

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STAVEBÍ

KATEDRA KONSTRUKCE POZEMNÍCH STAVEB



INTEGRATIVNÍ OSVĚTLENÍ V BUDOVÁCH – METODY MĚŘENÍ A HODNOCENÍ NEOBRAZOVÝCH ÚČINKŮ SVĚTLA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval:

Jan Kraus

Vedoucí Práce:

Ing. arch. Lenka Maierová, Ph. D.

2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kraus Jméno: Jan Osobní číslo: 477472Zadávající katedra: Katedra konstrukcí pozemních stavebStudijní program: Stavební inženýrstvíStudijní obor: Příprava, realizace a provoz staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Integrativní osvětlení v budovách – Metody měření a hodnocení neobrazových účinků světlaNázev bakalářské práce anglicky: Integrative Lighting in Buildings – Measuring and Evaluating Non-Image-Forming Effects of Light

Pokyny pro vypracování:

Integrativní osvětlení je oficiální výraz pro osvětlení, které je navrženo s ohledem na obrazové i neobrazové vnímání světla. Protože tento typ osvětlení ovlivňuje i fyziologické procesy v organismu, požadavky na měření světla se liší od klasických metrologických postupů. Práce se zabývá měřením a vyhodnocením kvality světelného prostředí z hlediska jeho vlivu na fyziologické procesy v organismu.

Teoretická část: Z literatury zpracujte rešerši požadavků na hodnocení účinků integrativního osvětlení a jejich měření v prostoru.


Praktická část: Na základě poznatků z teoretické části změřte světelné prostředí ve několika variantách osvětleného prostoru. Vyhodnoťte a porovnejte získané hodnoty z hlediska neobrazového vnímání světla.

Seznam doporučené literatury:

- Lucas, et al. Measuring and using light in the melanopsin age. Trends in Neuroscience 37(1): 1-9., 2014.
- CIE. Stanovisko CIE k neobrazovým účinkům světla - Doporučení správného světla ve správný čas, 2. vydání (2019), překlad V. Dvořáček. <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/stanovisko-cie-k-neobrazovym-ucinkum-svetla-5029>
- CIE S 026 α -opic Toolbox. 2020. <http://cie.co.at/news/launch-cie-s-026-toolbox-and-user-guide> doi: 10.25039/S026.2018.TB.
- Schlangen & Price. The lighting environment, its metrology and non-visual responses. Frontiers in Neuroscience 2020. <https://osf.io/j7m25>

Jméno vedoucího bakalářské práce: ing. arch. Lenka Maierová, Ph.D.Datum zadání bakalářské práce: 15. 2. 2021Termín odevzdání bakalářské práce: 16. 5. 2021

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku


Podpis vedoucího práce
Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

15. 2. 2021
Datum převzetí zadání
Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a podkladů

V Kutné Hoře dne 16. 5. 2021

Podpis:

Jan Kraus

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval své vedoucí bakalářské práce paní Ing. arch. Lence Maierové, Ph.D. za její odborné konzultace a rady v průběhu zpracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu a trpělivost během bakalářského studia.

ANOTACE

Nové poznatky o nevizuálních účincích světla poukazují na vliv světla na psychologii a fyziologii člověka. Světlo je stimulem regulace cirkadiánního rytmu a dalších významných biologických procesů v lidském těle. V rámci této práce je řešeno hodnocení světelného prostředí podle nového standardu CIE pro hodnocení integrativního osvětlení. Práce se skládá z teoretické rešerše a praktické části složené z měření světelných spekter v předmětné učebně a výpočtu biologické účinnosti pomocí oficiálního nástroje od CIE. V rámci výpočtové části bylo dále provedeno porovnání naměřených hodnot na horizontální a vertikální rovině a na základě tohoto porovnání byla stanovena kritéria ovlivňující rozdíl ftopické a melanopické osvětlenosti mezi horizontální a vertikální rovinou.

ANNOTATION

Latest research pointed out some of non-visual effect of light on human psychology and physiology. It is known that light is a stimulus, that can regulate circadian rhythm and other important biological rhythms. This thesis assesses the light environment in accordance with the new standard by CIE for assessment of integrative lighting. The thesis is divided into two parts. The first one is theoretical research and the second is experimental part, that includes measurement and calculations. The experimental part investigates the illuminance difference between horizontal and vertical surface. As a result of measurement and calculations, the significant parameters that determine the difference between photopic and melanopic illuminance were described.

KLÍČOVÁ SLOVA

Denní osvětlení, Integrativní osvětlení, Nevizuální vnímání světla, Melanopsin, Světelné spektrum, Umělé osvětlení

KEYWORDS

Artificial lighting, Daylight, Integrative lighting, Light spectrum, Melanopsin, Non-visual responses to light

OBSAH

1. Úvod.....	7
2. Teoretická část.....	9
2.1 Světlo	9
2.1.1 Viditelné spektrum	9
2.1.2 Význam denního světla pro člověka.....	11
2.1.3 Využití umělého osvětlení	12
2.2 Biologie člověka z hlediska světla.....	14
2.2.1 Lidské oko	14
2.2.2 Spektrální citlivost	15
2.2.3 Vliv neobrazového vnímání světla.....	17
2.3 Parametry světla.....	18
2.3.1 Parametry světla využívané v technické praxi	18
2.3.2 Činitel denní osvětlenosti	21
2.3.3 Integrativní osvětlení.....	22
2.3.4 Požadavky na umělé osvětlení	22
3. Praktická část.....	24
3.1 Popis učebny a světelných scén	25
3.1.1 Světelná scéna 1: denní osvětlení	27
3.1.2 Světelná scéna 2: nepřímé osvětlení.....	28
3.1.3 Světelná scéna 3: přímé osvětlení.....	29
3.2 Postup měření a výpočtů.....	30
3.2.1 Měření	30
3.2.2 Výpočty	31
3.3 Výsledky měření	33
3.3.1 Porovnání světlených scén	33

3.3.2	Porovnání horizontální a vertikální osvětlenosti.....	36
3.3.3	Porovnání ftopické a melanopické osvětlenosti	37
4.	Diskuse.....	40
4.1	Limity studie	41
5.	Závěr	42
	Seznam použité literatury.....	43
	Seznam obrázků.....	46
	Seznam tabulek.....	47

1. Úvod

K problematice světla jsem se dostal zejména v rámci studia na vysoké škole, a dále své znalosti rozvíjel v mém zaměstnání v oboru světelné techniky, kdy mě začala více zajímat otázka kvality vnitřního prostředí z hlediska denního a umělého osvětlení a vliv tohoto prostředí na psychologii a fyziologii člověka.

Předmětem této bakalářské práce je zkoumání osvětlenosti vertikální a horizontální roviny v různých světelných scénách, kdy je každá scéna osvětlena jiným způsobem. Předmětem zkoumání je pak učebna biologie Gymnázia U libeňského zámku. V učebně biologie je instalováno moderní integrativní osvětlení s přímým LED osvětlením a plnospektrálním nepřímým osvětlením, přičemž oba typy osvětlení mají vysoký činitel podání barev. První světelná scéna byla osvětlena pouze denním osvětlením, druhá pak pouze plnospektrálním nepřímým osvětlením a poslední třetí světelná scéna byla osvětlena pouze přímým LED osvětlením.

Současné normové požadavky pro návrh umělého osvětlení řeší zejména osvětlenost horizontálních pracovních ploch, v případě školních tabulí se pak navrhuje rovněž i na požadavky osvětlení na vertikální rovině. V normách však není ukotveno, jakého světelného prostředí bychom tímto osvětlením měli dosáhnout, jak by mělo působit na uživatele daného prostředí.

Zkoumání vychází z relativně nových poznatků o neobrazovém vnímání světla, kdy neuvažujeme světlo pouze jako zdroj obrazového vnímání. Z nových poznatků víme, že světlo je rovněž velmi důležité pro neobrazové vnímání světla. Dále se při zkoumání bere v úvahu, že uživatel většinu času netráví pohledem dolů na osvětlenou horizontální plochu, ale rozhlíží se po okolí. Předmětem zkoumání je tedy konkrétně porovnání hodnot naměřených na horizontální rovině představující pracovní plochu, a pro hodnoty na vertikální rovině v přibližné poloze oka uživatele. Dále budou v rámci zkoumání porovnány složky pro nevizuální vnímání světla mezi jednotlivými světelnými scénami.

Hypotéza zkoumání je, že hodnoty naměřené na vertikální rovině v poloze oka uživatele mají větší výpovědní hodnotu o vlivu prostředí na uživatele, budou však v porovnání s hodnotami na horizontální pracovní ploše nižší.

Další hypotézou je, že míra neobrazového vnímání světla bude výrazně vyšší při světelné scéně s denním osvětlením. Nejhorší hodnoty jsou očekávány v případě scény s přímým LED osvětlením. Co se týče porovnání složek pro neobrazové vnímání světla mezi horizontální a vertikální rovinou, předpokladem jsou vyšší hodnoty v případě horizontální roviny.

Cílem této bakalářské práce je tedy poukázat na příliš obecné a jednostranné uchopení návrhu osvětlení pracovních prostorů v normových požadavcích, které vnímají světlo jako prostředek k osvětlení předmětů, ale prozatím nereflektují současné vědecké poznatky o vlivu světla na biologické funkce člověka, jeho produktivitu a zdraví.

2. Teoretická část

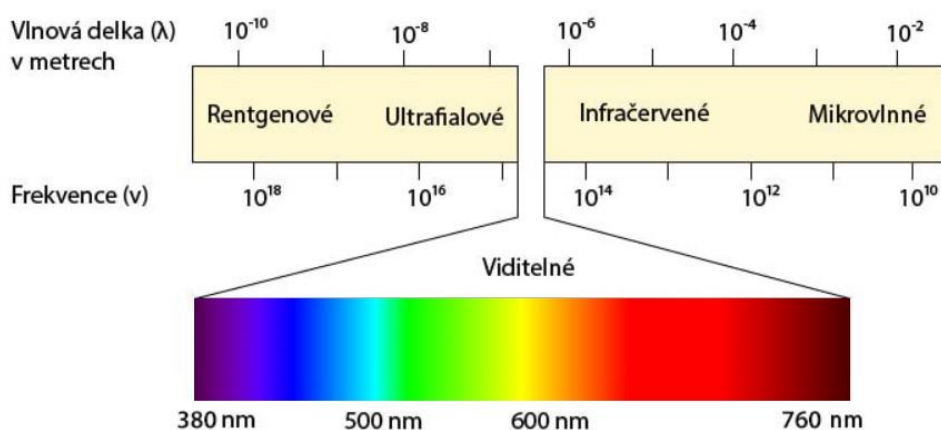
2.1 Světlo

Světlo je nezbytnou součástí našeho života a v dnešní době již pro každého z nás samozřejmostí. Největším a rovněž nejdůležitějším zdrojem světla pro většinu živého na Zemi je právě Slunce, které poskytuje energii nutnou pro život.

Z fyzikálního hlediska je světlo označováno jako elektromagnetické záření, které je schopno rozeznat lidské oko. Tuto viditelnou část elektromagnetického spektra označujeme též jako viditelné světlo a rozsah tohoto viditelného spektra se pohybuje v rozsahu vlnových délek 380 až 780 nm¹ a s mírnou odchylkou může být každým jedincem vnímán jinak. [1]

2.1.1 Viditelné spektrum

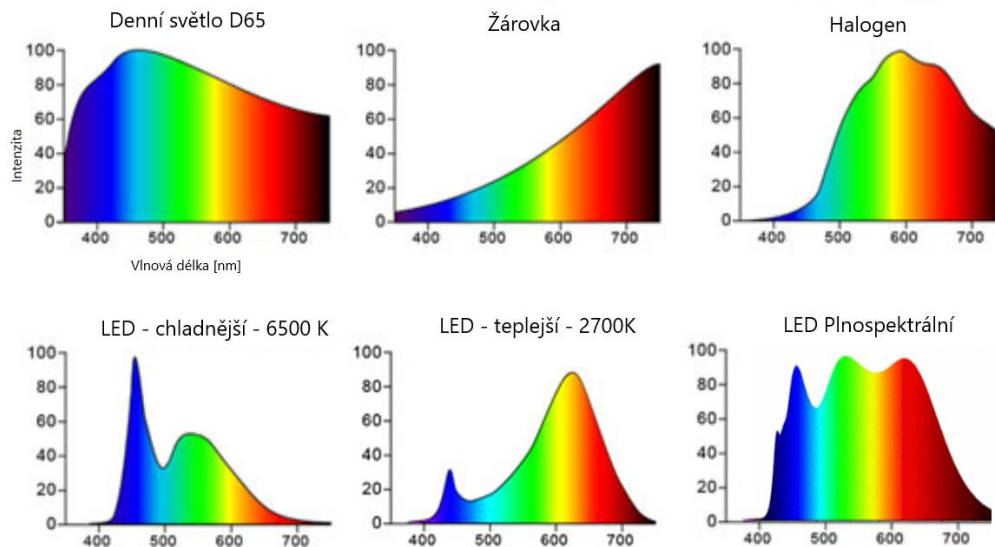
Viditelné spektrum se v rámci elektromagnetického spektra nachází mezi ultrafialovým zářením, dolní hranice kratších vlnových délek, a infračerveným zářením, které ohraničuje delší vlnové délky. Výsledná barva, kterou bude lidské oko u daného předmětu vnímat, závisí na tom, které vlnové délky povrch předmětu absorbuje a které odrazí. Výsledná barva předmětu odpovídá tedy odraženým, neabsorbovaným, vlnovým délkám.



