

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

Disertační práce

**Studium energetické náročnosti osvětlovacích soustav
v podmínkách mezopického vidění**

Praha, srpen, 2018

Doktorský studijní program: **Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektroenergetika**

Vypracoval: **Ing. Jan Zálešák**

Školitel: **Prof. Ing. Jiří Habel, DrSc.**

Školitel specialista: **Ing. Petr Žák, Ph.D.**

Abstrakt

Předložená disertační práce se věnuje tématu mezopického vidění a návazných možností potenciálních úspor vyplívajících z provozu a dimenzování veřejných osvětlovacích soustav pro podmínky mezopického vidění. V práci jsou prezentovány provedené teoretické simulace i terénní měření za účelem studia rozložení jasů v zorném poli pozorovatele. Na základě zjištěných souvislostí jsou odvozeny aplikační postupy a doporučení vhodných parametrů pro veřejné osvětlovací soustavy v praktických užitích. Dále jsou vyjádřeny potenciální úspory pro veřejné osvětlovací soustavy v podmínkách mezopického vidění.

Klíčová slova:

Mezopické vidění, veřejné osvětlení, poměr S/P, energetická náročnost, úspory ve veřejném osvětlení

Abstract

This thesis is dealing with now days topic of mesopic vision and potential saving due to possible lowering of power composition. Thesis describe many theoretical simulations based on MES2 system produced by CIE. Also, thesis handle a on field measurement and describe results. All gain knowledge is applied for determine basic requirements for public lighting suitable to human mesopic vision predisposition. Determine of possible savings is also shown.

Keywords

Public lighting, LED light source, mesopic vision, mesopic systems, S/P ratio, energy savings

Obsah

Seznam obrázků	iii
seznam Grafů	iv
Seznam tabulek	vi
čestné prohlášení	viii
Poděkování.....	ix
Úvod	10
1 Současný stav problematiky	11
1.1 Fyziologie zraku v oblasti mezopického vidění.....	11
1.1.1 Zrak a vidění	11
1.1.2 Fyziologický popis orgánu zraku	11
1.1.3 Sítnice a její části.....	12
1.1.4 Čípky a tyčinky	14
1.1.5 Rozsah zrakového vjemu a adaptace zraku na světelné podmínky.....	15
1.2 Mezopické systémy	21
1.2.1 USP-system.....	21
1.2.2 MOVE-System.....	23
1.2.3 Intermediate Systém – MES1 a MES2.....	25
1.2.4 Doporučený mezopický systém	29
1.2.5 Doporučení CIE NT-007-2017	29
1.3 Metoda stanovení průběhů spektrálních světelných účinností standardního pozorovatele pro vybrané adaptační jasy při mezopickém vidění.....	30
Cíle disertační práce:	35
2 Aplikace MES2 pro praktické příklady	36
2.1 Aplikace metodiky	36
2.1.1 Stanovení světelného toku svítidel dle adaptačního jasu.....	36
3 Porovnání světelných zdrojů LED pomocí MES2	41
3.1 Aplikace metodiky MES2 v reálných podmínkách.....	43
4 Rozbor jasu zorného pole pozorovatele ve venkovním prostředí	45
4.1 Postup metodiky studie pomocí programu DIALux	45
5 Studie rozložení jasů v zorném poli pozorovatele	50
5.1 Úvod	50
5.1.1 Postup měření a vyhodnocení	50
5.1.2 Popis výsledků měření a získaných údajů	54

5.2	Závěr měření	59
6	Energetické porovnání	60
6.1	Hodnocení energetické náročnosti	60
6.2	Případové studie	64
6.2.1	Porovnání příkonových a provozních nákladů pro světelné zdroje LED s rozdílnou teplotou chromatičnosti	71
7	Stanovení hodnotících parametrů osvětlovacích soustav v podmínkách mezopického vidění	73
8	Závěr	75
	Závěry pro další rozvoj vědy nebo realizaci v praxi	76
	Seznam odborné literatury	77
	Publikace v impaktovaných časopisech (excerpované WOS):	79
	Publikace v recenzovaných časopisech:	79
	Publikace ostatní:	79
	Ohlasy	80

Seznam obrázků

Obr. 1 Schematický řez lidským okem [6]	12
Obr. 2 Řez sítnicí [7]	13
Obr. 3 Zvětšený řez sítnicí [8].....	13
Obr. 4 Rozložení čípků a tyčinek na sítnici [9].....	14
Obr. 5 Graf relativní ostrosti vidění [10]	16
Obr. 6 Graf závislosti ostrosti vidění na adaptační úrovni jasu [5]	17
Obr. 7 Průběh adaptace na tmou [5].....	18
Obr. 8 Citlivost čípků a tyčinek pro jednotlivé adaptační úrovně [5]	19
Obr. 9 Rozsah vnímání jasů a oslnění [12]	20
Obr. 12 Ukázka průběhu spektra zářivé energie pro vzorovou komunikaci C	43
Obr. 10 Promítnutí pozorovaného obrazu na sítnici [16]	45
Obr. 11 Modelová scéna adaptačního prostředí v programu DIALux [17]	46
Obr. 13 Vyznačení zorných úhlů pro hodnocení rozložení jasů v zorném poli řidiče [19]....	50
Obr. 14 Zobrazení pozic výskytu pohledů v zorném poli řidiče	51
Obr. 15 Detailní analýza středu zorného pole.	52
Obr. 16 Grafické vyjádření rozsahu binokulárního vidění	53
Obr. 17 Fotografie se vymezenou oblastí binokulárního vidění	53
Obr. 18 Vyhodnocovací pole typu 3.....	54
Obr. 19 Ukázky jednotlivých situací pro hodnocení průměrného jasu zorného pole	56

seznam Grafů

Graf 1 Porovnání mezopických modelů. Nepřerušovaná linka reprezentuje světelný zdroj s poměrem $S/P = 2,25$, přerušovaná linka reprezentuje světelný zdroj s poměrem $S/P = 0,65$	26
Graf 2 Průběhy poměrné spektrální citlivosti zraku standardního fotometrického pozorovatele pro vybrané hodnoty adaptačních jasů	32
Graf 3 Průběhy poměrné spektrální citlivosti zraku standardního fotometrického pozorovatele pro vybrané hodnoty adaptačních jasů L_a [cd/m^2)	34
Graf 4 Spektrální rozložení fotopického, mezopického a skotopického světelného toku svítidla B	37
Graf 5 Závislost poměru S/P na náhradní teplotě chromatičnosti T_{cp}	38
Graf 6 Průběh poměru mezopického a fotopického světelného toku v závislosti na adaptačním jasu pro vybrané typy svítidel	39
Graf 7 Průběh poměru S/P vztažený k poměru S/P svítidla s vysokotlakou sodíkovou výbojkou v závislosti na adaptačním jasu pro vybrané typy svítidel Závislost poměrného světelného toku vybraných svítidel na hodnotě adaptačního jasu v mezopické oblasti.	39
Graf 8 Grafické vyjádření subjektivně vnímaného jasu L_m v podmínkách mezopického vidění pro různý poměr S/P světelného zdroje pro jednotlivé třídy osvětlení pro motorová vozidla	40
Graf 9 Závislost průměrného jasu pozorované plochy L_p na zorném úhlu pro jednotlivé modelové situace	48
Graf 10 Závislost průměrného vnímaného jasu pozorované plochy L_p ,mez na zorném úhlu pro jednotlivé modelové situace Adaptační jas v oblasti mezopického vidění pro modelové situace [17].....	49
Graf 11 Průběhy průměrných jasů zorného pole v závislosti na zorném úhlu pro 4 definované situace	55
Graf 12 Potřebný poměrný příkon HPS v porovnání s LED 4000 K pro dosažení stejných světelně technických parametrů v podmínkách mezopického vidění pro jednotlivé třídy osvětlení M.....	67
Graf 13 Potřebný poměrný příkon HPS v porovnání s LED 4000 K pro dosažení stejných světelně technických parametrů v podmínkách mezopického vidění pro jednotlivé třídy osvětlení P	68
Graf 14 Grafické vyjádření poměrných nákladů na provoz soustavy s vysokotlakou sodíkovou výbojkou a světelnou diodou 4000 K pro jednotlivé třídy osvětlení v podmínkách mezopického vidění pro třídy osvětlení M.....	70
Graf 15 Grafické vyjádření poměrných nákladů na provoz soustavy s vysokotlakou sodíkovou výbojkou a světelnou diodou 4000 K pro jednotlivé třídy osvětlení v podmínkách mezopického vidění pro třídy osvětlení P	70
Graf 16 Potřebný poměrný příkon LED 3000K v porovnání s LED 4000K pro dosažení stejných světelně technických parametrů v podmínkách mezopického vidění pro jednotlivé třídy osvětlení M	71
Graf 17 Potřebný poměrný příkon LED 3000K v porovnání s LED 4000K pro dosažení stejných světelně technických parametrů v podmínkách mezopického vidění pro jednotlivé třídy osvětlení P.....	71

Graf 18 Grafické vyjádření potenciálních úspor formou složek příkonu daných měrným výkonem a rozdílnou spektrální světelnou účinností zraku v podmínkách mezopického vidění pro LED 4000K v porovnání s LED 3000K pro třídu osvětlení M.....	72
Graf 18 Grafické vyjádření potenciálních úspor formou složek příkonu daných měrným výkonem a rozdílnou spektrální světelnou účinností zraku v podmínkách mezopického vidění pro LED 4000K v porovnání s LED 3000K pro třídu osvětlení P	72

Seznam tabulek

Tab 1 Procentní změna fotopického jasu při mezop. podmínkách vidění pro systém USP [3]	23
Tab 2 Procentní změna fotopického jasu při mezopických podmínkách vidění pro systém MOVE [3]	25
Tab 3 Procentní změna fotopického jasu při mezopických podmínkách vidění pro systém MES1 [2]	28
Tab 4 Procentní změna fotopického jasu při mezopických podmínkách vidění pro systém MES2 [2]	28
Tab 5 Základní parametry sledované skupiny svítidel	36
Tab 6 Hodnoty světelných toků sledovaných svítidel pro různé hodnoty adaptačních jasů	37
Tab 11 Závislost poměru S/P na náhradní teplotě chromatičnosti T_{cp} a indexu podání barev R_a (pro jednotlivé světelné zdroje LED)	41
Tab 12 Subjektivně vnímaný jas L_{mes} [cd/m^2] pro LED zdroje 3 000 K (vlevo) a 4 000 K (vpravo) se stejnými fotopickými světelnými toky	42
Tab 13 Relativní rozdíl mezopického jasu L_{mes} při teplotě chromatičnosti 3000 K a 4 000 K	42
Tab 14 Porovnání deklarovaných a měřených náhradních teplot chromatičnosti LED svítidel v reálném provozu.	44
Tab 7 Technické parametry použitých světelných zdrojů	47
Tab 8 Světelně technické parametry modelového návrhu	47
Tab 9 Relativní rozdíly průměrných jasů pro jednotlivé modelové situace osvětlené rozdílnými světelnými zdroji	47
Tab 10 Relativní rozdíly průměrných mezi jednotlivými modelovými situacemi v závislosti na zorném úhlu.	48
Tab 15 Zatřídění posuzovaných pozemních komunikací do výše definovaných situací	56
Tab 16 Přehled zatřízených komunikací dle zjištěných průměrných jasů dle rozšiřujících se zorných úhlů, binokulárního vidění a měření viděného jasu komunikace a okolí	57
Tab 17 Procentní průměrný jas okolí vůči průměrnému jasu komunikace	58
Tab 18 Hodnoty poměrů S/P pro vybrané modelové světelné zdroje	65
Tab 19 Hodnoty průměrných fotopických jasů na povrchu komunikace pro motorová vozidla k vyvolání identického subjektivního vjemu hodnoceného metodikou MES2	65
Tab 20 Hodnoty průměrných fotopických osvětleností na povrchu komunikace pro chodce k vyvolání identického subjektivního vjemu hodnoceného dle metodiky MES2	65
Tab 21 Zvolené parametry světelných zdrojů, svítidel a komunikace pro modelové řešení	66
Tab 22 Instalovaný příkon na 1 km délky komunikace třídy M s daným typem světelného zdroje	66
Tab 23 Instalovaný příkon na 1 km délky komunikace třídy P s daným typem světelného zdroje	67
Tab 24 Hustota příkonu D_p pro modelovou situaci komunikace třídy osvětlení M	68
Tab 25 Ukazatel roční spotřeby D_e pro modelovou situaci komunikace třídy M	69
Tab 26 Roční provozní náklady pro 1 km komunikace	69
Tab 27 Doporučené hodnoty kvalitativních parametrů světelných zdrojů pro veřejné osvětlení v rámci jednotlivých tříd osvětlení.	73

Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol	Význam	Jednotka
\bar{E}_m	průměrná udržovaná osvětlenost	(lx)
E_m	udržovaná osvětlenost	(-lx-)
E_{min}	minimální osvětlenost	(lx)
L	jas	(cd/m ²)
L_p	jas fotopický	(cd/m ²)
L_m	jas mezopický	(cd/m ²)
L_a	jas adaptační	(cd/m ²)
P	elektrický příkon	(W)
R_a	index barevného podání	(-)
S_λ	poměrné spektrální složení zářivé energie světelného zdroje	(lm/W)
T_c	teplota chromatičnosti	(K)
$V(\lambda)$	poměrná spektrální světelná účinnost pro c fotopické vidění	(lm/W)
$V'(\lambda)$	poměrná spektrální světelná účinnost pro skot skotopické vidění	(lm/W)
$V''(\lambda)$	poměrná spektrální světelná účinnost pro mezopické vidění	(lm/W)
W_{rok}	spotřeba elektrické energie za rok	(kWh/rok)
η	měrný výkon	(lm/W)
λ	vlnová délka	(nm)
ρ	činitel odrazu	(-)
Φ	světelný tok	(lm)

Zkratka	Význam
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování
ČSN	Česká státní norma
HPS	vysokotlaká sodíková výbojka (high pressure sodium)
InGaN	indium gallium nitrid
LED	světelná dioda (light-emitting diode)
LPS	nízkotlaká sodíková výbojka (low pressure sodium)
MH	halogenidová výbojka (metal-halide)
<i>S/P ratio</i>	poměr světelného toku skotopického k světelnému toku fotopickému
VO	veřejné osvětlení

čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Jiřího Habela, DrSc. a Ing. Petra Žáka, Ph.D., s použitím literatury uvedené v závěru disertační práce v seznamu použité literatury.

V Praze

Jan Zálešák

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval přednostně panu prof., Ing. Jiřímu Habelovi, DrSc. za jeho obětavou práci, trpělivost, schopnost naslouchat a nenásilnou formou získat si hluboký respekt u svých kolegů díky znalostem a laskavému přístupu. Dále pak Ing. Petru Žákovi, Ph.D., který v závěru po panu profesorovi převzal jeho práci a také tíhu odpovědnosti a očekávání, která je velkým odkazem a výzvou.

Mé hluboké poděkování patří mé manželce Mgr. Deboře Zálešákové, která společně se mnou nesla tíhu odhodlání a podporovala mne. Život s ní mne naplňuje radostí a odvahou.

Poděkování patří také kolegům Ing. Zuzaně Panské, Ing. Marku Bálskému, Ph.D a Ing. Rudolfovi Bayerovi, Ph.D. Bez jejich zastání během dlouhých let studia, nadšení a ochoty sdílet svůj čas a vědění by práce nemohla vzniknout.

Dále pak bych chtěl poděkovat všem přátelům a kolegům, které tato práce zastihla skrze mne.

„The brave things in the old tales and songs, Mr. Frodo: adventures, as I used to call them. I used to think that they were things the wonderful folk of the stories went out and looked for, because they wanted them, because they were exciting and life was a bit dull, a kind of a sport, as you might say. But that's not the way of it with the tales that really mattered, or the ones that stay in the mind. Folk seem to have been just landed in them, usually - their paths were laid that way, as you put it. But I expect they had lots of chances, like us, of turning back, only they didn't.“

J.R.R. Tolkien, The Two Towers, 1954

Úvod

Zrak a schopnost vidění je zásadním zdrojem informací o prostředí, ve které se člověk nachází. Možnosti a orientace, hodnocení nebezpečí a plnění úkolů je zásadním předpokladem jedince pro úspěšné přežití. V rámci evolučního vývoje člověka se jako jeden ze smyslových orgánů vyvinulo lidské oko, které umožňuje rozlišit jasy a kontury především během dne, kdy se také odehrává většina lidských aktivit. Na toto nastavení je třeba nahlížet s historickým odstupem, neboť před příchodem elektrické energie byly zdrojem osvětlení pouze teplotní světelné zdroje, kde zdrojem světla byl plamen. [1]

Na začátku 20. století definovala mezinárodní komise pro osvětlování spektrální citlivost zraku standardního pozorovatele pro oblast denního a nočního vidění. Denní vidění bylo definováno při adaptačním jasu vyšším než 10 cd/m^2 , a noční oblast vidění při adaptačních jasech nižších než $0,001 \text{ cd/m}^2$. Větší pozornosti se v posledních dvou desetiletích dostává zrakovým vjemům při nízkých adaptačních jasech, zhruba méně než 5 cd/m^2 a více než $0,005 \text{ cd/m}^2$ až s příchodem umělých světelných zdrojů, které umožňují rozšířit lidské aktivity ve venkovním prostředí do noční části dne. Tyto prostory jsou typické nízkými adaptačními jasy, kde se uplatňuje mezopická oblast vidění. [2]

Schopnost zraku využívat informace z dvou typově rozdílných světlo-čivných typů buněk, čípků a tyčinek zajišťuje subjektivně kvalitní zrakový vjem, při kterém je zachována vysoká kognitivní úroveň zrakové informace díky foveálnímu vidění zprostředkovaného čípkou a současně rychlá odezva zraku v periferní části zorného pole poskytovaná tyčinkami. [1]

Matematický popis funkce mezopického vidění, ani při současné úrovni poznání není snadné stanovit. V roce 2010 vydala CIE technickou zprávu CIE 191:2010, ve které jsou uvedeny a popsány 4 metody popisující chování zraku v mezopické oblasti vidění. V závěru dokumentu je doporučena jedna z metodik (MES2) pro další studium, testování a použití v praxi. [3] [4]

Většina výzkumů v oblasti mezopického vidění byla zaměřena na zpřesnění popisu funkce zraku. Testována byla například kvalita zrakového vjemu i rychlost reakce pozorovatele při různých adaptačních podmínkách. Variabilita a rozsah těchto studií však neumožňují sjednocení poznatků. Část výzkumu byla věnována také problematice adaptačního pole pozorovatele. Tomuto tématu se věnuje dokument CIE TN 007:2017, který shrnuje několik poznatků a pro zjednodušení využívání metodiky MES2 a popisu zraku v oblasti mezopického vidění doporučuje využívat standardní kontrolní pole komunikací (v rozmezí rozteče světelných bodů), kdy průměrná hodnota jasu je považována za adaptační jas.

1 Současný stav problematiky

1.1 Fyziologie zraku v oblasti mezopického vidění

1.1.1 Zrak a vidění

Jedním z pěti smyslů, člověka, je zrak. Obecně zrakový orgán zprostředkovává řadu informací přicházející z okolního prostředí, které ovlivňují člověka z pohledu fyziologického, psychologického i biologického. Pokud chceme zkoumat zrak či vidění obecně, je třeba respektovat vlivy fyziologické, psychologické i biologické. Důležitým aspektem je skutečnost, že se lidské oko vyvíjelo ve světelných podmínkách na Zemi. Je tedy třeba brát zřetel také na tyto okolnosti, kterým se vidění a vnímání okolního prostředí přizpůsobovalo.

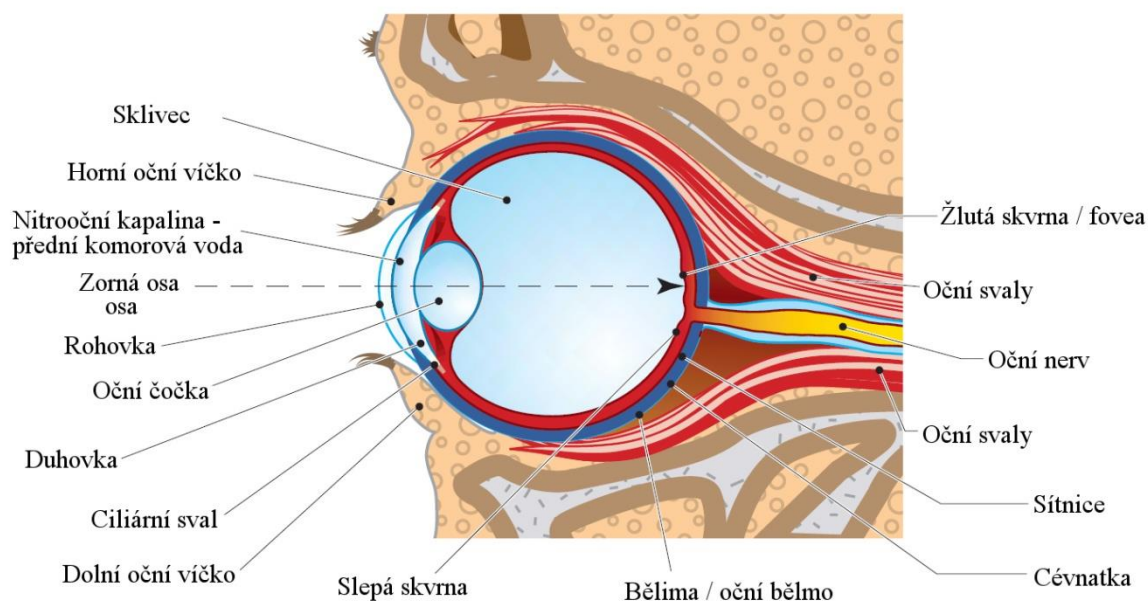
Význam vidění pro člověka je zřejmý ze skutečnosti, že více jak 80 % veškerých informací o okolí získává člověk prostřednictvím zraku. Oko, zrakový orgán, umožňuje zpracovávat informace přenášené optickým zářením a následně je setřídít ve zrakovém centru. Zde se z jednotlivých zrakových počitků skládá výsledný zrakový vjem.

1.1.2 Fyziologický popis orgánu zraku

Celkovému vnímání okolí zrak přispívá rozeznáváním barev, tvarů, kontrastů, a tedy i kontur. Zrakový systém člověka lze rozdělit do tří funkčních částí. První částí je oko samotné – nazývá se částí *periferní*. Zrakové nervy vedoucí nervové vzruchy vyvolané světelným podrážděním fotocitlivých buněk jsou částí druhou – *spojovací (spojová)*. Třetí část *centrální* tvoří podkorové a korové části mozku, kde je vizuální informace přijata, zpracovaná a upravena do finální podoby. [1]

Zrakový orgán Obr. 1 je tvořen oční koulí a dalšími orgány, které napomáhají funkci oka. Jimi jsou například okohybné svaly, spojivka, víčka a slzný aparát. Oční koule, která má průměr cca 24 mm, je ve své přední části zakřivena více než v zadní části, kde je poloměr zadního segmentu větší.

Hlavními prvky optické části je rohovka, oční čočka a duhovka. Rohovka zprostředkovává zhruba 2/3 refrakčního mechanismu – optické mohutnosti oka. Oční čočka má pak za úkol jemné doladění a zaostření na konkrétní cíl v rozmezí od cca 10 centimetrů do 6 metrů. [5]

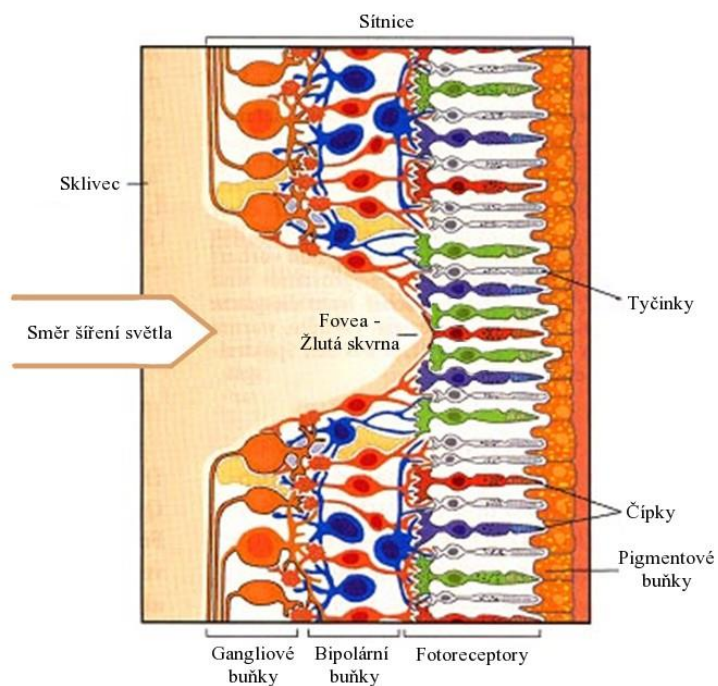


Obr. 1 Schematický řez lidským okem [6]

1.1.3 Sítnice a její části

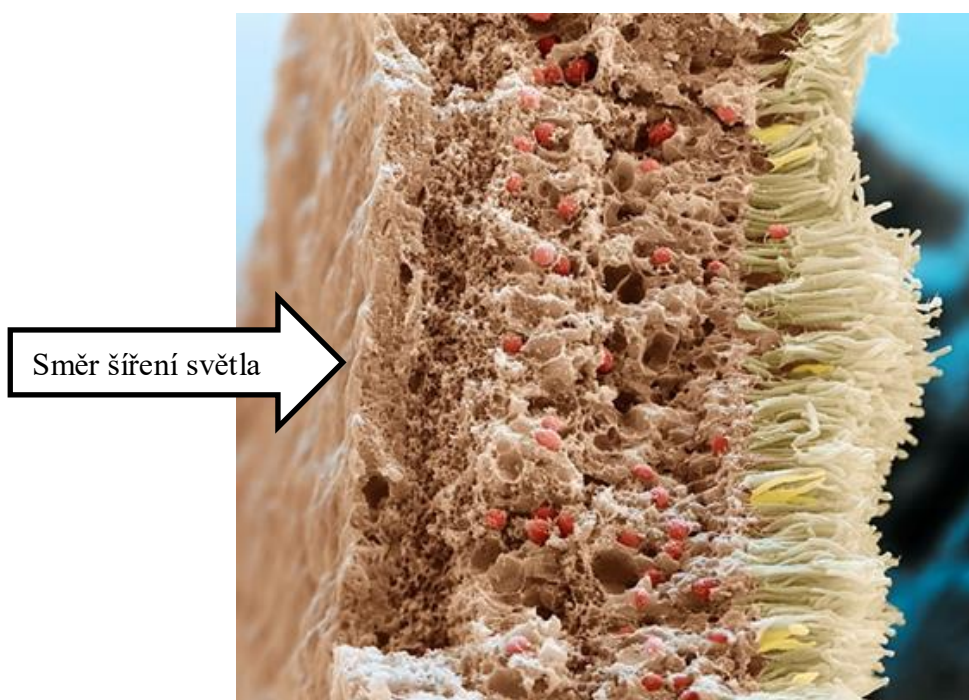
Sítnice je třetí vrstvou obalu oka. Těsně přiléhá k cévnatce a v přední části oka přechází v řasnaté tělísko stejně jako cévnatka. Na sítnici se nachází tzv. slepá skvrna, která je místem, kde do oka vstupuje zrakový nerv a kde nejsou přítomny žádné fotočinné receptory. Naopak největší koncentraci fotoreceptorů najdeme v místě zvaném žlutá skvrna, jejímž centrem je fovea, nacházející se v optické ose oka. Žlutá skvrna má v průměru cca 5 mm a fovea v jejím středu má průměr cca 1 mm. Barva žluté skvrny ve skutečnosti u živého člověka není žlutá, ale je spíše načervenalější, než zbytek okolní tkáně. Jméno žlutá dostala podle toho, že jako žlutá se jeví při patologických zákrocích.

Sítnici můžeme rozdělit do 11 vrstev. Některé svou funkcí zprostředkovávají podpůrné procesy vidění, jako například pigmentové buňky. Ty mají za úkol pohltit již zpracované optické záření, aby v oční bulvě nevznikaly odrazy, které by měly negativní vliv na zpětné vnímání optického záření přicházejícího do oka. V dalších vrstvách jsou obsaženy nervové buňky zprostředkovávající přenos informací obsažených v optickém záření na informace nervového vzruchu. Řez sítnicí je naznačen na Obr. 2.



