a jelikož tyčinky nerozeznávají barvy, dokáží vnímat jen rozdílné úrovně jasu.

## 1.2 Popis druhů vidění s ohledem na fotometrii

### 1.2.1 Fotopické vidění

Fotopické vidění neboli denní vidění je spojené především s činností čípků. Čípky jsou světlocitlivé buňky, které umožňují barevné vidění. Nejvyšší citlivosti dosahují čípky při záření o vlnové délce 555 nm. O fotopickém vidění můžeme uvažovat při jasech nad  $10 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Ovšem jako minimální adaptační jas, kdy je aktivovaný určitý počet čípků, se udává hodnota  $3 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ .

### 1.2.2 Skotopické vidění

Skotopické vidění neboli noční vidění je spojené s činností tyčinek. Tyčinky jsou světlocitlivé buňky umožňující černobílé vidění, respektive neumožňují vidění barevné. Tyčinky tedy pracují pouze s intenzitami světelného záření. Nejvyšší citlivosti dosahují tyčinky při záření o vlnové délce 507 nm. Adaptační jas je u skotopického vidění velmi nízký – setiny až tisíce  $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ .

### 1.2.3 Mezopické vidění

Mezopické vidění je oblast mezi viděním fotopickým a skotopickým. Vyznačuje se současnou funkcí tyčinek a čípků a jedná se o přechod mezi šerem a tmou. Maximální spektrální citlivost oka v závislosti na vlnové délce se mění s hodnotou adaptačního jasu. Příkladem využití mezopického vidění v každodenní praxi může být umělé osvětlení venkovních prostor či nouzové osvětlení.

Pro pochopení problematiky nejen mezopického vidění je třeba znát definici jedné kandely, což je základní jednotka popisující svítivost zdroje světla. Jedna kandela je tedy rovna svítivosti zdroje, který vyzařuje v určitém směru monochromatické záření o frekvenci 540 THz, přičemž zářivost zdroje v tomto směru je  $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ . Víme – li, že při základní vlnové délce  $\lambda_m = 555 \text{ nm}$  je spektrální citlivost lidského zraku pro fotopické i skotopické vidění shodná, můžeme zavést následující rovnici 1

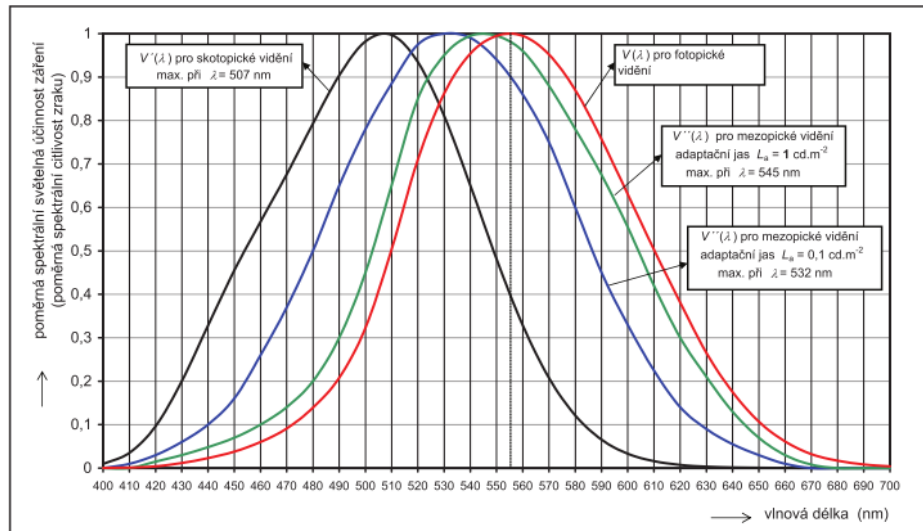
$$K(555) = K'(555) = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}, \quad (1)$$

kde  $K$  je světelná účinnost fotopického vidění a  $K'$  je světelná účinnost skotopického vidění. Jelikož mezopické vidění, jak už bylo řečeno dříve, je kombinací vidění fotopického a skotopického, lze říci, že průběhy spektrální citlivosti (světelná účinnost) zraku pro různé adaptační jasy v rámci všech druhů vidění vykazují při záření základní vlnové délky stejné hodnoty citlivosti, viz následující rovnice 2.

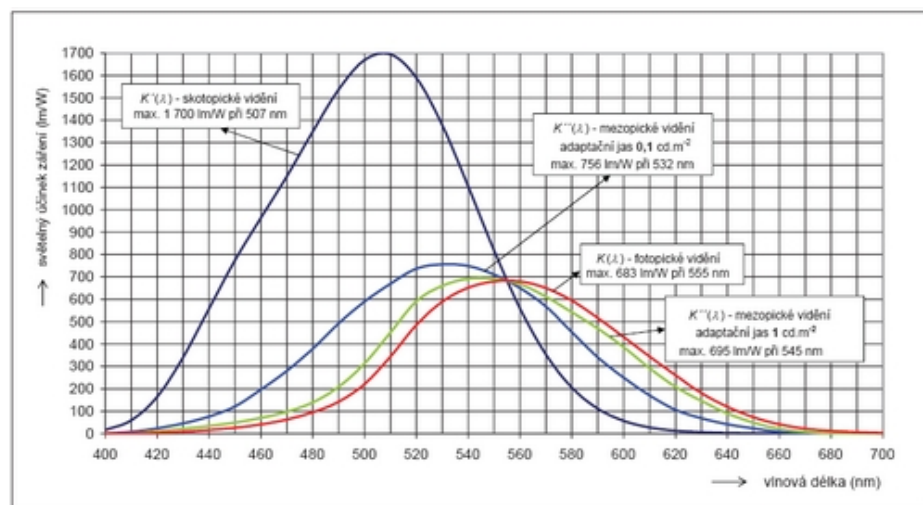
$$K(555) = K'(555) = K''(555) = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}, \quad (2)$$

kde  $K''$  je světelná účinnost mezopického vidění [7].

Na následujícím obrázku 3 je znázorněna poměrná spektrální citlivost oka na vlnové délce pro jednotlivé druhy vidění. Fotopické vidění popisuje křivka  $V(\lambda)$  a křivka  $V'(\lambda)$  vidění skotopické. Křivky  $V''(\lambda)$  popisují mezopické vidění pro dvě různé hodnoty adaptačního jasu, tj.  $0,1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  a  $1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Pro obě tyto hodnoty adaptačního jasu jsou patrná různá maxima poměrné spektrální citlivosti při různých vlnových délkách.



**Obrázek 3:** Závislost poměrné spektrální citlivosti oka na vlnové délce. Převzato z [7].



**Obrázek 4:** Průběhy absolutních hodnot světelných účinností záření. Převzato z [7].

Obrázek 4 popisuje průběh absolutních hodnot světelných účinností záření. Skotopické vidění zde popisuje křivka  $K'(\lambda)$  a fotopické  $K(\lambda)$ . Mezopické vidění popisují křivky  $K''(\lambda)$  pro hodnoty adaptačního jasu  $0,1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  a  $1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Na výsledných křivkách lze vidět, že maxima světelné účinnosti mezopického vidění se skutečně nachází mezi maximy skotopického a fotopického vidění. Dalším důležitým faktem je i posouvání maxim ke kratším vlnovým délkám, při zvyšování světelné účinnosti záření.

## 1.3 Adaptace a oční dominance

### Adaptace

Adaptací oka se rozumí přizpůsobení se jasů pozorované scény. Lidské oko je schopné se adaptovat v rozmezí jasů  $10^{-7} \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  až  $10^5 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Existují dvě základní situace, při kterých je oko nucené se adaptovat na změnu jasů v prostředí. Jedná se o tzv. světlou a temnou adaptaci. Kde světlá adaptace je přechod (adaptace) ze tmy na světlo a temná adaptace je přechod ze světla do tmy. Obecně platí, že k temné adaptaci je potřeba více času, než si oko dokonale navykne. Pohybujeme se v rádech až desítek minut. Oproti tomu světlá adaptace je pro lidské oko rychlejší a během několika desítek sekund je oko dokonale navyklé. Době, za kterou si oko navykne na jas pozorované scény (zadaptuje se), říkáme adaptační čas. A jak již bylo zmíněno, rozsah je mezi několika desítkami sekund až minut, s ohledem na typ adaptace.

### Oční dominance

Oční dominance může být chápána jako upřednostnění levého či pravého oka, které se při běžném binokulárním vidění projevuje jako vedoucí. Z dosavadních výzkumů lze podtrhnout především skutečnost, že každý člověk, nezávisle na tom zda je pravoruký či levoruký, má vždy jedno oko dominantní [8]. V praxi existuje dominance sensorická, okulomotorická a směrová. Ovšem není pravidlem, že oko, které je například směrově dominantní má i dominanci okulomotorickou či sensorickou.

### Senzorická dominance

Zde se jedná o dominanci, kde oční systém dává přednost jednomu oku před druhým, případně jej snáze utlumí. Jedním z možných příkladů sensorické oční dominance může být pozorování monokulárním přístrojem. Pomocí sensoricky dominantního oka se díváme a druhé (nedominantní) zůstává často zavřené [8].

### Okulomotorická dominance

V případě okulomotorické dominance se při binokulárním vidění projevuje u jednoho oka lepší fixace. Například v případě fixační disparity<sup>1</sup>, okulomotoricky dominantní oko fixuje centrálně [8].

### Směrová dominance

U směrové dominance se určuje směrovost při binokulárním vidění. Určuje se oko, které se zaměřuje na pozorovaný předmět a je následně chápáno jako vedoucí [8].

---

<sup>1</sup>Jedná se o odchylky pohledových os očí, které pozorují nějaký bod v předmětovém prostoru. Tyto osy se v bodě neprotínají.

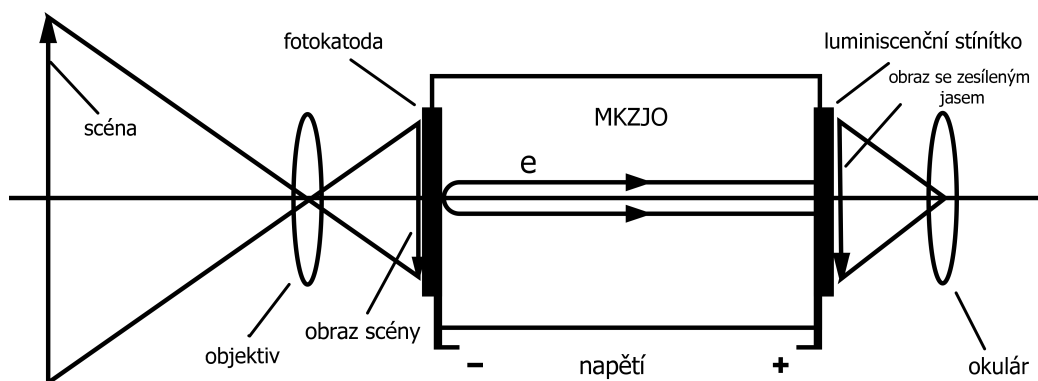
## 1.4 Úvod do technologií nočního vidění

Noktovizor, chceme-li přístroj nočního vidění, je zařízení, které pracuje na principu zesílení zbytkového elektromagnetického záření. Noktovizory mají v dnešní době již pět generací, z nichž čtyři jsou plně využívány. Odlišují se od sebe především dosahem, zesílením obrazu a také kvalitou obrazu a platí, že čím vyšší generace, tím lepší přístroj. Generace 0 a 1 pracovaly na principu elektrooptických převaděčů obrazu. Naopak generace 2, 3 a 4 pracují již s mikrokanálovými zesilovači jasu obrazu, které zajišťují několikanásobně větší zesílení zbytkového záření. V principu je tedy základní částí přístroje zesilovač jasu obrazu (ZJO). Funkční schéma zesilovače jasu obrazu je vyobrazeno na obrázku 5. Celý přístroj se potom skládá z fotokatody, která pracuje na principu vnějšího fotoelektrického jevu a převádí fotony na elektrony. Fotoelektrický jev je proces, kdy dopadající elektromagnetické záření předává svoji energii atomu v pevné látce. Vnější fotoelektrický jev je potom proces, kdy elektron má dostatek energie na uvolnění se z pevné látky. Přijatá energie elektronu je využita k uvolnění samotného elektronu a zbytek je využit jako kinetická energie vzniklého fotoelektronu. Toto popisuje Einsteinova rovnice zákona zachování energie 3.

