

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky**



**Osvětlování komunikací v podmínkách
mezopického vidění**

Road lighting in terms of mesopic vision

Diplomová práce

David Tomáš

Vedoucí práce: Ing. Jan Zálešák

Studijní program: Elektroenergetika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Českých Budějovicích dne 5. 5. 2015

.....
David Tomáš

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **David Tomáš**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Osvětlování komunikací v podmínkách mezopického vidění**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popis fyziologie zraku a jeho funkce.
- 2) Problematika osvětlování komunikací v podmínkách mezopického vidění.
- 3) Provedení experimentálních měření a výpočtů.
- 4) Potenciál energetických úspor veřejného osvětlení v podmínkách mezopického vidění.

Seznam odborné literatury:

- [1] HABEL, Jiří, et al. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. 622 s. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [2] CIE 191-2010 Recommended system for mesopic photometry based on visual performance, 2010. 73 s. ISBN 9783901906886.
- [3] Norma ČSN EN 13201 Osvětlení pozemních komunikací.

Vedoucí: Ing. Jan Zálešák

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

Poděkování

Skrze tyto řádky bych rád poděkoval Ing. Janu Zálešákovi za vedení této práce, za cenný čas a rady, které mi pomohly tuto práci dokončit.

Abstrakt

Předmětem této diplomové práce je problematika mezopického vidění v rámci veřejného osvětlení. V teoretické části je jedna kapitola věnována fyziologii oka. V dalších kapitolách je pak rozebrána problematika měření mezopického jasu včetně všech úskalí.

V praktické části jsou pak měření a následným analyzováním zjišťovány závislosti fotopického a mezopického jasu adaptačního pole na jeho velikosti a tvaru.

Poslední kapitola se věnuje potenciálním energetickým úsporám při využití vědomostí mezopické citlivosti lidského oka.

Klíčová slova

Veřejné osvětlení, citlivost lidského oka, mezopické vidění, modely mezopického vidění, mezopický jas, adaptační pole, měření v mezopických podmínkách

Abstract

This diploma thesis deals with the road lighting in terms of mesopic vision. The first chapter of this thesis focuses on the physiology of the human eye. In the following chapters there is analyzed the issue of mesopic luminance measuring including all the difficulties.

In the practical part there is measured and analyzed the photopic and mesopic luminance dependence of adaptation field on its size and shape.

The last chapter is devoted to the potential energy savings through the use of knowledge of eye sensitivity in terms of mesopic vision.

Keywords

Outdoor lighting, sensitivity of the human eye, mesopic vision, mesopic vision models, mesopic luminance, adaptation field, measuring in terms of mesopic vision

Obsah

Úvod.....	8
Kapitola 1. Zrak – fyziologie lidského oka	10
1.1. Popis zrakového systému.....	10
1.2. Sítnice	11
1.3. Čípky	12
1.4. Tyčinky	12
1.5. Adaptace.....	13
1.6. Citlivost lidského oka	14
1.7. Fotopické vidění	14
1.8. Skotopické vidění	15
Kapitola 2. Mezopické vidění	18
2.1. Proč se zabýváme mezopickým viděním.....	18
2.2. Poměr S/P	21
Kapitola 3. Určení spektrální citlivosti oka pro mezopickou oblast	23
3.1. USP model.....	23
3.2. MOVE model	24
3.3. MES1 a MES2 model.....	25
3.4. Výpočet modelu MES2	26
3.5. Měření mezopického jasu.....	29
3.6. Nedostatky při měření mezopických veličin.....	31
Kapitola 4. Platné normy pro osvětlování komunikací	33
4.1. Popis normy	33
Kapitola 5. – Praktická část Měření závislosti jasu na adaptačním poli	36
5.1. Cíle měření	36
5.2. Teoretický rozbor	36
5.3. Průběh měření.....	38
5.4. Zpracování měření	40
5.5. Výsledky měření.....	42
5.6. Porovnání s teoretickými průběhy	49
Kapitola 6. Potenciální energetické úspory	51

Závěr	58
Citovaná literatura	60
Seznam obrázků a tabulek	62

Úvod

Již s prvními městy, které vznikaly tisíce let před naším letopočtem, se lidé snažili v ulicích nahradit každodenně zapadající slunce. Chtěli si tak zajistit pohodlí, které jim umožňovalo se pohybovat po městě v nočních hodinách a cítit se přitom bezpečně, jelikož nebezpečí často přicházelo z temných, neosvětlených koutů. Tento úkol byl zprvu svěřen pochodním a rozžíhaným ohňům v železných klecích. Pochodně pak Římané nahradili olejovými lampami, které měli pověšené před svými domy, a o které se starali jejich otroci. Ve středověku se začala první města organizovaně rozsvěcovat v 16. století, ačkoliv to často platilo jen pro zimní období. Velký krok v tomto směru nastal na začátku 19. století, kdy se začaly používat plynové lampy. Netrvalo však ani století a do městských ulic se započalo zavádět osvětlení elektrické, zprvu zastoupené žárovkami, později výbojkami a v současné době LED zdroji. [1]

Veřejné osvětlení je dnes na velmi dobré úrovni, a proto se kromě vývoje nových zdrojů začíná celý systém především zefektivňovat a optimalizovat. Rostou nároky obyvatel měst a obcí a s nimi i energetická náročnost, kterou je ovšem nutné snižovat. Hledají se tak nové způsoby, jak omezit spotřebu energie a přitom stále splňovat požadavky, které jsou kladeny na veřejné osvětlení.

Vývoj se ubírá několika směry, z nichž jeden vede k příliš neprobádané a dříve opomíjené skutečnosti týkající se světelné citlivosti oka. Již téměř 100 let víme, jak je lidské oko citlivé na vlnové délky světla za dne. Dokonce známe i citlivost lidského oka za tmy. Avšak mezi temnou nocí a bílým dnem se nachází významná oblast, kterou nemůžeme opomíjet, a kterou můžeme nazvat šerem, odborně „mezopickými podmínkami“. Citlivost lidského oka v tomto stavu nebyla zjišťována, a to z důvodu, že není konstantní jako za dne či v noci, ale proměnná. Přičemž tyto podmínky nastávají právě i při osvětlování ulic v nočních hodinách.

Citlivost oka v šeru je dána úrovní jasu. Při stmívání se posouvá do nižších vlnových délek, zatímco citlivost vyšších vlnových délek je oslabena. Tento jev jako první popsal Jan Evangelista Purkyně ve své disertační práci, a proto také dostal název „Purkyňův jev“. A právě tento posun by se měl při návrhu veřejného osvětlení zohlednit.

Teprve až v 90. letech vznikly první modely mezopického vidění, které by bylo možné při výpočtech použít, a které ovšem nebyly považovány za příliš přesné, už jen proto, že každý podával jiný výsledek. Mezinárodní organizací pro osvětlování (CIE) byla proto ustanovena technická skupina, která měla nalézt nové a v rámci možností přesné řešení. Tak vznikly dva nové modely, které byly výpočtem velmi podobné. Na základě hlubšího měření a analýzy pak z nich byl komisí doporučen jeden. Byl označen zkratkou MES2 a jeho velkou výhodou bylo snadné začlenění do současných metod fotometrie. Výpočty

tohoto modelu, i všech ostatních, byly pak popsány v dokumentu CIE 191:2010, vydaného, jak už název napovídá, v roce 2010.

Problematika mezopického vidění, i přes vydání doporučených postupů, však stále nemohla být použita při praktickém měření. Hlavním problémem se tentokrát stal pojem „adaptační pole“. Abychom mohli MES2 model použít, bylo nutné umět změřit mezopický jas. S fotopickým jasnem nemáme v současnosti problémy, jelikož citlivost oka je v těchto podmínkách konstantní. To v mezopické oblasti neplatí a je proto nutné zjistit, na jakou oblast zorného pole se oko adaptuje. Tedy jaký tvar a velikost má adaptační pole, ve kterém se bude měřit mezopický jas.

Ačkoliv výzkum stále není u konce, už teď můžeme tvrdit, jaký vliv na veřejné osvětlení bude mít. Díky znalostem mezopického vidění bude možné volit světelné zdroje tak, aby vyzařovaly na těch vlnových délkách, na kterých je oko za daných podmínek nejcitlivější. To povede jednak k energetickým úsporám a také samozřejmě k celkově lepším návrhům veřejného osvětlení.

Kapitola 1.

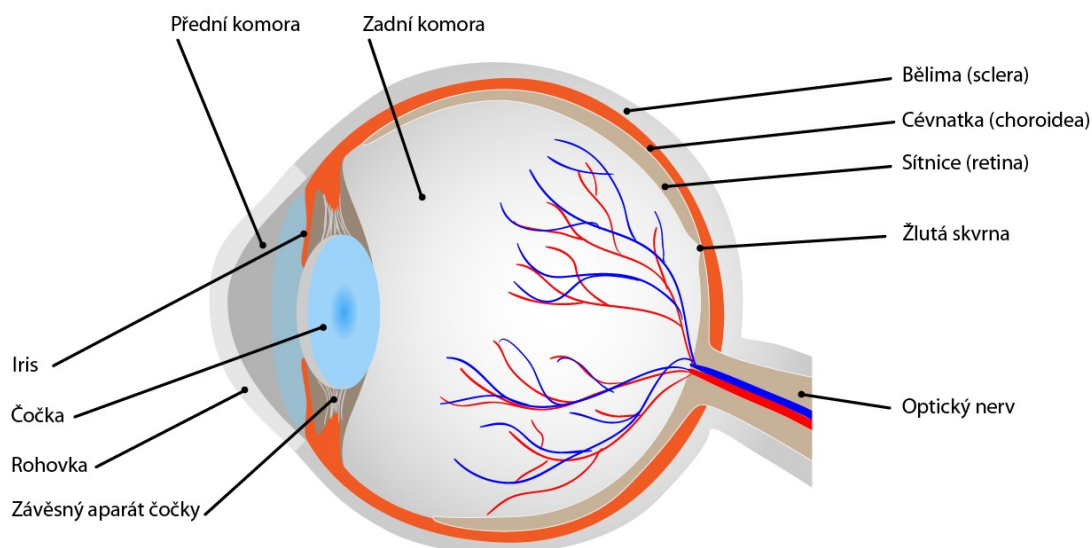
Zrak – fyziologie lidského oka

Zrak je jedním z pěti smyslů, kterým je člověk obdařen. A můžeme říci, že je pro něho ten nejdůležitější. Pomocí zraku vnímáme až 80 % všech informací a umožňuje nám orientaci v prostoru. Orgánem zraku není pouze oko, ale i další složité orgány, které se starají o proces vidění. Celý systém umožňuje člověku vnímat světlo, jež nese informaci, která je následně předána ke zpracování mozku. Ten vytvoří konečný obraz.

1.1. Popis zrakového systému

Systém zraku zahrnuje množství orgánů, které mají za úkol příjem, přenos a zpracování světelné informace. Dělíme ho na tři části. Lidské oko se řadí do první tzv. periferní části. Druhá část se nazývá spojovací. Jedná se o zrakové nervy, které spojují sítnici oka s nervovými centry v mozku, tedy s tzv. centrálními částmi zrakového systému. Zde je přijatá informace zpracována a upravena do výsledné podoby vidění. [2]

Lidské oko je párový orgán, který je uložen v očnici. Oční koule má přibližně kulový tvar o průměru 23 mm.



Obr. 1.1: Popis oka [2]

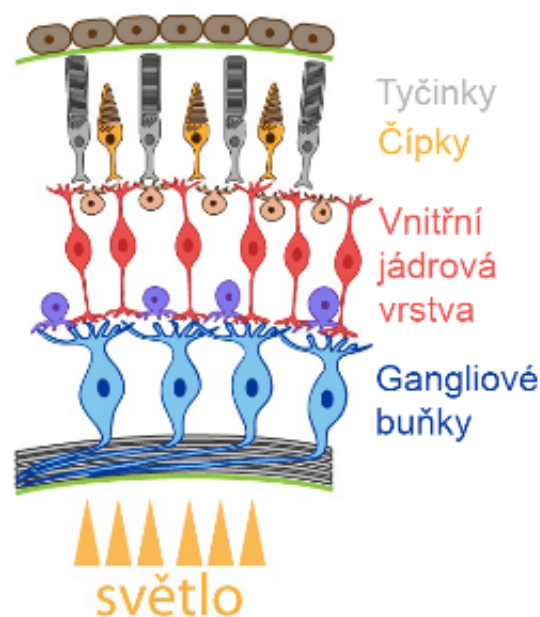
Světelný paprsek vstupuje do oka rohovkou. Ta je tvořena pěti vrstvami. Jejím hlavním úkolem je nechat prostoupit a lomit světlo. Rohovka se podílí na optické mohutnosti oka asi z 60%. Mnoho nervových zakončení, které rohovka obsahuje, spouští rohovkový reflex, který v případě ochrany před poškozením uzavírá víčko a přivádí větší množství slz.

Paprsek světla pak prostupuje přední komorou, která je vyplněna vnitřní tekutinou, skrz zornici duhovky, která odděluje přední a zadní segment oka. Smyslem čočky, která následuje, je doostření obrazu tak, že láme světlo, aby vhodně dopadalo na sítnici. Oproti rohovce je mohutnost čočky o více jak polovinu menší a na celkové refrakci oka se podílí ze čtvrtiny. Zadní část je vyplněná průhledným, rosolovitým sklivcem. Světlo, zmenšené a převrácené, pak dopadá na zadní část, kterou tvoří sítnice. [2]

1.2. Sítnice

Jedná se o velmi komplikovanou část oka, kterou můžeme rozdělit do deseti vrstev. Sítnice neslouží pouze k bezprostřednímu převádění světelného signálu na nervový impuls. Sítnice sama o sobě totiž výstupní signály z tyčinek a čípků ještě zpracuje a teprve potom je odešle do mozku. Proces, ke kterému dochází při zpracování světla v buňkách sítnice, je zatím spíše teorií a předmětem zkoumání. [2]

Sítnice je kromě světločivných buněk, tedy čípků a tyčinek, tvořena také buňkami bipolárními a gangliovými, které tvoří první a druhý neuron (tedy nervové buňky) a také buňkami podpůrnými a asociačními. Samotné fotoreceptory se nacházejí až za nimi, jak je vidět na obr. 1.2. Na sítnici se nachází ještě také třetí typ světločivných buněk, který byl u člověka objeven teprve v roce 2007. Jsou rozesety po celé sítnici, ačkoliv v dolní části jich nalezneme více. Nazýváme je cirkadiálním čidlem a jejich hlavním úkolem je řízení mnoha biologických pochodů v těle v závislosti na světle, tedy i na čase (spektrum světla se během dne mění). [3]

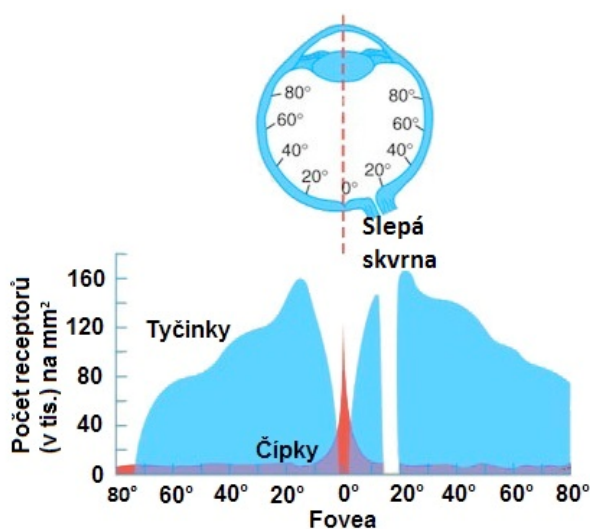


Obr. 1.2: Buněčná struktura sítnice [2]

Pohlédneme-li na sítnici z makroskopického hlediska, lze na ní rozlišit dva objekty. Prvním z nich je slepá skvrna. Tímto místem ze sítnice vystupuje zrakový nerv, a proto se zde nenalézají žádné fotoreceptory. Druhým je žlutá skvrna, ve které se nachází místo s největší koncentrací světločivných buněk, tzv. fovea centralis. Jedná se o oblast velikou přibližně 1,5 mm. Někdy se o ní také mluví jako o jamce nejostřejšího vidění. Prohlubeň v tomto místě vznikla rozestoupením nervových buněk a cév a světlu zde tedy stojí v cestě méně překážek. V samotném centru foveoly je ještě oblast o průměru pouhých 0,3 mm, kde se nachází pouze čípky. [4]

1.3. Čípky

Čípky, spolu s tyčinkami, patří k primárním smyslovým buňkám. Na sítnici jich nalezneme přibližně 6 až 7 milionů. Nejvíce je jich nahromaděno v oblasti fovey, kde dosahují hustoty až 150 000 na milimetr čtvereční. Mimo žlutou skvrnu je pak hustota čípků pouhých 6 000 na čtvereční milimetr. Čípky zprostředkovávají barevné fotopické vidění, tedy vidění za dne. Jsou aktivní zhruba od jasu $0,01 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, ovšem o vidění zprostředkované výhradně čípky mluvíme až od $10 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$.



Obr. 1.3: Rozložení fotoreceptorů v oku

Barevné vidění zajišťují díky fotoaktivnímu pigmentu, který obsahují. Čípky se podle spektrální citlivosti dělí do tří skupin: červené (maximum absorpce 565 nm, tedy spíše žluto-oranžová), modré (420 nm, tedy spíše fialová) a zelené (535 nm). Lidské vidění je tedy trichromatické a mozek barvu pozná podle signálů z těchto tří druhů čípků. Čípky ovšem nejsou citlivé pouze na „svoji“ barvu, ale zasahují i do širšího spektra, kde ovšem nejsou tolik citlivé. Proto se spíše označují S, M, L – short, medium a long, podle toho, v jaké části spektra vlnových délek jsou nejcitlivější.

Nejvíce je červených čípků a to 64 % z celkového počtu. Zelených je zhruba polovina, tedy 32 %, a modré jsou zastoupeny pouhými 4 %. Lidské oko je proto méně citlivé na modré světlo. Z jakého důvodu tomu tak je, není jisté. Existují pouze teorie. Modré čípky se navíc nenacházejí v oblasti fovey, ale pouze za ní a hlavně do úhlu 10° . Jejich signál je ovšem zatím nepopsaným způsobem zesílen, a tím je zmírněna jejich početní nevýhoda oproti ostatním čípkům. [3]

1.4. Tyčinky

Tyčinky zprostředkovávají skotopické vidění – vidění za slabé intenzity světla, tedy hlavně v oblasti pod $10 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Obsahují jiný fotoaktivní pigment než čípky a to rhodopsin. Ten je citlivý hlavně v oblasti zeleno – modrého světla, nejcitlivější je kolem vlnové délky 500 nm. V oblasti nad 650 nm již není aktivní vůbec.

Tyčinky jsou téměř tisíci násobně citlivější než čípky, ovšem neposkytují barevné vidění, pouze monochromatické. Na sítnici jich lze nalézt zhruba 120 milionů, což asi je 20 krát více než čípků. V oblasti foveoly se nenacházejí vůbec, objevují se až za ní. Největší

hustoty ($160\,000\text{ mm}^{-2}$) dosahují v oblasti 4,5 mm od středu jamky, což odpovídá zhruba 18° .

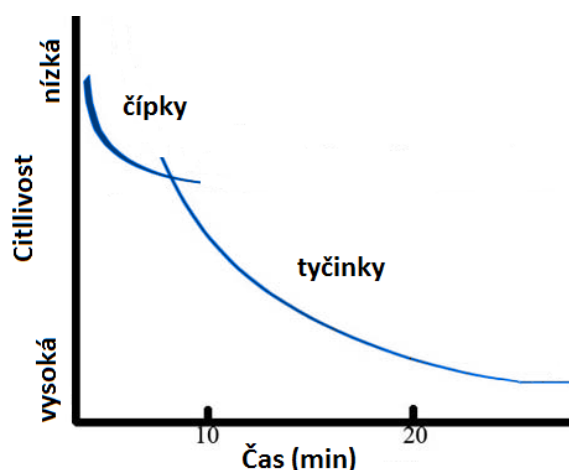
Vzhledem k velmi malým jasům, na které jsou tyčinky uzpůsobené, se tyčinky musí slučovat do skupin, aby došlo k reakci a k vyslání signálů do připojené gangliové buňky. Každá skupina tyčinek se spojuje s jednou bipolární buňkou. Čípky naopak mají každý svou vlastní bipolární i gangliovou buňku. Z toho důvodu při tyčinkovém vidění reaguje oko pomaleji. Čeká se, než se sběhne dostatek signálů z tyčinek. [3]

1.5. Adaptace

Adaptace je schopnost oka přizpůsobit se daným světelným podmínkám. Oko dokáže pracovat ve velkém rozpětí jasů, musí se ovšem daným podmínkám přizpůsobit. Adaptaci můžeme rozdělit na adaptaci na světlo a na tmu.

Adaptace na světlo je velmi rychlá a dosahuje hodnot až 0,15 s. Do 6 s se oko zadaptuje na nové podmínky úplně.

Adaptace na malé jasy je ovšem pomalejší. Trvá 25 až 40 minut a skládá se ze dvou fází. První fáze je čípková adaptace. V této fázi, která trvá zhruba 8 minut, roste citlivost čípků. Nejrychlejší nárůst citlivosti je v první polovině. Roste samozřejmě i citlivost tyčinek, tato křivka ovšem v grafu není, jelikož citlivost tyčinek v tomto čase je nižší než čípků. To se ovšem mění v bodě zvaném Purkyňův zlom, kdy se tyčinky stávají citlivějšími. V grafu je to znázorněno přechodem na novou křivku, kdy se adaptace dostává do své druhé fáze. Ta trvá 25 až 40 minut. [5]



Obr. 1.4: Průběh citlivosti oka při adaptaci na tmu

Základním procesem adaptace je změna průměru zornice. Tím se na sítnici propouští jen tolik světla, kolik je zapotřebí. Je to rychlý děj, zhruba 380 ms, při kterém se plocha zornice změní až v poměru 1:20. Není ovšem příliš účinný. Je proto zapotřebí i jiných, účinnějších procesů adaptace.

