

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

2016/2017

Bc. Josef Čmiel

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

Parametry veřejného osvětlení v mezopické oblasti  
The parameters of public lighting in the mesopic area

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Josef Čmiel**

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Parametry veřejného osvětlení v mezopické oblasti  
The parameters of public lighting in the mesopic area

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

- o Fyziologie lidského oka
- o Mezopické vidění
- o Parametry veřejného osvětlení z pohledu adaptačních jasů
- o Měření komunikace osazené LED
- o Měření komunikace osazené vysokotlakými sodíkovými výbojkami
- o Porovnání chování LED a vysokotlakých sodíkových výbojek v mezopické oblasti

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Sokanský, K.: Světelná technika. ČVUT, Praha 2011
- [2] Habel, J.: Světlo a osvětlování. FCC Public, Praha 2013
- [3] Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TU
- [4] Manuály k výpočetním programům (Relux, Dialux, WILS)

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Novák, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry

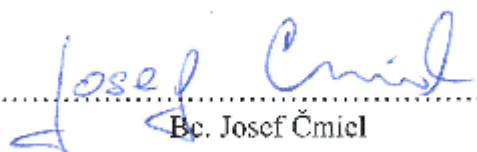


  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení Studenta

Prohlašuji, že jsem tuto předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny použité literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských prací.

V Ostravě, dne 28. 4. 2017

  
.....  
Bc. Josef Čmiel

## Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Tomášovi Novákovi, Ph.D. a panu Ing. Richardovi Balejovi za odbornou pomoc, cenné rady připomínky a ochotu věnovat svůj čas a zájem při zpracování této diplomové práce.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá parametry veřejného osvětlení v mezopické oblasti. V teoretické části je jedna kapitola věnována fyziologii lidského oka. V další kapitole je vysvětlena mezopická oblast a popsána její problematika. Poslední kapitola teoretické části je věnována parametrům veřejného osvětlení z pohledů adaptačních jasů, což je definováno normou.

V praktické části jsou pak jednotlivě popsány postupy měření komunikací, které jsou osvětlovány pomocí LED svítidel a vysokotlakých sodíkových výbojek a je zde taky popsán příklad výpočtu osvětlenosti pro mezopickou oblast. V poslední kapitole praktické části jsou srovnány vyhodnocené hodnoty z jednotlivých měření.

## **Klíčová slova**

Veřejné osvětlení, citlivost lidského oka, LED zdroje, mezopické vidění, mezopické systémy, mezopický jas, adaptační jas, náhradní teplota chromatičnosti, S/P ratio, fyziologie lidského oka, osvětlenost

## **Abstract**

This diploma thesis deals with parameters of public lighting in the mesopic area. In the theoretical part, one chapter is dedicated to physiology of the human eye. The next chapter explains the mesopic area and describes its problems. The last chapter of the theoretical part is devoted to the parameters of public lighting in terms of adaptive brightness, which is defined by the norm.

In the practical part, the approaches of measuring communication are individually described, which are illuminated using LED lights and high pressure sodium lamps. In addition to that the example of calculation of illumination is delineated on account of the mesopic area. The last chapter of the practical part compares the evaluated figures from the particular measurements.

## **Key Words**

Public light, human eye sensitivity, LED sources, mesopic vision, mesopic systems, mesopic luminance, adaptation luminance, correlated color temperature, S / P ratio, human eye physiology, illumination

# Seznam použitých symbolů a zkratek

## Seznam použitých zkratek

Symbol	Název
ČSN EN	Československá norma
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování
HPS	Vysokotlaká sodíková výbojka (high pressure sodium)
LED	Světelná dioda (light-emitting diode)
S/P ratio	Poměr skotopické spektrální citlivosti k fotopické spektrální citlivosti
tzn.	to znamená
tzv.	takzvaně
apod.	a podobně
SI	Základní jednotky SI (Le Système International d'Unités)
USP	United system of Photometry
MOVE	Mesopic Optimisation of Visual Efficiency

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Název	Jednotka
$E_m$	Průměrná osvětlenost	[lx]
$E_{min}$	Minimální osvětlenost	[lx]
$L$	Jas	[cd/m <sup>2</sup> ]
$R_a$	Index barevného podání	[-]
$S_\lambda$	Spektrální charakteristika zdroje	[lm/W]
$T_c$	Teplota chromatičnosti	[K]
$V(\lambda)$	Křivka průběhu spektrální citlivosti zraku fotopického vidění	[lm/W]
$V'(\lambda)$	Křivka průběhu spektrální citlivosti zraku skotopického vidění	[lm/W]
$V''(\lambda)$	Křivka průběhu spektrální citlivosti zraku mezopického vidění	[lm/W]
$\lambda$	Vlnová délka	[nm]
$L_a$	Adaptační jas	[cd/m <sup>2</sup> ]
$\bar{L}$	Průměrný jas povrchu pozemní komunikace	[cd/m <sup>2</sup> ]
$A$	Rozsah akomodace	[D]
$r_1$	Vzdálenost blízkého bodu	[m]
$r_2$	Vzdálenost vzdáleného bodu	[m]
$f$	Frekvence	[Hz]
$I_e$	Zářivost	[W/sr]
$K_m$	Maximální hodnota spektrálního průběhu fotopické oblasti	[lm/W]
$K'_m$	Maximální hodnota spektrálního průběhu skotopické oblasti	[lm/W]
$V_{mes}$	Vypočtená křivky citlivost zraku v mezopické oblasti	[lm/W]
$X$	Koeficient charakterizující poměr fotopické a skotopické křivky	[-]
$L_{mes}$	Vypočtený mezopický jas dle vztahu	[cd/m <sup>2</sup> ]

$L_p$	Fotopický jas	[cd/m <sup>2</sup> ]
$L_s$	Skotopický jas	[cd/m <sup>2</sup> ]
$x$	Koeficient závislý na úrovni jasu a spektru	[-]
$m$	Koeficient závislý na adaptačních podmínkách	[-]
$U_0$	Celková rovnoměrnost	[-]
$U_l$	Podélná rovnoměrnost	[-]
$TI$	Prahový přírůstek	[%]
$R_{EI}$	Osvětlení okolí	[-]
$E_{min}$	Minimální osvětlenost	[lx]
$E_{sc,min}$	Minimální poloválcová osvětlenost	[lx]
$E_{hs}$	Průměrná polokulová osvětlenost	[lx]
$E_{v,min}$	Minimální svislá osvětlenost	[lx]
$E$	Osvětlenost	[lx]

## Obsah:

1	Úvod .....	- 1 -
2	Fyziologie lidského oka.....	- 3 -
2.1	Zrakový orgán a vidění.....	- 3 -
2.1.1	Fyziologický popis zrakového systému.....	- 3 -
2.1.2	Sítnice.....	- 7 -
2.1.3	Čípky a tyčinky .....	- 8 -
2.1.4	Spektrální citlivost lidského oka .....	- 10 -
2.1.5	Adaptace .....	- 10 -
2.1.6	Akomodace.....	- 12 -
2.1.7	Fotopické a skotopické vidění .....	- 13 -
3	Mezopické vidění .....	- 16 -
3.1	Proč se zabýváme mezopickým viděním.....	- 17 -
3.2	Problematika mezopického vidění.....	- 18 -
3.3	Poměr S/P – S/P ratio .....	- 19 -
3.4	Mezopické systémy .....	- 21 -
3.4.1	USP – Systém.....	- 22 -
3.4.2	MOVE – Systém .....	- 22 -
3.4.3	MES1 a MES2 – Systém .....	- 24 -
3.4.4	MES2 – Systém.....	- 25 -
4	Parametry veřejného osvětlení z pohledů adaptačních jasů .....	- 27 -
4.1	Části normy .....	- 27 -
5	Měření komunikace osazené LED.....	- 31 -
6	Měření komunikace osazené vysokotlakými sodíkovými výbojkami.....	- 40 -
7	Porovnání chování LED a vysokotlakých sodíkových výbojek v mezopické oblasti .....	- 46 -
8	Závěr.....	- 52 -
9	Seznam použité literatury:.....	- 54 -



# 1 Úvod

Veřejné osvětlování bylo realizováno již tisíce let před naším letopočtem, a to z důvodu každodenní přicházející tmy po západu slunce, která u lidí vytváří pocit strachu. Osvětlení bylo zpočátku realizováno pomocí různých hořících pochodní přes rozžíhané ohně v železných klecích, až po olejové lampy, které byly zavěšené na domech nebo uložené podél cesty nebo chodníku. V 19 století se začaly pro veřejné osvětlení používat plynové lampy, které ani ne po jednom století byly nahrazeny osvětlovacími svítidly napájené elektrickou energií. Jednalo se o svítidla různých žárovek, později přišly na řadu výbojky a v současné moderní době LED svítidla.

Veřejné osvětlení je v dnešní době velmi rozšířené. Jsou osvětleny města, vesnice, komunikace, chodníky, různé památky apod. Je důležité najít takový způsob řešení pro celý systém osvětlování, který je efektivní, optimální, a zároveň při něm dochází k eliminaci světelného znečištění. Toto všechno přispívá k lepšímu a bezpečnějšímu provozu na pozemních komunikacích. Obyvatele měst a obcí kladou stále vyšší nároky na veřejné osvětlení, spolu s nimi roste i energetická náročnost, kterou je nutno snižovat. Vznikají tedy nové možnosti snížení spotřeby elektrické energie, při kterých je však nutno dodržet požadavky na osvětlovací soustavu.

V dnešní moderní době, kdy se pro veřejné osvětlení začaly používat LED svítidla, která mají na rozdíl od ostatních typů svítidel lepší technické vlastnosti, se objevuje problematika mezopického vidění, které nachází oblast užití ve veřejném osvětlení nebo nouzovém osvětlení. A touto problematikou se v této diplomové práci budu zabývat. Mezopická oblast je oblast, ve které doposud není přesně popsána a definována citlivost lidského oka, jak je tomu například ve fotopické nebo skotopické oblasti. Důvod proč citlivost lidského oka v této oblasti není definována je, že se neustále mění v závislosti na adaptačním jasu a není konstantní jako u fotopické nebo skotopické oblasti.

V případě, kdy se lidské oko nachází v mezopické oblasti, začne pro proces vidění využívat oba druhy fotoreceptorů (čípky a tyčinky) a to v určitém poměru. V mezopickém vidění tedy vzniká smíšené vidění, které je závislé na adaptačním jasu a vyzařovaném spektru zdroje. Díky dobrému vyzařovanému spektru světelného zdroje LED v kratších vlnových délkách je vnímání světla u člověka lepší, protože v oblasti mezopického vidění je světlo pro pozorovatele subjektivně jasnější, než světlo z jakéhokoli jiného používaného světelného zdroje, jako je například vysokotlaká sodíková výbojka.

V teoretické části této diplomové práce bude popsána fyziologie lidského oka, kde budou popsány jednotlivé části zrakového systému s detailnějším popisem sítnice a fotoreceptorů. Dále zde bude popsána citlivost lidského oka v závislosti na adaptačních jasech, vysvětlení adaptace oka s uvedením a popsáním možných adaptačních mechanismů, vysvětlení principu akomodace oka a vysvětlení dvou základních oblastí vidění.

V druhém bodu bude popsána oblast mezopického vidění, na což naváže popis problematiky mezopického vidění s uvedenými příklady výskytu vidění od fotopické přes mezopickou a až po skotopickou oblast. Pak bude vysvětlen a definován poměr mezi skotopickou a fotopickou oblastí, taktéž budou popsány a definovány mezopické systémy a budou mezi sebou porovnány.

Další bod bude věnován parametrům veřejného osvětlení z pohledů adaptačních jasnů, kde budou popsány jednotlivé třídy osvětlení.

Následující část této diplomové práce bude praktická. Ve dvou bodech bude popsáno měření jednotlivých komunikací. Nejprve bude popsáno měření komunikace osvětlené pomocí LED svítidel. V tomto bodě bude popsáno místo měřeného úseku s uvedenými měřicími přístroji a postupem měření. Dále bude uveden příklad výpočtu a postup pro získání mezopické osvětlenosti. V následujícím bodě bude obdobným způsobem popsáno měření a vyhodnocení komunikace osvětlené pomocí vysokotlakých sodíkových výbojek.

V posledním bodu se bude nacházet zhodnocení měření komunikací osvětlené pomocí LED svítidel a vysokotlakých sodíkových výbojek. Budou uvedeny všechny výsledné hodnoty osvětlení a křivky pro naměřené adaptační jasy.

## 2 Fyziologie lidského oka

### 2.1 Zrakový orgán a vidění

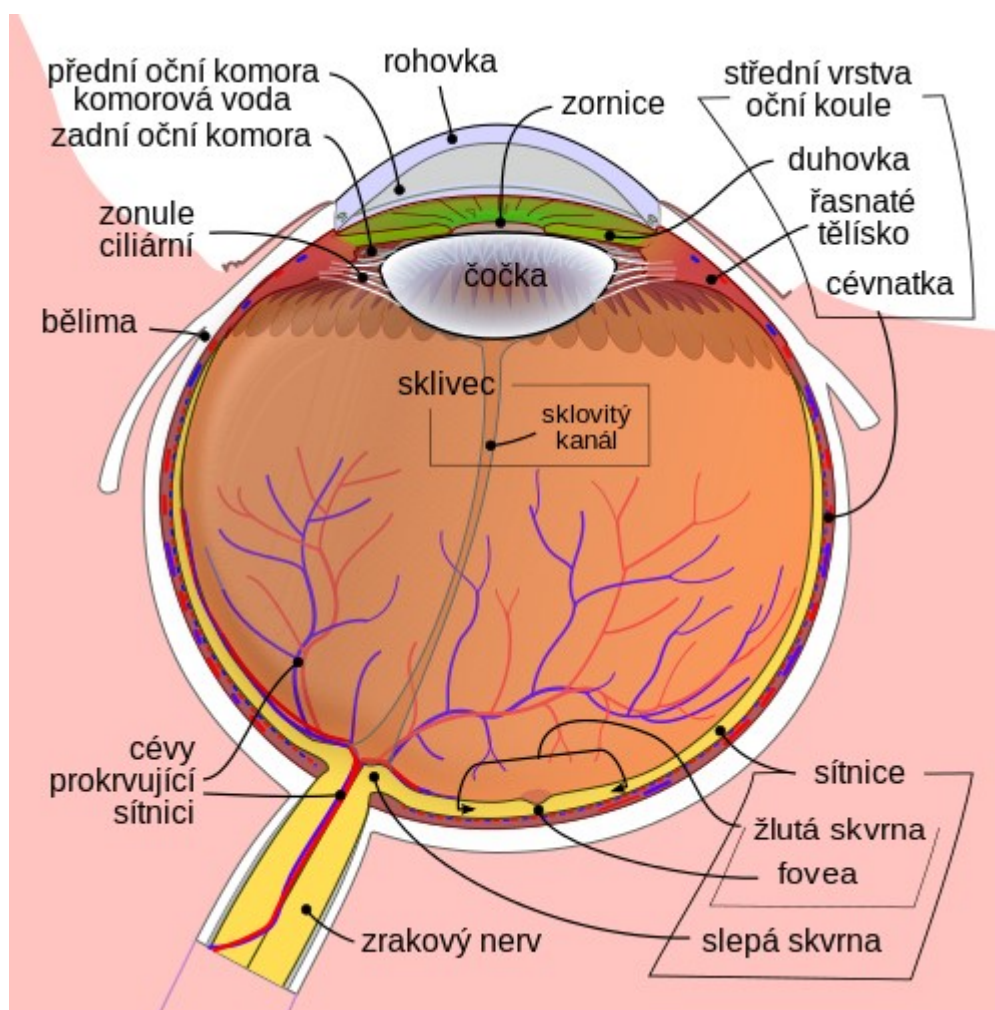
Má-li světelná technika přispívat k vytváření světelného mikroklimatu v osvětlovaných prostorech zabezpečující zrakovou pohodu, je třeba se seznámit se základy mechanismu, které vytváří zrakový počitek.

Zrak pro člověka je jedním z pěti smyslů, kterým byl vybaven. Zrak, je zařízení, které přijímá a zpracovává informace z okolního prostředí, díky kterému vnímáme 80 - 90 % všech informací, kde nositelem informací jsou světelné a barevné podněty. Tato informace je dále předána mozku ke zpracování, který vytvoří konečný obraz. Zrakový orgán netvoří pouze oko, ale řada zrakového ústrojí, které musí dokonale spolupracovat a zajišťují proces vidění a umožňuje tak člověku vnímat vnější prostředí.

#### 2.1.1 Fyziologický popis zrakového systému

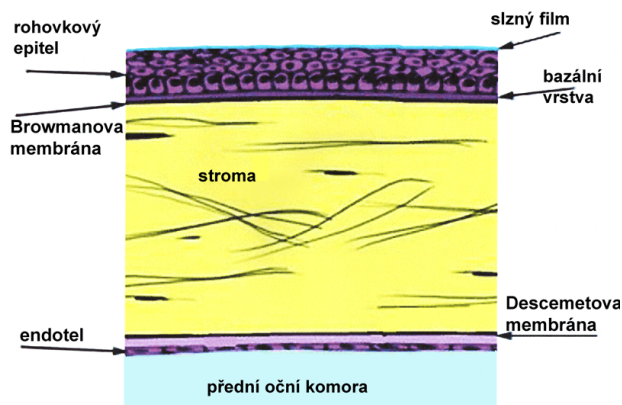
Zrakový systém je velmi komplikovanou anatomickou strukturou, která se skládá z různých částí, zajišťující příjem a přenos informací světelným podnětem a zpracování v komplex nervových podráždění, které tvoří zrakový vjem. Zrakový systém člověka se dělí na tři hlavní části. První část se nazývá část periferní a tvoří jí samotné oko. Nervové vzruchy, které se zrakovým nervem vedou k centrální části zrakového systému je část druhá, a jmenuje se spojovací část. Třetí část se jmenuje část centrální a nachází se v podkorové a korové části mozku, kde vzniká konečný zrakový počitek. [2]

Oko je smyslový orgán zraku, který se skládá ze světločivné vrstvy obsahující světlocitlivé buňky a optického systému, který usměrňuje paprsky tak, aby dopadaly na sítnici. To jsou ohybové svaly, víčka, spojivka a slzný aparát. Oční koule jsou symetricky uloženy v lebce v tzv. očnicích, má poloměr cca 12 mm, má přibližně kulový tvar, pro zajištění snadného a rychlého otáčení v očnici. Zadní stěna oka se skládá ze tří vrstev a to *bělima*, *cévnatka* a *sítnice*. [2]



**obr. 1** Schématický řez oční bulvou [21]

Oční rohovka uzavírá kruhový otvor o průměru asi 12 mm. U některých lidí může být daleko menší nebo naopak daleko větší. Povrch rohovky je pokrytý slzným filmem, který slouží jako ochrana pro rohovkový epitel. Rohovka je umístěná v přední části očního bělma, je průhledná čirá tkáň bez cév, je elastická a nejvíce zakřivená část vnější vrstvy oka. Je důležitou součástí aparátu oka lámající světlo. U dospělého člověka má rohovka uprostřed tloušťku cca. 0,6 mm, ve vnější oblasti 0,8 mm a skládá se z pěti vrstev obr. 2. Rohovka tvoří spolu se spojivkou, očním bělmem a slzným filmem mechanickou a chemicky nepropustnou bariéru mezi vnitřním a vnějším prostředím. Ve vnitřním prostředí je v kontaktu s komorovou tekutinou a ve vnějším prostředí hraničí se vzduchem. Rohovka se svou optickou mohutností je nejdůležitější částí optického aparátu a nejvíce se podílí na kvalitním vidění. Optická mohutnost rohovky je  $\pm 43$  dioptrií a představuje cca dvě třetiny celkové optické mohutnosti oka a společně s čočkou, která má optickou mohutnost  $\pm 20$  dioptrií, se podílí na lomu světla přicházejícího do oka. [21] [6] [8]



obr. 2 Přehledové schéma rohovky [6]

První vrstva se jmenuje rohovkový epitel má 4 – 6 vrstev buněk, které jsou na bazální vrstvě buněčného dělení. Odumírající buňky se z povrchu oka šupinově odlupují a jsou odplavovány pomocí slzného filmu. Tato vrstva se dobře a rychle regeneruje a je díky mnoha volným nervovým zakončením mimořádně citlivá na dotyk. [4]

Bowmanova membrána je druhou vrstvou rohovky. Za normálních okolností je transparentní, v případě poranění této vrstvy dochází k hojení jizvou, což způsobí snížení průhlednosti rohovky.

Stroma tvoří prostřední a základní vrstvu rohovky. Tvoří 90 % z celkové tloušťky rohovky, je tvořeno svazky kolagenních lamel uspořádaných většinou paralelně s povrchem rohovky.

Čtvrtá vrstva se jmenuje Descemetova membrána, která odděluje endotel od stromatu, má při narození tloušťku kolem 3  $\mu\text{m}$  a v dospělosti dosahuje velikosti 10  $\mu\text{m}$ . Je odolná vůči poraněním a infekcím a je bohatá na glykoproteiny.

Rohovkový endotel tvoří poslední vrstvu rohovky a je tvořen tenkou vrstvou buněk. Tyto buňky na rozdíl od rohového epitelu nemají schopnost regenerace. Pro dobrou optickou průhlednost rohovky je udržována v mírně dehydrovaném stavu, což je nezbytné pro optickou průhlednost rohovky. Dále rohovkový endotel odděluje rohovku od přední oční komory.