Obr. 2 Řez sítnicí [7]

V bipolárních a gangliových buňkách se sdružují výstupy fotoreceptorů a předzpracovávají se nervové vzruchy. Taková sdružení světločivných buněk k vyšší nadřazené nervové buňce se nazývají vjemová pole. Směrem od žluté skvrny k čočce oka se počet fotoreceptorů připadajících na jednu gangliovou buňku v jednom vjemovém poli zvyšuje až na tisíce receptorů. Počet příslušných receptorů k jedné takové buňce není pevný, ale může se měnit dle aktuální potřeby adaptace zraku.

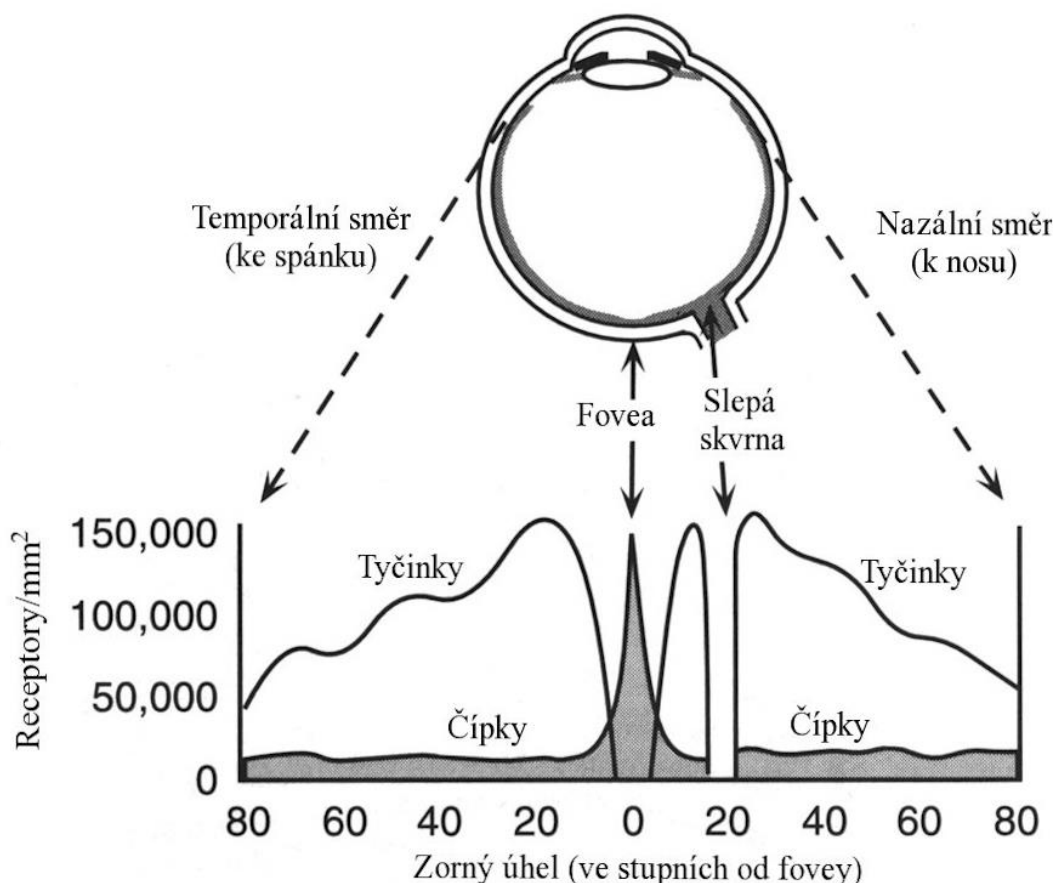


Obr. 3 Zvětšený řez sítnicí [8]

Na Obr. 3 je snímek řezu sítnicí zhruba osmisetnásobně zvětšený a renderovaný nepravými barvami. Směr šíření světla je znázorněn na levé straně obrázku. Červenou barvou jsou naznačeny gangliové a bipolární buňky, žlutou čípky, zelenou tyčinky a hnědou pak zbývající části sítnice. [8]

1.1.4 Čípky a tyčinky

Optické záření musí nejprve projít vrstvami nervových buněk sítnice, než dosáhne fotočivných receptorů. Ty jsou trojího typu - dva z nich zprostředkovávají vidění a třetí je využíván k řízení cirkadiálních rytmů. Světločivné receptory dělíme na tyčinky, čípky a receptory C. Rozložení tyčinek a čípků na sítnici je naznačeno na Obr. 4. Čípků je asi 7 milionů. Jsou koncentrovány okolo žluté skvrny a směrem od ní jejich hustota rapidně klesá. Tyčinky, kterých je asi 120 milionů, nejsou obsaženy ve žluté skvrně, ale jsou koncentrovány okolo žluté skvrny a směrem k přední části oka jich opět ubývá (jak naznačuje obrázek obr. Obr. 4). V místě vstupu očního nervu, tzv. papile, se nenacházejí žádné fotoreceptory.



Obr. 4 Rozložení čípků a tyčinek na sítnici [9]

Čípky se dále dělí na tři druhy zprostředkovávající vidění ve třech základních barvách. Procentuální rozložení jednotlivých druhů čípků je 64 % pro „červené“ spektrum, 32 % pro „zelené“ spektrum a 2 % pro „modré“ spektrum. Čípky reagující na „červené“ a „zelené“ spektrum můžeme najít v centrální části fovey. „Modré“ čípky, které mají sice větší citlivost,

ale zato je jich výrazně méně, jsou rozesety kolem žluté skvrny. Početní nevýhoda „modrých“ receptorů je vyvážena jejich citlivostí a zesílením signálu při zpracování v mozku.

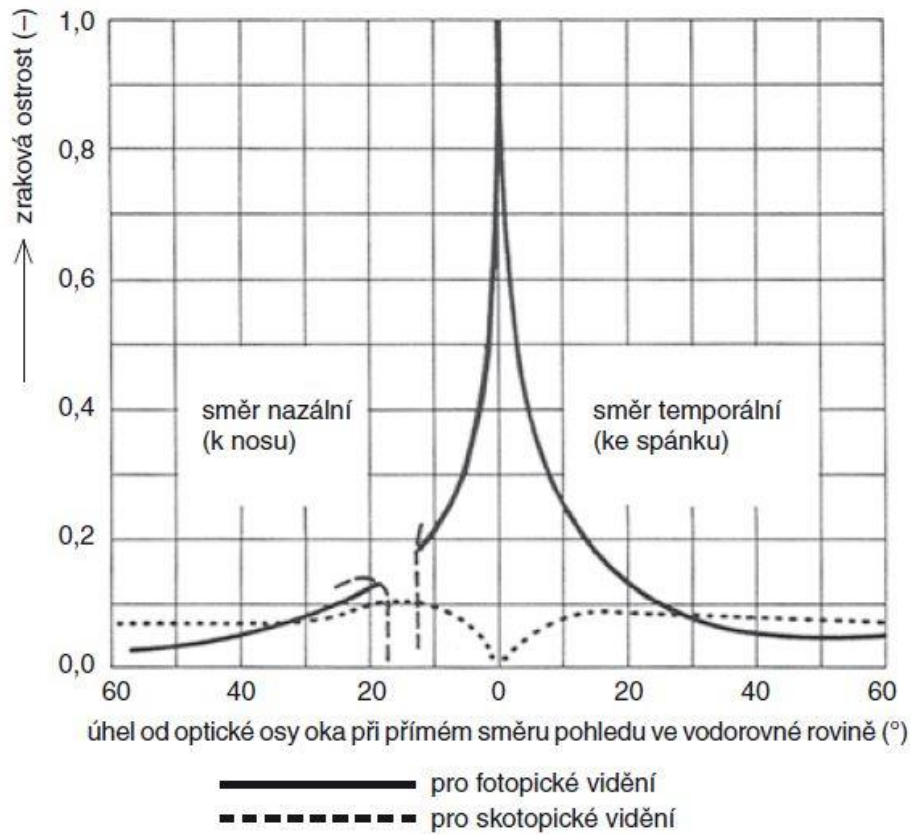
Úlohou všech čípků je barevné a ostré vidění. Jejich aktivita se uvádí od adaptačních jasů 0,001 či 0,01 cd/m². Vidění, které je považováno za čípkové, je od adaptačních jasů 10 cd/m². O čistém čípkovém vidění můžeme mluvit až od hodnoty jasu nad 100 cd/m². [5]

Tyčinky jsou druhým typem fotoreceptoru na sítnici zprostředkovávajícím vidění. Hlavní charakteristikou je vyšší citlivost na světelný podnět a mez adaptačních jasů, kdy jsou aktivní. Jsou citlivější než čípky a to až tisíci násobně. Tyčinky poskytují jen monochromatické vidění. Neumožňují rozlišovat jednotlivé barvy. Při pohledu na adaptační meze tyčinek obr. 8 můžeme říci, že se jejich význam ve vidění dá považovat za přínosný až v pásmu mezopického vidění – zhruba od 10 cd/m² a méně, i když jejich aktivitu můžeme předpokládat od jasů 100 cd/m². Vlivem svého rozložení na sítnici Obr. 4 zprostředkovávají část periferního vidění za běžných (denních) adaptačních jasů a také noční vidění, kdy periferní vjem pozorovaného detailu či objektu poskytuje vyšší míru informace než pohled foveální – tedy pozorování v ose pohledu. [1] [5]

1.1.5 Rozsah zrakového vjemu a adaptace zraku na světelné podmínky

1.1.5.1 Rozlišovací schopnost oka

K rozlišení detailů a předmětů se při zrakové činnosti používá způsob na základě porovnávání jasností pozorovaných objektů. Proces vidění, rozkladu a opětovné skládání obrazu s jeho identifikací a rozpoznání jsou velmi podobné Fourierově analýze. Tímto zjištěním založeným na základě výzkumu vjemových polí je odmítána teze, dle které je zraková ostrost omezena vzdáleností dvou fotoreceptorů, mezi nimiž je jeden neozářený. Průběh zrakové ostrosti je naznačen na Obr. 5. [10]

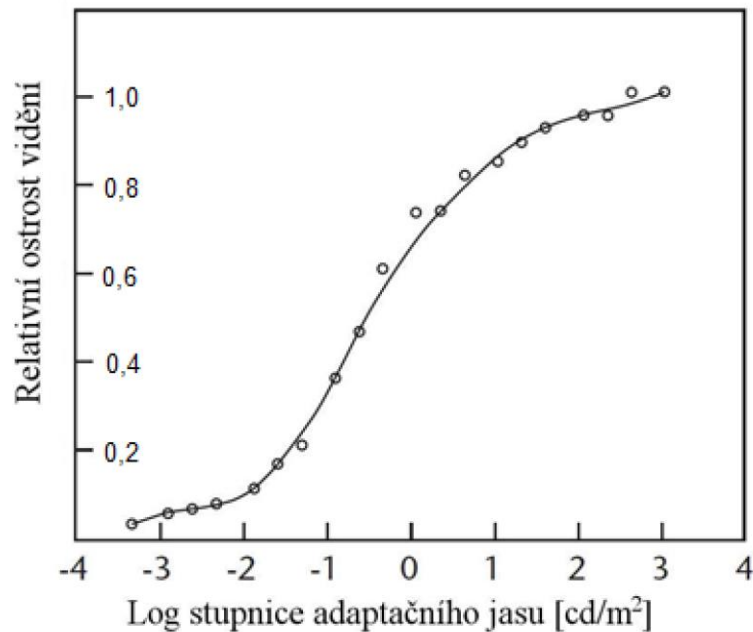


Obr. 5 Graf relativní ostrosti vidění [10]

Graf na Obr. 5 jasně popisuje průběh relativní ostrosti vidění pro čípky i tyčinky. Čípkové vidění charakteristické pro denní adaptační jasy je zdrojem ostrého obrazu. Vidíme, že nejvyšší ostrost je soustředěna na jedno místo – tím je fovea obsahující pouze čípky. Tyčinkové noční vidění není s to při nízkých jasech rozlišovat předměty tak ostře, jako je tomu u předchozího případu. Navíc jsou oblasti nejlepší relativní ostrosti u tyčinek situovány okolo středu pohledu. Experimentálně bylo zjištěno, že například při nočních zrakových úkolech, jako je řízení vozu či bezpečnostní dohled, jsou podněty mimo střed pohledu vnímány s kratší reakční dobou. [11]

1.1.5.2 Ostrost vidění v adaptačních hladinách

Různé hladiny adaptačních jasů ovlivňují také vjem a míru ostrosti, jakou zrakový orgán poskytuje. Výsledné hodnocení vidění vycházející z průběhu na uvedeném grafu ostrosti zraku na Obr. 6, je v tomto případě vyjádřena ve formě Snellenova zlomku. Ten vychází z oné známé tabule se zmenšujícími se písmenky u očního lékaře. Poměr zlomku prvního písmena „E“ je 20/200. Tento zlomek je udáván ve stopách. Po přepočtu na metry je to 6/60. První číslo udává vzdálenost, z jaké přečte správně písmeno člověk s vadou zraku bez optických pomůcek. Druhé číslo udává vzdálenost, z jaké je schopen rozlišit písmeno člověk s průměrným zdravým zrakem. Za nositele normálního, zdravého zraku se považuje člověk, který přečte písmena osmého řádku, kde hodnota zlomku je 20/20, respektive v SI 6/6.



Obr. 6 Graf závislosti ostrosti vidění na adaptační úrovni jasu [5]

Z grafu lze odvodit, že výkon definované zrakové činnosti klesá se zmenšujícím se jasem místa či jasem kritického detailu zrakového úkolu. Stejně tak míra odezvy rychlosti rozlišení detailu roste s rostoucí intenzitou osvětlení, avšak i v tomto případě se křivka postupně sklání do vodorovného směru. Namáhání očí způsobuje únavu a ty již nejsou s to nadále podávat zrakový výkon se zvyšující se tendencí. Pro nejvyšší jasy při denních adaptačních podmínkách byla ostrost dle Obr. 6 vidění udaná v Snellenově zlomku až 20/10. V jednotkách SI je to pak 6/3. Pro jasy nočních podmínek ostrost vidění klesla až na hodnotu 20/300, neboli v SI na 6/90. [5] [1]

1.1.5.3 Adaptační mechanismy na světlo a tmu

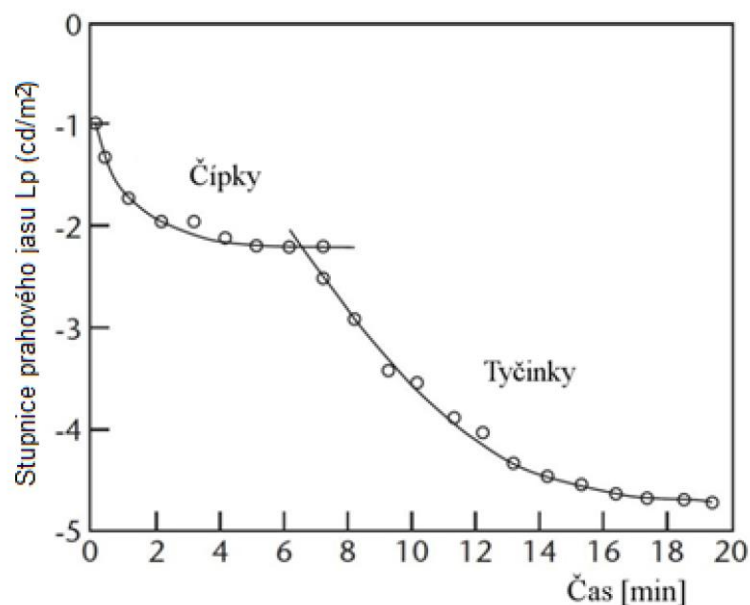
Zrakový systém používá několik adaptačních mechanismů. Nejjednodušším je fotopupilární reflex neboli změna průměru zorničky. Její průměr se může měnit v rozsahu až 1:20. Tento způsob regulace množství fotonů, které pronikají do oční koule, však nepatří k příliš účinným.

Dalším mechanismem adaptace je fotochemický děj, který se odehrává ve fotočivných receptorech. Každý druh na světlo citlivých buněk v sítnici má svůj konkrétní druh pigmentu. Od jejich vlastností se odvíjí většina adaptačních průběhů. Určuje jej čas rozpadu či syntézy pigmentu. Ten je závislý na předchozí adaptační hladině osvětlení a také na vlnové délce optického záření. Při jistých vlnových délkách je rozpad pigmentu rychlejší.

Nejdokonalejším adaptačním mechanismem je změna velikosti vjemových polí, kde nastávají procesy nervové adaptace. Průměr těchto polí se zmenšuje s rostoucí intenzitou osvětlení, a naopak se zvětšuje při adaptacích na tmu, aby mohla zachytit větší procento fotonů dopadajících na sítnici. Někdy se také mohou vzájemně překrývat.

1.1.5.4 Průběh adaptace

Oko nemá schopnost okamžité readaptace na hladiny různých osvětleností. Přechody mezi různými světelnými prostředími vyžadují čas pro přizpůsobení se novým podmínkám. Obr. 7 uvádí křivku adaptace na tmu, tedy přechod z prostoru s vyšší hladinou osvětlenosti do prostoru s nižší hladinou či do úplné tmy.



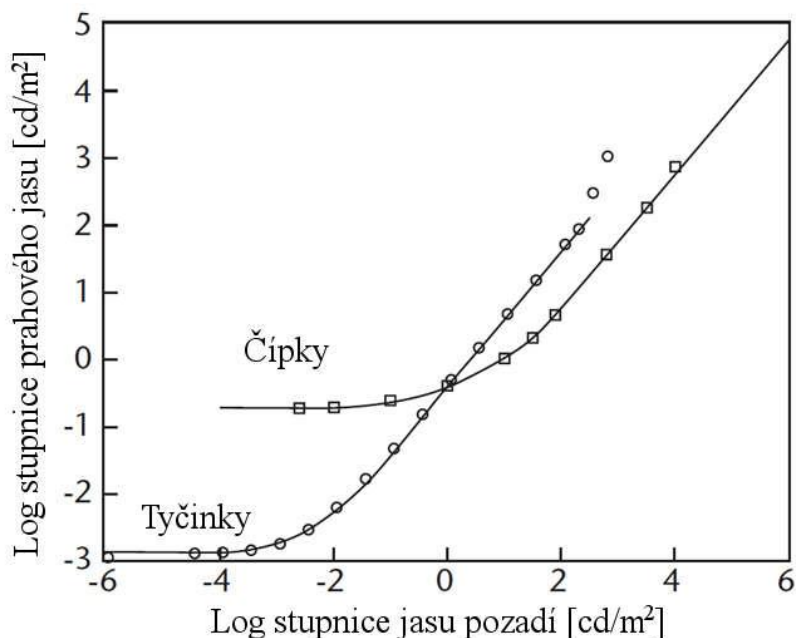
Obr. 7 Průběh adaptace na tmu [5]

Z předchozího grafu je možné pozorovat, že v první fázi adaptace na tmu stále ještě fungují čípky. Jejich citlivost na světlo roste po dobu přibližně osmi minut s tím, že v první půlce tohoto času se citlivost zvyšuje velmi rychle. Zlom v průběhu křivky se nazývá Kohlruschův ohyb, nebo také Purkyňův zlom. Jde o projev přechodu fotopického (čípkového) vidění do fáze skotopického (tyčinkového) vidění. Tím se také křivka dostává do své druhé fáze. Citlivost tyčinek na světlo dosahuje praktického maxima po 20 minutách, kdy je křivka grafu téměř vodorovná. Literatura uvádí 35 minutovou adaptaci jako dosažení měřitelného maxima [P1]. Jiná tvrdí, že je zde registrovatelný přírůstek citlivosti po dalších cca 30 minutách, který je však již téměř zanedbatelný. Další zvyšování citlivosti se může údajně dít dalších 24 – 48 hodin. [1]

Adaptace na světlo má oproti adaptaci na tmu poněkud jiný časový a psychologický průběh. Pokud vstoupíme do prostoru, kde je tma z prostoru dobře osvětleného, na relativně dlouhý moment, který může trvat až minuty, jsme „oslepeni“ tmou a nejsme schopni ani základní orientace. Pokud nastane taková situace v opačném případě, kdy se ocitáme v prostoru s výrazně vyšší hladinou osvětlenosti, než odkud přicházíme, je plná adaptace na vyšší hladinu osvětlenosti záležitostí momentů, maximálně jednotek minut oproti desítkám minut u adaptace na tmu. Navíc nedochází k naprosté ztrátě orientace v prostoru na několik minut jako u případu adaptace na tmu, ale po několika momentech jsme schopni se orientovat, i když máme psychologický vjem silného závoje jasů.

1.1.5.5 Adaptační poměry fotoreceptorů

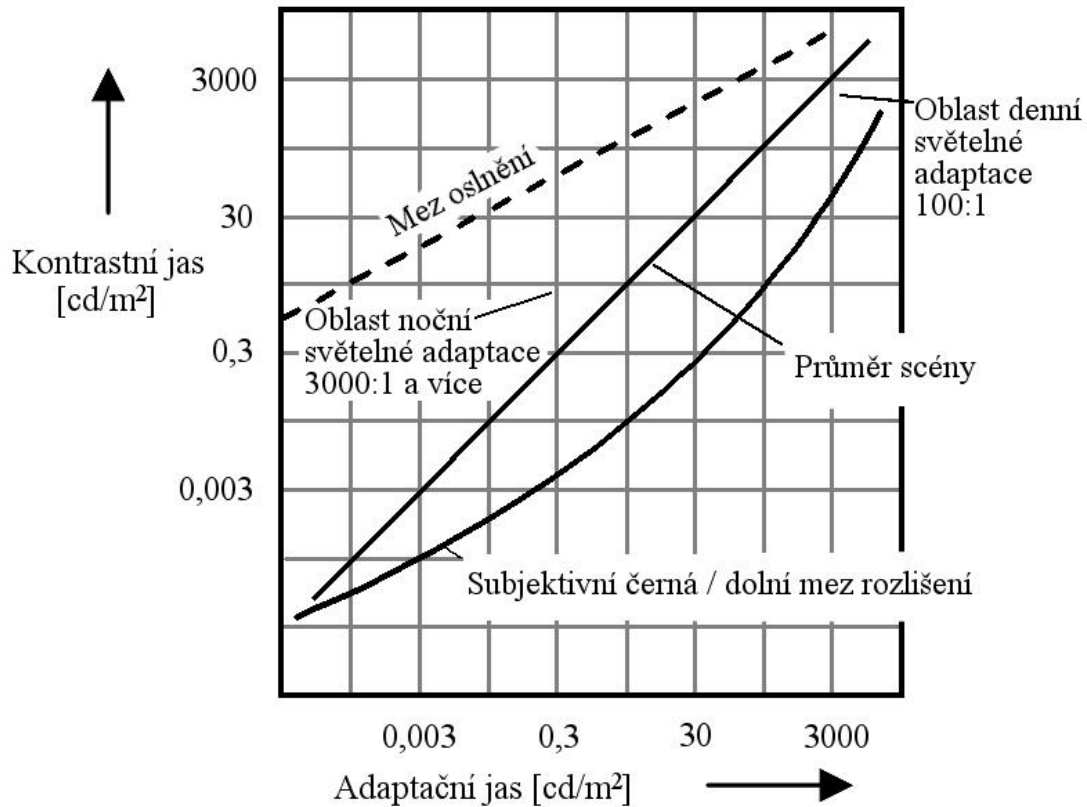
Základem vidění a rozpoznávání kontur je schopnost oka vnímat rozdílné jasy. Obr. 8 ukazuje graf průběhu citlivostí čípků a tyčinek na základě registrovaného prahového jasu, neboli kontrastu podnětu k jasu pozadí, na které je pozorovatel adaptován.



Obr. 8 Citlivost čípků a tyčinek pro jednotlivé adaptační úrovně [5]

Horizontální část křivky náležící tyčinkám, která je zhruba do hodnoty adaptačního jasu počátku rozlišovací schopnosti $-4 \log \text{cd}/\text{m}^2$, vypovídá o tom, že adaptační jas v těchto hodnotách v podstatě nemá vliv na změnu reakce minimálního světelného podnětu. To definuje spodní limitní hranici adaptace zrakového systému oka. Na druhé straně křivky tyčinek, nad hodnotou adaptace $2 \log \text{cd}/\text{m}^2$, se křivka začíná blížit svislé asymptotě, což svědčí o saturaci tyčinek a jejich další neschopnosti vnímat rozdíly jasů. Mezi těmito krajními hodnotami se nachází střední část křivky. Ta je lineární a můžeme ji popsat Weber-Fechnerovým zákonem říkajícím, že intenzita smyslového vjemu je logaritmičtě závislá na intenzitě fyzikálního podnětu. Křivka popisující citlivost čípků od jasu pozadí $2 \log \text{cd}/\text{m}^2$ také respektuje svou linearitou podle Weber-Fechnerův zákona. Pod hranicí $-2,6 \log \text{cd}/\text{m}^2$ jsou čípky již netečné na vizuální podmět. [5]

S možnostmi adaptací a vzruchové odezvy fotočivných receptorů je pracovní rozsah oka, resp. celého zrakového systému, velmi velký. Ale i tento systém má svá omezení. Nejsou jimi jen spodní a horní hranice adaptačních jasů, ale také oslnění. Je to stav, kdy se v zorném poli oka, které je adaptováno na určitou hladinu jasu, vyskytne zdroj jasu hodnoty vyšší, než je adaptační rozsah zrakového systému člověka. Oko tedy ovlivňují časové a prostorové kontrasty pozorovaných jasů. Hodnoty oslnění kontrastem jsou znázorněny na Obr. 9. [1]



Obr. 9 Rozsah vnímání jasů a oslnění [12]

Na vodorovné ose v grafu na Obr. 9 je uveden adaptační jas pozorovatele. Přímka „průměr scény“ nám pak ukazuje průměrný jas (adaptaci), kde pozorovaný detail v zorném poli má stejný jas jako jas jeho okolí. Na svislé ose je tedy hodnota jasu pozorovaného detailu. Pokud má pozorovaný detail výrazně menší hodnotu jasu, pak se jeví jako subjektivně černý – neosvícený. Při vyšší hodnotě pak nastává oslnění pozorovaným detailem.

Z grafu je zřejmé, že rozsah pozorovatelných kontrastů není shodný pro všechny adaptační hladiny. Pro noční prostředí je pozorovatelný rozsah kontrastů 3000:1 a více, kdežto pro denní adaptaci je to hodnota přibližně rovná poměru 100:1. [12]

1.2 Mezopické systémy

„Mezopický systém“ je model, respektive matematické vyjádření popisující spektrální citlivost oka na světelné podněty v oblasti mezopického vidění. V současné době představila Mezinárodní komise pro osvětlování čtyři mezopické systémy, s nimiž je možno stanovit subjektivně vnímané jasy v mezopické oblasti. Výsledně stanovená hodnota mezopického jasu je pak dána vstupními hodnotami adaptačních jasů a poměru spektrální odezvy vjemové soustavy ve fotopické a skotopické oblasti vnímání s tím, že k těmto poměrům v jednotlivých „systémech“ jsou přiřazeny koeficienty upravující výslednou hodnotu tak, aby odpovídala co nejvíce filozofii konkrétního výpočtového zaměření.

Všechny normy pro oblast všeobecného osvětlování vycházejí z křivky spektrální citlivosti lidského pro fotopické vidění $V(\lambda)$, která byla definována v roce 1924. Křivka pro skotopické vidění $V'(\lambda)$ definovaná v roce 1951 se v běžné praxi nepoužívá. Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) po více než 70 letech výzkumu a pokusů navrhla doporučený mezopický systém pro praxi pod názvem MES2 [13]

Předpokládá se, že jeho uvedení nebude mít vliv pouze na fotometrii jako takovou, ale vzhledem k rozmachu LED zdrojů se dá očekávat využití znalostí z fotometrie také pro samotnou výrobu a návrh těchto zdrojů, či jiných zdrojů s vysokým poměrem *S/P ratio* (poměr světelného toku při skotopickém vidění a světelného toku při fotopickém vidění). Vzhledem k současným trendům ve venkovním a veřejném osvětlení využívající bílé světelné diody (LED) lze očekávat, že mezopická fotometrie bude mít vliv i na optimalizování osvětlovacích soustav s nízkými hladinami osvětlenosti [13]. Popis chování lidského zraku, respektive vidění, při adaptačních hladinách spadajících do mezopické oblasti byly navrženy výpočetní metodiky, které jsou podrobně popsány v následující části. Jenž jsou následně uvedeny.