Tím je fotochemický děj. Jedná se o fotochemickou reakci uvnitř fotoreceptorů. Při adaptaci na vyšší jasy jsou některé fotony dopadající na sítnici pohlcovány pigmentem světločivných receptorů. To zapříčiní rozklad tohoto pigmentu a dojde tak k vybělení tyčinek, které se dále neúčastní procesu vidění. Ve světle se pigment rozkládá rychleji, než

se obnovuje, dokud nenastane rovnováha. Tím je snížen počet fotoreceptorů a oko je přizpůsobeno novým vyšším jasům. [5]

Při adaptaci na nízké jasy je potřeba citlivost oka obnovit. K tomu dochází regenerací pigmentu. Ovšem jedná se o pomalý proces, proto adaptace na tmu trvá mnohem déle.

Dalším účinným procesem adaptace je spojování tyčinek do skupin podle úrovně jasu. Tento proces byl popsán výše. Čím nižší je jas, tím větší se tvoří skupinky fotoreceptorů. Zvýšení citlivosti tímto procesem ovšem přináší i zhoršení prostorovému rozlišení. [3]

1.6. Citlivost lidského oka

Lidské oko reaguje na elektromagnetické vlnění v rozmezí vlnových délek 380 – 760 nm. Nelze ovšem tvrdit, že každé oko vidí naprosto stejně. Jedná se o velmi individuální parametr. Bylo proto nutné definovat jakýsi model průměrného oka, se kterým se bude pracovat a podle kterého se budou kalibrovat měřicí přístroje.

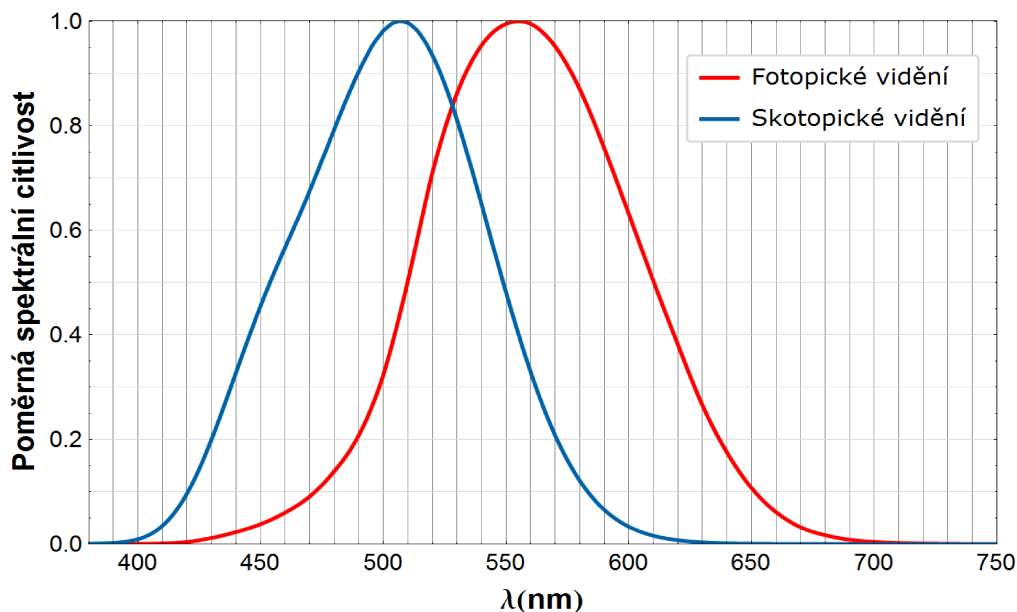
Jak už bylo řečeno, lidské oko vidí za různých světelných podmínek rozdílně podle toho, jak se zapojují čípky a tyčinky do procesu vidění. Byl proto vytvořen model oka v podmínkách denního osvětlení (fotopický model) a model za nočních podmínek (skotopický model). Vidění v šeru, tedy v podmínkách, které neodpovídají ani denním ani nočním, pak nazýváme mezopické. Pro tuto oblast bohužel nelze definovat pouze jedinou křivku citlivosti oka, jelikož pro každou úroveň jasu v této oblasti reaguje oko jinak. [6]

1.7. Fotopické vidění

O fotopickém, tedy denním vidění mluvíme, pokud lidský zrak pracuje v podmínkách denního světla. Pokud bychom to chtěli definovat čísly, jedná se o úroveň jasu vyššího než $5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Je to poměrně velký rozsah, který je dobře vidět v tab. 1.1

Fotopické vidění je zprostředkováno čípkami, které proto udávají citlivost oka v těchto světelných podmínkách. Citlivost oka při denním světle je popsána $V(\lambda)$ křivkou a její maximum leží v bodě 555 nm. Jedná se o zeleno-žlutou oblast. Celkově je průběh poměrné spektrální citlivosti při fotopickém vidění spíše posunut do červené oblasti než do modré, jak je vidět na obr. 1.5. Křivka byla na základě měření definována již v roce 1924. Citlivost oka je ve fotopické oblasti stejná pro všechny jasy. Oko je tedy v ustáleném stavu.

Pokud bychom křivku v poměrných jednotkách vynásobili $683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$, dostali bychom průběh absolutních hodnot účinku zářivého toku na lidský zrak. [6]



Obr. 1.5: Křivky fotopického a skotopického vidění

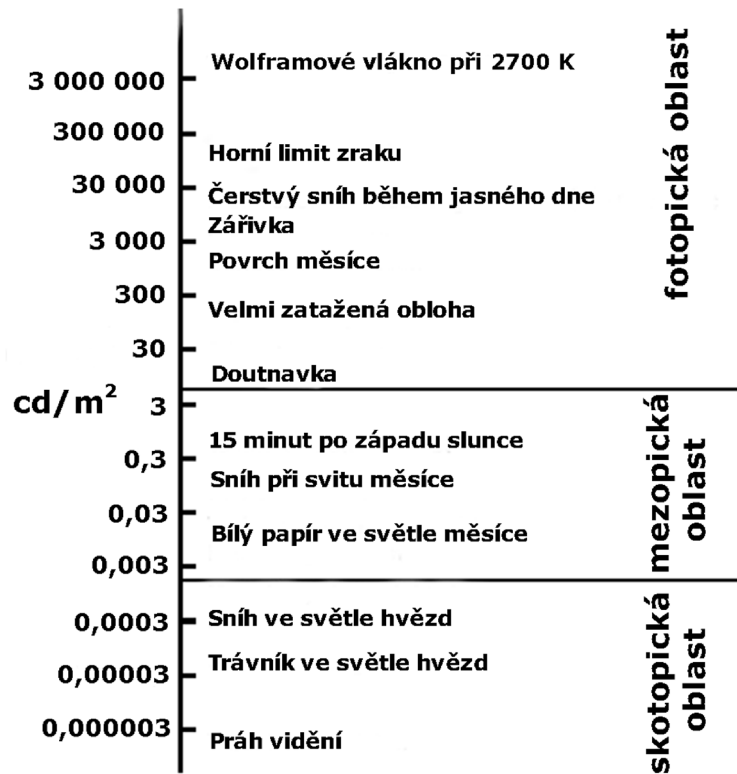
1.8. Skotopické vidění

Při velmi nízkých jasech, přesněji řečeno při jasech menších jak $0,005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, mluvíme o skotopickém vidění. Z tab. 1.1 je zřejmé, že se jedná pouze o bezměsíčnou tmou, pouze při světle hvězd, tedy téměř o naprostou tmou. V této oblasti pracují pouze tyčinky, a proto se křivka citlivosti pro normálního fotometrického pozorovatele posouvá více do modrého spektra. Nejvyšší citlivosti dosahují tyčinky při vlnové délce 507 nm, což odpovídá zelenomodré oblasti.

Skotopická křivka, která se značí $V'(\lambda)$, je vykreslena na obr. 1.5 a zasahuje převážně do modré oblasti spektra. Do červených vlnových délek téměř nezasahuje, což znamená, že červenou v noci vidíme velmi špatně na rozdíl od modré. Pro získání spektrálního světelného toku musíme poměrnou křivku vynásobit $1700 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$. Lidské oko je tedy při skotopických podmínkách výrazně citlivější, tedy dokáže mnohem lépe zhodnotit zářivý tok, který je v noci minimální. To můžeme vidět na obr. 1.6.

Oko je stejně citlivé při všech jasech ve skotopické oblasti. A jelikož zde pracují pouze tyčinky, nedokážeme ve tmě rozlišovat barvy. Navíc rozlišujeme změny až 10x pomaleji, než když jsme přivyklí světlu.

Mezopická oblast se nachází mezi fotopickou a skotopickou oblastí a budu se jí podrobněji zabývat v následující oblasti. [7]



Tab. 1.1: Přibližné přiřazení konkrétních hodnot jasů ke skutečným situacím [6]

Tyto fotopické, skotopické spektrální citlivosti stanovené pro normálního fotometrického pozorovatele, a také mezopické popsané dále, vyjadřují, jak se spektrálně zhodnotí zářivý tok Φ_e dopadající na sítnici. Výsledkem je pak světelný tok Φ , jehož jednotkou jsou lumény (lm). Světelný tok zdroje vyjadřuje, kolik světelné energie vyzáří do okolí. Matematicky zapsáno pro fotopický světelný tok Φ :

$$\Phi = K_m \int_0^{\infty} \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

- K_m je maximální světelná účinnost, 1 700 lm/W
- λ je vlnová délka
- $V(\lambda)$ je poměrná fotopická spektrální citlivost
- Φ je zářivý tok

Pro praktické využití se používá spíše numerický způsob řešení a to:

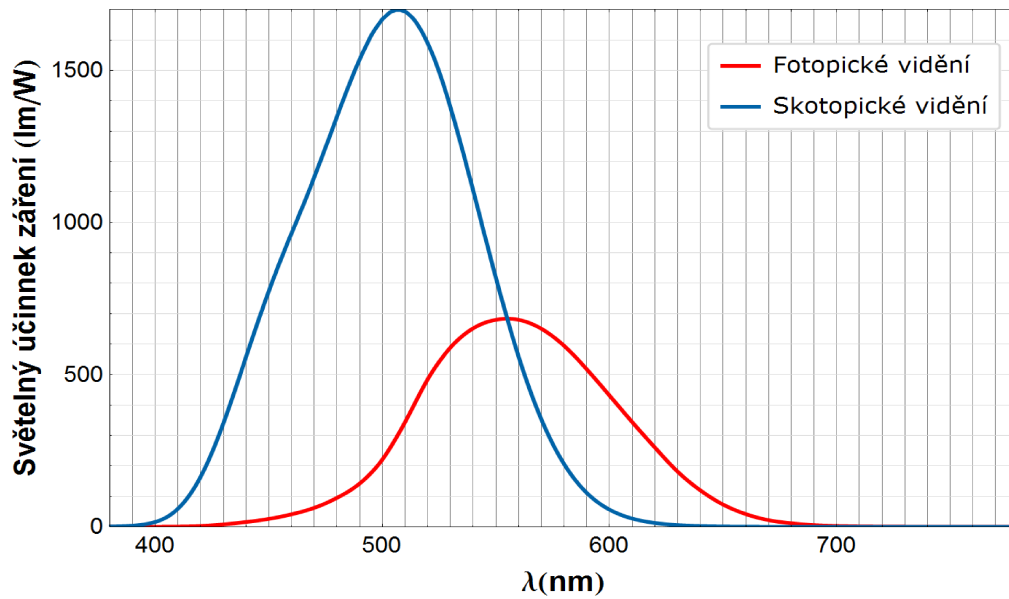
$$\Phi = K_m \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta\Phi_e(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) \cdot V(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i \quad (2)$$

Abychom lépe porozuměli maximální světelné účinnosti K_m , zavedeme veličinu světelná účinnost $K(\lambda)$ popř. $K'(\lambda)$, která vyjadřuje citlivost oka v absolutních jednotkách,

tedy v lumenech na Watt (lm/W). Vztah mezi absolutním účinkem záření $K(\lambda)$ a poměrným $V(\lambda)$ je pak následující:

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad (3)$$

Stejný vztah platí i pro skotopické veličiny a samozřejmě i pro mezopické, které budu zmiňovat dále.



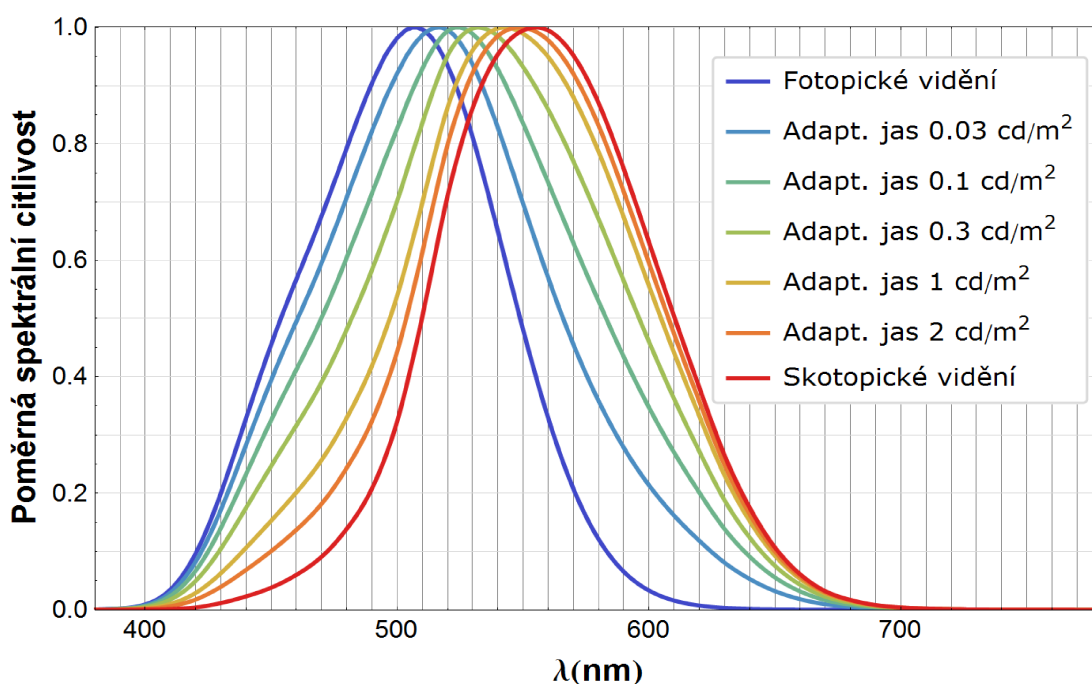
Obr. 1.6: Průběh absolutních spektrálních účinků záření pro fotopické $K(V)$ a skotopické $K'(V)$ podmínky

Kapitola 2.

Mezopické vidění

Za mezopickou oblast se považuje rozmezí mezi skotopickou a fotopickou oblastí. Tedy jasy mezi $0,005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ a $5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Podle tab. 1.1 se nejedná o velkou oblast oproti oblasti fotopické, přesto je významnou částí, kterou se musíme zabývat i pro svou komplikovanost.

Na procesu vidění se zde podílí jak tyčinky, tak čípky, a to v různé míře, podle aktuálního jasu. Nelze proto pro tuto oblast vytvořit pouze jednu křivku citlivosti. Jak ubývá světla, posouvá se citlivost oka směrem ke kratším vlnovým délkám, tedy směrem k modrému spektru. Červené objekty se nám jeví stále tmavší a méně barevné, avšak modré spíše jasnější. Tento úkaz se nazývá Purkyňův jev. [3]



Obr. 2.1: Průběhy poměrné spektrální citlivost pro vybrané adaptační jasy při použití metodiky MES2

Do mezopické oblasti se zrak dostává např. v osvětlených ulicích při nočních hodinách nebo při nouzovém osvětlení vnitřních prostor.

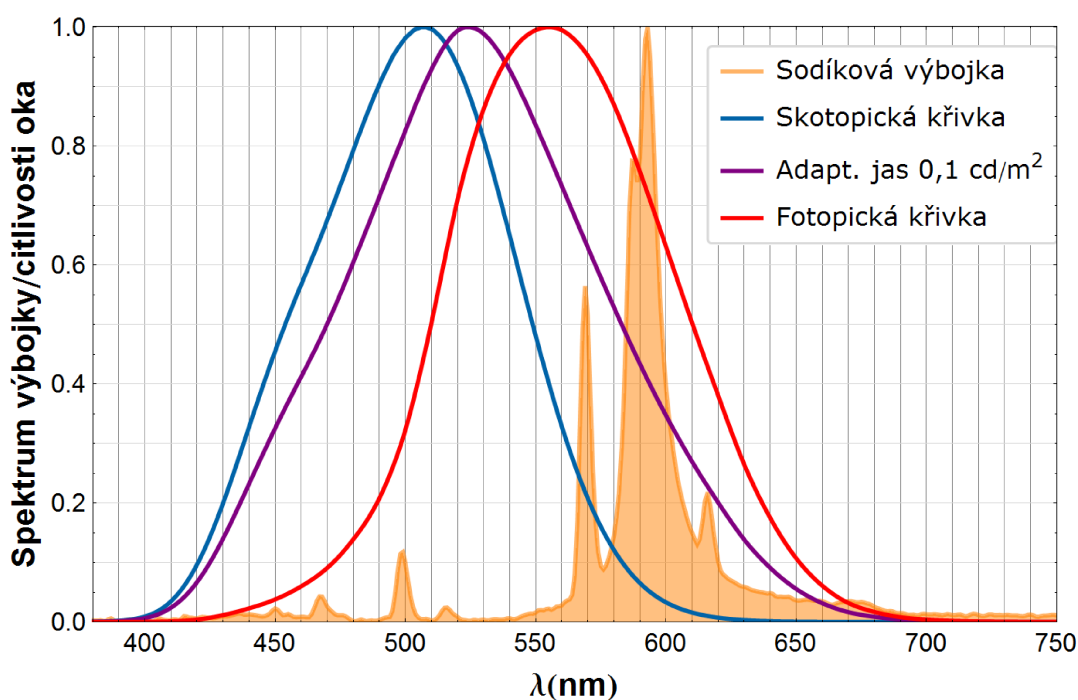
Dlouhou dobu se mezopická oblast příliš nebrala na vědomí a fotometrické přístroje se kalibrovaly pouze pro oblast při denním světle. Teprve nedávno se tato otázka začala řešit a vymýšlet, jak mezopické vidění integrovat do současných postupů měření.

2.1. Proč se zabýváme mezopickým viděním

Nachází-li se člověk v prostředí, kde se oko adaptuje na mezopické jasy, je s tím potřeba při návrhu veřejného osvětlení počítat. V současném systému navrhujeme

osvětlení podle fotopické křivky, jak už ale bylo uvedeno výše, citlivost oka je v těchto mezích velmi proměnlivá.

Při použití světelných zdrojů o nevhodném spektru člověk vnímá méně světla, než se podle výpočtu předpokládalo. Tento příklad je zobrazen na obr. 2.2. Jedná se o příklad vysokotlaké sodíkové výbojky. Vysokotlaké sodíkové výbojky vyzařují světlo především sodíkovými parami s provozním tlakem 3 až 60 kPa. Tím je také dáno vyzařované spektrum, jehož maximum se nachází ve žluté části spektra, proto se sodíkové výbojky poznají podle žlutooranžové barvy světla. Právě díky svému spektru mají vysokotlaké výbojky poměrně špatné podání barev, kdy barvy osvětlených předmětů, kromě oranžové, dostávají nádech šedé různé sytosti. Přesto se vysokotlaké sodíkové výbojky používají, zejména pro osvětlování dálnic, a to především díky přijatelné ceně, vysoké životnosti a velmi dobré světelné účinnosti, která se pohybuje kolem hodnoty 120 lm/W. U špičkových výrobců dosahují v dnešní době dokonce hodnoty až 200 lm/W. [8]



Obr. 2.2: Poměrné spektrální rozložení sodíkové vysokotlaké výbojky a poměrná spektrální citlivosti oka při fotopických a skotopických podmínkách a při adaptačním jasu 0,3 cd/m²

Zde ovšem nastává problém, protože světelná účinnost je vztažena k citlivosti oka při fotopických podmínkách. Z obr. 2.2 je ovšem vidět, že posouváme-li se do mezopické oblasti a dále až ke skotopické oblasti, je lidské oko stále méně citlivé na vlnové délky, kde vysokotlaká sodíková výbojka především vyzařuje. Z toho je jasně patrné, že sodíková vysokotlaká výbojka by se měla používat při adaptačních jasech blízkých se fotopickým podmínkám.

Zhodnotíme-li toto spektrum i pomocí mezopických křivek vypočtených podle doporučené metodiky MES2, kterou se budu zabývat dále, dostaneme následující hodnoty:

	Denní	Mezopické podmínky								Noční
Jas (cd/m²)		3	2	1	0,5	0,3	0,1	0,05	0,01	
Poměrná hodnota světelného toku (%)	100	98	97	94	91	89	82	77	59	47

Tab. 2.1: Světelný tok vysokotlaké sodíkové výbojky vyjádřeného v poměrných jednotkách vůči fotopickému stavu při různých mezopických jasech

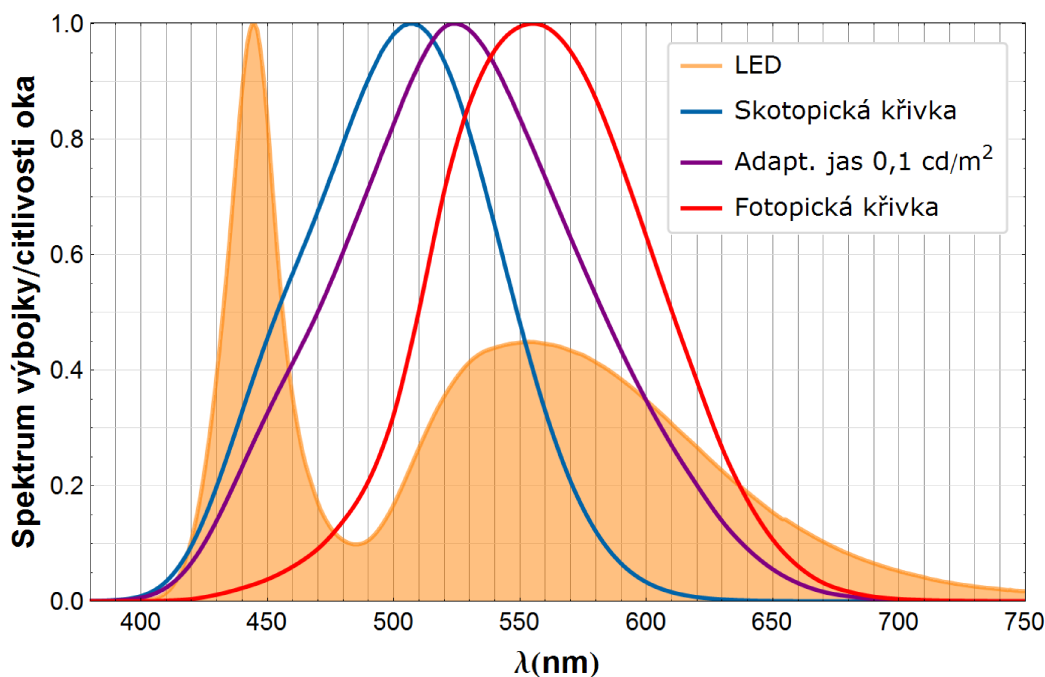
Z tabulky lze vyčíst, že výsledná hodnota světelného toku u této výbojky při velmi nízkých jasech klesá až k 50 %, tedy při podmínkách blízkých skotopickým se ztratí až polovina světelného výkonu. Takto nízké jasy ovšem v reálných osvětlených ulicích nenalezneme. Spíše by nás měli zajímat jasy kolem 0,5 cd/m², kde dochází k zhruba 10 – 20 % úbytku. V grafu to vypadá na ještě větší pokles, ale musíme brát na zřetel, že citlivosti oka jsou vyjádřeny v poměrných jednotkách. Oko je v noci výrazně citlivější, ve svém maximu nabývá hodnoty 1 700 lm/W, oproti citlivosti za dne, kdy v maximu dosahuje hodnoty 683 lm/W. Hodnoty mezopických křivek se pohybují mezi těmito čísly.