$$hf = W_v + E_k, \quad (3)$$

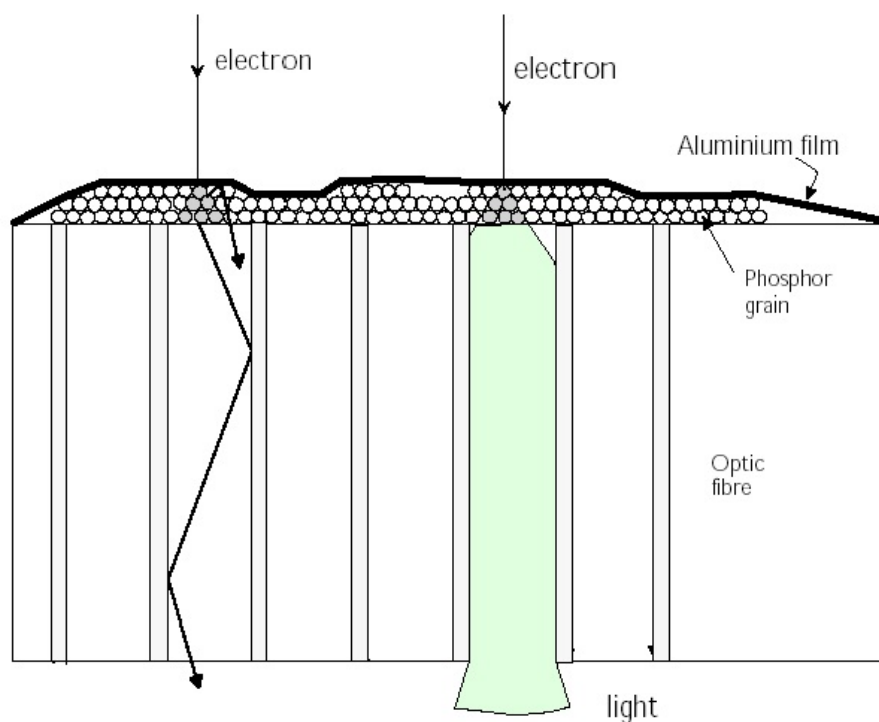
kde  $h$  je Planckova konstanta,  $f$  frekvence dopadajícího fotonu,  $W_v$  je výstupní práce a  $E_k$  je kinetická energie fotoelektronu.

Další součástí je zesilovač, který zesiluje proud elektronů (zvyšuje jejich počet) pomocí urychlení elektronu napětím, případně pomocí sekundární elektronové emise. Sekundární elektronová emise se v obecném případě používá častěji, zvláště u zařízení druhé a vyšší generace. Elektrony jsou násobeny v mikrokanálové destičce. Tuto destičku tvoří sada kanálků, otvorů, o průměru cca 6  $\mu\text{m}$  až 10  $\mu\text{m}$  a délce okolo 0,5 mm. Vnitřní stěny kanálků jsou pokryty materiálem s vysokým koeficientem sekundární emise. Zesilovač je nazýván jako mikrokanálový zesilovač jasu obrazu (MKZJO).



**Obrázek 5:** Funkční schéma zesilovače jasu obrazu. Převzato a překresleno z [9].

Na konec se ZJO skládá i z fosforového stínítka, kde dochází k opětovnému převodu elektronů na fotony. Jedná se o jev zvaný elektroluminiscence, kde dopadající elektrony s vysokou energií způsobí excitaci elektronů v luminoforu neboli fosforu, který následnou rekombinací elektronů a děr uvolňuje energii ve formě světelných fotonů, viz obr. 6. V rámci této práce je nejpodstatnější částí přístroje právě fosforové stínítko, jehož základní typy budou zmíněny v dalším textu.



**Obrázek 6:** Stínítko – princip. Převzato z [10].

### 1.4.1 Typy fosforového stínítka v přístrojích nočního vidění

Existuje mnoho typů fosforu pro různá využití. Pro použití v noktovizorech se nejčastěji uvádějí dva typy – P43 a P45.

1. P43 – jedná se o žlutozelený fosfor s maximální emisivitou pro vlnovou délku 545 nm. Používá se především proto, že lidské oko je díky čípkům „typu m“ na sítnici pro tuto oblast nejcitlivější.
2. P45 – v tomto případě se jedná o širokospektrální bílý fosfor, který má maximální emisivitu pro vlnovou délku stejnou, jako P43, tudíž 545 nm.

I přes stejnou maximální emisivitu pro vlnovou délku 545 nm, jsou mezi těmito typy fosforu značné rozdíly. P43 se používá, jak už bylo zmíněno dříve, protože fotopické vidění je pro tuto oblast nejcitlivější. A využívá se pouze jednoho typu čípků. Oproti tomu P45 je výhodný pro své široké spektrum, které aktivuje všechny tři typy čípků na sítnici a tudíž je pozorování pro lidské oko přirozenější. A to i v případě odložení přístroje, kdy se jeví okolí jako šedé. U zeleného fosforu může docházet k pocitu, že po odložení přístroje vidíme červené kruhy (jedná se o doplňkovou barvu k zelené), což není přirozené a může to narušovat komfort pozorování. K samotnému mezopickému vidění dochází právě v momentu odložení přístroje, kdy oslněné oko přechází do tmy a je nucené se adaptovat. Nežádoucí vlivy, které nastávají bezprostředně po odložení přístroje, kdy se zrak nachází v mezopické oblasti, se tak dají ovlivnit právě správným výběrem použitého fosforu. V rámci praktického využití se u obou typů fosforu, musí samozřejmě brát zřetel i na ostatní vlastnosti přístroje, tj. rozlišovací schopnost, kontrast, halo efekt nebo komfort pozorování. Pohled přes přístroj nočního vidění s oběma typy fosforu je na obrázku 7.



(a) Zelené fosforové stínítko



(b) Bílé fosforové stínítko

**Obrázek 7:** Pohled přes přístroje nočního vidění za použití zeleného a bílého fosforového stínítka. Převzato z [11].

### 1.4.2 Typy noktovizorů

V praxi nalezneme tři základní typy přístrojů nočního vidění. Tyto přístroje se liší funkčností, vzhledem, komfortem pozorování, ale i praktičností. V případě přístrojů nočního vidění se využití v praxi dělí právě dle následujících typů: monokulární, binokulární a bi-okulární noktovizor. Příklady všech typů noktovizorů jsou na obrázku 8.

#### Monokulární noktovizor

Monokulární přístroj, jak už název napovídá, je využíván pouze pro pozorování jedním okem. Skládá se tedy pouze z jednoho okuláru a jednoho objektivu. Mezi výhody použití tohoto typu přístroje můžeme zařadit například vyšší situační vědomí, nižší hmotnost a jednodušší manipulaci. Mezi nevýhody potom rozdílnoú adaptaci očí a oční dominanci každého uživatele.

#### Binokulární noktovizor

Binokulární přístroj je oproti monokulárnímu jednoznačně výhodnější z hlediska komfortního pozorování – využití obou očí. Jelikož má dva okuláry a dva objektivy, připadá v úvahu stereoskopické neboli prostorové vidění. Nevýhodou může být hmotnost a velikost přístroje.

#### Bi-okulární noktovizor

Bi-okulární přístroj je zařízení, které našlo využití především pro přístroje nočního vidění. Jedná se o přístroj, který má dva okuláry, ale pouze jeden objektiv. Z toho plynou pro uživatele dva základní aspekty: komfort zapojení obou očí a absence stereoskopického vidění, v důsledku použití jednoho objektivu.





(a) Monokulární noktovizor (b) Binokulární noktovizor (c) Bi-okulární noktovizor

Obrázek 8: Přehled základního rozdělení noktovizorů. Převzato z [12] [13].

## Dioptrická korekce

V rámci používání přístrojů nočního vidění je důležité zmínit i tzv. dioptrickou korekci. Jedná se o korekce, které v závislosti na typu přístroje mají různý rozsah udávaný v dioptriích. K zajištění správnosti měření (dokonalého pozorování) je nutné nejprve zaostřit okulárem přístroje, aby došlo ke korekci vad vlastního zraku a následně doostřit objektivem. V případě špatného zaostření na pozorovaný objekt, může docházet k nepřesnostem a chybám měření.

## Aplikace

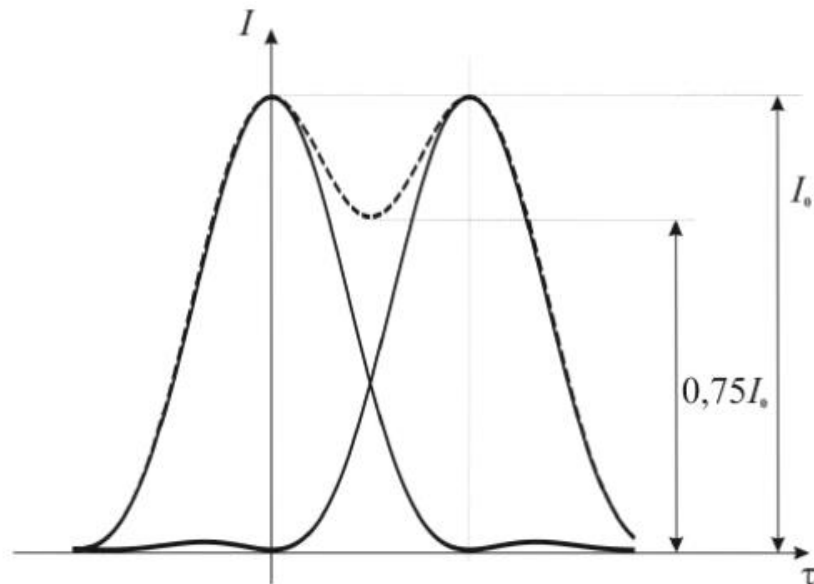
Přístroje nočního vidění našly dnes již mnoho aplikací a využití v praxi. Příkladem mohou být armádní aplikace, kde v závislosti na úrovni vojenských jednotek jsou využívány různé typy přístrojů. Například na úrovni vojáka se nejčastěji využívá menších a lehčích přístrojů, jako jsou již zmíněné monokuláry. Další využití, tentokrát mimo armádu, je například v myslivosti či ochraně prostor.

## 1.5 Definování parametrů pro určení kvality přístrojů nočního vidění

V závislosti na různých parametrech přístroje, lze určit jeho kvalitu a funkčnost. Základními parametry, které jsou v rámci této práce podstatné jsou rozlišení (rozlišovací schopnost) a kontrast. V obecném případě patří mezi tyto parametry například světelnost přístroje, dosah, dioptrická korekce nebo komfort pozorování.

### 1.5.1 Rozlišovací schopnost

Rozlišovací schopnost je dána minimální vzdáleností dvou ještě rozlišitelných bodů. V důsledku difrakce se bod zobrazuje jako ploška, která je lemovaná vedlejšími ohybovými maximy. K tomu, aby byly dva body od sebe bezpečně rozlišeny, je definováno Rayleighovo kritérium. Toto kritérium říká, že dva body jsou rozlišeny pokud maximum rozdělení intenzity v obraze prvního bodu bude ležet v prvním minimu druhého, což je možné vidět na obr. 9. Následující rovnice 4 potom definuje úhlové rozlišení přístrojů.



Obrázek 9: Rayleighovo kritérium. Převzato z [14].

$$\psi = 1,22 \frac{\lambda}{D}, \quad (4)$$

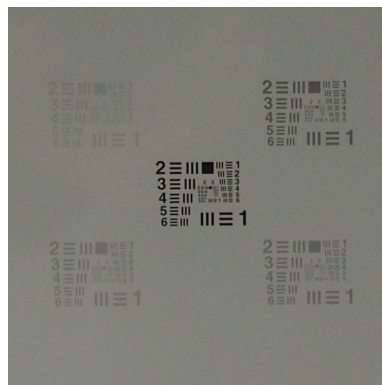
kde  $\lambda$  je vlnová délka a  $D$  průměr aperturní clony.

### 1.5.2 Kontrast

Kontrast  $M$  je definovaný jako poměr rozdílu maximální a minimální intenzity k součtu maximální a minimální intenzity, viz následující vztah 5.

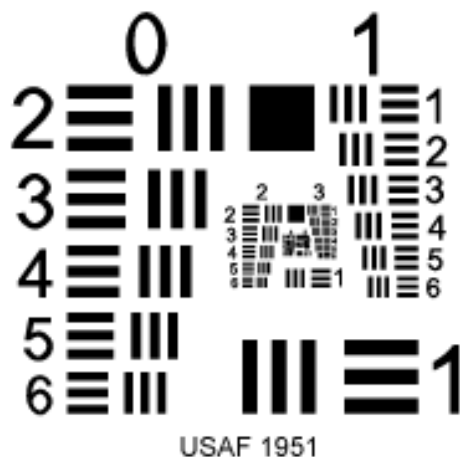
$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (5)$$

kde  $I_{\max}$  je maximální intenzita a  $I_{\min}$  minimální intenzita. Různých kontrastů je využíváno například při měření s klasickými čárovými testy. Příklad čárového testu o různých kontrastech je na obr. 10. U čárových testů je rozlišení měřené v čarách na milimetr (č/mm) případně v čarách na miliradián (č/mrad). Jako jedna čára je potom definovaná dvojice tmavé a světlé čáry.