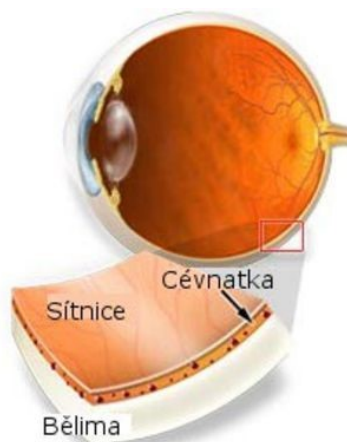
Řasnaté těleso je umístěno těsně za duhovkou. Má jemná četná vlákna, která vyběhají z povrchu řasnatého tělesa. Cévy jsou přiváděny kyslík a výživné látky, které také vyživují duhovku. Řasnaté těleso má za úkol plnit dvě důležité funkce oka. První funkcí je tvoření nitrooční tekutiny, která vyplňuje oční komory. Druhou funkcí je zajištění akomodace tedy ostrého vidění do dálky i do blízka podle toho, jak je v daném okamžiku potřeba. Akomodace oka probíhá pomocí změny tvaru čočky a tím i její tloušťky, což vede k zakřivení čočky, která je na řasnatém tělese zavěšena a je tak ovlivněn lom paprsků vstupujících do oka. [10]

Duhovka má tvar mezikruží, uprostřed má kruhový otvor, kde se nachází zornice (pupila), která umožňuje vstup světla do oka. Množství světelného toku vstupujícího do oka upravuje duhovka, pomocí hladkých svalů, které se buďto smršťují nebo uvolňují a mění tak průměr zornice, reguluje tedy dopadající světlo ve smyslu oslnění. Plocha duhovky obsahuje velké množství pigmentů, které určuje barvu očí (modré oči jsou méně pigmentované, zelené, šedé, hnědé jsou nejvíce pigmentované). [8] [34]

Sklivec vyplňuje dvě třetiny vnitřního prostoru oční koule. Je to čiré průhledné a bezbarvé gelovité médium s řídkou vláknitou strukturou. Neregeneruje se a vytváří se v embryonálním období. Za normálních okolností je čirý a tím umožňuje dobré optické zobrazení. Je z 98,5 % tvořen vodou. Ve stáří se může jeho struktura změnit, což vede k nepravidelnému ztluštění, což může omezovat vidění. Hlavní funkcí je udržení hladkého povrchu sítnice a udržování nitroočního tlaku. [17] [8]

Bělma, taky zvaná oční bělmo, se skládá z uspořádaných svazků kolagenních a elastických vláken. Slouží jako ochranný obal oční koule, tvoří pevný obal oka pro připojovací šlachy okohybných svalů a stará se o stabilitu oční koule. Tloušťka oční bělmy je v mezích 0,3 – 1,5 mm, kde v zadní části je silnější a nejslabší část je pod úpony okohybných svalů. Protože je bělma prakticky bezcévná, je proto bílé barvy, která se s věkem mění a to v období dospělosti je porcelánově bílá, ve stáří je nažloutlá z důvodu ukládání pigmentu z opotřebení. U dětí je částečně průhledná, což je dáno větším obsahem elastických vláken a vody, a prosvítající cévnatka ji lehce zabarvuje do modra. V přední části bělmy je otvor o průměru asi 12 mm, kde je umístěna rohovka, která zajišťuje vstup světla do oka. V zadní části bělmy jsou vystupující vlákna zrakového nervu a vstupující centrální sítnicová artérie a vena. [9]

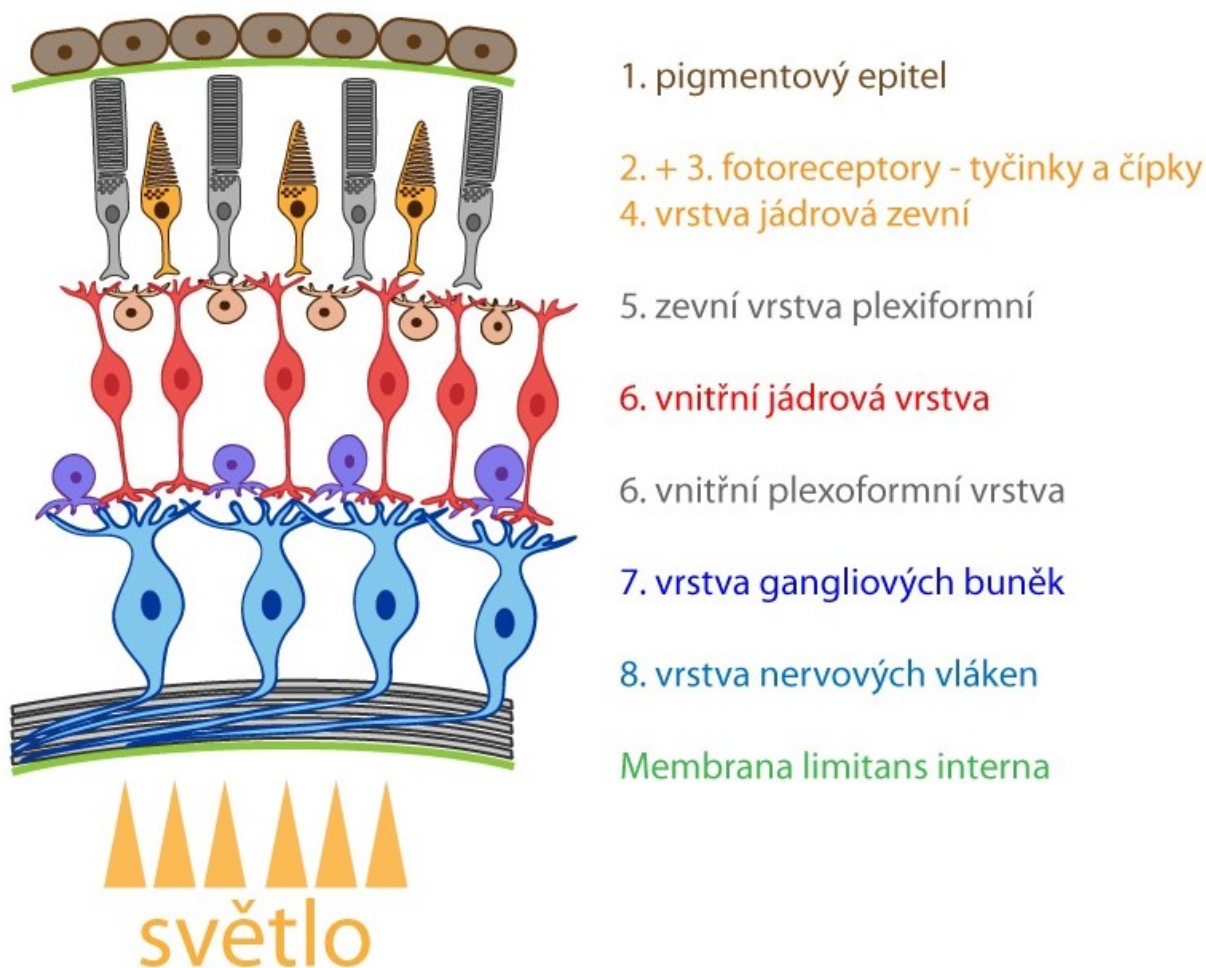
Cévnatka se nachází mezi bělimou a sítnicí a zaujímá dvě třetiny zadní stěny oční koule a je proto nejrozsáhlejší částí prostřední vrstvy. Je bohatá na cévy, které zajišťují jednotlivým částem oka výživu a dostatečné prokrvení. Je tvořena tenkou černohnědou blánou. Vnitřní strana cévnatky je bohatě pigmentovaná, zabraňuje rozptylu světelných paprsků do oka a pohlcuje nadbytečné světelné paprsky. Přední strana cévnatky je plynule napojená do řasnatého tělesa a na zadní straně je v cévnatce otvor, kterým prochází vlákna připojující se k okrajům zrakovému nervu. Na obr. 3 je znázorněno uložení bělma cévnatky a sítnice. [9] [8]



*obr. 3 Znázornění jednotlivých vrstev, které tvoří oční kouli [9]*

## 2.1.2 Sítňice

Sítňice je tenká průhledná a velmi komplikovaná část na vnitřní straně oka, kterou je možno rozdělit do několika vrstev viz obr. 4. Sítňice slouží jako receptor pro snímání a předzpracování světelných paprsků přicházející na sítňici skrze čočku. Jejím hlavním úkolem je přenést obraz na nervové impulsy. Proces zpracování světla v sítňici je v současné době předmětem zkoumání. [5] [18]



obr. 4 Struktura sítňice [4]

Pigmentové buňky zprostředkovávají procesy vidění. Nachází se mezi cévnatkou a smyslovými buňkami (čípky a tyčinky). Mají za úkol upravit světelné paprsky tak, aby v oku nevznikaly odrazy. V následujících vrstvách sítňice se nacházejí bipolární a gangliové nervové buňky, které mají za úkol zpracovávat přenos světelné informace na informaci nervového vzruchu. Ve světlocitlivých buňkách tedy čípky a tyčinky dochází vlivem působení světelných paprsků k chemické reakci vzniků nervových pochodů do centrální nervové soustavy. Látka nacházející se ve fotoreceptorech se nazývá rodopsin. Čípky a tyčinky se nacházejí ve foveální části (žlutá skvrna) sítňice, které mají přes gangliové buňky svůj jednotlivý vlastní výstup. V této oblasti se nachází nejostřejší vidění. Dalším typ světlocitlivých buněk

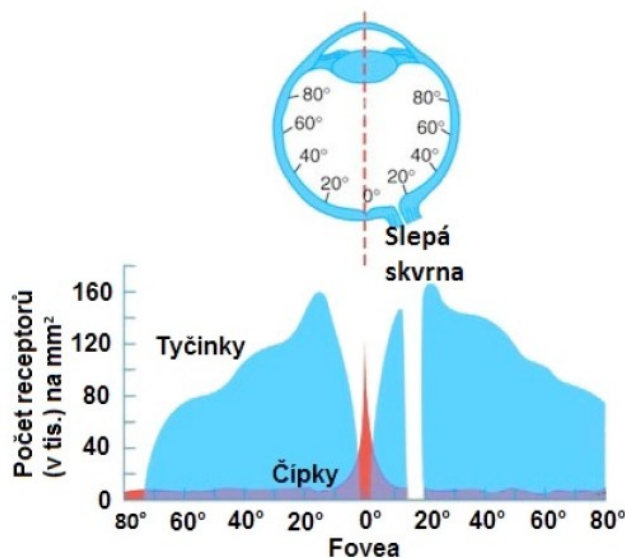


sítnice jsou tak zvané cirkadiální čidla, které v těle řídí mnoho biologických pochodů v závislosti na světle.[17] [18] [26]

Jak u bylo zmíněno sítnice je tvořena ze smyslových buněk a buněk bipolárních a gangliových. V neposlední řadě je sítnice také tvořena buňkami asociačními a podpůrnými, kde asociační buňky se dělí na buňky horizontální, které tvoří vzájemné spojení neuronů s tyčinkami a čípkami a vedou nervové vzruchy horizontálně a buňky amakrinní spojují gangliové buňky. Asociační buňky jsou spolu s bipolárními buňkami umístěny ve vnitřní jádrové vrstvě sítnice. Podpůrné buňky jsou podpůrná vlákna, mají vyživovací úlohu a prostupují všemi vrstvami sítnice. Bipolární mají úlohu zprostředkovatele mezi smyslovými a gangliovými buňkami. Ve foveální části existuje individuální spojení, což je propojení jednoho čípku na jednu bipolární buňku. Naopak difúzní propojení představuje propojení více smyslových buněk na jednu bipolární buňku a více bipolárních buněk na jednu gangliovou buňku. [5]

### 2.1.3 Čípky a tyčinky

Fotoreceptory, které tvoří primární smyslové buňky, se jmenují čípky a tyčinky. Čípků je v sítnici asi 6,5 miliónů a jsou nejvíce nahromaděny ke středu sítnice, což je oblast centrální jamky neboli fovey. V centrální jamce, má oko největší rozlišovací schopnosti, což je zapříčiněno spojením jednoho čípku s jednou gangliovou buňkou. Dokáže tedy rozlišit detaily řádů tisíců milimetrů a obsahuje asi 800 000 pouze čípkových receptorů. Průměr čípků je v rozmezí asi 0,005 až 0,006 milimetrů. [34] [2]



obr. 5 Rozložení čípku a tyčinek v oku [18]

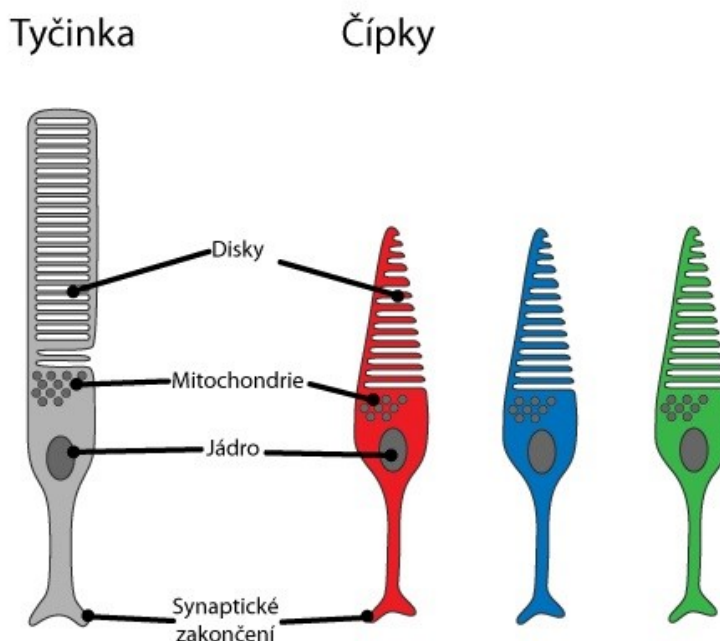
Čípky jsou fotoreceptory, které mají své největší uplatnění ve fotopickém vidění během jasného dne, kde zprostředkovávají barevné a ostré vidění. Čípky mají lahvovitý tvar. Svou funkci začínají vykonávat od jasu  $0,01 \text{ cd/m}^2$ . Za vidění, ve kterém se zúčastní pouze čípkové fotoreceptory, se považují jasy od  $10 \text{ cd/m}^2$ . Barevné vidění je zajištěno pomocí 3 druhů čípků, které jsou schopné přijímat světelné



paprsky o různých vlnových délkách. Červené čípky o vlnové délce 656 nm, zelené čípky o vlnové délce 535 nm a modré čípky o vlnové délce 420 nm. Vidění člověka je tedy trichromatické, tzn., že všechny další barvy se skládají mísením těchto tří základních barev. Mozek potom vyhodnotí barvu na základě elektro nervového signálu přicházející z těchto tří druhů čípku. U lidí s poruchou vnímání zelené a červené barvy dochází k barvosleposti. Na obr. 5 je znázorněno rozložení čípků a tyčinek na sítnici oka. [18] [4] [17] [7]

Fotoreceptory, které se uplatňují ve skotopické oblasti vidění, tedy v oblasti pod  $10 \text{ cd/m}^2$  a jsou schopné vytvořit pouze šedivý obraz, se jmenují tyčinky. Tyčinky jsou tedy nejvíce citlivé fotoreceptory na množství dopadajícího světla v noci, jsou schopné reagovat už na dopad jediného fotonu. V oku se jich nachází asi 125 miliónů hustěji uložených při kraji sítnice a v oblasti fovey se nenacházejí vůbec. Obsahují zrakový purpur rhodopsin, který se rozkládá na „opsin“ a „retinal“ vlivem dopadajících světelných paprsků. Je nejcitlivější v oblasti vlnové délky 500nm. Tyčinky jsou asi 1000 krát citlivější než čípky, je jich asi dvacetkrát více, než čípků a to vše je uloženo tak, aby se dosáhlo ve dne i v noci co nejlepší kombinace vidění. [7] [4]

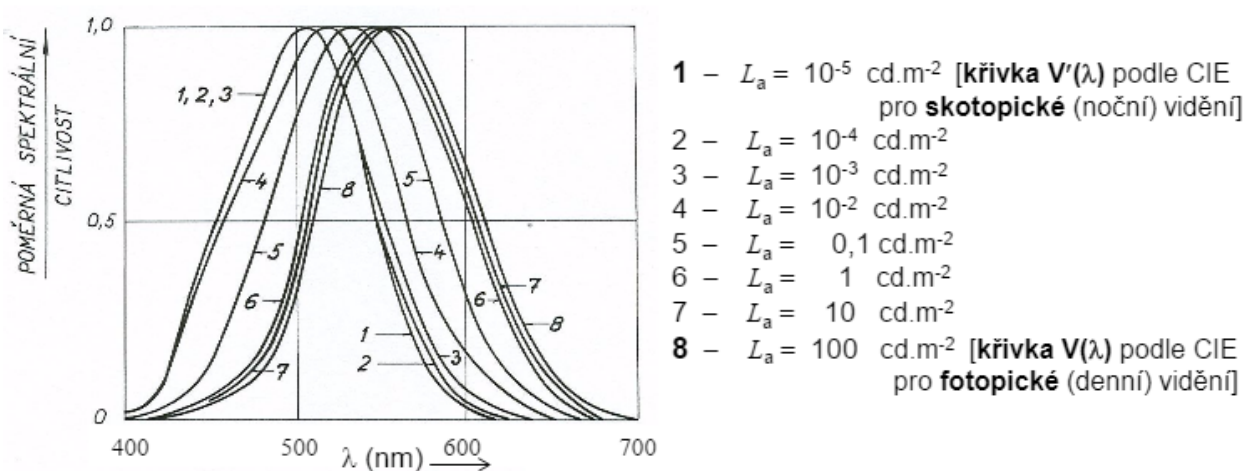
Při tyčinkovém vidění oko reaguje pomaleji než u čípkového vidění, což je dáno tím, že u tyčinkového vidění se oko pohybuje v nízkých jasech a tyčinky se musí seskupit, aby došlo k vyslání signálů do připojené gangliové buňky. Naopak u čípkového vidění se oko pohybuje ve vyšších jasech, kde čípky mají vlastní gangliovou i bipolární buňku. Na obr. 6 jsou zobrazeny RGB čípky a tyčinka. [17][18][7][4]



*obr. 6 Zobrazení tyčinky a RGB čípků [4]*

### 2.1.4 Spektrální citlivost lidského oka

Lidské oko reaguje na světelné paprsky v rozmezí vlnových délek 380 – 760 nm, což je malá část elektromagnetického vlnění. Rozmezí těchto vlnových délek není absolutní, protože lidský zrak je schopen vnímat i mimo rozmezí těchto vlnových délek, což závisí na vnímavosti jedince, na adaptaci oka, na intenzitě a podobně. Oko dosahuje maximální citlivosti při vlnové délce 555 nm (žlutozelené světlo). Při slabším osvětlení se citlivost oka posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám, jinými slovy, posouvá-li se citlivost oka od fotopického vidění ke skotopickému, postupně se snižují jasy červených ploch a rostou jasy ploch modrých. Tento jev (*Purkyňův jev*) popsal v roce 1825 český lékař, přírodovědec a filosof Jan Evangelista Purkyně. [2] [27]



**obr. 7** Křivky poměrné spektrální citlivosti zraku k záření různých vlnových délek pro různé adaptační jasy  $L_a$  [2]

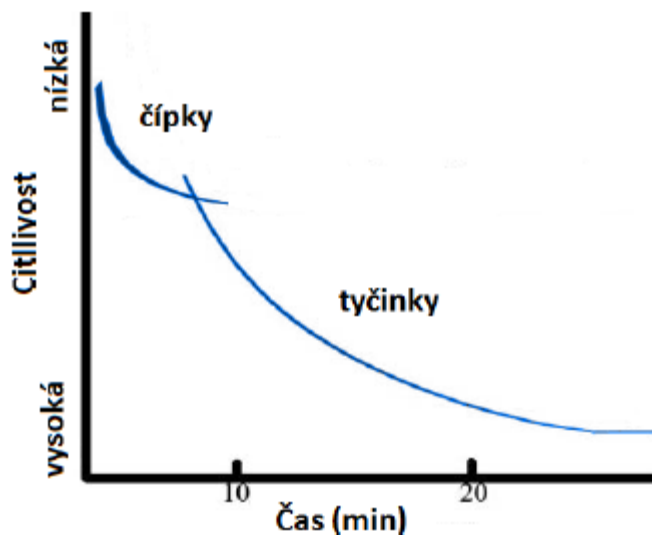
Na obr. 7 jsou znázorněny křivky poměrné spektrální citlivosti od skotopického nočního vidění k fotopickému dennímu vidění. Zde je možno vidět, že lidské oko se adaptuje na různé hladiny jasů od fotopické do skotopické oblasti. Proto přijala Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) dohodu o hodnotách spektrální citlivosti tzv. *normálního fotometrického pozorovatele*, která má zajistit jednotnost ve světelně technických výpočtech. Z pohledu normálního fotometrického pozorovatele je průběh spektrální citlivosti oka popsán jednou křivkou pro fotopické a skotopické vidění. Křivka číslo 8 znázorňuje fotopické vidění o vlnové délce 555 nm. Skotopické vidění pak znázorňuje křivka 1 s vlnovou délkou 507 nm. [2]

### 2.1.5 Adaptace

Adaptace je to schopnost přizpůsobení oka různým světelným hladinám. Oko je schopné přizpůsobovat se velkým změnám osvětlenosti tedy od  $0,25 \text{ lx}$  až do  $10^5 \text{ lx}$  a to pomocí změny citlivosti zornice někdy taky označováno jako fotopupilární reflex, dále změnou citlivosti fotoreceptorů sítnice a také změnou velikosti vjemových polí sítnice. Adaptaci oka můžeme tedy rozdělit na adaptaci na světlo a tmu.

Při adaptaci na světlo například při přechodu ze tmy na světlo, vnímá oko vlnové délky jako barvy a proto fotopické vidění se označuje jako barevné. V této oblasti je vidění zajištěno čípkami. Adaptace oka na světlo je rychlá, dosahuje hodnot okolo 0,15 sekund při přechodu ze tmy na světlo, ale na nové podmínky je oko zadaptované do šesti minut. [2]

Při adaptaci na malé jasy, dochází k přechodu fotopického vidění ke skotopickému. Jedná se o vidění, ve kterém je obraz nebarevný a neostrý. Tato adaptace trvá výrazně déle než u adaptace na světlo, její doba přechodu se pohybuje kolem 25 až 40 minut. Na obr. 8 je možno vidět průběh citlivosti oka při adaptaci na tmu, která se skládá ze dvou fází. V první fázi adaptace, která trvá kolem 8 minut a zvyšuje se citlivost čípků. Ve druhé fázi adaptace jsou zastoupeny tyčinky, jde o pomalý průběh adaptace, který trvá asi 30 minut. [2]



obr. 8 Průběh citlivosti oka při adaptaci na tmu [18]

K adaptaci oka používá zrakový systém různé adaptační mechanismy. Jeden ze základních adaptačních mechanismů je fotopupilární reflex, kde se jedná o změnu průměru zornice, která na sítnici propouští jen požadované množství světla. Tento proces se označuje za velmi rychlý s dobou trvání asi 380 ms, při kterém plocha zornice je schopná se měnit v poměru 1:20. Je to nejjednodušší proces a neoznačuje se jako příliš účinný, proto je zrakový systém vybaven další řadou účinnějšími adaptačními mechanismy. [2]

Za nejdokonalější adaptační mechanismus je považuje změna průměru vjemových polí sítnice, kde nastávají procesy nervové adaptace. Průměru vjemových polí sítnice se mění podle intenzity osvětlení. S rostoucí intenzitou se průměr těchto polí zmenšuje a při adaptaci na tmu se naopak zvětšuje, aby na sítnici dopadal větší počet fotonů. [2]

Fotometrický dej je dalším adaptačním mechanismem, který probíhá ve vnějších segmentech fotoreceptorů. Fotony dopadající na sítnici, jsou při adaptaci na vyšší jasy pohlcovány pigmentem, který

je konkrétní pro každý druh světlo citlivých buněk v sítnici. Rychlost rozpadu tohoto fotopigmentu závisí na zmiňovaném jasu a vlnové délce nového světelného podnětu. Po rozpadu fotopigmentu se tyčinky vybělí a přestanou se účastnit na procesu vidění. [2]

### 2.1.6 Akomodace

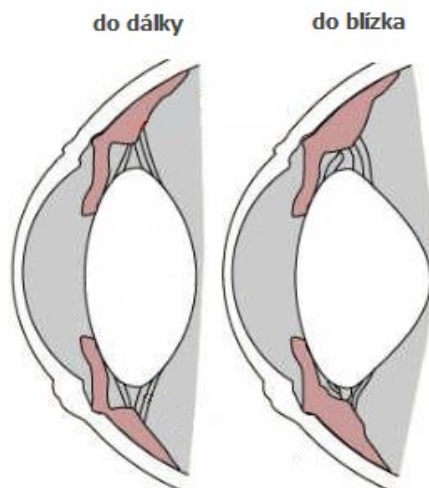
Akomodace oka je schopnost zaostření na různě vzdálené předměty. Toho je docíleno pomocí optického systému, který se musí přizpůsobit. Mění se optická mohutnost oka (dioptrie). Lomivost optického prostředí zajišťuje čočka, kdy dochází k zakřivení její přední ale i zadní stěny vlivem řasnatého tělíska. Zakřivení čočky do blízka a do dálky je znázorněno na obr. 9. Rozlišují se dva body akomodace, které leží na optické ose oka, tzv. blízky bod akomodace, je to nejbližší bod, ve kterém oko vidí ostře a naproti tomu bod, který je nejdále vzdálený a dokáže se přizpůsobit pro ostré vidění, se označuje jako daleký bod. Blízky bod se s rostoucím věkem vzdaluje, kde v patnácti letech se tento bod pohybuje kolem 9 cm a v padesátých asi 50 cm. Na základě toho se určuje rozsah akomodace, který rozdíl převrácených hodnot vzdáleného a blízkého bodu. Rozsah akomodace je měřen v dioptriích a je dán vztahem: [2]

$$A = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \quad (1)$$

$A$  – je rozsah akomodace

$r_1$  – je vzdálenost blízkého bodu (m)

$r_2$  – je vzdálenost vzdáleného bodu (m)

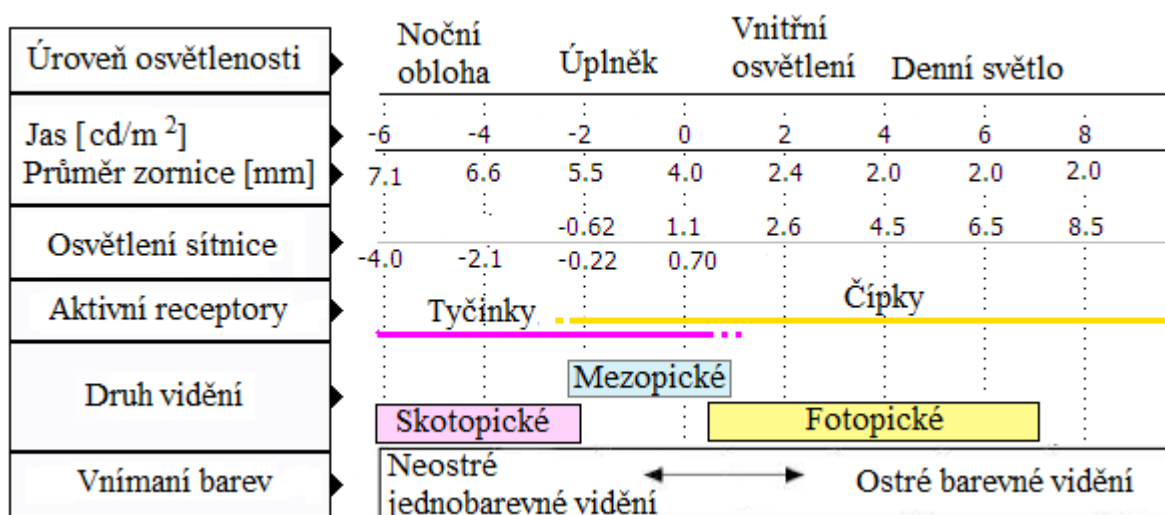


**obr. 9** Zakřivení čočky do dálky a do blízka [28]

Účinnost akomodace je ovlivňována zejména dvěma faktory a to výkonnosti ciliárního svalu, což je fyziologická akomodace, která je nutná ke změně lomu oka o 1D a elasticitou čočky, což je fyzikální deformace čočky, která se měří v dioptriích. Výkon akomodace o 1D odpovídá zvětšení lomivého optického systému o 1D. [29]

### 2.1.7 Fotopické a skotopické vidění

Existují tři skupiny vidění, kterým přísluší určité rozmezí jasů. Jedná se o vidění fotopické, mezopické a skotopické. V každé z těchto tří skupin vidění se zapojují do funkce fotoreceptory v různé kombinaci. Grafické porovnání těchto tří skupin je zobrazení na obr. 10.