Obr. 1 – Viditelné spektrum světla [2]

¹ Rozpětí viditelného spektra se může lišit v rámci různých zdrojů

To, jakým způsobem bude lidské oko vnímat jednotlivé barvy, dále závisí na intenzitě, jakou daný zdroj světla jednotlivé vlnové délky vyzařuje, což je znázorněno na obr. 2, kde můžeme vidět různé typy zdrojů světla a jejich intenzitu v závislosti na vlnových délkách.



Obr. 2 – Spektrální složení světla vybraných světelných zdrojů

Jak je z obr. 2 patrné, spektrální složení se liší zdroj od zdroje. Denní osvětlení je pro nás nejpřirozenějším zdrojem světla a obsahuje všechny vlnové délky o různých intenzitách. Nejvýraznější je ve spektru denního světla oblast kolem 450 až 480 nm, důležitost této oblasti, ale i ostatních složek spektra, pro člověka je dále popsána v kapitole 2.1.3. V kontrastu s denním světlem zde můžeme vidět spektrální složení běžné žárovky, kde je téměř eliminováno modré spektrum a výrazně potlačeno zelené spektrum. Dominantní složkou světelného spektra žárovky je právě červená barva ve vlnových délkách od 600 do 760 nm. Světelné spektrum žárovky můžeme připodobnit například ke světelnému spektru svíčky, s výjimkou vyššího potlačení zeleného spektra. Dále zde můžeme vidět spektrum halogenového svítidla, které bylo v minulosti využíváno například jako pouliční osvětlení. Zde je rovněž téměř eliminováno modré spektrum a nejvyšší intenzita v oblasti kolem 600 nm, která odpovídá žlutooranžové barvě.

V případě LED osvětlení je situace odlišná, jelikož v případě LED technologie máme možnost ovlivnit míru a intenzitu zastoupení jednotlivých složek světelného spektra. Na obrázku jsou zastoupena běžně využívaná LED svítidla. První znázorněné představuje LED svítidlo s vysokou teplotou chromatičnosti až 6500 K. Výsledný obrazový vjem tohoto svítidla je chladnější bílé světlo. U těchto svítidel jsou eliminovány krátké vlnové délky pod 400 nm, následuje strmý nárůst v oblasti kolem 450 nm s mírným poklesem a následně opětovným nárůstem v zelené složce spektra. Červené spektrum je zde výrazně potlačeno s rostoucí vlnovou délkou. Zde můžeme vidět zásadní rozdíl v porovnání s denním světlem. Například etalon denního světla D65, (standard CIE, rovnoměrně zatažená obloha) denní světlo o teplotě chromatičnosti 6500 K, která je shodná s porovnávaným LED svítidlem, má obsaženo spektrum všech vlnových délek. Naopak „teplejší“ LED osvětlení s nižší teplotou chromatičnosti má výrazně nižší intenzitu v oblasti modrého spektra, a naopak jsou zde posíleny vlnové délky v oblasti 600 až 650 nm. Jako poslední je zde znázorněno plnospektrální LED osvětlení. U tohoto typu svítidel si můžeme všimnout, že je nižší propad v intenzitě vlnových délek v oblasti 500 nm, který je typický pro běžná LED svítidla, a zároveň jsou zde hojně zastoupeny i delší vlnové délky červeného spektra. Tento typ LED svítidel se nejvíce přibližuje spektrálnímu složení běžného denního světla D65, nicméně důvodem, proč není v současnosti standardně využíván je zřejmě výrazně vyšší pořizovací cena v porovnání s běžnými LED svítidly.

2.1.2 Význam denního světla pro člověka

V minulosti, počínaje pravěkem, bylo Slunce nezbytným zdrojem světla pro tehdejšího člověka. Denní světlo bylo řídicím prvkem pro tehdejší život. Lidé pobývali v exteriéru prakticky od východu slunce do jeho západu. Do svých obydlí se uchýlovali zejména po západu slunce za účelem spánku, popř. v případě hrozby predátora nebo nepříznivého počasí. Osvětlení tehdejších obydlí bylo po objevu ohně možné pak např. dřevěnými loučemi nebo ohništi, ale zisk a výroba těchto zdrojů světla nebyla samozřejmostí v porovnání s dnešní dobou. Denní slunce bylo tehdy klíčové pro rytmizaci života. Lidé v pravěku díky slunci rozlišovali denní dobu, ale i se díky Slunci přizpůsobovali sezónním změnám.

Žádných velkých změn nedostála lidská civilizace ani v období středověku. I zde byl život řízen pohybem slunce po obloze. Lidé na venkově přes den obdělávali svá pole a po západu slunce věnovali čas odpočinku. Možnosti osvětlení byly, ale jejich ekonomická náročnost byla stále vysoká. Změna pak přichází až v období průmyslové revoluce, zejména pak v 19. století, kdy se z počátku století začal postupně využívat k osvětlení svítíplyn (směs plynů) a klesla i cenová dostupnost těchto zdrojů. Dále v tomto století byla rovněž vynalezena žárovka. V tomto období dochází k výraznému zvýšení urbanizace a společnost se začala postupně formovat k dnešnímu obrazu.

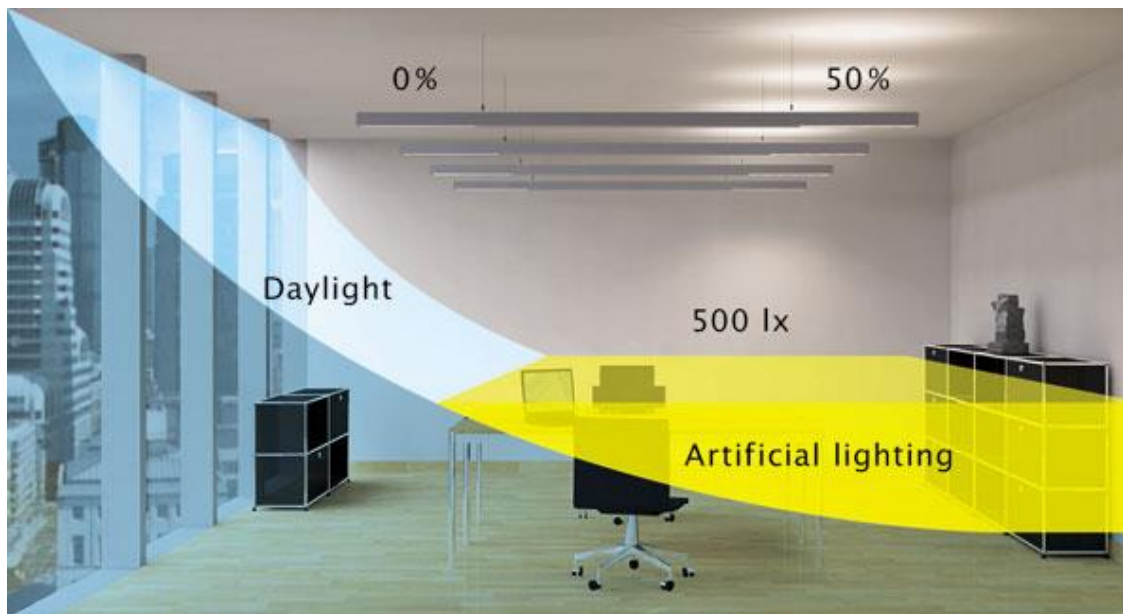


Obr. 3 Světlené prostředí ve zvolených historických obdobích [4]

Jak je z obr. 3 patrné, došlo k postupnému přesunu člověka z exteriéru z denního osvětlení do interiéru pod osvětlení umělé. Denní světlo přestalo postupně majoritně ovlivňovat délku našeho dne a lidé nyní mohou některé své aktivity plánovat nezávisle na denní době a přístupu denního světla. Nicméně se ukázalo, že lidské tělo je stále biologicky naladěno na původní, přirozený přísun světla, a cyklus dne a noci. Z tohoto hlediska může přísun umělého osvětlení v nočním čase porušit biologický rytmus člověka. [3] [4] [5]

2.1.3 Využití umělého osvětlení

Jak bylo popsáno v předchozích kapitolách, umělé osvětlení a jeho dostupnost nám umožňují vykonávat činnosti závislé na světle bez přístupu denního světla nebo můžeme například napomoci sdruženým osvětlením (současný příspěvek denního a umělého osvětlení, kdy však denní osvětlení stále převažuje) místnosti v její hloubce, kde bychom za normálních okolností nedosáhli požadovaného osvětlení, viz obr. 4.



Obr. 4 Sdružené osvětlení v interiéru [8]

Zároveň máme vícero způsobů, jak dosáhnout požadovaného osvětlení. Můžeme mít klasické celkové osvětlení prostoru, kdy je prostor rovnoměrně osvětlen v celé své ploše. V případě, že v určité části je zapotřebí intenzivnějšího osvětlení, se navrhuje osvětlení odstupňované. Dalším typem osvětlení je osvětlení místní a bodové, jehož funkcí je zvýšit osvětlenost na určité ploše. Sloučení výše zmíněných typů umělého osvětlení se nazývá kombinované osvětlení. Mimo jiné se rozlišuje umělé osvětlení i na základě směru osvětlení. Zde rozlišujeme dva typy osvětlení, a to přímé a nepřímé. Přímé osvětlení, jak už název napovídá, osvětluje danou plochu přímo, např. běžné osvětlení ve školních učebnách. Nepřímé osvětlení osvětluje plochu pomocí odrazu světla např. od stropu nebo stěny, čímž eliminujeme oslnění nebo tvorbu stínů. Nicméně je vždy důležitý vhodný návrh a následná volba světelného zdroje tak, aby byly splněny všechny požadavky světleného prostředí.

Nicméně bychom neměli volbu svítidel podceňovat a rovněž by nemělo docházet k jejich nadužívání zejména v nočních hodinách, jelikož se na světlo váže řada biologických rytmů v našem těle. Zejména expozice modrému světlu po západu Slunce je pro nás nepřirozeným jevem. Nejedná se však zdaleka jen o dopad na biologické rytmy člověka. Tím, že nyní je v trendu osvětlování venkovních prostorů, historických objektů a jiných turistických cílů, výrazně stoupá míra světelného znečištění nejen v České republice, ale i globálně. Toto zbytečné nadužívání umělého osvětlení ovlivňuje přilehlé

ekosystémy a v nich vyskytující se zvířata a hmyz, kteří jsou stejně jako lidé zvyklí na pravidelný cyklus dne a noci, nikoliv na nepřetržitou expozici bílému světlu, které je typické pro denní světlo. Konkrétní vliv umělého osvětlení bude rozebrán v následující kapitole. [10] [11]

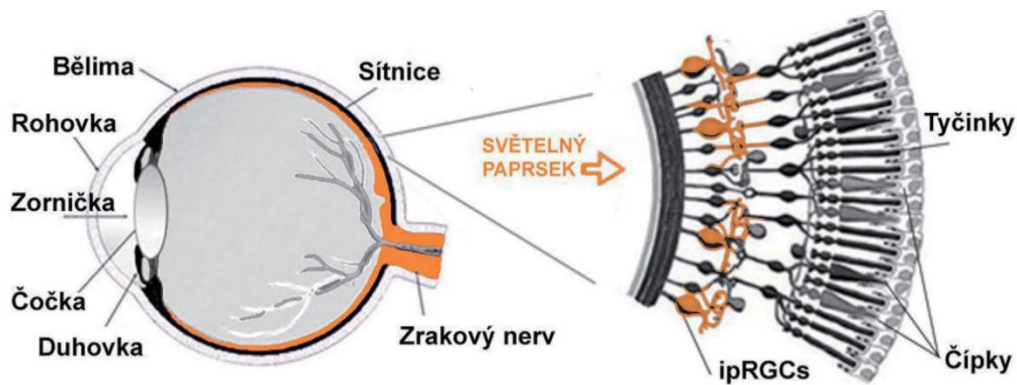
2.2 Biologie člověka z hlediska světla

Jak bylo popsáno v předchozích kapitolách, světlo hraje velmi důležitou roli v životě člověka. V historii bylo pro člověka nezbytné a zejména ohraničovalo rozdíl mezi dnem a nocí. S postupem dostupnosti umělého osvětlení dochází k odbourání tohoto omezení, s čímž ale souvisí riziko rozhození biologických hodin člověka, též označovaných jako cirkadiánní rytmus. Výzkumy v minulosti prokázaly, že cirkadiánní rytmus je řízen světlem, a tudíž nevhodné vystavování se světlu může vést k narušení pravidelného biologického cyklu jednotlivce.