Obrázek 10: Test USAF – 1951 o kontrastu 100 %, 50 %, 30 %, 20 %, 10 %.

Jedním z příkladů čárového testu je USAF – 1951. Jedná se o čárový test, původně definovaný americkou vojenskou normou MIL-STD-150A v roce 1951. Odtud zkratka názvu – US Air Force. Test je využíván především k určení rozlišovací schopnosti optických soustav. Celý test je tvořen několika skupinami každá o šesti elementech. Jako element je chápána vždy o 90° vzájemně pootočená dvojice. Tyto dvojice/elementy se periodicky zmenšují, tedy zvyšuje se počet čar na milimetr. Jako jedna čára je definovaná dvojice černé (tmavé) a bílé (světlé) čáry. Dále zde platí, že největší elementy se nacházejí na vnější straně spirály a nejmenší uprostřed. Velikost elementů a umístění skupin v rámci testu je přesně definované. Test USAF – 1951 je vyobrazen na obrázku 11 a v další části práce bude důležitou součástí měření.



Obrázek 11: Test USAF – 1951. Převzato z [15].

### 1.5.3 Definování fotometrických veličin – jas, osvětlení

#### Jas

Jas  $L$  je fotometrická veličina definovaná jako měrná veličina svítivosti, udávaná v jednotkách  $[\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}]$ . Zahrnuje vliv plošnosti zdroje a směr vyzařování  $\alpha$  vzhledem k normále na vyzařovací plochu [5]. Jas elementu zdroje je tedy definován následujícím vztahem

$$L_\alpha = \frac{d I_\alpha}{d S \cos(\alpha)}, \quad (6)$$

kde  $I_\alpha$  je svítivost,  $S$  velikost plochy zdroje a odpovídá míře osvětlení obrazu zdroje na sítnici oka. Příklady různých zdrojů záření a jejich jasů jsou v tabulce 2.

Tabulka 2: Zdroje záření – jas. Převzato a upraveno z [5][16].

Zdroj záření	Jas $[\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}]$
Noční obloha	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Měsíc	$2,5 \cdot 10^3$
Slunce	$2,0 \cdot 10^9$
Plamen svíčky	$5,0 \cdot 10^3$
Žárovka	$2,0 \cdot 10^6 - 15 \cdot 10^6$
Zářivka	$2,0 \cdot 10^3 - 4,0 \cdot 10^3$

## Osvětlení

Osvětlení  $E$  je možné definovat jako poměr světelného toku  $d\Phi$  a velikosti plochy  $dS$ . Jedná se o veličinu, která je udávána v luxech [lx]. Dle vztahu 7 pro osvětlení je patrné, že osvětlení klesá se zvětšující se vzdáleností od zdroje a s náklonem osvětlované plochy. Tudíž je možné říci, že největšího osvětlení je možné dosáhnout při kolmém dopadu paprsků.

$$E = \frac{I_\alpha \cos(\theta)}{r^2}, \quad (7)$$

kde  $I_\alpha$  je svítivost zdroje,  $\theta$  je úhel normály plochy vůči dopadajícím paprskům a  $r$  je vzdálenost osvětlené plochy od zdroje záření [16]. Příklady různých zdrojů záření a jejich osvětlení jsou v tabulce 3.

**Tabulka 3:** Zdroje záření – osvětlení. Převzato a upraveno z [5][16].

Zdroj záření	Osvětlení [lx]
Bezměsíčná noc	$3,0 \cdot 10^{-4}$
Noc za úplňku	$3,0 \cdot 10^{-1}$
Slunce	$1,0 \cdot 10^5$

## 2 Experimentální část

Společným parametrem pro všechna následující měření, byla zatemněná laboratoř a měřící sestava NVS test station<sup>2</sup> od firmy Inframet. Tato sestava byla složena z kolimátoru CNV1260 a LAN light source – zdroje záření, který pracuje s nízkými úrovněmi osvětlení. Dále bylo využito čárového testu USAF – 1951 s různými úrovněmi kontrastu a to konkrétně se 100 %, 50 %, 30 %, 20 %, 10 %. Jako zdroj byla použita LED dioda o vlnové délce 590 nm.

### 2.1 Měření 1 – Určení rozlišovací schopnosti oka v závislosti na osvětlení

Měření probíhalo s částí testu o 100 % kontrastu. Prostorová frekvence byla měřena v čarách na miliradián (č/mrad), dle tabulek udávaných výrobcem.

Průběh měření:

1. Na zdroji – LAN light source, bylo nastaveno 15 lx, což byla pro toto měření maximální hodnota osvětlení.
2. Proběhla přibližně 30 minutová adaptace na tmou.
3. Určila se skupina a element testu, které bylo možné při tomto osvětlení rozlišit. Konkrétně se jednalo o skupinu 1 a element 6. Poté se mohla určit i prostorová frekvence.
4. Následně se postupně snižovalo osvětlení a zaznamenávaly se hodnoty, při kterých už nebylo možné rozlišit daný element. Takto se postupovalo až po největší element 1, skupiny 0.
5. První část měření končila v momentu, kdy už nebylo možné rozlišit element 1, skupiny 0.
6. Druhá část měření probíhala obdobně, jen se tentokrát osvětlení zvyšovalo a určovaly se hodnoty, kdy bylo možné zmenšující se elementy jednotlivých skupin rozlišit.

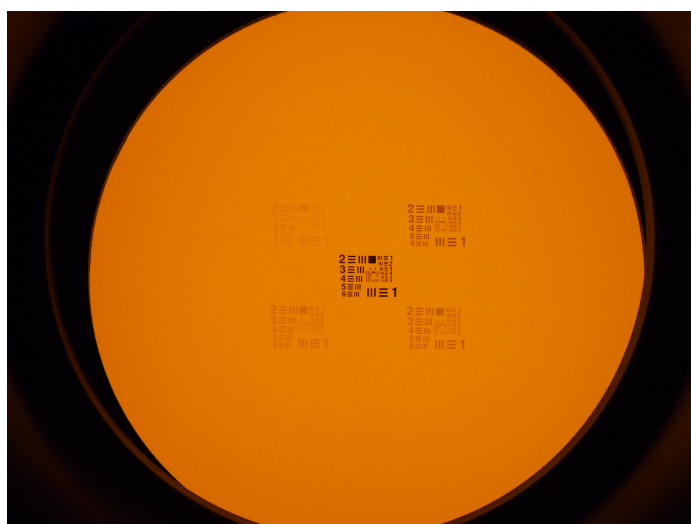
Na následujících obrázcích 12, 13, 14 je vyobrazena měřící sestava a použitý test USAF – 1951.

---

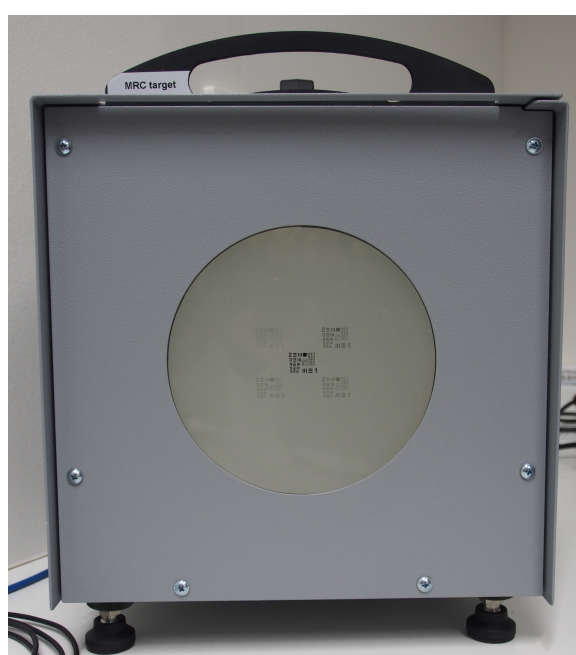
<sup>2</sup>Night Vision Sights – for testing night vision sights.



Obrázek 12: Měřicí sestava – vpravo: LAN light source, vlevo: kolimátor.



Obrázek 13: Pohled na osvětlený test USAF – 1951 přes kolimátor.



Obrázek 14: Pohled na neosvětlený test USAF – 1951.

## 2.2 Měření 2 – Reakční doba lidského oka na silný zdroj záření při simulaci nočního pozorování

Silným zdrojem záření byl mobilní telefon Lenovo A536 a hodnota jasu tohoto zdroje záření byla určena pomocí jasoměru od firmy Inframet, viz obrázek 15. Podstatou měření bylo nastavení konstantního osvětlení zdroje, pravidelné oslňování zraku silným zdrojem záření a určení doby rozlišení testu po oslňení. V tomto případě se jednalo spíše o doplňkové měření k následujícím experimentům, avšak neméně důležité.

Průběh měření:

1. Na zdroji – LAN light source, bylo nastaveno konstantní osvětlení 300 mlx. Což odpovídá osvětlení za měsíčné noci<sup>3</sup>.
2. Po přibližně 30 minutové adaptaci na tmu byla určena prostorová frekvence, kterou bylo možné rozlišit. Konkrétně se jednalo o hodnotu 1,20 č/mrad.
3. Následně byl zrak oslňen po dobu 1 min mobilním telefonem o jasu displeje  $132,8 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  ze vzdálenosti cca 250 mm<sup>4</sup>.
4. Po uplynutí doby oslňení, se měřila doba, za kterou bylo opět možné rozlišit původní prostorovou frekvenci.
5. Měření mělo deset opakování a proběhlo dvakrát pro ověření výsledků.



(a) Jasoměr od firmy Inframet



(b) Mobilní telefon Lenovo A536

**Obrázek 15:** Použitý jasoměr k určení jasu displeje a mobilní telefon jako silný zdroj záření.

<sup>3</sup>Pro představu: bezměsíčné noci odpovídá osvětlení cca 3 mlx.

<sup>4</sup>Konvenční zraková vzdálenost.

## 2.3 Měření 3 – Určení vlivu mezopického vidění při pozorování monokulárním a binokulárním noktovizorem

Pro toto měření byl použit noktovizor MUM – 14 (Multi – Use Monocular), viz obrázek 16. Jedná se o monokulární víceúčelový noktovizor s možností IČ přísvitů. Toto zařízení je možné osadit mikrokanálovými zesilovači jasu obrazu všech generací. V kombinaci s druhým noktovizorem MUM – 14 vznikne binokulární noktovizor. Mezi základní specifikace přístroje, které mohou ovlivňovat měření, patří:

- (a) Zvětšení – 1x
- (b) Rozsah zaostření – 20 cm až  $\infty$
- (c) Dioptrická korekce – –4 D až 2 D
- (d) Jas „displeje“, který oko oslňuje



**Obrázek 16:** Monokulární noktovizor MUM – 14.

Měření probíhalo za pomoci monokulárního/binokulárního noktovizoru MUM – 14. Podstatou měření bylo zjistit jak se mezopické vidění projeví při použití monokulárního a binokulárního přístroje nočního vidění. Čili jak se projeví rozdíl v pozorování po oslnění binokulárním a monokulárním přístrojem při osvětlení, které odpovídá mezopické oblasti. Výsledků bylo dosaženo za pomoci čtyř pozorovatelů (studenti oboru Digitální a přístrojové optiky), kteří nezávisle na výsledcích ostatních hodnotili svou vlastní rozlišovací schopnost po oslnění přístroji. Pozorovatelé byli vybráni namátkou, avšak v souvislosti s měřením bylo zajištěno rovnoměrné rozdělení pohlaví, očních vad a pravorukosti/levorukosti. A dále byly k měření vytvořeny protokoly, do kterých se zapisovaly výsledky.



Průběh měření:

1. Na zdroji – LAN light source, bylo nastaveno konstantní osvětlení 300 mlx.
2. Dále proběhla cca 30 minutová adaptace na tmu.
3. Následně se určila prostorová frekvence, kterou bylo možné rozlišit, u každého z kontrastů, tj. 100 %, 50 %, 30 %, 20 % a 10 %.
4. Poté došlo k oslnění binokulárním přístrojem nočního vidění po dobu 20 sekund.
5. Po uplynutí doby oslnění se určila rozlišitelná prostorová frekvence u všech kontrastů.
6. Následně bylo po stejnou dobu pomocí monokulárního noktovizoru oslněno nejprve levé oko a byla rozlišena prostorová frekvence u všech kontrastů. Totéž proběhlo i pro oko pravé.
7. Pozorovatelé se střídali vždy po celé sadě měření (bod 3 až 6) a výsledky – skupina a element testu, se zapisovaly do tabulky. Prostorová frekvence se dále přepsala dle tabulky dodávané výrobcem.