1.2.1 USP-system

Mezopický systém USP-systém, někdy nazývaný jako X-model, byl prvním matematickým popisem vidění v mezopických podmínkách. Jeho autorem je He a spol., kteří jej publikovali v letech 1997 až 1998. K definování tohoto systému byly využity údaje získané při experimentu s monokulárním pozorovatelem, kde byl měřen čas reakce pozorovatele. Ten tvořil pozorovaný předmět, k jehož osvětlení byla použita vysokotlaká sodíková výbojka a vysokotlaká halogenidová výbojka. UPS-system definuje rozsah mezopického vidění v rozmezí $0,001 \text{ cd/m}^2$ do $0,6 \text{ cd/m}^2$ [2]. Výpočet V_{mes} vychází ze vztahu:

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

kde:

$V(\lambda)$ je poměrná fotopická spektrální světelná účinnost standardního pozorovatele

$V'(\lambda)$ je poměrná skotopická spektrální světelná účinnost standardního pozorovatele

X je koeficient charakterizující poměr fotopické a skotopické křivky:

$$X = \frac{1}{0,599} L_{mes} - \frac{0,001}{0,599} \quad (2)$$

pro $0 \leq X \leq 1$

L_{mes} je mezopický jas vypočtený následovně:

$$L_{mes} = 0,834L_p - 0,335L_s - 0,2 + \sqrt{0,696L_p^2 - 0,333L_p - 0,56L_p L_s + 0,113L_s^2 + 0,537L_s + 0,04} \quad (3)$$

kde:

L_f je fotopický jas (cd/m^2)

L_s je skotopický jas (cd/m^2)

Uvedený matematický model pro výpočet poměrné mezopické spektrální citlivosti lidského oka dle UPS-system je pro svou jednoduchost často kritizován jako nedostatečný a nerespektující nově zjištěné zákonitosti chování lidského zraku v podmínkách mezopického vidění.

Tab 1 ukazuje, jak se procentuálně liší vypočítaný mezopický jas pomocí USP oproti jasu, který bychom odečetli z klasického jasoměru s fotopickým spektrálním filtrem respektujícím křivku spektrální světelné účinnosti lidského oka $V(\lambda)$.

Tab 1 Procentní změna fotopického jasu při mezop. podmínkách vidění pro systém USP [3]

	S/P ratio	Fotopický jas [cd/m ²]					Pozn.
		0,01	0,03	0,1	0,3	1	
LPS ~	0,25	-75	-73	-65	-34	0	Hodnoty jsou v procentech [%]
	0,45	-54	-62	-44	-21	0	
HPS ~	0,65	-34	-32	-26	-12	0	
	0,85	-15	-14	-11	-5	0	
MH teple bílá ~	1,05	5	4	3	1	0	
	1,25	24	22	16	7	0	
	1,45	43	38	27	11	0	
	1,65	61	54	37	15	0	
	1,85	79	69	47	18	0	
MH denní světlo ~	2,05	97	84	56	22	0	
	2,25	115	98	65	25	0	
	2,45	132	112	73	27	0	
	2,65	149	122	80	30	0	

1.2.2 MOVE-System

Na vzniku mezopického systému MOVE se podílelo několik evropských vysokých škol. Základní vizí při tvorbě tohoto systému nebyl přesný a detailní popis mezopického vidění, ale vytvoření popisu modelových situací nastávajících při řízení automobilu během noci tak, aby závěrečná metodika byla provázána s reálnými požadavky reálných světelných situací. Tím měl být zajištěn návrh optimálního mezopického systému, jehož výsledkem je komplexní popis lidských zrakových reakcí na dané podměty v podmínkách nočního řízení. [3]

Pokud chtěli tvůrci respektovat konkrétní praktické podmínky, museli si prvně položit základní otázky, které následně definovali postup prací. Noční řízení vozu lze tedy charakterizovat trojicí základních úkolů:

Je to vidět? Jak rychle? Co to je?

Tyto otázky vedou především na popis a definování schopnosti zraku a lidského faktoru reagovat na daný podnět. Trojice rozdílných dotazů pak vždy reflektuje jednotlivé aspekty vidění. První otázka vede na základní rozlišovací schopnost, kterou determinuje především prahový kontrast pozorovaného objektu. Následuje hodnocení rychlosti reakce na daný podnět. Posledním kritériem je samotná schopnost rozeznání objektu či překážky. Zde se hodnotí také samotná rychlost reakce pozorovatele na danou změnu. [3]

Všechny výše zmíněné otázky mají návaznost na výsledky laboratorních měření, kterých se zúčastnilo dohromady 109 pozorovatelů. Systém MOVE definuje podmínky mezopického vidění od 0,01 cd/m² do hodnoty 10 cd/m². [3]

Výpočet poměrné spektrální světelné účinnosti oka V_{mes} je následující:

$$V_{mes}(\lambda) = \frac{x V(\lambda) + (1 - x)V'(\lambda)}{M(x)} \quad (4)$$

$V(\lambda)$ je poměrná fotopická spektrální světelná účinnost standardního pozorovatele [-]

$V'(\lambda)$ je poměrná skotopická spektrální světelná účinnost standardního pozorovatele [-]

x je koeficient závislý na úrovni jasu a spektru [-]

$M(x)$ je normalizační funkce, která převede max. hodnotu na 1 [-]

koeficient x se získává následujícím iteračním výpočtem:

$$x_{n+1} = 1,49 + 0,282 \log_{10} \left[\frac{1}{M(x_n)} \left(x_n \frac{L_p}{1699} + (1 - x_n) \frac{L_s}{683} \right) \right] \quad (5)$$

pro $0 \leq x \leq 1$

Normalizační funkci $M(x)$ můžeme popsat:

$$M(x) = \max[x V(\lambda) + (1 - x)V'(\lambda)] \approx 1 - 0,65x + 0,65x^2 \quad (6)$$

Mezopický jas L_{mes} má pak hodnotu:

$$L_{mes} = \frac{x L_p + (1 - x) L_s (683/1699)}{x + (1 - x) (683/1699)} \quad (7)$$

kde

L_p je fotopický jas [cd/m²]

L_s je skotopický jas [cd/m²]

V Tab 2 jsou uvedeny procentuální změny fotopického jasu pro adaptační hladiny v podmínkách mezopického vidění v závislosti na poměru S/P.

Tab 2 Procentní změna fotopického jasu při mezopických podmínkách vidění pro systém MOVE [3]

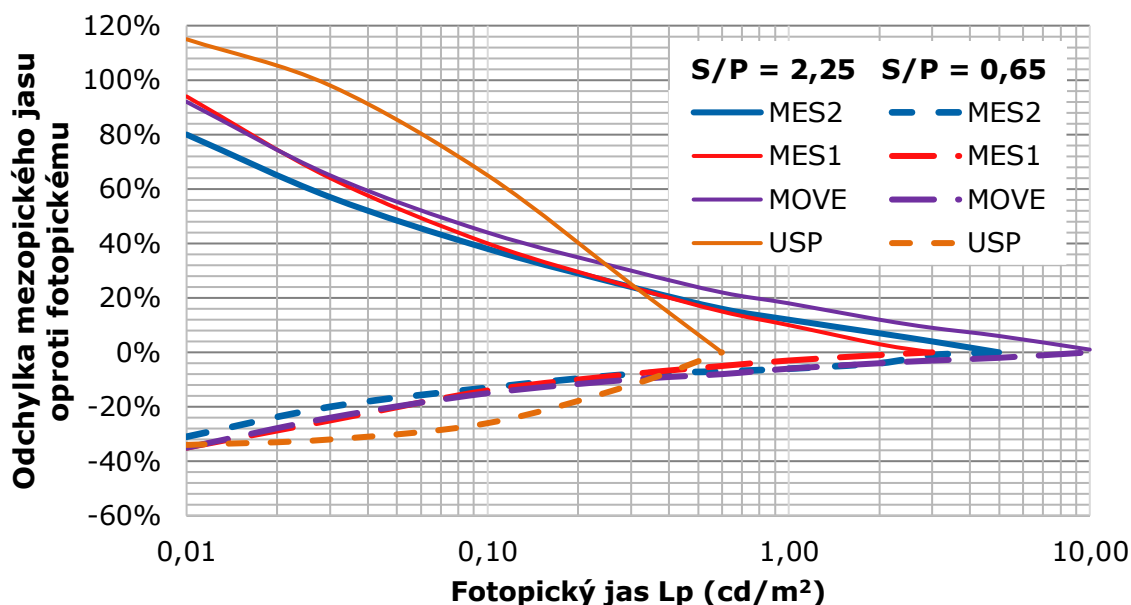
	S/P ratio	Fotopický jas [cd/m^2]									Pozn.
		0,01	0,03	0,1	0,3	1	2	3	5	10	
LPS ~	0,25	-75	-75	-36	-22	-13	-8	-6	-4	-1	Hodnoty jsou v procentech [%]
	0,45	-55	-42	-25	-16	-9	-6	-5	-3	-1	
HPS ~	0,65	-35	-24	-15	-10	-6	-4	-3	-2	0	
	0,85	-15	-10	-6	-4	-2	-2	-1	-1	0	
MH teple bílá ~	1,05	5	3	2	1	1	1	0	0	0	
	1,25	22	15	10	7	7	3	2	1	0	
	1,45	38	26	17	12	12	5	3	2	1	
	1,65	52	36	24	16	16	7	5	3	1	
MH denní světlo ~	1,85	66	46	31	21	21	9	6	4	1	
	2,05	79	56	38	26	26	12	8	5	1	
	2,25	92	65	44	30	30	12	9	6	1	
	2,45	105	74	51	34	34	14	11	7	2	
	2,65	116	83	57	39	39	16	12	7	2	

1.2.3 Intermediate System – MES1 a MES2

Mezinárodní komise pro osvětlování uvádí v technické zprávě CIE 191:2010 dva systémy s označením MES1 a MES2 pro výpočty mezopických jasů. Důvodem vytvoření těchto nových systémů je eliminace hlavních nedostatků systémů USP a MOVE. Mezi tyto nedostatky patří příliš jednoduchý matematický model USP systému, který tak neposkytuje dostatečně přesné výsledky, respektující skutečné podmínky. Hlavním nedostatkem systému MOVE je pak příliš velké omezení pouze na zrakové úkony související s řízením vozidel v nočních adaptačních podmínkách.

Mezi další nedostatky systémů USP a MOVE, patří jejich maximální hodnota rozsahu adaptačního jasu. U systému UPS je příliš nízká, dosahující hodnoty $0,6 \text{ cd}/\text{m}^2$, u systému MOVE je naopak příliš vysoká, dosahující hodnoty $10 \text{ cd}/\text{m}^2$. Nový systém MES1 má maximální hodnotu adaptačního jasu mezopického vidění $3 \text{ cd}/\text{m}^2$ s tím, že již na této hodnotě vnímaný mezopický jas odpovídá jasu fotopickému. Rozsah systém MES2 je pak definován až do hodnoty $5 \text{ cd}/\text{m}^2$, kde již nastává fotopické vidění. [3]

Na Graf 1 je graficky znázorněn rozdíl jednotlivých systému pro popis mezopické oblasti vidění. [3]



Graf 1 Porovnání mezopických modelů. Nepřerušovaná linka reprezentuje světelný zdroj s poměrem $S/P = 2,25$, přerušovaná linka reprezentuje světelný zdroj s poměrem $S/P = 0,65$.

Jednotlivé mezopické modely se liší především v limitní hodnotě vnímání fotopického jasu dle $V(\lambda)$. Se zvyšujícím se adaptačním jasnem pro pozorovatele (nadále již jen dle fotopických zvyklostí), je v grafu pro každý výpočtový model definováno bodem, kde se setkávají hodnoty vnímaných jasů pro vybrané ukázkové poměry S/P. Z grafu je také jasnější rozdílný průběh vypočtených hodnot pro subjektivní vnímání jasů dle UPS modelu a ostatních systémů, které sdílejí podobné tendence.

Matematický výpočet, stejně jako u předchozích modelů, je založen na kombinaci skotopické a fotopické křivky spektrální citlivosti. Poměrná spektrální světelná účinnost lidského oka pro jednotlivé vlnové délky se stanoví ze vztahu:

$$V_{mes}(\lambda) = \frac{m V(\lambda) + (1 - m)V'(\lambda)}{M(m)} \quad (8)$$

m je koeficient, který závisí 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 max. hodnotu na 1. [-]

$V_{mes}(\lambda)$ je poměrná spektrální světelná účinnost zraku pro daný adaptační jas [-]

$V(\lambda)$ je poměrná fotopická spektrální světelná účinnost standardního pozorovatele [-]

$V'(\lambda)$ je poměrná skotopická spektrální světelná účinnost standardního pozorovatele [-]

Pro výpočet spektrální citlivost v mezopické oblasti je tedy nutné znát fotopickou i skotopickou křivku spektrální světelné účinnosti oka. $M(m)$ je pouze číslo, které převádí výsledek do poměrných jednotek, tak, aby se nejvyšší hodnota rovnala 1.

Koeficient m ve vzorci zastupuje adaptační jas, pro který se poměrná spektrální světelná účinnost počítá. Ve vzorci je dobře patrné, že blíží-li se hodnota m k hodnotě 1, převažuje vliv spektrální světelné účinnosti oka pro fotopické vidění $V(\lambda)$. Naopak, blíží-li se k nule, převládá vliv spektrální světelné účinnosti oka pro skotopické vidění $V'(\lambda)$. Výpočet koeficientu m a L_{mes} se řeší iterací dvou vzorců:

$$L_{mes,n} = \frac{m_{(n-1)} \cdot L_p + (1 - m_{(n-1)}) \cdot L_s \cdot \left(\frac{683}{1699}\right)}{m_{(n-1)} + (1 - m_{(n-1)}) \cdot \left(\frac{683}{1699}\right)} \quad (9)$$

$$m_n = a + b \log_{10}(L_{mes,n}) \quad (10)$$

S počáteční podmínkou: $m_0 = 0,5$.

a, b jsou parametry, $a = 0,767$, $b = 0,3334$

L_p je změřený fotopický jas (cd/m²)

L_s je skotopický jas (cd/m²)

Hodnota m se musí pohybovat v mezích $0 \leq m \leq 1$. Při použití mezopického systému MES1 jsou koeficienty $a = 0,807$ a $b = 0,404$ a výpočet bude probíhat v mezích 0,01 cd/m² až 3 cd/m².

Iterační výpočet není pro běžné jasy dlouhý, pro dosažení chyby menší jak 0,1 %, jsou dostačující 4 až 5 iteračních kroků. K prodloužení výpočtu dochází při malých jasech ($L_p < 0,025$) a malém poměru S/P ($< 0,3$), kdy pro dostatečně přesný výpočet je třeba okolo 50 iteračních kroků. Problém nastává při některých malých jasech a hodnotách S/P , kdy pomocí iterace nedostaneme žádné řešení. Důvodem je pokles hodnoty $L_{mes,n}$ do záporných hodnot. To znemožňuje provést následný výpočet m , kvůli záporné hodnotě v logaritmu.

V Tab 3 a Tab 4 jsou vypsány, změny fotopického jasu pro subjektivní vnímání v podmínkách mezopického vidění pro systémy MES1 a MES2

Tab 3 Procentní změna fotopického jasu při mezopických podmínkách vidění pro systém MES1 [2]

	S/P ratio	Fotopický jas [cd/m ²]							Pozn.
		0,01	0,03	0,1	0,3	1	2	3	
LPS ~	0,25	-75	-75	-34	-18	-7	-2	0	Hodnoty jsou v procentech [%]
	0,45	-55	-44	-23	-13	-5	-2	0	
HPS ~	0,65	-35	-25	-14	-8	-3	-1	0	
	0,85	-15	-10	-6	-3	-1	0	0	
MH teple bílá ~	1,05	5	3	2	1	0	0	0	
	1,25	23	15	9	5	2	1	0	
	1,45	39	26	16	9	4	1	0	
	1,65	54	36	22	13	5	2	0	
	1,85	68	46	28	17	7	2	0	
MH denní světlo ~	2,05	82	55	34	20	8	3	0	
	2,25	94	64	40	24	10	3	0	
	2,45	107	72	45	27	11	4	0	
	2,65	119	81	51	30	13	4	0	

Tab 4 Procentní změna fotopického jasu při mezopických podmínkách vidění pro systém MES2 [2]

	S/P ratio	Fotopický jas [cd/m ²]							Pozn.	
		0,01	0,03	0,1	0,3	1	2	3		5
LPS ~	0,25	-75	-52	-29	-18	-9	-5	-2	0	Hodnoty jsou v procentech [%]
	0,45	-55	-34	-21	-13	-6	-3	-2	0	
HPS ~	0,65	-31	-20	-13	-8	-4	-2	-1	0	
	0,85	-12	-8	-5	-3	-2	-1	0	0	
MH teple bílá ~	1,05	4	3	2	1	1	0	0	0	
	1,25	18	13	8	5	3	1	1	0	
	1,45	32	22	15	9	5	3	1	0	
	1,65	45	32	21	13	7	4	2	0	
	1,85	57	40	27	17	9	5	3	0	
MH denní světlo ~	2,05	69	49	32	21	11	6	3	0	
	2,25	80	57	38	24	12	7	4	0	
	2,45	91	65	43	28	14	8	4	0	
	2,65	101	73	49	31	16	9	5	0	

1.2.4 Doporučený mezopický systém

Komise CIE uvádí v technické zprávě CIE 191:2010 jako doporučený mezopický systém založený na vizuálních zkouškách systém MES2. [3]

Cílem CIE je nyní zavést tento systém do praxe, což znamená definovat postupy pro navrhování osvětlení konkrétních oblastí jako je venkovní osvětlení, veřejné osvětlení silniční, pro pěší zóny, městské oblasti, nouzové osvětlení a mnohé jiné. Je také třeba definovat kritéria, která budou respektovat zorný úhel, neboť stále není vyřešena otázka foveálního a periferního vidění v podmínkách mezopického vidění. [3]

1.2.5 Doporučení CIE NT-007-2017

V roce 2017 vydala mezinárodní komise pro osvětlování CIE technické doporučení CIE NT-007-2017, ve kterém se věnuje problematice určení adaptačního jasu pozorovatele.

Hlavním důvodem byly nejasnosti a nejednotnost při určování adaptačního jasu pozorovatele, který je hlavním vstupním parametrem matematických modelů pro popis mezopického vidění. Pro vyřešení tohoto problému je doporučeno jednotně považovat průměrný jas hodnocené komunikace jako jas adaptační, s vědomím toho, že v reálných podmínkách není adaptační jas pozorovatel ovlivněn pouze jasem povrchu komunikace. CIE k tomuto závěru dochází i s uznáním toho, že adaptační jas pozorovatele není ovlivněn pouze průměrným jasem povrchu komunikace.

1.3 Metoda stanovení průběhů spektrálních světelných účinností standardního pozorovatele pro vybrané adaptační jasy při mezopickém vidění

Pro stanovení průběhů spektrální světelné účinnosti standardního pozorovatele za podmínek mezopického vidění je použit systém MES2-system. Ten je definován v technické zprávě Mezinárodní komise pro osvětlování CIE. [3]

Ve zmíněném systému je oblast mezopického vidění definována adaptačními jasy od hodnoty 0,005 cd/m² do hodnoty 5 cd/m². [3]

Průběhy poměrných spektrálních citlivostí zraku $V_{mes}(\lambda)$ v mezopické oblasti jsou odvozeny ze dvou základních spektrálních průběhů světelné účinnosti $V(\lambda)$ a $V'(\lambda)$ přičemž se vychází ze vztahu [14]:

$$V_{mes}(\lambda) = \frac{m \cdot V(\lambda) + (1 - m) \cdot V'(\lambda)}{M(m)} \quad \text{kde } 0 \leq m \leq 1 \quad (11)$$

kde

$M(m)$ je funkce upravující průběh maxima $V_{mes,L}(\lambda)$ poměrné spektrální citlivosti v mezopické oblasti do maximální hodnoty „1“, (-)

m je koeficient, který závisí na adaptačních podmínkách:

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

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

$V(\lambda)$ je poměrná spektrální světelná účinnost zraku standardního fotometrického pozorovatele při fotopickém vidění (-)

$V'(\lambda)$ je poměrná spektrální světelná účinnost zraku standardního fotometrického pozorovatele při skotopickém vidění (-)

$V_{mes,L}(\lambda)$ je poměrná spektrální světelná účinnost zraku pro daný adaptační jas (-)

Subjektivně vnímaný jas L_{mes} se pak stanovuje z rovnice:

$$L_{mes} = \frac{683}{V_{mes,L}(\lambda_0)} \int V_{mes}(\lambda) \cdot L_e(\lambda) \cdot d\lambda \quad (12)$$

kde

$V_{mes,L}(\lambda_0)$ je hodnota poměrné spektrální citlivosti zraku při mezopickém vidění pro daný adaptační jas při vlnové délce $\lambda_0 = 555 \text{ nm}$

$L_e(\lambda)$ spektrální zář [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$]

Koeficient m se řeší iterací dle:

$$m_0 = 0,5 ; \quad \text{pro } \lambda_0 = 555 \text{ nm je } V'(\lambda_0) = 683 / 1699$$

$$L_{mes,n} = \frac{m_{(n-1)} \cdot L_p + (1 - m_{(n-1)}) \cdot L_s \cdot (683/1699)}{m_{(n-1)} + (1 - m_{(n-1)}) \cdot (683/1699)} \quad (13)$$

$$m_n = 0,7670 + 0,3334 \log_{10}(L_{mes,n}) \quad (14)$$

kde

L_p je fotopický jas odpovídající spektrální citlivosti zraku pro standardního fotometrického pozorovatele při fotopickém vidění

L_s je skotopický jas z rovnice:

$$L_s = L_p \cdot (S/P \text{ ratio}) \quad (15)$$

$$(S/P \text{ ratio}) = \frac{K'_m \cdot \int_0^\infty \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot V'(\lambda) \cdot d\lambda}{K_m \cdot \int_0^\infty \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (16)$$

kde

$K_m = 683 \text{ lm/W}$ je maximum světelného účinku záření pro standardního fotometrického pozorovatele při fotopickém vidění

$K'_m = 1699 \text{ lm/W}$ je maximum světelného účinku záření pro standardního fotometrického pozorovatele při skotopické vidění, obvykle se uvažuje zaokrouhleně $K'_m = 1700 \text{ lm/W}$,

$\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ je spektrální hustota složeného zářivého toku $\Phi_e(\lambda)$ dle $\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda$

Popisuje-li funkce $\Phi_e(\lambda)$ spektrální složení sledovaného zářivého toku, pak pro $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ platí vztah

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda \quad (17)$$

Jsou-li zadány poměrné hodnoty $\varphi_e(\lambda)$ zářivého toku $\Phi_e(\lambda)$ vztažené například k maximu $\Phi_{e\max}$ spektrálního průběhu $\Phi_e(\lambda)$, tj.

$$\varphi_{e\lambda}(\lambda) = \left(\frac{\Phi_e(\lambda)}{\Phi_{e\max}} \right) \quad (18)$$

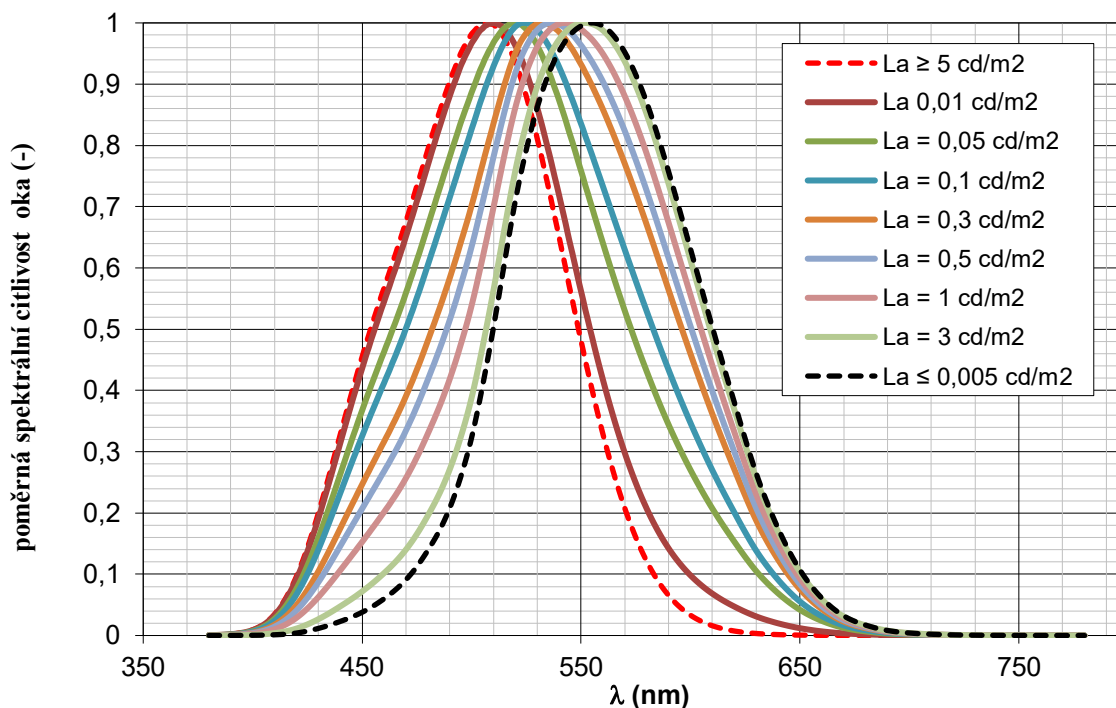
pak se pracuje s poměrnou spektrální hustotou zářivého toku $\varphi_{e\lambda}(\lambda)$, pro kterou platí rovnice

$$\varphi_{e\lambda}(\lambda) = \left(\frac{d\varphi_e(\lambda)}{d\lambda} \right) \quad (19)$$

$V(\lambda)$ je poměrná spektrální světelná účinnost zraku standardního fotometrického pozorovatele při fotopickém vidění (-),

$V'(\lambda)$ je poměrná spektrální světelná účinnost zraku standardního fotometrického pozorovatele při skotopickém vidění (-).

Výše uvedená metodika výpočtu subjektivně vnímaných jasů v mezopické oblasti byla použita ke stanovení průběhů poměrných spektrálních světelných účinností oka v mezopických podmínkách $V''(\lambda)$ pro vybrané hodnoty adaptačních jasů. Na Graf 2 jsou znázorněny průběhy poměrné spektrální světelné účinnosti zraku standardního fotometrického pozorovatele, stanovené podle výše uvedeného postupu.