2.2.1 Lidské oko

Lidské oko je poměrně složitým mechanismem. Pro účely této bakalářské práce budou popsány pouze části důležité pro pochopení popisované látky, a to bez zacházení do podrobností, které náleží jiným oborům. Lidské oko nám umožňuje vnímat vizuální a nevizuální vjemy. Mezi vizuální vjemy řadíme možnost vidět prostor, detaily, barvy a zachytit pohyb. Na základě těchto vjemů jsme pak schopni se v daném prostředí orientovat. Termínem nevizuálních vjemů rozumíme celou škálu biologických reakcí našeho těla ve spojení se světlem. Této části se budeme podrobně věnovat v kapitole 2.2.3 Vliv neobrazového vnímání světla.

Vnímání světla v lidském oku zajišťují světločivné buňky, které se nachází uvnitř oka na sítnici. Receptory nacházející se v sítnici zachycují světlo, které projde čočkou a přemění ho na elektrické impulzy, které čteme pomocí mozku. Přeměna světelné energie na signál, který putuje do mozku, probíhá v proteinech citlivých na světlo, zvaných opsiny, které jsou obsaženy v jednotlivých receptorech. Receptory, které nám umožňují vnímání světla nazýváme fotoreceptory a dále je dělíme na tyčinky a čípky. K těmto dlouho známým typům fotoreceptorů se na počátku tisíciletí přidal další a to ipRGCs, který bude rozebrán dále v rámci neobrazového vnímání světla. [4]

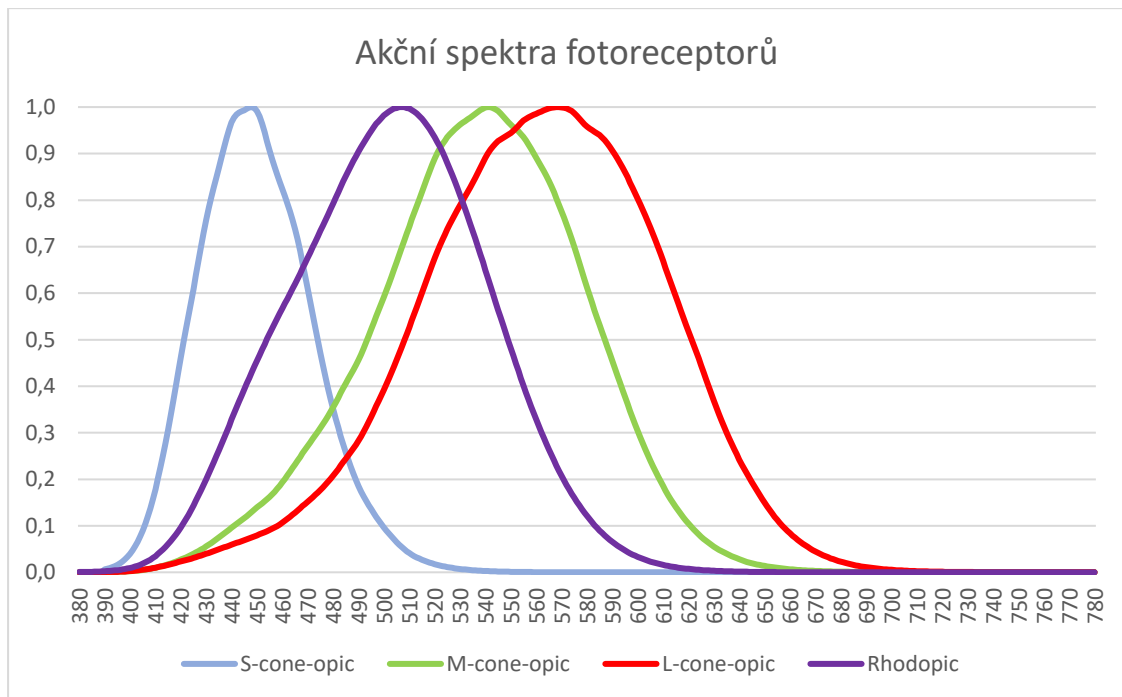


Obr. 5 Schématický řez lidským okem, detail sítnice se třemi typy fotoreceptorů [14]

Aktivace tyčinek a čípků je závislá na množství světelného záření, které dopadá na sítnici. Na základě aktivace těchto fotoreceptorů dále rozlišuje různé typy vidění, a to skotopické, mezopické a fotopické vidění. V případě skotopického vidění jsou aktivovány pouze tyčinky, tj. oko je adaptováno na tmu. K tomu dochází při velice nízké osvětlenosti. Při vyšší osvětlenosti, kdy jsou stále aktivní tyčinky, ale již začaly reagovat i čípky, dojde ke stavu mezopického vidění. Fotopické vidění nastává, když dosáhneme dostatečné osvětlenosti, kdy již tyčinky přestávají reagovat a tuto roli plně převzou čípky, které dále zajišťují barevné vidění. [4][13]

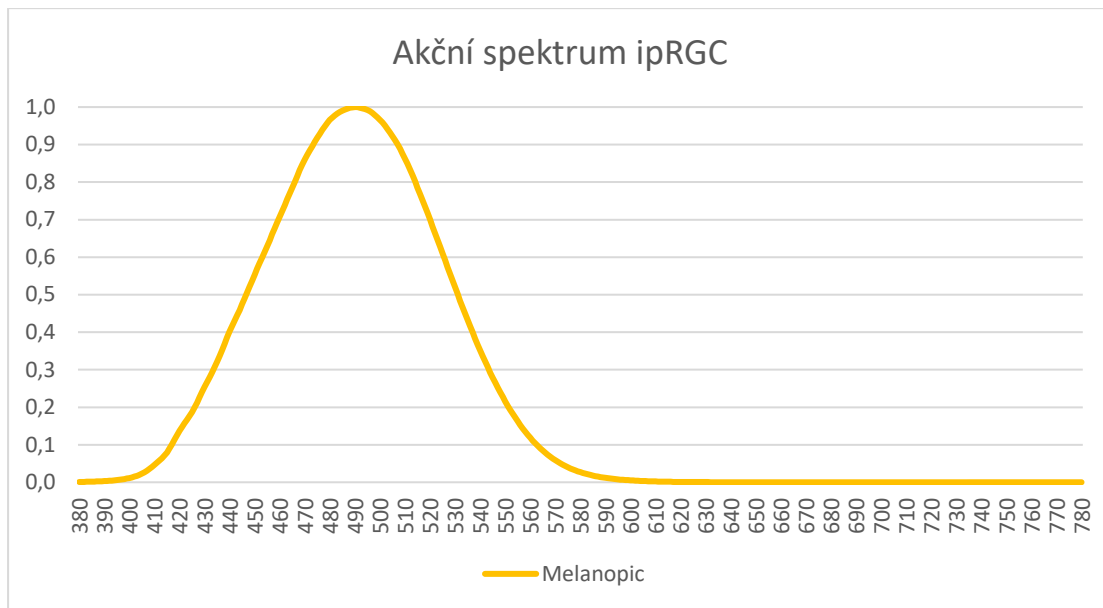
2.2.2 Spektrální citlivost

Na sítnici se vyskytují celkem tři různé typy čípků, které nám umožňují vnímat barvy, přičemž každý typ čípků má odlišný vrchol citlivosti v rámci světelného spektra. Typy čípků jsou S – krátké (v angličtině *short*), M – středně dlouhé (v angličtině *medium*) a L – dlouhé (v angličtině *long*). S – čípky jsou citlivé na kratší vlnové délky. Nejcitlivější jsou v oblasti modré barvy na světelném spektru, konkrétně pak kolem 445 nm. M – čípky jsou citlivé na střední vlnové délky s vrcholem citlivosti kolem 535 nm, což na světelném spektru odpovídá zelené barvě. A poslední L – čípky jsou nejcitlivější na červené světlo. Vrchol jejich citlivosti je přibližně ve vlnové délce 575 nm. Jednotlivé čípky mají i různé poměrné zastoupení. Největší podíl tvoří L – čípky, které tvoří většinu všech čípků, zatímco nejmenší zastoupení mají S – čípky, které tvoří minimum z celkového počtu. V poměru s čípky jsou na sítnici výrazně více zastoupeny tyčinky, a to až dvacetinásobně. Tyčinky jsou nejvíce citlivé na vlnovou délku o hodnotě kolem 505 nm. [4]



Obr. 6 – Citlivosti jednotlivých čípků a tyčinek

V roce 1998 došlo k objevu nového proteinu citlivého na světlo, melanopsinu. Na objev tohoto proteinu dále navázaly další vědecké výzkumy. V roce 2001 určil George C. Brainard a jeho tým [15] na základě pokusů vrchol spektrální citlivosti pro neobrazové vnímání na hodnotu mezi 446–477 nm, která neodpovídá spektrální citlivostí fotoreceptorů pro vizuální vnímání, ale dříve objevenému melanopsinu. Následně pak v roce 2002 identifikoval Samer Hattar a jeho tým [16] nový fotoreceptor na sítnici – gangliové buňky obsahující melanopsin, dnes zvané ipRGC (intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells – v překladu: vnitřně fotosenzitivní sítnicové gangliové buňky). [17]



Obr. 7 – Spektrální citlivost melanopsinu

2.2.3 Vliv neobrazového vnímání světla

Termínem neobrazové vnímání, nebo též nevizuální vnímání světla, rozumíme, jak již bylo psáno dříve, celou škálu biologických reakcí v souvislosti se světlem. Mezi tyto reakce patří například rozšiřování nebo zužování zornice, ovlivnění produkce melatoninu nebo řízení cirkadiálního rytmu, či kognitivní funkce

- Cirkadiální rytmus

Jedná se biologický rytmus s určitou periodou, která se může lišit u každého jedince. Řádově se pohybujeme kolem délky periody 24 hodin. Pokud bychom zamezili synchronizaci s vnějšími podněty a tento biologický rytmus běžel volně, trvala by jedna perioda v průměru 24,2 hodiny. V závislosti na jednotlivcích se může ovšem lišit v rozsahu od 23,6 do 25,1. [17] Více než 90 % lidí má však volně běžící cirkadiální rytmus delší než 24 hodin, tedy delší než jeden den. Za normálních okolností jsou však cirkadiální rytmy synchronizovány na základě vnějšího 24hodinového systému dne a noci. Právě pravidelné střídání dne a noci je pro tuto synchronizaci nejdůležitější. Z tohoto vyplývá, že pokud dojde k vystavení se světlu v pozdních hodinách, resp. v první polovině subjektivní noci, dojde ke zpoždění cirkadiálních rytmů, naopak expozice

světlu v ranních hodinách, kdy je stále ještě subjektivní noc, způsobí předběhnutí cirkadiánních rytmů.

Světlo je dále důležité i pro kognitivní výkon každého z nás. Světlo v tomto případě hraje roli ve schopnosti udržení pozornosti, schopnosti práce s pamětí nebo vyhodnocování sensorických informací. Například světelná expozice během noci způsobí dříve zmíněné potlačení produkce melatoninu a navození dočasného stavu bdělosti. Dále bylo potvrzeno, že jasné světlo v průběhu dne se pozitivně podílí na zlepšení nálady. Tohoto poznatku se dále využívá při léčbě sezónních depresí pomocí tzv. světelné terapie, kdy je pacient vystaven jasnému světlu.