## **2.4 Měření 4 – Určení vlivu mezopického vidění při pozorování monokulárním noktovizorem s různými typy fosforového stínítka**

Měření pro určení vlivu mezopického vidění při pozorování monokulárním noktovizorem s různými typy fosforového stínítka, probíhalo podobně jako měření s binokulárním a monokulárním přístrojem. Tentokrát však bylo využito dvou monokulárních noktovizorů MUM – 14, kde jeden byl se zeleným typem fosforu (luminoforu) – P43, a druhý s bílým typem fosforu (luminoforu) – P45. Měření bylo provedeno za pomoci čtyř pozorovatelů. Smyslem experimentu bylo zjistit, zda-li typ použitého fosforu ovlivní mezopické vidění pozorovatele, případně který z typů stínítka by byl pro použití v praxi výhodnější.

Průběh měření:

1. Na zdroji – LAN light source, bylo nastaveno konstantní osvětlení 300 mlx.
2. Dále proběhla cca 30 minutová adaptace na tmu.
3. Následně se určila prostorová frekvence, kterou bylo možné rozlišit, u každého z kontrastů, tj. 100 %, 50 %, 30 %, 20 % a 10 %.
4. Poté došlo k oslnění levého oka monokulárním přístrojem nočního vidění se zeleným typem fosforu po dobu 20 sekund.
5. Po uplynutí doby oslnění se určila rozlišitelná prostorová frekvence u všech kontrastů.
6. Následně bylo po stejnou dobu pomocí monokulárního noktovizoru oslněno pravé oko a byla rozlišena prostorová frekvence u všech kontrastů.

7. Totéž proběhlo i pro monokulární noktovizor s bílým typem fosforu.
8. Pozorovatelé se střídali vždy po celé sadě měření (bod 3 až 7) a výsledky – skupina a element testu, se zapisovaly do tabulky. Prostorová frekvence se dále přepsala dle tabulky dodávané výrobcem.

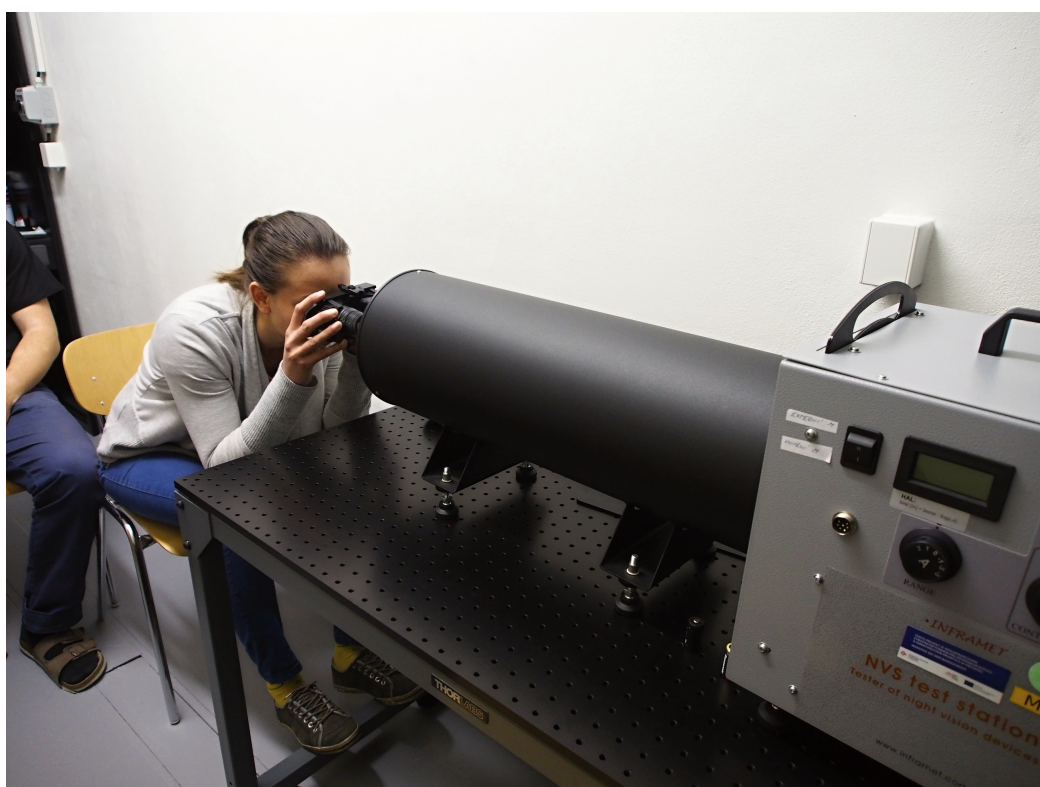
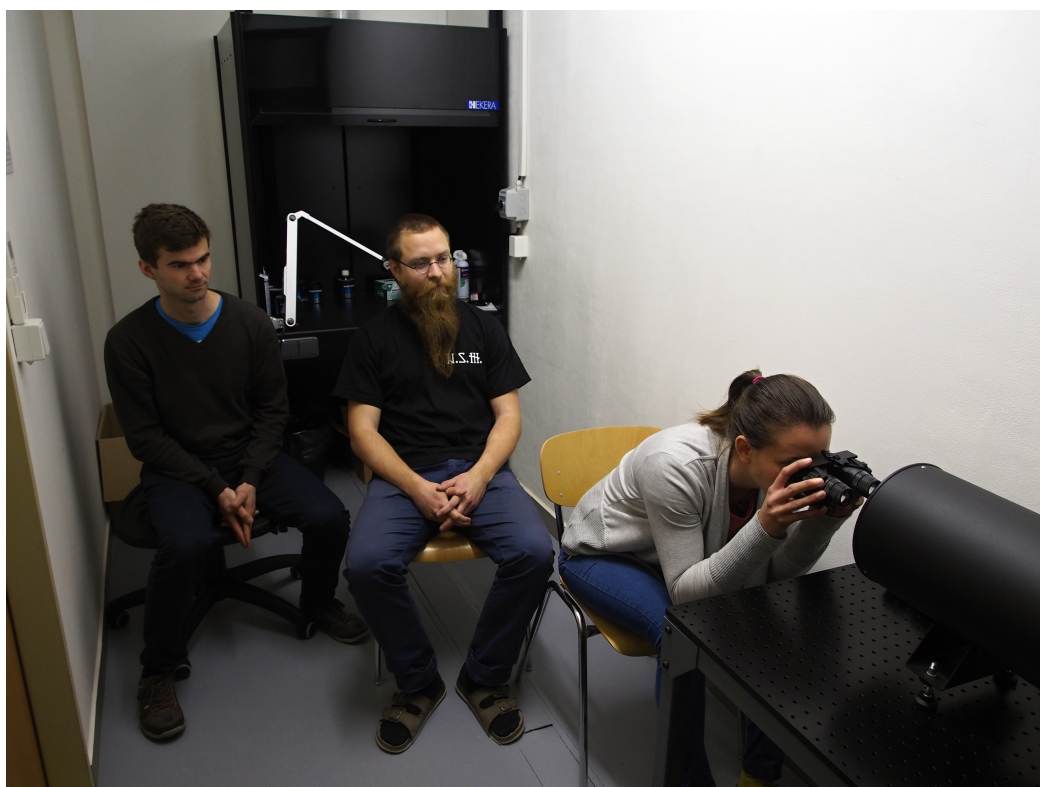
## 2.5 Měření 5 – Porovnání rozlišovací schopnosti monokulárního noktovizoru s různými typy fosforového stínítka a lidského oka při mezopickém vidění

Cílem měření bylo zjistit, jak se bude lišit rozlišení testu u všech kontrastů při pozorování neozbrojeným okem, čili okem bez přístroje, a přístrojem nočního vidění s různými typy fosforu pro konstantní osvětlení 300 mlx. Osvětlení odpovídalo oblasti mezopického vidění. Samotné měření probíhalo za pomoci přístroje nočního vidění MUM – 14 a čtyř pozorovatelů. Měření bylo provedeno pro rozlišovací schopnost noktovizoru a porovnávalo s rozlišovací schopností oka po dostatečné adaptaci na tmou.

Průběh měření:

1. Na zdroji – LAN light source, bylo nastaveno konstantní osvětlení 300 mlx.
2. Dále proběhla přibližně 30 minutová adaptace na tmou.
3. Po adaptaci se určila rozlišitelná prostorová frekvence pomocí neozbrojeného zraku a to u všech kontrastů.
4. Poté se určila prostorová frekvence u všech kontrastů pro přístroj se zeleným fosforem a nejprve pro levé a následně pro pravé oko.
5. Následovala výměna přístroje a určila se prostorová frekvence pro bílé stínítka. Opět pro všechny kontrasty a pro obě oči.
6. Hodnoty (skupina a element testu) se zapisovaly do tabulky a byly přepočítány pomocí tabulky dodávané výrobcem. Pozorovatelé se střídali vždy po celé sadě měření (bod 3 až 4).

Následující obrázky 17 prezentují průběh třetího měření tedy „Určení vlivu mezopického vidění při pozorování monokulárním a binokulárním noktovizorem“. Dále čtvrtého měření tedy „Určení vlivu mezopického vidění při pozorování monokulárním noktovizorem s různými typy fosforového stínítka“ a pátého měření čili „Porovnání rozlišovací schopnosti monokulárního noktovizoru s různými typy fosforového stínítka a lidského oka při mezopickém vidění“.



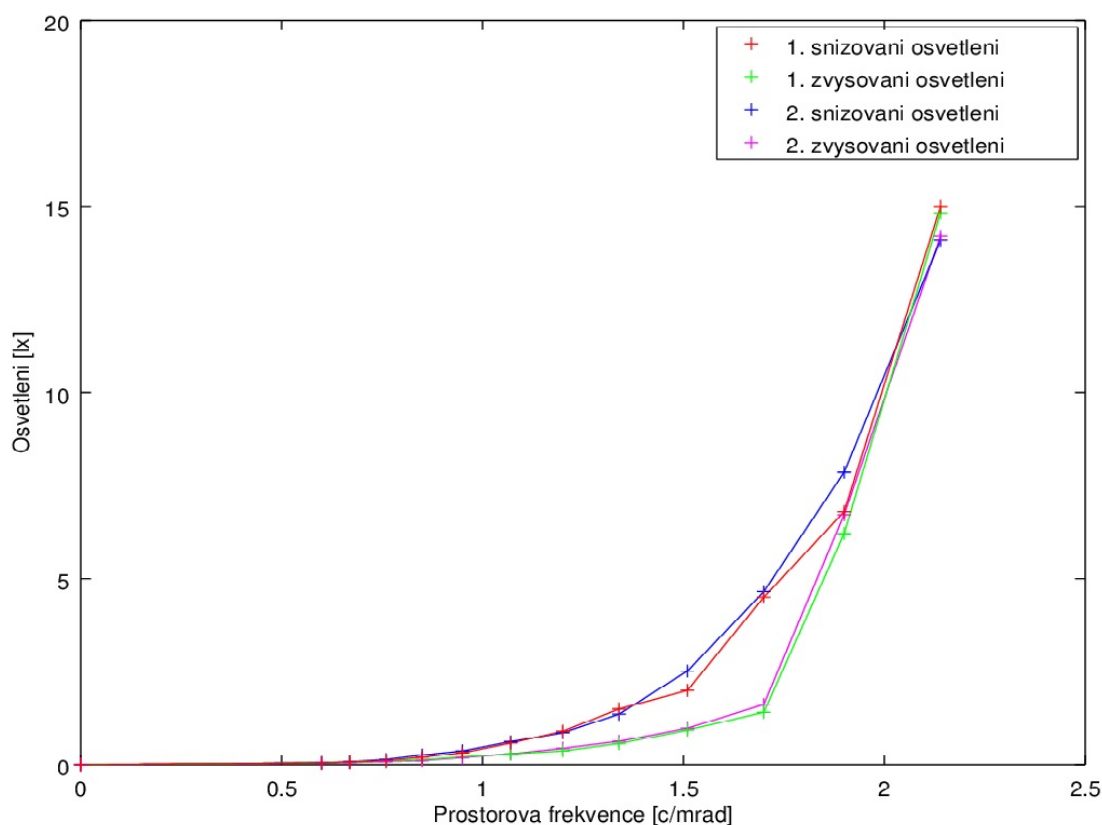
**Obrázek 17:** Průběh měření v zatemněné laboratoři firmy Pramacom-HT po 30 minutové adaptaci na tmou, za účasti pozorovatelů a pomocí měřicí sestavy NVS test station a noktovizoru MUM – 14.