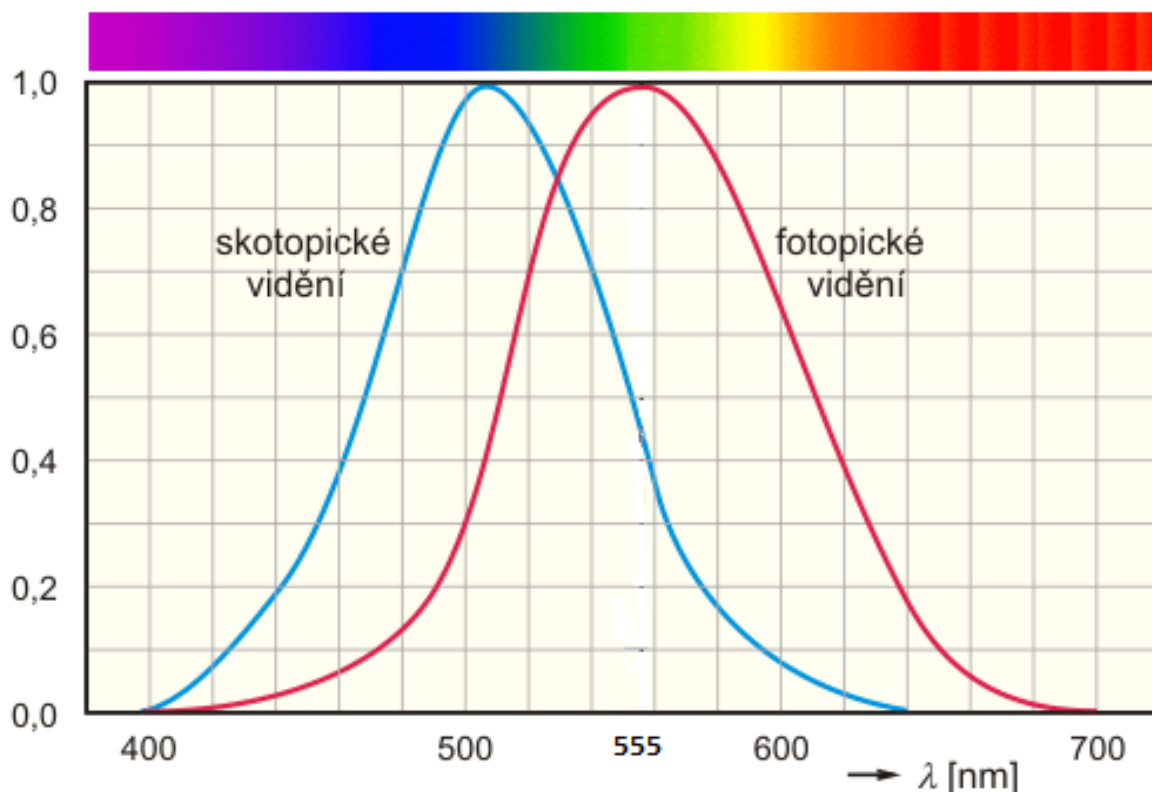


obr. 10 Grafické porovnání fotopického, mezopického a skotopického vidění [24]

Fotopické vidění  $V(\lambda)$  je vidění, které je registrováno během denního světla. Jas, o kterém je možno říci, že odpovídá, nebo ve kterém již probíhá proces fotopického vidění, není doposud pevně mezinárodně stanoven. Uvažuje se, že při hladinách jasu kolem  $3 \text{ cd/m}^2$  jsou splněny podmínky denního vidění. Rozsah jasů s uvedenými příklady je znázorněn na obr. 16. Při denním (fotopickém) vidění je světlo dopadající do oka zprostředkováváno především čípky, které umožňují barevné vidění a jsou nejvíce koncentrovány v centrální části sítnice, ve foveální oblasti neboli žlutá skvrna, které také udávají maximální citlivost oka v těchto světelných podmínkách. Ve fotopickém vidění je citlivost oka popsána křivkou  $V(\lambda)$  a její maximum odpovídá vlnové délce 555 nm o hodnotě 683 lm/W viz obr. 13. Na obrázku obr. 11 je možno vidět, že křivka fotopického vidění má své maximum v zelenožluté oblasti.

Skotopické vidění  $V'(\lambda)$  je na rozdíl od fotopického vidění registrováno v noci. V této oblasti se adaptační jasy pohybují ve velmi nízkých hodnotách, které se uvádí nižší než několik setin či dokonce tisícín  $\text{cd/m}^2$ . Při nočním (skotopickém) vidění jsou uplatňovány výrazně citlivější fotoreceptory a to tyčinky, které tvoří spíše šedivé vidění (nedokážeme rozlišovat barvy), jsou rozmístěny v okolí žluté skvrny a v dalších krajních oblastech sítnice. Ve skotopickém vidění je citlivost oka popsána křivkou

$V'(\lambda)$  a její maximum odpovídá vlnové délce 507 nm o hodnotě 1700 lm/W viz obr. 13. Křivka skotopického vidění své maximum nachází v zelenomodré oblasti, což je možno vidět z obr. 11. Z obrázku je taky vidět, že křivka téměř nezasahuje do vlnových délek červené barvy, což znamená, že červenou barvu vidíme v této oblasti velmi špatně na rozdíl od modré barvy. Oko ve skotopické oblasti rozlišuje změny jasů až 10x pomaleji, přitom je stejně citlivé při všech jasech této oblasti. Skotopické vidění z hlediska hodnocení osvětlovacích soustav v praxi nemá význam.



**obr. 11** Křivky skotopického a fotopického vidění [30]

Na obr. 12 je ukázka porovnání vidění skotopického, mezopického a fotopického. Za normálních podmínek kdy člověk vnímá barvy, pracuje zrak člověka v oblasti fotopického vidění, kde ve funkci fotoreceptorů jsou zejména čípky. V mezopické oblasti se musí zrakový orgán přizpůsobit jasům, které se nacházejí mezi fotopickou a skotopickou oblastí. Ve funkci fotoreceptoru v mezopické oblasti jsou v určitém poměru čípky i tyčinky, proto zde není dosaženo plného barevného vidění, jak tomu bylo u fotopické oblasti. Ve skotopické oblasti jsou pak ve funkci pouze tyčinky, které jsou charakteristické vysokou citlivostí ale šedivým viděním.



**obr. 12** Porovnání vidění ve skotopické, mezopické a fotopické oblasti [11]

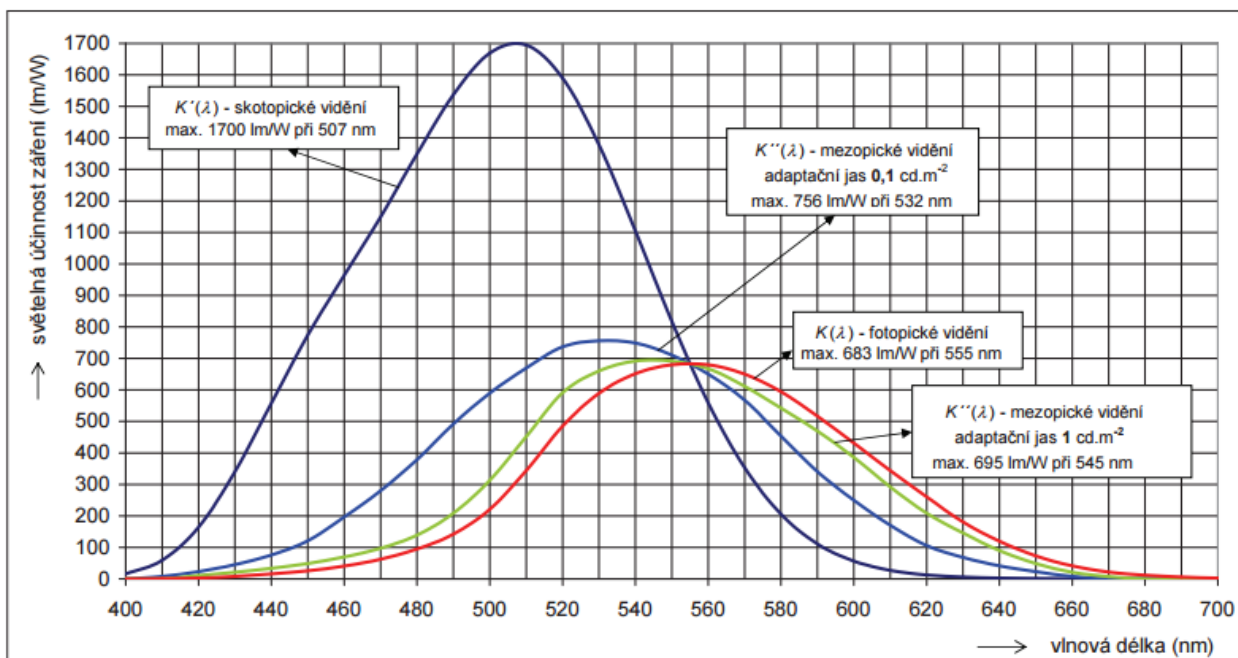
Oblast mezi fotopickou a skotopickou oblastí se jmenuje mezopická oblast a je popsána v následující kapitole.



### 3 Mezopické vidění

Mezopická oblast pokrývá celou škálu jasů mezi noční skotopickou a denní fotopickou oblastí. Typickým příkladem kde má smysl se zabývat mezopickým viděním je silniční a pouliční osvětlení, venkovní osvětlení a další noční dopravní prostředí, kde zrak člověka zhodnocuje osvětlenost dle mezopických křivek citlivosti. Jinými slovy je to oblast adaptačních jasů nacházející se v rozmezí od  $0,001 \text{ cd/m}^2$  do  $10 \text{ cd/m}^2$ . Jestliže v mezopické oblasti u centrální jamky (fovea) kde se nachází pouze čípky, začne klesat jas, začne taky klesat bez výrazné změny spektrální citlivosti absolutní citlivost. Doposud nedošlo k mezinárodně uznávanému systému mezopické fotometrie. To znamená, že vhodné metody k vyhodnocení vizuální účinnosti světelných produktů a instalací v mezopické oblasti nejsou dostupné. [12]

V mezopické oblasti vidění spektrální citlivost lidského vizuálního systému není konstantní, ale mění se s úrovní adaptačního jasů okolí. To je díky měnícímu se podílu tyčinek a čípku v oční sítnici. Reakce tyčinek umístěných po obvodu sítnice postupně převládají nad čípky, což způsobí posunutí spektrální citlivosti do oblastí kratších vlnových délek, což má za následek zhoršení barevného vidění a rozlišování detailů. Skotopického vidění je dosaženo v situaci, kdy foveální vidění již není schopno reagovat na světelné podněty. K popisu mezopického vidění světelného účinku záření popisující spektrální citlivost zraku nestačí pouze jedna křivka, ale je potřeba křivek víc, které popisují změnu tvaru, i maximálních hodnot od fotopického ke skotopickému vidění viz obr. 13. [12]



obr. 13 Průběhy spektrálních citlivostí zraku pro fotopickou mezopickou a skotopickou oblast [19]



Z obr. 13 je možno vidět, křivky citlivosti protínající společný bod o vlnové délce 555 nm. V tomto bodě mají všechny křivky světelnou účinnost záření 683 lm/W. Díky rovnosti světelné účinnosti záření fotopického a skotopického vidění, je možno tvrdit o mezopickém vidění, že je kombinací fotopického a skotopického vidění.

Pro mezopickou oblast dlouhou dobu nebyly postupy měření a otázka řešení mezopického vidění se nebrala na vědomí. Přístroje pro fotometrii se pouze kalibrovaly ve fotopické oblasti, tedy při denním světle. Tato problematika se nedávno začala řešit a začaly se vymýšlet různé nové postupy měření, které by byla schopné zhodnocovat světelné parametry dle mezopických křivek citlivosti.

### 3.1 Proč se zabýváme mezopickým viděním

Proč je mezopické vidění důležité pro osvětlení? Na obr. 14 jsou dvě fotografie osvětlení komunikace různými svítidly. Na fotografii vpravo je osvětlená komunikace pomocí svítidla s vysokotlakými sodíkovými výbojkami. Fotografie vlevo je komunikace osvětlená LED svítidly. Za mezopických podmínek světelné zdroje s více modrobílým obsahem světla budou svítit jasněji než světelné zdroje s více žlutým obsahem světla i když mají stejný světelný výkon světla. Tento mezopický efekt má vliv na vyhodnocení LED osvětlení. [11]



**obr. 14** Porovnání osvětlení komunikace pomocí svítidel LED a vysokotlakých sodíkových výbojek [11]

Jinými slovy, má-li svítidlo vyšší světelný výkon než jiné svítidlo, nemusí to nutně znamenat, že vizuální výkon bude lepší. Již dlouho je známo, že mezopické vidění závisí na spektrálním složení

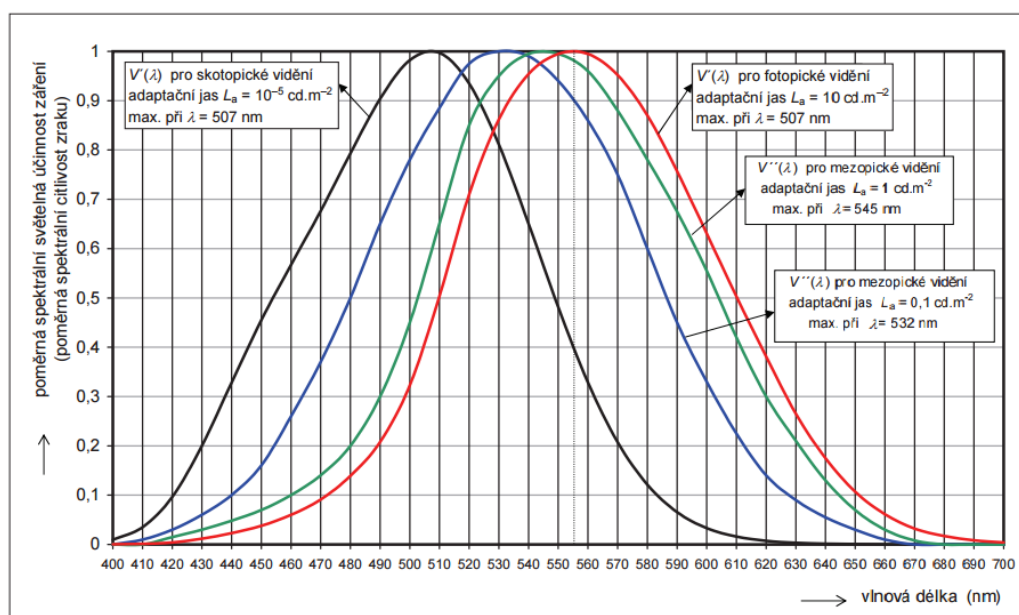
světelného zdroje a na velikosti adaptačního jasu okolí. Otázkou je jak nejlépe zhodnotit osvětlenost v mezopické oblasti. [11]

### 3.2 Problematika mezopického vidění

Problematikou mezopického vidění pro oblast světelné techniky je, že základní jednotkou v soustavě SI je 1 kandela, která popisuje svítivost zdroje, a jsou z ní odvozeny ostatní světelnotechnické veličiny. Podle usnesení 16. generální konference Míry a váhy z roku 1979 je jedna kandela rovna svítivosti zdroje, který vyzařuje monochromatické záření o frekvenci  $f = 540 \cdot 10^{12}$  Hz a zářivost tohoto zdroje je  $I_e = 1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ . [19]

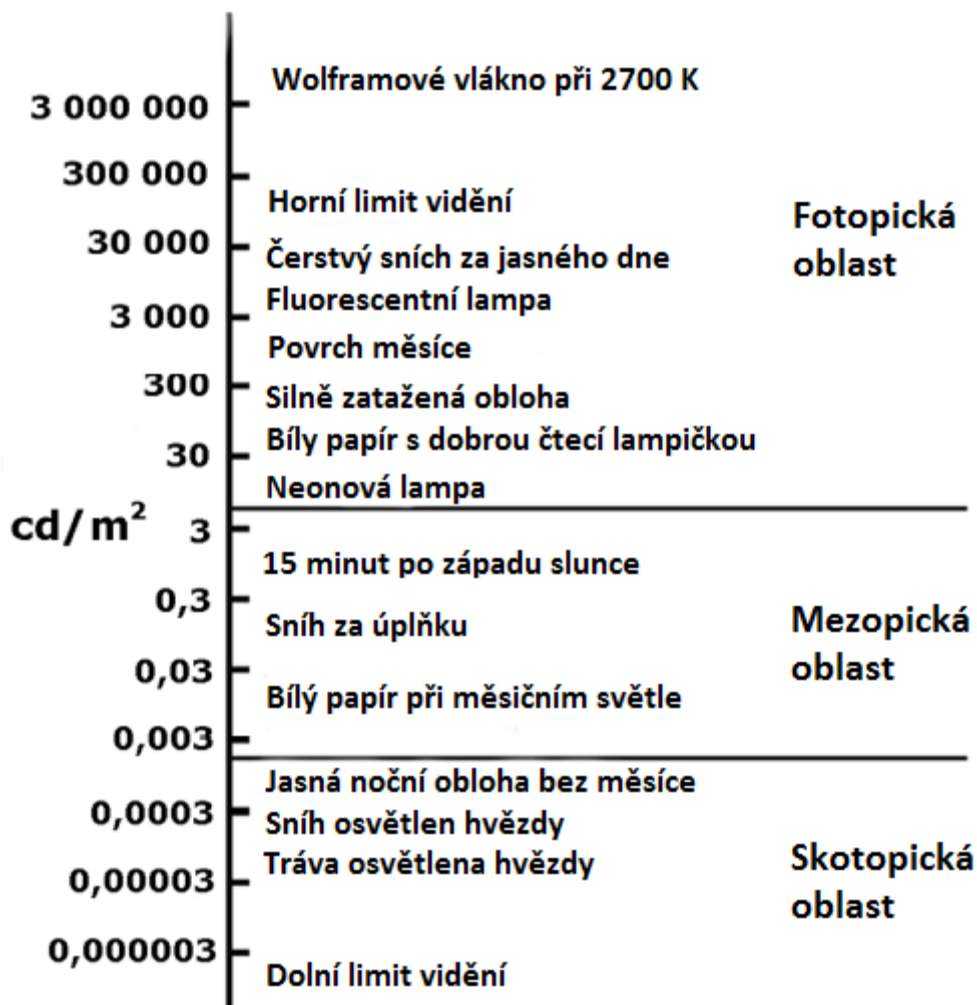
Jak už bylo uvedeno výše mezopické vidění je stav kdy oko využívá obou receptorů tedy čípků a tyčinek. Problematika v této oblasti, zejména u případu nouzového osvětlení kde jsou poměrně nízké jasy například  $0,1 \text{ cd/m}^2$  se citlivost lidského oka posouvá z barev teplejších, které pro fotopickou oblast mají vlnovou délku  $\lambda = 555 \text{ nm}$  směrem k studenějším barvám skotopické oblasti o vlnové délce  $\lambda = 507 \text{ nm}$ . Oko začne využívat fotoreceptorů s vyšší citlivostí pro vnímání studených barev s vyšší teplotou chromatičnosti. Z osobního hlediska pozorovatele jsou tedy lépe vnímané jasy nižších hodnot o nízké teplotě chromatičnosti.