Dále byly v návaznosti na studii popisující spektrální citlivost nevizuálního vnímání, kterou v roce 2001 publikoval George C. Brainard [15] a jeho tým, prováděny výzkumy zaměřené na vliv monochromatických světelných zdrojů a zdrojů s modrou složkou spektra. Tyto výzkumy dále potvrdily závislost jednotlivých reakcí na vlnové délce. [18] [19] [20]

2.3 Parametry světla

2.3.1 Parametry světla využívané v technické praxi

Cílem této podkapitoly je seznámit čtenáře s významem jednotlivých parametrů světla. Tyto parametry popisují nejen denní osvětlení, ale rovněž i umělé. Pro účely této bakalářské práce jsou zde vysvětleny pouze pojmy důležité v kontextu tématu.

Světlo lze popisovat radiometricky, tzn jako energii v daných vlnových délkách, anebo fotometricky, z pohledu citlivosti lidského oka a jeho schopnosti vytvářet obraz vnějšího prostředí v lidském mozku. Pro popisování vlastností světla užíváme následující kategorie.

- Intenzita záření

Intenzitou záření neboli ozářeností, rozumíme měrnou radiometrickou veličinu, která udává množství zářivého toku na jednotku plochy. Jednotkou intenzity záření W/m^2 . Intenzitu záření dále můžeme specifikovat pro jednotlivé vlnové délky. Toto nazýváme spektrální intenzitou záření, která udává míru ozářenosti na jednotku vlnové délky nebo frekvence

- Spektrální účinnost světelného záření

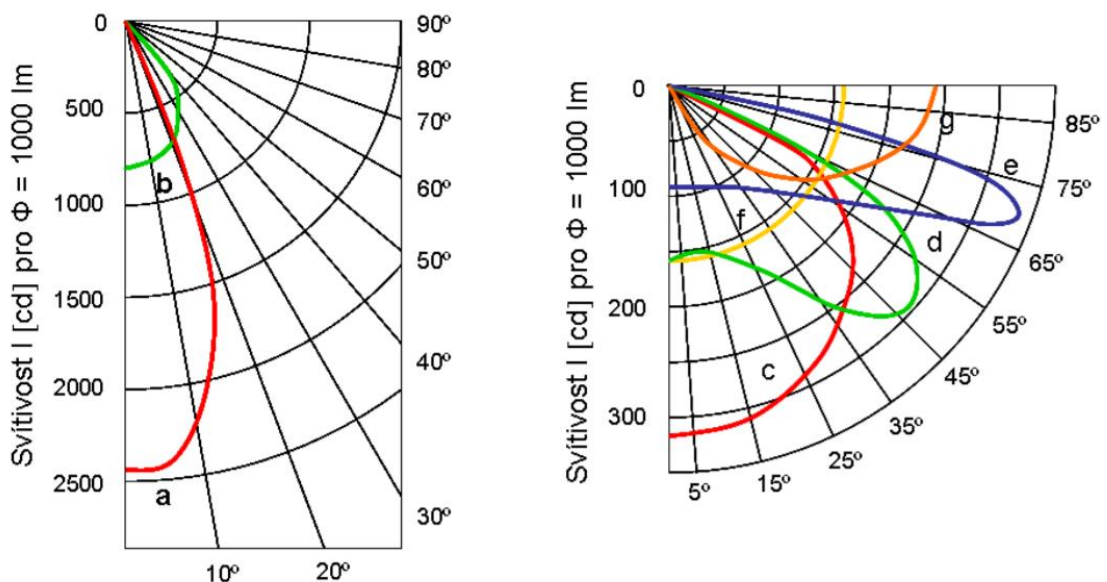
Tento termín popisuje průměrnou spektrální citlivost vizuálního vnímání u člověka. Jedná se tedy o zjednodušené vyjádření citlivosti tří typů čípků, kterou CIE popsala pomocí tzv. V_λ křivky, která má vrchol citlivosti v 550 nm.. Pomocí této křivky je možné převádět radiometrické veličiny na fotometrické. Též se využívá ke kalibraci fotometrických přístrojů, jako je např. luxmetr a jasoměr.

- Světelný tok

Světelný tok, značený Φ , jednotkou je lumen. Definice: „Světelný tok vyjadřuje intenzitu zrakového vjemu normální oka, vyvolaného energií světelného záření, které projde za jednotku času určitou plochou v prostoru, kterým se světlo šíří“ [6]. Zjednodušeně řečeno nám, resp. našemu oku světelný tok udává míru zdrojem vyzařovaného světla.

- Křivka svítivosti

Křivka svítivosti popisuje svítivost světelného zdroje v závislosti na směru. Křivky svítivosti jsou udávány výrobcem a vykreslují se v kandelách na kilolumen. Křivky svítivosti se zakreslují ve dvou typech souřadnic, a to v polárních a pravouhlých. Na obrázku jsou znázorněny různé typy křivek svítivosti v polárních souřadnicích. [13]



Obr. 8 – Tvary křivek svítivosti [13]

- **Jas**

Jas je měrnou veličinou svítivosti v daném směru na jednotku plochy. Udává tedy intenzitu vyzařovaného nebo odraženého světla při dopadu do lidského oka pod určitým úhlem pohledu. Jas značíme L a jednotkou je cd/m^2 (kandela na plochu).

- **Osvětlenost**

Též označována jako intenzita osvětlení, vyjadřuje míru světelného toku (v lumenech) dopadajícího na jednotku plochy (v metrech čtverečních). Osvětlenost značíme E_v a jednotkou je lux, značen lx.

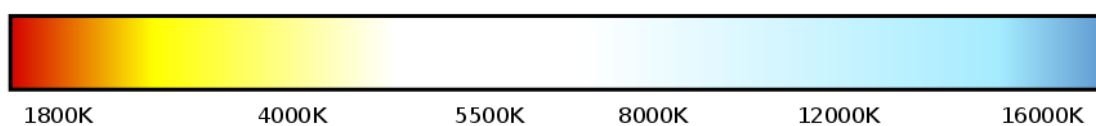
Světelné prostředí	Osvětlenost [lx]
Jasná denní obloha	50 000 – 100 000
Zatažená denní obloha	10 000 – 20 000
Běžné pracoviště	300 – 500
Obytné místnosti	50 – 200
Úplněk	<1

Tab. 1 – Přibližné hodnoty E_v pro různá světelná prostředí [17]

- **Teplota chromatičnosti**

Teplotou chromatičnosti rozumíme termodynamickou teplotu černého tělesa, při jejímž dosažení by vyzařovalo světlo, které by bylo pro lidské oko ekvivalentní světlu vyzařovanému konkrétním zářičem. Teplotu chromatičnosti značíme T a jednotkou je kelvin, značen K. Pro běžně užívané zdroje umělého osvětlení se teplota chromatičnosti pohybuje od 2700 K (např. žárovka, západ a východ slunce) po 9000 K.

Teplota chromatičnost 2700–4000 K odpovídá teplejším odstínům, bílé s žlutým nádechem. Světla s touto teplotou se instalují zejména do obytných místností. Teplota v rozsahu 4000–6500 K odpovídá dennímu bílému světlu a je využívána zejména v pracovních prostorech. Teplota v rozsahu 6500–9000 K odpovídá chladnějšímu bílému světlu s odstínem do modré barvy. Toho využíváme např. v prostorách výrobních hal. Kompletní rozsah teploty chromatičnosti je znázorněn na obr. 9.



Obr.9 – Teplota chromatičnosti [7]

- **Index podání barev (CRI)**

CRI (Color Rendering Index), někdy též označován Ra, představuje poměr zrakového vjemu jednotlivých barev pod daným světlem v porovnání s viditelností těchto barev při osvětlení standardizovaným denním světlem. Udává nám tedy odchylku zobrazení barev. Rozpětí indexu je od 0 do 100, kde 100 odpovídá právě zobrazení barev při denním světle. Dle normy ČSN EN 12 464 je minimální požadovaná hodnota Ra pro obytné prostory 80. Pro venkovní a průmyslové prostory pak 65. [6][8]

- **Životnost**

Životnost udává garantovanou dobu provozu v hodinách, po kterou zdroj splňuje stanovené vlastnosti. Udává se pouze u umělého osvětlení

- **Válcová osvětlenost**

Slouží k objektivnímu stanovení osvětlení prostoru. Vystihuje směr blízký vodorovnému pozorování ve veřejných a společenských prostorech. Válcová osvětlenost je popsána střední válcovou osvětleností, která odpovídá střední hodnotě osvětlenosti pláště elementárního válce.

2.3.2 Činitel denní osvětlenosti

Činitel denní osvětlenosti je jedním ze základních parametrů posouzení obytných a pobytových místností. V každé z těchto místností, ať už obytné nebo pobytové, musí být splněna alespoň minimální požadovaná hodnota činitele denní osvětlenosti. Výpočet hodnoty činitele denní osvětlenosti je stanoven následujícím vztahem:

$$D = \frac{E_i}{E_h} \cdot 100[\%]$$

Slovně se tedy jedná o poměr osvětlenosti denním světlem E_i v daném bodě k osvětlenosti venkovní nestíněné roviny E_h . Body jsou umístěny do výšky 850 mm nad úroveň podlahy.

V obytných místnostech se posuzuje denní osvětlení ve dvou bodech, které jsou umístěny 1 m od stěn a do poloviny hloubky místnosti, nejdále však 3 m od okenního otvoru. Minimálním požadavkem na denní osvětlení obytných místností je průměrná

hodnota činitele denní osvětlenosti větší nebo rovna 0,9 %, přičemž minimální hodnota činitele denní osvětlenosti v jednom bodě je větší nebo rovna 0,7 %.

V případě pobytových místností je zvolena síť bodů ve funkčně vymezeném prostoru. V případě pobytových místností je minimální požadovaná hodnota činitele denní osvětlenosti pro vyhovující denní osvětlení 1,5 %. V pobytových místnostech lze v určitých případech přistoupit i ke sdruženému osvětlení, kdy je část místnosti s nevyhovujícím denním osvětlením doplněna o umělé osvětlení. Minimální hodnotou činitele denní osvětlenosti pro požadavky sdruženého je alespoň 0,5 % a dále navýšení osvětlenosti pracovního prostoru umělých osvětlení o jeden stupeň, viz následující kapitola. [22, 23, 24, 25]

2.3.3 Integrativní osvětlení

V mezinárodním světelnětechnickém slovníku CIE jsou pod tímto termínem zahrnuty vědecky podložené obrazové i neobrazové parametry, které mají fyziologický a psychologický vliv na člověka. [28] V rámci mezinárodní normy CIE S026:2018 [29] jsou definovány jednotlivé funkce spektrálních citlivostí, veličin a metrik pro popis, jakým způsobem stimuluje světelné záření každý z pěti fotoreceptorů.