### 3 Výsledky a diskuze

#### 3.1 Měření 1 – Určení rozlišovací schopnosti oka v závislosti na osvětlení

##### Prezentování dat

Na obr. 18 je vyobrazen graf závislosti rozlišovací schopnosti lidského oka na osvětlení. Při snižování osvětlení dochází k adaptaci oka ze šera na tmu. K části grafu, při osvětlení 15 lx, kde se křivky sbíhají, můžeme přiřadit fotopické vidění. A lze říci, že na sítnici oka je tedy aktivovaná většina světlocitlivých buněk – čípků. Pro nižší úrovně osvětlení je možné naopak přiřadit vidění skotopické, kde se již z velké části projevuje funkce tyčinek. Podstatným výsledkem je oblast grafu, kde dochází k určitému posunu křivek, tzn. oblast kolem 2 lx až 6 lx. Jedná se o oblast, které je možné přiřadit mezopické vidění.



Obrázek 18: Graf rozlišovací schopnosti oka v závislosti na osvětlení.

## Diskuze

Dle tohoto výsledného grafu je zřejmé, že při snižování osvětlení se lidské oko při mezopickém vidění adaptovalo na tmu lépe, než když se osvětlení zvyšovalo. Dále je možné konstatovat, že mezopické vidění je do jisté míry ovlivněno adaptačním jasem. V rámci tohoto měření se musí vzít v úvahu i určitá únava oka, která přicházela s opakujícím se měřením, a z toho tedy i plynoucí případné odchylky měření.

### 3.2 Měření 2 – Reakční doba lidského oka na silný zdroj záření při simulaci nočního pozorování

#### Prezentování dat

Základním výsledkem tohoto měření je tabulka hodnot, ve které nalezneme počet opakování měření a s tím spojenou adaptaci oka na osvětlení 300 mlx a následné rozlišení původního testu, viz tabulka 4. Zrak byl oslňován po dobu jedné minuty, zdrojem záření o jasu  $132,8 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Z výsledků je patrný nárůst doby adaptace po každém opakování. Od určitého momentu je potom zřejmé ustálení doby adaptace, což lze vysvětlit jako určitý návyk zraku na jednotlivé situace (oslňování, adaptace). Můžeme tedy konstatovat, že po určité době, je lidské oko schopné si navyknout na jednotlivé změny a přizpůsobit se jim.

**Tabulka 4:** Doba adaptace oka po oslňování.

Počet opakování	Doba adaptace 1 [s]	Doba adaptace 2 [s]
1.	25	17
2.	33	20
3.	36	25
4.	40	36
5.	56	39
6.	73	46
7.	76	62
8.	65	69
9.	70	59
10.	79	70

## Diskuze

Z výsledků je zřejmá oční únava, která však dosahuje určité saturace. Prvotní rychlý nárůst oční únavy je při vyšším počtu opakování snižován. Konečné kolísání času adaptace ukazuje na schopnost oka potlačit nežádoucí vlivy a „naučit“ se pracovat s opakujícími se situacemi.

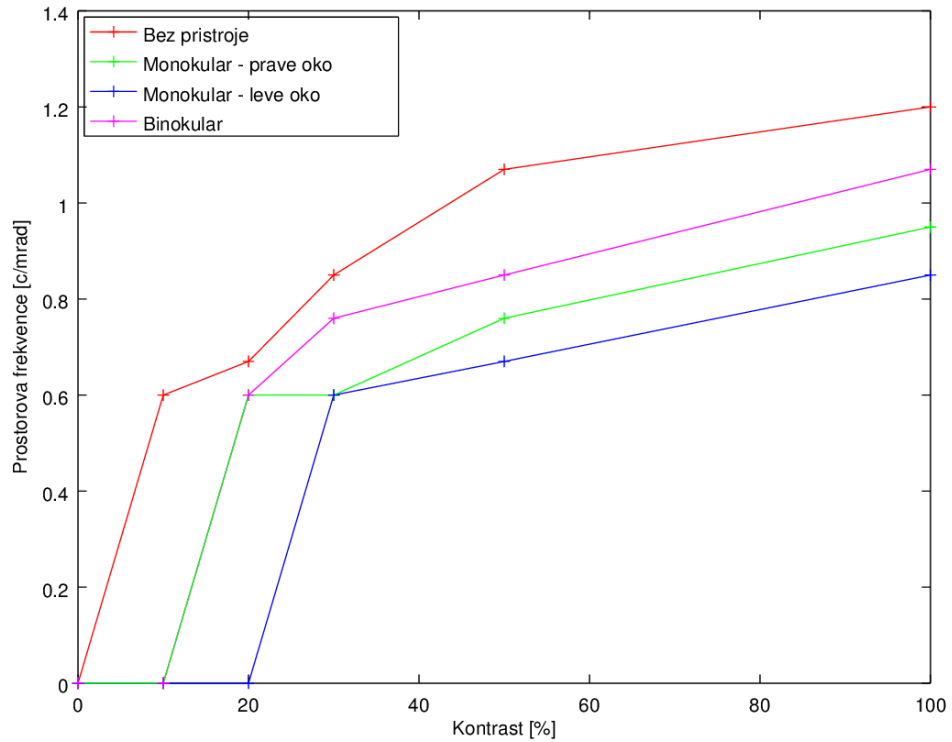
### 3.3 Měření 3 – Určení vlivu mezopického vidění při pozorování monokulárním a binokulárním noktovizorem

#### Prezentování dat

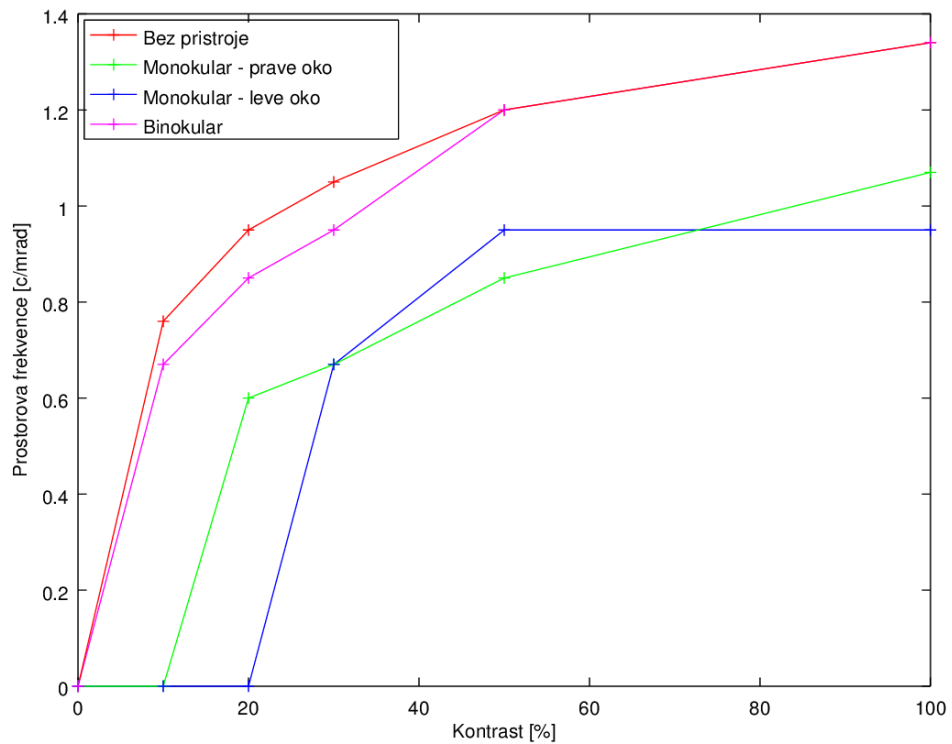
Na obrázcích 19, 20, 21 a 22, na kterých je vidět závislost prostorové frekvence [č/mrad] na kontrastu [%] při oslnění lidského oka monokulárním a binokulárním přístrojem nočního vidění, je zřejmý pokles prostorové frekvence po oslnění přístroji. A to vůči pozorování neozbrojeným okem bez oslnění, po cca 30 min adaptaci na tmu. Tyto křivky jsou chápány jako referenční. Nicméně průběhy křivek rozlišitelné prostorové frekvence po oslnění binokulárním přístrojem nejsou příliš odlišné od původního referenčního pozorování. Například pozorovatel 3 má dokonce shodný průběh křivky po oslnění binokulárním přístrojem s referencí bez oslnění. Naopak po oslnění pravého/levého oka monokulárním přístrojem je znát velký pokles rozlišení testu, a to u všech hodnot kontrastů. Výsledkem měření jsou tedy grafy závislosti, dle kterých lze určit vliv oslnění přístroji nočního vidění různých typů, na rozlišovací schopnost oka při osvětlení odpovídajícímu oblasti mezopického vidění. V tabulce 5 jsou zapsány hodnoty rozlišené prostorové frekvence pro binokulární a monokulární noktovizor, vztažené k hodnotám rozlišené prostorové frekvence bez oslnění přístrojem. P/L značí pravé/levé oko. V tabulce jsou hodnoty vypsány pouze pro 100 % a 50 % kontrasty, protože u nižších kontrastů v závislosti na pozorovateli nedocházelo k rozlišení ani největších elementů testu.

**Tabulka 5:** Tabulka závislosti prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním a binokulárním přístrojem nočního vidění pro všechny pozorovatele. Kde hodnoty rozlišené prostorové frekvence pro binokulární a monokulární noktovizor jsou vztažené k hodnotám rozlišené prostorové frekvence bez oslnění přístrojem.

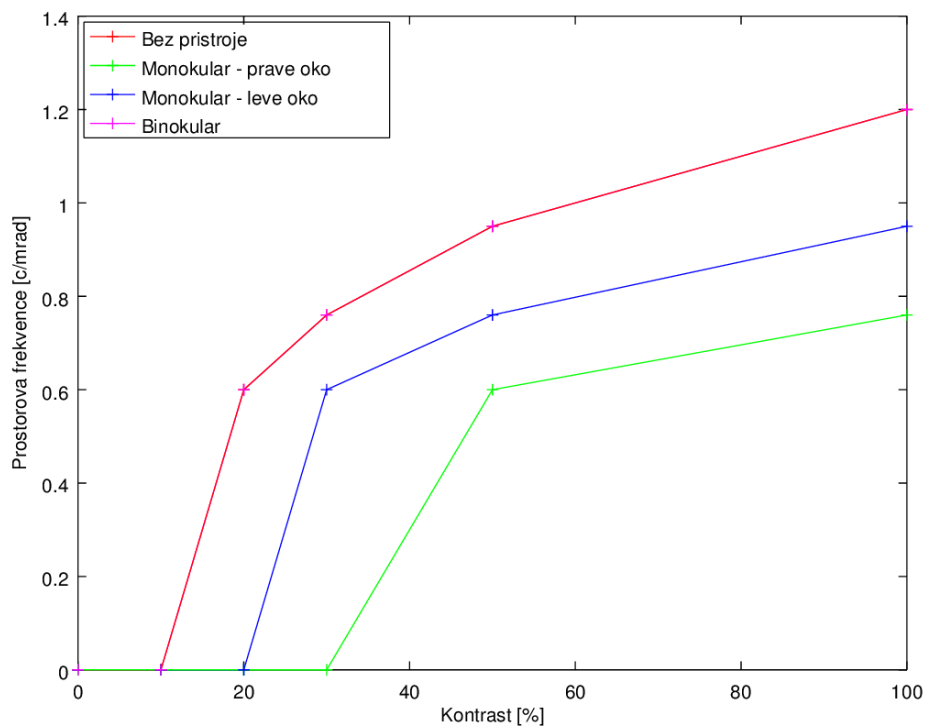
Pozorovatel	Kontrast	Rozlišovací schopnost oka		
		Bez oslnění přístrojem	Oslnění binokulárním noktovizorem	Oslnění monokulárním noktovizorem
	[%]	[č/mrad]	[%]	P/L [%]
Pozorovatel 1	100	1,20	89	79/70
	50	1,07	79	71/63
Pozorovatel 2	100	1,34	100	79/70
	50	1,20	100	70/79
Pozorovatel 3	100	1,20	100	63/79
	50	0,95	100	63/80
Pozorovatel 4	100	1,20	100	63/56
	50	0,85	89	70/70
Šřední hodnota	100	—	97	71/69
	50	—	92	68/73
Směrodatná odchylka	100	—	5	8/8
	50	—	8	3/7