Při nízkých jasech tedy poměrně klesá i světelná účinnost. Mělo by se proto při návrhu veřejného osvětlení s touto problematikou počítat a zvolit zdroj s vhodnějším spektrem, abychom nemuseli instalovat toto svítidlo s větším příkonem pro dorovnání zde popsané ztráty světelného toku. Lze tedy tvrdit, že čím je vyzařované spektrum posunuté k vyšším vlnovým délkám, tím více klesá světelný tok pro mezopické jasy.

Při zvolení zdroje s vyzařovaným spektrem spíše v nižších vlnových délkách, tedy v modrozelené části spektra, dostáváme opačný jev. Při mezopických jasech se světelný výkon zdroje zvyšuje. A opět to mohou být rozdíly až desítky procent. Vhodné spektrum, které lze použít mají například LED. Na obr. 2.3 je vidět, že bílá LED zasahuje jak do vyšších vlnových délek, tak do nižších. I když spektrum z pohledu mezopické křivky není dokonalé, oproti výbojce jsou nižší vlnové délky výrazně více zastoupeny.

Zde při navrhování osvětlení podle fotopické křivky dochází k předimenzování. Proto, pokud budeme pracovat s mezopickými křivkami, můžeme snížit příkon navrhovaného příkonu až o několik desítek procent a výrazně tak ušetřit při pořizování zdrojů a při jejich provozu.

Pokud tedy spektrum vysokotlaké sodíkové výbojky zhodnotíme podle fotopické křivky, dostaneme vyšší světelný tok, než když spektrum zhodnotíme podle vybrané mezopické křivky. Pokud to zobecníme, velmi záleží, v jaké části spektra světelný zdroj vyzařuje. Byl proto zaveden poměr S/P.



Obr. 2.3: Poměrné spektrální rozložení bílé LED a poměrná spektrální citlivosti oka při fotopických a skotopických podmínkách a při adaptačním jasu 0,3 cd/m²

2.2. Poměr S/P

Poměr S/P je podílem zářivého toku zhodnoceného přes skotopickou křivku a fotopickou křivku. V podstatě vyjadřuje, v jaké části spektra zdroj vyzařuje. Vyšší hodnota poměru S/P znamená větší zastoupení zářivého toku na nižších vlnových délkách a naopak. Některé články tento poměr označují písmeny R_{SP} . Vzorec pro výpočet poměru S/P je následující:

$$S/P \text{ ratio} = \frac{1700 \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda}{683 \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

- λ je vlnová délka
- $S_{\lambda}(\lambda)$ je spektrální distribuční křivka světelného zdroje
- $V(\lambda)$ je poměrná fotopická spektrální citlivost
- $V'(\lambda)$ je poměrná skotopická spektrální citlivost

Pro osvětlování komunikací s nižším jasem se tedy hodí spíše zdroje s vyšším poměrem S/P, tedy zdroje s vyzařovaným spektrem blíže skotopické křivce. To splňují například LED, které se pro veřejné osvětlování začínají dnes využívat.

Známe-li pro určitý zdroj poměr S/P, jsme schopni z hodnoty světelného toku pro fotopickou oblast spočítat světelný tok pro skotopickou oblast. Zároveň dokážeme určit hodnoty i pro oblast mezopickou.

Hodnota S/P je tedy dobrým ukazatelem, jaké zdroje pro jakou situaci použít. Výrobci ovšem tuto hodnotu ve svých katalogích zatím neuvádějí. Je tedy nutné si tuto hodnotu napočíst z naměřených hodnot.

Nastává tak otázka: Když je lepší zdroj s vyšším poměrem S/P, proč nepoužít zdroj, který vyzařuje hlavně v zelené části spektra? Odpověď je vcelku jednoduchá. Je pravda, že bychom dostali zdroj, který vyzařuje na vlnových délkách, kde je lidské oko při šeru nejcitlivější a tudíž ušetřili za příkon zdroje. Ovšem při použití téměř monochromatického světla by index podání barev byl na velmi nízké úrovni. Zároveň bychom dostali velmi nízký kontrast, problém by nastal i s rozlišováním lidských tváří a lidé by celkově v tomto světle vypadali mdle. Nejen proto je tedy vhodné, aby zdroj vyzařoval v širším spektru.

Kapitola 3.

Určení spektrální citlivosti oka pro mezopickou oblast

Jelikož je citlivost oka v mezopické oblasti proměnná, je nutné vytvořit model, který dokáže chování zraku popsat v celé míře mezopické oblasti. Nelze změřit pouze jednu křivku, jak se dělo při získávání fotopické a skotopické křivky, ale je nutné popsat citlivost zraku funkcí.

Během vývoje vzniklo několik modelů, které se chování zraku v této oblasti snažily popsat. Vycházely z množství měření, která byla zpracována do závislostí na mezopickém jasu.

Tyto modely jsou popsány i v oficiálním dokumentu mezinárodní organizace pro osvětlování CIE 191-2010. Dnes je organizací CIE doporučován mezopický model MES2.

3.1. USP model

USP model, někdy zvaný X-model, byl vytvořený na základě měření z let 1997 a 1998, kdy He a spol. měřili rychlost reakce, tedy čas za jakou dobu pozorovatel zareagoval na určitý podnět. V experimentu byly použity dva různé zdroje, sodíková vysokotlaká výbojka a halogenidová výbojka. Měření se zúčastnili pouze 3 pozorovatelé. Na základě svého výzkumu pak He a spol. vytvořili model, který pracuje v oblasti jasů pouze od 0,001 cd/m² do 0,6 cd/m². Jak už jsem zmiňoval výše, dnes se bere mezopická oblast od 0,005 až do 5 cd/m², je proto dnes tento model považován za nevyhovující. [9] Výpočet požadovaného V_{mes} je poměrně jednoduchý:

$$V_{mes}(\lambda) = X V(\lambda) + (1 - X)V'(\lambda) \quad (5)$$

- $V(\lambda)$ je poměrná fotopická spektrální citlivost zraku normálního fotometrického pozorovatele
- $V'(\lambda)$ je poměrná skotopická spektrální citlivost zraku normálního fotometrického pozorovatele
- X je koeficient charakterizující poměr fotopické a skotopické křivky:

$$X = \frac{1}{0,599} L_{mes} - \frac{0,001}{0,599} \quad (6)$$

- pro $0 \leq X \leq 1$
- L_{mes} je mezopický jas vypočtený následovně:

$$L_{mes} = 0,834L_p - 0,335L_s - 0,2 + \sqrt{0,696L_p^2 - 0,333L_p - 0,56L_p L_s + 0,113L_s^2 + 0,537L_s + 0,04} \quad (7)$$

- L_p je fotopický jas
- L_s je skotopický jas

Jedná se o poměrně jednoduchý matematický model, z toho důvodu je také kritizován. Výsledky se oproti hodnotám doporučeného systému pro některá S/P velmi liší.

3.2. MOVE model

Na modelu MOVE, neboli Mesopic Optimisation of Visual Efficiency, se podílely organizace a univerzity Finska, Velké Británie, Nizozemska, Německa a Maďarska. Díky tomu probíhalo měření na více pozorovatelích, čímž se minimalizovala chyba měření.

Model měl respektovat skutečné situace při řízení auta. Proto se hodnotily následující otázky:

- *Je to vidět?* Touto otázkou hledáme minimální kontrast, při kterém dokážeme rozeznat objekt na pozadí.
- *Jak rychle?* Ptáme se, jak rychle dokážeme daný objekt detekovat. Jak dlouho nám to trvá.
- *Co je to?* Tato otázka míří na schopnost rozeznání detailů překážky.

Model mezopického vidění, který byl pomocí těchto měření vytvořen, je v tomto případě definován v rozmezí fotopických jasů od 0,01 cd/m² do 10cd/m². [9]

Jeho výpočet citlivostní křivky V_{mes} je následující:

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

- $V(\lambda)$ je poměrná fotopická spektrální citlivost zraku pro normálního fotometrického pozorovatele
- $V'(\lambda)$ je poměrná skotopická spektrální citlivost zraku pro normálního fotometrického pozorovatele
- x je koeficient závislý na úrovni jasu a spektru
- $M(x)$ je normalizační funkce, která převede max. hodnotu na 1.

Koeficient x se získává následujícím iteračním výpočtem:

$$x_{n+1} = 1,49 + 0,282 \log_{10} \left[\frac{1}{M(x_n)} \left(x_n \frac{L_p}{1699} + (1 - x_n) \frac{L_s}{683} \right) \right] \quad (9)$$

- pro $0 \leq x \leq 1$

Normalizační funkci $M(x)$ můžeme popsat:

$$M(x) = \max[x V(\lambda) + (1 - x)V'(\lambda)] \approx 1 - 0,65x + 0,65x^2 \quad (10)$$

Mezopický jas L_{mes} má pak hodnotu:

$$L_{mes} = \frac{x L_p + (1 - x) L_s (683/1699)}{x + (1 - x) (683/1699)} \quad (11)$$

- L_p je fotopický jas
- L_s je skotopický jas

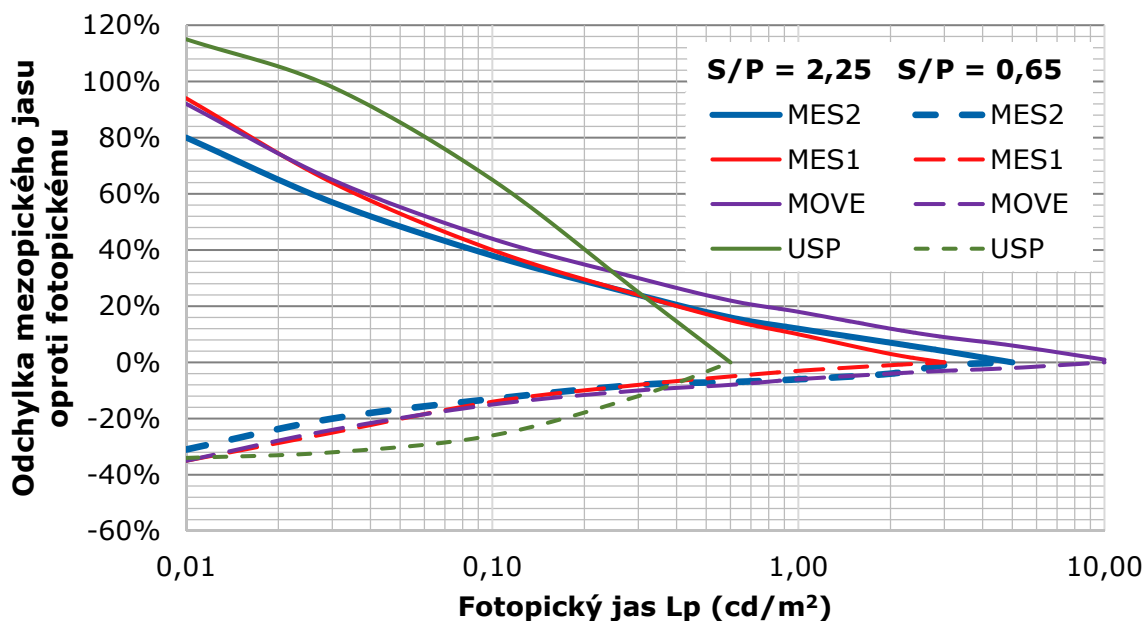
Výsledná křivka citlivosti v mezopické oblasti je pak mnohem bližší k hodnotám doporučeného systému MES2 než USP.

3.3. MES1 a MES2 model

Oba předchozí modely ukázaly, že rozdíly skutečně vnímaného jasu, vypočteného podle výše uvedených modelů, jsou oproti fotopickému velmi výrazné. Přesto oba modely nedávaly úplně stejné hodnoty, často se výrazně lišily. Zároveň se u modelu USP kritizuje malá mezopická oblast, se kterou počítá, tedy do pouhých 0,6 cd/m². Naopak u modelu MOVE se horní hranice mezopického vidění, 10 cd/m², považuje za příliš vysokou.

Byly proto vytvořeny nové modely, které odstraňovaly nedostatky předchozích systémů. Snaha byla vytvořit model, který bude obecně použitelný pro všechny možné situace, bude snadno aplikovatelný do současných postupů měření a zároveň bude počítat s rozumným rozsahem mezopické oblasti.

Vznikly tak systémy MES1 a MES2. Liší se pouze rozmezím mezopické oblasti a koeficienty při výpočtu. Zatímco model MES1 počítá s rozsahem od 0,01 cd/m² do 3 cd/m², model MES2 má rozšířenou oblast, a to od 0,005 cd/m² do 5 cd/m². Komisí CIE byl k používání doporučen systém MES2, se kterým v této práci počítám. [9]



Obr. 3.1: Porovnání mezopických modelů. Plná čára značí výpočet pro zdroj s poměrem S/P = 2,25 (např. studená bílá LED), přerušovaná zdroj s poměrem S/P = 0,65 (vysokotlaká sodíková výbojka).

Na obr. 3.1 jsou všechny výše uvedené modely srovnány v grafu. Hodnoty byly napočítány pro zdroje s $S/P = 2,25$ (studená bílá LED) a $S/P = 0,65$ (vysokotlaká sodíková výbojka). Za přesné hodnoty se považuje systém MES2. Jak je vidět, nejvíce se odlišuje model UPS, hlavně pro zdroj s vysokým S/P . Průběhy pro $S/P = 0,65$ byly velmi podobné, tedy až opět na USP. [9]

3.4. Výpočet modelu MES2

Doporučený systém výpočtu spektrální citlivosti oka $V_{mes}(\lambda)$ je popsán mezinárodní komisí pro osvětlování v dokumentu CIE 191-2010. Jedná se o lineární kombinaci fotopické a skotopické funkce spektrální citlivosti.

Stejně jako u předchozích modelů jde o kombinaci skotopické a fotopické křivky násobené pomocí koeficientu, v tomto případě pomocí koeficientu m . Výpočet citlivosti oka $V_{mes}(\lambda)$ pro dané m :

$$V_{mes}(\lambda) = \frac{m V(\lambda) + (1 - m)V'(\lambda)}{M(m)} \quad (12)$$

- m je koeficient, který závisí na adaptačních podmínkách.
 $m = 1$ pro $L_{mes} \geq 5 \text{ cd m}^{-2}$
 $m = 0$ 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 citlivost zraku pro daný adaptační jas
- $V(\lambda)$ je poměrná fotopická spektrální citlivost zraku pro normálního fotometrického pozorovatele
- $V'(\lambda)$ je poměrná skotopická spektrální citlivost zraku pro normálního fotometrického pozorovatele

Průběhy $V_{mes}(\lambda)$ vypočtené podle tohoto vzorce jsou vykresleny na obr. 2.1 v úvodu 2. kapitoly.

Pro výpočet spektrální citlivost v mezopické oblasti je tedy nutné znát fotopickou i skotopickou křivku citlivosti 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 výsledný průběh počítáme. Ve vzorci je dobře patrné, že blíží-li se hodnota m k 1, převažuje vliv $V(\lambda)$ křivky. Naopak, blíží-li se k nule, převládá skotopická $V'(\lambda)$ křivka. Výpočet koeficientu m a L_{mes} ovšem není tak jednoduchý a řeší se iterací dvou vzorců:

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

$$m_n = a + b \log_{10}(L_{mes,n}) \quad (14)$$

S počáteční podmínkou: $m_0 = 0,5$.

- a, b jsou parametry, $a = 0,767$, $b = 0,3334$
- L_p je změřený fotopický jas
- L_s je skotopický jas

Tím jsme dostali výslednou hodnotu mezopického jasu pro dané podmínky.

Hodnota m se samozřejmě musí pohybovat v mezích $0 \leq m \leq 1$. Pokud bychom chtěli počítat s modelem MES1, změni se parametry na $a = 0,807$ a $b = 0,404$ a výpočet bude probíhat v mezích $0,01 \text{ cd/m}^2$ až 3 cd/m^2 .

Ale zpět k MES2. Iterační výpočet není pro běžné jasy dlouhý, a pokud chceme dosáhnout chyby menší jak $0,1 \%$, stačí nám většinou 4 - 5 kroků. Prodloužení výpočtu ovšem nastává při nízkých jasech ($L_p < 0,025$) a nízkém poměru S/P ($< 0,3$), kdy výpočet může trvat i kolem 50 kroků. To ovšem s výpočetní technikou není problém. Ten nastává při některých nízkých jasech a hodnotách S/P , kdy pomocí iterace nedostaneme žádné řešení. A to proto, že hodnota $L_{mes,n}$ klesne pod nulu a tudíž nelze provést následný výpočet m kvůli záporné hodnotě v logaritmu.

Abychom mohli použít tento iterační výpočet, potřebujeme znát i skotopický jas L_s . Ten lze buď změřit, pokud bychom měli přístroj kalibrovaný na skotopickou křivku nebo lze vypočítat pomocí poměru S/P :

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

Pokud bychom znali požadovanou $V_{mes}(\lambda)$ křivku a spektrální zář zdroje, lze mezopický jas vypočítat i podle následujícího vzorce:

$$L_{mes} = \frac{683}{V_{mes}(\lambda_0)} \int V_{mes}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \quad (16)$$

- $V_{mes}(\lambda_0)$ je hodnota poměrné spektrální citlivosti zraku v mezopické oblasti pro daný adaptační jas při vlnové délce $\lambda_0 = 555 \text{ nm}$
- $V_{mes}(\lambda)$ je poměrná spektrální citlivost zraku pro daný adaptační jas
- $L_e(\lambda)$ je spektrální zář ($\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$)

Pokud bychom chtěli dostat průběhy absolutních hodnot $K''(\lambda)$, pak musíme vycházet ze vzorce (3), tedy:

$$K''(\lambda) = K_m'' \cdot V''(\lambda) \quad (17)$$

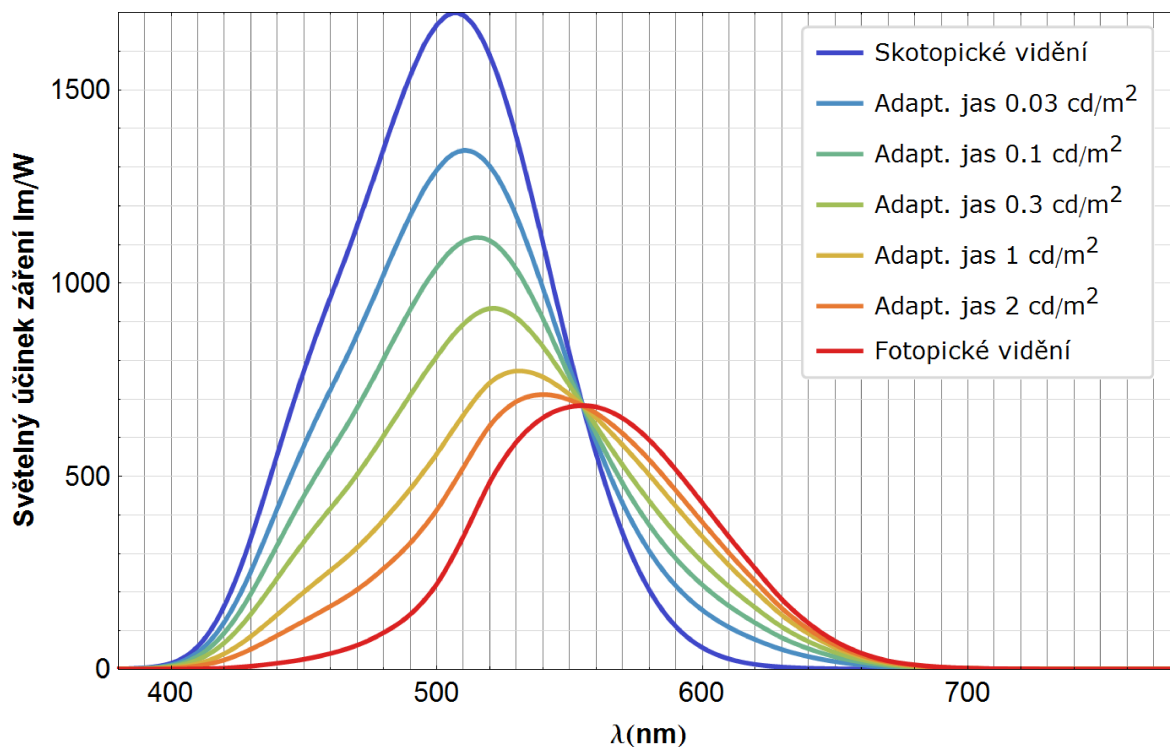
Hodnotu K_m'' lze pak určit ze vztahu:

$$K_m'' = \frac{683}{V''(555)} \quad (18)$$

Tento vztah vychází ze základní definice kandely, jejímž důsledkem nastává rovnost $K(555) = K'(555)$. A vzhledem k tomu, že výpočtem mezopické citlivosti je lineární kombinace citlivosti skotopické i fotopické, pak musí platit i:

$$K(555) = K'(555) = K''(555) = 683 \text{ lm/W} \quad (19)$$

To je poměrně důležitá informace, která nám říká, že na vlnové délce 555 nm vnímá lidské oko stejně při všech jasech. Tedy nezáleží, jestli se nacházíme ve fotopických, skotopických nebo mezopických podmínkách. Tato skutečnost je dobře patrná na následujícím grafu, kde jsou vyobrazeny absolutní hodnoty světelných účinků záření.