- Melanopická osvětelnost

Melanopickou osvětleností rozumíme ekvivalent k fotopické osvětlenosti, který je vyjádřen v závislosti na specifické citlivosti ipRGC (světlocitlivých melanopsinových buněk) [4]

2.3.4 Požadavky na umělé osvětlení

Umělé osvětlení je řešeno v rámci normy ČSN EN 12464-1 – Osvětlení pracovních prostorů. Do posuzovaného prostoru se umísťuje síť bodů v úrovni pracovní roviny. Rovina může být rovněž různě orientována, např. v případě školních tabulí se posuzuje na vertikální rovině. Hodnocení umělého osvětlení v těchto bodech se provádí pomocí tzv. udržované osvětlenosti \bar{E}_m , která udává minimální průměrnou hodnotu osvětlenosti v momentě provedení plánované údržby (čištění svítidel, výměna zdroje apod.). V normě ČSN EN 12464-1 jsou uvedeny požadované hodnoty udržované osvětlenosti pro jednotlivé prostory, úkoly a činnosti, viz tab. 2. Kromě místa zrakového úkolu se

udržitelná osvětlenost rovněž posuzuje v bezprostředním okolí úkolu, které je vymezeno pásmem o šířce alespoň 0,5 m okolo místa zřakového úkolu, viz tab. 3. [25, 26, 27]

Prostor, úkol, činnost	Udržovaná osvětlenost \bar{E}_m [lx]	Index oslnění UGR_L [-]	Index podání barev R_a [-]
Učebny, konzultační místnosti	300	19	80
Tabule ve školách	500	19	80
Komunikační prostory a chodby	100	28	40

Tab. 2 – Požadavky na udržovanou osvětlenost vybraných prostorů, úkolů nebo činností dle ČSN EN 12464-1

Osvětlenost úkolu [lx]	Osvětlenosti bezprostřední okolí úkolu [lx]
≥ 750	500
500	300
300	200
≤ 200	Osvětlenost úkolu

Tab. 3 – Osvětlenosti úkolu a bezprostředního okolí úkolu dle ČSN EN 12464-1

3. Praktická část

V rámci praktické části bylo provedeno měření denního a umělého osvětlení ve školní učebně. Měření, zpracování a vyhodnocení získaných dat je samostatnou prací autora. Měření vycházelo z teoretických poznatků o důležitosti světla a spektrálního složení pro vizuální a nevizuální vnímání. Měření bylo provedeno na základě předpokladu, že po významnou dobu je směr pohledu studentů v učebně je dominantně vertikální, zejména pohled směrem na tabuli, pozorování učitele, sledování projekce, nikoliv pouze pohled směřovaný na školní lavici, tj. na horizontální rovinu. Tomu odpovídá i pozice hlavy a množství a směr světla, které dopadá do oka. Pro stanovení vlivu světla na fyziologické procesy v organismu, tak jak je nově definuje mezinárodní organizace pro osvětlování [30] je třeba hodnotit světelné záření dopadající přímo do oka. Požadavky na osvětlení stanovené ve stávajících normách ČSN EN 12464-1 a ČSN EN 17037 se však vztahují k osvětlenosti roviny pracovní plochy, zpravidla horizontální desky stolu, neboť byly určeny k posouzení kvality obrazového vidění. Místo i směr měření pro posouzení biologické účinnosti osvětlení se tedy liší od stávajících obecně užívaných postupů pro hodnocení zrakového komfortu. Porovnání výsledků výše uvedených dvou způsobů měření a vyhodnocení rozdílů mezi nimi je jedním z cílů této práce. Hypotézou je, že osvětlenost vertikální roviny, která představuje pohled studenta před sebe (směrem k tabuli), bude výrazně nižší než osvětlenost horizontální roviny, která představuje pracovní plochu.

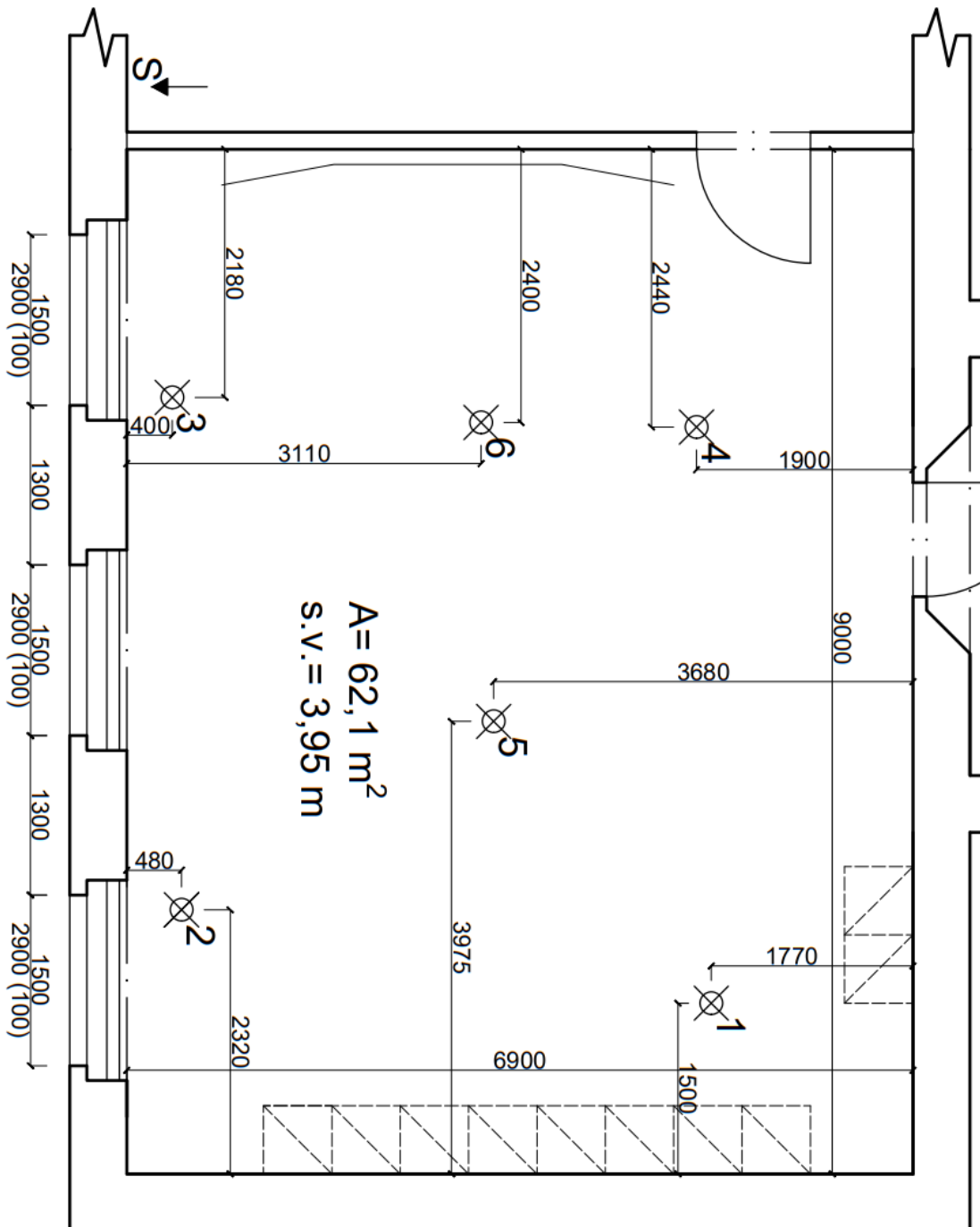
Dále bylo v rámci měření provedeno porovnání jednotlivých typů osvětlenosti světelných scén, tedy osvětlenosti denním osvětlením, přímým umělým osvětlením a nepřímým umělým osvětlením.

Mezi jednotlivými světelnými scénami byla porovnána míra také neobrazového vnímání světla na vertikální rovině v závislosti na spektrálním složení a směrovosti jednotlivých zdrojů světla.

3.1 Popis učebny a světelných scén

Měření bylo provedeno v učebně biologie, která se nachází v objektu gymnázia U Libeňského zámku. Učebna se nachází ve 2. NP s okenními otvory orientovanými na sever. Místnost je obdélníkovitého půdorysu o rozměrech 9,0 m na 6,9 m a světlé výšce 3,95 m, viz půdorys na obrázku 10. Čelní stěna a stěna proti oknům jsou natřeny světlou, sytě oranžovou barvou. Zbylé dvě stěny jsou čistě bílé barvy. V zadní části místnosti se nachází šedé skříňe o výšce kolem 2,5 m. Na čelní stěně místnosti se dále nachází bílá trojdílná tabule. Školní lavice a učitelská katedra jsou světle šedé barvy a židle světle zelené barvy.

Učebna je osvětlena moderním integrativním osvětlením, které se skládá ze dvou částí: plnospektrálního LED nepřímého osvětlení a přímého LED osvětlení s nižší teplotou chromatičnosti. Plnospektrální LED se vyznačuje spektrálním složením s rovnoměrně zastoupenými vlnovými délkami (v intervalu 450 – 650 nm maximální odchylka $\pm 15\%$), tj. oproti běžným LED zdrojům je snížen propad intenzity v oblasti přechodu mezi modrou a zelenou barvou spektra a rozšířeno zastoupení dlouhých vlnových délek (červené barvy). Umělé osvětlení je v učebně rozmístěno ve třech řadách pod stropem podvěšených prvků o několika nezávislých polích. Prvky mají spodní a horní vyzařování. Jednotlivé řady i prvky i směry vyzařování lze samostatně zapínat a vypínat, případně zvyšovat a snižovat intenzitu.



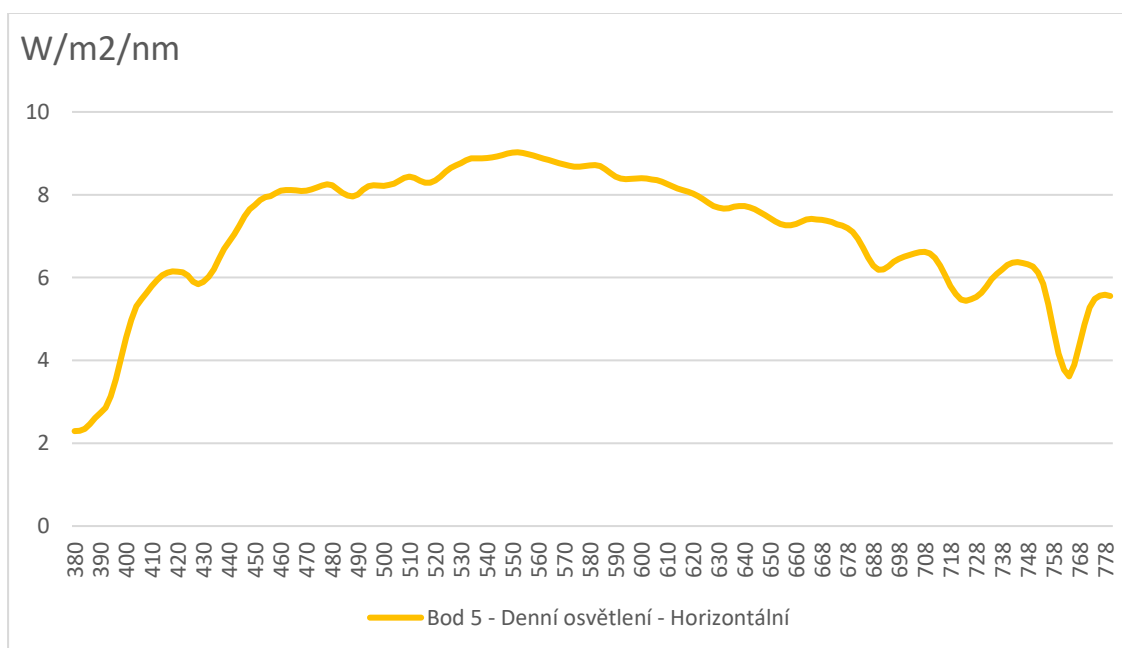
Obr. 10 – Půdorys místnosti s vyznačenými měřebními body

3.1.1 Světelná scéna 1: denní osvětlení

První světelná scéna byla osvětlena pouze denním světlem z okenních otvorů. Denní osvětlení bylo měřeno 15. 3. 2021 po 10:00. Barvy stěn a nábytku jsou popsány v předchozí kapitole. Rolety jsou maximálně vytaženy, takže nesnižují prostup denního světla skrze okenní otvory do místnosti. Umělé osvětlení je vypnuto. Pohled na světelnou scénu je na obr. 11. Rozsah světelného spektra v absolutních hodnotách je znázorněn na následujícím grafu.