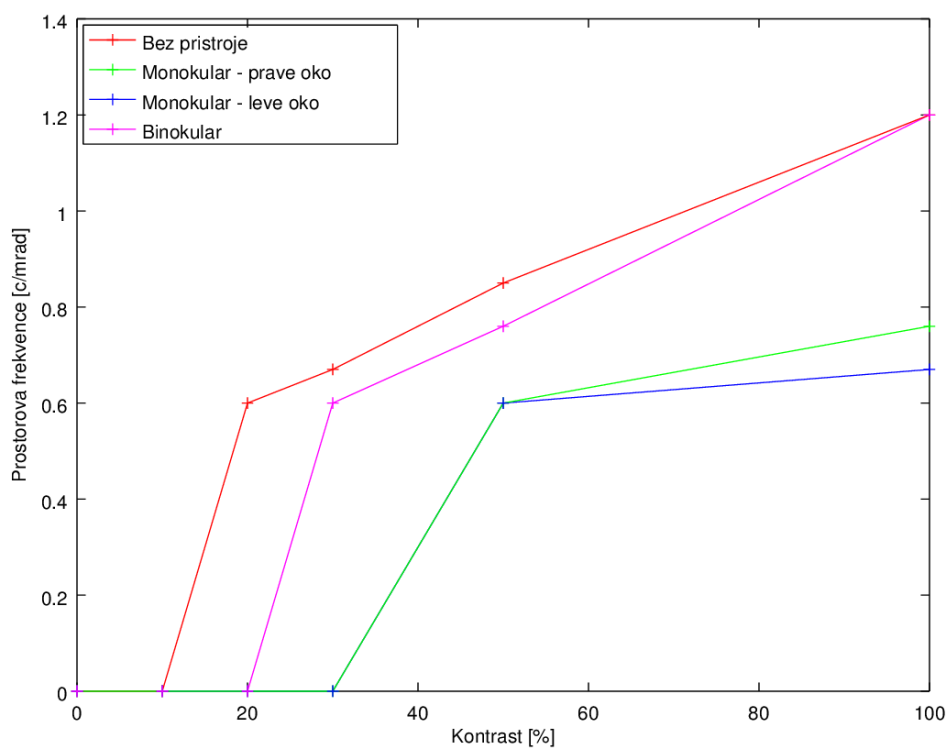
**Obrázek 19:** Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním a binokulárním přístrojem nočního vidění pro pozorovatele 1.



**Obrázek 20:** Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním a binokulárním přístrojem nočního vidění pro pozorovatele 2.



**Obrázek 21:** Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním a binokulárním přístrojem nočního vidění pro pozorovatele 3.



**Obrázek 22:** Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním a binokulárním přístrojem nočního vidění pro pozorovatele 4.



## Diskuze

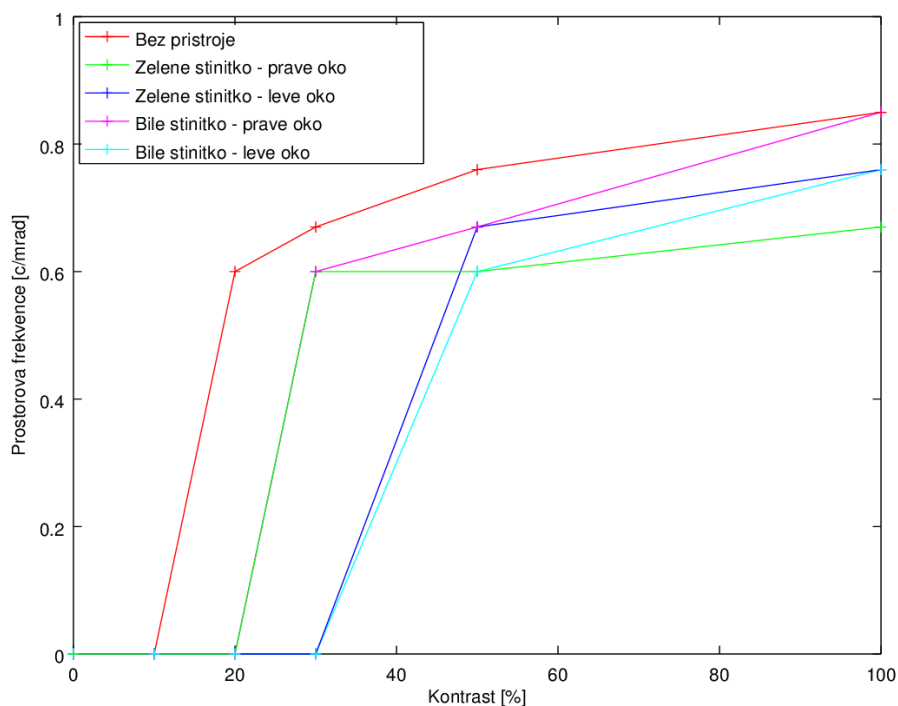
Při oslnění binokulárním noktovizorem dochází k oslnění obou očí za stejných podmínek a je zachované stereoskopické vidění. Což jsou pravděpodobně důsledky mnohem menšího poklesu rozlišitelné prostorové frekvence, než je tomu u monokulárního noktovizoru. U monokulárního přístroje dochází v závislosti na použitém oku k potlačení schopnosti rozlišovat nižší prostorové frekvence a lze tak pozorovat i jistý vliv oční dominance na výsledky experimentu. Na výsledných křivkách je patrná výsledná oční dominance pozorovatelů, kteří měřením prošli. Ovšem na kvalitě výsledků je vliv částečně potlačen proměřením každého oka zvlášť. Mezopické vidění má při pozorování přístroji nočního vidění za následek bezprostřední rozlišení testů po oslnění. Oko se tedy nachází v „mezifázi“, kde pracují oba typy světlocitlivých buněk. Ale i přes nedokonalou adaptaci zraku na nízké osvětlení po oslnění, je oko schopné rozlišit poměrně vysoké prostorové frekvence, a to i v případě nízkých kontrastů testu.

### 3.4 Měření 4 – Určení vlivu mezopického vidění při pozorování monokulárním noktovizorem s různými typy fosforového stínítka

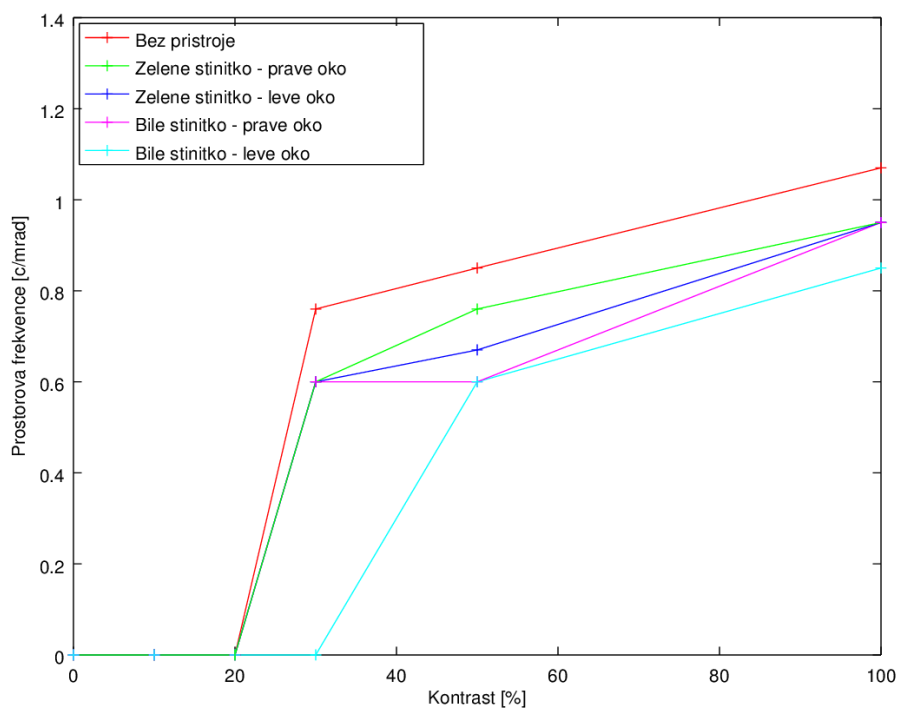
#### Prezentování dat

V tomto experimentu se porovnával vliv fosforového stínítka na rozlišovací schopnost oka při osvětlení odpovídajícímu mezopické oblasti. Na obrázcích 23, 24, 25 a 26 jsou zakreslené závislosti prostorové frekvence [č/mrad] na kontrastu [%], při oslnění lidského oka monokulárním přístrojem nočního vidění s bílým a zeleným typem fosforového stínítka. Červená křivka vyobrazuje rozlišenou prostorovou frekvenci po 30 min adaptaci na tmou a je chápána jako referenční. Níže položené křivky jsou potom rozlišené prostorové frekvence po oslnění přístroji, a to pro levé a pravé oko. Dle výsledných grafů lze soudit, že pokles rozlišitelných prostorových frekvencí vůči referenčním hodnotám závisí na typu použitého fosforového stínítka, ale i na oční dominanci pozorovatelů.

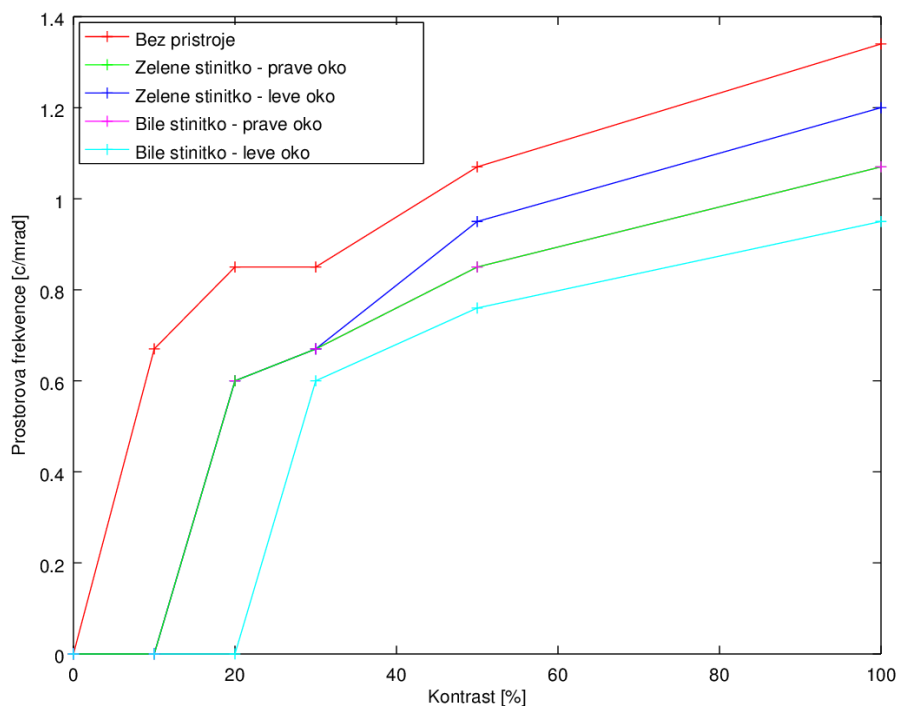
V tabulce 6 jsou zapsány hodnoty rozlišené prostorové frekvence pro zelený a bílý luminofor, kde P/L značí pravé/levé oko. Tyto hodnoty jsou vztahované k hodnotám rozlišené prostorové frekvence bez oslnění přístrojem. Výsledné hodnoty jsou vypsané pouze pro 100 % a 50 % kontrast, neboť u nižších kontrastů často nedocházelo k rozlišení ani největšího elementu testu. V tabulce nalezneme i střední hodnoty a směrodatnou odchylku. Dalším výsledkem je i závislost rozlišovací schopnosti na adaptaci oka. Pozorovatelé vždy uvedli vyšší hodnoty rozlišené prostorové frekvence bezprostředně po adaptaci na tmou, zatímco po oslnění docházelo k výraznému poklesu rozlišených elementů, a to u všech kontrastů.



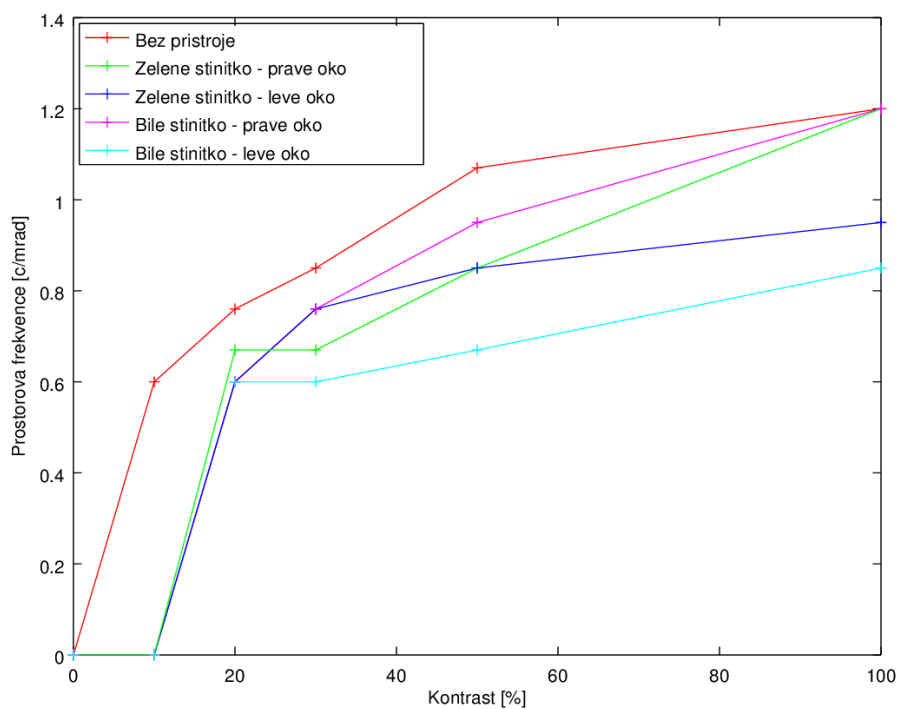
**Obrázek 23:** Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 1.