Ve vnitřních prostorech s umělým osvětlením, kde adaptační jasy jsou kolem  $10 \text{ cd/m}^2$  se od křivky  $V(\lambda)$  průběhy spektrální citlivosti liší jen relativně málo, což je možno vidět na obr. 15. U umělého osvětlení ve venkovním prostoru se adaptační jasy pohybují v nižších hodnotách například  $0,1$  až  $1 \text{ cd/m}^2$  než v budovách, to je dáno tím, že v interiéru je prostor obklopen světelně činnými plochami, které také ovlivňují hladinu adaptačního jasu. [19]



obr. 15 Průběhy poměrných světelných účinností záření pro fotopické, mezopické a skotopické vidění [19]

Na obr. 16 je ukázka typické situace, kdy oko může být v každém provozním režimu. Okolní úroveň osvětlení vytvořeného pozicí slunce je téměř nezávislá na jeho pozici, toto platí až do té chvíle, kdy slunce zapadne na 5 – 10 stupňů nad horizont. Když je slunce vysoko nad horizontem, pak citlivost oka je přibližně konstantní. Jakmile je slunce nad horizontem začíná soumrak a mění se fotopické vidění na mezopické vidění a nakonec nastane skotopické vidění. Čistě skotopický provoz oka nastává pouze v případě, kdy neexistuje žádný významný zdroj světla. Dokonce i dobrý měsíční svit může zabránit plnému skotopickému vidění. [15]



obr. 16 Svítivost a vizuální režim v různých podmínkách oblohy [15]

### 3.3 Poměr S/P – S/P ratio

Jde o poměr příspěvku skotopického zářivého toku k fotopickému ve zdroji osvětlení. Určuje jas světelného zdroje a dále vysvětluje, proč daný světelný zdroj působí na lidský zrak stejně jasně, nebo dokonce jasněji, než jiné světelné zdroje s dvojnásobným příkonem. Například, LED zdroje s větším obsahem modré barvy bude mít větší poměr S/P než zdroje vysokotlakých sodíkových výbojek. LED

zdroje s vyšším S/P poměrem se zdají být jasnější než zdroje s nízkým poměrem S/P se stejným světelným výkonem za mezopických podmínek. [16]

Stejný světelný zdroj bude mít různé hodnoty zářivého toku pro skotopické a fotopické vidění protože křivky spektrální světelné účinnosti pro fotopické a skotopické vidění jsou odlišné. Poměr S/P popisuje zdroj, v jaké části spektra vyzařuje. Vztah pro výpočet poměru S/P je následující: [16]

$$S/P = \frac{K'_m \int_0^\infty S_\lambda(\lambda) V'(\lambda) d\lambda}{K_m \int_0^\infty S_\lambda(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

kde  $\lambda$  – je vlnová délka

$K_m$  – je maximální hodnota spektrálního průběhu veličiny  $K(\lambda)$ ,  $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$

$K'_m$  – je maximální hodnota spektrálního průběhu veličiny  $K'(\lambda)$ ,  $1700 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$

$S_\lambda$  – je spektrální charakteristika světelného zdroje

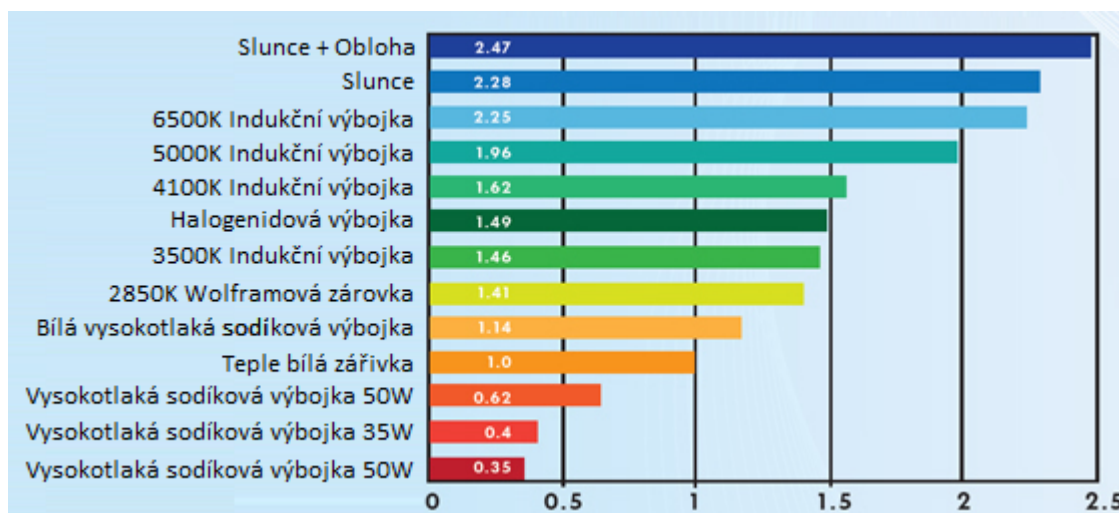
$V(\lambda)$  – je poměrná spektrální citlivost zraku pro fotopické vidění

$V'(\lambda)$  – je poměrná spektrální citlivost zraku pro skotopické vidění

Poměr S/P se zjišťuje porovnáním měření, které prakticky odpovídá mezinárodní normě pro osvětlování (CIE) a to měření světelného toku svítidla ve dvou různých oblastech vidění. Měření se provádí spektrometrem či speciálním luxmetrem, kde měřicí přístroj je nejprve kalibrován pro oblast fotopického vidění, poté následuje opakované měření, kde měřicí přístroj je kalibrován pro skotopickou oblast vidění. [16]

Výsledek poměru S/P se někdy nazývá „vnímaný světelný tok“, je ve formě bezrozměrného čísla, které je menší než 1 a odpovídá zdrojům, které vyzařují v oblasti delších vlnových délek vyzařovacího spektra, což je v čípkové oblasti vidění. U hodnot větších než 1 odpovídají zdroje, které vyzařují v oblasti kratších vlnových délek vyzařovacího spektra, kde převládá tyčinková oblast vidění. [16]

Na následujícím obrázku obr. 17 je zobrazeno porovnání poměru S/P pro řadu svítidel.



obr. 17 Hodnoty poměru S/P pro různé světelné zdroje [14]

Hodnota skotopického a fotopického poměru slouží, tedy jako ukazatel pro správnou volbu zdroje. Tato hodnota se v katalogu od výroby neuvádí a je potřeba ji vypočítat z naměřených hodnot. Získáme-li tuto hodnotu je možno vypočítat světelný tok pro skotopickou oblast z hodnoty světelného toku fotopické oblasti. Protože LED světelné zdroje působí ve skotopické oblasti jasněji, zvyšují tak ostrost vidění. Tato hodnota úzce souvisí s teplotou chromatičnosti světelného zdroje. To znamená, že světla s vyšší hodnotou teploty chromatičnosti mívají „chladnější“ světlo s výraznějším zastoupením modré barvy a proto jsou na sítnici oka účinněji stimulovány tyčinkové receptory, než svítidla s „teplejší“ teplotou chromatičnosti. Proto jsou svítidla s větším obsahem modré barvy „skotopický vylepšené“ světelné zdroje. V současné době se pro veřejné osvětlení s nižším jasnem začíná využívat světelných zdrojů s vyšším poměrem S/P, což jsou zdroje LED, které mají vyzařovací spektrum blíže skotopické křivce. [16][18]

### 3.4 Mezopické systémy

Jak víme lidské oko se v mezopické oblasti jednotlivě adaptuje na každý jas. Je proto nutné vytvořit systém, který dokáže popsat chování zraku v celém spektru jasů mezopické oblasti. Zde nastává složitost mezopického systému, kde je potřeba popsat citlivost zraku funkcí a nelze tedy změřit jen jednu křivku jak u fotopického či skotopického vidění.

K popisu spektrální citlivosti oka v adaptačních jasech mezopického vidění vzniklo během vývoje několik systému, které byly vytvořené na základě měření. Mezinárodní organizace pro osvětlování CIE popisuje tyto systémy v oficiálním dokumentu a pro matematický popis spektrální citlivosti oka v mezopické oblasti doporučuje systém MES2.

### 3.4.1 USP – Systém

Systém USP neboli United system of Photometry, byl to první systém vytvořený v letech 1997 až 1998 autorem He a spol., který matematicky popisuje mezopické vidění. Tento systém vznikl na základě měření času reakce monokulárního pozorovatele, kde k osvětlení pozorovaného předmětu byly použité dva různě světelné zdroje a to vysokotlaká sodíková výbojka a halogenidová výbojka. Experimentu se zúčastnili 3 pozorovatelé. Na základě tohoto experimentu byl definován USP systém, který je v rozsahu jasů od 0,001 cd/m<sup>2</sup> do 0,6 cd/m<sup>2</sup>. [18] Výpočet je následující:

$$V_{mes}(\lambda) = XV(\lambda) + (1 - X)V'(\lambda) \quad (3)$$

$V(\lambda)$  - je poměrná fotopická spektrální citlivost zraku normálního fotometrického pozorovatele.

$V'(\lambda)$  - je poměrná skotopická spektrální citlivost zraku normálního fotometrického pozorovatele.

$X$  – je koeficient charakterizující poměr fotopické a skotopické křivky:

$$X = \frac{1}{0,599} L_{mes} - \frac{0,001}{0,599} \quad (4)$$

pro  $0 \leq X \leq 1$

$L_{mes}$  – je vypočtený mezopický jas dle vztahu:

$$L_{mes} = 0,834L_p - 0,335L_s - 0,2 + \sqrt{0,696L_p^2 - 0,333L_p - 0,56L_pL_s + 0,113L_s^2 + 0,537L_s + 0,4} \quad (5)$$

$L_p$  – je fotopický jas.

$L_s$  – je skotopický jas.

### 3.4.2 MOVE – Systém

Systém MOVE neboli z angličtiny Mesopic Optimisation of Visual Efficiency je systém vznikající ve spolupráci několika evropských vysokých škol. Na základě toho, se měření provádělo na více místech a byla tak minimalizována chyba měření. Vizi tohoto systému bylo vytvořit systém nebo model, který by popisoval situaci nastávající během řízení automobilu v noci. Vizuální výkon noční jízdy byl rozdělen do tří dílčích vizuálních úkolů charakterizované otázkami:

*Může to být vidět? Jak rychle? Co je to?*

*Může to být vidět?* Tato otázka souvisí s prahovým kontrastem objektu, při kterém řidič ještě dokáže rozeznat objekty ve svém zorném poli.

*Jak rychle?* Souvisí s reakční dobou. To znamená doba mezi začátkem vizuálního podnětu a odezvy detekování tohoto podnětu. Jinými slovy jak dlouho trvá detekovat řidiči detekovat objekt.

*Co to je?* Tato otázka se vztahuje k rozpoznání a identifikaci objektů tedy vnímání jemných detailů.

Na základě těchto otázek bylo provedeno měření, kterých se zúčastnilo 109 pozorovatelů. Tento systém je definován v rozmezí jasů  $0,01 \text{ cd/m}^2$  až  $10 \text{ cd/m}^2$ . [33]

Výpočet křivky citlivosti  $V_{\text{mes}}$  MOVE systému je následující:

$$V_{\text{mes}}(\lambda) = \frac{xV(\lambda) + (1-x)V'(\lambda)}{M(x)} \quad (6)$$

$V(\lambda)$  – je poměrná fotopická spektrální citlivost zraku pro normálního fotometrického pozorovatele.

$V'(\lambda)$  – je poměrná skotopická spektrální citlivost zraku pro normálního fotometrického pozorovatele.

$x$  – je koeficient závislý na úrovni jasu a spektru.

$M(x)$  – je normalizační funkce, která převede maximální hodnotu na 1.

Koeficient  $x$  se získává iteračním výpočtem:

$$x_{n+1} = 1,49 + 0,282 \log_{10} \left[ \frac{1}{M(x_n)} \left( x_n \frac{L_p}{1699} + (1-x_n) \frac{L_s}{683} \right) \right] \quad (7)$$

pro  $0 \leq x \leq 1$

Normalizační funkce  $M(x)$  je popsána vztahem:

$$M(x) = \max[xV(\lambda) + (1-x)V'(\lambda)] \approx 1 - 0,65x + 0,65x^2 \quad (8)$$

Hodnota mezopického jasu  $L_{\text{mes}}$  je dána vztahem:

$$L_{mes} = \frac{xL_p + (1-x)L_s (683/1699)}{x + (1-x)(683/1699)} \quad (9)$$

$L_p$  – je fotopický jas.

$L_s$  – je skotopický jas.

### 3.4.3 MES1 a MES2 – Systém

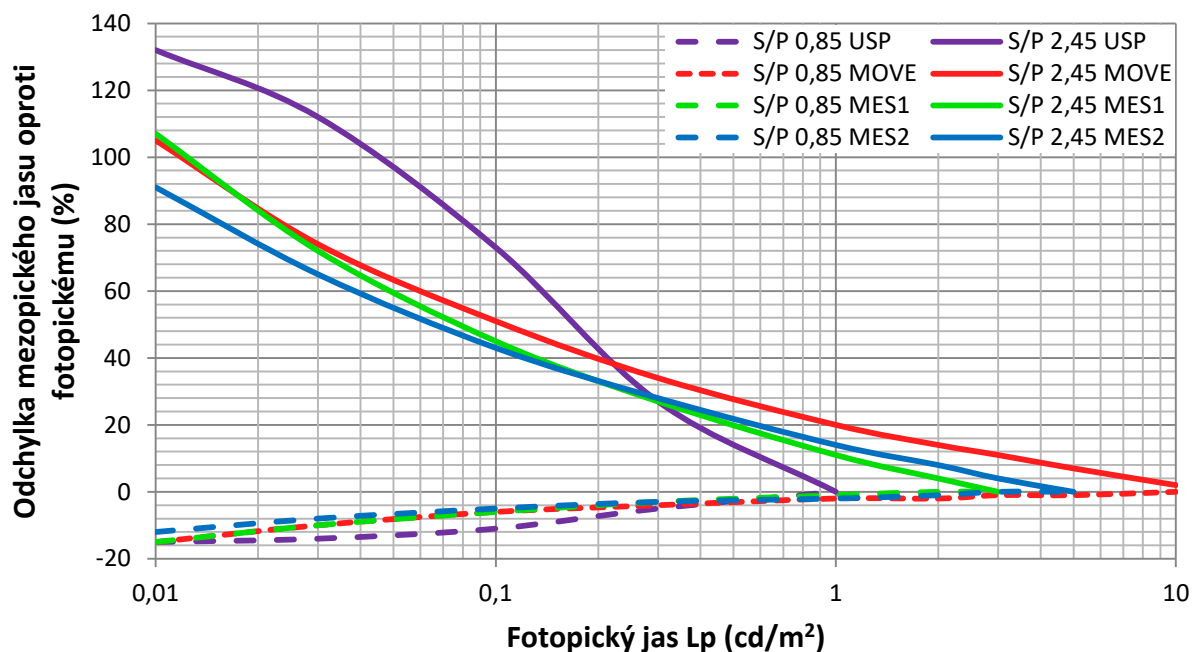
Systémy USP má určité nevýhody jako je například jednoduchý matematický popis, který tak není schopen poskytnout věrohodná data odpovídající skutečným podmínkám, nebo další nevýhodou je malý mezopický rozsah jasů, se kterým se počítá od 0,001 cd/m<sup>2</sup> do 0,6 cd/m<sup>2</sup>. U systému MOVE je nevýhodou zaměření se na úkony spojené s řízením automobilu v noci, dále rozsah jasů je v rozmezí 0,01 cd/m<sup>2</sup> až 10 cd/m<sup>2</sup>, kde hodnota 10 cd/m<sup>2</sup> se považuje za příliš vysokou. Mezinárodní komise CIE proto uvádí dva systémy MES1 a MES2, které odstraňují nevýhody systému USP a MOVE.

Základní vizi při tvorbě systému MES1 a MES2 bylo vytvořit systém, který bude počítat s rozumným rozsahem adaptačních jasů mezopického vidění a bude snadno aplikovatelný do současných metod měření.

Zmiňované systémy MES1 a MES2 se liší pouze koeficienty při výpočtu a rozsahem adaptačních jasů v mezopickém vidění, které pro systém MES1 jsou v rozmezí od 0,01 cd/m<sup>2</sup> do 3 cd/m<sup>2</sup>, kde pro hodnotu 3 cd/m<sup>2</sup> je vnímaný mezopický jas roven jasu fotopickému. Pro systém MES2 jsou adaptační jasy v rozmezí od 0,005 cd/m<sup>2</sup> do 5 cd/m<sup>2</sup>, kde hodnota 5 cd/m<sup>2</sup> odpovídá fotopickému vnímanému jasu.

[18]





**obr. 18** Porovnání jednotlivých mezopických systémů USP, MOVE, MES1 a MES2 pro zdroje s poměrem S/P 2,45 a poměrem S/P 0,85.

Na obr. 18 je porovnání uvedených modelů. Hodnoty jsou uváděny pro zdroj s poměrem S/P=2,45, kde tato hodnota odpovídá světelnému zdroji LED – studená bílá, a pro zdroje s poměrem S/P=0,85, což odpovídá vysokotlaké sodíkové výbojce. Z obrázku je možno vidět, že nejvíce nepřesný systém je USP s vysokým poměrem S/P. Křivky poměru S/P = 0,85 jsou takřka stejné až na USP systém. Nejvíce přesným systémem je považován MES2 systém. [17][18]

### 3.4.4 MES2 – Systém

Systém MES2 je doporučený systém mezinárodní komise pro osvětlování CIE. Tak jak předchozí systémy, tak i tento systém je popsán kombinací skotopické a fotopické křivky, která je vynásobená koeficientem. U systému MES2 se jedná o koeficient  $m$ . Jeho výpočet citlivostní křivky  $V_{mes}(\lambda)$  pro dané  $m$  je následující:

$$V_{mes}(\lambda) = \frac{mV(\lambda) + (1-m)V'(\lambda)}{M(m)} \quad (10)$$

$m$  – je koeficient závislý na adaptačních podmínkách.

$$m = 1 \text{ pro } L_{mes} \geq 5 \text{ cd/m}^2$$

$$m = 0 \text{ pro } L_{mes} \leq 0,005 \text{ cd/m}^2$$

$M(m)$  – je normalizační funkce, která převede maximální hodnotu na 1.

$V_{mes}(\lambda)$  – je poměrná spektrální citlivost zraku pro daný adaptační jas.

$V(\lambda)$  – je poměrná fotopická spektrální citlivost zraku pro normálního fotometrického pozorovatele.

$V'(\lambda)$  – je poměrná skotopická spektrální citlivost zraku pro normálního fotometrického pozorovatele. [18]

Křivky poměrné spektrální citlivosti  $V_{mes}(\lambda)$  jsou zobrazeny na obr. 15.

## 4 Parametry veřejného osvětlení z pohledů adaptačních jasů

Problematickou veřejného osvětlení se v české republice zabývá evropská norma, která nahradila starší normy z důvodu malého záběru této problematiky. Tato norma obsahuje nové značky i novou terminologii a je tvořená ze čtyř samostatných částí.

- ČSN CEN/TR 13201-1 (Část 1: Výběr tříd osvětlení)
- ČSN EN 13201-2 (Část 2: Požadavky)
- ČSN EN 13201-3 (Část 3: Výpočet)
- ČSN EN 13201-4 (Část 4: Metody měření)

V těchto částech normy se mezopické vidění neřeší. Je to z důvodu platnosti této normy, tedy rok kdy začala tato norma platit se mezopické vidění v praxi ještě neřešilo.

### 4.1 Části normy

První část normy obsahuje návod pro výběr tříd osvětlení a s ním související hlediska. Platí pro pevné osvětlovací soustavy, jejichž účelem je po setmění zajistit uživatelům veřejných pozemních komunikací dobrou viditelnost a přispět tak k bezpečnosti dopravy, výkonnosti komunikací a bezpečnosti osob a majetku. [31]

Osvětlení je podle normy rozděleno do několika tříd osvětlení:

Třídy osvětlení M: Třídy osvětlení M se vztahují na řidiče motorových vozidel pohybujících se po silnicích a dálnicích, ale v některých zemích také na místních komunikacích v sídelních útvarech, se střední až vysokou povolenou rychlostí. Dále se tyto třídy osvětlení vztahují na komunikace s mokřým povrchem v noci. Platí zde dodatečné požadavky na celkovou rovnoměrnost, aby nedošlo k významnému zhoršení parametrů osvětlení. [31]

Třídy osvětlení C: Tyto třídy se vztahují na řidiče motorových vozidel, v konfliktních místech jako jsou obchodní třídy, složitější křížení komunikací, okružní křižovatky a oblasti, kde se tvoří dopravní zácpy. Tyto třídy osvětlení platí i pro chodce a cyklisty. [31]

Třídy osvětlení P nebo HS: Třídy P nebo HS jsou určeny pro chodce a cyklisty pohybující se po chodnících a cyklistických stezkách, zpevněných krajnicích a ostatních částech pozemních komunikací,

kteřé leží odděleně nebo podél jízdního pásu, po komunikacích v obytných zónách, pěších zónách, parkovacích plochách, školních dvorech a podobně. [31]

Kritéria osvětlení tříd P jsou založeny na horizontální osvětlenosti na silnici a jsou vyjádřeny průměrnou a minimální osvětleností.

Kritéria osvětlení tříd HS jsou založeny na polokulové osvětlenosti na silnici a jsou vyjádřeny průměrem polokulové osvětlenosti a celkové jednotnosti tohoto osvětlení.

Třídy osvětlení SC: Doplnkové třídy osvětlení SC se používají v situacích, kde je nutné, aby osvětlení zajistilo rozpoznávání osob a předmětů a dále pro komunikace se zvýšeným rizikem kriminálního deliktu. [31]

Třídy osvětlení EV: Doplnkové třídy osvětlení EV se používají v případech, vyžadujících dostatečnou viditelnost svislých ploch, například na křižovatkách a podobně. [31]

Druhá část normy definuje jednotlivé třídy osvětlení. Třídy uvedené výše jsou definovány vlastní tabulkou, ve které jsou hodnoty následujících veličin: [32]

- Průměrný jas povrchu pozemní komunikace  $\bar{L}$  cd/m<sup>2</sup>
- Celková rovnoměrnost  $U_0$
- Podélná rovnoměrnost  $U_l$
- Prahový přírůstek  $TI$  (%) – míra zhoršení viditelnosti způsobeného omezujícím oslněním
- Osvětlení okolí  $R_{EI}$
- Průměrná osvětlenost  $\bar{E}$  (lx)
- Minimální osvětlenost  $E_{min}$  (lx)
- Minimální poloválcová osvětlenost  $E_{sc,min}$  (lx)
- Průměrná polokulová osvětlenost  $\overline{E_{hs}}$  (lx)
- Minimální svislá osvětlenost  $E_{v,min}$  (lx)

Na tabulce tab. 1 je specifikovaná třída M, kde nejpřísnější je třída M1, tedy čím nižší hodnota třídy tím je vyšší kvalita osvětlení. Zde je průměrný jas povrchu komunikace  $2 \text{ cd/m}^2$ . Při této hladině jasu lidské oko už nevnímá tak dobře barvy jako za bílého dne. Zhoršení viditelnosti není při této hodnotě ještě příliš velké, ale s rostoucí třídou bude rozpoznání barev horší. U třídy M6 je hodnota průměrného jasu povrchu komunikace  $0,3 \text{ cd/m}^2$  a rozpoznání barev bude samozřejmě nejhorší.

Tabulka tab. 1 specifikuje požadavky pro třídy osvětlení M. Tato skupina tříd taky specifikuje komunikace na mokřích a suchých podmínkách. Kritérium  $U_{0w}$  je pouze kritérium pro komunikace za mokřích podmínek. Může být aplikováno v dodatku pro suché vozovky v souvislosti se specifickými národními požadavky. Hodnoty umístěné v tabulce tab. 1 můžou být pozměněny, kde specifické národní požadavky nepřísluší.