Graf 2 Průběhy poměrné spektrální citlivosti zraku standardního fotometrického pozorovatele pro vybrané hodnoty adaptačních jasů

V soustavě SI se jednotky světelně technických veličin odvozují od základní jednotky svítivosti (1 kandela), tj. od svítivosti zdroje záření o jediné frekvenci $\nu = 540 \cdot 10^{12}$ Hz, při zářivosti zdroje v daném směru $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$. V souladu s definicí kandelu schválily mezinárodní orgány CIE a ISO, že maximum K_m světelného účinku záření $K(\lambda)$ odpovídající monofrekvenčnímu záření základní vlnové délky $\lambda = \lambda_m = 555 \text{ nm}$ dosahuje u standardního fotometrického pozorovatele při fotopickém vidění hodnoty $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Tato konstanta představovala v dané době (v roce 1979) nejlepší odhad maxima světelného účinku záření pro fotopické vidění, který zachovával předchozí úroveň fotopické kandelu. Jde o důležitou konstantu, která spojuje fyzikální fotometrii a optickou radiometrii. [1] [14]

Zásadním důsledkem definice kandelu je, že pro záření základní vlnové délky 555 nm je světelný účinek záření, tj. také spektrální citlivost zraku standardního fotometrického pozorovatele, při fotopickém vidění $K(555)$ i při skotopickém vidění $K'(555)$ shodný a číselně rovný $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Proto lze i při skotopickém vidění pracovat se světelnými toky udávanými v lumenech. [1]

Vzhledem k tomu, že uvedená rovnost světelných účinků $K(555) = K'(555)$ platí pro oba krajní případy vidění, tj. pro vidění fotopické a skotopické, lze logicky tento předpoklad rozšířit [3] i na oblast vidění mezopického. Uvažuje se tedy, že pro libovolný adaptační jas zraku pozorovatele i v mezopické oblasti vidění je absolutní hodnota $K''(555)$ světelného účinku záření pro záření základní vlnové délky 555 nm rovna hodnotě $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, tzn., že platí vztah

$$K(555) = K'(555) = K''(555) = 683 \text{ lm/W} \quad (20)$$

Při výpočtu maxim K'_m , resp. K''_m průběhů absolutních hodnot světelných účinků záření pro skotopické vidění, resp. pro různé adaptační jasy v oblasti mezopického vidění se vychází z definice poměrné spektrální citlivosti

$$K(555) = K'(555) = K''(555) = 683 \text{ lm/W} \quad (21)$$

$$V'(\lambda) = K'(\lambda) / K'_m, \text{ resp. } V''(\lambda) = K''(\lambda) / K''_m$$

z nichž pro veličiny K'_m , resp. K''_m vyplývají vztahy

$$K'_m = K'(\lambda) / V'(\lambda), \text{ resp. } K''_m = K''(\lambda) / V''(\lambda)$$

Pro $\lambda = 555 \text{ nm}$, $K'(555) = K''(555) = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ se předchozí rovnice upraví do tvaru

$$K'_m = 683 / V'(555), \text{ resp. } K''_m = 683 / V''(555)$$

Hodnoty poměrných spektrálních citlivostí $V'(555)$, resp. $V''(555)$ se určí ze zjištěných spektrálních průběhů veličin $V'(\lambda)$, resp. $V''(\lambda)$, které jsou uvedeny na obr. 1.

S použitím podrobných tabulek funkce $V'(\lambda)$ [např. viz publikace CIE S010 (2005)] se zjistí $V'(555) = 0,40176$. Potom pro K'_m vychází

$$K'_m = \frac{683}{V'(555)} = \frac{683}{0,40176} = 1700 \text{ lm/W} \quad (22)$$

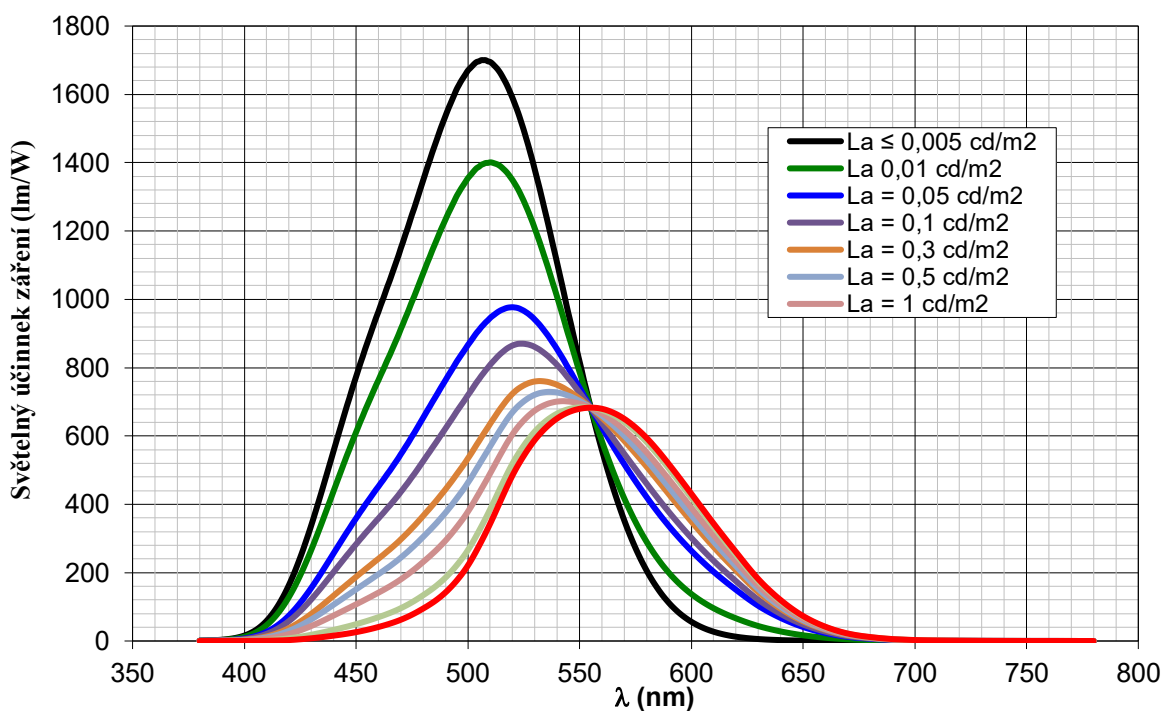
Obdobně se postupuje i pro stanovení maxim K''_m světelného účinku záření v mezopické oblasti. Např. pro adaptační jas $0,1 \text{ cd/m}^2$ se z odpovídající křivky $V''(\lambda)$ [resp. z předchozích výpočtů] zjistí pro 555 nm hodnota poměrné citlivosti $V''(555) = 0,78492$ a po dosazení do vztahu $K''_m = 683 / V''(555)$ pak v tomto případě pro K''_m vychází

$$K''_m = \frac{683}{V''(555)} = \frac{683}{0,78492} = 780 \text{ lm/W} \quad (23)$$

Pro známý průběh poměrné spektrální citlivosti $V''(\lambda)$ se pak již snadno zjistí průběh absolutních hodnot světelného účinku záření $K''(\lambda)$ ze vztahu

$$K''(\lambda) = K''_m \cdot V''(\lambda) \quad (24)$$

Analogicky se postupuje i pro ostatní případy průběhů $V''(\lambda)$ odpovídajících dalším vybraným adaptačním jasům. Výsledné průběhy absolutních hodnot světelných účinků záření $K''(\lambda)$ jsou pak zakresleny v Graf 3.



Graf 3 Průběhy poměrné spektrální citlivosti zraku standardního fotometrického pozorovatele pro vybrané hodnoty adaptačních jasů L_a [cd/m²]

Cíle disertační práce:

- Studium rozložení jasů v zorném poli při adaptaci zrakového systému člověka a srovnání reálných a vypočtených výsledků
- Volba a definice parametrů pro hodnocení kvalitativních světelně technických veličin světelného prostředí v soustavách veřejného osvětlení.
- Stanovení hodnot kvalitativních parametrů hodnocení osvětlovacích soustav v podmínkách mezopického vidění.
- Výpočty energetické bilance při úpravách světelných toků svítidel v podmínkách mezopického vidění.

2 Aplikace MES2 pro praktické příklady

2.1 Aplikace metodiky

2.1.1 Stanovení světelného toku svítidel dle adaptačního jasu

Získané průběhy světelných účinků záření (Graf 2) lze využít pro posouzení vlivu adaptačních podmínek na odezvu lidského zraku pro různé typy svítidel, resp. světelných zdrojů. Využití mezopických systémů pro hodnocení osvětlení lze využít v aplikačních oblastech s nízkými úrovněmi osvětlení jako je například veřejné osvětlení, nouzové osvětlení apod.

Pro porovnání byly zvoleny běžné typy svítidel pro vysokotlaké sodíkové výbojky (HST). Typ I a nové typy svítidel, osazené světelnými diodami LED, typ A až H používané ve veřejném osvětlení. Základní technické parametry vybraných svítidel jsou shrnuty v Tab 5

Tab 5 Základní parametry sledované skupiny svítidel

Ozn.	světelný zdroj	P [W]	Φ (lm)	η [lm/W]	T_{cp} [K]	R_a [-]
A	LED	106	5 053	48	4 959	72
B	LED	141	6 011	43	5 100	72
C	LED	118	8 400	71	6 872	73
D	LED	110	6 417	59	6 012	69
E	LED	22	1 080	48	3 088	93
F	LED	130	6 716	52	3 901	81
G	LED	47	3 206	68	7 478	80
H	LED	204	12 300	60	5 690	69
I	HST	150	12 000	80	2 000	20

U jednotlivých svítidel bylo provedeno měření spektrálního průběhu zářivé energie v kroku po 1 nm. Z naměřených hodnot byly stanoveny teploty chromatičnosti a indexy podání barev. Pro mezopickou oblast vidění bylo zvoleno celkem 9 úrovní adaptačního jasu (3, 2, 1, 0.3, 0.2, 0.1, 0.03, 0.02, 0.01 cd/m²), pro které byly stanoveny průběhy citlivostí lidského oka podle metodiky MES-2 systém [2]. Ze spektrálních průběhů světelného účinku záření pro jednotlivé adaptační jasy a z průběhu zářivého toku jednotlivých svítidel byly stanoveny výsledné světelné toky. Výsledky výpočtů jsou uvedeny v Tab 6.

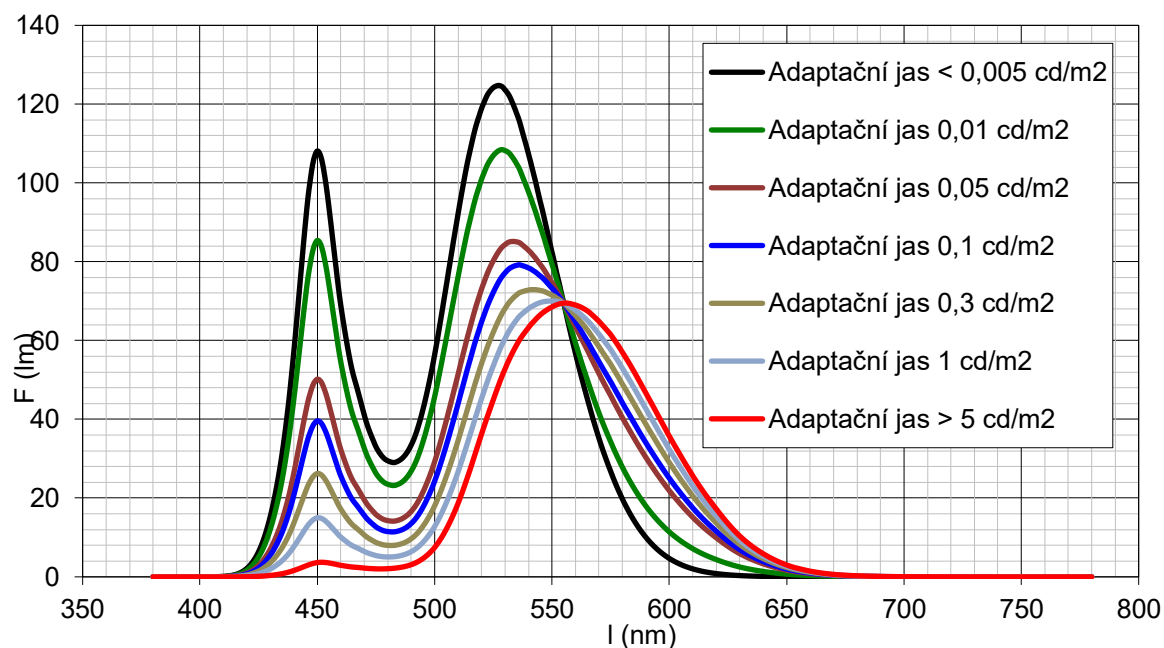
Tab 6 Hodnoty světelných toků sledovaných svítidel pro různé hodnoty adaptačních jasů

ozn.	vidění										
	denní	mezopické									noční
	Φ [lm]	$\Phi''_{L=3.0}$ [lm]	$\Phi''_{L=2.0}$ [lm]	$\Phi''_{L=1.0}$ [lm]	$\Phi''_{L=0.5}$ [lm]	$\Phi''_{L=0.3}$ [lm]	$\Phi''_{L=0.1}$ [lm]	$\Phi''_{L=0.0}$ 5 [lm]	$\Phi''_{L=0.0}$ 3 [lm]	$\Phi''_{L=0.0}$ 1 [lm]	Φ' [lm]
A	5 053	5 171	5 272	5 465	5 687	5 873	6 357	6 741	7 078	8 019	8 846
B	6 011	6 156	6 280	6 517	6 789	7 018	7 612	8 084	8 497	9 652	10 669
C	8 400	8 669	8 902	9 343	9 850	10 276	11 384	12 263	13 032	15 186	17 076
D	6 417	6 600	6 757	7 057	7 401	7 690	8 441	9 038	9 559	11 020	12 303
E	1 080	1 095	1 107	1 131	1 158	1 181	1 241	1 288	1 330	1 446	1 548
F	6 716	6 838	6 944	7 144	7 374	7 567	8 069	8 468	8 816	9 793	10 652
G	3 206	3 332	3 441	3 647	3 884	4 083	4 600	5 011	5 371	6 377	7 260
H	12 300	12 612	12 881	13 392	13 980	14 472	15 755	16 773	17 664	20 158	22 347
I	8 075	7 943	7 829	7 612	7 363	7 154	6 611	6 179	5 802	4 745	3 825

Z výsledků je zřejmý trend nárůstu světelného toku, při nižších adaptačních jasech. Ukázka spektrálního průběhu světelného toku pro svítidlo B je uvedena na

Graf 4 Spektrální rozložení fotopického, mezopického a skotopického světelného toku svítidla B -

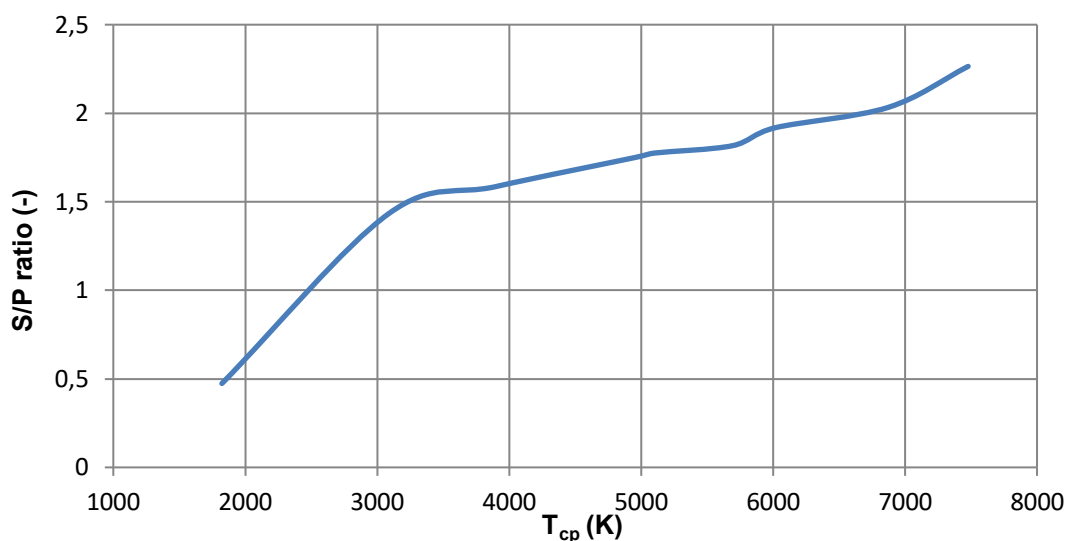
Graf 4.



Graf 4 Spektrální rozložení fotopického, mezopického a skotopického světelného toku svítidla B

V praxi se pro porovnávání světelných zdrojů mezi sebou a pro jejich hodnocení z pohledu mezopických podmínek vidění používá poměr mezi skotopickým a fotopickým

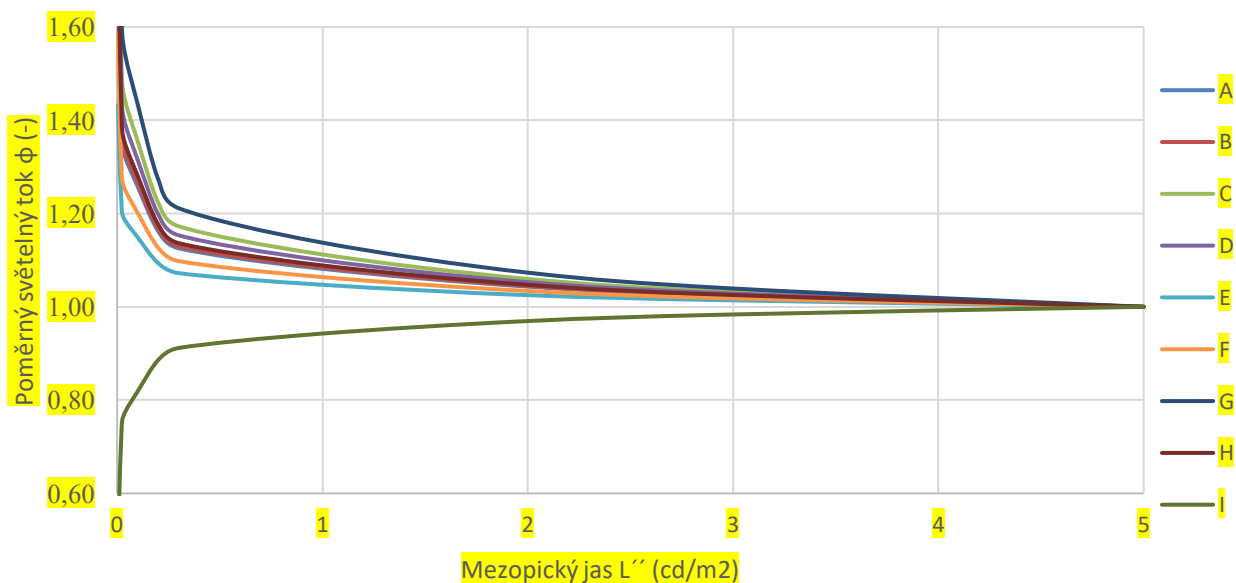
světelným tokem a tento poměr se označuje jako S/P. U posuzovaných svítidel je zřejmý trend mezi náhradní teplotou chromatičnosti T_{cp} a poměrem S/P (Graf 5).



Graf 5 Závislost poměru S/P na náhradní teplotě chromatičnosti T_{cp} .

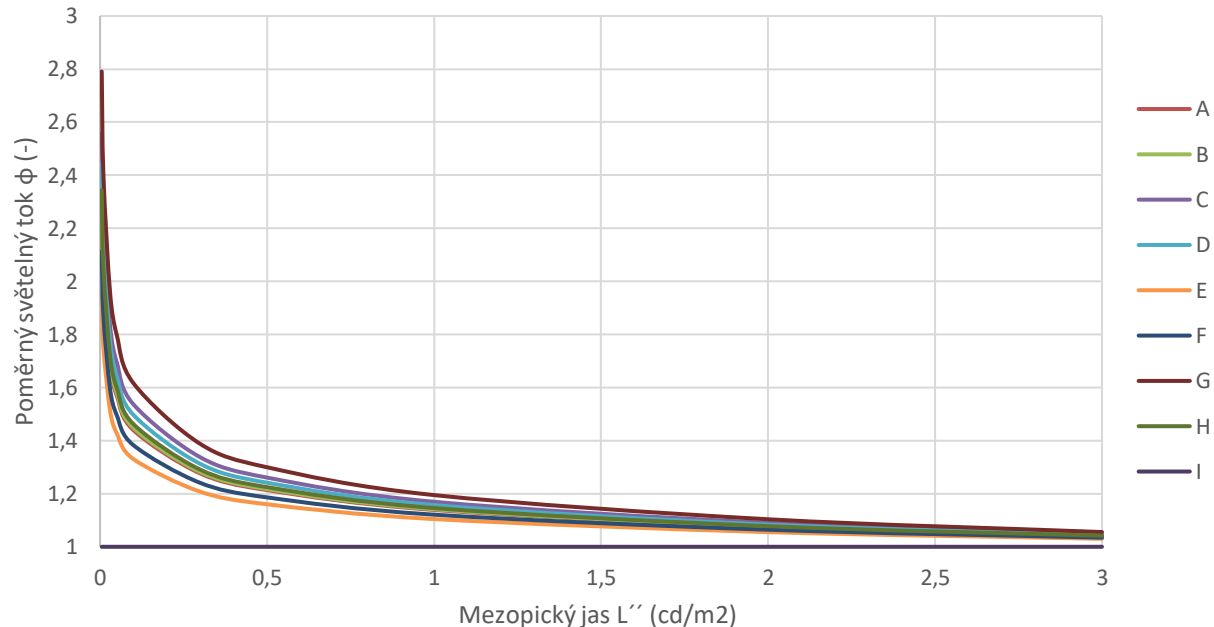
Podobně jako určení poměru S/P jako poměr skotopického a fotopického světelného toku lze vypočtené hodnoty mezopických světelných toků pro různé adaptační jasy vztáhnout ke světelnému toku svítidel při podmínkách fotopického vidění. Průběhy těchto poměrů pro různé adaptační jasy je uveden na Graf 6.

S využitím vypočtených výsledků světelných toků svítidel pro různé adaptační jasy je také možno ukázat na obr. 4 chování zraku pro jednotlivé adaptační úrovně za pomoci vyjádření poměru vypočteného světelného toku v poměru k toku svítidla hodnocenému fotopickou křivkou V_λ definovanou pro standardního fotometrického pozorovatele.



Graf 6 Průběh poměru mezopického a fotopického světelného toku v závislosti na adaptačním jasu pro vybrané typy svítidel

Z obr.4 je zřejmé že hodnota světelného toku při shodných adaptačních podmínkách se liší podle poměru S/P. Na Graf 7 jsou hodnoty S/P vztaženy na poměr S/P svítidla pro vysokotlakou sodíkovou výbojku.



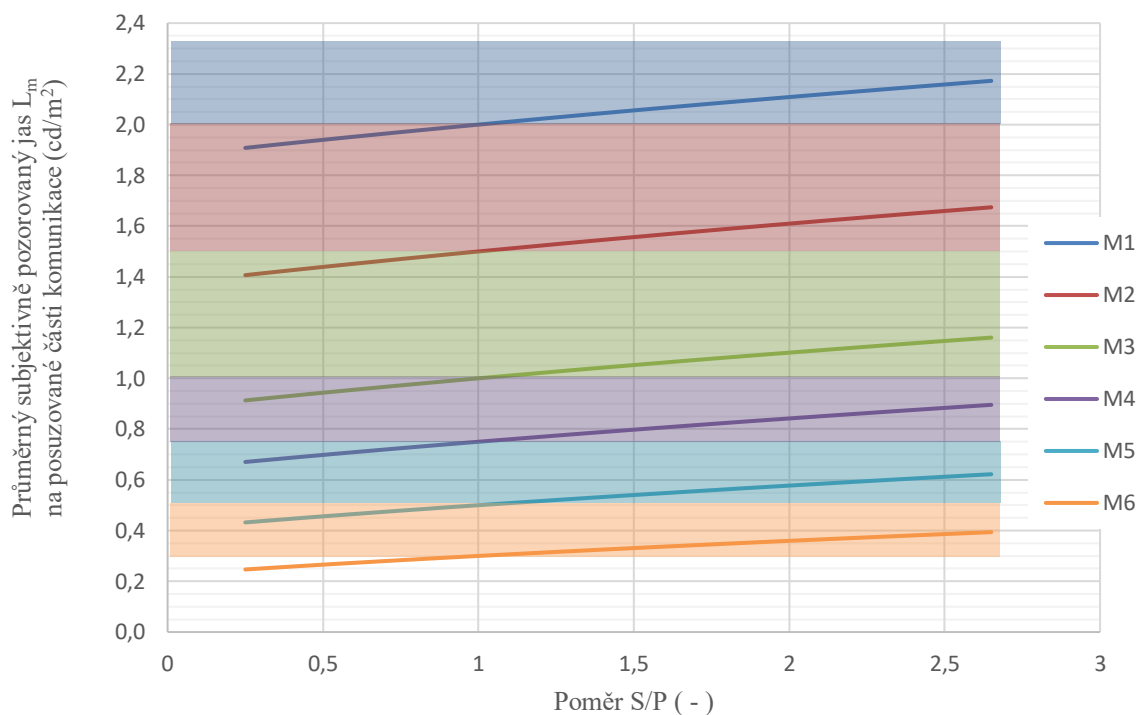
Graf 7 Průběh poměru S/P vztažený k poměru S/P svítidla s vysokotlakou sodíkovou výbojkou v závislosti na adaptačním jasu pro vybrané typy svítidel. Závislost poměrného světelného toku vybraných svítidel na hodnotě adaptačního jasu v mezopické oblasti.

Vypočtené změny světelných toků jednotlivých svítidel, které respektují subjektivní vnímání v mezopické oblasti vidění, jsou vyšší pro světelné zdroje s charakteristikou poměru S/P vyšší než jedna s postupným nárůstem v nižších adaptačních hladinách.

Pro praktické využití je uvažována nejnižší adaptační hladina 0,3 cd/m², která je reprezentována třídou osvětlení komunikace M6. Poměrný rozdíl mezi subjektivně vnímaným tokem vysokotlaké sodíkové výbojky (typ I) a LED svítidlem (typ A až H) je rozdíl poměrů menší než 1,4. Zjištěný nárůst světelného toku (pro svítidlo „I“) v adaptační hladině 0,3 cd/m², je méně než 40 %. V takovém případě se jedná o registrovatelné zvýšené světelné množství, avšak nelze potvrdit, že by se jednalo o velmi výrazné zlepšení – například přesahem subjektivně vnímaných jasů do vyšší třídy komunikace, v tomto případě M5.

Subjektivní velikost vnímaného adaptačního jasu L_m pro jednotlivé třídy osvětlení v závislosti na poměru S/P daného typu zdroje je vyjádřena na Graf 8.

Graf 8 Grafické vyjádření subjektivně vnímaného jasů L_m v podmínkách mezopického vidění pro různé poměry S/P světelného zdroje pro jednotlivé třídy osvětlení pro motorová vozidla



Je zřejmé, že ani pro světelný zdroj s poměrem $S/P = 2,5$ nenastane situace, že by subjektivně vnímaný mezopický jas L_m , který je způsoben fotopicky měřitelným jasnem L_p , odpovídajícím vždy hodnotě dané třídy komunikace, byl v subjektivní oblasti vnímání s takovým ziskem, aby se dalo hovořit o přesahu do vyšší osvětlované třídy komunikace. [15]

3 Porovnání světelných zdrojů LED pomocí MES2

Problematika mezopického vidění primárně souvisí vedle úrovně adaptačního jasu se spektrálními vlastnostmi světelných zdrojů. Nejčastěji se při studiu mezopické oblasti vyjadřují spektrální vlastnosti prostřednictvím náhradní teploty chromatičnosti T_{cp} a poměru S/P. V další části je tato problematika zkoumána také z pohledu indexu podání barev R_a jako dalšího parametru používaného k vyjádření spektrálních vlastností světelných zdrojů. Pro analýzu výše uvedených souvislostí byly využity údaje o spektrální vyzařování světelných diod LED XLAMP CMT1930 (Cree) pro 4 různé indexy podání barev a 4 náhradní teploty chromatičnosti.

Po zpracování spektrálních průběhů zářivých toků jednotlivých světelných zdrojů byly stanoveny poměry S/P uvedené v Tab 7.

Tab 7 Závislost poměru S/P na náhradní teplotě chromatičnosti T_{cp} a indexu podání barev R_a (pro jednotlivé světelné zdroje LED)

T_c [K]	Index podání barev R_a [-]			
	70	80	90	95
2700	-	1,23	1,38	1,44
3000	1,2	1,4	1,48	1,55
4000	1,55	1,73	1,84	1,94
5700	1,97	2,14	2,12	-

Z výsledků uvedených v Tab 7 je zřejmá již dříve uvedená skutečnost, že s nárůstem teploty chromatičnosti dochází k nárůstu poměru S/P. Novým zjištěním je že také při vzrůstajícím indexu podání barev dochází k nárůstu S/P.