**Obrázek 24:** Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 2.



**Obrázek 25:** Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 3.



**Obrázek 26:** Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 4.

**Tabulka 6:** Tabulka závislosti prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro všechny pozorovatele. Kde hodnoty rozlišené prostorové frekvence pro zelený a bílý luminofor jsou vztaženy k hodnotám rozlišené prostorové frekvence bez oslnění přístrojem.

Pozorovatel	Kontrast	Rozlišovací schopnost oka		
		Bez oslnění přístrojem	Oslnění zeleným luminoforem P/L	Oslnění bílým luminoforem P/L
	[%]	[č/mrad]	[%]	[%]
Pozorovatel 1	100	0,85	78/89	100/89
	50	0,76	79/88	88/79
Pozorovatel 2	100	1,07	92/105	117/105
	50	0,85	103/115	115/103
Pozorovatel 3	100	1,34	79/89	79/70
	50	1,07	79/88	79/71
Pozorovatel 4	100	1,20	100/79	100/70
	50	1,07	79/79	88/62
Sřední hodnota	100	—	87/90	99/84
	50	—	85/93	93/79
Směrodatná odchylka	100	—	7/9	13/14
	50	—	10/13	13/15

## Diskuze

Z výsledných dat můžeme vidět určité systematické snižování rozlišené prostorové frekvence u každého z pozorovatelů. Zajímavý je i fakt, že dle slov pozorovatelů, se bílé stínítko jeví jako méně oslnující a potvrzují u něj vyšší komfort pozorování. Výsledné grafy však ukazují, že i přes přirozenější průběh pozorování, není bílé fosforové stínítko zcela optimální. A to především v kombinaci s nedominantním okem, což potvrzují všechny grafy pozorovatelů. Zvláštností zůstává, že u zeleného fosforu nedochází k příliš velkým rozdílům mezi dominantním a nedominantním okem. U bílého je tento rozdíl značný.

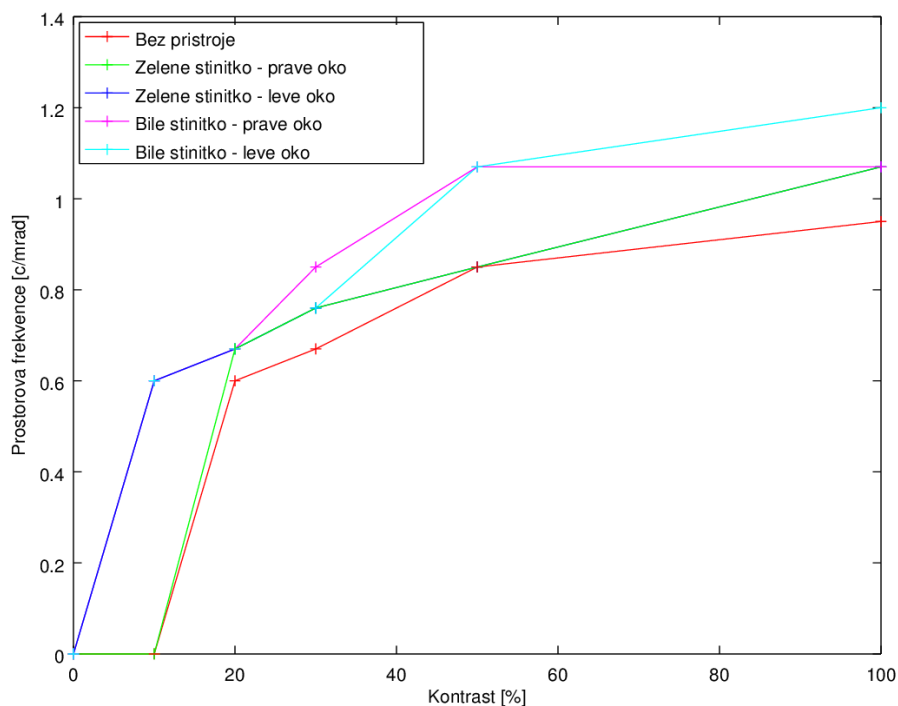
### 3.5 Měření 5 – Porovnání rozlišovací schopnosti monokulárního noktovizoru s různými typy fosforového stínítka a lidského oka při mezopickém vidění

#### Prezentování dat

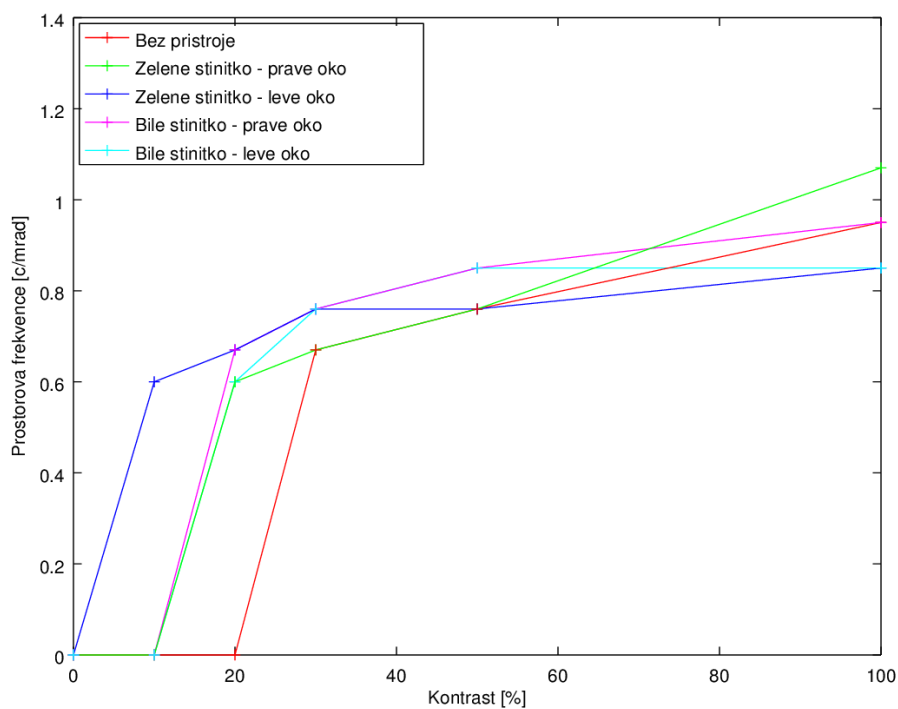
Měření, kde výsledkem je porovnání rozlišovací schopnosti lidského oka a monokulárního noktovizoru s různými typy fosforového stínítka, vedlo k očekávaným výsledkům. Na obrázcích 27, 28, 29 a 30 nalezneme závislost prostorové frekvence [č/mrad] na kontrastu [%], při pozorování přístrojem nočního vidění. Výsledné grafy každého pozorovatele ukazují, že i dokonale odpočaté a navyknuté oko nedokáže rozlišit srovnatelné prostorové frekvence, jako přístroje nočního vidění. A to nezávisle na typu stínítka. Výjimkou může být pouze výsledek třetího pozorovatele, jehož rozlišovací schopnost bez přístroje značně převýšila rozlišovací schopnost při pozorování noktovizorem. V závislosti na podmínkách měření (nastavené osvětlení 300 mlx, kvalitě noktovizoru a případných očních vadách pozorovatelů) lze konstatovat, že bílé fosforové stínítko, představuje pro pozorování noktovizorem lepší rozlišení a přirozenější pozorování. Kromě toho můžeme opět na výsledných křivkách pozorovat vliv oční dominance u každého z pozorovatelů. V následující tabulce 7 nalezneme hodnoty prostorové frekvence pro přístroje nočního vidění s bílým a zeleným typem stínítka, které jsou vztažené k hodnotám rozlišené prostorové frekvence bez přístroje. Kde P/L znamená pravé/levé oko.

**Tabulka 7:** Tabulka závislosti prostorové frekvence na kontrastu při pozorování monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy luminoforu. Hodnoty rozlišené prostorové frekvence jsou vztažené k pozorování bez přístroje.

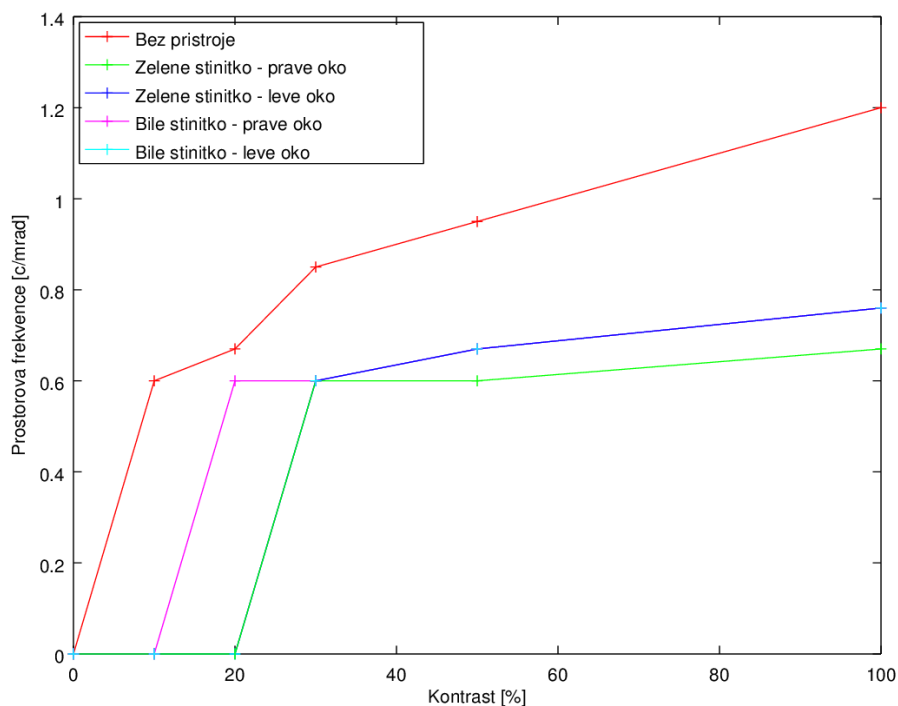
Pozorovatel	Kontrast	Rozlišovací	schopnost	oka
		Pozorování bez přístroje	Pozorování se zeleným luminoforem P/L	Pozorování s bílým luminoforem P/L
	[%]	[č/mrad]	[%]	[%]
Pozorovatel 1	100	0,95	112/112	112/126
	50	0,85	100/100	125/125
Pozorovatel 2	100	0,95	118/118	118/132
	50	0,76	117/117	148/148
Pozorovatel 3	100	1,20	55/63	63/63
	50	0,95	63/70	70/70
Pozorovatel 4	100	1,20	111/79	100/100
	50	1,07	79/79	100/88
Sřední hodnota	100	—	99/93	98/105
	50	—	90/91	111/108
Směrodatná odchylka	100	—	24/20	21/27
	50	—	19/17	28/30



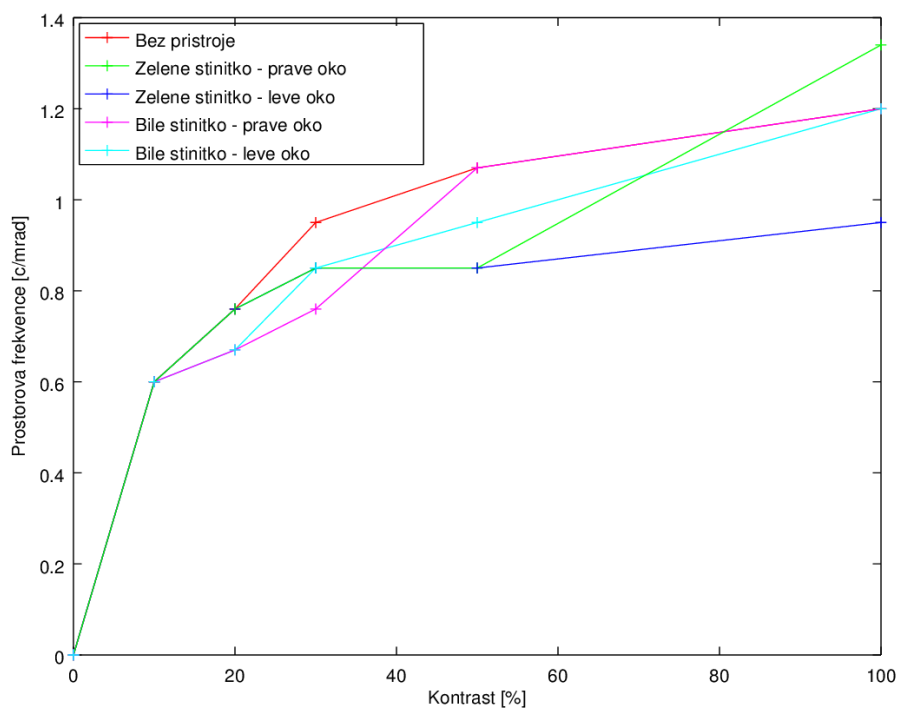
**Obrázek 27:** Závislost prostorové frekvence na kontrastu při pozorování neozbrojeným okem a při pozorování monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 1.