Třída	Jas povrchu vozovky za suchých a mokřích podmínek				Omezující oslnění	Osvětlení okolí
	Suchý povrch		Mokřý povrch		Suchý povrch	
	$\bar{L} \text{ (cd/m}^2\text{)}$	$U_0$	$U_l$	$U_{0w}$	$TI \text{ (}\%\text{)}$	$R_{EI}$
<b>M1</b>	2	0,4	0,7	0,15	10	0,35
<b>M2</b>	1,5	0,4	0,7	0,15	10	0,35
<b>M3</b>	1	0,4	0,6	0,15	15	0,3
<b>M4</b>	0,75	0,4	0,6	0,15	15	0,3
<b>M5</b>	0,5	0,35	0,4	0,15	15	0,3
<b>M6</b>	0,3	0,35	0,4	0,15	20	0,3

**tab. 1** Výňatek tabulky z ČSN EN 13201-2. Třídy osvětlení M. [32]

Omezující oslnění TI je pro třídu M3, M4, M5 o 5 procentních bodů vyšší než u třídy M1 a M2 a třídy M6 o 10 procentních bodů vyšší než u třídy M1 a M2. Osvětlení pozemních komunikací zlepšuje zrakové podmínky, ale je také zdrojem omezujícího oslnění. Stupeň zdroje omezujícího oslnění závisí na typu použitých svítidel, dále na typu světelných zdrojů a na geometrickém uspořádání osvětlovací soustavy. Za světelné zdroje s nízkým jasnem se považují zářivky a nízkotlaké sodíkové výbojky, kde při použití těchto světelných zdrojů nebo jiných svítidel se stejným nebo nižším jasnem než mají tyto světelné zdroje lze připustit vyšší hodnoty prahového přírůstku TI. [32]

Kritérium oslnění okolí  $R_{EI}$  lze uplatnit pouze v případě, kdy k pozemní komunikaci nepřiléhá komunikace s vlastními požadavky. [32]

V tabulce tab. 2 jsou uvedeny třídy C, které se vztahují na řidiče motorových vozidel a jiné uživatelé pozemní komunikace v konfliktních oblastech jako jsou obchodní třídy, složitější křižování komunikací a podobně. Tyto třídy jsou definovány průměrnou vodorovnou osvětleností a celkovou rovnoměrností osvětlení. [32]

Třída	Vodorovná osvětlenost	
	$\bar{E}$ (lx)	$U_0$
<b>C0</b>	50	0,4
<b>C1</b>	30	0,4
<b>C2</b>	20	0,4
<b>C3</b>	15	0,4
<b>C4</b>	10	0,4
<b>C5</b>	7,5	0,4

**tab. 2** Výňatek tabulky z ČSN EN 13201-2. Třídy osvětlení C. [32]

V tabulce tab. 3 jsou uvedeny třídy osvětlení P a HS, které jsou určeny pro cyklisty a pěší pohybující se po komunikacích pro cyklisty nebo pěší. Třídy S jsou definovány průměrnou vodorovnou osvětleností a minimální vodorovnou osvětleností. Třídy osvětlení A jsou definovány průměrnou polokulovou osvětleností a celkovou rovnoměrností. [32]

Třída	Horizontální osvětlenost		Další požadavek je-li nutné rozpoznání obličeje		Třída	Polokulová osvětlenost	
	$E$ (lx)	$E_{min}$ (lx)	$E_{v,min}$ (lx)	$E_{sc,min}$ (lx)		$\bar{E}_{hs}$ (lx)	$U_0$
<b>P1</b>	15	3	5	5	<b>HS1</b>	5	0,15
<b>P2</b>	10	2	3	2	<b>HS2</b>	2,5	0,15
<b>P3</b>	7,5	1,5	2,5	1,5	<b>HS3</b>	1	0,15
<b>P4</b>	5	1	1,5	1	<b>HS4</b>	neurčeno	neurčeno
<b>P5</b>	3	0,6	1	0,6			
<b>P6</b>	2	0,4	0,6	0,2			
<b>P7</b>	neurčeno	neurčeno					

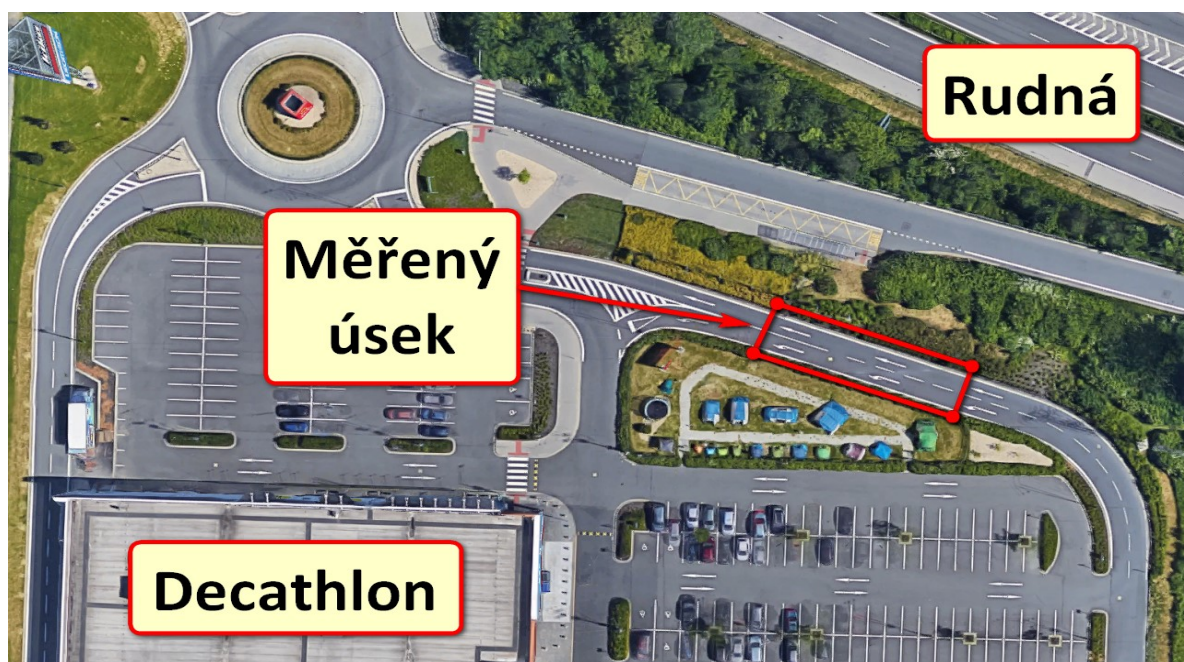
**tab. 3** Výňatek tabulky z ČSN EN 13201-2. Třídy osvětlení P a třídy osvětlení HS. [32]

V předposlední části normy jsou popsány předpoklady a postupy potřebné k výpočtům osvětlení na pozemních komunikacích.

Ve čtvrté a poslední části normy jsou uvedeny příklady protokolů a uvádí postupy pro fotometrická měření.

## 5 Měření komunikace osazené LED

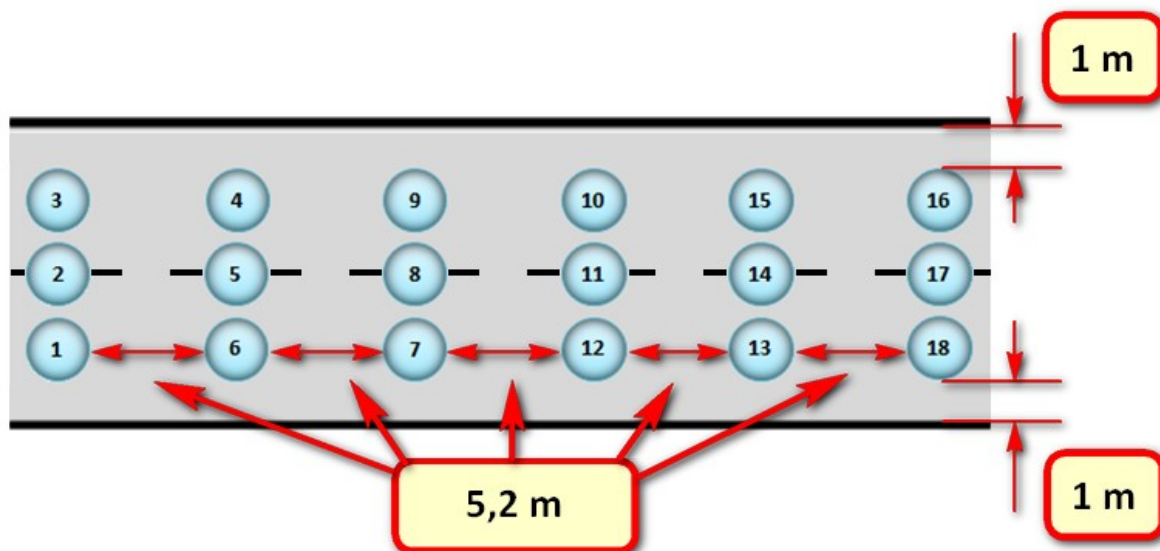
Pro měření komunikace osvětlené pomocí LED svítidly byla vybrána jednosměrná výjezdová komunikace nacházející se v Ostravě v lokalitě nákupního centra mezi komunikací Rudná a obchodního domu Decathlon. Měřený úsek svým východním koncem navazuje na parkoviště a západní část směřuje ke kruhovému objezdu, který slouží pro příjezd a odjez k obchodnímu domu Decathlon a dalších obchodů. Dále slouží pro připojení ke komunikaci Rudná a nákupního centra AVION Shopping Part Ostrava. Celá tato komunikace je osvětlena LED svítidly o náhradní teplotě chromatičnosti  $T_c$  cca 5700K, indexem podání barev  $R_a$  cca 60 a výkonem 60W. Na této komunikaci se také nachází přechod pro chodce, který se nachází na západní části. Na obr. 19 je znázorněná mapa měřeného úseku, na kterém jsou umístěny stožáry veřejného osvětlení, které jsou od sebe vzdáleny 26 metrů. Osvětlení komunikace je realizováno jako jednostranná osvětlovací soustava, kde svítidla jsou umístěny na stožárech vlevo ve směru jízdy.



obr. 19 Místo měřeného úseku. [35]

Měření bylo provedeno pomocí spektrofotometru EVERFINE SPIC-200 a jasového analyzátoru Canon EOS 350D. Pomocí spektrofotometru EVERFINE SPIC-200 byla změřena osvětlenost a spektrum světelného zdroje pro každý bod měřicí sítě. Toto měření nebylo prováděno podle normy. Byl to pouze experiment. Úlohou nebylo vyhodnotit, zda je tato komunikace nasvětlená podle normy, ale pouze bylo potřeba získat hodnoty osvětlenosti a spektra. Toto měření sloužilo jednak pro výpočty ale také pro porovnání naměřených hodnot s vypočtenými hodnotami. K získání těchto hodnot bylo potřeba navrhnout síť měřících bodů, tato síť měřících bodů je zobrazena na obr. 20. Bylo naměřeno celkem 18 bodů. Pozice měřených bodů je zřejmá z obr. 20. Pozice těchto bodů byla značena z toho důvodu, aby byla zjištěna

změna spektra a osvětlenosti v závislosti na vzdálenosti a poloze od svítidla a ověření přesnosti použitého měřicího přístroje, který pro měření osvětlenosti a vyzařovaného spektra používal dva senzory.



*obr. 20 Síť měřených bodů pro spektrální analýzu.*





obr. 21 Spektrofotometr EVERFINE SPIC-200.

Na obr. 21 je zobrazen měřicí přístroj spektrofotometr EVERFINE SPIC-200, který obsahuje dva měřicí senzory sloužící k měření spektra světelného zdroje a osvětlenosti. Pomocí programu SPIC-200 lze z naměřených hodnot získat hodnoty osvětlenosti nebo spektra pro vlnovou délku s krokem 1-10 nanometrů. Dále je možno získat kolorimetrický trojúhelník s vyznačenou čarou teplotních zdrojů, SDCM křivku což je standardní odchylka korespondence barev, dále spektrální křivku.

Měření jasové analýzy, které je důležité pro vyhodnocení v mezopické oblasti bylo realizováno pomocí jasového analyzátoru a sloužilo pro jasovou analýzu. Jedná se o fotoaparát zrcadlového provedení, firmy LMK viz obr. 22. Z naměřených hodnot je možno pomocí programu LMK LabSoft získat hodnoty fotopického jasu pro každý bod fotografie. Díky tomu je možné zjišťovat maximální, průměrné a minimální jasy různých měřených ploch v požadovaném umístění, tvaru a velikosti. Oblast adaptačního jasu byla počítaná jako aritmetický průměr všech jasů měřených na vymezené ploše jasového analyzátoru.



**obr. 22** Canon EOS 350D.

Při měření byl použit dlouhý objektiv. Měřicí přístroj byl umístěn ve výšce 1,5 metrů a ve vzdálenosti 60 metrů od měřeného úseku. Měřený úsek byl vyhodnocován v celé šířce vozovky mezi dvěma stožáry se svítidly. Jasovým analyzátozem se vyhotovilo několik snímků s různou dobou expozice, které se pak pomocí programu LMK LabSoft spojily tak, aby byly zachycené všechny jasy v měřeném poli a byly věrohodně vyhodnoceny.

Nastavení jasového analyzátoru je zobrazeno v tabulce tab. 4.

**tab. 4** Nastavení jasového analyzátoru Canon EOS 350D.

Čas uzávěrky [s]	Citlivost čipu ISO	Clona
1/8	200	F4

Pro získání osvětlenosti v mezopické oblasti bylo potřeba provést následující výpočet.

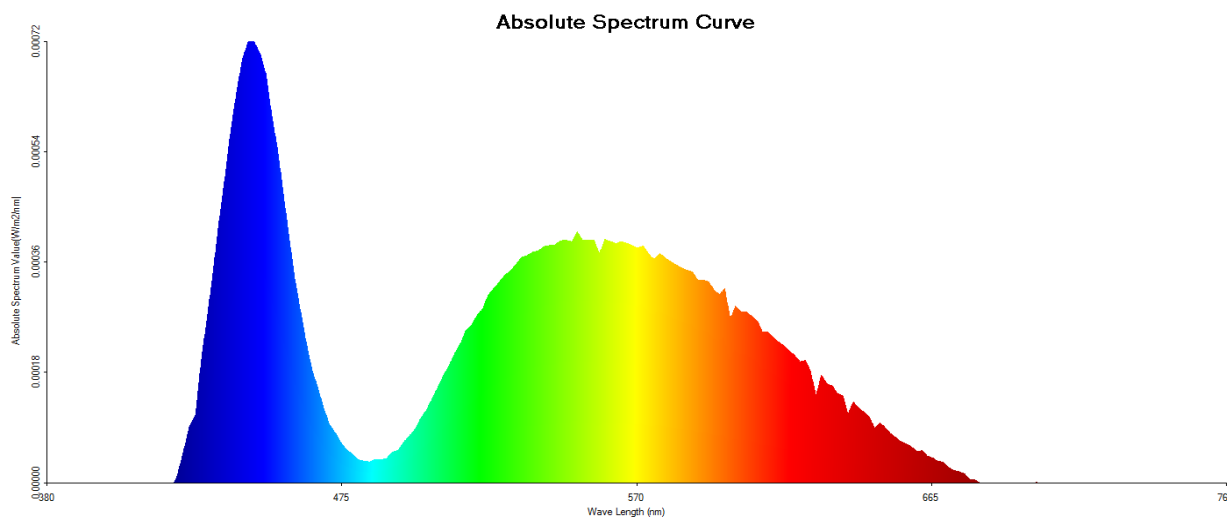
$$E = K_m \sum_{380}^{780} \Delta \text{AbsoluteSpectrum} \cdot \Delta V'' \quad (11)$$

E	Osvětlenost (lx)
Absolute Spectrum	Spektrální průběh světelného zdroje (W/m <sup>2</sup> /nm)
V''	Křivka spektrální citlivosti zraku pro mezopickou oblast (lm/W)
K <sub>m</sub>	Maximální světelná účinnost v mezopické oblasti pro adaptační jas 0,127 cd/m <sup>2</sup> 840 (lm/W). Tato hodnota charakterizuje maximální množství lumenu, které je možno získat z jednoho wattu.

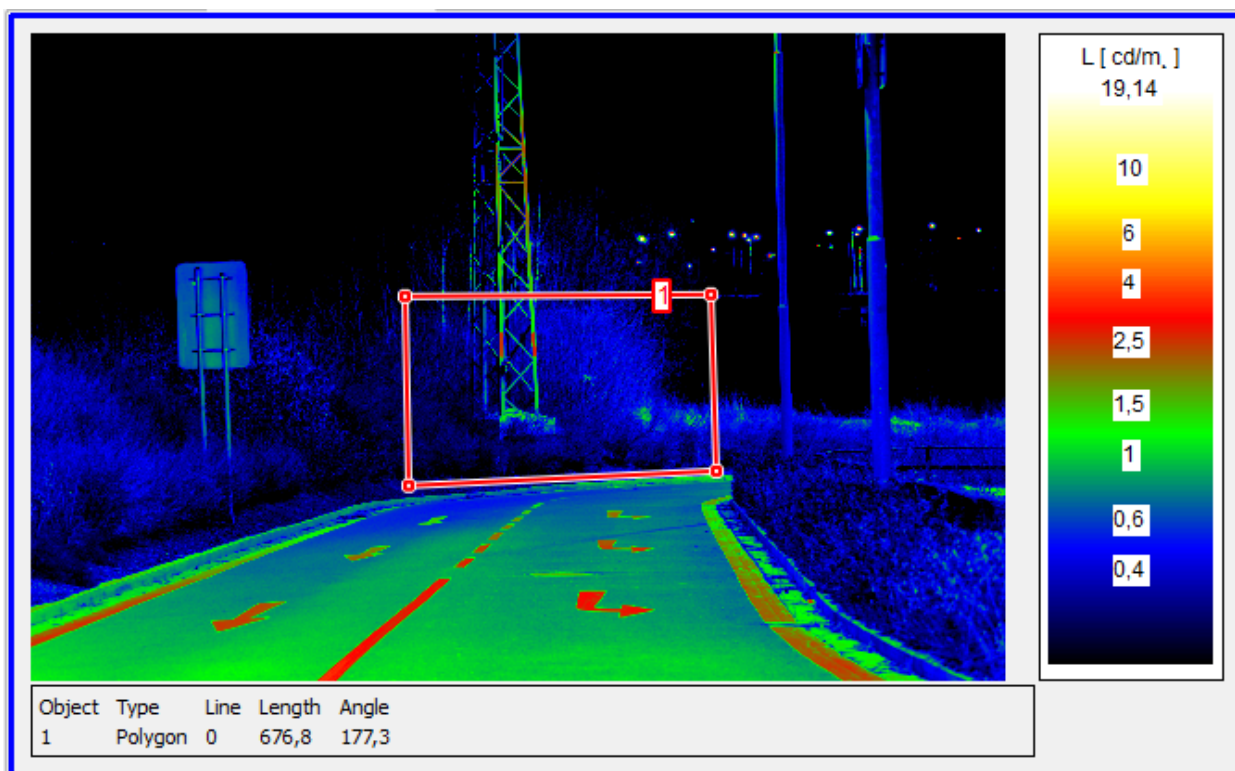
K výpočtu bylo potřeba nejdříve získat spektrální průběh zdroje, viz obr. 23, který byl získán z měření pomocí měřicího přístroje EVERFINE SPIC-200. Následně pomocí programu SPIC - 200 byly naměřená data spektrálního průběhu zdroje vyexportovány do programu Excel, kde byla provedena sumarizace spektra pro každý naměřený bod.

Následně pomocí druhého měření byla jasovým analyzátozem Canon EOS 350D provedena jasová analýza jasu pozadí měřeného úseku v obou směrech. K vyhodnocení jasu pozadí byl použit program LMK LabSoft. Ukázkou snímku jasové analýzy s vyznačenou plochou jasu pozadí je možno vidět na obr. 24 a obr. 25.

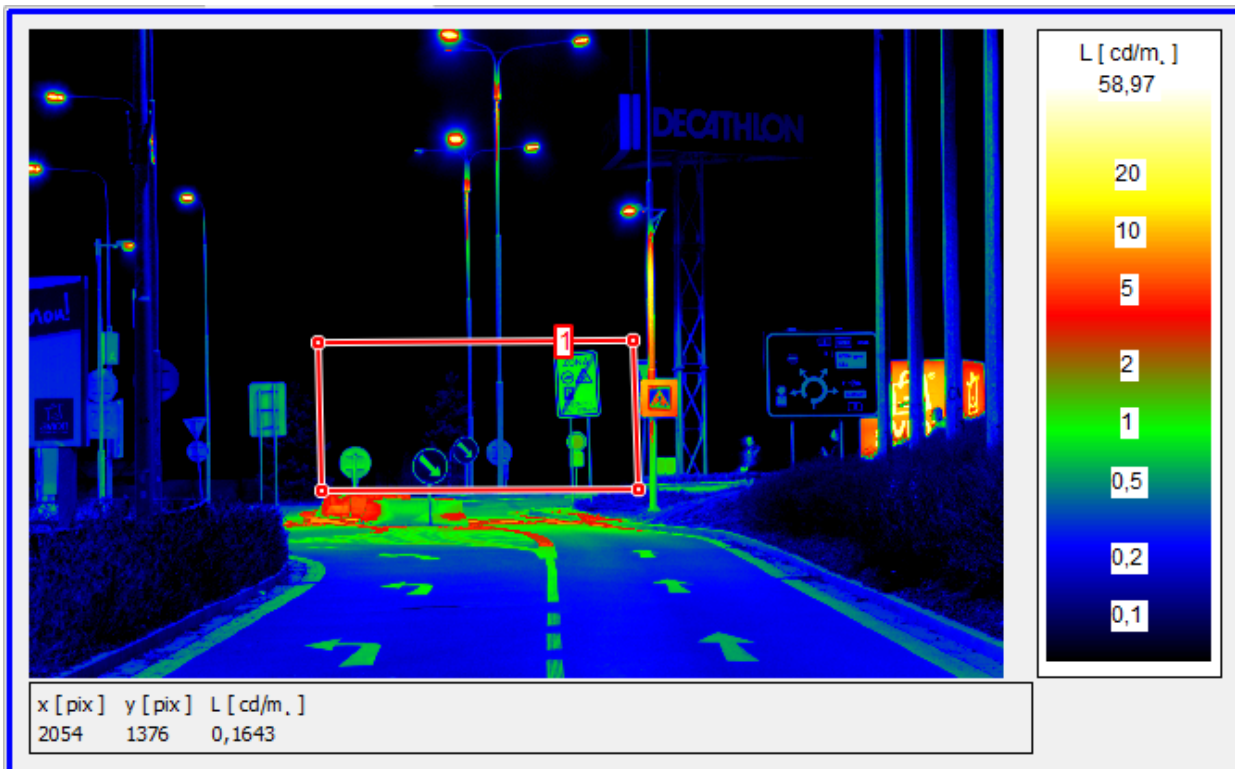
Na základě jasové analýzy byl proveden výběr křivky citlivosti lidského oka. Na obr. 26 je možno vidět tuto křivku, která se nachází v mezopické oblasti s adaptačním jasnem  $0,127 \text{ cd/m}^2$ . Na tomto obrázku jsou taktéž pro porovnání zobrazeny křivky pro fotopickou oblast s adaptačním jasnem  $5 \text{ cd/m}^2$  a skotopickou oblast s adaptačním jasnem  $0,005 \text{ cd/m}^2$ .