Obr. 11 – Pohled na světelnou scénu 1: denní osvětlení



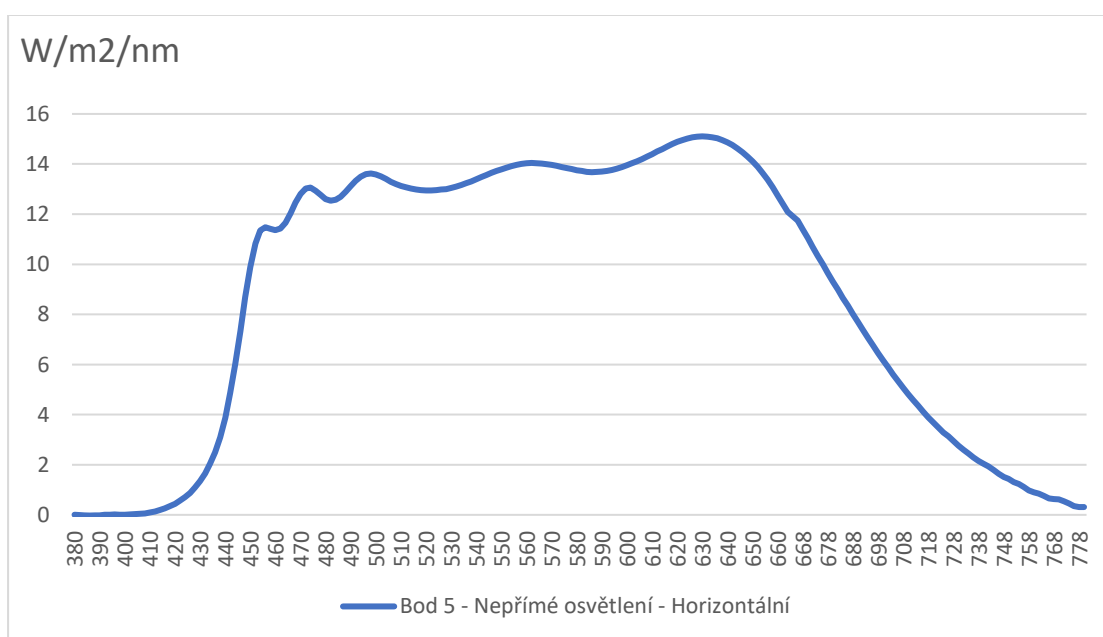
Obr. 12 – Naměřené světelné spektrum denního světla

3.1.2 Světelná scéna 2: nepřímé osvětlení

Pro měření v rámci druhé světelné scény byly všechny okenní otvory zataženy stahovatelnými roletami sytě černé barvy. Rolety zakrývají okenní otvory v celé jejich ploše a přístup denního světla do místnosti je zanedbatelný. Barvy stěn a nábytku jsou popsány v předchozí kapitole. Místnost je osvětlena pouze plnospektrálním nepřímým umělým osvětlením o maximální možné intenzitě. Přímé osvětlení je vypnuto. Pohled na světelnou scénu je na obr. 13 a rozsah naměřeného světelného spektra na grafu níže.



Obr. 13 – Pohled na světelnou scénu



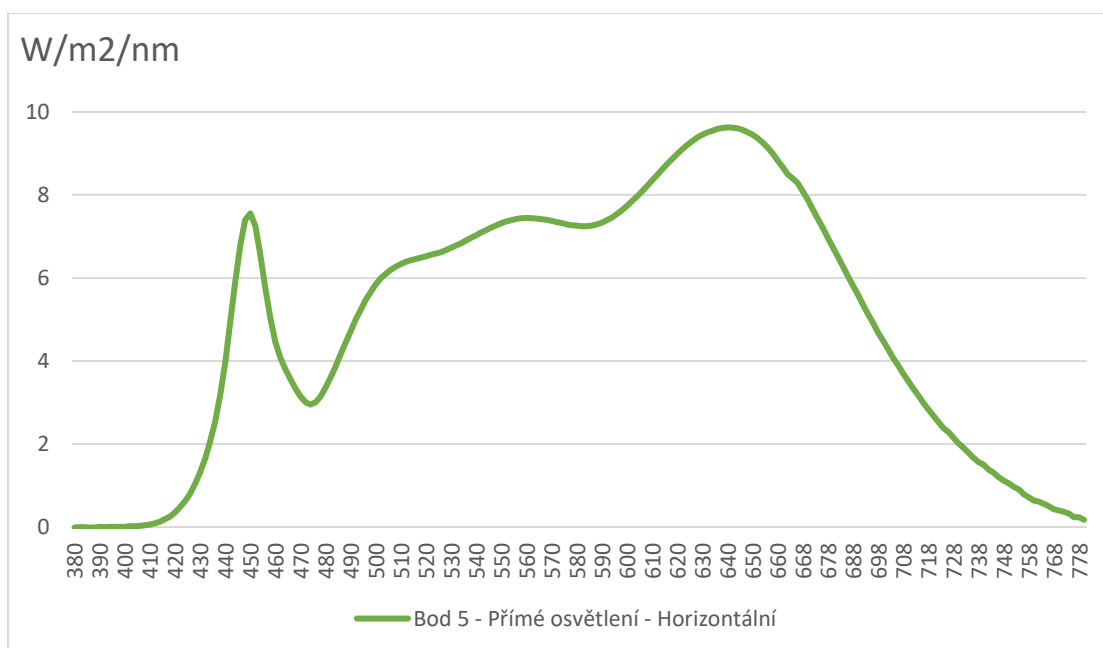
Obr. 14 – Naměřené světelné spektrum nepřímého umělého osvětlení

3.1.3 Světelná scéna 3: přímé osvětlení

Pro měření v rámci třetí světelné scény byly všechny okenní otvory zataženy stahovatelnými roletami sytě černé barvy. Rolety zakrývají okenní otvory v celé jejich ploše a přístup denního světla do místnosti je zanedbatelný. Barvy stěn a nábytku jsou popsány v předchozí kapitole. Místnost je osvětlena pouze přímým umělým osvětlením s nižší teplotou chromatičnosti a posíleným spektrem v oblasti přechodu mezi modrým a zeleným světlem. Osvětlení bylo spuštěno o maximální možné intenzitě.



Obr. 15 – Pohled na světelnou scénu



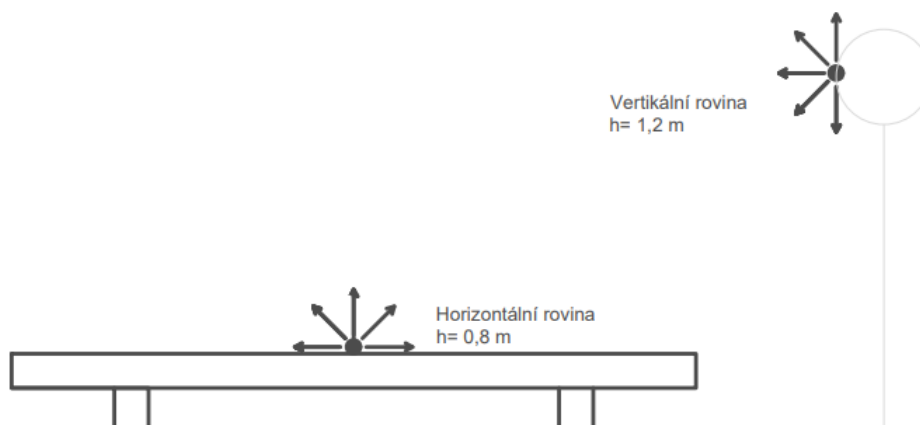
Obr. 16 – Naměřené světelné spektrum přímého umělého osvětlení

3.2 Postup měření a výpočtů

3.2.1 Měření

Měření bylo prováděno 15. března 2021 v rozmezí 10:00 – 11:30 při podmínkách rovnoměrně zatažené oblohy. Nejdříve byly pomocí laserového dálkoměru zaměřeny rozměry učebny, a ověřena jejich shoda s podklady, které byly k dispozici od správce budovy. Následně bylo v učebně vybráno celkem 6 bodů, ve kterých bylo dále pomocí spektrometru prováděno měření. Body byly v rámci místnosti voleny taky, aby byl přibližně popsán celý prostor, včetně extrémních situací v krajích učebny. Proto byly zvoleny 4 body v každém rohovém místě, kde se vyskytují žáci v průběhu výuky. Dále byl zvolen jeden bod v přibližném středu místnosti a poslední bod byl zvolen ve střední řadě, v lavici nejbliže k tabuli. Každému bodu bylo přiděleno příslušné označení pro orientaci ve výpočtech. Ve všech bodech byla pomocí laserového dálkoměru zaměřena vzdálenost od dvou na sebe kolmých stěn, a nakonec byla změřena výška lavice, tedy výška, ve které se bude měřit osvětlenost horizontální roviny a to přibližně 800 mm. Body pro posouzení horizontální roviny byly vždy umístěny přibližně do středu poloviny lavice. Měření osvětlenosti na vertikální rovině bylo prováděno ve výšce oka sedící osoby, ve 1200 mm nad podlahou, ve dominantním směru pohledu, směrem k tabuli. Pro zaznamenání osvětlenosti a spektrálního složení světla dopadajícího do daného bodu byl použit kalibrovaným radiospektrometr GL Spectis 1.0 Touch.

Po definování bodů byla připravena první světelná scéna. Byla zhasnuta všechna světla a rolety maximálně vytaženy. Dále byla nejprve v rámci první světelné scény orientačně zaměřena vertikální osvětlenost roviny zasklení fasády a následně se přešlo k měření v jednotlivých bodech. Měření probíhalo nejdříve v horizontální rovině a následně se pomocí svinovacího metru umístil radiospektrometr do výšky 1200 mm v místě židle, pro měření osvětlenosti vertikální roviny odpovídající přibližné poloze očí sedícího studenta, viz skica na obr. 17. Měření v každé měřené rovině bodu bylo prováděno dvakrát po sobě z důvodu minimalizace odchylek v měření a zároveň byla prováděna průběžná kontrola naměřených hodnot po zaměření každého bodu.



Obr. 17 – Znáznornění polohy měřených bodů

Stejný postup měření následoval i pro druhou světelnou scénu. Pro nastavení druhé světelné scény byly zataženy rolety, aby byl téměř eliminován příspěvek denního světla. Bylo zapnuto nepřímé osvětlení učebny ve všech polích a intenzita byla zvýšena na maximum a následně bylo zopakováno měření ve všech bodech stejně jako při předchozím měření.

Pro nastavení třetí světelné scény zůstaly stažené rolety pro eliminaci příspěvku denního světla. Bylo vypnuto nepřímé osvětlení a místo něj bylo zapnuto přímé osvětlení ve všech polích svítidel na maximální možnou intenzitu. Následně se stejně jako v případě obou předchozích světelných scénách provedlo zaměření osvětlenosti.

3.2.2 Výpočty

Naměřené hodnoty byly ze spektrometru exportovány do programu GL Spectrosoft, ze kterého byla následně vytažena světelná spektra pro každé měření a provedena analýza těchto dat. Následně byla provedena kontrola, zda jednotlivé body odpovídají naměřeným hodnotám, aby nedošlo k chybě. Z každé dvojice měření v bodě na jedné rovině byl udělán průměr pro každou hodnotu vlnové délky a osvětlenost v daném bodě. Jelikož spektrometr měřil hodnoty v rozsahu 340–780 nm, byl rozsah manuálně oříznut na 380–780 nm.

Takto připravená data byla dále zpracována v oficiálním výpočtovém nástroji *CIE S026 alpha-opic Toolbox* [21], viz obr. 18, který v roce 2020 vytvořila Mezinárodní komise pro osvětlování (Commission internationale de l'éclairage, CIE). Tento výpočetní nástroj slouží k převodu naměřených hodnot na množství světla, které je biologicky aktivní pro jednotlivé fotoreceptory a umožní nám tak tedy vypočítat míru světla, které je skutečně aktivní pro nevizuální vnímání na základě dosavadních vědeckých poznatků.

Pomocí CIE Toolboxu byly absolutní hodnoty naměřených spekter přenásobeny melanopickým spektrem pro ipRGC v relativních hodnotách, tedy biologicky aktivním spektrem, které odpovídá nevizuálnímu vnímání. Tímto byla získána míra světla, které je z celého spektra aktivní pro melanopsin ve fotocitlivých gangliových buňkách.

Toolbox od CIE rovněž poskytne hodnotu ekvivalentní osvětlenosti denním světlem (Equivalent Daylight Illuminance, EDI), tj. intenzitu denního světla s teplotou chromatičnosti 6500 K, která má srovnatelnou biologickou účinnost jako posuzovaný světelný zdroj.

Dále byly vzaty hodnoty osvětlenosti naměřené v jednotlivých bodech v jednotlivých rovinách a světelných scénách a hodnoty osvětlenosti pro akční spektrum vypočtené z tabulky od CIE a byly dále porovnávány rozdíly mezi hodnotami naměřenými na horizontální rovině a na vertikální rovině v závislosti na poloze bodu a typu osvětlení světelné scény.