**Obrázek 28:** Závislost prostorové frekvence na kontrastu při pozorování neozbrojeným okem a při pozorování monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 2.



**Obrázek 29:** Závislost prostorové frekvence na kontrastu při pozorování neozbrojeným okem a při pozorování monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 3.



**Obrázek 30:** Závislost prostorové frekvence na kontrastu při pozorování neozbrojeným okem a při pozorování monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 4.

## Diskuze

Experiment potvrdil obecně známou skutečnost, že při pozorování přístrojem nočního vidění je dosaženo lepší rozlišovací schopnosti než u pozorování neozbrojeným okem. Výjimkou je jen pozorovatel 3, který zcela tuto skutečnost popírá. Ve výsledných grafech je vidět i oční dominance pozorovatelů a dokonce i typ stínítka, které by pravděpodobně každý z pozorovatelů upřednostnil. Měření, ale mělo ukázat, především samotnou funkční stránku přístroje a doplnit ostatní měření.



## Závěr

Výsledkem této práce je především zjištění, že přechodové jevy značně ovlivňují pozorování za šera. Případně, chceme – li, při přechodu ze šera do tmy. Z konečných dat je patrné, že lidské oko je velmi schopný orgán, který se dokáže přizpůsobit i podmínkám, které nejsou striktní. Což znamená, že dokáže spojit funkci světlocitlivých receptorů (tyčinek a čípků) a pracovat právě v oblasti mezopického vidění. Což dokazují výsledná data prvního měření, které se zabývalo závislostí rozlišovací schopnosti lidského oka na osvětlení. A stejně tak i druhé měření, které ukázalo, jaká je reakční doba lidského oka na silný zdroj záření při simulaci nočního pozorování. Ukázalo se tedy, že v rámci adaptace oka na tmu je třeba brát v úvahu i jistou „dynamiku“ oka.

V rámci určování vlivu mezopického vidění pro binokulární a monokulární noktovizor, bylo zjištěno, že po oslnění binokulárním noktovizorem se oko adaptuje na změnu osvětlení lépe než při pozorování monokulárním přístrojem. Ovšem u monokulárního přístroje je třeba počítat i s oční dominancí pozorovatele, což bylo určeno a zavedeno do výsledných grafů. Podobné výsledky se objevily i v případě určení vlivu mezopického vidění při pozorování monokulárním noktovizorem s různými typy fosforových stínítek. Tyto výsledky však nejsou jednoznačné pro všechny pozorovatele. V závislosti na pozorovateli a jeho oční dominanci docházelo ke značným rozdílům.

Mezi výsledky měření jsou kromě grafů k nalezení i tabulky hodnot, které prezentují normované hodnoty rozlišené prostorové frekvence, které jsou vztažené vždy k pozorování bez přístroje. Je třeba poznamenat, že výsledné hodnoty rozlišené prostorové frekvence bez přístroje, byly vždy chápány jako referenční. Zajímavostí může být, že tabulky jsou vytvořené pouze pro kontrasty testu, které odpovídají 100 % a 50 %. Je to především z důvodu omezené velikosti testu. Proto ve většině případů u nižších kontrastů nedocházelo u pozorovatelů k rozlišení ani největších elementů testu.

Konečným výsledkem všech měření se může stát určení nejvýhodnějšího přístroje nočního vidění pro pozorování v nočních podmínkách, kdy dochází k občasnému odložení přístroje a tedy i mezopickému vidění. S velkou pravděpodobností lze konstatovat, že k omezení vlivu mezopického vidění je vhodné použít binokulární noktovizor. U různých typů fosforových stínítek hraje velkou roli především dominantní oko pozorovatele. Ale v obecném případě má bílý fosfor jisté výhody. Ovšem je nutné podotknout, že v závislosti na fyziologických faktorech oka pozorovatele je vliv mezopického vidění pro každého individuální.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] P. Kellnhofer, T. Ritschel, P. Vangorp, K. Myszkowski, and H.-P. Seidel, “Stereo day-for-night: Retargeting disparity for scotopic vision,” *ACM Trans. Appl. Percept.*, vol. 11, no. 3, pp. 15:1–15:17, 2014.
- [2] C. L. Clark, J. L. Hardy, V. J. Volbrecht, and J. S. Werner, “Scotopic spatiotemporal sensitivity differences between young and old adults,” *Ophthalmic and Physiological Optics*, vol. 30, no. 4, pp. 339–350, 2010.
- [3] A. J. Zele and D. Cao, “Vision under mesopic and scotopic illumination,” *Frontiers in Psychology*, vol. 5, p. 1594, 2015.
- [4] MEFANET, síť lékařských fakult ČR a SR, “Wikiskripta (cs),” 2016. <http://www.wikiskripta.eu>.
- [5] Z. Lošťák, *Fotometrie*. Univerzita Palackého v Olomouci, 2014.
- [6] D. Cao, *Chapter 10 - Color Vision and Night Vision*. London: W.B. Saunders, fifth edition ed., 2013.
- [7] J. Habel and P. Žák, “Význam mezopického vidění pro praxi,” *Světlo*, no. 6, pp. 52–54, 2007.
- [8] K. ZIRMOVÁ, “Oční dominance,” *Studentský časopis Optometrie a Ortoptiky: OČIMA*, no. 3, 2014.
- [9] M. Jedlička, “Zesilovače jasu obrazu,” *Světlo*, no. 4, 2006.
- [10] F. Chlup, “OPT/AKS – akviziční systémy (prezentace).” nepublikováno, 2016.
- [11] K. CHRZANOWSKI, “Review of night vision technology,” *OPTO-ELECTRONICS REVIEW*, no. 2, pp. 153–181, 2013.
- [12] Noční vidění – ATN, “NVM14 – optika pro noční vidění, myslivost, night vision, dalekohledy, noční vidění ATN,” 2011. <http://www.nocni-videni-atn.cz>.
- [13] PRAMACOM – HT spol. s.r.o., “Mum-14,” 2016. <http://www.infrared.cz>.
- [14] I. Vyšín and J. Říha, *Paprsková a vlnová optika*. Univerzita Palackého v Olomouci, 2012.
- [15] Wikipedia, “1951 usaf resolution test chart,” 2016. <https://en.wikipedia.org>.
- [16] J. Bajer, *Optika 1*. Univerzita Palackého v Olomouci, 2015.

# Seznam obrázků

1	Řez lidským okem. Převzato z [4]. . . . .	9
2	Relativní citlivost čípků v závislosti na vlnové délce. Převzato z [6]. . .	10
3	Závislost poměrné spektrální citlivosti oka na vlnové délce. Převzato z [7]. . . . .	12
4	Průběhy absolutních hodnot světelných účinností záření. Převzato z [7].	12
5	Funkční schéma zesilovače jasů obrazu. Převzato a překresleno z [9]. . .	14
6	Stínítko – princip. Převzato z [10]. . . . .	15
7	Pohled přes přístroje nočního vidění za použití zeleného a bílého fosfo- rového stínítka. Převzato z [11]. . . . .	16
8	Přehled základního rozdělení noktovizorů. Převzato z [12] [13]. . . . .	17
9	Rayleighovo kritérium. Převzato z [14]. . . . .	18
10	Test USAF – 1951 o kontrastu 100 %, 50 %, 30 %, 20 %, 10 %. . . . .	18
11	Test USAF – 1951. Převzato z [15]. . . . .	19
12	Měřicí sestava – vpravo: LAN light source, vlevo: kolimátor. . . . .	22
13	Pohled na osvětlený test USAF – 1951 přes kolimátor. . . . .	22
14	Pohled na neosvětlený test USAF – 1951. . . . .	22
15	Použitý jasoměr k určení jasů displeje a mobilní telefon jako silný zdroj záření. . . . .	23
16	Monokulární noktovizor MUM – 14. . . . .	24
17	Průběh měření v zatemněné laboratoři firmy Pramacom-HT po 30 minutové adaptaci na tmu, za účasti pozorovatelů a pomocí měřicí sestavy NVS test station a noktovizoru MUM – 14. . . . .	27
18	Graf rozlišovací schopnosti oka v závislosti na osvětlení. . . . .	28
19	Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka mo- nokulárním a binokulárním přístrojem nočního vidění pro pozorovatele 1. . . . .	31
20	Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka mo- nokulárním a binokulárním přístrojem nočního vidění pro pozorovatele 2. . . . .	31
21	Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka mo- nokulárním a binokulárním přístrojem nočního vidění pro pozorovatele 3. . . . .	32

22	Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním a binokulárním přístrojem nočního vidění pro pozorovatele 4. . . . .	32
23	Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 1. . . . .	34
24	Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 2. . . . .	34
25	Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 3. . . . .	35
26	Závislost prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 4. . . . .	35
27	Závislost prostorové frekvence na kontrastu při pozorování neozbrojeným okem a při pozorování monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 1. . . . .	38
28	Závislost prostorové frekvence na kontrastu při pozorování neozbrojeným okem a při pozorování monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 2. . . . .	38
29	Závislost prostorové frekvence na kontrastu při pozorování neozbrojeným okem a při pozorování monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 3. . . . .	39
30	Závislost prostorové frekvence na kontrastu při pozorování neozbrojeným okem a při pozorování monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro pozorovatele 4. . . . .	39

## Seznam tabulek

1	Parametry optických členů. Převzato a upraveno z [5]. . . . .	10
2	Zdroje záření – jas. Převzato a upraveno z [5][16]. . . . .	19
3	Zdroje záření – osvětlení. Převzato a upraveno z [5][16]. . . . .	20
4	Doba adaptace oka po oslnění. . . . .	29
5	Tabulka závislosti prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním a binokulárním přístrojem nočního vidění pro všechny pozorovatele. Kde hodnoty rozlišené prostorové frekvence pro binokulární a monokulární noktovizor jsou vztaženy k hodnotám rozlišené prostorové frekvence bez oslnění přístrojem. . . . .	30
6	Tabulka závislosti prostorové frekvence na kontrastu při oslnění lidského oka monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy fosforového stínítka pro všechny pozorovatele. Kde hodnoty rozlišené prostorové frekvence pro zelený a bílý luminofor jsou vztaženy k hodnotám rozlišené prostorové frekvence bez oslnění přístrojem. . . . .	36
7	Tabulka závislosti prostorové frekvence na kontrastu při pozorování monokulárním přístrojem nočního vidění s různými typy luminoforu. Hodnoty rozlišené prostorové frekvence jsou vztaženy k pozorování bez přístroje. . . . .	37

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$\lambda$	vlnová délka
$\lambda_m$	základní vlnová délka
$K$	světelná účinnost fotonického vidění
$K'$	světelná účinnost skotopického vidění
$K''$	světelná účinnost mezopického vidění
$e$	elektron
$h$	Planckova konstanta
$f$	frekvence dopadajícího fotonu
$W_v$	výstupní práce
$E_k$	kinetická energie fotoelektronu
ZJO	zesilovač jasů obrazu
MKZJO	mikrokanálový zesilovač jasů obrazu
$I$	intenzita
$D$	průměr aperturní clony
$\psi$	úhlové rozlišení
$M$	kontrast
$L$	jas
$E$	osvětlení
$r$	vzdálenost osvětlené plochy od zdroje
$\theta$	úhel normály plochy vůči dopadajícím paprskům
$d\Phi$	změna světelného toku
$dI_\alpha$	změna svítivosti