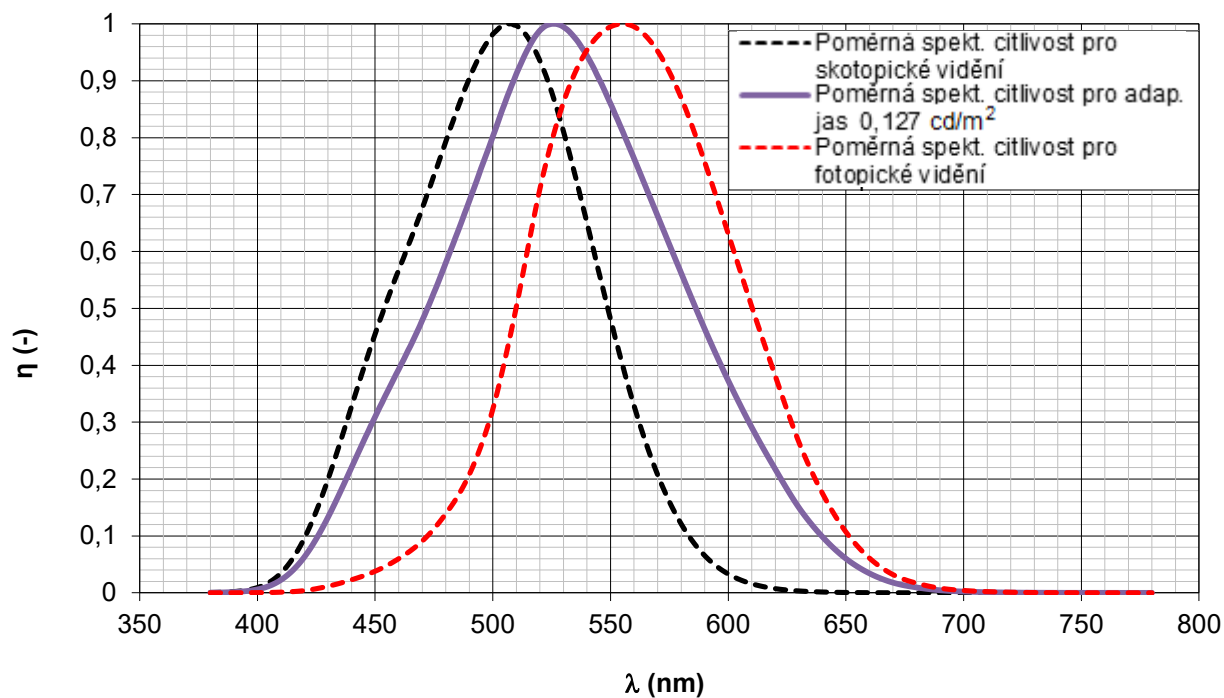
*obr. 23 Spektrální průběh zdroje LED.*



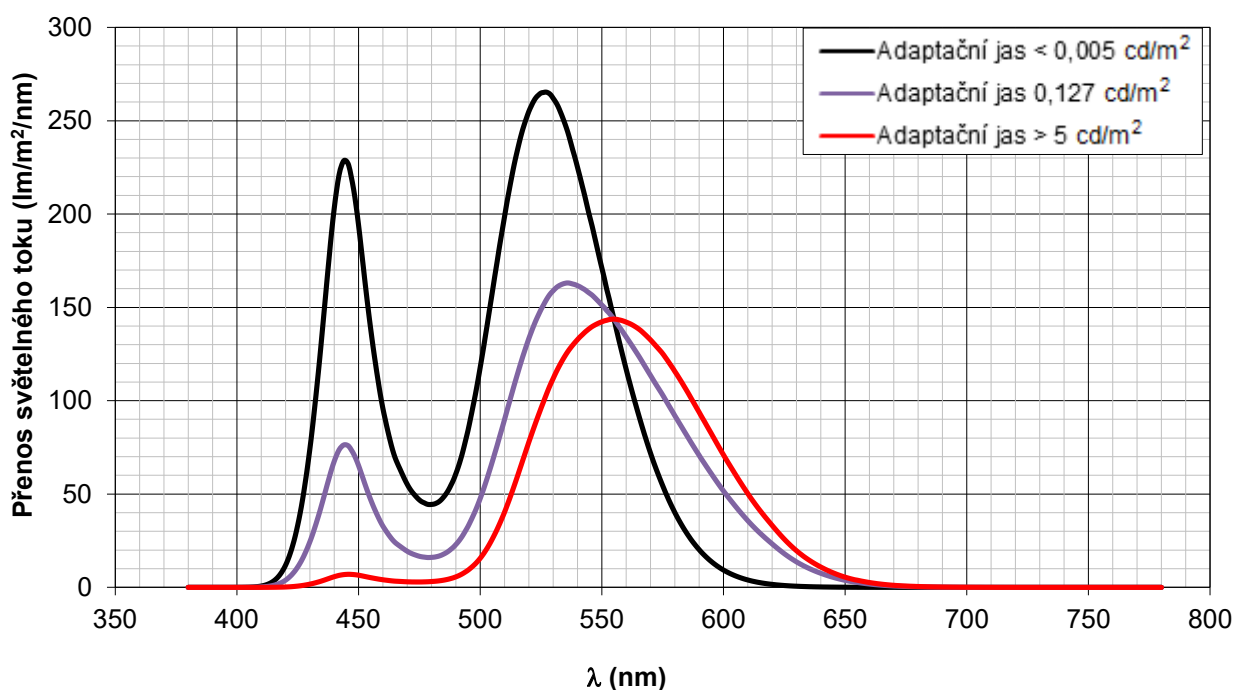
*obr. 24 Ukázka snímku jasové analýzy s vyznačenou plochou ve směru od kruhového objezdu.*



*obr. 25 Ukázka snímku jasové analýzy s vyznačenou plochou ve směru ke kruhovému objezdu.*



**obr. 26** Křivky poměrné spektrální citlivosti oka pro skotopickou oblast s adaptačním jasnem  $0,005 \text{ cd/m}^2$  mezopickou oblast s adaptačním jasnem  $0,127 \text{ cd/m}^2$  a fotopickou oblast s adaptačním jasnem  $5 \text{ cd/m}^2$ .



**obr. 27** Přenos světelného toku pro skotopickou mezopickou a fotopickou oblast.

Naměřené hodnoty z jasové analýzy jsou pro jednotlivé směry zobrazeny v tabulce tab. 5.

**tab. 5** Tabulka naměřených hodnot z jasové analýzy pro LED svítidla

Hodnoty ve směru od kruhového objezdu				Hodnoty ve směru ke kruhovému objezdu			
Jas ( $\text{cd/m}^2$ )	Min	Max	Průměr	Jas ( $\text{cd/m}^2$ )	Min	Max	Průměr
Pozadí	0,07	2,96	0,337	Pozadí	0,028	1,52	0,127

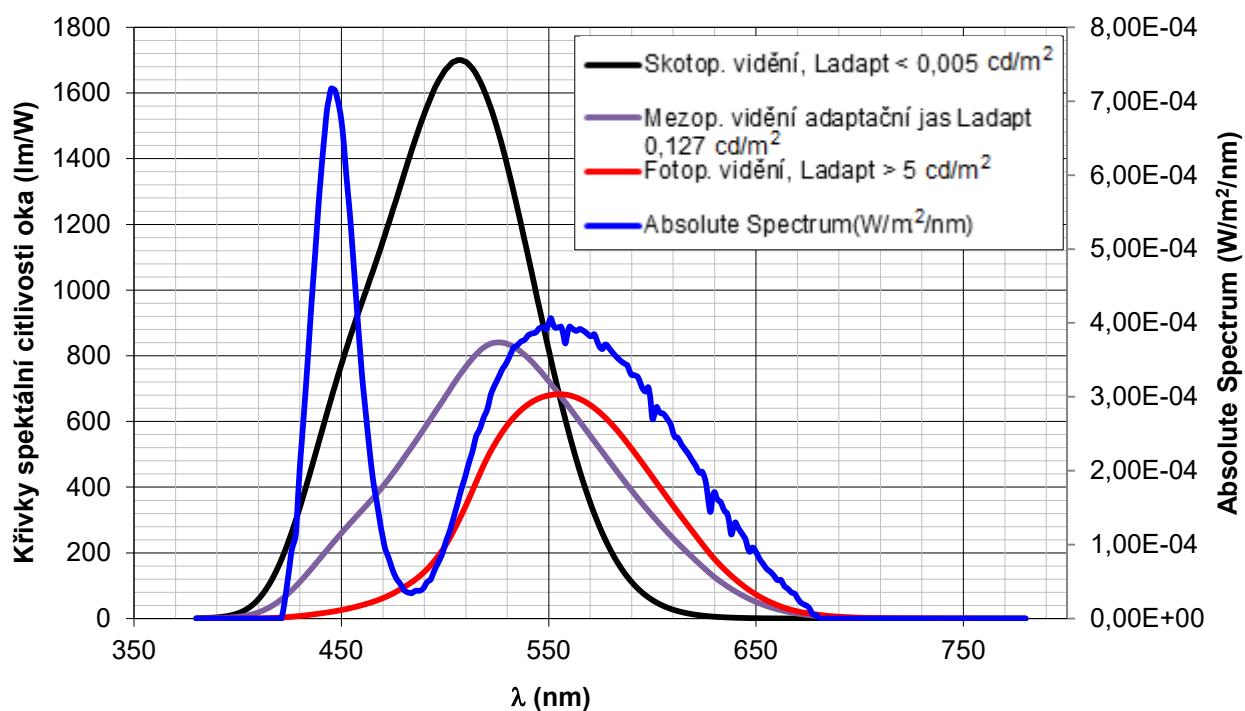
Po vynásobení se sumarizovaných hodnot spektrálního průběhu zdroje a mezopické křivky citlivosti lidského oka byla získána křivka přenosu světelného toku. Aby byla získána osvětlenost v daném bodě pro mezopickou oblast, bylo potřeba ještě křivku přenosu světelného toku vynásobit hodnotou maximální světelné účinnosti pro oba získané jasy pozadí. Křivka přenosu světelného toku je zobrazena na obr. 27 pro skotopickou oblast s adaptačním jasnem  $0,005 \text{ cd/m}^2$ , mezopickou oblast s adaptačním jasnem  $0,127 \text{ cd/m}^2$ , a fotopickou oblast s adaptačním jasnem  $5 \text{ cd/m}^2$ .

V tabulce tab. 6 je ukázka naměřených a spočtených mezopických hodnot pro první bod měření, které bylo prováděno spektrofotometrem EVERFINE SPIC-200. Spočtené hodnoty jsou pro všechny tři oblasti a to fotopickou, skotopickou a mezopickou. Mezopická oblast je zde spočtená dvakrát a to z toho důvodu, protože na komunikaci byla provedena jasová analýza pro východní a západní pohled. Tudíž byly získány dva různé adaptační jasy.

**tab. 6** Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro první bod měření pomocí měřicího přístroje EVERFINE SPIC-200

změřeno		vypočteno			
		Jas 5 ( $\text{cd/m}^2$ )	Jas 0,005 ( $\text{cd/m}^2$ )	Jas 0,127 ( $\text{cd/m}^2$ )	Jas 0,337 ( $\text{cd/m}^2$ )
E (lx)	S/P	E (lx) fotopické	E (lx) skotopické	E (lx) mezopické	E (lx) mezopické
22,31	1,86	22,33	41,61	28,36	26,27

Na obrázku obr. 28 je zobrazen spektrální průběh zdroje LED se skotopickou a fotopickou spektrální křivkou citlivosti zraku a přiřazenou mezopickou spektrální křivkou citlivosti zraku podle adaptačního jasu  $0,127 \text{ cd/m}^2$ .

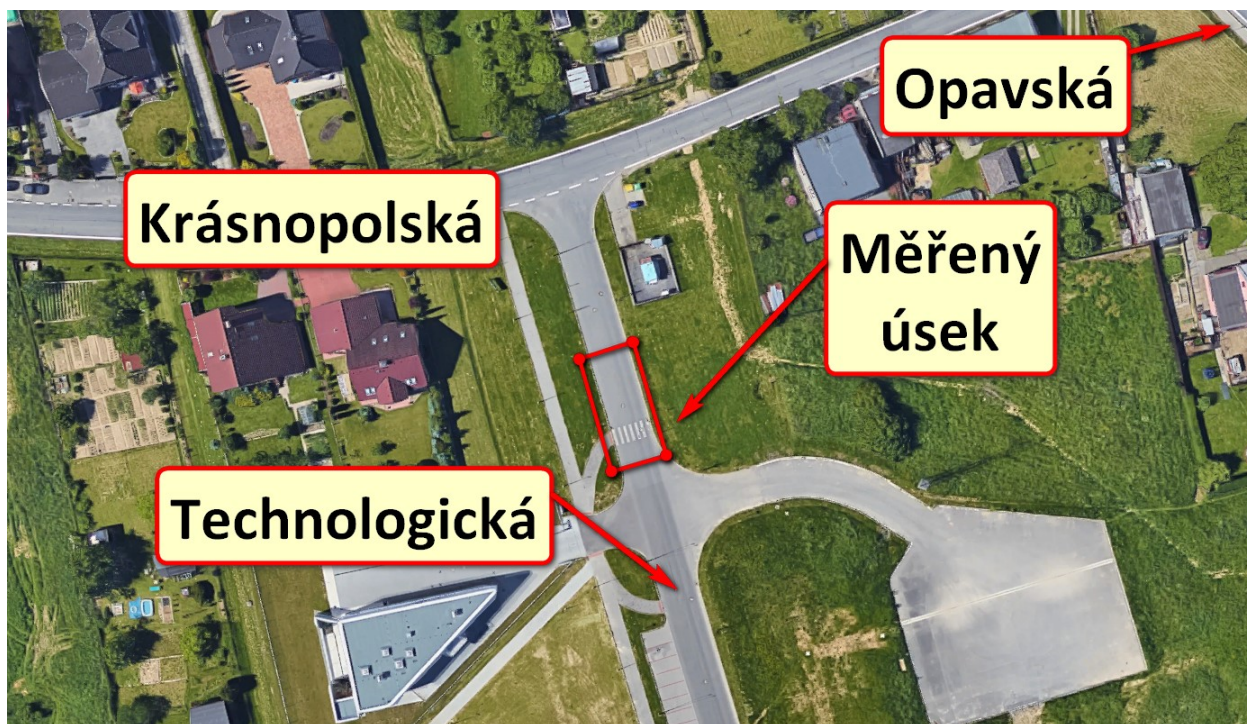


**obr. 28** Křivky spektrální citlivosti zraku pro skotopickou oblast s adaptačním jasnem  $0,005 \text{ cd/m}^2$  mezopickou oblast s adaptačním jasnem  $0,127 \text{ cd/m}^2$  a fotopickou oblast s adaptačním jasnem  $5 \text{ cd/m}^2$  a křivka spektrálního záření led svítidla.



## 6 Měření komunikace osazené vysokotlakými sodíkovými výbojkami

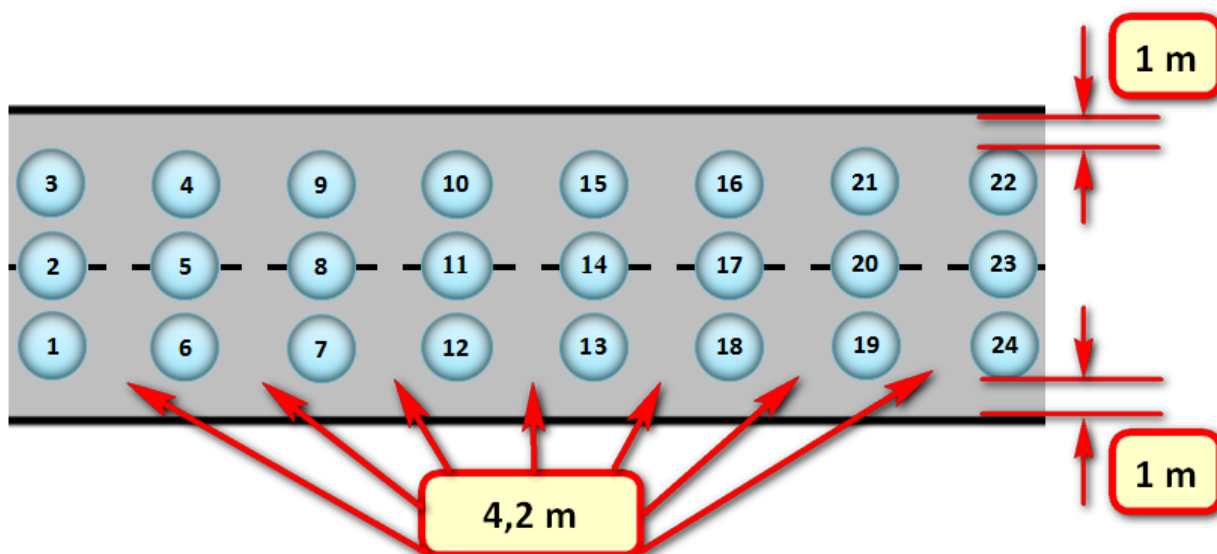
Pro měření komunikace osvětlené pomocí vysokotlakých sodíkových výbojek byla vybrána komunikace na ulici Technologická. Tato komunikace se nachází v Ostravě v lokalitě ubytovacích služeb Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Měřený úsek svým severním koncem navazuje na křižovatku, která dále navazuje ke komunikaci Opavská nebo k hvězdárně Planetárium Ostrava. Svým jižním koncem směřuje k ubytovacím službám Vysoké školy báňské a k budově Vědecko – technologický park Ostrava. Celá tato komunikace je osvětlena vysokotlakými sodíkovými výbojkami o náhradní teplotě chromatičnosti  $T_c$  cca 1500 K, indexem podání barev  $R_a$  cca 20 a výkonem 70W. Na této komunikaci se také nachází přechod pro chodce, který se nachází na jižní části. Na obrázku obr. 29 je znázorněná mapa měřeného úseku. Na měřeném úseku jsou umístěny stožáry veřejného osvětlení, které jsou od sebe vzdáleny 30 metrů. Osvětlení komunikace je realizována jako jednostranná osvětlovací soustava, kde svítidla jsou umístěny na stožárech vlevo ve směru jízdy k ulici Krásnopolská.



*obr. 29 Místo měřeného úseku[35]*

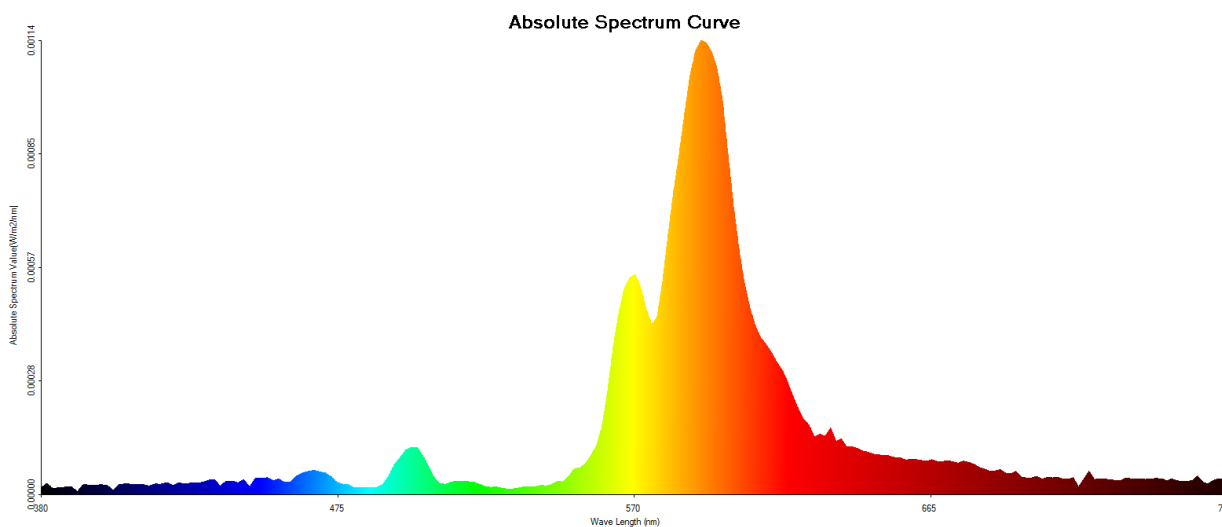
Měření komunikace osvětlené pomocí vysokotlakých sodíkových výbojek, bylo prováděno stejnými měřicími přístroji, jak tomu bylo v případě měření komunikace osvětlené pomocí LED svítidel. Byly tedy použity měřicí přístroje spektrofotometr EVERFINE SPIC-200 a jasový analyzátor firmy LMK.





*obr. 30 Síť měřených bodů pro spektrální analýzu*

První měření, které probíhalo pomocí spektrofotometru EVERFINE SPIC-200, bylo v tomto případě obdobné s měřením pro LED svítidla. Na obrázku obr. 30 je zobrazená síť měřených bodů. V tomto měření bylo naměřeno celkem 24 bodů.



*obr. 31 Spektrální průběh vysokotlaké sodíkové výbojky.*

Pro získání osvětlenosti v mezopické oblasti, bylo potřeba provést stejné kroky, jak tomu bylo při vyhodnocování osvětlenosti komunikace osvětlené pomocí LED svítidel. Z naměřených a vyhodnocených hodnot byl proveden výpočet podle vztahu (11).

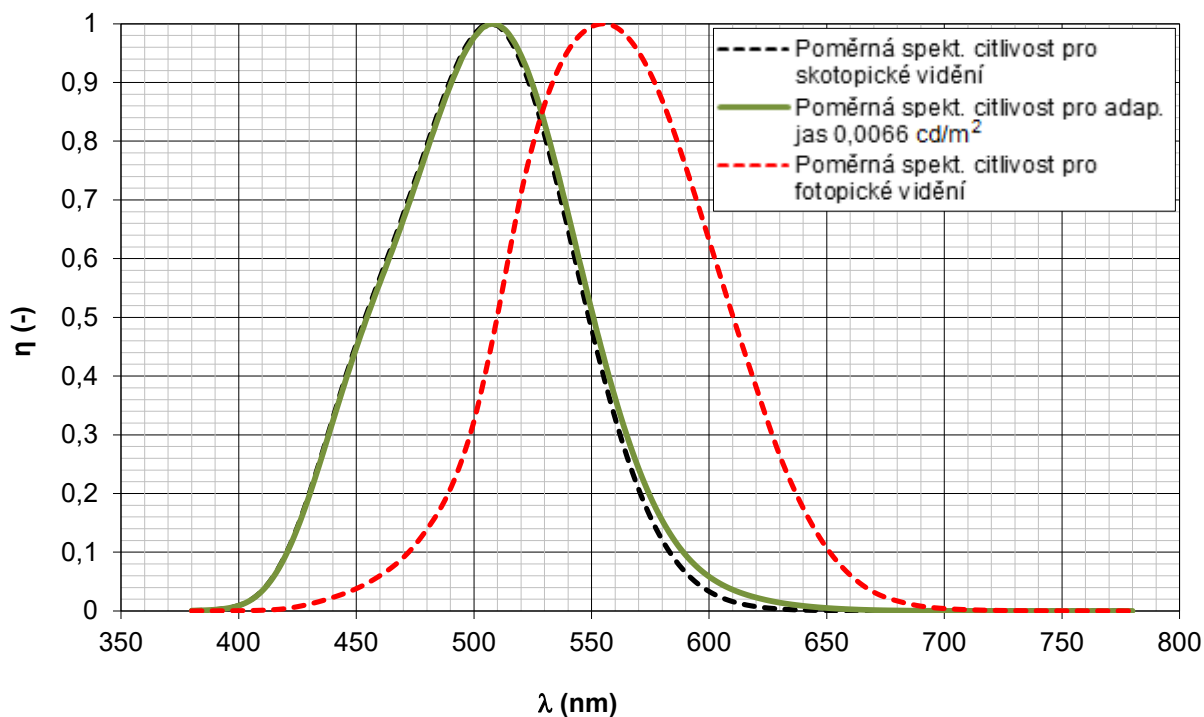
Ukázku snímku jasové analýzy s vyznačenou plochou jasu pozadí pro vysokotlaké sodíkové výbojky je možno vidět na obr. 32 a obr. 33.