Obr. 3.2: Průběhy absolutních hodnot světelných účinků záření při fotopických, skotopických a vybraných mezopických podmínkách podle modelu MES2.

V následující tabulce jsou uvedeny příklady zdrojů o různých hodnotách S/P a procentní rozdíl skutečně vnímaného mezopického jasu vypočteného pomocí vysvětleného modelu MES2 oproti jasu fotopickému.

Pro praktické využití nás zajímají především jasy od 0,3 cd/m² a výše. Pro poměr S/P rovnající se jedné nedochází k žádným změnám, k těm dochází pouze pro S/P nižší či vyšší než jedna. Pro S/P menší než jedna klesá světelný výkon svítidla. Naopak pro S/P vyšší než jedna světelný výkon zdroje roste. Dobře je to vidět na již zmiňované sodíkové výbojce nebo LED vysoké teploty chromatičnosti, tedy studeně bílé.

Příklad zdroje	S/P	Fotopický jas (cd/m ²)						
		0,01	0,1	0,3	0,5	1	3	5
Nízkotlaká sodíková výbojka	0,25	-75 %	-29 %	-18 %	-14 %	-9 %	-2 %	0 %
Vysokotlaká sodíková výbojka	0,65	-31 %	-13 %	-8 %	-6 %	-4 %	-1 %	0 %
Zářivka – teple bílá	1,05	4 %	2 %	1 %	1 %	1 %	0 %	0 %
Teplotní zdroj	1,45	32 %	15 %	9 %	7 %	5 %	1 %	0 %
Zářivka - denní	1,85	57 %	27 %	17 %	13 %	9 %	3 %	0 %
LED - studená bílá	2,25	80 %	38 %	24 %	19 %	12 %	4 %	0 %
	2,65	101 %	49 %	31 %	24 %	16 %	5 %	0 %

Tab. 3.1: Procentuální rozdíly mezi fotopickým a vnímaným mezopickým jasem pro světelné zdroje s různým poměrem S/P (podle modelu MES2) [10]

3.5. Měření mezopického jasu

Abychom výše popsany model mohli uvést do praxe, je nutné dokázat změřit požadované data. A to je fotopický a skotopický jas.

Dnešní přístroje jsou kalibrovány na fotopickou křivku, proto s fotopickým jasem není problém. Ten nastává pro skotopický jas. Jak už bylo výše napsáno, skotopický jas lze vypočítat pomocí poměru S/P, ovšem výrobci tuto hodnotu neuvádějí a hlavně při praktické aplikaci světla na ulici spektrální složení světla ovlivňuje mnoho dalších podmínek. Ať už je to okolní osvětlení nebo třeba materiál komunikace a zástavby.

Další možností je tedy pořídit nový přístroj kalibrováný právě na spektrální citlivost zraku pro skotopické vidění normálního fotometrického pozorovatele. Avšak, pak bychom prováděli měření dvěma přístroji, což nelze považovat za úplně praktické provedení. A navíc, pro měření dalších mezopických veličin, jako osvětlenost, světelný tok či svítivost, bychom potřebovali také další přístroje kalibrovány touto křivkou.

Z tohoto důvodu se začalo přemýšlet o takzvaném M/P metru. M/P představuje poměr mezi mezopickým a fotopickým jasem. Tento poměr se označuje R_{MP} a matematicky lze zapsat následovně [11]:

$$M/P \text{ ratio} = R_{MP} = \frac{L_{mes}}{L_p} \quad (20)$$

M/P metr se takto nazývá právě proto, že dokáže tento poměr změřit. A pokud tento poměr známe, není problém mezopický jas L_{mes} dopočítat.

$$L_{mes} = L_p \cdot R_{MP} \quad (21)$$

M/P metr je v podstatě dvoukanalový jasoměr, tedy zvládne najednou změřit fotopický i skotopický jas. Poté z naměřených dat, pomocí výpočetních algoritmů dopočítá právě poměr M/P. A pokud tento poměr známe, lze kromě jasu získat i další mezopické veličiny:

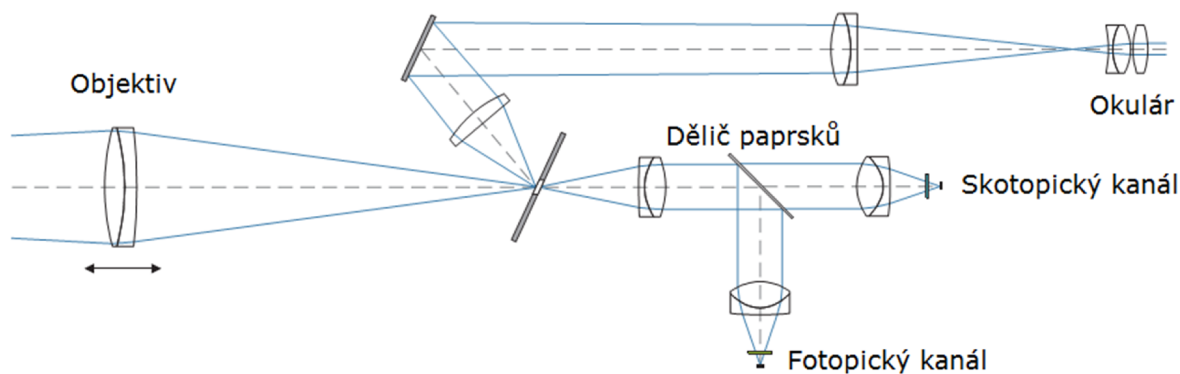
$$E_{mes} = E_p \cdot R_{MP} \quad (22)$$

$$\Phi_{mes} = \Phi_p \cdot R_{MP} \quad (23)$$

$$I_{mes} = I_p \cdot R_{MP} \quad (24)$$

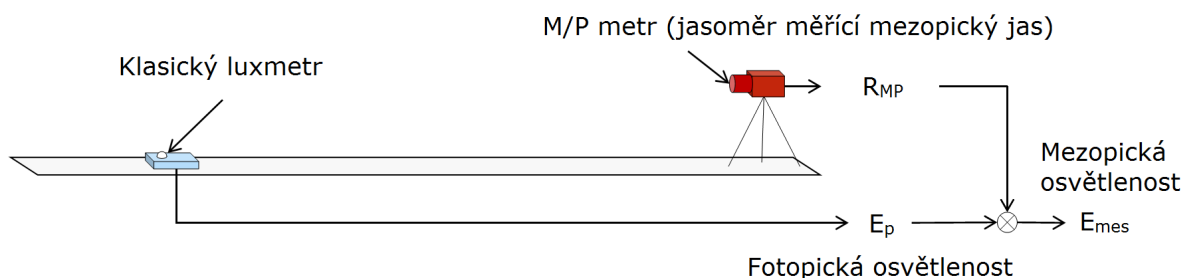
- E je osvětlenost (lx)
- Φ je světelný tok (lm)
- I je svítivost (cd)

Přístroj je samozřejmě sám o sobě schopný měřit fotopický, skotopický a samozřejmě i mezopický jas, protože je to v podstatě obyčejný jasoměr schopný měřit podle $V(\lambda)$ i $V'(\lambda)$ křivek. [12]



Obr. 3.3: Ukázka optické části M/P metru (neboli dvoukanalového jasoměru) [12]

Při návrhu M/P metru musíme zajistit lineární vztah mezi dopadlým zářením a výstupním signálem hlavně v mezopické oblasti. Také si musíme uvědomit, že jak fotopicky, tak skotopicky kalibrovaný senzor mají svoji nejistotu měření a ta se projeví ve zvětšené nejistotě celkového měření mezopického jasu popřípadě M/P poměru. [12]

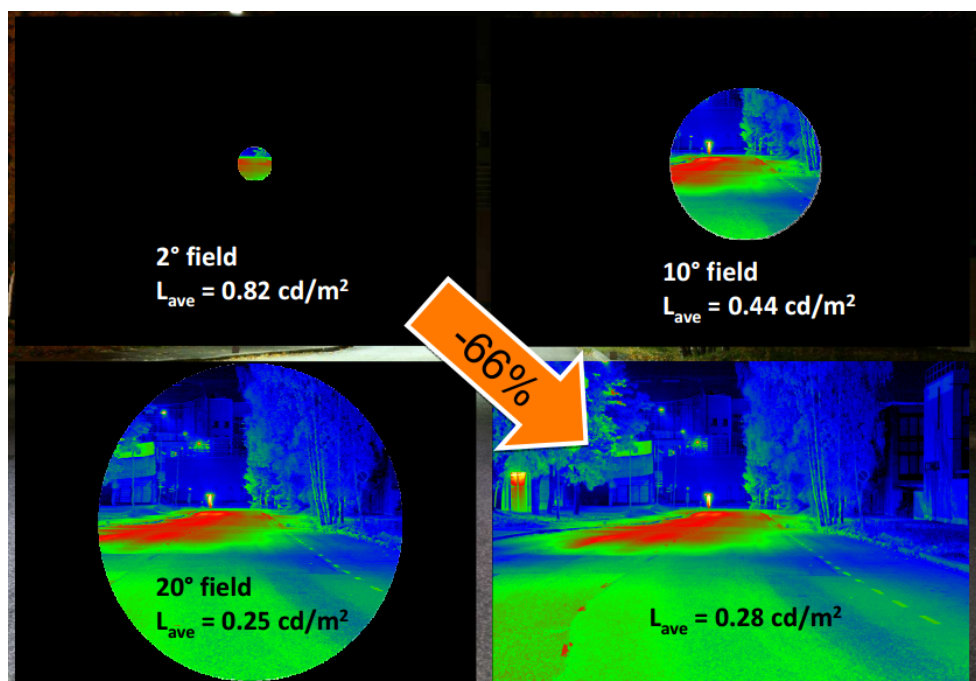


Obr. 3.4: Příklad použití M/P metru: Měření mezopické osvětlenosti [11]

3.6. Nedostatky při měření mezopických veličin

Přese všechno ovšem není možné měření mezopického jasu použít v praxi. A to hlavně z jednoho důvodu. V dokumentu CIE 191-2010 není definováno, v jakém poli se má jas měřit. Mluví se zde pouze o adaptačním poli, tedy prostoru, na který je zrak adaptován, ovšem není blíže specifikován. Neví se tedy jaký tvar má adaptační pole mít, jak má být velký a kam ho umístit. Pokud by citlivost oka v podmínkách šera nebyla proměnlivá, tuto skutečnost neřešíme, ovšem jak víme (viz obr. 3.2) citlivost se mění dosti výrazně.

Budeme-li při měření využívat různé velikosti a tvary měřeného pole, dostaneme různé výsledky jasů. Pro praktické měření ale potřebujeme získat pouze jeden výsledek, a to takový, na který je zrak opravdu adaptovaný.



Obr. 3.5: Ukázka, jak se může měnit adaptační jas pro různá adaptační pole [13]

Inženýři ze skupiny TM 12-12 IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) doporučují použít jako adaptační jas lokální jas, tedy jas testovaného objektu.

Vycházejí z experimentů, kdy zrakový výkon korespondoval více s lokálním jasnem, v místě, které pozorovatelé sledovali, více než s jasnem vozovky, který byl vyšší. Odborníci se přesto převážně shodují, že by mělo jít o průměrný jas určitého pole. [13]

Mezopická fotometrie popsaná v CIE 191-2010 je založena na periferních experimentálních úkolech, především o excentricitě 10°. V těchto případech bylo určení hodnot fotopického a skotopického jasu, a tedy i mezopického, jednoduché, jelikož experimenty se prováděli při rovnoměrném jasu pozadí v celém zorném poli a tudíž nezáleželo na velikosti a tvaru adaptačního pole. Ovšem v reálném prostředí, jak je znázorněno na obr. 3.5, je jas pozadí velmi rozdílný a to je ten problém.

Vedou se i diskuze okolo tvaru adaptačního pole. Zatím se odborníci shodují, že tvar pole bude jiný pro chodce i pro řidiče. Zatímco řidič sleduje především dění před sebou, chodec kromě toho sleduje i chodník pod sebou. U řidiče navíc velmi záleží na členitosti komunikace a obtížnosti orientace. Některými měřeními, bylo prokázáno, že člověk při jízdě míří zrakem do oblasti oválu velikosti čelního skla, ovšem nejčastěji se dívá přímo před sebe.

Kapitola 4.

Platné normy pro osvětlování komunikací

V České republice se problematikou veřejného osvětlení zabývá evropská norma, která zde vstoupila v platnost 1. 5. 2004. Nahradila zde starší normy, které neměly tak široký záběr. Evropská norma zavádí i novou terminologii a nové značky. Tvoří ji čtyři samostatné celky:

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

V roce, kdy v České republice norma začala platit, tedy v roce 2004, se mezopické vidění v praxi v podstatě neřešilo. Proto ani v jedné části normy se o mezopickém vidění nepíše a neřeší se.

4.1. Popis normy

První část normy je návod, jak určit požadavky na osvětlení venkovních dopravních prostor. Tedy vybrat pro komunikace správnou třídu osvětlení. Pro zařazení se bere v úvahu, kdo bude používat hlavní prostor, kdo prostor využívat nesmí, jaká je geometrie prostoru, jeho využití, intenzita provozu, přehlednost a vliv okolního prostředí na světelné podmínky na komunikaci. [14]

Komunikaci tak podle normy můžeme rozdělit do několika skupin:

ME/MEW: Tyto třídy platí pro řidiče motorových vozidel pohybujících se po komunikacích střední až vysokou rychlostí, což v podstatě znamená 30 km/h a více. MEW se používá tam, kde je komunikace v noci často mokrá. Zabraňuje výraznému zhoršení kvalitativních parametrů osvětlení při těchto podmínkách.

CE: Jedná se o komunikace v konfliktních oblastech. Pokud bychom to chtěli více specifikovat, jedná se například o obchodní třídy, složitější křižovatky, kruhové objezdy, místa, kde se často tvoří zácpy a další. Třída CE se dá použít i pro chodce a cyklisty třeba v podchodech a podjezdech (pokud nevyhovují třídy S a A).

S, A: Tyto skupiny se zabývají osvětlením komunikací, které využívají chodci a cyklisti. Mezi tyto komunikace patří stezky, odstavné pruhy, oddělené části komunikace nebo komunikace podél vozovek. Pak také obytné a pěší zóny, parkoviště a podobné prostory.

ES: Do této doplňkové kategorie spadají pěší zóny, na kterých chceme snížit riziko kriminálního přečinu a navodit pocit bezpečí.

EV: Jedná se opět o doplňkovou třídu. Používá se tam, kde je potřeba zajistit dobrou viditelnost svislých ploch, například na křižovatkách. [14]

Druhá část normy dále specifikuje třídy uvedené výše. Každá třída má svou vlastní tabulku, ve které se definují hodnoty následujících veličin:

- Průměrný jas povrchu komunikace \bar{L} (cd/m²)
- Celková rovnoměrnost jasu U_0
- Podélná rovnoměrnost jasu U_l
- Prahový přírůstek – omezující oslnění TI (%)
- Osvětlení okolí SR
- Průměrná osvětlenost \bar{E} (lx)
- Minimální osvětlenost E_{min} (lx)

Každá třída pracuje pouze s některými z uvedených veličin.

Ve třídě ES je pak ještě používána poloválcová osvětlenost E_{sc} a ve třídě EV svislá osvětlenost E_v . [15]

V následující tabulce jsou vyobrazeny požadavky pro některé třídy ME. Nejpřísnější třída je ME1, která odpovídá dennímu provozu kolem 25 000 aut a větší hustotě křižovatek (samozřejmě to závisí i na dalších parametrech). Minimální průměrný jas povrchu komunikace je 2 cd/m², což je úroveň jasu, kdy lidské oko vnímá už poměrně rozdílně, oproti stavu za dne. Není to ještě příliš velký rozdíl, ale ten bude růst s číslem třídy.

Třída	Jas povrchu suché vozovky			Omezující oslnění	Osvětlení okolí
	\bar{L}_{min} (cd/m ²)	$U_{0,min}$	$U_{l,min}$	TI_{max} (%)	SR_{min}
ME1	2	0,4	0,7	10	0,5
ME2	1,5	0,4	0,7	10	0,5
ME3a	1	0,4	0,7	15	0,5
ME4a	0,75	0,4	0,6	15	0,5
ME5	0,5	0,35	0,4	15	0,5
ME6	0,3	0,35	0,4	15	-

Kritérium okolního osvětlení SR_{min} lze uplatnit pouze v případě, kde k silniční komunikaci nepřiléhají jiné komunikace s vlastními požadavky

Tab. 4.1: Výňatek tabulky z ČSN EN 13201-2. Jsou zde stanoveny požadavky podle tříd ME. Čím nižší hodnota třídy, tím je požadována vyšší kvalita osvětlení. Chybí zde uvedeny třídy ME3b, ME3c a ME4b.

[15]

Největší rozdíl bude samozřejmě pro poslední třídu ME6, kdy hodnota minimálního průměrného jasu je pouze 0,3 cd/m². Pokud tuto hodnotu porovnáme v tab. 3.1, zjistíme, že při této hodnotě už může docházet k poměrně velkým rozdílům hodnoty světelného toku. Bylo by proto vhodné počítat s mezopickou oblastí zraku.

Třída	Horizontální osvětlenost	
	\bar{E}_{\min} (lx)	$U_{0,\min}$
CE0	50	0,4
CE1	30	
CE2	20	
CE3	15	
CE4	10	
CE5	7,5	

Tab. 4.2: Třídy osvětlení CE [15]

Třída	Horizontální osvětlenost	
	\bar{E}_{\min} (lx)	E_{\min} (lx)
S1	15	5
S2	10	3
S3	7,5	1,5
S4	5	1
S5	3	0,6
S6	2	0,6
S7	-	-

Tab. 4.3: Třídy osvětlení S [15]

Třídy CE, tedy komunikace v konfliktních oblastech jsou pak definovány minimální průměrnou horizontální osvětleností a celkovou rovnoměrností osvětlenosti.

Třídy S jsou také definovány minimální průměrnou horizontální osvětleností a poté minimální osvětleností. Aby bylo v třídě S dosaženo rovnoměrnosti, nesmí skutečná průměrná udržovaná hodnota osvětlenosti přesahovat 1,5 násobek minimální hodnoty \bar{E} pro danou třídu. [15]

Ve třetí části normy se popisují postupy a předpoklady potřebné k výpočtům osvětlení pozemních komunikací. A ve čtvrté jsou popsány postupy pro fotometrická měření. Jsou zde uvedeny i příklady protokolů měření.

Aby požadované osvětlenosti odpovídali skutečným hodnotám, tak jak je vnímá lidské oko, bylo by vhodné zakomponovat do tabulek upravené hodnoty pro různé hodnoty S/P.

Kapitola 5. – Praktická část

Měření závislosti jasu na adaptačním poli

Jak už bylo popsáno výše, stále se bádá nad tím, jaký tvar či úhel má mít adaptační pole. V rámci této práce jsme provedli sérii měření, jejichž výsledky by nám měli říct, jak se mění výsledný naměřený jas v závislosti právě na tvaru, popřípadě úhlu adaptačního pole.

Tím se nám zodpoví otázky, jak výrazně se hodnota průměrného jasu mění s měřeným úhlem, zdali lze vysledovat určité spojitosti mezi závislostmi jasu a adaptačního úhlu, či použitého zdroje a budeme moci lépe posoudit vliv okolního osvětlení.