Inputs		Basis of system: radiant flux (power), W		Outputs		photon flux, s-1	
luminous flux, lm		irradiance		luminous flux, lm		photon irradiance	
Quantity, Q: illuminance		Quantity, Q: irradiance		illuminance		log Q/(s-1.cm-2)	
Units: lx		Units: $\mu\text{W.cm}^{-2}$		lx		$\log Q/(s-1.cm-2)$	
Output prefix		Select: μ		Select:		Select: c	
Area prefix		Select: c		Do not use:			
Scaling factors	1E+00		1E+02		1E+00		1E-04
INPUTS: Standard CIE S 026 calculations.				(unweighted) irradiance = $\int \text{spectral irradiance} * d\lambda$		(T1)	
Note to (T2) $K_m \approx K_{cd} = 683 \text{ lm.W}^{-1}$				(photopic) illuminance = $K_m * \int \text{spectral irradiance} * V(\lambda) * d\lambda$		(T2)	
				(unweighted) photon irradiance = $\int \text{spectral photon irradiance} * d\lambda$		(T3)	
Values for		irradiance, $\mu\text{W.cm}^{-2}$		illuminance, lx		log photon irradiance/(s-1.cm-2)	
LED-B3	Test source	157,76		500,00		14,652	
daylight (D65)	Reference: "D"	244,11		500,00		14,842	
		α -opic irradiance, $\mu\text{W.cm}^{-2}$				α -opic irradiance	
		α -opic irradiance = $\int \text{spectral irradiance} * \alpha$ -opic action spectrum * $d\lambda$				(T4)	
α -opic irradiance for		<i>S-cone-opic</i>		<i>M-cone-opic</i>		<i>L-cone-opic</i>	
		<i>Rhodopic</i>		<i>Melanopic</i>			
LED-B3		25,29		64,35		81,26	
daylight (D65)		40,86		72,79		81,45	
		α -opic efficacy of luminous radiation, mW.lm^{-1}				α -opic ELR	
		α -opic ELR = α -opic irradiance / illuminance				(T5)	
α -opic ELR for		<i>S-cone-opic</i>		<i>M-cone-opic</i>		<i>L-cone-opic</i>	
		<i>Rhodopic</i>		<i>Melanopic</i>			
LED-B3		0,5057		1,2870		1,6253	
daylight (D65)		0,8173		1,4558		1,6289	
		α -opic daylight (D65) efficacy ratio, 1				α -opic DER	
		α -opic DER = α -opic ELR / α -opic ELR for daylight (D65)				(T6)	
α -opic DER for		<i>S-cone-opic</i>		<i>M-cone-opic</i>		<i>L-cone-opic</i>	
		<i>Rhodopic</i>		<i>Melanopic</i>			
LED-B3		0,6188		0,8840		0,9978	
daylight (D65)		1,0000		1,0000		1,0000	
		α -opic equivalent daylight (D65) illuminance, lx				α -opic EDI	
		α -opic EDI = α -opic irradiance / α -opic ELR for daylight (D65)				(T7)	
		α -opic EDI = illuminance * α -opic DER				(T8)	
α -opic EDI for		<i>S-cone-opic</i>		<i>M-cone-opic</i>		<i>L-cone-opic</i>	
		<i>Rhodopic</i>		<i>Melanopic</i>			
LED-B3		309,39		442,02		498,88	
daylight (D65)		500,00		500,00		500,00	

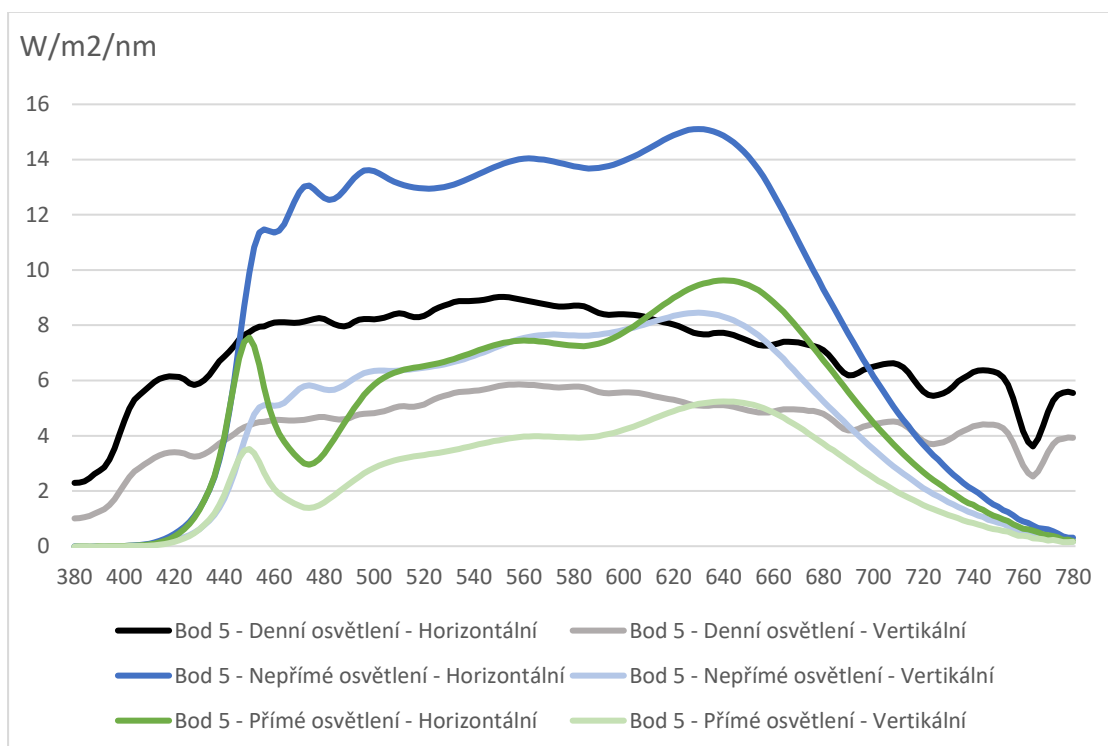
Obr. 18 – Rozhraní CIE S 026 α -opic Toolbox

3.3 Výsledky měření

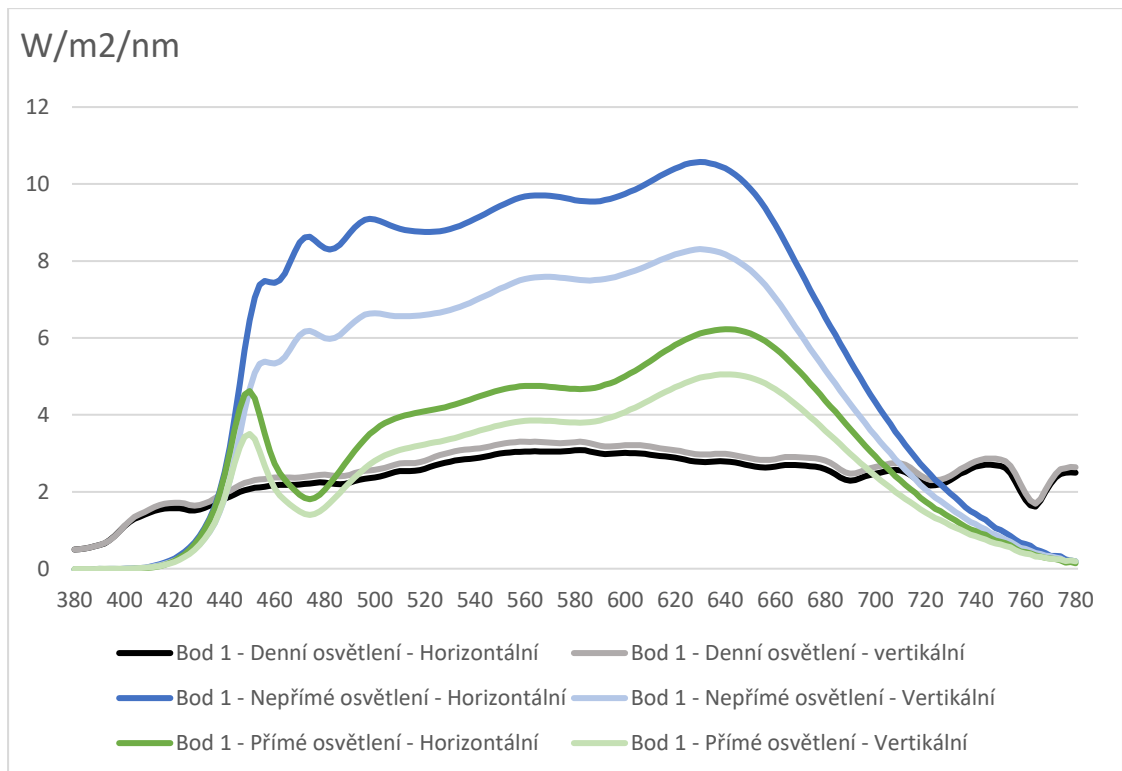
Výsledky měření poukazují na značný rozdíl mezi hodnotami ve vertikální rovině, a rovněž i mezi jednotlivými světelnými scénami. Dále pak na závislost rozdílu na umístění bodu v učebně, jak můžeme vidět na jednotlivých tabulkách níže. V závislosti na spektru, směru pohledu a rozložení světla v prostoru se také mění biologická účinnost světla, tzv melanopická osvětlenost.

3.3.1 Porovnání světlených scén

Na následujících grafech jsou znázorněny rozdíly mezi jednotlivými spektry a naměřenými horizontálními a vertikálními rovinami. Pro znázornění byly vybrány body 1 a 5. Bod 1 z důvodu minimálního rozdílu osvětlenosti mezi horizontální a vertikální rovinou a bod 5 z důvodu svého umístění ve středu místnosti, kde je nejvíce osvětlen umělým osvětlením. V grafech je tmavou barvou znázorněna horizontální rovina a světlejším odstínem pak vertikální rovina.



Obr. 19 – Porovnání hodnot v bodě 5 napříč světelnými scénami



Obr. 20 – Porovnání hodnot v bodě 1 napříč světelnými scénami

Z grafů je patrné, že nejvyšší intenzita osvětlení je v obou bodech v případě světelné scény s umělým nepřímým osvětlením. Intenzita denního osvětlení se vlivem hloubky místnosti snížila. Dále lze vidět v případě bodu 1 podstatně menší rozdíl mezi vertikální a horizontální osvětleností, než je tomu v bodě 5. Nicméně je nutno počítat s určitou nepřesností měření. Zejména u horního přímého osvětlení je třeba vzít v úvahu, že naměřená hodnota světla dopadajícího na senzor neodpovídá skutečnému kvantu světla, které dopadne do oka člověka. Lidské oko má zejména ve vertikálním směru zorný úhel omezený na cca 120 stupňů, neboť světlo dopadající do oka omezí tvar obličeje, např. nadočnicové oblouky. Sensor měřícího přístroje zachycuje paprsky v celém rozsahu 180 stupňů, a proto bude registrovat i světlené paprsky ze svítidla umístěného téměř přímo nad hlavou dané osoby. Hodnoty získané z takto prováděného měření budou tedy nadhodnocené oproti realitě.

Scéna:	DENNÍ OSVĚTLENÍ			
Veličina:	Melanopická osvětlenost [melanopic lx]		Fotopická osvětlenost [lx]	
Rovina:	Horizontální rovina	Vertikální rovina	Horizontální rovina	Vertikální rovina
BOD1	154,03	167,20	208,01	224,15
BOD2	882,83	384,28	969,82	465,51
BOD3	1374,84	812,88	1493,42	933,37
BOD4	278,28	173,72	366,91	257,54
BOD5	534,87	314,24	622,80	399,41
BOD6	506,68	281,82	603,45	362,38

Tab. 4 – Světelná scéna 1: denní osvětlení – Naměřené hodnoty osvětlenosti

Scéna:	NEPŘÍMÉ OSVĚTLENÍ			
Veličina:	Melanopická osvětlenost [melanopic lx]		Fotopická osvětlenost [lx]	
Rovina:	Horizontální rovina	Vertikální rovina	Horizontální rovina	Vertikální rovina
BOD1	517,39	380,54	683,08	526,92
BOD2	474,91	336,39	611,66	463,09
BOD3	414,45	185,52	548,20	292,63
BOD4	666,23	294,07	907,57	480,48
BOD5	775,43	365,26	994,16	526,70
BOD6	704,68	284,89	921,53	422,73

Tab. 5 – Světelná scéna 2: Nepřímé osvětlení – Naměřené hodnoty osvětlenosti

Scéna:	NEPŘÍMÉ OSVĚTLENÍ			
Veličina:	Melanopická osvětlenost [melanopic lx]		Fotopická osvětlenost [lx]	
Rovina:	Horizontální rovina	Vertikální rovina	Horizontální rovina	Vertikální rovina
BOD1	209,49	163,43	334,59	269,14
BOD2	169,69	125,69	267,35	206,85
BOD3	142,99	76,98	229,35	138,93
BOD4	299,33	122,31	479,44	226,96
BOD5	338,09	165,34	525,02	277,21
BOD6	319,07	147,69	500,23	247,61

Tab. 6 – Světelná scéna 3: Přímé osvětlení – Naměřené hodnoty osvětlenosti

3.3.2 Porovnání horizontální a vertikální osvětlenosti

V následující tabulce je vyjádřen procentuální rozdíl mezi jednotlivými rovinami v rámci naměřených hodnot. Označení SV1-3 je zkratka pro světelnou scénu 1-3. Z tab. 4 lze vyvodit několik závěrů.