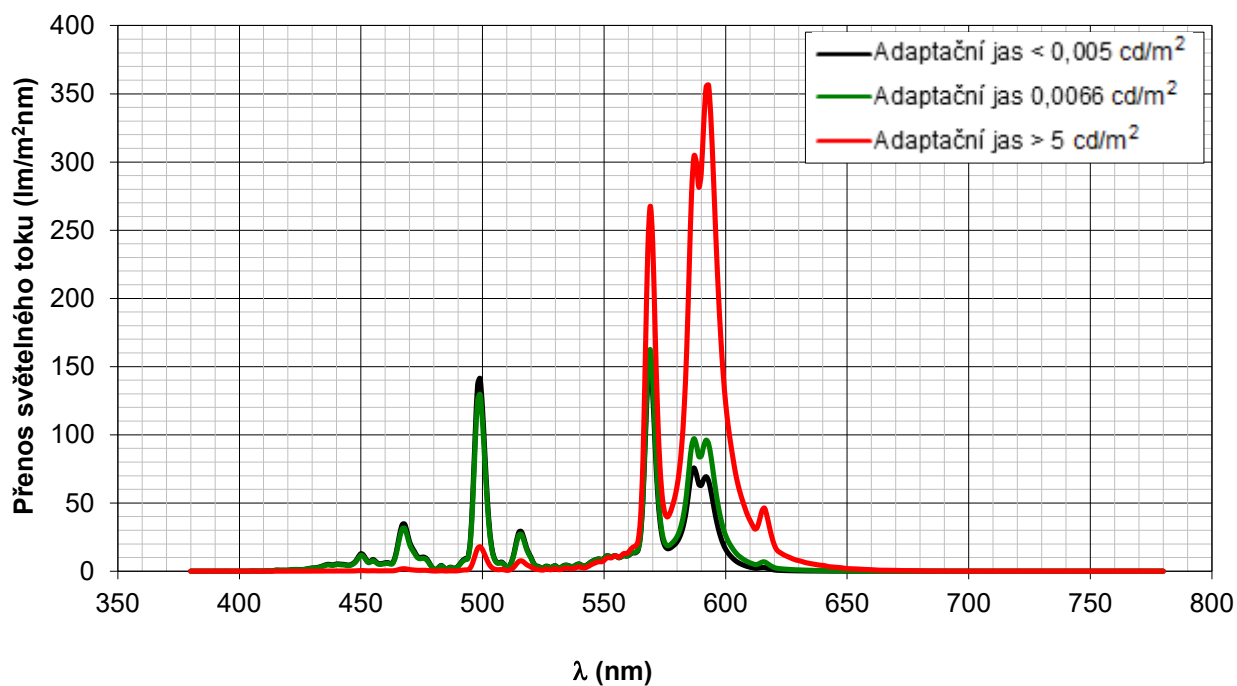
*obr. 32 Ukázka snímku jasové analýzy s vyznačenou plochou ve směru od křižovatky.*



*obr. 33 Ukázka snímku jasové analýzy s vyznačenou plochou ve směru od kolejí VŠB.*



obr. 34 Křivky poměrné spektrální citlivosti oka pro skotopickou oblast s adaptačním jasnem  $0,005 \text{ cd/m}^2$  mezopickou oblast s adaptačním jasnem  $0,0066 \text{ cd/m}^2$  a fotopickou oblast s adaptačním jasnem  $5 \text{ cd/m}^2$ .



obr. 35 Přenos světelného toku pro skotopickou mezopickou a fotopickou oblast.

Naměřené hodnoty z jasové analýzy jsou pro jednotlivé směry zobrazeny v tabulce tab. 7.

**tab. 7** Tabulka naměřených hodnot z jasové analýzy pro vysokotlaké sodíkové výbojky.

Hodnoty ve směru od křižovatky				Hodnoty ve směru od kolejí VŠB			
Jas (cd/m <sup>2</sup> )	Min	Max	Průměr	Jas (cd/m <sup>2</sup> )	Min	Max	Průměr
Pozadí	0,216	137	0,842	Pozadí	0,0033	0,07	0,0066

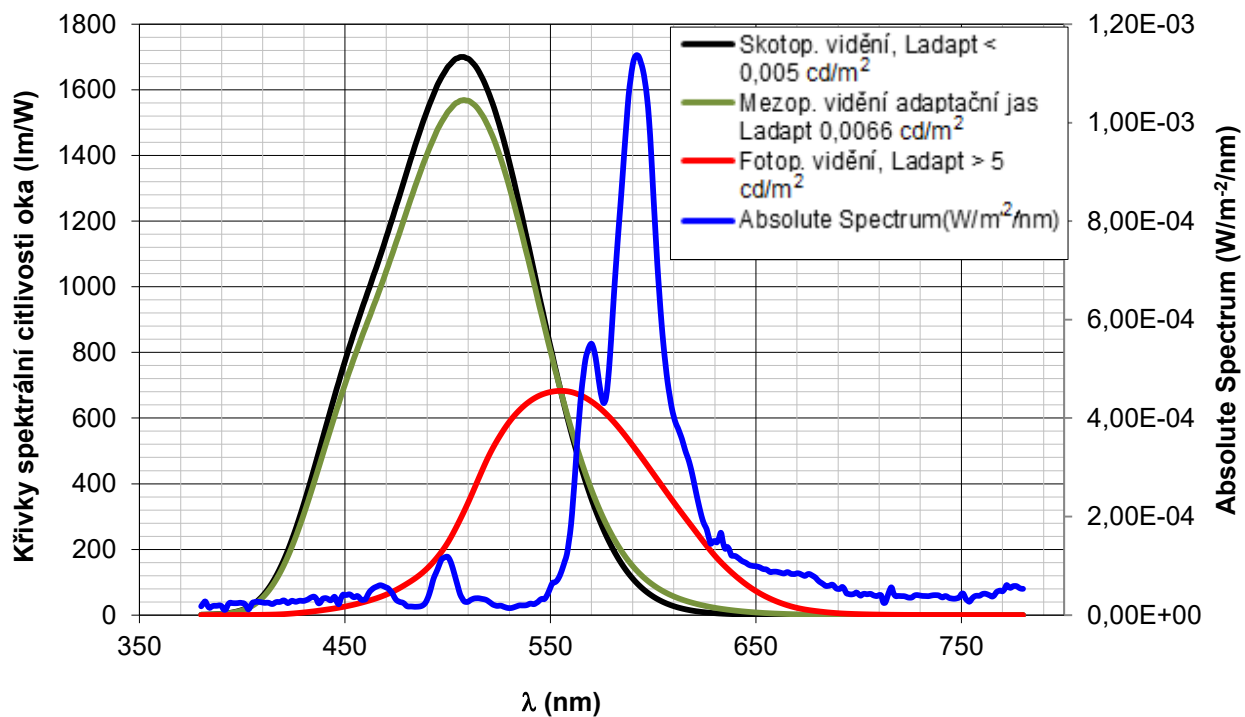
Byla vynásobená křivka spektrálního průběhu, viz obr. 31 s přiřazenou poměrnou spektrální křivkou citlivosti lidského oka viz obr. 34, která byla vybrána na základě jasové analýzy pro adaptační jas 0,0066 cd/m<sup>2</sup>. Po vynásobení těchto dvou křivek, byla získána křivka přenosu světelného toku viz obr. 35, která byla také vynásobená hodnotou maximální světelné účinnosti pro oba získané jasy pozadí v mezopické oblasti. Tudiž bylo získáno osvětlení pro dvě různé mezopické oblasti. Na obrázku obr. 34 jsou také zobrazeny křivky poměrné spektrální citlivosti zraku pro skotopickou a fotopickou oblast. Z tohoto obrázku je možno konstatovat, že v pohledu ve směru od kolejí VŠB, převládají ve funkci citlivější tyčinkové fotoreceptory, protože hodnota adaptačního jasu 0,0066 cd/m<sup>2</sup> je téměř na hranici skotopického adaptačního jasu 0,005 cd/m<sup>2</sup>.

V tabulce tab. 8 jsou zapsány naměřené a spočtené mezopických hodnoty pro první bod měření. V této tabulce jsou spočtené hodnoty rovněž pro všechny tři oblasti a to fotopickou, skotopickou a mezopickou, tak jak tomu bylo v případě měření komunikace osvětlené pomocí LED svítidel.

**tab. 8** Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro první bod měření pomocí měřicího přístroje EVERFINE SPIC-200.

změřeno		vypočteno			
		Jas 5 (cd/m <sup>2</sup> )	Jas 0,005 (cd/m <sup>2</sup> )	Jas 0,0066 (cd/m <sup>2</sup> )	Jas 0,8424 (cd/m <sup>2</sup> )
E (lx)	S/P	E (lx) fotopické	E (lx) skotopické	E (lx) mezopické	E (lx) mezopické
22,59	0,57	21,59	12,22	13,10	20,44

Na obrázku obr. 36 je zobrazen spektrální průběh vysokotlaké sodíkové výbojky se skotopickou a fotopickou spektrální křivkou citlivosti zraku a přiřazenou mezopickou spektrální křivkou citlivosti zraku podle adaptačního jasu 0,0066 cd/m<sup>2</sup>.



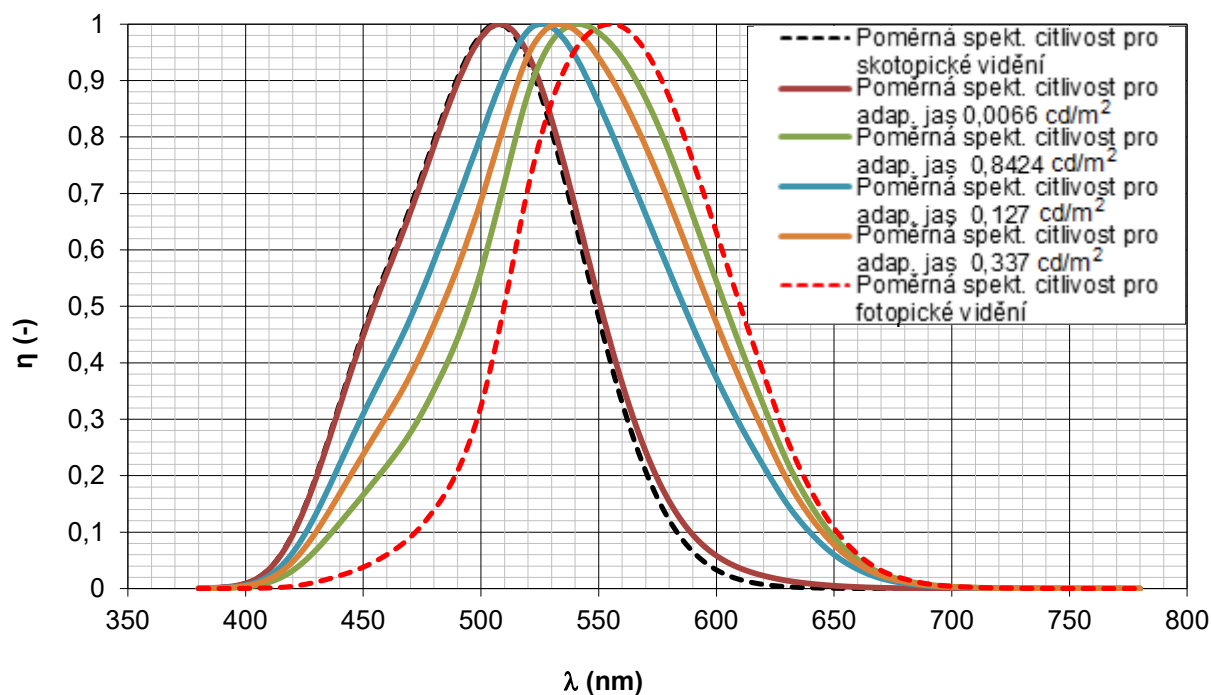
**obr. 36** Křivky spektrální citlivosti zraku pro skotopickou oblast s adaptačním jasnem  $0,005 \text{ cd/m}^2$  mezopickou oblast s adaptačním jasnem  $0,0066 \text{ cd/m}^2$  a fotopickou oblast s adaptačním jasnem  $5 \text{ cd/m}^2$  a křivka spektrálního záření vysokotlaké sodíkové výbojky.

## 7 Porovnání chování LED a vysokotlakých sodíkových výbojek v mezopické oblasti

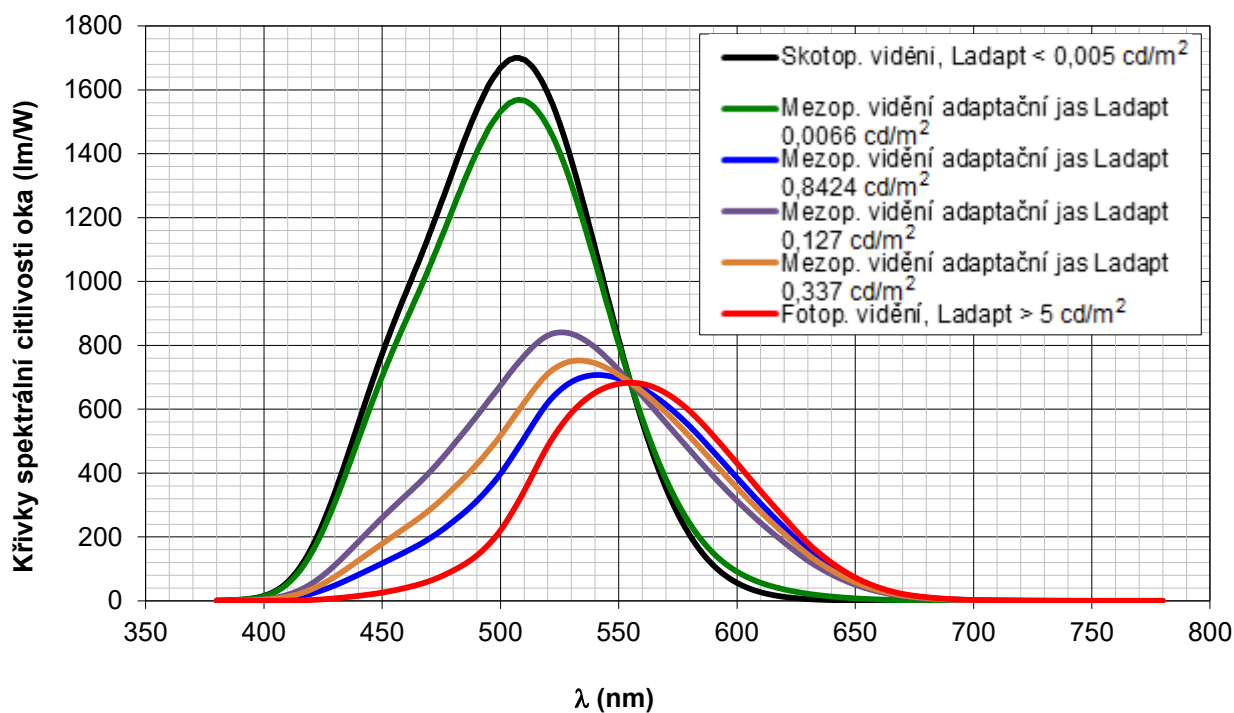
Jak už bylo zmíněno v teoretické části, existuje jen jedna křivka citlivosti mezopického vidění pro daný jas pozadí. Na obr. 37 jsou zobrazeny křivky poměrné spektrální citlivosti zraku pro skotopickou a fotopickou oblast, a vypočítané mezopické křivky pro každý naměřený jas pozadí. Pro porovnání jsou na obr. 38 zobrazeny křivky spektrální citlivosti zraku ve fyzikálních jednotkách, rovněž pro fotopickou skotopickou a mezopickou oblast s určenými adaptačními jasy podle jasové analýzy. Tyto obrázky jsou důkazem, že mezi skotopickou a fotopickou oblastí se nachází oblast mezopická, která může mít křivek nekonečně mnoho. Tedy každému adaptačnímu jasu přísluší jedna křivka spektrální citlivosti lidského oka. Dále je možno potvrdit, že čím je adaptační jas nižší tím se daná mezopická křivka posouvá blíže ke skotopické křivce a naopak. Kromě určení spektrální křivky citlivosti, byla také určena maximální světelná účinnost pro každou mezopickou křivku odpovídající příslušnému adaptačnímu jasu viz tab. 9, což je světelná konstanta, která definuje maximální množství lumenů z jednoho wattu, při dané křivce citlivosti. Světelná konstanta je pro fotopickou oblast definována hodnotou 683 lm/W a pro skotopickou oblast je tato hodnota mnohem vyšší a to 1700 lm/W. Hodnoty světelné konstanty pro mezopickou oblast se tedy budou nacházet mezi hodnotami fotopické a skotopické oblasti.

Na obr. 39 a obr. 40 jsou pro porovnání zobrazeny křivky přenosu světelného toku LED svítidla a vysokotlaké sodíkové výbojky pro fotopickou, mezopickou a skotopickou oblast. Průběhy pro mezopickou oblast jsou v těchto obrázcích zobrazeny pouze pro adaptační jasy, získané měřením a následným vyhodnocením jasovou analýzou.

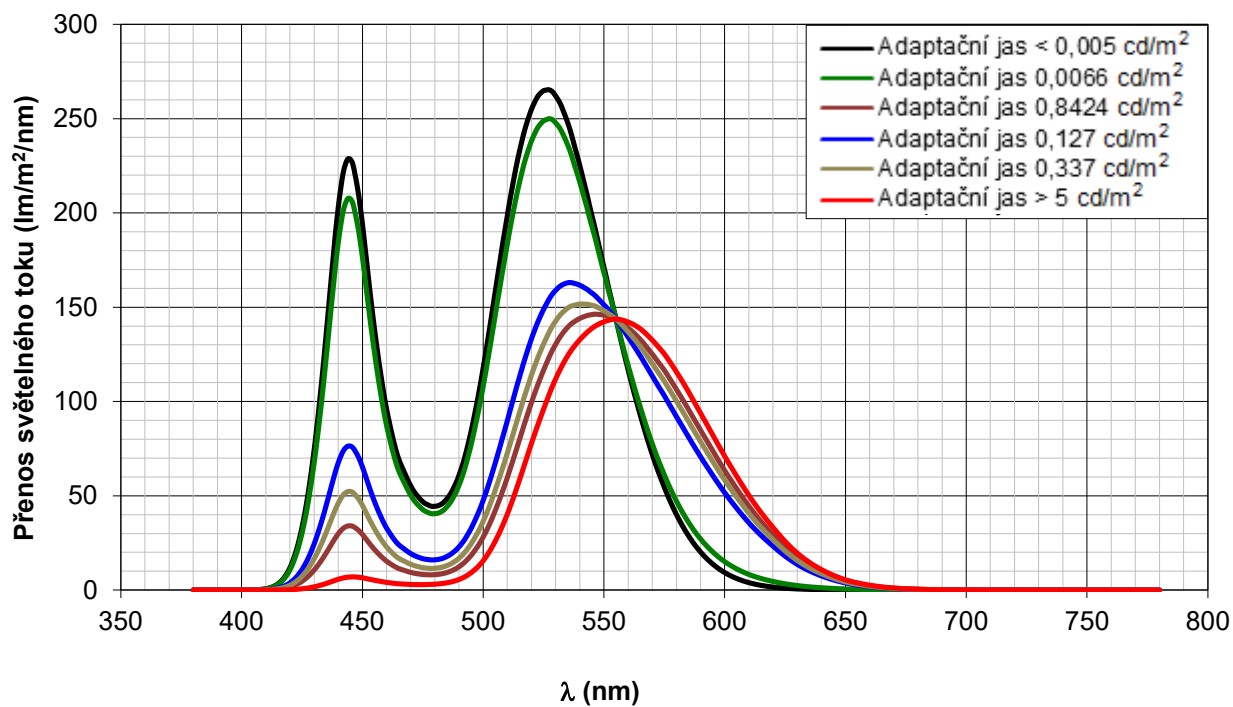
V tabulkách tab. 10 a tab. 11 jsou zobrazeny výsledné hodnoty měření osvětlenosti. Jsou zde zobrazeny hodnoty měřené i vypočtené. V prvním sloupci je zapsáno pořadí měřicích bodů osvětlenosti a spektra. Tyto body odpovídají měřicím bodům na obrázcích obr. 20 a obr. 30. Díky tomu je možno zjistit rozdíl měřené osvětlenosti mezi jednotlivými body a také rozdíl mezi měřenou a vypočtenou hodnotou. V další dvojici sloupců jsou naměřené hodnoty spektrofotometrem EVERFINE SPIC-200. V prvním sloupci E (lx) jsou zobrazeny naměřené hodnoty osvětlenosti (měřící senzor osvětlenosti). Druhý sloupec S/P zobrazuje hodnoty S/P poměru, což je poměr hodnot skotopických a fotopických. Jinak řečeno je to podíl vyhodnoceného zářivého toku skotopické křivky a fotopické. Další sloupce zobrazují vypočtené hodnoty osvětlenosti pro každý měřicí bod. Pro každý měřicí bod, byl naměřen vyzařovací spektrální průběh zdroje a na základě toho, byly vypočítány hodnoty osvětlenosti pro fotopickou, skotopickou a mezopickou oblast. Hodnoty osvětleností jednotlivých oblastí byly zhodnocovány přes křivku citlivosti, která přísluší dané oblasti. To znamená, že na příklad fotopická oblast byla zhodnocena přes křivku fotopické citlivosti dle vztahu (11). Stejným způsobem byla zhodnocena skotopická a mezopická oblast s tím rozdílem, že pro mezopickou oblast byl výpočet prováděn dvakrát. To je dáno tím, že křivka citlivosti je pro každý adaptační jas jiná a adaptační jak byl při měření pro každý směr pohledu různý. Proto jsou v těchto tabulkách uváděny dva sloupce hodnot osvětleností.



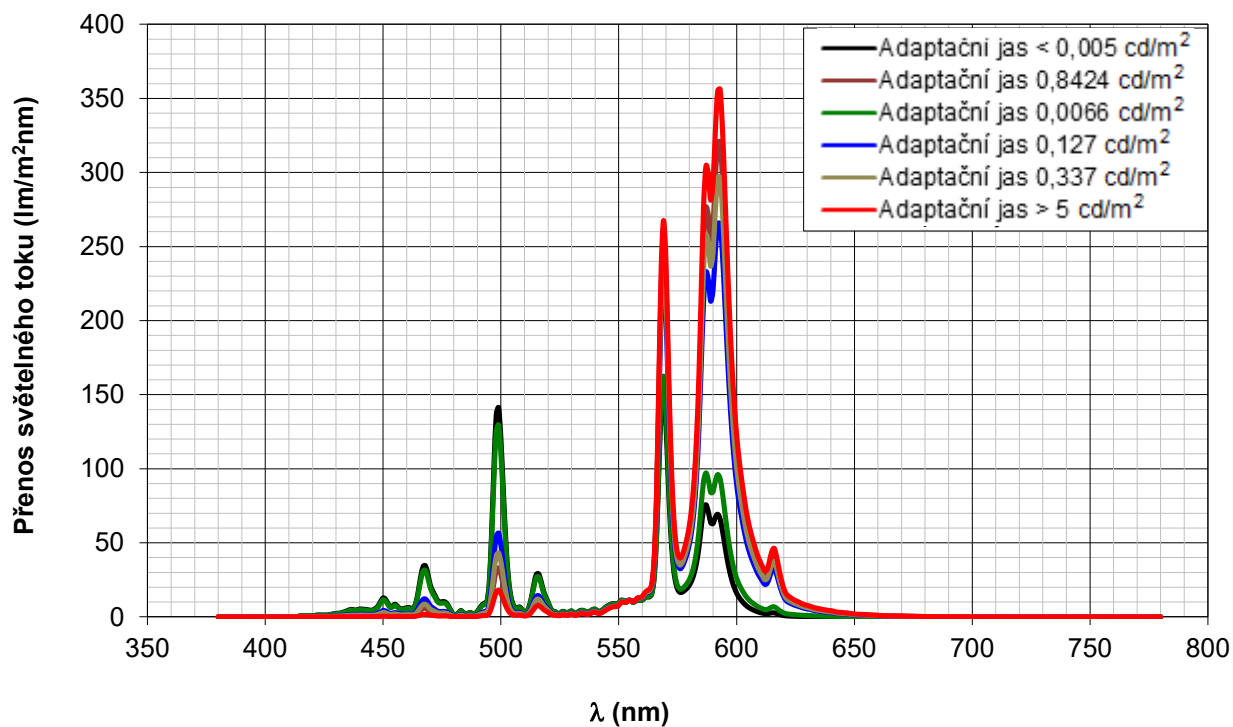
**obr. 37** Křivky poměrné spektrální citlivosti oka pro skotopickou oblast s adaptačním jasnem  $0,005 \text{ cd/m}^2$  a fotopickou oblast s adaptačním jasnem  $5 \text{ cd/m}^2$  a přiřazenými mezopickými křivkami.



**obr. 38** Křivky spektrální citlivosti oka pro skotopickou oblast s adaptačním jasnem  $0,005 \text{ cd/m}^2$  a fotopickou oblast s adaptačním jasnem  $5 \text{ cd/m}^2$  a přiřazenými mezopickými křivkami.



obr. 39 Přenos světelného toku pro skotopickou mezopickou a fotonickou oblast.



obr. 40 Přenos světelného toku pro skotopickou mezopickou a fotonickou oblast.



tab. 9 Tabulka maximálních světelných účinností mezopických křivek, které jsem používal.