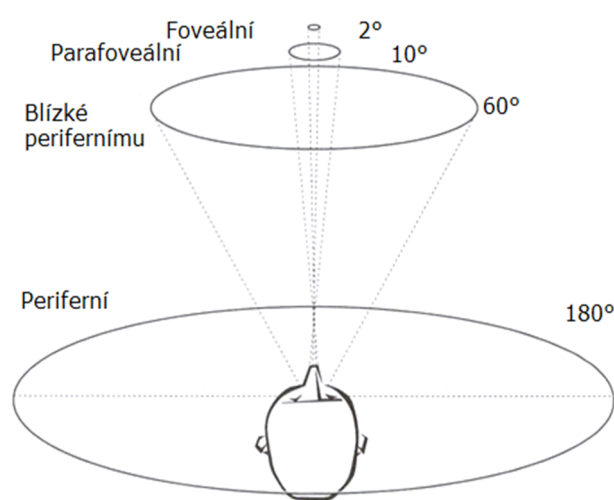
5.1. Cíle měření

Tímto měřením bychom chtěli docílit:

- Porovnat naměřené průběhy s teoretickými
- Zjistit závislosti fotopického a mezopického jasu na úhlu zorného pole
- Nalézt souvislosti i s tvarově odlišným adaptačním polem popřípadě i další souvislosti vyplývající z měření
- Zjistit vliv okolí
- Vyvodit závěry

5.2. Teoretický rozbor

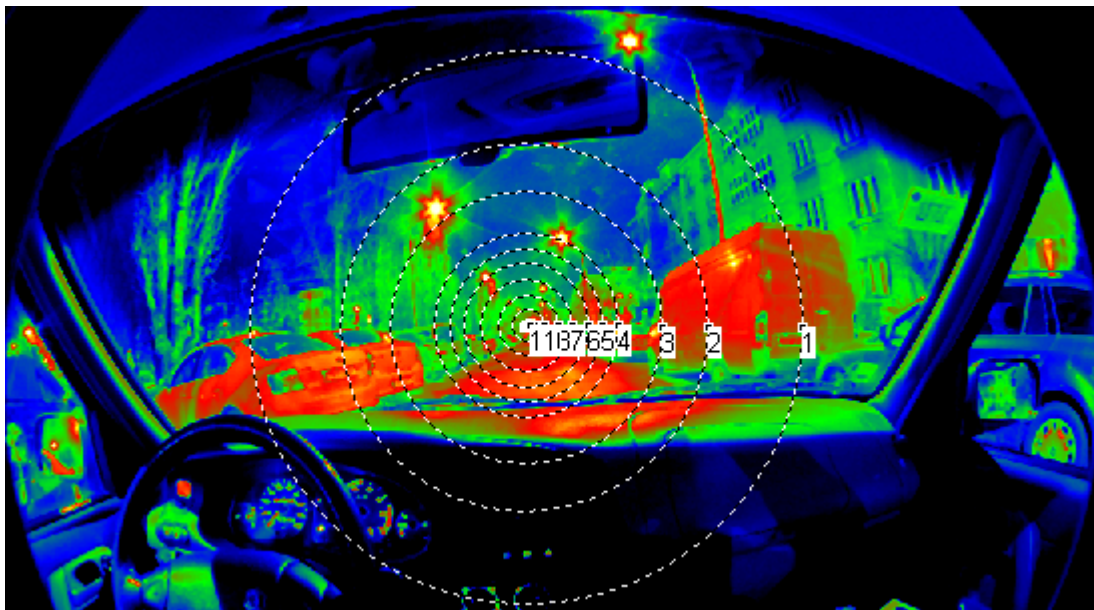
Jak už bylo popsáno v 1. kapitole, tyčinky a čípky nejsou rozmístěny po sítnici pravidelně. To při definici adaptačního pole hraje poměrně velkou roli. Při foveálním vidění (do $1^\circ - 2^\circ$) se zapojují především čípky, jelikož v samotném středu se ani tyčinky nevyskytují (viz obr. 1.3). Proto v tomto rozmezí pozorovaného úhlu nemůžeme mluvit přímo o mezopickém vnímání. A nelze ani, pokud bychom chtěli použít mezopické modely, mezopicky vnímaný jas pouze pro tuto oblast vypočítat či změřit. [3]



Obr. 5.1: Popis zraku v závislosti na pozorovacím úhlu [19]

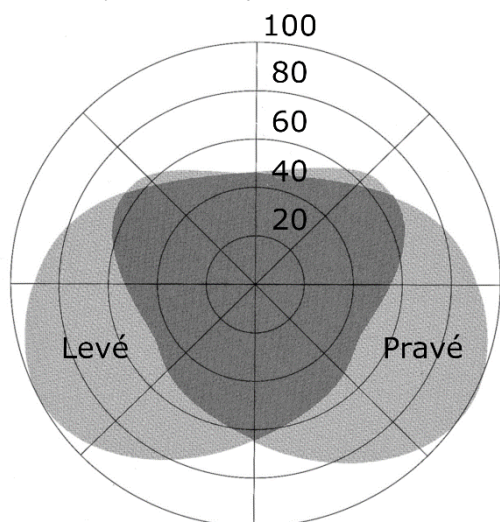
Z tohoto pohledu lze tedy mluvit o mezopickém vidění až od větších úhlů spíše v periferní oblasti. Při praktickém měření nám ovšem nejde pouze o malé úhly v samotném středu, ale o celkové působení na sítnici. A to je právě problém velikosti a tvaru adaptačního pole, který se stále řeší.

Právě z tohoto důvodu jsme použili 8 mm objektiv s pozorovacím úhlem 180°, abychom mohli porovnat velikosti jasů pro plochy různých úhlů. Od nejmenších až po ty větší. Těmto plochám odpovídají kružnice, vyznačené na následujícím obrázku.



Obr. 5.2: Ukázka výsledného snímku s vyznačenými plochami odpovídajícím zorným úhlem 1° až 90°

Jelikož neznáme tvar a velikost adaptačního pole, rozhodli jsme se využít znalosti zorného úhlu binokulárního vidění. Každým okem vnímáme jeden obraz, ovšem zorná pole levého a pravého oka jsou rozdílná. Při pohledu oběma očima dochází ke spojení obrazů v jeden. Díky tomu dokážeme vnímat hloubku obrazu. Průnik zorných úhlů

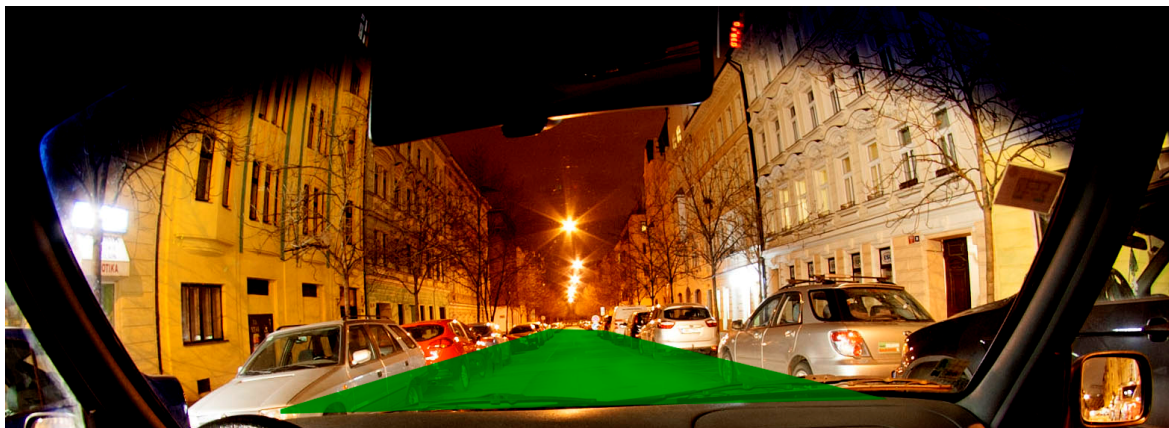


Obr. 5.3: Binokulární vidění [16]

pravého a levého oka pak nazýváme právě binokulární vidění. V této části zorného pole dochází k lepšímu rozlišování a identifikaci povrchů a detailů a v podstatě je nejdůležitější oblastí při procesu vidění.

Z tohoto důvodu jsme se rozhodli odečítat jasy i pro tento tvar adaptačního pole. Jak je vidět na obr. 5.3, tento tvar je souměrný podle osy, ovšem kružnici se zdaleka nepodobá. Zúžený tvar ve spodní části je způsoben umístěním nosu, který brání výhledu. [16]

Kromě ploch odpovídajících určitým úhlům (tvarem kružnice) a binokulárnímu vidění jsme pro analýzu snímku použili i jiné tvary. Jedná se o lichoběžník, který zahrnuje pouze osvětlenou komunikaci a zbytek fotky, tedy okolí, je zahrnuto v samostatné oblasti. Toto rozdělení nám poslouží hlavně k porovnání rozdělení jasu mezi osvětlenou komunikací a okolím. Tím dokážeme zjistit, jak velmi se jasy okolí mohou měnit a tedy jestli mohou výrazně ovlivňovat celkový jas. Plocha okolí byla rozdělena na dva díly: na pravé a levé okolí. Tím dokážeme zjistit i nerovnosti mezi pravým a levým okolním jasem.



Obr. 5.4: Naznačení lichoběžníkové oblasti

5.3. Průběh měření

Měření probíhalo pomocí přístroje Canon EOS 350D. Jedná se o zrcadlovku, která byla společností Techno Team Bildverarbeitung GmbH dokonale zkalibrována, jak čip, tak objektiv, abychom dostali naprosto přesná data. Z naměřených obrazových dat lze poté pomocí programu LMK 2000 získat hodnoty fotonického jasu v každém bodě fotografie. Lze pak jednoduše zjišťovat průměrné jasy požadovaných ploch, jejichž tvar, velikost i umístění si sami určíme.



Obr. 5.5: Canon EOS 350D

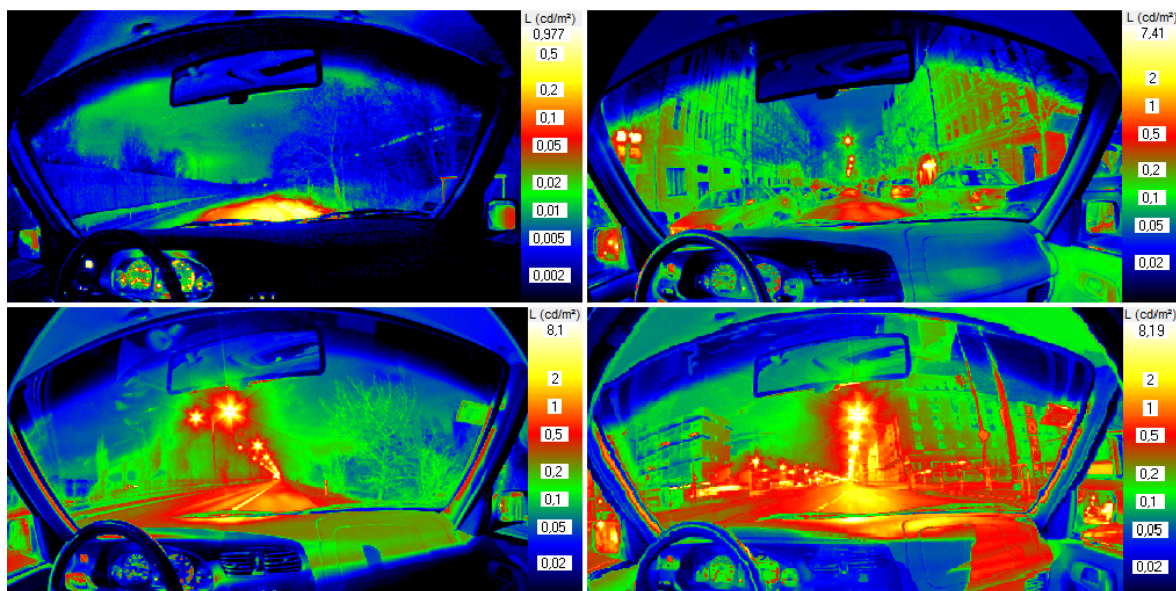
Abychom zrak řidiče simulovali co nejvěrněji, naistalovali jsme kameru přímo do auta, ve výšce očí řidiče vedle jeho hlavy. Vzhledem k tomu, že přesně nevíme, na jak velkou oblast se lidský zrak adaptuje, použili jsme širokoúhlý objektiv s ohniskovou vzdáleností 8 mm, zvaný rybí oko, jehož záběr je 180° úhlu pohledu. Tím jsme dokázali zachytit jak celé čelní

sklo a přístrojovou desku, tak i část bočních oken i se zpětnými zrcátky. Díky tomuto rozsahu jsme pak mohli zanalyzovat více případů adaptačního pole.

Před samotným měřením jsme ještě v laboratoři prováděli kalibraci. Porovnávali jsme naměřené hodnoty právě Canonu EOS 350D s jasoměrem LMT L1009, který jsme považovali za referenční. Na vyznačených místech jsme oběma přístroji změřili jasy a

porovnaly. Výsledky byly naprosto vyhovující a ve většině bodů nabýval rozdíl řádově procenta.

Měření probíhalo ve skutečném provozu během večerních a nočních hodin v ulicích Prahy. Komunikace byly zvoleny tak, aby v měření byly zastoupeny různé druhy komunikací. Tedy od neosvětlených až po velmi osvětlené. Proto jsou mezi měřeními komunikacemi malé jednosměrné uličky s minimálním provozem, ale i dálnice.



Obr. 5.6: Příklady všech čtyř skupin. Vlevo nahoře: 1. skupina (Na Staré silnici), vpravo nahoře: 2. skupina (Jana Zajíce), vlevo dole: 3. skupina (Strakonická), vpravo dole: 4. skupina (Evropská).

Měření lze rozdělit do tří skupin. První skupinu tvoří ulice měřené staticky, tedy v zastaveném autě. Ulice byly změřené bez provozu, tedy pouze při instalovaném osvětlení. Všechna měření probíhala s rozsvícenými potkávacími světly, některé vybrané situace poté i s dálkovými a bez žádného osvětlení. Tím zjistíme, jak hodně ovlivňují světla automobilu, ve kterém řidič sedí, měřený jas.

V druhém případě se již kamera nacházela v jedoucím automobilu. Museli jsme ovšem volit pouze rovné komunikace s rovnoměrným osvětlením po celou dobu měření a to z důvodu dlouhého expozičního času kamery. Pokud bychom v pohybu s kamerou nerovnoměrně zatáčeli, výsledný obraz by byl rozmazaný s velkým množstvím světelných čar. Ovšem pokud bychom při zatáčení drželi během měření stále stejný poloměr zakřivení, dostali bychom relevantní výsledky také.

Při tomto typu měření dostáváme průměrné hodnoty jasů z celé doby měření, které trvalo zhruba minutu. Měření se skládá ze tří samostatných snímků pořízených ihned za sebou s různým časem expozice.

Tímto měřením vlastně napodobujeme lidské oko, které se na jasy průběžně adaptuje. Adaptace ovšem není tak rychlá, proto se oko adaptuje na průměrný jas, daný osvětlením komunikace i dalšími podmínkami.

Kamera byla umístěna v autě na pevně pomocí stativu. Všechny fotky tak byly pořízeny ze stejného úhlu, ať už v jedoucím nebo stojícím autě. Tím jsme dokázali udržet pro všechny měření stejné podmínky.

V třetím případě jsme měřili pěší zóny. Měření tedy již neprobíhalo z auta, ale standardně na stativu. Jednalo se o tři ulice s různými světelnými zdroji o různých hodnotách poměru S/P. Jak jsem zmínil výše, předpokládá se, že velikost, tvar i umístění adaptačního pole pro chodce bude rozdílný oproti poli pro řidiče. Proto jsme také tyto komunikace zvolili. Ovšem toto měření není dále v této práci rozebíráno.

5.4. Zpracování měření

Při zpracování naměřených dat, jsme museli pro začátek čelit několika problémům. A to, kam umístit střed kružnic. Podle normy pro měření fotopického jasu se měřící bod umísťuje 60 metrů před objektiv na silnici. Ovšem toto měření se provádí, abychom věděli, na jakou oblast se oko adaptuje. Tudíž nejlépe přímo na obzor. Proto jsme vytvořili jednu šablonu se středem těsně nad obzorem, kterou jsme aplikovali na všechny fotografie.

Ovšem zde nastává nové úskalí. Každá dopravní situace, která byla měřena, si vyžaduje zvláštní zpracování. Je to způsobeno například zatáčkami, pozicí automobilu, a tedy měřícího přístroje, například v odstavném pruhu, kdy se posouvá horizont a podobnými detaily.

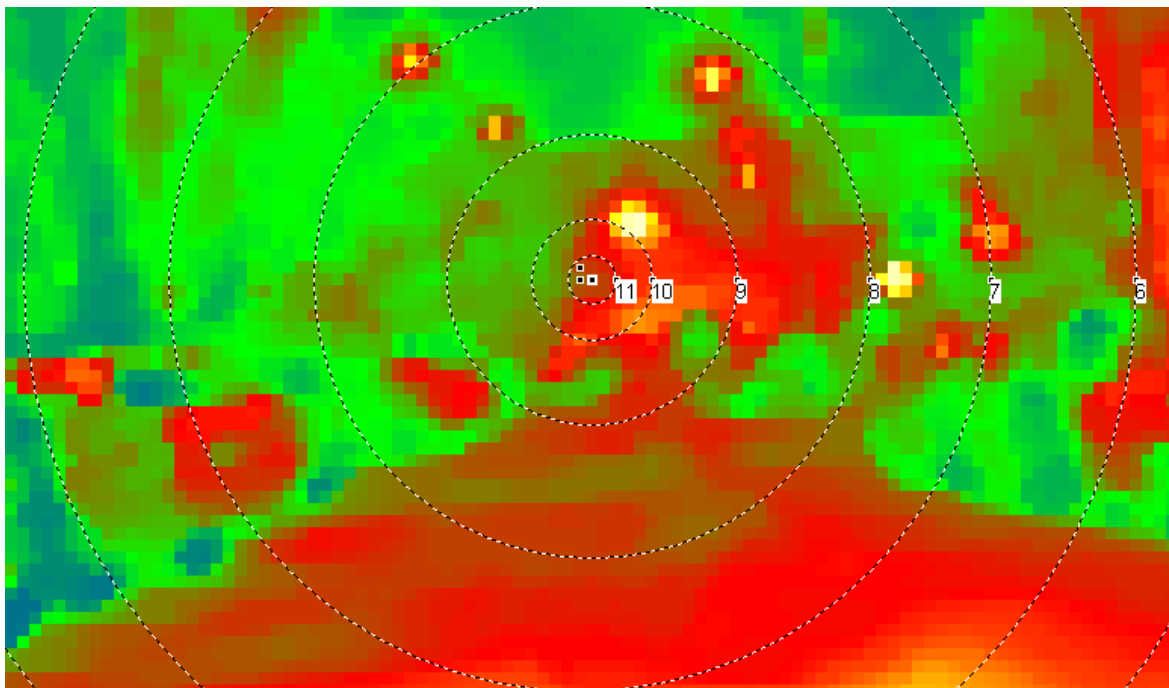
Zvláštní případ také nastává na neosvětlených komunikacích. Zde jsou jediným zdrojem světla reflektory automobilu. Takovéto situace jsme měřili jak s potkávacími světly, tak i se světly dálkovými. Zde je nutné střed kružnic umístit na konec osvětleného úseku, tedy „kam až reflektory dosáhnou“. Jelikož při po zapnutých potkávacích světlech se osvětlí kratší část silnice a umísťovat střed do tmy, kam se řidič pravděpodobně nedívá, by nemělo výpovědní hodnotu. To potvrzuje, že je pro některé situace nutné upravit umístění měřících ploch.

Pro získání údajů jsme vytvořili kružnice o velikostech 1°, 2°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 45°, 60° a 90° zorného úhlu. Kromě kružnic jsme měřili jas i celého čelního výhledu. Poté jsme výhled rozdělili na hlavní oblast měření, do které spadala komunikace a okolní oblast, kam patřilo okolí napravo a nalevo od silnice.

Při zpracování kružnic malého úhlu, to znamená do 10°, velmi záleží na umístění středu kružnic. Jedná se opravdu o malé plochy a fotografie je velmi členitá a obsahuje spoustu malých tmavých míst nebo naopak velmi světlých, viz obr. 5.7. Proto i při velmi

malém posunutí, v rámci fotografie o několik pixelů, se může výsledná hodnota jasu měnit řádově i stovky procent.

Následkem tohoto jevu pak charakteristiky mají do ve svých částech do 10 stupňů rozdílné tendence (rostoucí, klesající) a těžko se v nich hledá podobnost. Dá se proto i prohlásit, že lidské oko se jistě adaptuje na větší plochu než je právě 10° .



Obr. 5.7: Přibližný střed kružnic. Kružnice s číslem 11 odpovídá 1° , číslo 10 zas 2° , 9 pak 5° a kružnice označená číslem 8 odpovídá 10° .

Je vhodné také zmínit, že kružnice o velikosti více než 25° už zasahují do palubní desky. Ta má v některých případech stejnou hodnotu jasu jako oblast před autem, někdy je ovšem tmavá. Záleží, jak se zrovna světlo od palubní desky odráží. Pokud bychom ovšem střed posunuli výše, abychom se jí vyhnuly, dostáváme se středem v mnoha případech až na oblohu. Proto v těchto úhlech je i zahrnutý jas palubní desky automobilu.

Z naměřených dat však vyplývá, že horní část palubní desky u více osvětlených komunikací, tedy u komunikací s vyšším jasnem, má mírně nižší hladinu jasu než vozovka před automobilem a tedy nesnižují tolik celkový jas kružnicové plochy. U méně osvětlených komunikací je jas palubní desky výrazně nižší a průměrný jas snižují.

Stejný problém nastává i při použití plochy binokulárního vidění. I v tomto případě zasahuje značná část do přístrojové desky, ovšem je to přirozená věc, kterou nelze ovlivnit. Střed plochy jsme opět umístili na obzor. Jelikož je tato plocha poměrně obsáhlá, nemění se při posunu středu výrazně její hodnota jasu. A to ani při větších posunech

5.5. Výsledky měření

Po zpracování a analyzování naměřených dat byly ulice na základně určitých parametrů, jako je využití komunikace, povolená rychlost, četnost křižovatek, přítomnost chodců apod., roztrženy. Komunikace, které pak byly zařazeny do stejné skupiny, měly podobné naměřené úrovně fotopického jasu.

Pro přehledné zpracování byly komunikace rozděleny do 4 skupin.

První skupina obsahovala ulice neosvětlené žádným umělým osvětlením, pouze světly automobilu. Pro tuto skupinu je charakteristická velmi nízká hladina jasu a velké rozdíly mezi osvětlenou silnicí a okolím.

Druhá skupina je zastoupena typicky městskými ulicemi s maximální povolenou rychlostí pro automobily do 50 km/h. Tyto komunikace jsou často lemovány chodníky a často vysokými budovami a vyznačují se též vyšší hustotou křižovatek. Další typickou charakteristikou této třídy jsou parkovací místa mezi komunikací a chodníkem či městská zeleň (stromy, křoviny).

Do **třetí skupiny** jsme zařadili dopravně důležité komunikace s vyšší povolenou rychlostí než je 50 km/h (často 80 km/h). Typické jsou vysoké budovy či protihlukové bariéry, které komunikace lemuje, pokud se vyskytují u zástavby.

Poslední **čtvrtá skupina** vystihuje zvláštní případy, kde je potřeba vysoké úrovně jasu. Do této skupiny patří komunikace kombinující vysokou hustotu provozu s chodníky či zastávkami veřejné dopravy. Spadají sem také tunely, kde je vysoká úroveň jasu vytvořena uzavřeným prostorem.

Název ulice	Skupina
Milady Horákové	3
Na Staré silnici, Kněžves	1
Evropská, Dejvice	4
Strahovský tunel	4
Pražský okruh	3 a 4
Strakonická	3 a 4
Technická	2
Vaníčková	2
Flemingovo náměstí	2
Jana Zajíce	2
Hlaváčova	2

Tab. 5.1: Seznam měřených ulic i se zatříděním do skupin

Pražský okruh a Strakonická ulice byly zařazeny do dvou skupin. Tato skutečnost vyplývá z jejich délky, kdy měření probíhalo na několika úsecích s různým osvětlením. Zástupci všech čtyř skupin jsou zobrazeny na obrázku obr. 5.6.