Vliv spektrálních vlastností světelných zdrojů v podmínkách mezopického vidění byl dále prověřován ve vztahu k aplikační oblasti, konkrétně k osvětlování pozemních komunikací pro motorovou dopravu. Pro tuto aplikační oblast jsou požadavky na osvětlení vyjádřeny prostřednictvím tříd osvětlení M1 až M6. V příslušné technické normě je každé z těchto tříd přiřazena konkrétní hodnota fotopického jasu. V Tab 8 jsou uvedeny pro jednotlivé třídy osvětlení M hodnoty subjektivně vnímaných (mezopických) jasů pro teploty chromatičnosti 3 000 K a 4 000 K a pro indexy podání barev 70, 80, 90 a 95.

Tab 8 Subjektivně vnímaný jas L_{mes} [cd/m^2] pro LED zdroje 3 000 K (vlevo) a 4 000 K (vpravo) se stejnými fotopickými světelnými toky

Třída osvětlení	Normativní požadavek L_p [cd/m^2]	Index podání barev R_a [-]							
		L_{mes} pro zdroj LED 3000 K				L_{mes} pro zdroj LED 4000 K			
		70	80	90	>95	70	80	90	>95
M1	2,00	2,02	2,05	2,05	2,06	2,06	2,08	2,09	2,10
M2	1,50	1,52	1,55	1,55	1,56	1,56	1,58	1,59	1,60
M3	1,00	1,02	1,04	1,05	1,06	1,06	1,08	1,09	1,10
M4	0,75	0,77	0,79	0,80	0,80	0,80	0,82	0,83	0,84
M5	0,50	0,52	0,53	0,54	0,54	0,54	0,56	0,57	0,57
M6	0,30	0,31	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34	0,35	0,36

V Tab 9 je pro jednotlivé třídy osvětlení uveden relativní rozdíl mezopických jasů pro náhradní teplotu chromatičnosti 4 000 K a 3 000 K. Pro jednodušší orientaci ve výsledcích porovnání je uveden procentní rozdíl subjektivně vnímaných jasů L_{mes} určených pomocí metodiky MES2.

Tab 9 Relativní rozdíl mezopického jasu L_{mes} při teplotě chromatičnosti 3000 K a 4 000 K

Tř. osv.	Index podání barev R_a [-]			
	70	80	90	>95
M1	1,9 %	1,7 %	1,9 %	2,0 %
M2	2,6 %	2,3 %	2,5 %	2,6 %
M3	3,5 %	3,2 %	3,4 %	3,6 %
M4	4,2 %	3,8 %	4,1 %	4,3 %
M5	5,3 %	4,7 %	5,0 %	5,3 %
M6	6,8 %	6,0 %	6,3 %	6,7 %

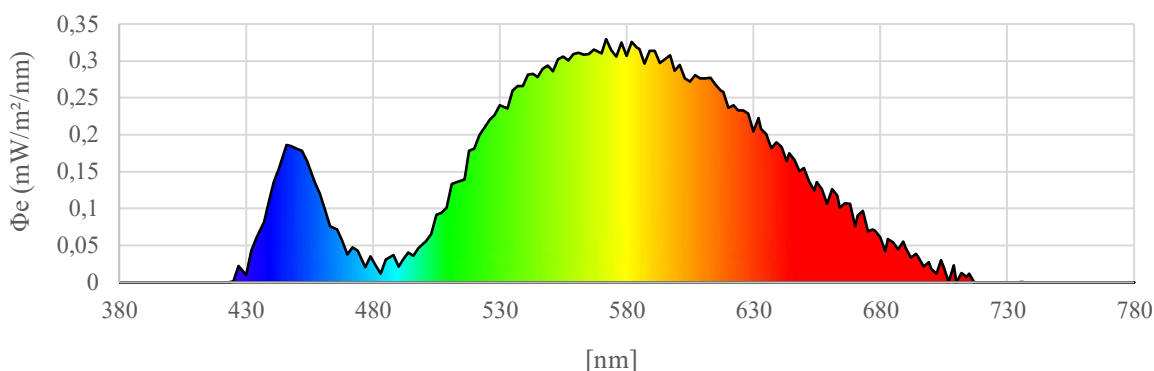
Výsledné rozdíly změny subjektivně vnímaného mezopického jasu L_{mes} pro náhradní teploty chromatičnosti 3000 K a 4000 K se pohybují v jednotkách procent a nacházejí se tak v pásmu nejistoty běžného fotometrického měření. Je zřejmé, že pro praxi je vliv mezopického vidění u komunikací pro motorovou dopravu zanedbatelný.

3.1 Aplikace metodiky MES2 v reálných podmínkách

V rámci diskuze o volbě náhradních teplot chromatičnosti pro oblast veřejného osvětlení se pro dopravně významné komunikace (s vyšší intenzitou dopravy) doporučují vyšších hodnoty náhradních teplot chromatičnosti. V dnešní praxi se u nově navrhovaných osvětlovacích soustav ve většině případů již používají LED svítidla, která se standardně vyrábějí pro LED s náhradní teplotou chromatičnosti 3 000 K a 4 000 K. Z předchozího teoretického rozboru je zřejmé, že v případě komunikací pro motorovou dopravu je vliv mezoptického vidění pro 3 000 K a 4 000 K na výsledný vnímaný jas zanedbatelný.

Z pohledu aplikace světelných diod v praxi je třeba uvést, že deklarovaná náhradní teplota chromatičnosti světelných diod se v reálných podmínkách změní. K první změně dochází při průchodu optickým systémem svítidla a další změna souvisí s odraženou složkou světelného toku od okolního prostředí (fasády, zeleň..), dopadající na osvětlovanou komunikaci. Pro ověření rozdílů mezi deklarovanou náhradní teplotou chromatičnosti světelných diod a skutečnou hodnotou náhradní teploty chromatičnosti svítidel bylo provedeno terénní měření náhradní teploty chromatičnosti pro 10 různých soustav s LED svítidly instalovaných v rámci pilotního projektu v okolí Karlova náměstí v Praze. Hodnota náhradní teploty chromatičnosti byla při terénním měření zjišťována uprostřed příčného řezu pozemní komunikací na úrovni vybraného světelného místa.

Odečtené měřené spektrum zářivého toku bylo ovlivněno spektrálně závislými odrazy dle povrchů materiálů nacházejících se v blízkosti posuzované komunikace. Ukázka naměřeného spektrálního průběhu zářivého toku pro pozemní komunikaci C je uveden na Obr. 10.



Obr. 10 Ukázka průběhu spektra zářivé energie pro vzorovou komunikaci C

Přehled náhradních teplot chromatičnosti LED deklarovaných výrobcí $T_{cp, LED}$ a naměřených náhradních teplot chromatičnosti $T_{cp,m}$ je uveden v Tab 10.

Tab 10 Porovnání deklarovaných a měřených náhradních teplot chromatičnosti LED svítidel v reálném provozu.

Pozemní komunikace	$T_{cp,d}$	$T_{cp,m}$	Rozdíl ΔT_c	Poměr S/P
	[K]	[K]	[%]	[-]
A	4100	3573	12,9	1,14
B	4300	3601	16,3	1,23
C	4000	3477	13,1	1,23
D	4000	2832	29,2	1,16
E	4000	2800	30,0	1,17
F	6000	4910	18,2	1,56
G	4000	2840	29,0	1,19
H	5600	4503	19,6	1,48
CH	5770	4270	26,0	1,32
I	4200	3699	11,9	1,19
průměr			20,6	1,3

Při porovnání náhradních teplot chromatičnosti uváděných výrobcí přímo pro světelný zdroj a údajů z terénního měření se tyto údaje pro sledovaný vzorek komunikací liší v průměru o 20 %.

Podstatným zjištěním byla průměrná hodnota poměru S/P, která je pro daný soubor pozemních komunikací rovna hodnotě 1,3. Pro tuto hodnotu S/P pro reálné podmínky třídy osvětlení M6 bude při použití metodiky MES2 a respektování mezopického vidění subjektivní změna ve vnímání osvětleného prostředí pouze 5 % a pro třídu komunikace M1 jen 1 %.

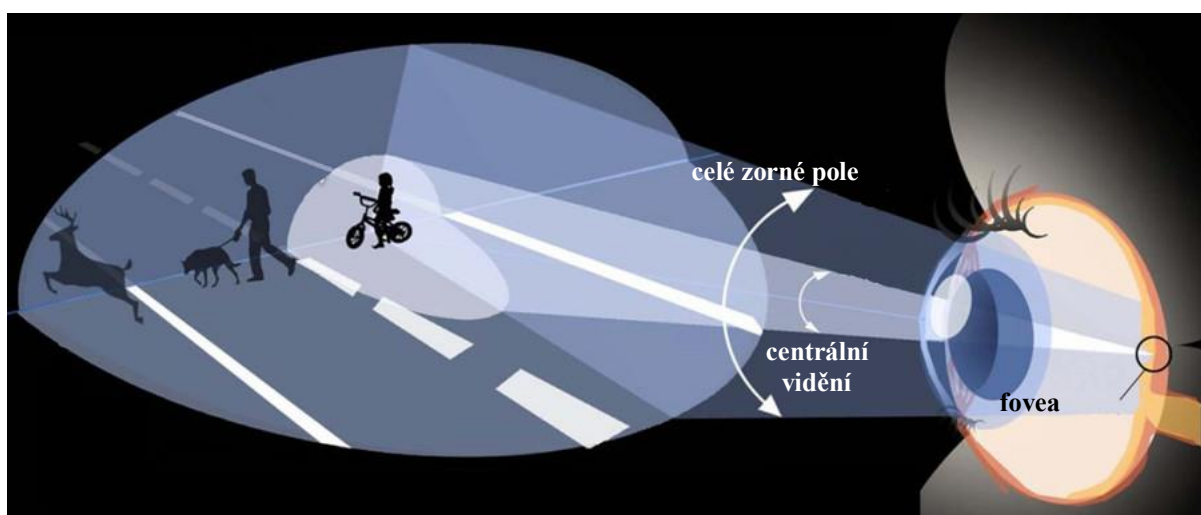
Pokud omezíme výběr svítidel pouze na skupinu zdrojů, u nich byl deklarován rozsah T_{cp} od 4000 K do 5000 K, je průměrný poměr S/P pouze 1,2, což představuje ještě menší význam respektování mezopického vidění. Subjektivní změna se pohybuje v rozsahu do 5 %, což hodnota pohybující se v pásmu nejistoty pro fotometrická měření.

4 Rozbor jasů zorného pole pozorovatele ve venkovním prostředí

4.1 Postup metodiky studie pomocí programu DIALux

Definice adaptačního pole pozorovatele je jednou z nejpodstatnějších otázek při řešení subjektivního vnímání světelného prostředí v podmínkách mezopického vidění. Vzhledem k rozložení světločivných sensorů, čípků a tyčinek, na ploše sítnice, je souvisí mezopické vidění především s viděním periferním. Vidění centrální (foveální), které je zhruba v úhlu jedné minuty, je zprostředkováno pouze čípkami a jde tedy o vidění fotopické, ne mezopické.

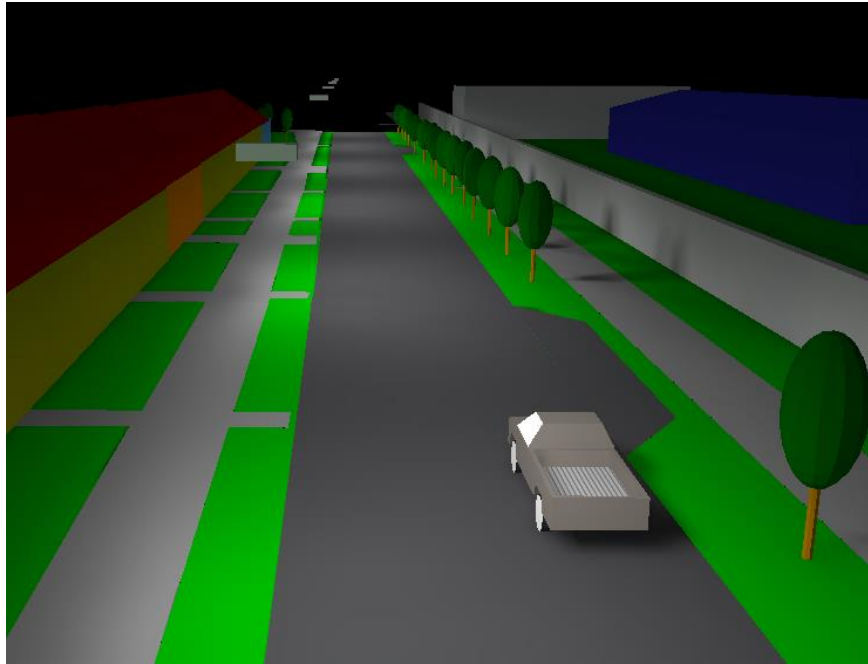
V případě mezopických adaptačních jasů nelze pro přesné ostré vidění (přísně foveální) mezopickou metodiku použít. Jev foveálního vidění je již zahrnut ve výpočetním systému MES2. Jedná se o kompromisní řešení, které vychází z testů, kde centrální vidění v aplikační oblasti mezopických adaptačních jasů je zohledněno. Pro lepší představu je zjednodušené zorné pole naznačeno na Obr. 11.



Obr. 11 Promítnutí pozorovaného obrazu na sítnici [16]

V současné době je problematika hodnocení fyziologických aspektů dynamicky se měnícího adaptačního pole mimo oblast zájmu a možností výzkumu na ČVUT. Pro statické pole pozorovatele byla provedena studie, která problém popisuje kvantitativně z hlediska současného chápání adaptačního jasů, kdy se za adaptační jas považuje průměrný jas pozorované plochy.

V rámci studie byl zpracován rozbor několika modelových situací, které hodnotí výsledná adaptační pole pozorovatele ve zvětšujícím se zorném úhlu, při rozdílných podobě adaptačního prostředí. Jako standardní scéna pozorovatele byla vybrána uliční oblast dle skutečného urbanistického řešení, která byla detailně namodelována v programu DIALux. Scéna respektuje skutečnou domovní zástavbu městského prostředí (Obr. 12).



Obr. 12 Modelová scéna adaptačního prostředí v programu DIALux [17]

Modelová scéna byla užita k hodnocení adaptačního jasu statického pozorovatele pro 3 různé modelové situace. PoJe sledován vliv okolí na samotný adaptační jas. Ten je dle standartního posuzování uvažován pouze hodnotou průměrného jasu povrchu vozovky.

Analýza krokově se zvětšujícího zorného úhlu pozorovatele komunikace vychází z daných předpokladů polohy pozorovatele 60 metrů před pozorovanou výsečí s pohledem směřujícím doprostřed pozorované výseče definované mezi dvěma stožáry uličního osvětlení. V rámci modelové scény pro statického pozorovatele byly definovány tři modelové situace [17]:

A jas oblohy je uvažován 0 cd/m^2 . Plocha oblohy je **zahrnuta** do výpočtu adaptačního jasu při daném zorném úhlu.

B jas oblohy je uvažován 0 cd/m^2 . Plocha oblohy **NENÍ zahrnuta** do výpočtu adaptačního jasu při daném zorném úhlu.

C jas oblohy je uvažován 1 cd/m^2 . Plocha oblohy je **zahrnuta** do výpočtu adaptačního jasu při daném zorném úhlu.

Při posuzování výše uvedených modelových situací byla komunikace v modelové scéně osvětlena jednak svítidly pro vysokotlaké sodíkové výbojky a jednak svítidly pro světelné diody. Volba typů světelných zdrojů byla provedena tak, aby byly pokryty rozdílné části viditelného spektra. Technické parametry použitých světelných zdrojů jsou uvedeny v Tab 11.

Tab 11 Technické parametry použitých světelných zdrojů

Typ světelného zdroje	Světelný tok	Příkon
Vysokotlaká sodíková výbojka	6 600 lm	70 W
LED zdroj	6 500 lm	32 W

Návrh osvětlení modelových situací vychází z požadavků technických norem pro osvětlování pozemních komunikací. Z důvodů porovnání návrhů pro oba typy světelných zdrojů v podmínkách mezopického vidění jsou návrhy provedeny tak, aby rozdíly ve výsledných hodnotách jasů a rovnoměrností byly minimální, Výsledné technické parametry návrhů pro fotopické vidění jsou uvedeny v Tab 12.

Tab 12 Světelně technické parametry modelového návrhu

Typ světelného zdroje	L_{avg} [cd/m ²]	U_0 [-]	U_1 [-]
Vysokotlaká sodíková výbojka	1,1	0,68	0,84
LED zdroj	1,1	0,69	0,83

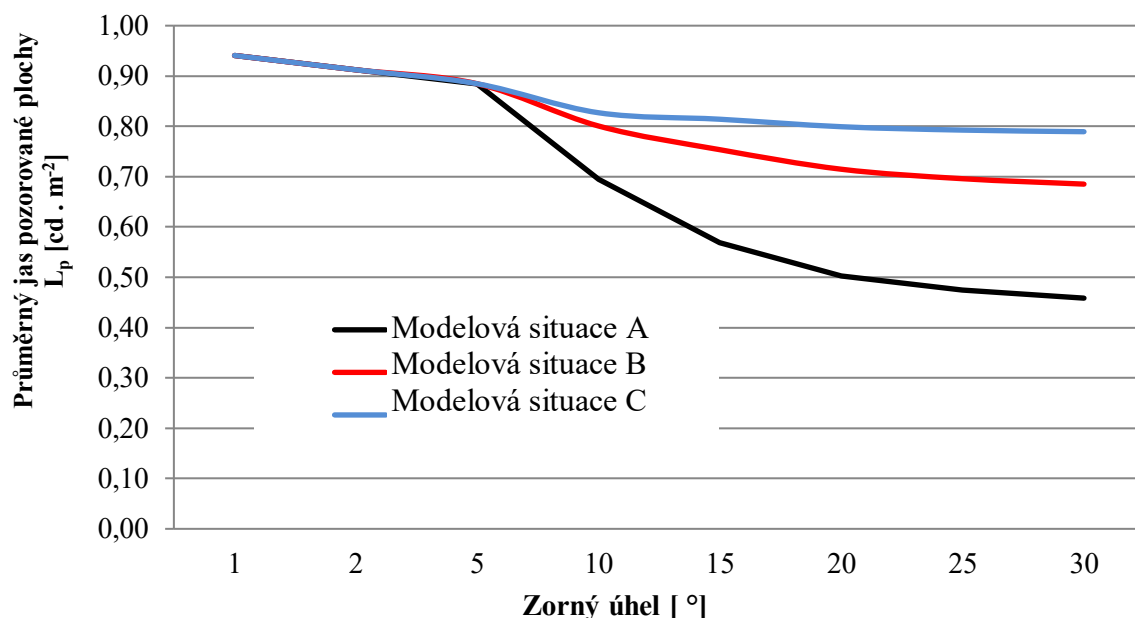
Hodnoty průměrného pozorovaného jasu pro daný zorný úhel byly pro oba typy světelných zdrojů zprůměrovány, z důvodu eliminace vlivu rozdílných technických řešení distribuce světelného toku. Určení výsledné hodnoty posuzovaného průměrného jasu pomocí zjednodušení (zprůměrování výsledných hodnot) obou variant návrhu je zvoleno za účelem posouzení celkové situace uličního osvětlení, nikoliv hledání rozdílů v použitých optických systémech. [18]

Výsledky modelových situací pro stanovení průměrných jasů ploch definovaných zorným úhlem (vrcholový úhel kuželu v rámci kterého se nachází pozorovaná scéna) dle jednotlivých modelových situací (A, B, C) jsou uvedeny v Tab 13, jako procentní rozdíl zjištěného průměrného jasu pro daný zorný úhel vztažený k vypočtené hodnotě průměrného jasu vozovky v měřeném úseku.

Tab 13 Relativní rozdíly průměrných jasů pro jednotlivé modelové situace osvětlené rozdílnými světelnými zdroji

Zorný úhel	Návrhová situace		
	A	B	C
	LED vůči HPS rozdíl průměrného jasu plochy [%]		
1	-16,9	-16,9	-16,9
2	-20,6	-20,6	-20,6
5	-24,4	-24,4	-24,4
10	-58,3	-37,4	-33,0
15	-93,5	-46,0	-35,1
20	-118,7	-53,9	-37,6
25	-131,6	-58,1	-38,8
30	-139,9	-60,6	-39,4

Závislost velikosti průměrného jasu pozorované plochy na zorném úhlu je uvedeno na Graf 9.



Graf 9 Závislost průměrného jasu pozorované plochy L_p na zorném úhlu pro jednotlivé modelové situace

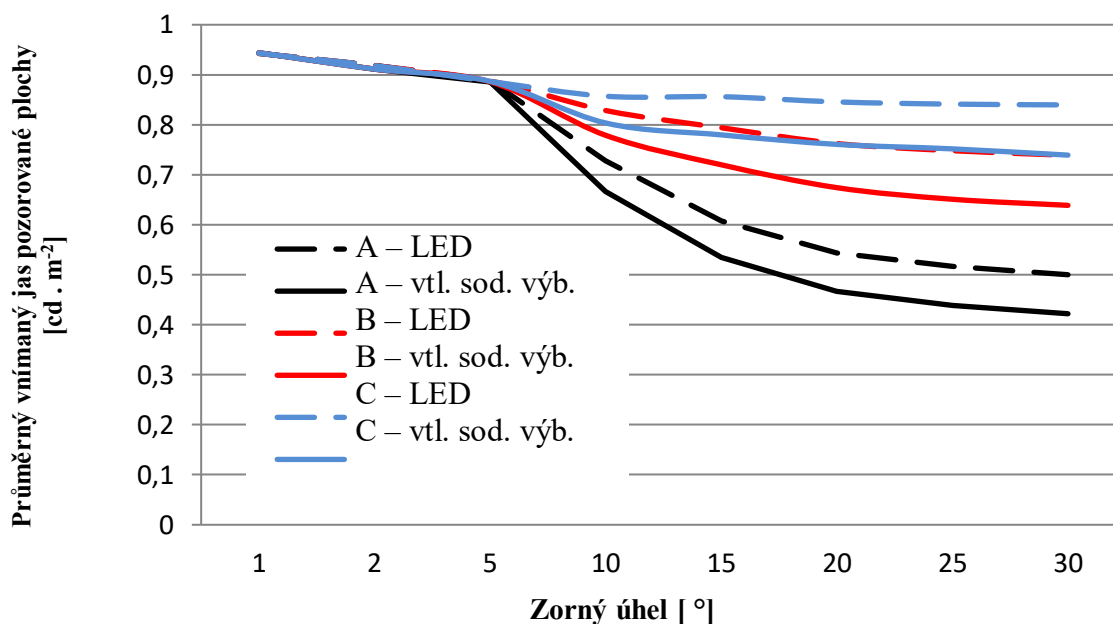
Relativní rozdíly průměrných jasů mezi jednotlivými modelovými situacemi jsou uvedeny na Graf 9. To umožňuje posoudit vliv zahrnutí oblohy do hodnocení průměrného jasu. Výsledky jsou uvedeny v Tab 14.

Tab 14 Relativní rozdíly průměrných mezi jednotlivými modelovými situacemi v závislosti na zorném úhlu.

Zorný úhel	Návrhová situace		
	A-B	A-C	B-C
	Rozdíl průměrného jasu plochy [%]		
1	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0
10	13,2	16,0	3,2
15	24,6	30,2	7,4
20	29,6	37,1	10,6
25	31,8	40,1	12,2
30	33,1	41,9	13,2

Výsledné hodnoty získané při rozboru jasu zorného pole pozorovatele lze nadále využít pro stanovení subjektivně vnímaných jasů při mezopických podmínkách vidění. Při užití mezopického systému MES2, dle zmíněných postupů v předchozích kapitolách lze stanovit subjektivně vnímané jasy a jejich hodnoty. Toto srovnání je pak uvedeno v grafu na Graf 10,

jde pro každou návrhovou variantu (A, B, C), je napočten subjektivně vnímaný jas pro oba typy užitých světelných zdrojů. [17]



Graf 10 Závislost průměrného vnímaného jasu pozorované plochy $L_{p,mez}$ na zorném úhlu pro jednotlivé modelové situace Adaptační jas v oblasti mezopického vidění pro modelové situace [17]

Výsledné průběhy průměrných jasů adaptačních polí ukazují nestejnou charakteristiku průběhu v oblastech, kdy zorný úhel pozorovatele je více než 10° . Aby bylo možno posoudit tyto výsledky v praxi, je třeba provést další studii, která by obsahovala definování zorného pole pozorovatele v reálných podmínkách.

Pro další provedenou simulaci jasových poměrů byla vybrána situace uličního osvětlení s nižšími požadavky na světelné množství předepsaného průměrného jasu komunikace. Předpokladem byl opět podobný průběh průměrných jasů pro situace A, B a C do úhlu 5° , kdy se v zorném úhlu nachází pouze posuzované komunikace. Se zvětšujícím se zorným úhlem pozorovatele se do průměrného jasu začíná dostávat blízké a následně i vzdálené okolí s plochou oblohy.

Svítilna byla záměrně zvolena tak, aby poskytovala rozdílné hodnoty poměrů S/P. Postupem dalšího vytváření modelových situací bylo zjištěno, jasová charakteristika dle sledovaného zorného úhlu se skutečně do úhlu cca 5° liší dle konkrétního návrhu osvětlení komunikace. Tento fakt ovlivňují především křivky svítivosti konkrétního svítidla, rozteče mezi svítilny. Výsledné průměrné jasy v zorném úhlu přibližně 5° jsou dány rozložením jasu na komunikaci.

5 Studie rozložení jasů v zorném poli pozorovatele

5.1 Úvod

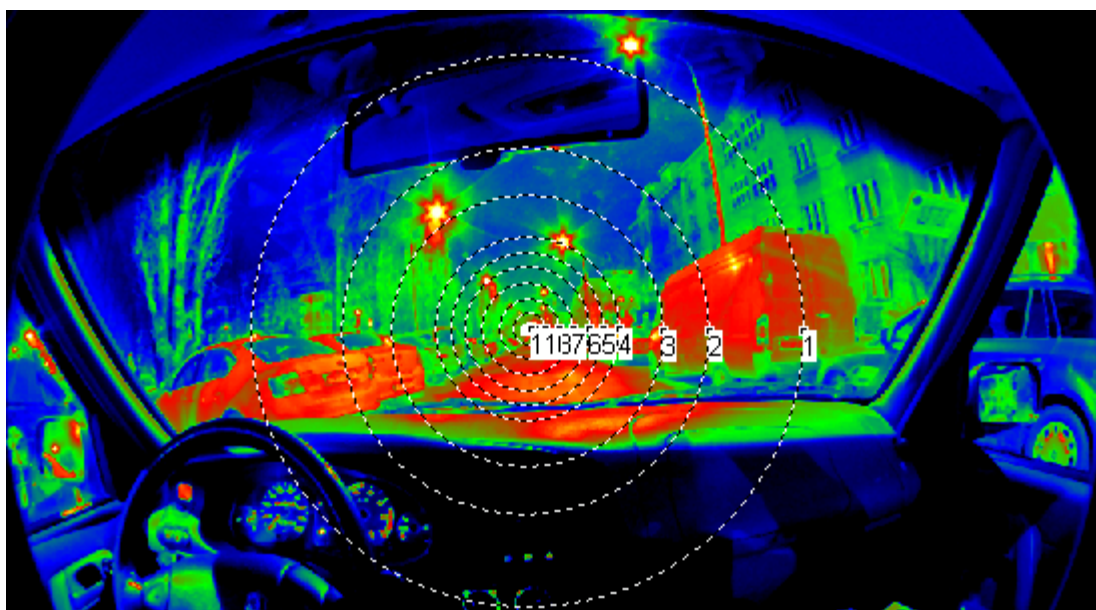
Při posuzování adaptačních jasů je dle původních doporučení CIE třeba vycházet z průměrného jasů vzorového úseku komunikace. Toto doporučení je vydáno pro sjednocení odborné diskuse a výzkumných postupů nezahrnujících studium rozložení jasů v zorném poli.

Vzhledem k disproporcii jednotlivých výsledků při softwarové simulaci prostředí a výpočtech adaptačních jasů v kapitole 4.1 byl proveden výzkum na reálných pozemních komunikacích. Byly vybrány komunikace rozdílného využití (rychlostní, místní), dle typu dopravy, pohybu chodců či rychlosti pohybu vozidel.