Mezopický jas (cd/m <sup>2</sup> )	< 0,005	0,0066	0,8424	0,127	0,337	>5
Maximální světelná účinnost (lm/W)	1700	1569,06	707,28	840,67	752,55	683

tab. 10 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření komunikace osazené LED svítidly.

LED Tc 4000K						
	změřeno		vypočteno			
			Jas 5 (cd/m <sup>2</sup> )	Jas 0,005 (cd/m <sup>2</sup> )	Jas 0,127 (cd/m <sup>2</sup> )	Jas 0,337 (cd/m <sup>2</sup> )
	E (lx)	S/P	E (lx) fotopické	E (lx) skotopické	E (lx) mezopické	E (lx) mezopické
1	22,31	1,86	22,33	41,61	28,36	26,27
2	21,325	1,87	21,34	39,89	27,15	25,13
3	20,07	1,85	20,09	37,17	25,43	23,58
4	18,18	1,82	18,19	33,04	22,84	21,23
5	19,78	1,83	19,79	36,19	24,93	23,15
6	18,71	1,81	18,73	33,91	23,48	21,83
7	15,07	1,72	15,09	25,95	18,49	17,31
8	15,82	1,74	15,84	27,48	19,48	18,22
9	14,31	1,72	14,34	24,62	17,56	16,44
10	13	1,67	13,06	21,79	15,79	14,84
11	14	1,67	14,05	23,39	16,97	15,96
12	13,72	1,66	13,77	22,88	16,62	15,63
13	14,06	1,66	14,14	23,48	17,06	16,05
14	13,63	1,67	13,71	22,90	16,59	15,59
15	12,47	1,65	12,58	20,79	15,15	14,26
16	13,232	1,65	13,34	22,02	16,06	15,11
17	14,67	1,67	14,76	24,64	17,85	16,78
18	15,6	1,67	15,67	26,13	18,94	17,81
<b>E<sub>m</sub> (lx)</b>	<b>16,11</b>	<b>1,73</b>	<b>16,16</b>	<b>28,22</b>	<b>19,93</b>	<b>18,62</b>

Z uvedených měření na komunikacích, které jsou osvětlené jak LED svítidly, tak vysokotlakými sodíkovými výbojkami, byly ověřeny rozdíly při těchto rozdílných osvětlovacích soustavách, které mohou vzniknout ve zrakovém vjemu. Tyto rozdíly vznikají ve spektrálním vyzařování LED svítidla s náhradní teplotou chromatičnosti Tc cca 5700K, indexem podání barev Ra cca 60 a vysokotlakých sodíkových výbojek s náhradní teplotou chromatičnosti Tc cca 1500K, indexem podání barev Ra cca 20. Tyto rozdíly vznikají zejména při změnách citlivosti oka při přechodu z fotopického do skotopického vidění.

**tab. 11** Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření komunikace osazené vysokotlakými sodíkovými výbojkami.

Vysokotlaký sodík Tc 2000 K						
	změřeno		vypočteno			
	E (lx)	S/P	Jas 5 (cd/m <sup>2</sup> ) E (lx) fotopické	Jas 0,005 (cd/m <sup>2</sup> ) E (lx) skotopické	Jas 0,0066 (cd/m <sup>2</sup> ) E (lx) mezopické	Jas 0,8424 (cd/m <sup>2</sup> ) E (lx) mezopické
1	21,59	0,57	21,59	12,22	13,10	20,44
2	23,85	0,51	21,59	12,22	13,10	20,44
3	23,49	0,46	23,50	10,87	12,05	21,95
4	20,53	0,42	20,60	8,75	9,86	19,15
5	17,8	0,39	18,02	7,00	8,03	16,67
6	14,47	0,36	14,87	5,38	6,27	13,70
7	12,07	0,31	13,32	4,13	4,99	12,19
8	14,57	0,32	15,80	5,03	6,04	14,48
9	17,73	0,33	18,98	6,19	7,39	17,41
10	16,04	0,31	17,52	5,51	6,64	16,04
11	10,92	0,29	13,15	3,78	4,66	12,00
12	8,14	0,28	11,72	3,31	4,10	10,69
13	8,54	0,28	11,72	3,31	4,10	10,69
14	11,71	0,29	14,40	4,15	5,11	13,15
15	18,27	0,31	20,20	6,25	7,56	18,49
16	21,12	0,32	22,99	7,25	8,73	21,06
17	14,84	0,29	17,53	5,09	6,25	16,00
18	12,28	0,29	15,84	4,53	5,59	14,46
19	15,36	0,29	18,17	5,22	6,44	16,58
20	21	0,31	23,28	7,18	8,69	21,31
21	23,07	0,32	25,16	8,01	9,62	23,05
22	22,42	0,31	24,80	7,69	9,29	22,71
23	22,64	0,31	25,12	7,75	9,38	22,99
24	16,48	0,29	19,12	5,61	6,88	17,47
<b>E<sub>m</sub> (lx)</b>	<b>17,04</b>	<b>0,34</b>	<b>18,71</b>	<b>6,52</b>	<b>7,66</b>	<b>17,21</b>

**tab. 12** Srovnávací tabulka průměrných naměřených a vypočtených hodnot pro měření komunikace osazené LED svítidly a vysokotlakými sodíkovými výbojkami.

		změřeno		vypočteno			
		E (lx)	S/P	E (lx) fotopické	E (lx) skotopické	E (lx) mezopické	E (lx) mezopické
<b>LED</b>	<b>E<sub>m</sub> (lx)</b>	<b>16,11</b>	<b>1,73</b>	<b>16,16</b>	<b>28,22</b>	<b>19,93</b>	<b>18,62</b>
<b>HPS</b>	<b>E<sub>m</sub> (lx)</b>	<b>17,04</b>	<b>0,34</b>	<b>18,71</b>	<b>6,52</b>	<b>7,66</b>	<b>17,21</b>

V tabulkách tab. 10 a tab. 11 jsou zobrazeny rozdílné hodnoty pro jednotlivá měření. Pro porovnání a lepší přehlednost jsou v tab. 12 zobrazeny průměrné hodnoty jednotlivých osvětleností z tab. 10 a tab. 11.

Při porovnávání osvětlovací soustavy, která je realizována pomocí LED svítidel, je rozdíl fotopické osvětlenosti mezi hodnotami změřenými a vypočtenými minimální a to 0,05 lx. Pro osvětlovací soustavu s vysokotlakými sodíkovými výbojkami, je rozdíl mezi vypočtenou a změřenou fotopickou osvětleností o něco větší a to 1,67 lx.

V různých publikacích je uváděno, že pro návrh osvětlovací soustavy by se měl brát ohled na různé parametry a to zejména na náhradní teplotu chromatičnosti, index podání barev a na S/P poměr, který by neměl být nižší než 1,2. Osvětlení realizováno pomocí vysokotlakých sodíkových výbojek, má v tomto případě S/P poměr 0,34, což je podle uváděné hodnoty 1,2 velmi malá hodnota. Důvodem, proč je tato hodnota S/P poměru pro vysokotlaké sodíkové výbojky tak nízká, je zapříčiněno průběhem vyzařovaného spektra viz obr. 31. Průběh vyzařovaného spektra u vysokotlaké sodíkové výbojky je dominantně vyzařován mimo oblast skotopického vidění. Z toho důvodu je výsledná osvětlenost ve skotopické oblasti výrazně menší než ve fotopické oblasti.

V porovnání s LED svítidly je skotopická osvětlenost vysokotlakých sodíkových výbojek výrazně menší. Vypočtené hodnoty osvětlenosti pro mezopickou oblast jsou u LED svítidel vyšší, než pro fotopickou oblast. Tento rozdíl je kolem 3 lx. V případě vysokotlakých sodíkových výbojek je tato situace opačná. Mezopická osvětlenost je nižší než fotopická a to s rozdílem 11,05 lx pro adaptační jas 0,0066 cd/m<sup>2</sup> a 1,5 lx pro adaptační jas 0,8424 cd/m<sup>2</sup>. Důvod je opět stejný, jak tomu bylo v případě porovnávání skotopické osvětlenosti. Spektrální průběh vysokotlaké sodíkové výbojky má maximum vyzařování v jiné oblasti, než je maximum citlivosti lidského oka. Proto vyzařovací spektrum vysokotlaké sodíkové výbojky není vhodné vyhodnocovat přes skotopickou a mezopickou křivku citlivosti. Z toho důvodu je mezopické vidění více uplatňováno pro LED svítidla s vyšší náhradní teplotou chromatičnosti, kde průběh vyzařovaného spektra viz obr. 23 je vhodnější pro zhodnocení před dané křivky citlivosti.

V případě návrhu osvětlovací soustavy, která bude realizována pomocí LED svítidel je nutno brát ohled na náhradní teplotu chromatičnosti, protože s vyšší náhradní teplotou chromatičnosti dochází v oblasti periferního vidění k zvýšení citlivosti lidského oka. To se může projevit lepší viditelností a vnímáním okrajových oblastí. Náhradní teplotu chromatičnosti u LED svítidel není dobré výrazně zvyšovat, protože to může vést k negativnímu vnímání barvy. Jedná se zejména o psychologické působení, což popisuje tzv. Kruithoffův diagram. Ten popisuje, že lidé pocitově lépe vnímají nízké osvětlenosti s nízkou teplotou chromatičnosti. Proto v obydlených oblastech pro veřejné osvětlení se doporučuje maximální teplota chromatičnosti cca 4000 K.

## 8 Závěr

Citlivost lidského oka v mezopické oblasti je oproti fotopické a skotopické oblasti velmi odlišná. Této oblasti dlouhou dobu nebyla věnována pozornost, avšak při uvážení této problematiky oblasti mezopického vidění v praxi, by mohlo dojít k velkým energetickým úsporám, zejména u zdrojů s dominantnějším vyzařováním modrého spektra, kde lidské oko je při snížené viditelnosti citlivější.

První systémy, které měly za úkol popsat chování zraku v mezopické oblasti, vznikly v devadesátých letech. Jako první systém byl USP, který je považován za nejvíce nepřesný systém mezopického vidění. Proto vznikl další systém MOVE, který byl vytvořen ve spolupráci s několika organizacemi z Evropy. Oba tyto systémy nejsou dostatečně věrohodné, a proto vznikly další systémy, které by mohly být použity v praxi. Systém považující za přesnější a věrohodnější jsou MES1 a MES2, kde systém MES2 je považován za nejpřesnější a je doporučován mezinárodní komisí pro osvětlování (CIE).

Systém MES2 však stále nelze uvést do praxe, protože jeho definice adaptačního pole je nejasná, což je uvedeno v dokumentu mezinárodní komise pro osvětlování (CIE). Tento pojem není nikde přesně definován a zabývá se tím mnoho výzkumných projektů i tato diplomová práce, ale stále nebyla definována plocha, na kterou se lidské oko adaptuje. Z praktické části při vyhodnocování adaptačního jasu pomocí jasové analýzy bylo zjištěno, že hodnota adaptačního jasu může být velmi proměnlivá. Velikost této hodnoty závisí především na tvaru, velikosti pole, umístění adaptačního pole, což tyto údaje stále nebyly zjištěny.

Cílem praktické části této diplomové práce bylo provést měření na dvou různých komunikacích, které byly osvětleny různými osvětlovacími zdroji a to LED svítidly a vysokotlakými sodíkovými výbojkami, a následně zhodnotit a porovnat různá osvětlení v mezopické oblasti. Byla tedy provedena spousta praktických měření v Ostravě a získaná naměřená data byla následně zpracována a zanalyzována.

Na základě naměřených a zpracovaných dat bylo ověřeno a potvrzeno, že v oblasti mezi fotopickým a skotopickým viděním se může nacházet nekonečně mnoho mezopických křivek citlivosti lidského oka. Jinými slovy je možno říci, že každému adaptačnímu jasů odpovídá jedna mezopická křivka spektrální citlivosti lidského oka. Dále bylo zjištěno, že v mezopické oblasti se citlivost lidského oka nachází v periferní oblasti zrakového orgánu. To je dáno tím, že v mezopické oblasti, kde se nachází nízké adaptační jasy, jsou ve funkci fotoreceptory tyčinkového provedení, které se nenacházejí v centrální oblasti oka (fovea), ale v periferní. To vede ke zvýšení citlivosti oka, což se může projevit lepší viditelností a vnímáním okrajových oblastí.

Z měřených a vypočtených hodnot bylo zjištěno, že komunikace osvětlena pomocí vysokotlakých sodíkových výbojek má S/P poměr velmi nízký, než by měl být podle různých publikací, kde je doporučován. S/P poměr je u vysokotlakých sodíkových výbojek nízký kvůli jeho vyzařovanému spektru,

které je vyzařováno mimo oblast skotopického vidění, což zapříčiní výrazně nižší výslednou skotopickou osvětlenost než fotopickou a tedy i nízký S/P poměr. Jinými slovy spektrální průběh vysokotlaké sodíkové výbojky má maximum vyzařování v jiné oblasti, než je maximum citlivosti lidského oka. Tudíž vyzařovací spektrum vysokotlaké sodíkové výbojky není vhodné vyhodnocovat přes skotopickou a mezopickou křivku citlivosti. Z tohoto důvodu je možno říci, že vysokotlaké sodíkové výbojky jsou nevhodné z hlediska kvality vidění pro veřejné osvětlení.

V případě porovnání komunikace osvětlené pomocí LED svítidel je situace opačná. Odpovědí proč tomu tak je, je opět v průběhu vyzařování spektra zdroje. Spektrální vyzařování LED zdroje se nachází v oblasti, kde je oko nejcitlivější, tedy ve skotopické oblasti. A proto při vyhodnocování hodnot z měření bude skotopická osvětlenost vyšší než fotopická a tedy i S/P poměr bude větší. Čím studenější barvu bude vyzařovat LED zdroj v mezopické oblasti, tím více bude spektrální vyzařování posunuté do oblasti kde je oko nejcitlivější tedy do skotopické oblasti o vlnové délce 507 nm. S/P poměr u komunikace osvětlené pomocí LED svítidel vyšel vyšší, než je doporučován a proto je možno říci, že osvětlování pomocí LED svítidel je lepší. V případě zakomponování faktu, že osvětlení pomocí LED svítidel je energeticky méně náročné, jsou LED svítidla vhodným osvětlovacím zdrojem.

Měřením bylo potvrzeno, že když se pozorovatel nachází v mezopické oblasti s vhodným spektrálním vyzařováním jako je u LED zdroje a je adaptován na nízké adaptační jasy, tak viditelnost je lepší, protože mezopická osvětlenost vyšla větší než fotopická. Ve všech měření byly nízké adaptační jasy, což znamená, že bylo vždy uplatněno mezopické vidění. Na základě měření jsem potvrdil, že v mezopické oblasti se může lépe vidět, ale záleží na vyzařovaném spektru světelného zdroje a na velikosti adaptačního jasu.

Tato práce byla pro mě přínosem z hlediska pochopení vidění pro různé oblasti. Jak už zde bylo řečeno fotopická a skotopická oblast je jasně definována křivkou citlivosti lidského oka, což znamená, že oko je vždy adaptováno pouze na jeden jas. Kdežto v mezopické oblasti se oko adaptuje na každý jas jinak a proto každému adaptačnímu jasu přísluší jedna mezopická křivka citlivosti lidského oka. Tento fakt jsem nevěděl do té doby, než jsem začal studovat problematiku mezopického vidění a dokud jsem si to neověřil měřeními a následným vyhodnocením.

## 9 Seznam použité literatury:

- [1] Sokanský, K.: *Světelná technika*. ČVUT, Praha 2011.
- [2] Habel, J.: *Světlo a osvětlování*. FCC Public, Praha 2013.
- [3] Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TU.
- [4] Šajdíková, M.: *Funkce buněk a lidského těla*, [Online]  
Dostupné z: <http://fblt.cz/skripta/xiii-smysly/1-zrakovy-system/>
- [5] Horáková, H.: *Fyziologie změny oka ve stáří*, Brno 2007, Bakalářská práce, [Online]  
Dostupné z: [http://is.muni.cz/th/156070/lf\\_b/](http://is.muni.cz/th/156070/lf_b/)
- [6] Wikipedia, [Online]  
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Rohovka>
- [7] Fyziologie oka, [Online]  
Dostupné z: [http://panwiki.panska.cz/index.php/Fyziologie\\_oka](http://panwiki.panska.cz/index.php/Fyziologie_oka)
- [8] *Anatomie lidského oka*, [Online]  
Dostupné z: <http://www.videni.cz/oko/32-anatomie-oka>
- [9] *Anatomie oka*, [Online]  
Dostupné z: <http://www.zeleny-zakal.cz/belima-a-cevnatka>
- [10] *Anatomie oka*, [Online]  
Dostupné z: [http://www.zeleny-zakal.cz/rasnate-telisko?velikost\\_fontu=1](http://www.zeleny-zakal.cz/rasnate-telisko?velikost_fontu=1)
- [11] OSRAM Opto Semiconductors, *LED Fundamentals Mesopic Vision*, [Online]  
Dostupné z: [https://ledlight.osram-os.com/wp-content/uploads/2014/04/OSRAM-OS\\_LED-FUNDAMENTALS\\_Mesopic\\_Vision\\_v1\\_4-2-141.pdf](https://ledlight.osram-os.com/wp-content/uploads/2014/04/OSRAM-OS_LED-FUNDAMENTALS_Mesopic_Vision_v1_4-2-141.pdf)
- [12] Žák, P.: *Barva světla ve veřejném osvětlení - Část 2. Vliv prostředí a adaptačních podmínek na zrakový vjem*, ČVUT, Praha 2015, [Online]  
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/barva-svetla-ve-verejnem-osvetleni-cast-2-vliv-prostredi-a-adaptacnich-podminek-na-zrakovy-vjem--1239>
- [13] Hecht, J.: *Photonic Frontiers: Color Measurement, Light Sources, and Vision: LED lighting makes new demands on color measurement*, [Online]  
Dostupné z: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-52/issue-01/features/photonic-frontiers-color-measurement-light-sources-and-vision-led-lighting-makes-new-demands-on-color-measurement.html>
- [14] *Consider Photopic, Scotopic, Mesopic Vision before Specifying Lumen Requirements*, [Online]  
Dostupné z: <http://lumenistics.com/consider-photopic-scotopic-mesopic-vision-before-specifying-lumen-requirements/>
- [15] Green, M.: *Night Vision*, [Online]  
Dostupné z: <http://www.visualexpert.com/Resources/nightvision.html>
- [16] UNIVERSELITE, *O indukci*, [Online]  
Dostupné z: <http://universelite.cz/O-indukci/>
- [17] Zálešák, J.: *Možnosti použití LED diod při osvětlování komunikací*, VŠB-TU Ostrava 2011, [Online]  
Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/87176?show=full>

- [18] Tomáš, D.: *Osvětlení komunikací v podmínkách mezopického vidění*, ČVUT, Praha 2015, [Online]  
Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/61684>
- [19] Habel, J.: *Význam mezopického vidění pro praxi*, ČVUT, Praha 2007, [Online]  
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36187.pdf>
- [20] *Barevné vidění*, [Online]  
Dostupné z: <http://www.videni.cz/oko/29-barevne-videni>
- [21] WikiSkripta, [Online]  
Dostupné z: [http://www.wikiskripta.eu/index.php/Oko\\_\(biofyzika\)](http://www.wikiskripta.eu/index.php/Oko_(biofyzika))
- [22] *Skotopické a fotopické vidění*, [Online]  
Dostupné z: <https://www.jandur.cz/optics/detekce/d5.htm>
- [23] Skokanský, K.: *Snižovat jasy při použití světla s vysokou teplotou chromatičnosti ve veřejném osvětlení, či nikoliv?*, VŠB-TU Ostrava, [Online]  
Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Svetlo/2012/05/Svetlo\\_05\\_2012\\_output/web/Svetlo\\_05\\_2012\\_opf\\_files/WebSearch/page0050.html](http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Svetlo/2012/05/Svetlo_05_2012_output/web/Svetlo_05_2012_opf_files/WebSearch/page0050.html)
- [24] Telescope optics, *Eye spectral response*, [Online]  
Dostupné z: [http://www.telescope-optics.net/eye\\_spectral\\_response.htm](http://www.telescope-optics.net/eye_spectral_response.htm)
- [25] Skokanský, K.: *Světelná technika*, ČVUT, Praha 2011, [Online]  
Dostupné z: [http://k315.feld.cvut.cz/CD\\_MPO/CVUT-6-Svetelna.pdf](http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-6-Svetelna.pdf)
- [26] OFTA, Oči laserové centrum, [Online]  
Dostupné z: <http://www.ofta.cz/cz/encyklopedie-oka/schema-oka/>
- [27] Encyklopedie fyziky, *Spektrální citlivost*, [Online]  
Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/491-spektralni-citlivost>
- [28] *Akomodace oka*, [Online]  
Dostupné z: <http://www.cocky.cz/akomodace-oka.html>
- [29] Randulová, J.: *Akomodace a konvergence*, Masaryková univerzita, Brno 2008, [Online]  
Dostupné z: [https://is.muni.cz/th/175182/lf\\_b/Bakalarska\\_prace\\_k40k2.pdf](https://is.muni.cz/th/175182/lf_b/Bakalarska_prace_k40k2.pdf)
- [30] Aldebarn Bulletin, [Online]  
Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005\\_s1\\_uni.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_s1_uni.php)
- [31] ČSN CEN/TR 13201-1 *Osvětlení pozemních komunikací – Část 1: Výběr tříd osvětlení*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [32] ČSN EN 13201-2 *Osvětlení pozemních komunikací – Část 2: Požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [33] Performace based model for mesopic photometry, Lightinglab 2005. [Online]  
Dostupné z: [http://www.lightinglab.fi/CIETC1-58/files/MOVE\\_Report.pdf](http://www.lightinglab.fi/CIETC1-58/files/MOVE_Report.pdf)
- [34] Habel, J.: *Základy světelné techniky 2*, ČVUT, Praha 2008, [Online]  
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-2--15893>
- [35] Google Maps, [Online]  
Dostupné z: <https://www.google.cz/maps>
- [36] CIE, *CIE AND MESOPIC PHOTOMETRY* [Online]  
Dostupné z: <http://www.cie.co.at/index.php/LEFTMENUE/About+us/CIE+Newsletter/Artikel+1+Oktober>

- [37] Světloblog, [Online]  
Dostupné z: <http://www.svetloblog.cz/index.php?svetlo=verejne-osvetleni>
- [38] Wikisofia, [Online]  
Dostupné z: [https://wikisofia.cz/wiki/Principy\\_vn%C3%ADm%C3%A1n%C3%AD\\_barev\\_-\\_fyzik%C3%A1ln%C3%AD\\_a\\_fyziologick%C3%A1\\_omezen%C3%AD](https://wikisofia.cz/wiki/Principy_vn%C3%ADm%C3%A1n%C3%AD_barev_-_fyzik%C3%A1ln%C3%AD_a_fyziologick%C3%A1_omezen%C3%AD)
- [39] Ofta, [Online]  
Dostupné z: <http://www.ofta.cz/cz/encyklopedie-oka/schema-oka/>
- [40] Springer, *Road Lighting*, [Online]  
Dostupné z:  
[https://books.google.cz/books?id=tzuSBQAAQBAJ&pg=PA78&lpg=PA78&dq=S/P+ratio+usp+system&source=bl&ots=IKaA-tlqLt&sig=OKwvtHQ7aOiODA6Bb9Fij16dwKs&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjS4sL\\_\\_sPQAhUD6CwKHYU0DgUQ6AEILTAC#v=onepage&q=S%2FP%20ratio%20usp%20system&f=false](https://books.google.cz/books?id=tzuSBQAAQBAJ&pg=PA78&lpg=PA78&dq=S/P+ratio+usp+system&source=bl&ots=IKaA-tlqLt&sig=OKwvtHQ7aOiODA6Bb9Fij16dwKs&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjS4sL__sPQAhUD6CwKHYU0DgUQ6AEILTAC#v=onepage&q=S%2FP%20ratio%20usp%20system&f=false)