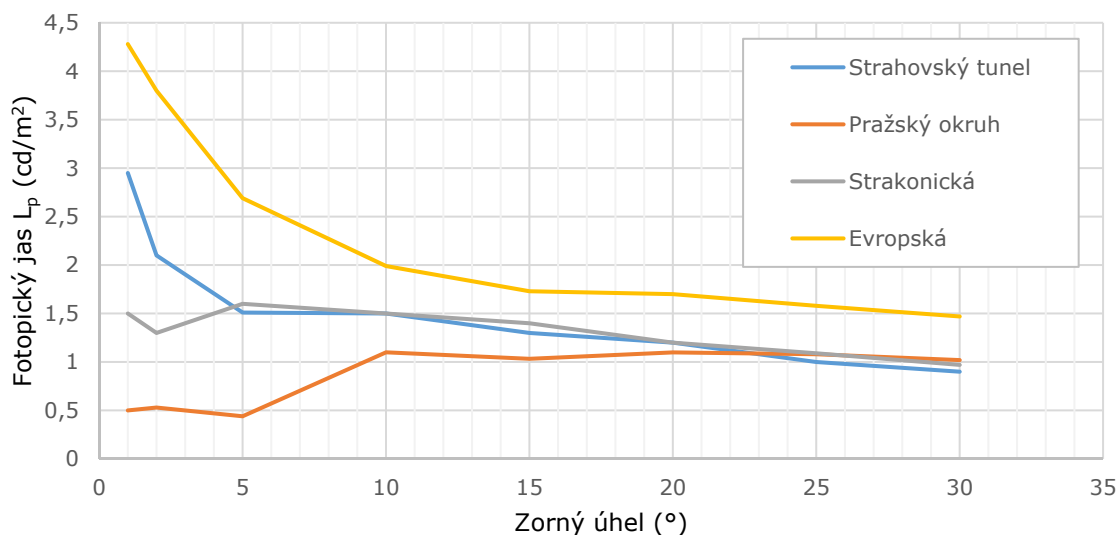
V první části byly výsledky vyneseny do grafů závislosti fotonického jasu na daném úhlu zorného pole. Pro přehlednost byly vyneseny pro každou výše vyjmenovanou skupinu zvlášť.

Závislost fotonického jasu na zorném úhlu

Na obr. 5.8 jsou vyobrazeny výsledky pro 4. skupinu s velmi vysokými průměrnými jasy. Jak již bylo uvedeno, jedná se o hlavní tahy s vysokým provozem. V této skupině jsou obsaženy čtyři komunikace. Ovšem jejich průběhy jsou velmi podobné. Jak už jsem zmínil výše, výsledky lze brát vážně až od 10° zorného úhlu.

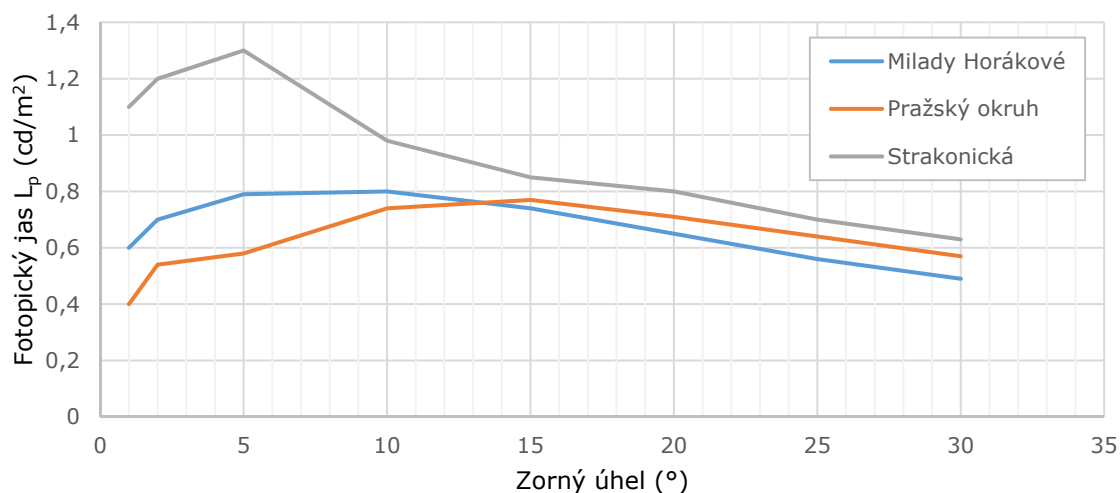
Komunikace Strakonická a Strahovský tunel mají v podstatě totožný průběh na stejné hladině jasu. Průběh Evropské je sice posazen výše (a to pouze díky celkově lepšímu osvětlení komunikace), ovšem sklon charakteristiky téměř dokonale kopíruje zbylé průběhy. Pouze Pražský okruh nemá klesající průběh, ale spíše konstantní, který se drží kolem hladiny 1 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$.

Ve třech případech s klesajícími charakteristikami došlo k poklesu jasu v rozmezí 10° - 30° o zhruba 0,5 – 0,6 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$, tedy o 25 % - 40 %.



Obr. 5.8: Závislost fotonického jasu na úhlu zorného pole pro 4. skupinu, tedy nejvíce osvětlené komunikace

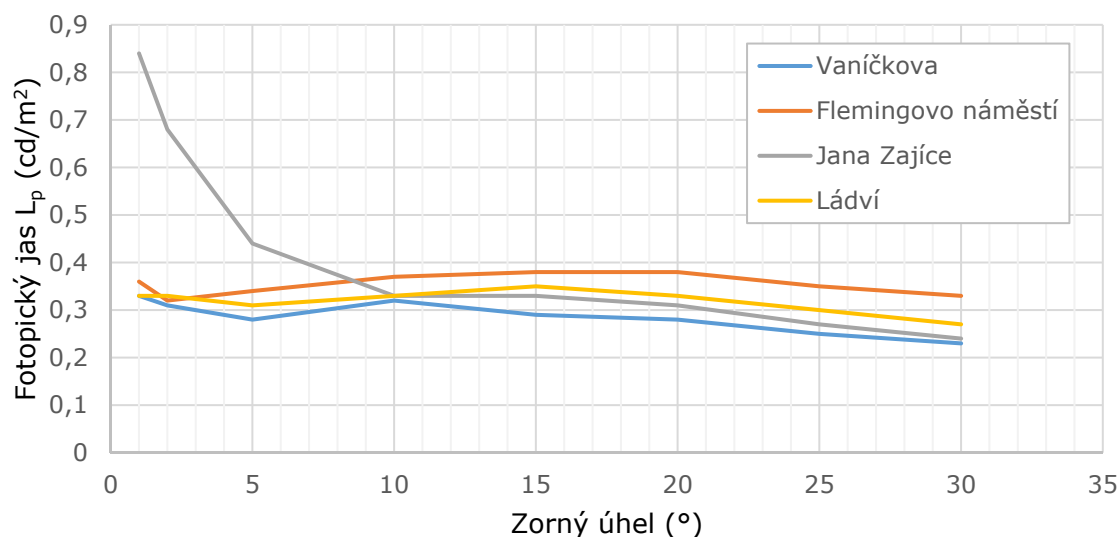
Průběhy třetí skupiny, zahrnující důležité komunikace, ovšem ne tak náročné na osvětlení jako čtvrtá skupina, vypadají opět velmi podobně. Ve všech třech případech charakteristiky opět klesají, v této skupině maximálně o 0,3 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$, což znamená 40 %, tedy stejně jako u předchozí skupiny. Opět nastává větší různorodost do úhlu do 10° z výše popsaných důvodů.



Obr. 5.9: Závislost fotopického jasů na úhlu zorného pole pro 3. skupinu

Ani druhá skupina, zahrnující většinu městských ulic, nevybočuje z trendu a opět má klesající tendenci. Ta není na první pohled tak zřetelná, přesto hodnoty z 10° na 30° poklesnou v rozmezí 10 – 30%. V rozsahu 10° – 30° jsou průběhy opět velmi podobné, samozřejmě nezapočítáváme zorné pole do 10°.

Zajímavé je, že i pod zorný úhel 10° jsou naměřené průběhy podobné, tedy až na průběh naměřený v ulici Jana Zajíce, který má v tomto intervalu prudce klesající trend.

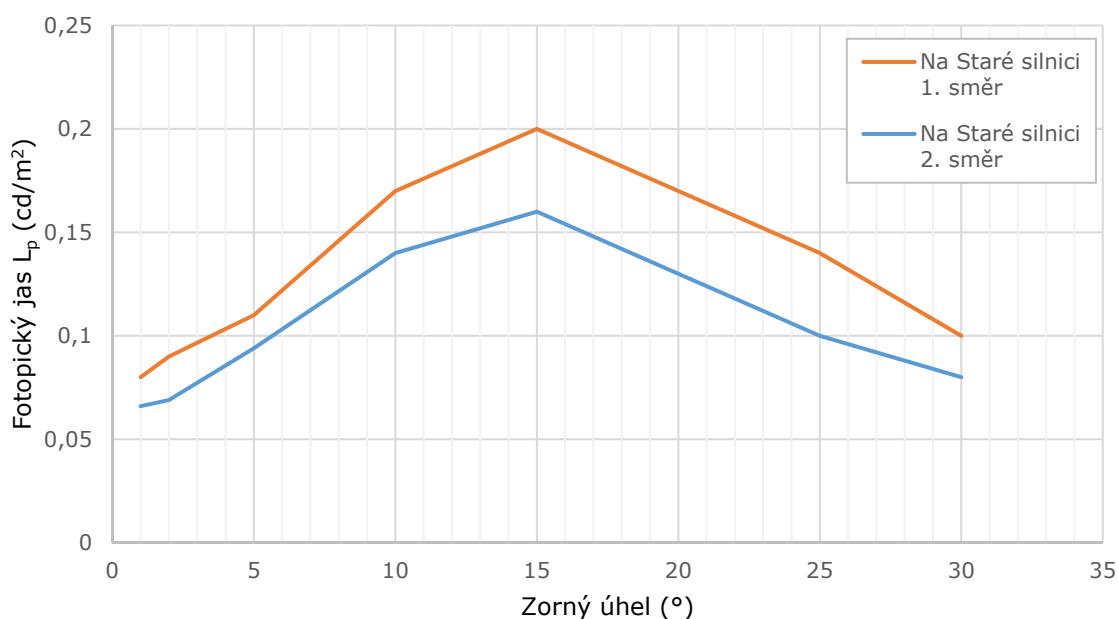


Obr. 5.10: Závislost fotopického jasů na úhlu zorného pole pro 2. skupinu

Zvláštní skupinu tvoří neosvětlené komunikace. Tato skupina dosahuje velmi nízkých hodnot jasů. Je to způsobeno tím, že jediným zdrojem světla jsou zde reflektory automobilu.

Střed kružnic jsme umístili vždy na konec osvětlené části komunikace světly automobilu. Naměřené průběhy rostou s úhlem zhruba do 15°. Důvodem je, že větší kružnice zabírají oblast i blíže autu, kde jsou reflektory účinnější a tudíž roste jas.

Od 15° z důvodu převažujícího tmavého pozadí již průběhy fotopického jasu opět klesají. Vše je způsobeno vysokým kontrastem mezi okolím a osvětlenou komunikací, kdy se jasy liší až 20 krát.

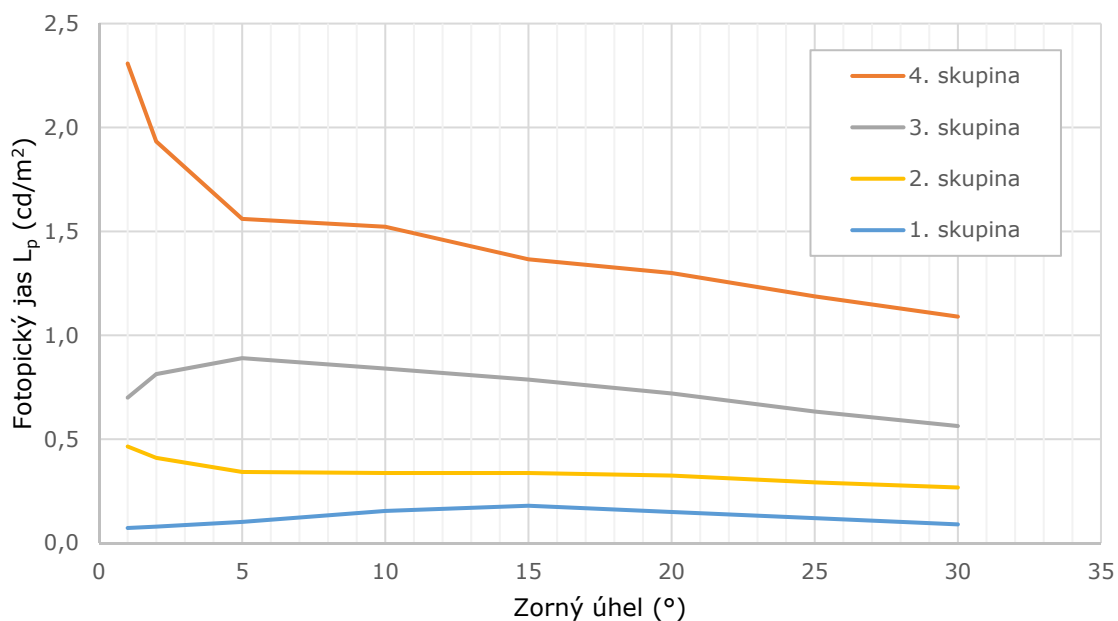


Obr. 5.11: Závislost fotopického jasu na úhlu zorného pole pro 1. skupinu, tedy neosvětlené komunikace

V této skupině je jediným zástupcem ulice Na Staré silnici v Kněževsi, ovšem měření probíhalo v obou směrech a v jiném úseku. Rozdílné výsledky mohly být zapříčiněny betonovou zdí, která se nacházela blíže řidiči při měření 1. směru, popřípadě i rozdílným prostředím obou úseků, jelikož 1. směr byl zakončen zatáčkou, která mohla způsobit odraz světla.

Abychom mohli porovnávat **skupiny celkově**, zprůměrovali jsme hodnoty každé skupiny zvlášť a ty převedli na stejné charakteristiky vykreslené na obr. 5.12. Trendy všech skupin jsou samozřejmě klesající. Pohlédneme-li na to opět z pohledu procentuálního úbytku v rozmezí zorného úhlu 10° - 30°, dostaneme poměrně podobné výsledky. Ve skupině s nejvyššími jasy, tedy ve 4. skupině, dostáváme hodnotu poklesu 28 % (0,43 cd·m⁻²), ve 3. skupině poklesl jas v tomto rozmezí o 33 % (0,28 cd·m⁻²) a v případě 2. skupiny činí tento rozdíl 21 % (0,07 cd·m⁻²). Vidíme, že rozptyl je 12 % mezi skupinami. Je ovšem možné, že při větším množství měřených situací by se tento rozdíl ještě zmenšoval.

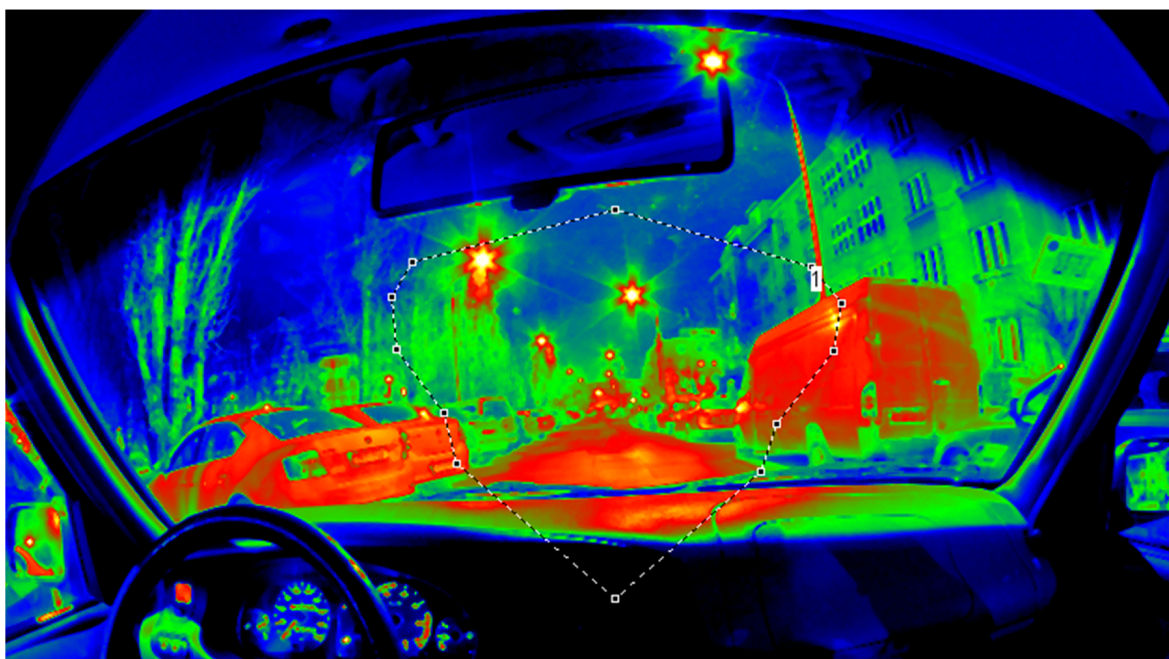
První skupinu jsem do tohoto přehledu nezahrnul, jelikož se jedná o neosvětlené komunikace, které se kvůli tomu v této charakteristice velmi liší a nebylo proto vhodné je porovnávat. Pokles v této skupině činil 42% (0,07 cd·m⁻²), ovšem tvar charakteristiky je oproti přechozím skupinám rozdílný a to kvůli výše popsaným důvodům.



Obr. 5.12: Závislost fotopického jasu na zorném úhlu pro všechny skupiny

Zhodnocení podle binokulárního vidění

Podíváme-li se na výsledky z pohledu binokulárního vidění, zjistíme, že nám vychází nižší hodnoty jasů, než je uvedeno v grafech v rozmezí 1° - 30°. Je to způsobeno tím, že tato oblast se v některých směrech rozšiřuje až nad úroveň 60°. Tím je obsažena i méně osvětlená část výhledu, která pak snižuje průměr jasu. Tento fakt je patrný v tab. 5.2. Zde vidíme, že hodnota jasu binokulárního vidění se v 1., 2. a 3. skupině pohybuje v oblasti mezi 45° a 60°.



Obr. 5.13: Fotografie se zvýrazněnou plochou binokulárního vidění

Často je hodnota blíže jasů při 45°. Ovšem ve 2. skupině odpovídají jasy většinou přesně právě hodnotě jasů při úhlu 45°. Čím je tato shoda určena, nelze z našeho měření přesně určit. Roli ovšem může hrát, že tato skupina, oproti ostatním, je nejvíce zastoupena ulicemi lemovanými budovami i zaparkovanými automobily.

Kdyby oblast binokulárního vidění odpovídala adaptačnímu poli, pak by nejvíce při měření vyhovoval úhel 45°, popřípadě úhel mezi 45° až 60°. Musíme ale uvést, že ačkoliv je binokulární vidění nejvýznamnější oblastí zorného pole, není zatím nikým potvrzeno, že by stejnou roli hrálo i pro adaptaci.

	Ulice	Jas (cd/m ²)			
		bin. vidění	30°	45°	60°
1. skupina	Na Staré silnici 1. směr	0,065	0,1	0,08	0,04
	Na Staré silnici 2. směr	0,035	0,08	0,044	0,027
2. skupina	Vaníčková	0,22	0,23	0,22	0,2
	Flemingovo náměstí	0,25	0,33	0,25	0,22
	Jana Zajíce	0,18	0,24	0,17	0,14
	Hlaváčova	0,2	0,27	0,2	0,18
	Technická	0,12	0,2	0,12	0,09
3. skupina	Milady Horákové	0,31	0,49	0,34	0,26
	Pražský okruh	0,4	0,57	0,44	0,36
	Strakonická	0,41	0,63	0,44	0,38
4. skupina	Evropská	0,93	1,47	1,17	0,82
	Strakonická	0,8	0,97	0,8	0,71
	Pražský okruh	0,66	1,02	0,78	0,63
	Strahovský tunel	0,72	0,9	0,75	0,66

Tab. 5.2: Porovnání jasů v oblasti binokulárního vidění a zorného úhlu 30°, 45° a 60°

Vliv okolního jasů

Jak velký vliv má jas okolí jsme se pokusili zjistit tím, že jsme si fotografii rozdělili na již zmíněný lichoběžník pokrývající osvětlenou komunikaci a okolí, které bylo rozlišeno na levé a pravé.

Zajímavé je, že u 3. a 4. skupiny dosahovalo vyšších hodnot jasů většinou levé okolí. Je to pravděpodobně dáno tím, že nalevo od automobilu se nachází druhý směr, který je taktéž osvětlen, naproti tomu pravá strana bývá zakončena protihlukovou stěnou či pouze stromy. Rozdíly ovšem nejsou veliké. Komunikace, které byly ohraničeny domy, to pak mají naopak. Tyto situace nastávají především u druhé skupiny, ve které je obsažena většina městských ulic. V některých případech nabývaly rozdíly poměrně vysokých hodnot, většinou se však lišily mírně.

V následující tabulce jsou uvedeny procentuální hodnoty jasů okolí oproti hlavnímu lichoběžníku silnice. Zde nastala opět zajímavá závislost, a to čím vyšší průměrné jasy (vyšší třída), tím méně se jasy liší.

Nejnižší hodnota okolního jasu, pokud nezapočítáváme 1. skupinu, dosahuje v podstatě poloviny hodnoty jasu hlavního středu.

Nízké číslo u první skupiny je logické. Kromě silnice, která je osvětlena pouze reflektory, už nic jiného uměle osvětleno není.