5.1.1 Postup měření a vyhodnocení

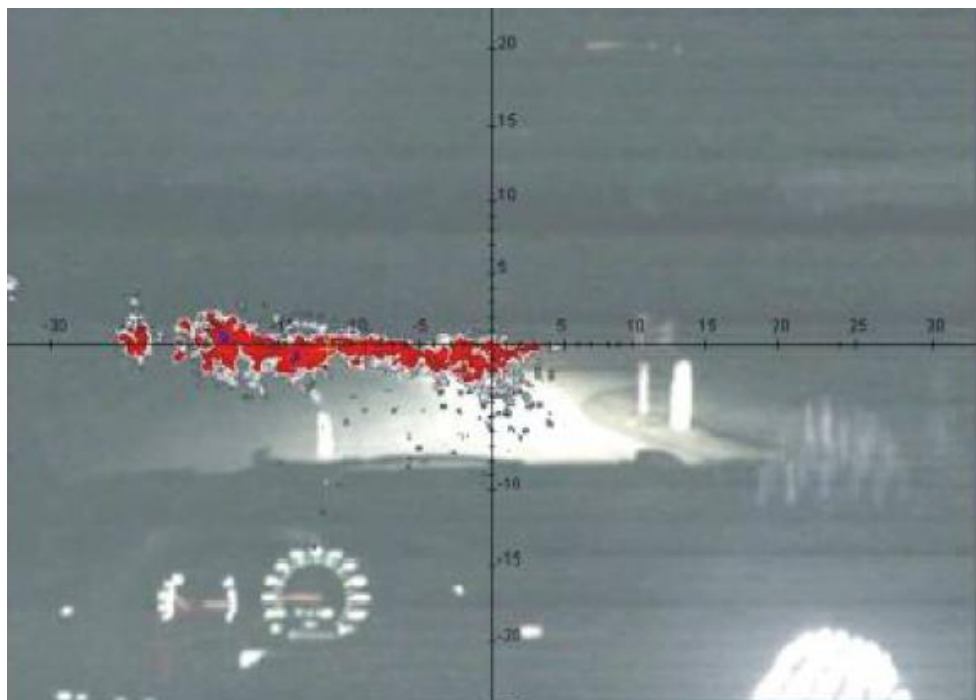
Do osobního automobilu byla v úrovni očí řidiče nainstalována jasová kamera. Snímky byly vzhledem k délce integračního času použitého jasového analyzátoru pořizovány ze stojícího automobilu. Z výsledných jasových map byly získány adaptační pole pro různá geometrická uspořádání.

První variantou bylo kružnicové uspořádání – napodobení zorného úhlu pozorovatele, při směru pohledu na komunikaci. Středů kružnic byly umístěny do středu pohledu řidiče. V tomto bodě se nacházely středy kružnic vyznačujících zorný úhel s velikostí vrcholového úhlu 1°, 2°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 45°, 60° a 90°, jak je vyobrazeno na Obr. 13



Obr. 13 Vyznačení zorných úhlů pro hodnocení rozložení jasů v zorném poli řidiče [19]

Během měření a vyhodnocení měření bylo určeno, že pro běžně osvětlená prostranství bude střed kružnic umístěn nad horizont povrchu vozovky. Toto místo bylo vybráno na základě zkušeností řidičů při běžných pohledech. Předpoklad většinového pohledu řidiče byl následně potvrzen také jinými studiemi. Jedním z příkladů je studie (Stahl L-LAB 2002) citovaná Stephanem Völkerem na konferenci CIE Mesopic Workshop, na téma mezopického vidění, kde jsou uvedeny pozice výskytů pohledů 6 testovaných řidičů.

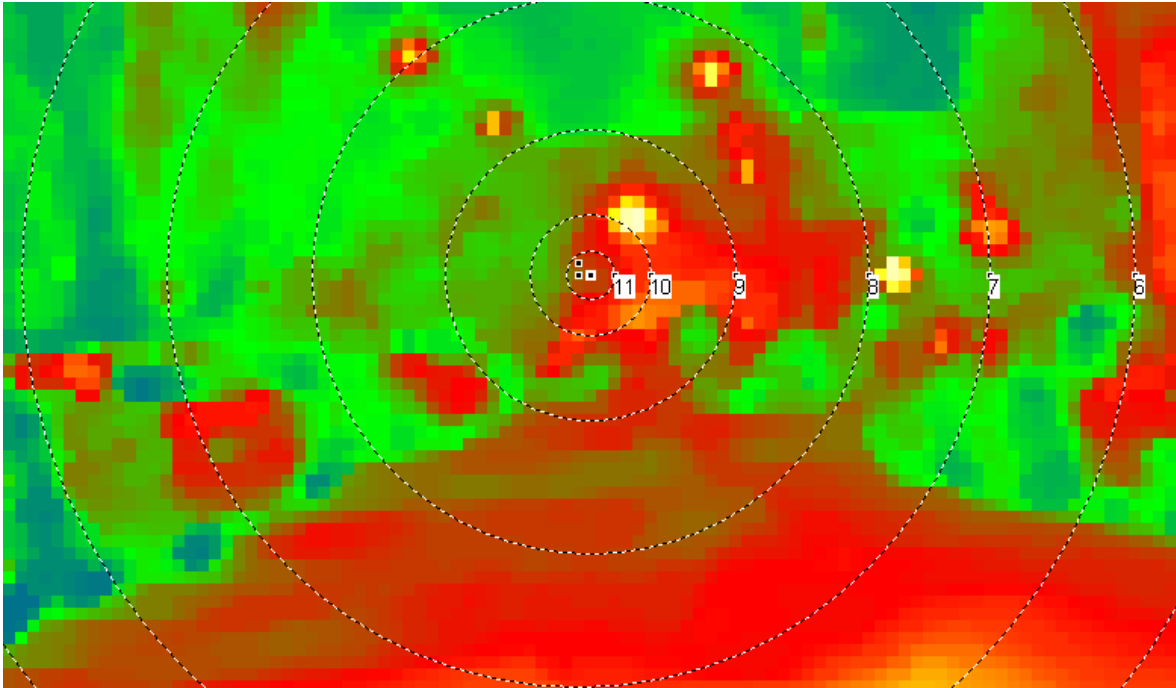


Obr. 14 Zobrazení pozic výskytu pohledů v zorném poli řidiče

Výše uvedené pozice výskytu pohledů řidiče jsou snímány pro situaci, kdy řidič projíždí zatáčkou. Při jízdě na rovném úseku komunikace se pohled koncentruje do středu komunikace.

Vyhodnocení pozorované plochy definované jako kružnice se středem v bodě horizontu komunikace však není univerzální pro všechny možné situace. Například u neosvětlené komunikace, kde komunikaci a prostor před automobilem osvětlují světlomety, se středy kružnic umístili do středu skutečného pohledu řidiče – na viděný nejvzdálenější bod, který světlomety osvětlují. Při umístění středů vyhodnocovacích ploch do „pevného bodu jasové mapy“ by nebyl respektován smysl měření – popis rozložení jasů v zorném poli řidiče.

Hodnocení velmi malých zorných úhlů provází vysoká nejistota a variabilita výsledků. Zorné úhly 1° jsou velmi malé a při nehomogenním povrchu komunikace, vodorovné dopravní značení, či zaparkovaný automobil může ovlivnit výsledky při hodnocení velmi malých zorných úhlů, viz Obr. 15.

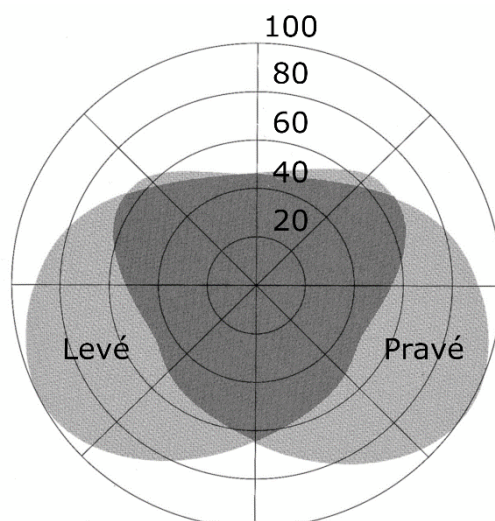


Obr. 15 Detailní analýza středu zorného pole.
Kružnice 11 – 1°, kružnice 10 – 2°, kružnice 9 – 5°, kružnice 8 – 10°

Hodnocené malé zorné úhly byly detekovány jako „téměř náhodné“ veličiny měřených jasů. Z tohoto důvodu nejsou při pozdějším zpracování naměřených dat uvažovány.

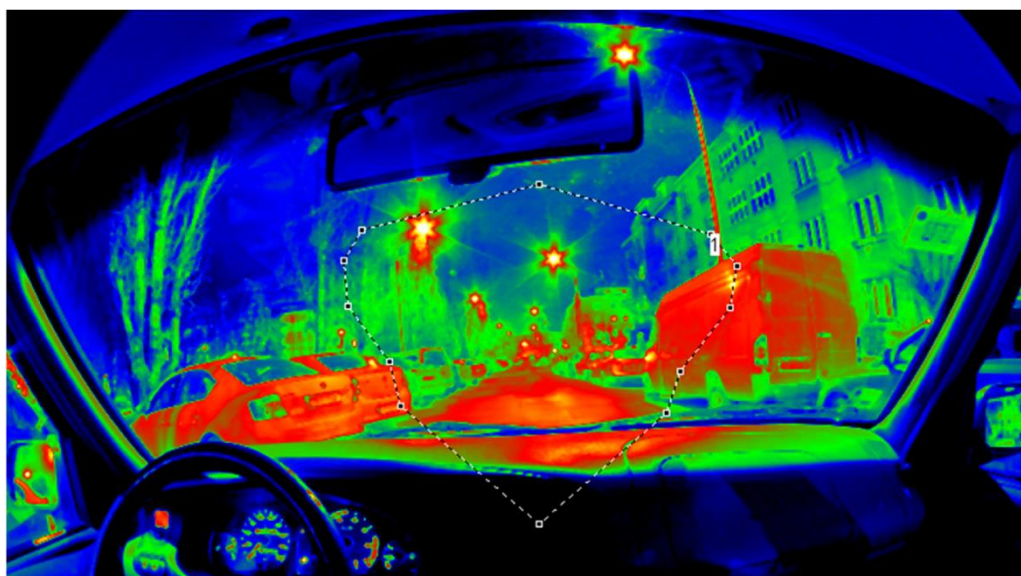
U úhlů 25° a vyšších je do hodnocení celkového průměrného jasu započítávána také palubní deska automobilu. V oblastech s vyšší hladinou osvětlení (urbanistické oblasti, rychlostní komunikace) byl průměrný jas palubní desky srovnatelný s průměrným jasnem komunikace. V místech s nižší intenzitou venkovní osvětlenosti byl jas palubní desky výrazně nižší než jas komunikace a snižoval celkový průměrný jas.

Vidění normálního pozorovatele ve skutečnosti není definováno kružnicovým polem respektujícím pouze jediný zorný úhel. Je složeno ze zorných úhlů obou očních orgánů, které jsou stranově odlišné (Obr. 16).



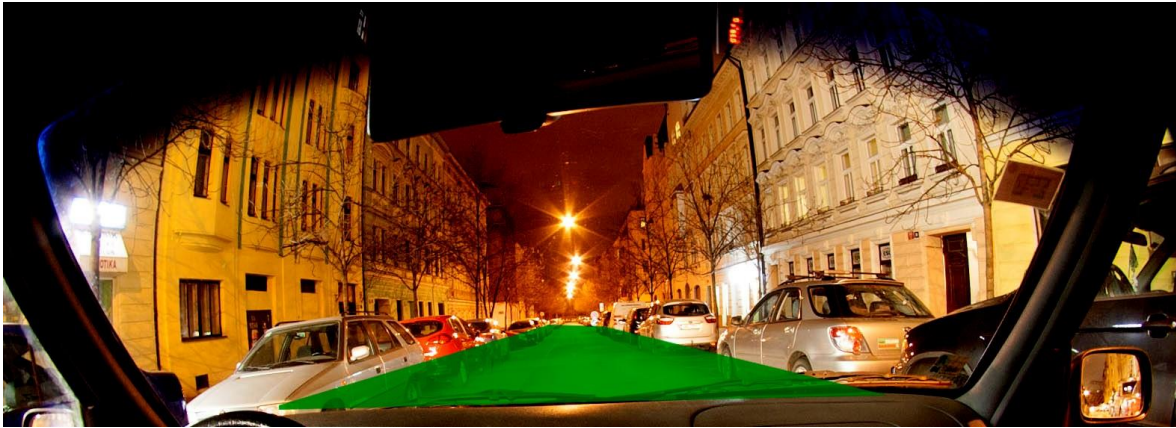
Obr. 16 Grafické vyjádření rozsahu binokulárního vidění

Při jejich spojení vzniká binokulární zorné pole. Při hodnocení jasových map byla vymezena oblast binokulárního vidění, pro kterou byl určen průměrný jas zorného pole. Vymezení binokulárního zorného pole je uvedeno na Obr. 17.



Obr. 17 Fotografie se vymezenou oblastí binokulárního vidění

Výše zmíněné postupy hodnocení zorného pole jsou experimentální. Aby bylo možno porovnat experimentálně zjištěné údaje s údaji relevantnějšími dnešním metodám, pomocí kterých hodnotíme průměrný jas komunikací, bylo dodatečně zavedeno vyhodnocovací pole typu 3. Vyhodnocovací pole má lichoběžníkový tvar (Obr. 18) a umožňuje vyhodnocovat viděný jas na povrchu vozovky.

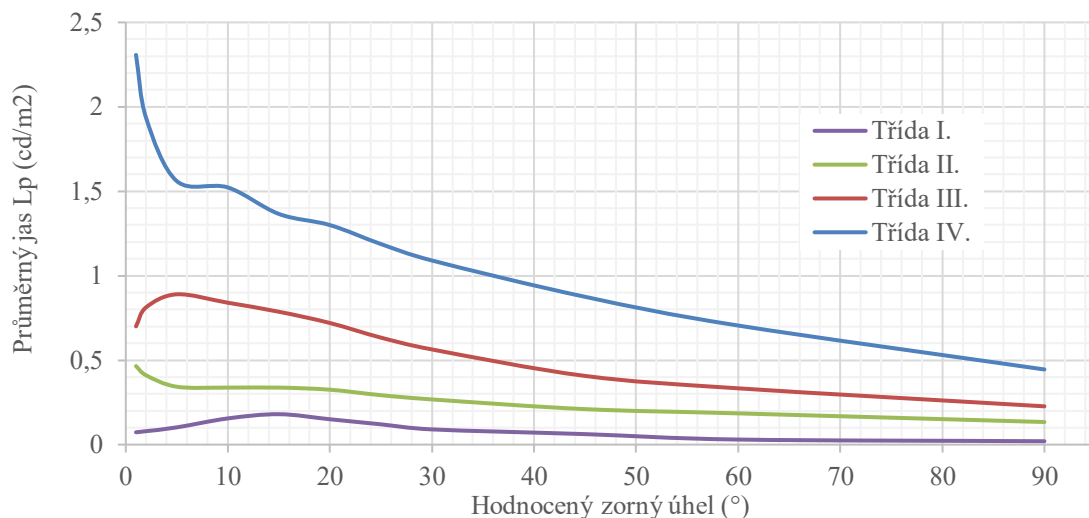


Obr. 18 Vyhodnocovací pole typu 3

5.1.2 Popis výsledků měření a získaných údajů

Experimentální charakter provedených měření nutně vede k empirickým metodám vyhodnocování získaných výsledků. Postupy uvedené v předešlé kapitole byly stanoveny během samotného procesu vyhodnocování. Zjištěná data následně inklinovala k několika závěrům.

Nejjednodušší popis viděné plochy pomocí popisu různými zornými úhly, umožňuje analyzovat rozdílná světelná prostředí. U každého analyzovaného snímku byl určen „střed“ pohledu (viz. kap 6.4.2). Při tomto modelu vyhodnocení mohly být srovnány rozdílné světelné situace dle teoretických průměrných adaptačních jasů. Při vynesení průměrných jasů pro jednotlivé navržené zorné úhly bylo možno pozorovat podobné průběhy jasů pro některé světelné prostředí. Na základě těchto podobností byla pro světelná prostředí definovány čtyři situace I – IV. Průměrné jasy v závislosti na pozorovaném zorném úhlu pro jednotlivé situace jsou vyneseny v grafu v Graf 11.



Graf 11 Průběhy průměrných jasů zorného pole v závislosti na zorném úhlu pro 4 definované situace

Hodnoty průměrných jasů v úhlech 1° až 10° nejsou plně vypovídající. Vzhledem k malému rozlišení použitého přístroje jsou tyto pozorovací úhly reprezentovány jednotkami pixelů, případně 3 desítkami pro 10° předpokládaný zorný úhel. Toto malé rozlišení, vzhledem k variabilitě hodnocených prostředí, generuje výsledky, pro jednu měřenou scénu, v rozdílu až 300 % odečítaného jasů.

Pokles průměrného jasů hodnocené výseče u hodnot vyšších než 45° je ovlivněn především plochou tmavé oblohy a přístrojové desky, která se dostává do zorného pole. Pro I. situaci se z těchto důvodů hodnoty průměrných jasů blíží velmi nízkým hodnotám – až tisíce cd/m^2 , neboť jediným zdrojem světelného záření v těchto situacích jsou světlometry automobilu. Konkrétní popisy a rozdělení situací je následující:

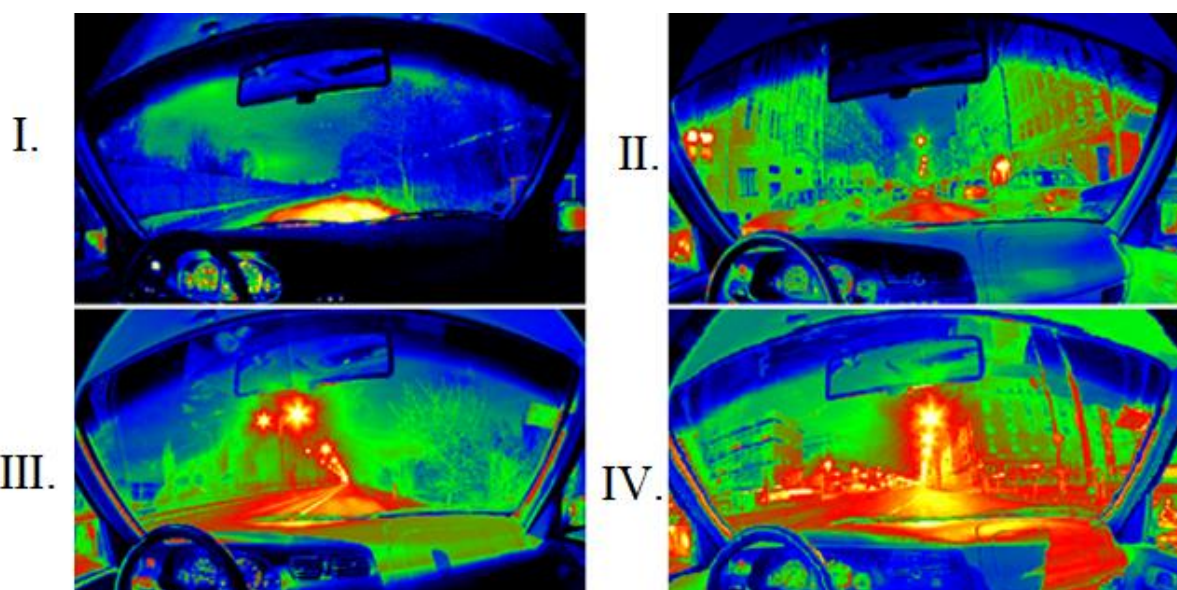
- I. situace – je prostředí s velmi nízkou hladinou osvětlenosti. Jedná se o prostředí bez umělého uličního osvětlení. Typickým příkladem jsou pozemní komunikace s nízkou intenzitou dopravy nacházející se mezi obcemi.
- II. situace – zastupuje prostředí urbanistického prostoru, kde nejvyšší povolená rychlost je 50 km/h. Jsou to především pozemní komunikace ve vesnicích nebo městech s přilehlými pěšími komunikacemi. Ve druhé skupině také nalézáme typický charakter živé zeleně či zaparkovaných vozidel na krajích jízdních pruhů, křižovatky a přechody pro chodce.
- III. situace – reprezentuje osvětlené části komunikací první třídy bez výskytu chodců. Typická povolená rychlost v této skupině je 80 km/h a více. Může se však jednat také o oblasti s nejvyšší povolenou rychlostí 50 km/h v případě, že jde o středně významné komunikace v rámci měst a obcí.
- IV. situace – obsahuje světelné situace s nejvyššími průměrnými jasy. Jedná se o dopravně významné pozemní komunikace s velkou intenzitou dopravy a o důležité dopravní tahy, kde se kombinuje vysoká hustota dopravy společně s pohybem chodců a zastávkami veřejné dopravy. Do této situace lze také zařadit komunikace s vyšší povolenou rychlostí dopravy (více než 50 km/h), kdy jsou dopravní trasy zatíženy vysokou hustotou dopravy s vysokým množstvím dopravních změn (sjezdy, přípojovací pruhy, aj.) nebo například tunely na rychlostních komunikacích.

Zatřídění vybraných komunikací do jednotlivých kategorií, dle výsledků měření je uvedeno v Tab 15.

Tab 15 Zařídění posuzovaných pozemních komunikací do výše definovaných situací

Kategorie	I.	II.	III.	IV.
Komunikace	Na Staré silnici, Kněžves	Vaníčkova, Praha	Pražský okruh, Praha	Pražský okruh, Praha
		Jana Zajíce, Praha	Strakonická, Praha	Strakonická, Praha
		Flemingovo náměstí, Praha		Strahovský tunel, Praha
		Hlaváčova, Praha		Evropská, Praha
		Technická, Praha		

Vzhledem k proměnnému charakteru komunikací během jejich délky a změny doporučního uspořádání dopravy se například světelné poměry Pražského okruhu a ulice Strakonická, řadí do situace III. i IV. U delších komunikací měnící charakter dopravy nelze hovořit o zatřídění „komunikace“, avšak jde o popis světelného prostoru. Ukázky jednotlivých zástupců popisovaných situací jsou uvedeny na Obr. 19.



Obr. 19 Ukázky jednotlivých situací pro hodnocení průměrného jasů zorného pole

Výsledky hodnocení vnímané plochy, která dle navrženého geometrického uspořádání, respektovala binokulární vidění jsou uvedeny v tabulce níže. Z výsledků lze vyčíst největší podobnost s výsledky předpokládaných zorných úhlů pro 45°. To je dáno podobnými geometrickými poměry v rámci celkového zorného pole.

Tab 16 Přehled zatřízených komunikací dle zjištěných průměrných jasů dle rozšiřujících se zorných úhlů, binokulárního vidění a měření viděného jasu komunikace a okolí

Situace	Pozemní komunikace	Binokulární vidění	Zorný úhel - kruhový 45°	Mezopický jas komunikace	Relativní rozdíl jasu okolí vůči jasu komunikaci	Jas komunikace vůči jasu zorného úhlu 45°
		Průměrný jas Lp[cd/m ²)			[%]	[%]
I.	Na Staré silnici 1. směr	0,07	0,08	0,10	6	20
	Na Staré silnici 2. směr	0,04	0,04	-	-	-
II.	Vaničkova	0,22	0,22	0,30	51	36
	Flemingovo náměstí	0,25	0,25	0,34	46	36
	Jana Zajíce	0,18	0,17	0,22	70	29
	Hlaváčova	0,20	0,20	0,30	43	50
	Technická	0,12	0,12	0,19	30	58
III.	Milady Horákové	0,31	0,34	0,36	82	6
	Pražský okruh	0,40	0,44	0,37	76	-16
	Strakonická	0,41	0,44	0,61	31	39
IV.	Evropská	0,93	1,17	0,85	54	-27
	Strakonická	0,80	0,80	0,73	68	-9
	Pražský okruh	0,66	0,78	0,45	84	-42
	Strahovský tunel	0,72	0,75	0,99	55	32

Výsledné hodnoty průměrných jasů zorného pole pro jednotlivé vyhodnocovací postupy jsou uvedeny v tab. 15. Obecně lze pozorovat jev, kdy při hodnocení „binokulárním polem“ jsou hodnoty viděných jasů nižší z důvodu tvaru dolní poloviny vyhodnocovacího pole. U postupu vyhodnocování průměrného jasu na ploše lichoběžníkového tvaru imitujícího výseč povrchu pozemní komunikace, jsou hodnoty adaptačních jasů vyšší vyjma situací, které v sobě zahrnují plošné zdroje světelného záření v horní polovině pohledu – jako jsou například informační tabule či osvětlené billboardy.

Poměry průměrného jasu komunikace k průměrnému jasu okolí v rámci třetího typu vyhodnocovacího pole pro digitální snímky jasových map jsou uvedeny výše Tab 16. Porovnání výsledků pomocí dříve stanovených kategorií vyvozuje průměrné poměry adaptačních jasů: I. kategorie 6 %, II. kategorie 48 %, III. kategorie 63 % a IV. kategorie 65 %. Tyto výsledky lze více zpřesnit pomocí rozdělení sledovaných situací dle Tab 17.

Tab 17 Procentní průměrný jas okolí vůči průměrnému jasů komunikace

Světelné oblasti	Procentní průměrný jas okolí vůči průměrnému jasů komunikace [%]
Venkovské oblasti – bez uličního osvětlení	6
Městské oblasti, nízká dopravní vytiženost - s uličním osvětlením	50
Městské oblasti, vysoká dopravní vytiženost - s uličním osvětlením	67

Při rozčlenění jednotlivých světelných scén do tzv. „světlených oblastí“ je možno pozorovat tendenci k vyšší poměrným hodnotám okolních jasů komunikací s vyšší důležitostí. Předpokládanou světelnou oblastí, kde je možno pozorovat malé rozdíly mezi jasnem komunikace a okolí mohou být například centra měst s vysokou dopravní i pěší vytižeností. Tento trend je však poměrně výrazný pro vysokorychlostní komunikace, které nejsou umístěny přímo ve městech, kde by sousedily s pěšími zónami. Adaptační jasy pozorovatele, při sledování okolního světelného prostoru, jsou v těchto oblastech nejbližší smluvním adaptačním plochám na površích komunikací. Adaptační jasy u venkovských oblastí jsou určeny téměř výhradně povrchových jasnem komunikace, avšak velmi tmavé oblasti mimo komunikaci, které mají jasové poměry pouze v rádech jednotek procent vůči jasů komunikace značně ovlivňují vidění.

Posuzovaný vliv světlometů automobilu byl nejznatelnější pro světelné situace II., kdy průměrný fotonický jas (v kruhovém zorném úhlu 30° při binokulárním vidění) byl světlometry navýšen o cca 30 %. Vzhledem k jasovým rozestupům tříd komunikací dle ČSN CEN/TR 13 201 nemá 30 % nárůst adaptačního jasu (v případě, že vycházíme z předepsaných hodnot) vliv na celkový adaptační jas ve smyslu „navýšení“ třídy osvětlení komunikace.

5.2 Závěr měření

Získaná data popisující prostor adaptačního pole řidiče vykonávajícího zrakový úkol při řízení vozidla na pozemní komunikaci a okolí vozovky před sebou byl měřen digitální kamerou s vysokým počtem pixelů – měřících bodů. Celkový obraz byl posléze v postprodukční fázi vyvolání snímku hodnocen rozdílně umístěnými vyhodnocovacími plochami s variabilní velikostí v rámci zorného pole. Zpracovaná výstupní data popisují průměrné jasy myšlených adaptačních polí a umožňují provádět analýzy rozložení pozorovaného jasu.

Cílem měření nebylo určit přesné hodnoty adaptačních jasů. Takový úkol není možný, pokud nejsou stanoveny jasné hranice prostoru, viděné plochy, která musí nutně definovat oblast hodnocení světelného prostoru. Přesné určení adaptačního pole pozorovatele (uživatele komunikace) je v současné době smluvně stanoveno, pro svou jednoduchost a univerzalitu řešení, jako obdélníková plocha mezi dvěma světelnými místy.