Skupina	Úroveň jasu okolí oproti středu (%)
1	6
2	48
3	63
4	65

Tab. 5.3: Procentní hodnota jasu okolí oproti hlavní části - lichoběžníku silnice

Vliv potkávacích světél

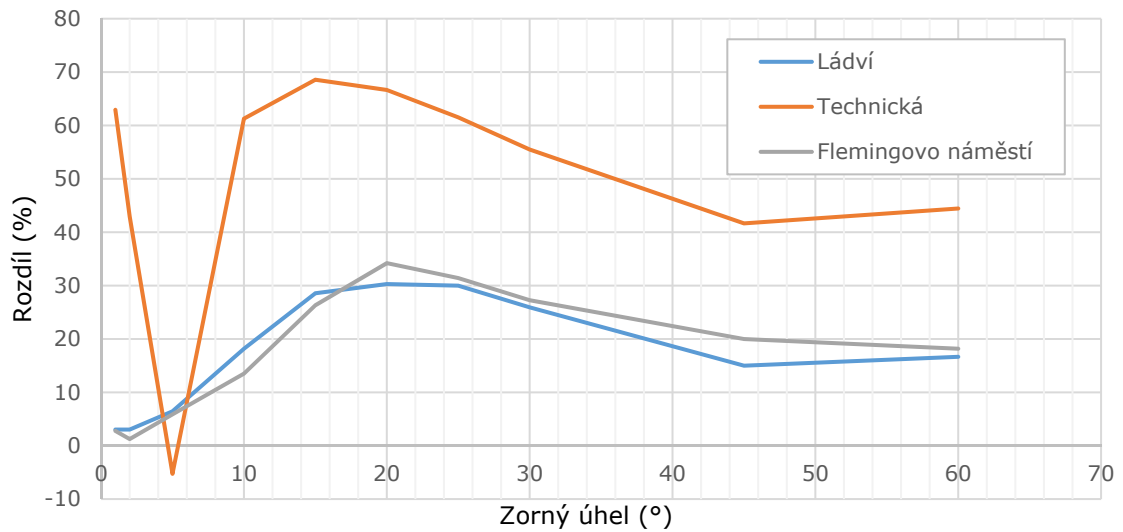
Ve třech případech jsme měřili jas jak se zapnutými potkávacími světly, tak i bez nich. Jedná se o ulice Technická, Hlaváčova a Flemingovo náměstí. Všechny tři komunikace patří do 2. skupiny, jedná se tedy o běžné městské ulice s povolenou rychlostí nanejvýš 50 km/h. Ve vyšších skupinách by toto porovnání nemělo takový význam, jelikož by se světlo reflektorů automobilu „ztrácelo“ v umělém osvětlení a rozdíly by nebyly tak významné.

Výsledky pro zorný úhel 30° a pro binokulární vidění jsou uvedeny v tab. 5.4. Většího rozdílu se dosahuje při 30° zorného úhlu než při binokulárním vidění. Rozdíly jsou v řádu desítek procent, přičemž největší rozdíly jsme naměřili v ulici Technická. V tomto případě hraje pravděpodobně velkou roli nižší hladina jasu než v případě zbývajících ulic.

Ulice	Jas L_p (cd/m ²)					
	30°			binokulární vidění		
	Potkávací světla	bez světél	Rozdíl (%)	Potkávací světla	bez světél	Rozdíl (%)
Flemingovo náměstí	0,33	0,24	27	0,25	0,2	20
Hlaváčova	0,27	0,2	26	0,19	0,16	16
Technická	0,2	0,09	56	0,12	0,07	39

Tab. 5.4: Porovnání jasů s potkávacími světly a bez světél

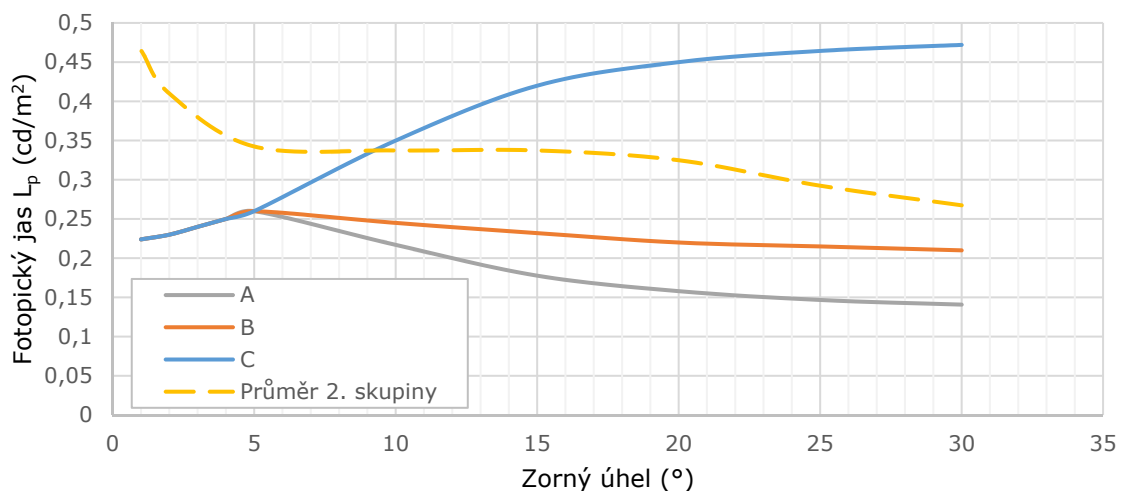
Na obr. 5.14 jsou pak vyobrazeny rozdíly i pro ostatní úhly. Zajímavé je, že ačkoliv je průběh z ulice Technické na vyšší hladině jasu, průběhy jsou tvarově velmi podobné. Maximální rozdíl se nachází v rozmezí 15° až 25°. Od 45° zorného úhlu se pak hodnota rozdílu ustaluje. V případě 2. skupiny v naměřeném jasu tedy hrají znatelnou roli potkávací světla automobilu



Obr. 5.14: Průběh rozdílů v procentech mezi scénou osvětlenou i potkávácími světly a bez potkávácích světél pro zorné úhly od 1° až po 60°

5.6. Porovnání s teoretickými průběhy

Abychom mohli porovnat naměřená data s teoreticky vypočítanými, rozhodli jsme se použít data z diplomové práce Jakuba Tomáše [17]. Výpočty v této práci byly určeny pro modelovou ulici, která v našem případě spadá do 2. skupiny. Jednalo se o ulici lemované z jedné strany domy, z druhé zdi. Výpočty se prováděly pro rozsah úhlů zorného pole 1° - 30° a byly provedeny ve třech verzích. V situaci **A** se počítalo s oblohou, která nabývá hodnoty jasu 0 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$. V případě **B** se obloha do výpočtu celkového průměrného jasu nezahrnovala vůbec. V situaci **C** pak obloha byla do výpočtu opět zahrnuta, ovšem s hodnotou 1 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Průběhy jsou vidět na následujícím grafu.



Obr. 5.15: Teoretický průběh příkladu 2. skupiny. A: hodnota oblohy 0 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$, B: obloha z výpočtu vynechána, C: hodnota oblohy 1 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ [11]

Jelikož nejde o přímé porovnání jedné určité silnice, je možné srovnání jen v rámci skupiny, v tomto případě skupiny 2. Proto se neočekává plná shoda a není možné porovnávat přesnou hladinu jasu, ale pouze trend průběhu.

Oblast 1° až 10° nebudeme hodnotit. Ve zbylé oblasti pak vidíme, že v našem případě můžeme situaci C (obloha o hodnotě $1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$) vyřadit. Porovnáme-li pokles z hodnoty o 10° na hodnotu na 30° , která u druhé skupiny činí 21 %, pak nejbliže se k této hodnotě blíží situace B s hodnotou poklesu 14 %. Situace A dosahuje 35 % poklesu. V tomto případě se nejbliže průměru druhé skupiny blíží situace B, kdy z výpočtů bylo vyňato nebe.

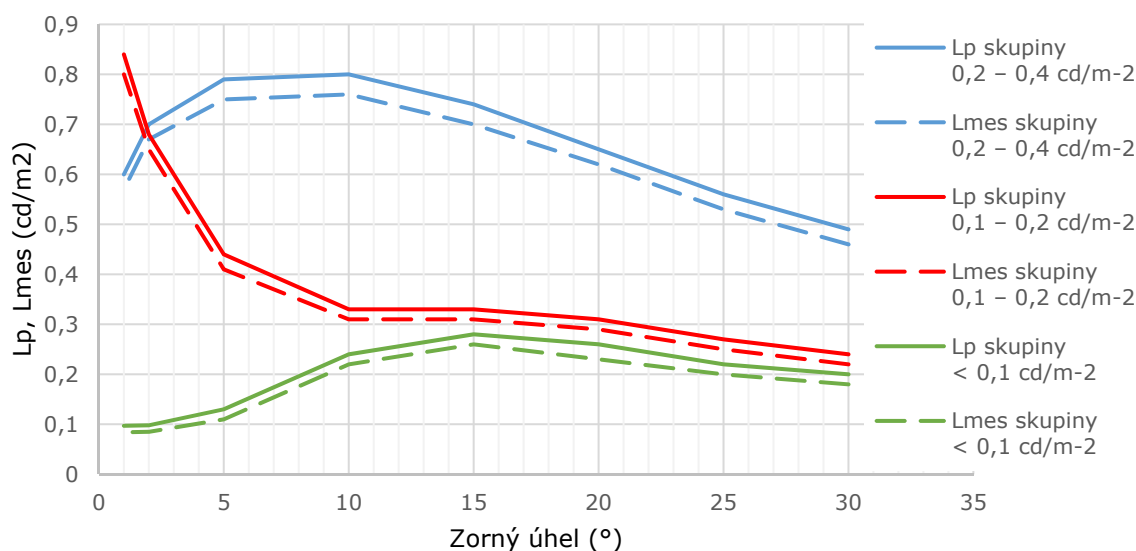
Abychom mohli lépe najít shodu, bylo by vhodné výpočty aplikovat přímo na stejné ulice, obsažené jak v praktickém měření, tak i ve výpočtech. Další možností je aplikovat výpočet na více příkladů různých komunikací spadající do stejné skupiny a průměrné průběhy poté porovnat.

Kapitola 6.

Potenciální energetické úspory

Abychom mohli názorně předvést vliv mezopického vidění na energetickou náročnost, můžeme použít naměřená data z předchozí kapitoly.

Převědeme-li naměřené průběhy na mezopické veličiny podle modelu MES2, dostaneme v podstatě totéž, jen posunuté níže. Je to dáno tím, že veškeré měřené komunikace byly osvětleny vysokotlakými sodíkovými výbojkami, které mají poměr S/P zhruba 0,65. A proto se průběhy celkově posouvají do nižších hladin jasů. Je to zobrazeno na následujícím grafu.



Obr. 6.1: Průběh fotopické i mezopického jasu pro vybraná měření

Posun směrem dolu nevypadá vůbec významně. Musíme ovšem počítat s tím, že podle teoretických výpočtů by pokles na této hladině jasu měl být maximálně 10 %, či spíše menší, což není v grafu tolik znatelné. V tab. 6.1 jsou uvedeny přesné hodnoty poklesu pro všechny skupiny až na případ s neosvětlenou komunikací, který není vhodný pro toto srovnání.

	2. skupina	3. skupina	4. skupina
Rozdíl (cd/m²)	0,020	0,035	0,040
Rozdíl (%)	7,4	6,2	3,7

Tab. 6.1: Rozdíly mezi fotopickým a mezopickým jasem

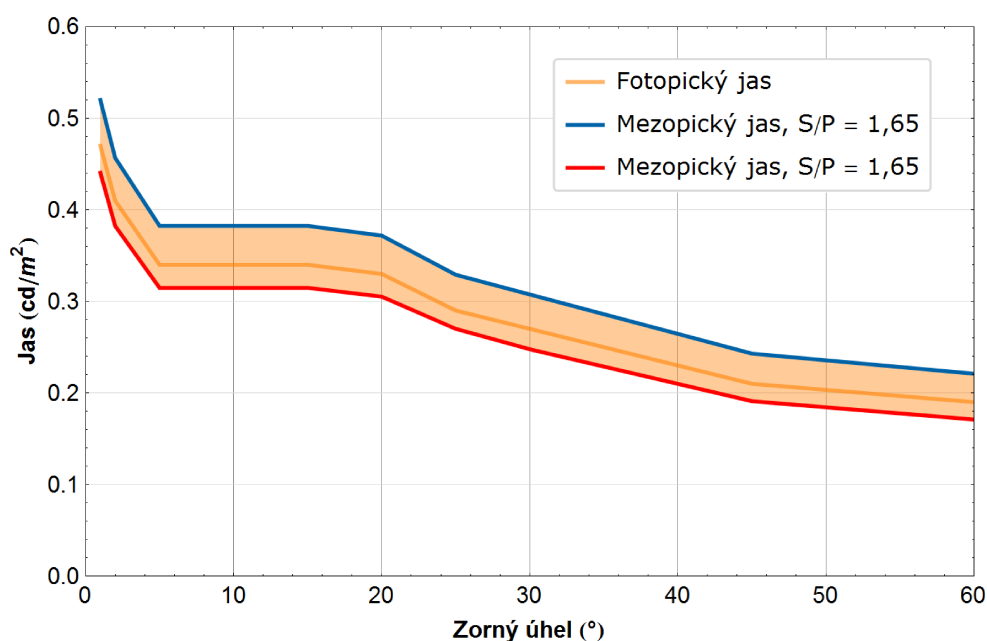
Jedná se o poměrně malé poklesy. Největší je samozřejmě ve 2. skupině, jelikož se jedná o nejnižší hladinu jasu. Tedy při započítání mezopického vidění je výsledný jas na komunikaci o 7,4 % nižší, než bylo naměřeno.

V případě 4. skupiny je tento pokles poměrně malý. Pouze o 3,7 % je nižší mezopicky vnímaný jas od naměřeného.

V tomto případě se tedy nejedná o úspory, naopak je nutné nainstalovat vyšší výkon zdrojů, abychom dosáhli požadovaného mezopického jasu, a to v řádu jednotek procent. Tento výpočet platí za předpokladu, že se nezmění vyzařovací charakteristika, ani spektrální složení zdroje.

Abychom však dostali lepší představu, jaký je rozdíl v mezopicky vnímaných jasech pro různé zdroje, byl proveden přepočít i pro hodnotu S/P 1,65 odpovídající bílé LED, ačkoliv se o diodové osvětlení ve skutečnosti nejedná. V tomto teoretickém výpočtu dochází pouze ke změně vyzařovaného spektra na hodnotu S/P = 1,65. Všechny ostatní změny, jako například vyzařovací charakteristika, byly zanedbány. V reálné aplikaci se samozřejmě všechny parametry změny, ovšem pro tento teoretický výpočet to lze zanedbat.

V tomto případě se už dostáváme k zajímavějším výsledkům. Na následujícím grafu pro skupinu 2, je dobře vidět rozdíl v mezopicky vnímaném jase mezi S/P = 0,65 a S/P = 1,65, což odpovídá vysokotlaké sodíkové výbojce a LED. Při stejném fotopickém jase dostáváme výrazné rozdíly, právě díky rozložení spektra, neboli poměru S/P.



Obr. 6.2: Rozdíl mezopického (S/P = 0,65 a S/P = 1,65) a fotopického jasu pro 2. skupinu

Při změně poměru S/P tedy dochází ke změnám až o desítky procent v hodnotách mezopicky vnímaného jasu. To je znázorněno v tab. 6.2. Nejmenší rozdíly nastávají při nižších zorných úhlech, což je způsobeno vyšší hladinou jasu. Čím vyšší je pak zorný úhel, tím větší rozdíl nastává mezi mezopicky vnímaným jasem vyzařované vysokotlakou sodíkovou výbojkou o hodnotě S/P = 0,65 a LED, zastupující poměr S/P = 1,65.

V této skupině, tedy ve 2. skupině dochází k největším rozdílům, jelikož se zde dosahuje nejnižších hodnot jasu, nezapočítáváme-li 1. skupinu.

Zorný úhel (°)	2	5	10	20	30	45	60
Rozdíl (%)	19	22	22	22	24	27	29

Tab. 6.2: Změna hodnoty mezopicky vnímaného jasu z hodnoty $S/P = 0,65$ na $S/P = 1,65$ v závislosti na velikosti zorného úhlu pro 2. skupinu

Při úhlu zorného pole 30° bychom naměřili o 24 % vyšší mezopicky vnímaný jas, ačkoliv pokud bychom měřili jas fotopický, vyšel by v obou případech stejně. To lze považovat za velmi výrazný rozdíl. To znamená, že při stejném světelném toku udávaného v lumenech bychom dostali výrazně rozdílné hodnoty mezopicky vnímaných jasů.

Abychom získali lepší představu, je v tabulce tab. 6.4 uveden přepočten na světelné toky uvedené v procentech při stejném mezopickém jasu a na příkon potřebný na osvětlení 1 km dvouproude komunikace o šířce 7 m. Je tedy vidět, že při použití LED nám stačí pouze 71 % světelného toku vysokotlaké výbojky, abychom dosáhli stejného mezopicky vnímaného jasu. To je výrazný rozdíl. Potřebný světelný tok v absolutních hodnotách potřebný pro výpočet příkonu je vypočten jako součin plochy komunikace a potřebné osvětlenosti. Osvětlenost lze vypočítat ze vzorce:

$$L \cdot \pi = \rho \cdot E_m \quad (25)$$

- L je jas
- E_m je požadovaná osvětlenost
- ρ je odrazivost vozovky

Odrazivost plochy je v tomto výpočtu dána hodnotou 0,13. Přepočten z požadováno světelného toku na příkon svítidla byl pak proveden pomocí měrného výkonu, jehož hodnoty jsou uvedeny v tab. 6.3.

Typ svítidla	Měrný výkon (lm/W)
Vysokotlaká sodíková výbojka	100
LED	110

Tab. 6.3: Měrné výkony vysokotlaké sodíkové výbojky a LED

Při použití LED klesne hodnota potřebného světelného toku na 71 %, abychom dosáhli stejného mezopicky vnímaného jasu. To je výrazný rozdíl, který se projeví v příkonu svítidla. Oproti vysokotlaké sodíkové výbojce lze tedy ušetřit 130 W na 1 km, což odpovídá 30 % úspoře energie.

Zdroj	Mezopický jas (cd/m^2)	Potřebný fotopický jas (cd/m^2)	Potřebný světelný tok (%)	Příkon na 1 km (W)	Příkon na 1 km (%)
Vysokotlaká sodíková výbojka	0,24	0,21	100	452	100
LED		0,27	71	322	70

Tab. 6.4: Porovnání potřebného světelného toku při použití dvou různých zdrojů pro zorný úhel 30° pro 2. skupinu

Nejedná se samozřejmě o přesný výpočet pro určitou situaci. Každý konkrétní výpočet je ovlivněn specifickými parametry použitého svítidla, které dále výpočet ovlivňují.

Pokud bychom brali v potaz jen osvětlení LED, tak rozdíl při návrhu s fotopickým jasnem a mezopicky vnímaným jasnem by činil 46 W, což odpovídá 11 % úspory energie.

V případě 3. skupiny, tedy skupiny, kde jsou zahrnuty komunikace s vyšší povolenou rychlostí, pak dostaneme nižší úspory, než v případě předchozí skupiny. Je to dáno vyšší úrovní fotopického jasů.

Dobře je to patrné na obr. 6.3: rozdíl mezopického ($s/p = 0,65$ a $s/p = 1,65$) a fotopického jasů pro 3. skupinu

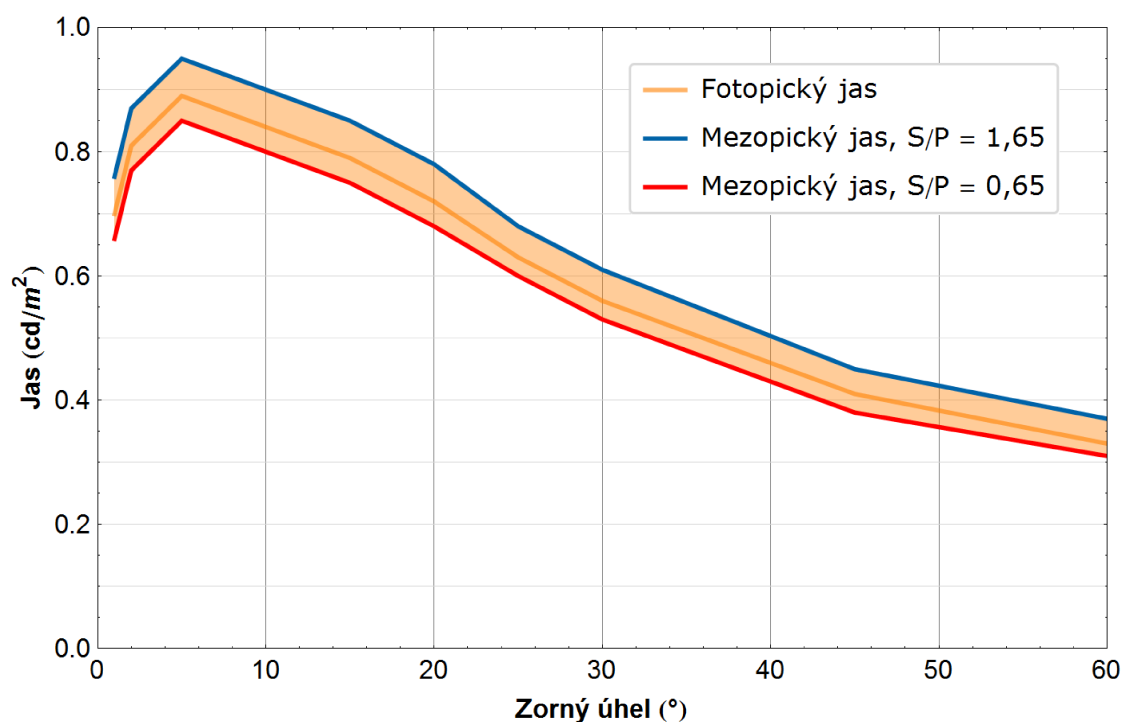
, kde ani při 60° zorného úhlu neklesne mezopicky vnímaný jas pod 0,3 cd/m².

Jak je patrné z tab. 6.5, opět největší rozdíl nastává pro největší úhly. Nejmenší procentuální rozdíl pak nastává pro zorný úhel 10° a nižší.

Zorný úhel (°)	2	5	10	20	30	45	60
Rozdíl (%)	13	15	13	14	16	19	22

Tab. 6.5: Změna hodnoty mezopicky vnímaného jasů z hodnoty $S/P = 0,65$ na $S/P = 1,65$ v závislosti na velikosti zorného úhlu pro skupinu 3

V případě zorného úhlu 30° pak dostáváme procentuální rozdíl 16 %. Což je oproti předchozí skupině, tedy 2. skupině, rozdíl 8 % bodů. Stále se jedná o výrazný rozdíl.



Obr. 6.3: Rozdíl mezopického ($S/P = 0,65$ a $S/P = 1,65$) a fotopického jasů pro 3. skupinu

Opět pro lepší představu zde přikládám tabulku, ve které jsou uvedené světelné toky v procentech potřebné pro dosažení stejné úrovně mezopicky vnímaného jasu, jak pro LED, tak pro vysokotlakou sodíkovou výbojku, a také potřebné příkony svítidel na 1 km komunikace, které v této skupině jsou podstatně vyšší.

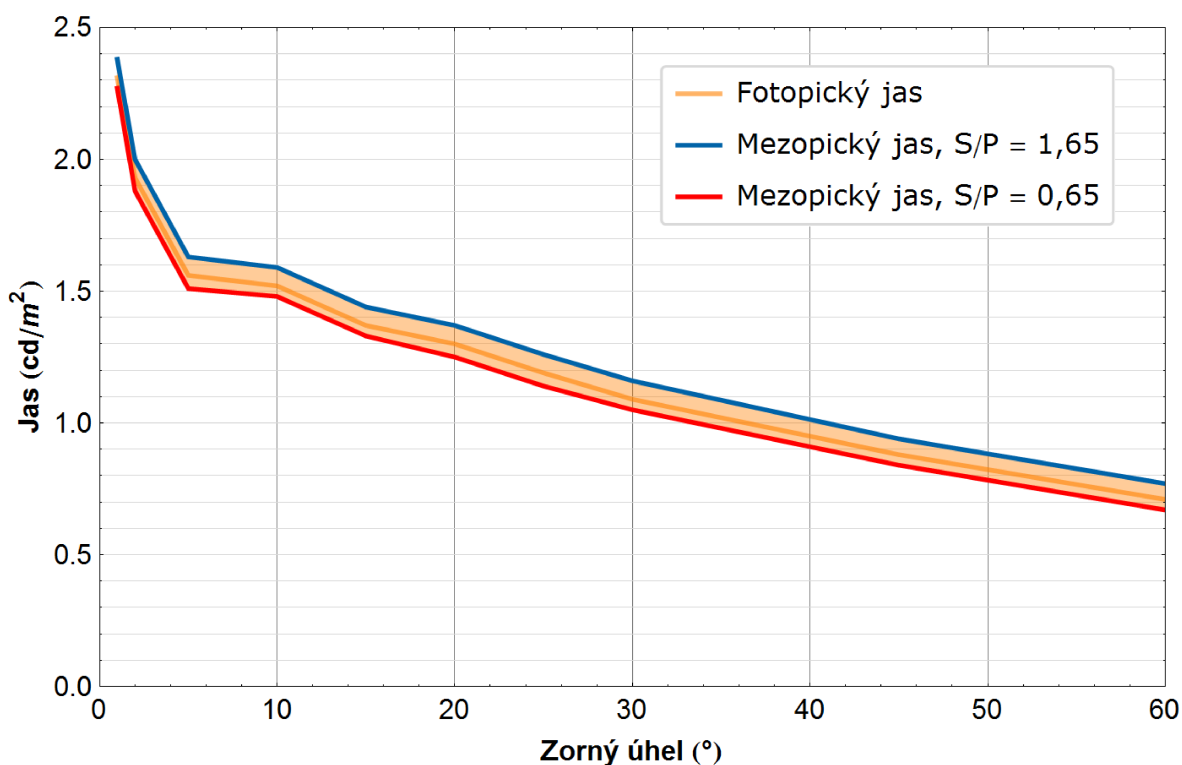
Zdroj	Mezopický jas (cd/m ²)	Potřebný fotopický jas (cd/m ²)	Potřebný světelný tok (%)	Příkon na 1 km (W)	Příkon na 1 km (%)
Vysokotlaká sodíková výbojka	0,53	0,56	100	947	100
LED		0,48	86	737	78

Tab. 6.6: Porovnání potřebného světelného toku při použití dvou různých zdrojů pro zorný úhel 30° pro 3. skupinu

Opět vidíme úsporu, která činí 14 % světelného toku. Oproti vysokotlaké sodíkové výbojce nám při použití LED stačí pouze 86 % světelného toku. V přepočtu na výkon činí rozdíl 210 W, což odpovídá 22 %.

Pokud bychom opět porovnávali příkon při aplikování pouze LED soustavy navrhované při fotopickém a mezopickém jasu, dostali bychom rozdíl 78 W na kilometr, což odpovídá úspoře necelých 10 % energie.

Nejmenší rozdíly v mezopicky vnímaných jasech nastávají ve 4. skupině. Jedná se o skupinu, kde je nutné dosáhnout vysokých jasů. V tomto případě ani při zorném úhlu 60° neklesne fotopický jas pod úroveň 0,6 cd/m².



Obr. 6.4: Rozdíl mezopického (S/P = 0,65 a S/P = 1,65) a fotopického jasu pro 4. skupinu

Při 30° zorného úhlu je rozdíl mezopicky vnímaného jasu mezi vysokotlakou výbojkou o hodnotě S/P = 0,65 a bílou LED o hodnotě S/P = 1,65 oproti předchozím skupinám menší. Jedná se o hodnotu 10 %, což je opět o 8 procentních bodů méně, než u předchozí 3. skupiny.

Zorný úhel (°)	2	5	10	20	30	45	60
Rozdíl (%)	6	8	8	9	10	12	14

Tab. 6.7: Změna hodnoty mezopicky vnímaného jasu z hodnoty S/P = 0,65 na S/P = 1,65 v závislosti na velikosti zorného úhlu pro skupinu 4

Podíváme-li se na to opět z pohledu světelného toku, který je nutný, abychom dostali stejný mezopicky vnímaný jas, zjistíme, že v případě LED jsme na 90 % hodnotě světelného toku oproti vysokotlaké výbojce. Při přepočtu na požadovaný příkon dostáváme hodnotu rozdílu 337 W, odpovídající 18 % úspory energie. V tomto případě již hraje velkou roli i vyšší měrný výkon LED svítidel.

Rozdíl při aplikování pouze LED soustavy, ovšem jednou při výpočtu s fotopickým jasem, podruhé s jasem mezopicky vnímaným činí necelých 7 %.

Zdroj	Mezopický jas (cd/m ²)	Potřebný fotopický jas (cd/m ²)	Potřebný světelný tok (%)	Příkon na 1 km (W)	Příkon na 1 km (%)
Vysokotlaká sodíková výbojka	1,05	1,09	100	1843	100
LED		0,98	90	1506	82

Tab. 6.8: Porovnání potřebného světelného toku při použití dvou různých zdrojů pro zorný úhel 30° pro 4. skupinu

Z výše uvedených výpočtů a vypočtených hodnot je zřejmé, že při použití matematického modelu mezopického vidění MES2 je možné snížit světelný tok, tedy i příkon svítidla LED, na nižší hodnoty fotopického jasu až o desítky procent, a přitom pro oko bude výsledek stejný, jako bychom komunikaci osvětlovali nesníženým světelným tokem, ovšem sodíkovou výbojkou.

Největší možná úspora energie je v našem případě ve 2. skupině, která se vyznačuje nejnižší hladinou fotopického jasu z osvětlených ulic. Pokud bychom počítali s adaptačním polem v oblasti 30° zorného úhlu, je možné snížit světelný tok až o necelých 30 %, v případě použití LED s hodnotou S/P = 1,65.

V případě třetí skupiny je to ovšem už nižší pokles, přesto se nejedná o malé číslo. Světelný tok lze snížit při zachování mezopicky vnímaného jasu až o 14 % což znamená zmenšení příkonu o 22 %. V případě třetí skupiny lze snížit světelný tok oproti toku sodíkové vysokotlaké výbojky o 10 %, což odpovídá 18 % snížení příkonu svítidla.

Jedná se tedy o značné energetické úspory. V reálné aplikaci je ovšem ještě nutné počítat se specifickými parametry svítidla, s jeho vyzařovací charakteristikou a s celkovou situací pro danou komunikaci.

Závěr

Citlivost zraku je v šeru velmi odlišná oproti stavu za dne, ovšem dlouhou dobu se jí nevěnovala pozornost. Při uvedení problematiky mezopického vidění by mohlo ovšem dojít k velkým úsporám, především u zdrojů, které vyzařují spíše v modrých vlnových délkách spektra, na které je lidské oko v šeru citlivější.

Teprve až v devadesátých letech vznikly první modely mezopického vidění. Nejprve USP, poté ve spolupráci několika organizací z celé Evropy i model MOVE. Výsledky obou modelů ovšem spolu nekorespondovaly a hledaly se proto další a přesnější modely, které by mohly být použitelné v praktickém měření. Modely MES1 a MES2 jsou již považovány za přesnější, především druhý jmenovaný, který je mezinárodní komisí doporučován pro praktické využití.

Ačkoliv je jeho výpočet založený na iteraci dvou vzorců snadný, stále ho nelze uvést do praxe. Je to způsobeno nejasnou definicí pojmu adaptačního pole, které je uvedeno v dokumentu mezinárodní komise pro osvětlování CIE, který se tímto tématem zabývá. Tento pojem je předmětem mnoha výzkumných projektů, včetně této práce. Ovšem stále nebylo zjištěno, na jakou plochu se lidské oko adaptuje. Stále neznáme tvar, velikost ani umístění středu adaptačního pole. Jak bylo zjištěno v praktické části, hodnota jasu je velmi proměnlivá především na velikost pole, ovšem i na umístění jeho středu.

Tématem praktické části této práce bylo ověření velikosti jasu na velikosti a tvaru adaptačního pole. Měření probíhalo na několika komunikacích v Praze. Získaná data pak byla zanalyzována a zpracována.

Na základě naměřených zpracovaných dat bylo možné rozdělit měřené komunikace do čtyř skupin, které měly stejné průběhy závislostí jasu na velikosti adaptačního pole. Do první skupiny spadají komunikace neosvětlené. Druhá skupina komunikací se vyznačovala maximální povolenou rychlostí 50 km/h. Komunikace byly lemovány parkujícími auty, veřejnou zelení a chodníky. Třetí skupina obsahuje dopravně důležité komunikace s vyšší povolenou rychlostí a čtvrtá případy, kdy je potřeba vysokého jasu, kvůli kombinaci vysoké hustoty dopravy a přítomnosti autobusových zastávek či chodníků.

Hodnoty jasu se analyzovaly pro zorné úhly 1° až 60° a také pro pole tvaru binokulárního vidění. Při zpracování bylo zjištěno, že velikost adaptačního pole musí být větší než 10° zorného úhlu, jelikož při nízkých úhlech velmi záleželo, kam se umístí střed pole. Hodnoty jasu se lišily o desítky až stovky procent, jen při nepatrném posunu. Proto jsou výsledky zpracovávány a komentovány především pro úhly vyšší než 10° .

Bylo zjištěno, že s rostoucím úhlem zorného pole 2., 3. a 4. skupiny klesá hodnota fotopického, tedy i mezopického jasu. V případě 3. a 4. skupiny činí rozdíl v rozmezí

10° - 30° v průměru zhruba 30 %. V případě 2. skupiny pokles činil 20 %. Průběh první skupiny, tedy neosvětlených komunikací, je odlišných od zbylých skupin a klesající trend nastává až od 15°. Je to dáno tmavým pozadím a osvětleným středem silnice pouze reflektory automobilu.

Z pohledu binokulárního vidění, které je nejdůležitější oblastí zorného pole, vycházely hodnoty jasu odpovídající zornému úhlu 45° až 60° stupňů. Zajímavým zjištěním je, že v případě 2. skupiny vycházely hodnoty pro binokulární oblast shodně jako pro oblast zorného úhlu 45°. Ovšem stále nevíme, zda oblast binokulárního vidění hraje stejnou roli, jako v případě vidění, i v adaptaci.

Naměřená a zpracovaná data byla dále použita k výpočtům energetické náročnosti pro každou skupinu zvlášť. Výpočty se pohybují v teoretické rovině. Pro přesné výsledky bychom museli znát všechny parametry svítidel, použité pro danou situaci. V této práci je porovnáván potřebný světelný tok a příkon svítidel na 1 km komunikace široké 7 metrů mezi vysokotlakou sodíkovou výbojkou a bílou LED v podmínkách mezopického vidění. Bílá LED na rozdíl od výbojky vyzařuje více v modrých vlnových délkách.

Největší potenciální úspora je u 2. skupiny. Je to způsobeno nižší úrovní jasu, tedy větším posunem citlivosti zraku do kratších vlnových délek. V případě bílé LED je možné snížit světelný tok až o 29 %, při zachování stejné hodnoty mezopicky vnímaného jasu v porovnání s vysokotlakou výbojkou. To odpovídá úspoře 30 % energie, v absolutních hodnotách 130 W na 1 km. Jedná se tedy o velkou potenciální úsporu energie.

V případě třetí skupiny se jedná o potenciální pokles světelného toku o 14 %, což je dáno už vyšší hladinou jasu. Pokud tento stav přepočítáme na příkon, jedná se snížení výkonu 210 W na 1 km délky komunikace. To odpovídá 22 % snížení příkonu. V případě poslední 4. skupiny činí teoretický pokles světelného toku 10 %, to odpovídá rozdílu v příkonu 337 W, tedy 18 %.

Za přínos této práce považuji získání dat a následné zpracování do závislostí na zorném úhlu. Díky tomu bylo možné rozdělit komunikace do čtyř kategorií podle naměřených průběhů. Data byla následně zpracována z pohledu vlivu okolního jasu. Díky reálným datům bylo také možné vypočítat potenciální úsporu energie pro každou skupinu zvlášť za použití znalostí mezopického vidění.

Citovaná literatura

1. History of lighting. [Online] <http://www.historyoflighting.net/>.
2. Synek, Svatopluk a Skorkovská, Šárka. *Fyziologie oka a vidění*. 1. vyd. Praha : Grada, 2004. 93 s. ISBN 80-247-0786-1.
3. The Organization of the Retina and Visual System. *Webvision*. [Online] <http://webvision.med.utah.edu/>.
4. Horáková, Hedvika. *Fyziologické změny oka ve stáří*. Brno, 2007. Bakalářská práce. Maysarykova univerzita.
5. Mann, Michael D. Web site of Michael D. Mann, Ph.D., Professor Emeritus of Cellular and Integrative Physiology. [Online] <http://michaeldmann.net/>.
6. Habel, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha : FCC Public, 2013. 622 s. ISBN 978-80-86534-21-3.
7. Green, Marc. Visual Expert. [Online] <http://www.visualexpert.com/Resources/nightvision.html>.
8. Dvořáček, Vladimír. Světelné zdroje - vysokotlaké sodíkové výbojky. *Světlo*. 2009, 3., ISSN 1212-0812
9. *CIE 191-2010 Recommended system for mesopic photometry based on visual performance*. Vienna: CIE Central Bureau, 2010. ISBN 978-390-1906-886.
10. Puolakka, Marjukka. Use of mesopic photometry and mesopic dimensioning in outdoor lighting. 2012.
11. CORM . *An Experimental Approach to a Definition of the Mesopic Adaptation Field*. [Online] 2012. http://www.cormusa.org/uploads/2012_2.4_Uchida_CORM_2012_Mesopic_luminance.pdf.
12. *Luminance meter for photopic and scotopic measurements in the mesopic range*. M, Shpak a al, et. 25, IOP Publishing, 2014. ISSN 1361-6501.
13. *Defining the visual adaptation field for mesopic photometry: Does surrounding luminance affect peripheral adaptation?* Ohno, Y a Uchida, T. 46, Sage journals, 2014. ISSN 1477-0938.
14. ČSN CEN/TR 13201-1 *Osvětlení pozemních komunikací - Část 1: Výběr tříd osvětlení*. Praha : Český normalizační institut, 2006.
15. ČSN EN 13201-2 *Osvětlení pozemních komunikací - Část 2: Výkonnostní požadavky*. Praha : Český normalizační institut, 2004.
16. Ware, Colin. *Information Visualization: Perception for Design*. San Francisco, 2004. ISBN 1-55860-819-2.
17. Tomáš, Jakub. *Návrh osvětlovací soustavy komunikace*. Praha, 2013. ČVUT v Praze.

18. Fontana, Josef. *Funkce buněk a lidského těla*. Multimediální scripta, Univerzita Karlova, 3. lékařská fakulta. [Online] <http://fblt.cz/skripta/xiii-smysly/1-zrakovy-system/>.
19. MIT Media Lab. [Online] http://alumni.media.mit.edu/~faaborg/research/cornell/cg_fovealvision_site/site/background.htm.

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1.1: Popis oka [2]	10
Obr. 1.2: Buněčná struktura sítnice [2]	11
Obr. 1.3: Rozložení fotoreceptorů v oku	12
Obr. 1.4: Průběh citlivosti oka při adaptaci na tmu.....	13
Obr. 1.5: Křivky fotopického a skotopického vidění.....	15
Obr. 1.6: Průběh absolutních spektrálních účinků záření pro fotopické K (V) a skotopické K' (V) podmínky.....	17
Obr. 2.1: Průběhy poměrné spektrální citlivost pro vybrané adaptační jasy při použití metodiky MES2	18
Obr. 2.2: Poměrné spektrální rozložení sodíkové vysokotlaké výbojky a poměrná spektrální citlivosti oka při fotopických a skotopických podmínkách a při adaptačním jasu 0,3 cd/m ²	19
Obr. 2.3: Poměrné spektrální rozložení bílé LED a poměrná spektrální citlivosti oka při fotopických a skotopických podmínkách a při adaptačním jasu 0,3 cd/m ²	21
Obr. 3.1: Porovnání mezopických modelů.	25
Obr. 3.2: Průběhy absolutních hodnot světelných účinků záření při fotopických, skotopických a vybraných mezopických podmínkách podle modelu MES2.	28
Obr. 3.3: Ukázka optické části M/P metru (neboli dvoukanalového jasoměru) [6]	30
Obr. 3.4: Příklad použití M/P metru: Měření mezopické osvětlenosti [5].....	31
Obr. 3.5: Ukázka, jak se může měnit adaptační jas pro různá adaptační pole	31
Obr. 5.1: Popis zraku v závislosti na pozorovacím úhlu [13].....	36
Obr. 5.2: Ukázka výsledného snímku s vyznačenými plochami odpovídajícím zorným úhlem 1° až 90°.....	37
Obr. 5.3: Binokulární vidění [10]	37
Obr. 5.4: Naznačení lichoběžníkové oblasti.....	38
Obr. 5.5: Canon EOS 350D	38
Obr. 5.6: Příklady všech čtyř skupin.....	39
Obr. 5.7: Přiblížený střed kružnic.	41
Obr. 5.8: Závislost fotopického jasu na úhlu zorného pole pro 4. skupinu, tedy nejvíce osvětlené komunikace	43
Obr. 5.9: Závislost fotopického jasu na úhlu zorného pole pro 3. skupinu.	44
Obr. 5.10: Závislost fotopického jasu na úhlu zorného pole pro 2. skupinu.	44
Obr. 5.11: Závislost fotopického jasu na úhlu zorného pole pro 1. skupinu, tedy neosvětlené komunikace	45
Obr. 5.12: Závislost fotopického jasu na zorném úhlu pro všechny skupiny.....	46
Obr. 5.13: Fotografie se zvýrazněnou plochou binokulárního vidění	46
Obr. 5.14: Průběh rozdílů v procentech mezi scénou osvětlenou i potkávacími světly a bez potkávacích světel pro zorné úhly od 1° až po 60°.....	49
Obr. 5.15: Teoretický průběh příkladu 2. skupiny. [11]	49
Obr. 6.1: Průběh fotopické i mezopického jasu pro vybraná měření.....	51

Obr. 6.2: Rozdíl mezopického ($S/P = 0,65$ a $S/P = 1,65$) a fotopického jasu pro 2. skupinu.	52
Obr. 6.3: Rozdíl mezopického ($S/P = 0,65$ a $S/P = 1,65$) a fotopického jasu pro 3. skupinu.	54
Obr. 6.4: Rozdíl mezopického ($S/P = 0,65$ a $S/P = 1,65$) a fotopického jasu pro 4. skupinu.	55

Tab. 1.1: Přibližné přiřazení konkrétních hodnot jasů ke skutečným situacím [6]	16
Tab. 2.1: Světelný tok vysokotlaké sodíkové výbojky vyjádřeného v poměrných jednotkách vůči fotopickému stavu při různých mezopických jasech	20
Tab. 3.1: Procentuální rozdíly mezi fotopickým a vnímaným mezopickým jasem pro světelné zdroje s různým poměrem S/P (podle modelu MES2) [9]	29
Tab. 4.1: Výňatek tabulky z ČSN EN 13201-2. [14]	34
Tab. 4.2: Třídy osvětlení CE [14]	35
Tab. 4.3: Třídy osvětlení S [14]	35
Tab. 5.1: Seznam měřených ulic i se zařazením do skupin	42
Tab. 5.2: Porovnání jasů v oblasti binokulárního vidění a zorného úhlu 30° , 45° a 60°	47
Tab. 5.3: Procentní hodnota jasu okolí oproti hlavní části - lichoběžníku silnice	48
Tab. 5.4: Porovnání jasů s potkávacími světly a bez světél	48
Tab. 6.1: Rozdíly mezi fotopickým a mezopickým jasem	51
Tab. 6.2: Změna hodnoty mezopicky vnímaného jasu z hodnoty $S/P = 0,65$ na $S/P = 1,65$ v závislosti na velikosti zorného úhlu pro 2. skupinu	53
Tab. 6.3: Měrné výkony vysokotlaké sodíkové výbojky a LED	53
Tab. 6.4: Porovnání potřebného světelného toku při použití dvou různých zdrojů pro zorný úhel 30° pro 2. skupinu	53
Tab. 6.5: Změna hodnoty mezopicky vnímaného jasu z hodnoty $S/P = 0,65$ na $S/P = 1,65$ v závislosti na velikosti zorného úhlu pro skupinu 3.	54
Tab. 6.6: Porovnání potřebného světelného toku při použití dvou různých zdrojů pro zorný úhel 30° pro 3. skupinu	55
Tab. 6.7: Změna hodnoty mezopicky vnímaného jasu z hodnoty $S/P = 0,65$ na $S/P = 1,65$ v závislosti na velikosti zorného úhlu pro skupinu 4.	56
Tab. 6.8: Porovnání potřebného světelného toku při použití dvou různých zdrojů pro zorný úhel 30° pro 3. skupinu	56