Z vyhodnocení výsledků provedených měření je zřejmý vliv okolí komunikace. To je obecně charakterizováno nižšími měřenými jasy, v závislosti na daném typu prostředí. Z výsledků lze usuzovat, že adaptační mechanismy vidění pracují s nižším viděným celkovým jasem, nežli je smluvený adaptační jas měřený na povrchu komunikace.

6 Energetické porovnání

6.1 Hodnocení energetické náročnosti

Popis energetických vlastností světelně technických návrhů veřejného osvětlení je jednou z možností, jak hodnotit přínos energetických úspor, či navýšení energetické náročnosti jednotlivých aplikací. Hodnocení energetických poměrů jednotlivých variantních řešení může být rozhodujícím faktorem při určení vhodných variantních řešení návrhů veřejného osvětlení.

Veřejné osvětlení má svá vlastní specifické požadavky na energetickou a finanční náročnost. Nejvyužívanější, rychle přehledné způsoby hodnocení energetické náročnosti jsou:

- 1) - Instalovaný příkon uliční osvětlovací soustavy na délku komunikace [$\text{kW} \cdot \text{km}^{-1}$]
- 2) - Instalovaný příkon uliční osvětlovací soustavy na plochu komunikace [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$]
- LENI – ukazatel spotřeby elektrické energie uliční osvětlovací soustavy na plochu za rok [$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$]
- SLEEC – Hodnotící kritérium energetické náročnosti veřejného osvětlení [$\text{kWh} \cdot \text{lx}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$]
- Měrný výkon osvětlovací soustavy [lm/W]

Uvedené ukazatele energetické náročnosti nepopisují ideálně posuzovanou osvětlovací soustavu vzhledem k navrženým světelně technickým parametrům - ukazatel příkonu na délku; mohou být vhodnější spíše pro interiérové aplikace osvětlovacích soustav (LENI); případně byla zjištěna nemožnost vždy určit vhodnější světelné návrhy (SLEEC). Detailnějšího a komplexnějšího popisu energetické náročnosti osvětlovací soustavy lze dosáhnout použitím dvou ukazatelů:

- ukazatele hustoty příkonu, který popisuje chování osvětlovací soustavy v daný moment a respektuje případné změny hustoty příkonu či typu osvětlovací soustavy po celé ploše, na které je hustota příkonu vyhodnocována.

$$D_p = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (\bar{E}_i \cdot A_i)} \quad (25)$$

kde

- D_p je ukazatel hustoty příkonu ($\text{W} \cdot \text{lx}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$);
 P je celkový příkon osvětlovací soustavy v každé typické části komunikace (W);

- E_i je udržovaná průměrná horizontální osvětlenost měřená v úrovni vozovky typické části komunikace „i“ (lx);
 A_i je plocha posuzované typické části komunikace „i“ (m²);
 n je počet typických částí úseků komunikace (-).

- ukazatele roční spotřeby energie, který doplňuje informace v časovém horizontu pro danou osvětlovací soustavu nebo část osvětlovací soustavy (například stmívání či měnící se doba provozu soustavy veřejného osvětlení během roku)

$$D_E = \frac{\sum_{j=1}^m (P_j \cdot t_j)}{A} \quad (26)$$

kde

- D_E je roční ukazatel spotřeby energie hodnocené osvětlovací soustavy (Wh·m⁻²);
 P_j je provozní příkon spojený s j -tou periodou provozu typické části soustavy (W);
 t_j je délka j -té periody provozu, kdy je využíván příkon P_j (h);
 A je plocha posuzované typické části komunikace (m²);
 n je počet stavů s odlišnou energetickou náročností (-).

Soustavy veřejného osvětlení lze hodnotit také prostřednictvím nákladů na instalaci veřejného osvětlení. Stanovení investičních nákladů je provedeno pomocí Bommeova vzorce. Ten je pravděpodobně nejrozšířenějším a nejzavedenějším. Jiné výpočetní postupy, které nabízejí například Vzorec Philips, Finský vzorec, USA vzorec, TEDAS vzorec generují, při zohlednění některých konkrétních vstupů, srovnatelné výsledky.

Celkové roční náklady na veřejné osvětlení s využitím Bommelova [20] postupu se stanoví ze vztahu:

$$N_{celkové} = N_a + N_{en} + N_{ú} \quad (27)$$

kde

- $N_{celkové}$ jsou celkové roční náklady na provoz osvětlovací soustavy (Kč·rok⁻¹);
 N_a jsou roční odpisy (Kč·rok⁻¹);
 N_{en} jsou celkové roční náklady na elektrickou energii (Kč·rok⁻¹);
 $N_{ú}$ jsou celkové roční náklady na údržbu (Kč·rok⁻¹);

jednotlivé dílčí složky se vypočítají dle:

$$N_a = A_f \cdot (N_i - n_z \cdot (C_z + C_{mz})) \quad (28)$$

kde:

- A_f je anuitní faktor (-)
- N_i jsou investiční náklady (Kč)
- N_z je počet světelných zdrojů (ks)
- C_z je cena světelného zdroje (Kč)
- C_{mz} je cena montáže světelného zdroje (Kč)

Výpočet anuitního faktoru k vyjádření odpisů se určí ze vztahu:

$$A_f = \frac{\frac{P}{100} \cdot \left(1 + \frac{P}{100}\right)^{T_a}}{\left(1 + \frac{P}{100}\right)^{T_a} - 1} \quad (29)$$

kde:

- P je úroková sazba (%)
- T_a je doba umoření dluhu (rok)

Investiční náklady N_i :

$$N_i = n_p \cdot C_p + n_v \cdot C_v + n_s \cdot C_s + n_z \cdot (C_z + C_{mz}) + l_k \cdot C_k \quad (30)$$

kde:

- N_p je počet stožárů (ks)
- C_p je cena stožáru (Kč)
- N_v je počet výložníků (ks)
- C_v je cena výložníku (Kč)
- N_s je počet svítidel (ks)
- C_s je cena svítidel (Kč)
- l_k je délka kabelového vedení (m)
- C_k je cena kabelového vedení (Kč·m⁻¹)
- C_z je cena světelného zdroje (Kč)
- C_{mz} je cena montáže světelného zdroje (Kč)

Náklady na elektrickou energii N_{en} :

$$N_{en} = n_s \cdot P_i \cdot C_{en} \cdot 10^{-3} \cdot 365 \cdot T_p \quad (31)$$

kde:

- N_s je počet svítidel (ks)
 P_i je příkon svítidla (W)
 C_{en} je cena elektrické energie (Kč·kWh⁻¹)
 T_p je průměrná denní doba provozu osvětlovací soustavy za rok (h)

$$N_{\dot{u}} = \left(\frac{1}{T_z} \cdot (C_z + C_{sk}) + \frac{q}{100} \cdot (C_z + C_{vz}) \right) \cdot n_z + C_{\dot{u}p} \quad (32)$$

kde:

- C_z je cena světelného zdroje [Kč]
 C_{sk} je cena za skupinovou výměnu zdrojů s čištěním svítidla [Kč·ks⁻¹]
 q je procentní podíl vyměněných světelných zdrojů [%]
 $N_{\dot{u}}$ jsou jcelkové roční náklady na údržbu [Kč·rok⁻¹]
 C_{vz} je cena za výměnu světelného zdroje [Kč]
 N_z je množství světelných zdrojů [ks]
 $C_{\dot{u}p}$ je cena za údržbu stožárů světelných bodů [Kč·km⁻¹]
 T_z je interval výměny světelných zdrojů [rok]

6.2 Případové studie

Výběr zadání a vstupních parametrů osvětlovacích soustav případových studií reflektuje současnou odbornou diskusi o vhodnosti různých teplot chromatičností světelných zdrojů pro jednotlivé typy pozemních komunikací. Mezioborová komise pro světelné znečištění při ministerstvu životního prostředí vydala dokument pro vládu, kde jedno z probíraných témat souvisí s volbou teploty chromatičnosti světelných zdrojů pro veřejné osvětlení. Tlak na snižování teplot chromatičnosti je zdůvodňován negativními účinky krátkých vlnových délek optického záření v nočních hodinách na biologický systém člověka.

Pro porovnání zrakového výkonu v podmínkách mezopického vidění pro vybrané světelné zdroje byl zvolen jako referenční zdroj vysokotlaká sodíková výbojka. Vůči tomuto světelnému zdroji jsou porovnávány parametry svítidel se světelnými diodami s náhradními teplotami chromatičnosti 3 000 K a 4 000 K.

Výpočty příkonů a potřebných subjektivních zrakových počitků se vztahují k subjektivnímu vnímání jasů L_m , které jsou vytvořeny osvětlovací soustavu s vysokotlakými sodíkovými výbojkami. Postup je zvolen jako základní modelový – tímto způsobem je možno popisovat změny, nejčastěji pak úspory příkonu, při využití zdrojů světla emitujících zářivé toky ve viditelném spektru světla, které mají charakteristicky vyšší poměr S/P. [21]

Postup určení přizpůsobených fotopických jasů s využitím metodiky MES2-system je následující:

Subjektivní vjem při mezopickém vidění vyvolaný vysokotlakým sodíkovým zdrojem, při prokázání parametrů (průměrný jas komunikace L_{f1}) osvětlované komunikace pomocí měřících přístrojů kalibrovaných s křivkou citlivosti standardního fotometrického pozorovatele. Viděný subjektivní vjem lze popsat průměrným mezopickém jasnem komunikace L_m .

Totožný subjektivní vjem (viděný průměrný jas L_m) při mezopickém vidění vyvolaný světelným zdrojem LED, při prokázání parametrů osvětlované komunikace pomocí měřících přístrojů kalibrovaných s křivkou citlivosti normálního fotometrického pozorovatele popsatelný hodnotou L_{f2} .

Případové studie byly provedeny pro 3 vybrané světelné zdroje, jako zástupce nejběžnějších výrobků využívaných v oblasti veřejného osvětlení. Výběr těchto světelných zdrojů také souvisí s diskutovanou problematikou MŽP – světelné znečištění. Vybrané modely světelných zdrojů mají výsledné poměry zářivých toků, zhodnocených fotopickou a skotopickou křivkou spektrální citlivosti pro normálního pozorovatele, tedy poměry S/P dle Tab 18.

Tab 18 Hodnoty poměrů S/P pro vybrané modelové světelné zdroje

Typ světelného zdroje	poměr S/P
	(-)
Vysokotlaká sodíková výbojka (HPS)	0,65
Světelná dioda (LED), T _c = 3000 K	1,2
Světelná dioda (LED), T _c = 4000 K	1,55

Porovnávací výpočty vycházejí ze stanovených tříd osvětlení komunikací dle ČSN EN 13201 pro komunikace třídy M a P, jako nejtypičtějších zástupců pozemních komunikací. V tabulce Tab 19 a Tab 20 jsou uvedeny hodnoty průměrných jasů pro třídy osvětlení M a osvětleností pro třídy osvětlení P, nutných pro vyvolání stejného subjektivního vjemu pozorovatele pro danou třídu osvětlení. Uvedené jasy a osvětlenosti jsou uváděny ve formátu fotopických jasů ověřitelných měřicími přístroji běžně užívanými pro fotometrická měření.

Tab 19 Hodnoty průměrných fotopických jasů na povrchu komunikace pro motorová vozidla k vyvolání identického subjektivního vjemu hodnoceného metodikou MES2

Třída komunikace	Průměrný fotopický jas komunikace osvětlovaný svítidlem se světelným zdrojem [cd/m ²]:			Relativní pokles průměrného fotopického jasu L _r [%]:		
	HPS	LED T _c = 3000 K	LED T _c = 4000 K	HPS x LED 3000 K	HPS x LED 3000 K	LED 3000 K x LED 4000 K
M1	2,000	1,935	1,900	-3,3	-5,0	-1,8
M2	1,500	1,435	1,400	-4,3	-6,7	-2,4
M3	1,000	0,940	0,905	-6,0	-9,5	-3,7
M4	0,750	0,695	0,664	-7,3	-11,5	-4,5
M5	0,500	0,454	0,429	-9,2	-14,2	-5,5
M6	0,300	0,265	0,246	-11,7	-18,0	-7,2

Tab 20 Hodnoty průměrných fotopických osvětleností na povrchu komunikace pro chodce k vyvolání identického subjektivního vjemu hodnoceného dle metodiky MES2

Třída komunikace	Průměrná fotopická osvětlenost komunikace svítidlem se světelným zdrojem [lx]:			Procentní vyjádření poklesu průměrné fotopické osvětlenosti E _f při porovnání [%]:		
	HPS	LED T _c = 3000 K	LED T _c = 4000 K	HPS x LED 3000 K	HPS x LED 3000 K	LED 3000 K x LED 4000 K
P1	15,000	14,277	13,879	-4,8	-7,5	-2,8
P2	10,000	9,064	8,541	-9,4	-14,6	-5,8
P3	7,500	6,950	6,238	-7,3	-16,8	-10,2
P4	5,000	4,354	4,019	-12,9	-19,6	-7,7
P5	3,000	2,512	2,282	-16,3	-23,9	-9,2
P6	2,000	1,633	1,465	-18,4	-26,7	-10,3

Uvádění výchozích a vypočtených hodnot jasů a osvětleností pro jednotlivé třídy komunikací na tisíce je z důvodů přesností použitých metod tak, aby bylo možno vypočítat

a prezentovat detailněji chování systému MES2 s modelovými světelnými zdroji. V praxi se takováto přesnost ve světelné technice nepoužívá.

Fotopické hodnoty jasu a osvětlenosti pro vyvolání stejného subjektivního vjemu v oblasti mezopického vidění jsou dle očekávání nižší pro světelné zdroje s vyšším poměrem S/P a současně se rozdíl zvětšují pro klesající adaptační úroveň zraku. Aby bylo možno objektivně kvantifikovat nastalé změny, je pro každou uvažovanou třídu osvětlení je vytvořen model osvětlení pro 1 km délky komunikace.

Základní parametry modelů jsou nastaveny dle parametrů výpočtu uvedených v Tab 21. Záměrná volba stejných typických hodnot pro každý typ svítidla a světelné situace (jako je například činitel využití svítidel či stejná plocha komunikace) je provedena pro snazší porovnání výsledných příkonů. Pokud by pro každou modelovou situaci bylo vybráno jiné svítidlo, byla by práce zaměřena na hledání ideální křivky svítivosti, nikoliv na popis chování zraku a následné možnosti přizpůsobení výkonové části VO.

Tab 21 Zvolené parametry světelných zdrojů, svítidel a komunikace pro modelové řešení

Světelný zdroj	Měrný výkon svítidla	Činitel využití svítidla	Šířka komunikace	Činitel odrazu povrchu komunikace
	[lm/W]	[-]	[m]	[-]
Vysokotlaká sodíková výbojka (HPS)	85	0,6	7	0,15
Světelná dioda (LED), T _c = 3000 K	124			
Světelná dioda (LED), T _c = 4000 K	129			

Pro zvolený model komunikace byl vypočten potřebný světelný tok k dosažení požadovaného jasu na povrchu komunikace. Potřebný instalovaný příkon byl stanoven vynásobením světelného toku činitelem využití svítidla a měrným výkonem svítidla. Hodnoty činitele využití a měrných výkonů jsou stanoveny jako průměr charakteristických hodnot skutečných svítidel. Následně byly do vypočtených příkonů projektovány potenciální úspory při uvažování mezopického vidění za využití výpočetní metodiky MES2.

Tab 22 Instalovaný příkon na 1 km délky komunikace třídy M s daným typem světelného zdroje

Třída osvětlení	Příkony vypočteny z nutného dodání světelného toku na plochu při respektování činitele využití svítidla + měrné účinnosti			Nutné příkony při započtení vlivu mezopického vidění pro předešlé hodnoty příkonů		
	HPS	LED T _c = 3000 K	LED T _c = 4000 K	HPS – LED 3000 K	HPS – LED 3000 K	LED 3000 K – LED 4000 K
M1	5,14	3,88	3,76	5,14	3,75	3,57
M2	3,86	2,91	2,82	3,86	2,78	2,63
M3	2,57	1,94	1,88	2,57	1,82	1,70
M4	1,93	1,45	1,41	1,93	1,35	1,25
M5	1,29	0,97	0,94	1,29	0,88	0,81
M6	0,77	0,58	0,56	0,77	0,51	0,46

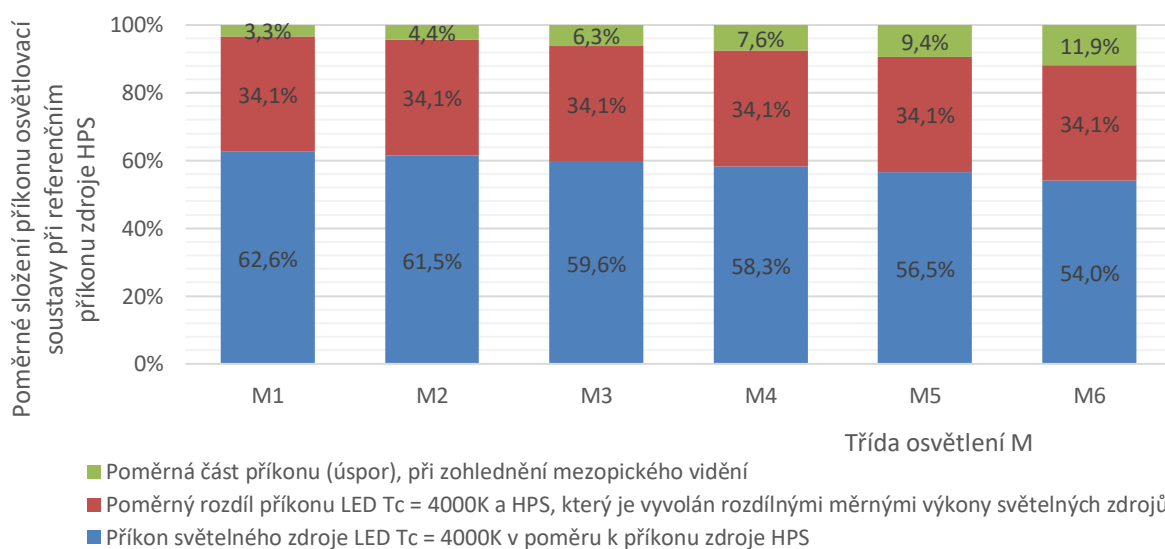
Tab 23 Instalovaný příkon na 1 km délky komunikace třídy P s daným typem světelného zdroje

Třída komunikace	Instalovaný příkon pro fotopické hodnoty osvětlenosti			Instalovaný příkon při zohlednění mezopického vidění		
	LED T _c = 4000 K	HPS x LED 3000 K	LED T _c = 4000 K	HPS x LED 3000 K	HPS	LED 3000 K – LED 4000 K
	P1	2,06	1,42	1,36	2,06	1,35
P2	1,37	0,95	0,90	1,37	0,86	0,77
P3	1,03	0,71	0,68	1,03	0,66	0,56
P4	0,69	0,47	0,45	0,69	0,41	0,36
P5	0,41	0,28	0,27	0,41	0,24	0,21
P6	0,27	0,19	0,18	0,27	0,15	0,13

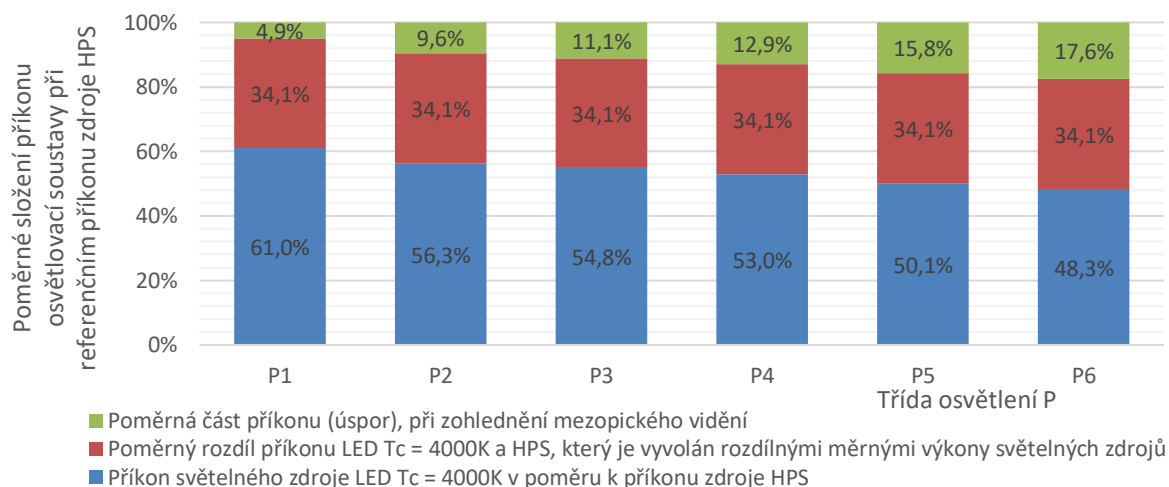
Popis výkonových parametrů pomocí absolutních hodnot jasů a osvětleností pro danou třídu a typ osvětlovací soustavy, uvedený v tabulkách výše, je souhrnem minimálních požadavků dle zadaných parametrů modelových osvětlovacích soustav. Grafické vyjádření poměrných složek uvedených příkonů v Pro zvolený model komunikace byl vypočten potřebný světelný tok k dosažení požadovaného jasů na povrchu komunikace. Potřebný instalovaný příkon byl stanoven vynásobením světelného toku činitelem využití svítidla a měrným výkonem svítidla. Hodnoty činitele využití a měrných výkonů jsou stanoveny jako průměr charakteristických hodnot skutečných svítidel. Následně byly do vypočtených příkonů projektovány potencionální úspory při uvažování mezopického vidění za využití výpočetní metodiky MES2.

a Tab 23 je uvedeno v Graf 12 a Graf 13.

Graf 12 Potřebný poměrný příkon HPS v porovnání s LED 4000 K pro dosažení stejných světelně technických parametrů v podmínkách mezopického vidění pro jednotlivé třídy osvětlení M



Graf 13 Potřebný poměrný příkon HPS v porovnání s LED 4000 K pro dosažení stejných světelně technických parametrů v podmínkách mezopického vidění pro jednotlivé třídy osvětlení P



Uvedené grafy vyjadřují potřebné poměrné příkony osvětlovacích soustav pro jednotlivé třídy osvětlení. Zásadním aspektem, který určuje rozdíl v potřebných příkonech svítidel se světelnými zdroji HPS a LED 4000 K není oblast mezopického vidění, která tvoří cca 10 % úspory u komunikací třídy osvětlení M (pro motorová vozidla), ale měrný výkon světelného zdroje, resp. svítidla. Ten tvoří více než jednu třetinu celkových potenciálních úspor.

V rámci porovnání dvou výše zmíněných situací je možno provést porovnání hustoty příkonu vypočtených situací

Tab 24 Hustota příkonu D_p pro modelovou situaci komunikace třídy osvětlení M

Třída osvětlení	HPS	LED 4000 K
	[W·lx ⁻¹ ·m ⁻²]	
M1	0,018	0,013
M2	0,018	0,013
M3	0,018	0,013
M4	0,018	0,013
M5	0,018	0,013
M6	0,018	0,013

Ukazatel hustoty příkonu D_p neumožňuje rozlišit změny způsobené vlivem rozdílných potenciálních úspor v oblasti mezopického vidění. Je to tím, že výpočet sleduje vždy potřebný příkon na vyvolaný světelný počitek. Tímto ukazatelem lze porovnat osvětlovací soustavy se světelnými zdroji s rozdílnými měrnými výkony, které vytvářejí stejné požadované, subjektivně vnímané, světelné prostředí. Vhodným parametrem pro hodnocení energetické náročnosti dvou hodnocených situací je ukazatel roční spotřeby D_e (Tab 25).

Tab 25 Ukazatel roční spotřeby D_e pro modelovou situaci komunikace třídy M

Třída komunikace	HPS	LED 4000 K
	[Wh·m ²]	
M1	2,938	2,040
M2	2,204	1,503
M3	1,469	0,972
M4	1,102	0,713
M5	0,735	0,461
M6	0,441	0,264

Při použití ukazatele roční spotřeby je již možné určit potenciál možných energetických úspor. Pro vyjádření nákladů na veřejné osvětlení je možno využít výše uvedený Bommelův vzorec (27), jenž poskytuje, předpokladem stejných investičních nákladů na pořízení a provoz, kam zahrnujeme stejné náklady osvětlovacích soustav na údržbu a obnovu, výsledky ročních nákladů na provoz osvětlovací soustavy uvedených v

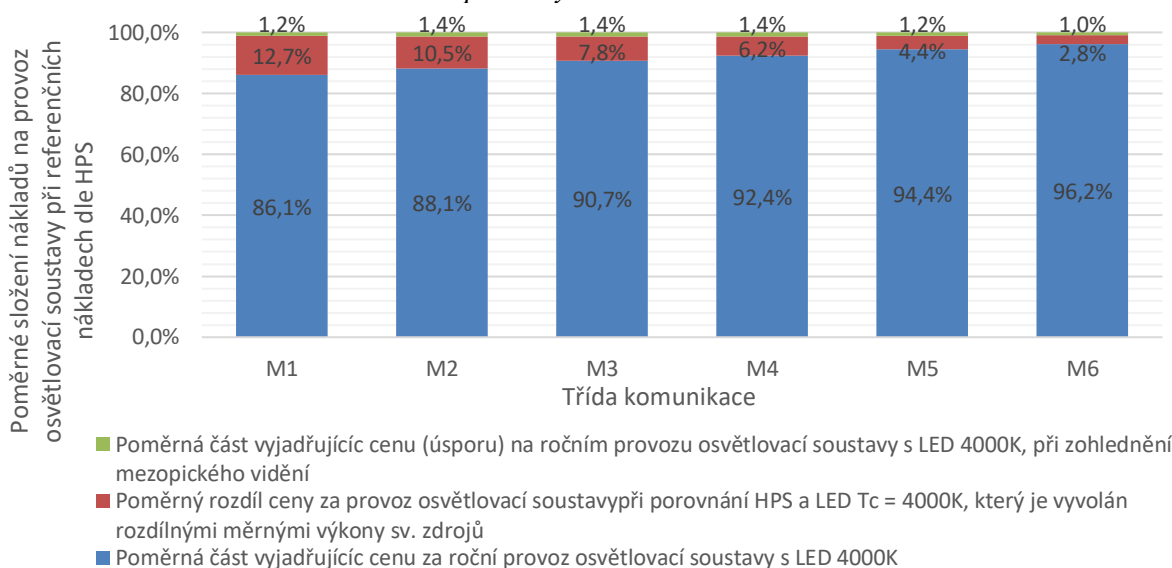
Tab 26:

Tab 26 Roční provozní náklady pro 1 km komunikace

Třída komunikace	HPS	LED 4000 K	LED 4000 K v mezop. oblasti
	[tisíce Kč·rok ⁻¹]		
M1	123,8	108,0	106,5
M2	112,2	100,4	98,9
M3	100,7	92,8	91,4
M4	94,9	89,0	87,7
M5	89,2	85,2	84,1
M6	84,5	82,2	81,4
P1	94,1	88,5	87,7
P2	88,6	84,9	83,8
P3	85,9	83,1	82,1
P4	83,1	81,2	80,5
P5	80,9	79,8	79,3
P6	79,8	79,1	78,7

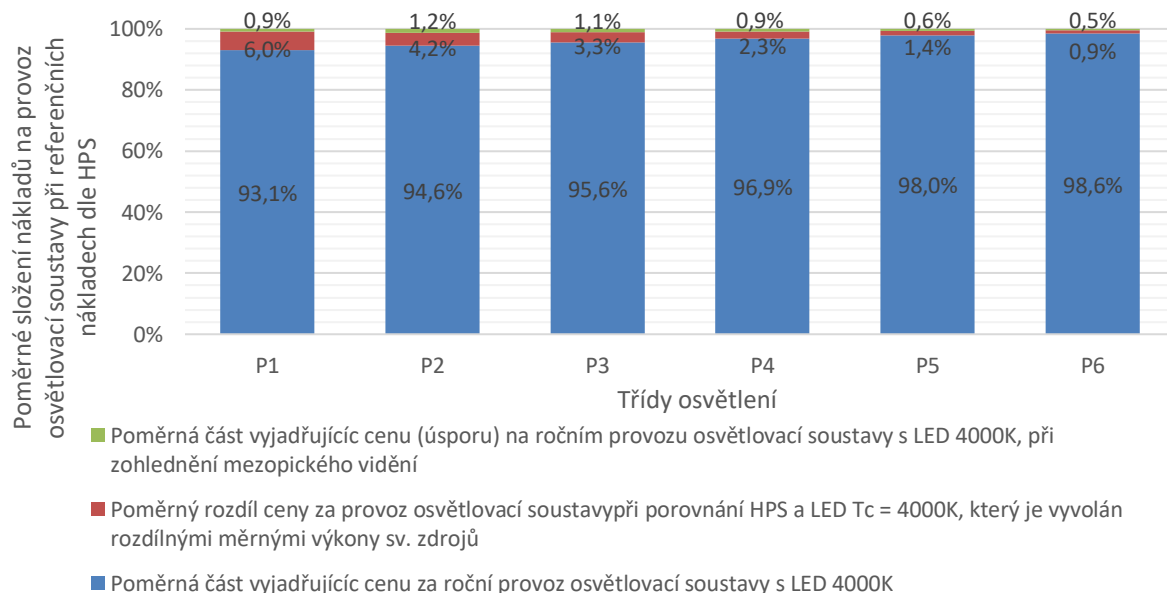
Grafické vyjádření provozních nákladů na 1 km komunikace na provoz osvětlovacích soustav pro jednotlivé třídy osvětlení M jsou uvedeny v Graf 14.

Graf 14 Grafické vyjádření poměrných nákladů na provoz soustavy s vysokotlakou sodíkovou výbojkou a světelnou diodou 4000 K pro jednotlivé třídy osvětlení v podmínkách mezopického vidění pro třídy osvětlení M



Stejné grafické vyjádření poměrných provozních nákladů na provoz osvětlovací soustavy pro třídy osvětlení P je uveden na Graf 15.

Graf 15 Grafické vyjádření poměrných nákladů na provoz soustavy s vysokotlakou sodíkovou výbojkou a světelnou diodou 4000 K pro jednotlivé třídy osvětlení v podmínkách mezopického vidění pro třídy osvětlení P

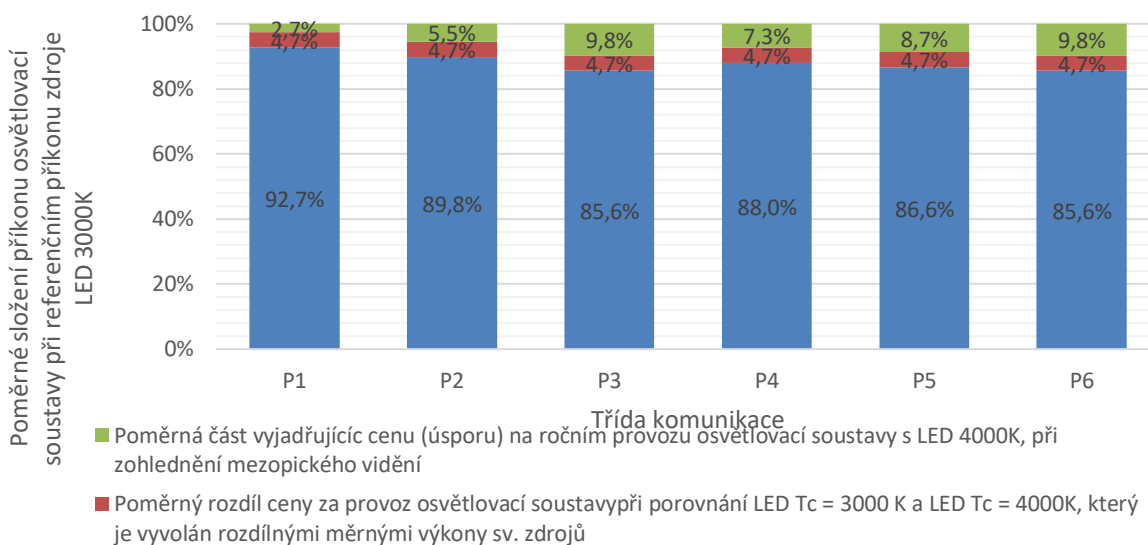


Potenciál úspor, vzhledem k rozložení ročních provozních nákladů, generovaný využitím mezopické oblasti vidění dosahuje řádu jednotky procenta z celkové částky.

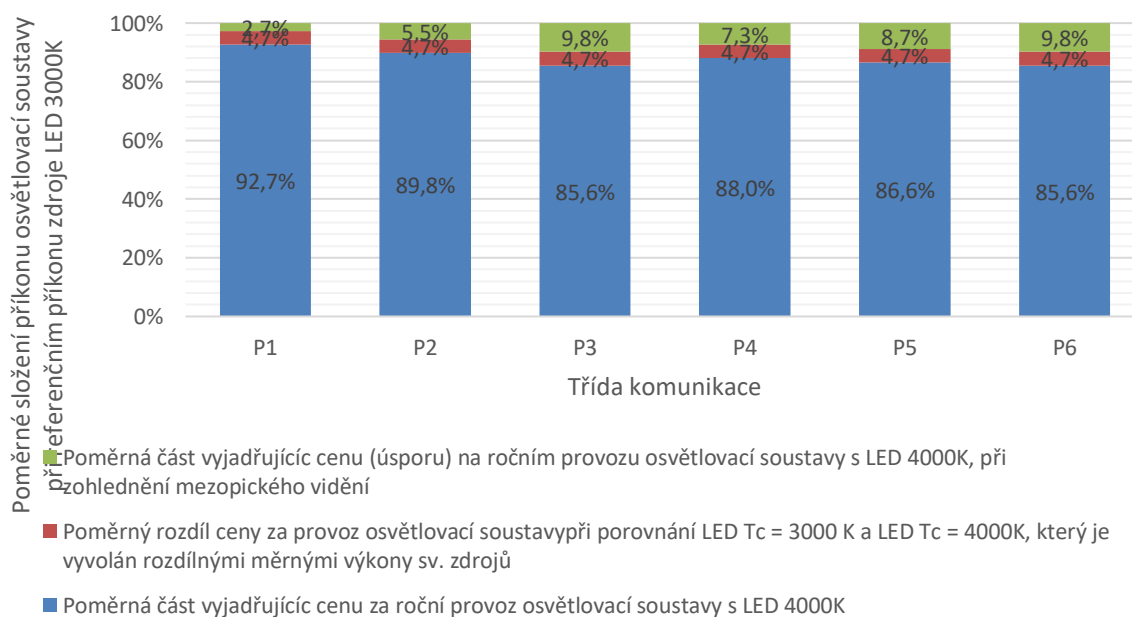
6.2.1 Porovnání příkonových a provozních nákladů pro světelné zdroje LED s rozdílnou teplotou chromatičnosti

Pro porovnání je na následujícím grafu uveden maximální příkon pro světelný zdroj LED 3000 K a vyjádřeny poměrné složky snížení příkonu pro LED 4000 K.

Graf 16 Potřebný poměrný příkon LED 3000K v porovnání s LED 4000K pro dosažení stejných světelně technických parametrů v podmínkách mezopického vidění pro jednotlivé třídy osvětlení M

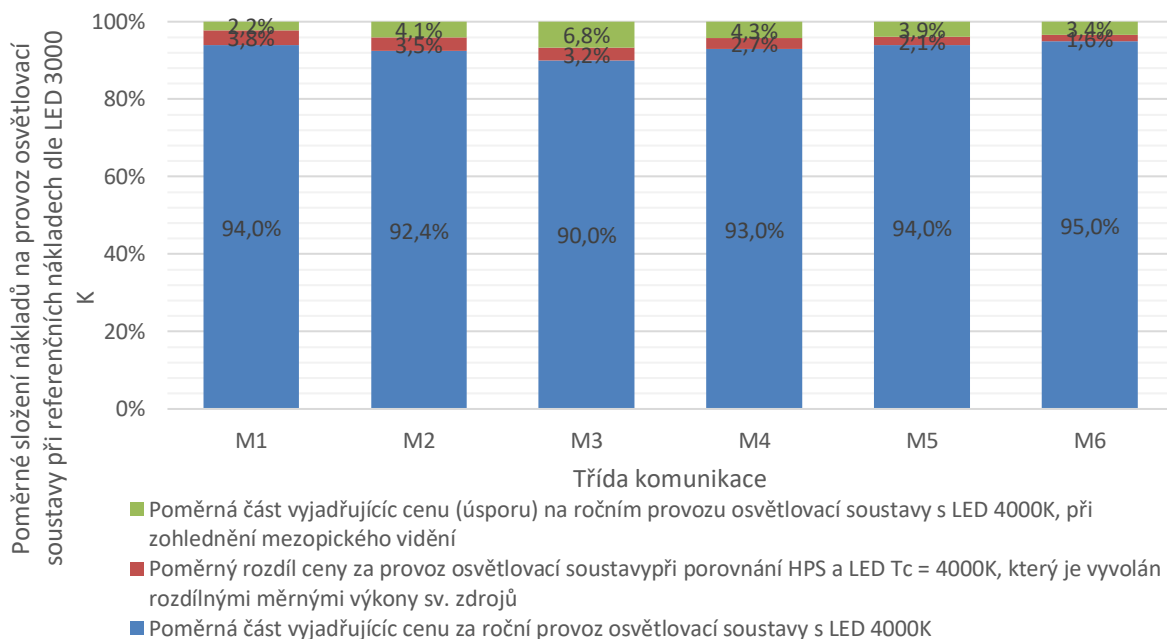


Graf 17 Potřebný poměrný příkon LED 3000K v porovnání s LED 4000K pro dosažení stejných světelně technických parametrů v podmínkách mezopického vidění pro jednotlivé třídy osvětlení P

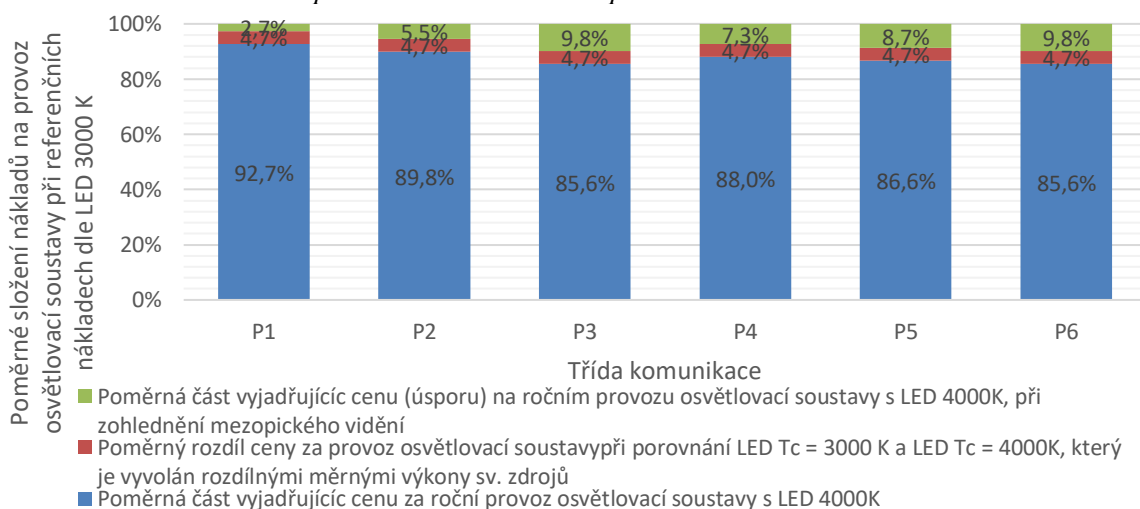


Hustota příkonu D_p , podobně jako u předchozího porovnání HSP a LED 4000 K je pro všechny třídy osvětlení M a P totožná. Výsledné číslo 0,014 je dáno návrhovým postupem, kdy příkon je vždy přesně dopočítán dle požadovaných parametrů osvětlení a plocha hodnocené pozemní komunikace je shodná. Výsledky popisujících skutečné možnosti úspor při porovnání můžeme vyjádřit pomocí Bommelova výpočetního vzorce, tak jako v přechodném případě.

Graf 18 Grafické vyjádření potenciálních úspor formou složek příkonu daných měrným výkonem a rozdílnou spektrální světelnou účinností zraku v podmínkách mezopického vidění pro LED 4000K v porovnání s LED 3000K pro třídu osvětlení M



Graf 19 Grafické vyjádření potenciálních úspor formou složek příkonu daných měrným výkonem a rozdílnou spektrální světelnou účinností zraku v podmínkách mezopického vidění pro LED 4000K v porovnání s LED 3000K pro třídu osvětlení P



7 Stanovení hodnotících parametrů osvětlovacích soustav v podmínkách mezopického vidění

Na základě provedených analýz výsledků teoretických výpočtů, modelací a terénních měření byly definovány parametry ovlivňující kvalitu soustav veřejného osvětlení.

Výzkum kvantitativních světelně technických veličin v podmínkách mezopického vidění dle provedených analýz ukázal, že zohlednění mezopického vidění při návrhu veřejného osvětlení pro třídy osvětlení M nemá zásadní vliv na snížení energetické náročnosti osvětlovacích soustav.

Kvalitativní parametry veřejného osvětlení, jako je teplota chromatičnosti a index podání barev, sledované v podmínkách mezopického vidění, při respektování předepsaných úrovní jasů či osvětleností dle jednotlivých tříd osvětlení komunikací, se ukazují hlavní faktory, ovlivňující kvalitu světelného prostředí vytvářené veřejným osvětlením,

Souhrn doporučujících kvalitativních parametrů a jejich hodnot pro jednotlivé třídy osvětlení je uveden v Tab 27.

Tab 27 Doporučené hodnoty kvalitativních parametrů světelných zdrojů pro veřejné osvětlení v rámci jednotlivých tříd osvětlení.

účel komunikace	Požadavky	Typ komunikace	Funkční skupina	Třída osvětlení komunikace	Ra	Tc
					[-]	[K]
přenos dopravy	bezpečnost provozu	Rychlostní	A	M1	≥ 7	≤ 4000
				M2	≥ 70	≤ 4000
		Sběrná	B	M3	≥ 80	≤ 3000
				M4	≥ 80	≤ 3000
		Obslužná	C	M5 / P1	≥ 40	≤ 3000
				M6 / P2	≥ 40	≤ 3000
obsluha území	komfort a pocit bezpečí, bezpečnost pohybu	Pěší a obytné zóny	D1	P3	≥ 80	≤ 2700
				P4	≥ 80	≤ 2700
		Chodníky, stezky	D2	P5	≥ 20	≤ 2700
				P6	≥ 20	≤ 2700

Tab 27 uvádí rozdělení pozemních komunikací dle současně platné legislativy pro které uvádí kvalitativní parametry světelných zdrojů. Uvedená doporučení vycházejí z teoretických i praktických výsledků disertační práce.

Pro pozemní komunikaci primárně určené pro přenos dopravy, kde je hlavním požadavkem bezpečnost dopravy, jsou navrženy vyšší hodnoty požadovaných indexů podání barev. Jelikož vyšší index podání barev má také vliv na energetickou náročnost osvětlovacích soustav jsou pro pozemní komunikace (M1, M2) s nejvyššími nároky na osvětlení voleny nižší indexy podání barev a vyšší teploty chromatičnosti. Pro pozemní komunikace s nižšími nároky na osvětlení (M3, M4) jsou voleny vyšší indexy podání barev a je snížena požadovaná hodnota

teploty chromatičnosti. U nejnižších tříd osvětlení (M5, M6) jsou sníženy požadavky na index podání barev. Pro výše uvedené volby parametrů jsou využity nově získané poznatky o závislosti zvyšujícího se zrakového výkonu v mezopických podmínkách při vyšším indexu podání barev. [22]

U pozemních komunikací určených pro obsluhu území se vedle bezpečnosti pohybu požaduje také zajištění pocitu bezpečí a kvality vjemu osvětleného prostředí. Z tohoto důvodu jsou pro společensky a sociálně významné pěší komunikace (P3, P4) voleny vyšší indexy podání barev zajišťující kvalitní vjem okolního prostředí. U nejnižších tříd osvětlení (P5, P6) je požadavek na index podání barev snížen. Pro všechny pozemní komunikace pro obsluhu území jsou vzhledem k nízkým hladinám osvětlenosti navrženy nižší teploty chromatičnosti, které působí při těchto světelných podmínkách přirozenějším dojmem.

Toto doporučení také reflektuje současný trend razantního snižování náhradní teploty chromatičnosti světelných zdrojů z důvodu odstranění modré složky vyzařovaného spektra.

8 Závěr

Disertační práce je z pohledu teoretického přínosem pro oblast výpočtů, měření i vyhodnocování světelně technických parametrů v podmínkách mezopického vidění. Z pohledu praktického je přínos práce v oblasti hodnocení zrakového výkonu v podmínkách mezopického vidění a sním souvisejících parametrů osvětlení i energetické náročnosti osvětlovacích soustav.

Výzkum v oblasti mezopického vidění a návazných témat a jeho celkové zaměření u jednotlivých pracovišť je vždy významně ovlivněn možnosti výzkumu a přístrojovým vybavením daného pracoviště. Jednotlivé výzkumy jsou zpravidla prováděny v jednotně definovaných situacích, a tak není možné je mezi sebou porovnávat, či slučovat do větších celků k dedukci konkrétnějších poznatků. Tato disertační práce předkládá odlišný přístup – nezkoumá chování zraku v jedné či více konkrétních situacích. Sledovaným cílem je obecný popis světelných prostředí a jejich porovnání je s typicky využívanými parametry osvětlení a technickými specifikacemi svítidel při návrzích osvětlení pozemních komunikací.

Teoretické přínosy práce

Výsledky analýzy spektrálních vlastností reálných světelných zdrojů na rozsáhlém souboru vzorků potvrdily trend nárůstu vnímaného jasu v oblasti mezopického vidění v závislosti na teplotě chromatičnosti.

Nově byla zjištěna závislost vnímaného jasu v oblasti mezopického vidění na indexu podání barev.

Rozbor a hodnocení změn průměrných jasů na modelové scéně pozemní komunikace pro různé zorné úhly pozorování a tři modelové situace.

Na základě terénních měření 14 světelných scén a vyhodnocení jejich průměrných jasů v závislosti byly pro veřejné osvětlení definovány čtyři typické světelné situace

V rámci terénních měření 14 světelných scén bylo provedeno hodnocení jasu bezprostředního okolí komunikace, na základě kterého byly pro veřejné osvětlení definovány tři typické situace, důležité pro adaptaci zraku pozorovatele.

Praktické přínosy práce

V praktické části práce bylo provedeno měření teplot chromatičnosti na vzorku 10 osvětlovacích soustav. Výsledky měření ukázaly významné rozdíly v deklarovaných hodnotách teplot chromatičnosti světelných zdrojů a hodnot zjištěných při terénním měření v kontrolních polích osvětlovacích soustav.

Pro oblast osvětlování pozemních komunikací pro motorovou dopravu bylo na základě provedených analýz zjištěny a popsány rozdíly subjektivně vnímaných jasů u nejběžnějších typů LED svítidel.

Stanovení významu aplikace mezopického systému při návrhu osvětlení pozemních komunikací pro motorovou i pěší dopravu z pohledu světelně technických parametrů, energetické náročnosti

Porovnání celkových nákladů a možných úspor osvětlovacích soustav veřejného osvětlení v podmínkách mezopického a fotopického vidění.

Stanovení parametrů a jejich hodnot pro hodnocení kvality veřejného osvětlení

Závěry pro další rozvoj vědy nebo realizaci v praxi

Na základě zjištěných rozdílů deklarovaných hodnot teplot chromatičnosti světelných zdrojů a hodnot zjištěných při terénním měření v kontrolních polích osvětlovacích soustav navrhnout metodiku pro měření teplot chromatičnosti osvětlovacích soustav v terénu.

Další využití čtyř definovaných typických světelných situací ve veřejném osvětlení pro stanovení adaptačních jasů v reálném prostředí.

Další využití tří definovaných typických situací bezprostředního okolí pozemní komunikace pro stanovení adaptačních jasů v reálném prostředí.

Seznam odborné literatury

- [1] HABEL, J., et al. *Světelná technika a osvětlování*. Praha : FCC Public, 1995. 437 s. ISBN 80-90-1985-0-3..
- [2] m. a. s. z. 2. 3. s. ČSN EN 13201-1. Osvětlení pozemních komunikací – Část 1: Výběr tříd osvětlení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci.
- [3] CIE, *CIE 191-2010 Recommended system for mesopic photometry based on visual performance*, ISBN 9783901906886., 2010.
- [4] Halonen L., Puolaka M.; *CIE System for Mesopic Photometry*, In: *CIE Introductory Tutorial & workshop on mesopic Photometry*. (2012)..
- [5] FERWERDA, James A. *Elements of Early Vision for Computer Graphics* [online]. Program of Computer Graphics, Cornell University : , 2001. Dostupné z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=946628&userType=inst>>..
- [6] KALITOVÁ , Jana; ŠPAČKOVÁ , Kateřina. *Anatomie a fyziologie oka II*. [online]. Dostupné z WWW: <www.ocniklinikaol.cz/prednasky/anat2.ppt>..
- [7] *Zpsychologie.uni-heidelberg* [online]. Das visuelle system. Dostupné z WWW: <http://www.psychologie.uni-heidelberg.de/ae/allg/lehre/wct/w/w3_visuelles_system/w320_aufbau.htm>..
- [8] *Science Photo Library* [online]. [200-] [cit. 2011-04-15]. Retina, SEM. Dostupné z WWW: <http://www.sciencephoto.com/images/download_lo_res.html?id=804240184>..
- [9] HLAVÁČ, V. *Felk.cvut.cz* [online]. [cit.]. *Human Eye Physiology*. Dostupné z WWW: <<http://cmp.felk.cvut.cz/~hlavac/TeachPresEn/15ImageAnalysis/61HumanEyePhysiology.ppt>>..
- [10] HABEL, J. *Zrak a vidění (1. část)* . *Světlo* [online]. 2008, 5, Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37974>..
- [11] JOSEFOWICZ, Jack; HA, Debbie. *Vision and exterior lighting: Shining some light on scotopic and photopic lumens in roadway conditions*, 2008. 10 s..
- [12] NARISADA; SCHREUDER et al. *Light Pollution Handbook*. The Netherlands : Springer, 2004. 943 s. ISBN 978-1-4020-2665-2..
- [13] CIE, „CIE AND MESOPIC PHOTOMETRY,“ 2010 . [Online]. Available: <http://www.cie.co.at/index.php/LEFTMENUE/About+us/CIE+Newsletter/>.
- [14] Habel, J.; Žák, P.; Zálešák, J.: *Determination of luminous flux in conditions of mesopic vision*. In: *Przegląd Elektrotechniczny*. 2013, 89(6), 334-336. ISSN 0033-2097..
- [15] ČSN EN 13201-2. *Osvětlení pozemních komunikací – Část 2: Výkonnostní požadavky*., Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004. 17 s..
- [16] GOODMAN, T., *Photometric Measurement using the CIE System for Mesopic Photometry*. In: *CIE Introductory Tutorial on Mesopic Photometry*. 2012..
- [17] Zálešák, J. - Tomáš, J. *Comparison of static visual adaptation field in night time and mesopic conditions* In: *Proceedings of the 14th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2013*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita O.
- [18] Zálešák, J.: *Visual field analysis for night-time drivers*. In: *Proceedings of the 21st International Conference LIGHT SVĚTLO 2015*. Brno: Brno University of Technology, FEEC, Department of Electrical Power Engineering, 2015. pp. 195-197. ISBN 978-80-214-52.

- [19] Zálešák, J.; Tomáš, J.: *Comparison of static visual adaptation field in night time and mesopic conditions*. In: *Electric Power Engineering 2013*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, 2013. pp. 463-465. ISBN 978-80-248-2988-3.
- [20] Van Bommel, W.J.M., (1978) *Optimization of Road Lighting Installations by the Use of Performance Sheets*.
- [21] Zálešák, J.; Habel, J.; Bayer, R.: *Hodnocení energetické náročnosti navržených osvětlovacích soustav*. In: *Světlo*. 2015, 18(2), 48-49. ISSN 1212-0812. 33 %.
- [22] ČESKÁ REPUBLIKA. *Zákon o pozemních komunikacích*. In: . Praha: Praha, 1997, ročník 1997, číslo 13..

Publikace v impaktovaných časopisech (excerpované WOS):

- [L1] Habel, J.; Žák, P.; Zálešák, J.: Determination of luminous flux in conditions of mesopic vision. In: Przegląd Elektrotechniczny. 2013, 89(6), 334-336. ISSN 0033-2097. 33 %

Publikace v recenzovaných časopisech:

- [L2] Zálešák, J.; Habel, J.; Bayer, R.: Hodnocení energetické náročnosti navržených osvětlovacích soustav. In: Světlo. 2015, 18(2), 48-49. ISSN 1212-0812. 33 %

Publikace ostatní:

- [L3] Zálešák, J.: Studie jasových adaptačních podmínek pro uživatele veřejného osvětlení. In: Sborník odborného semináře Kurz osvětlovací techniky XXXII. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. pp. 316-320. 1. ISBN 978-80-248-3969-1. 100 %
- [L4] Žák, P.; Zálešák, J.: The influence of spectral properties of light in street lighting on visual perception. In: Proceedings of 2016 IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries, Lumen V4 2016. New York: IEEE, 2016. ISBN 978-1-5090-3305-8. 50 %
- [L5] Zálešák, J.: Visual field analysis for night-time drivers. In: Proceedings of the 21st International Conference LIGHT SVĚTLO 2015. Brno: Brno University of Technology, FEEC, Department of Electrical Power Engineering, 2015. pp. 195-197. ISBN 978-80-214-5244-2. 100 %
- [L6] Zálešák, J.: Hodnocení energetické náročnosti navržených osvětlovacích soustav v podmínkách fotopického a mezopického vidění. In: Proceedings of ELEN 2014. Praha: ČVUT FEL, Katedra elektroenergetiky, 2014. ISBN 978-80-01-05654-7. 100 %
- [L7] Zálešák, J.; Pelánová, Z.: Possible evaluation of visual performance and energy potencial in conditions of mesopic vision. In: LUMEN V4 2014. Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2014. pp. 279-284. ISBN 978-963-9299-21-4. 50 %
- [L8] Zálešák, J.; Pelánová, Z.: Evaluation of Energy Performance of Road Lighting System. In: Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014. pp. 645-648. ISSN 2376-5623. ISBN 978-1-4799-3807-0. 50 %
- [L9] Zálešák, J.: Rozbor jasu zorného pole pozorovatele ve venkovním prostředí. In: Kurz osvětlovací techniky XXX. Ostrava: Česká společnost pro osvětlování, 2013. pp. 250-253. ISBN 978-80-248-3173-2. 100 %
- [L10] Zálešák, J.; Tomáš, J.: Comparison of static visual adaptation field in night time and mesopic conditions. In: Electric Power Engineering 2013. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, 2013. pp. 463-465. ISBN 978-80-248-2988-3. 50 %
- [L11] Zálešák, J.; Habel, J.: Světelnětechnické výpočty v oblasti mezopického vidění a jejich praktická aplikace. In: Kurz osvětlovací techniky XXIX. Ostrava: Česká společnost pro osvětlování, 2012. pp. 198-203. ISBN 978-80-248-2832-9. 50 %
- [L12] Zálešák, J.; Habel, J.: Spektrální a jasová citlivost zraku v oblasti mezopického vidění. In: IV Lighting Conference of the Visegrad Countries. Bratislava: Kongres management s.r.o., 2012. pp. 309-314. ISBN 978-80-89275-32-8. 50 %

- [L13] Zálešák, J.; Habel, J.; Sokanský, K.: Summary of present knowledge about mesopic vision. In: Light Světlo 2011. Ostrava: Česká společnost pro osvětlování, 2011. pp. 116-117. ISBN 978-80-248-2480-2. 33 %

Ohlasy

Cítace [L8] v impaktovaném článku: Tulbure, A.; Marc, G.; Kurt, U.: Electrical and optical evaluation aspects of public lighting systems. In: ADVANCED TOPICS IN OPTOELECTRONICS, MICROELECTRONICS, AND NANOTECHNOLOGIES VIII, vol. 10010, 2016. ISBN 978-1-5106-0425-4. ISSN 0277-786X.