	SV1	SV2	SV3	SV1	SV2	SV3
	Procentuální změny: Melanopická osvětlenost			Procentuální změny: Fotopická osvětlenost		
	H/V	H/V	H/V	H/V	H/V	H/V
BOD 1	-7,20 %	29,64 %	24,32 %	-7,88 %	35,96 %	28,18 %
BOD 2	108,33 %	32,08 %	29,25 %	129,74 %	41,18 %	35,01 %
BOD 3	60,00 %	87,34 %	65,08 %	69,13 %	123,40 %	85,75 %
BOD 4	42,47 %	88,89 %	111,24 %	60,19 %	126,55 %	144,73 %
BOD 5	55,93 %	88,75 %	89,39 %	70,21 %	112,30 %	104,48 %
BOD 6	66,52 %	117,99 %	102,02 %	79,79 %	147,35 %	116,04 %
PRŮMĚR	54,34 %	74,11 %	70,22 %	66,86 %	97,79 %	85,70 %

Tab. 7 – Procentuální rozdíl mezi horizontální a vertikální rovinou v jednotlivých světelných scénách

- Světelná scéna 1: denní osvětlení

Jak je z tabulky patrné, nejnižší průměrný rozdíl mezi horizontální rovinou a vertikální rovinou je při osvětlenosti učebny pouze denním světlem. V rámci světelné scény 1 se nejvíce liší rozdíl v osvětlenosti jednotlivých rovin v bodech 1 a 2. V případě bodu 1 byla dokonce naměřena vyšší hodnota osvětlenosti na vertikální rovině než na rovině horizontální. Příčinou je umístění bodu v zadní části místnosti, kde je celková nižší hodnota osvětlenosti horizontální roviny v porovnání s body, které jsou umístěny ve střední části místnosti a blíže u oken. Dále lze ve výhledu z tohoto bodu zaznamenat téměř celou místnost a tím i značnou část okenních otvorů. Nicméně i tak by se mělo jednat o bod, ve kterém bude nejnižší rozdíl mezi horizontální a vertikální rovinou, jak je patrné i ve zbylých světelných scénách. Naopak v případě bodu 2 je výrazně nižší osvětlenost vertikální roviny, a to zejména z důvodu, že bod se nachází u zdi a ve výhledu nejsou zastoupeny okenní otvory. Ve zbylých bodech v případě světelné scény 1 je rozdíl podobný, a to v průměru přibližně 55 %. Roli hraje vzdálenost bodu od oken a od čelní stěny, jelikož místnost je osvětlena pouze z jedné strany. Osvětlenost tedy klesá hloubkou místnosti.

- **Světelná scéna 2: nepřímé umělé osvětlení**

Ve výsledcích měření v rámci druhé světelné scény osvětlené pouze nepřímým umělým osvětlením lze pozorovat jiné spojitosti v porovnání s první světelnou scénou. Významnou roli zde již nehraje vzdálenost bodů od okna. Nejmenší rozdíl míry osvětlenosti mezi vertikální a horizontální rovinou lze dle tab. 4 pozorovat v bodech 1 a 2 a to zejména kvůli jejich umístění na okraji osvětlené plochy. V těchto bodech jsou jedny z nejnižších hodnot osvětlenosti v porovnání se zbytkem zóny, kde probíhá výuka. Zatímco v případě vertikální roviny má student v zorném poli většinu místnosti, včetně značné části osvětleného stropu. Se zkracující se vzdáleností od čelní stěny roste osvětlenost horizontální roviny a ve vertikální rovině zabere sedící student ve výhledu stále menší osvětlenou plochu.

- **Světelná scéna 3: přímé umělé osvětlení**

Ve třetí světelné scéně lze pozorovat obdobné spojitosti jako v případě druhé světelné scény. Opět je nejmenší rozdíl mezi vertikální a horizontální rovinou v bodech 1 a 2. V tab. 4 lze dále vidět značný rozdíl mezi horizontální a vertikální rovinou v bodě 3 při porovnání světelné scény 2 a 3. Kdy v případě světelné scény je osvětlenost vertikální roviny až od 123,4 % nižší než osvětlenost horizontální roviny, kdežto v případě světelné scény 2 je nižší jen o 85,75 %. Toto je patrně způsobeno vyšší osvětleností čelní stěny vlivem přímého osvětlení, jelikož bod 3 se nachází v přední části místnosti přibližně 2 metry od čelní stěny.

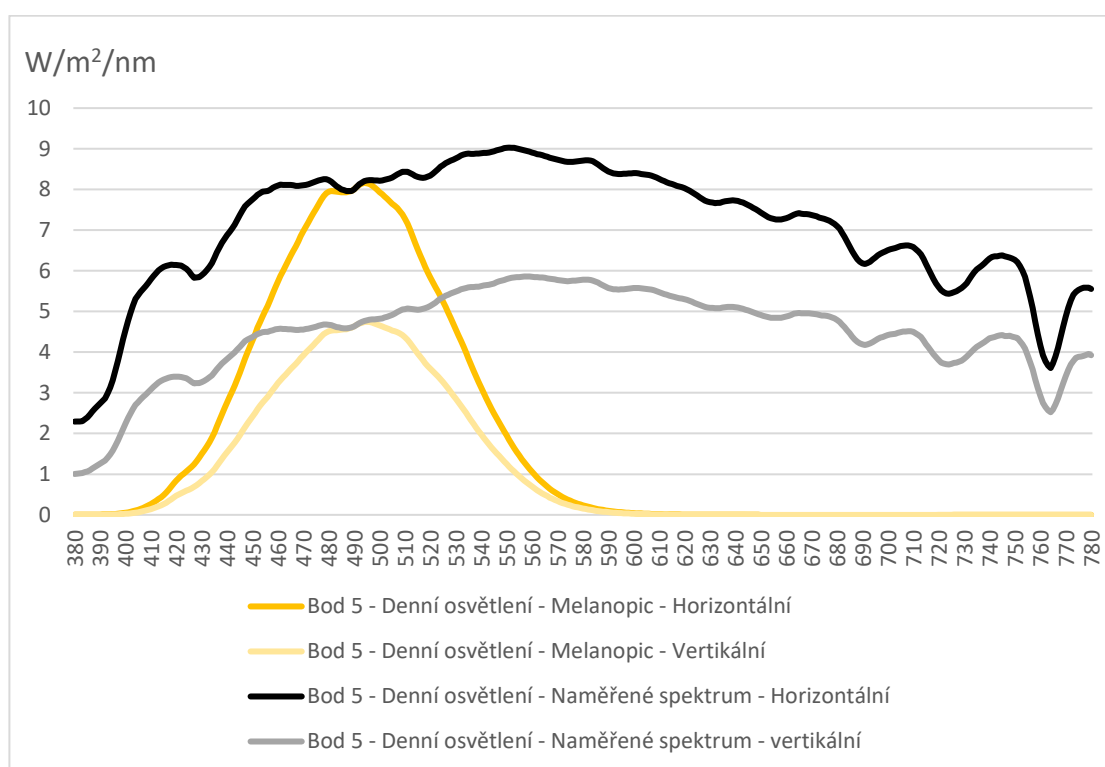
3.3.3 Porovnání fotopické a melanopické osvětlenosti

V následující tabulce je znázorněn rozdíl mezi skutečnou osvětleností a aktivní osvětleností pro neobrazové vnímání. Rozdíl je znázorněn pro obě měřené roviny a pro každý bod napříč světelnými scénami. Jak je z tab. 5 patrné, ve všech bodech a posuzovaných rovinách dojde ke snížení.

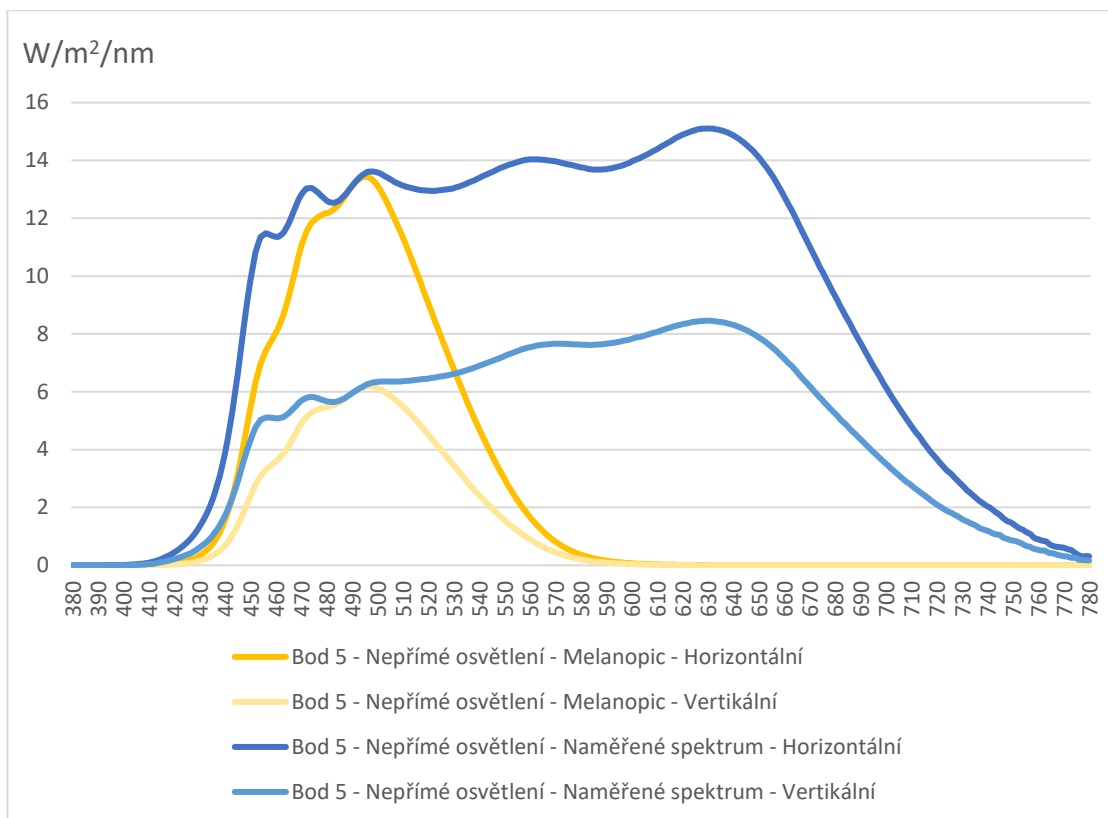
Scéna:	Světelná scéna 1		Světelná scéna 2		Světelná scéna 3	
Veličina:	Fotopická osvětlenost/ Melanopická osvětlenost		Fotopická osvětlenost/ Melanopická osvětlenost		Fotopická osvětlenost/ Melanopická osvětlenost	
Rovina	Horizontální	Vertikální	Horizontální	Vertikální	Horizontální	Vertikální
BOD1	25,95 %	25,41 %	24,26 %	27,78 %	37,39 %	39,28 %
BOD2	8,97 %	17,45 %	22,36 %	27,36 %	36,53 %	39,24 %
BOD3	7,94 %	12,91 %	24,40 %	36,60 %	37,65 %	44,59 %
BOD4	24,16 %	32,55 %	26,59 %	38,80 %	37,57 %	46,11 %
BOD5	14,12 %	21,32 %	22,00 %	30,65 %	35,60 %	40,36 %
BOD6	16,04 %	22,23 %	23,53 %	32,61 %	36,22 %	40,35 %
Průměr	16,20 %	21,98 %	23,86 %	32,30 %	36,83 %	41,65 %

Tab. 8 – Procentuální snížení melanopické osvětlenosti v porovnání s naměřenou osvětleností napříč světelnými scénami

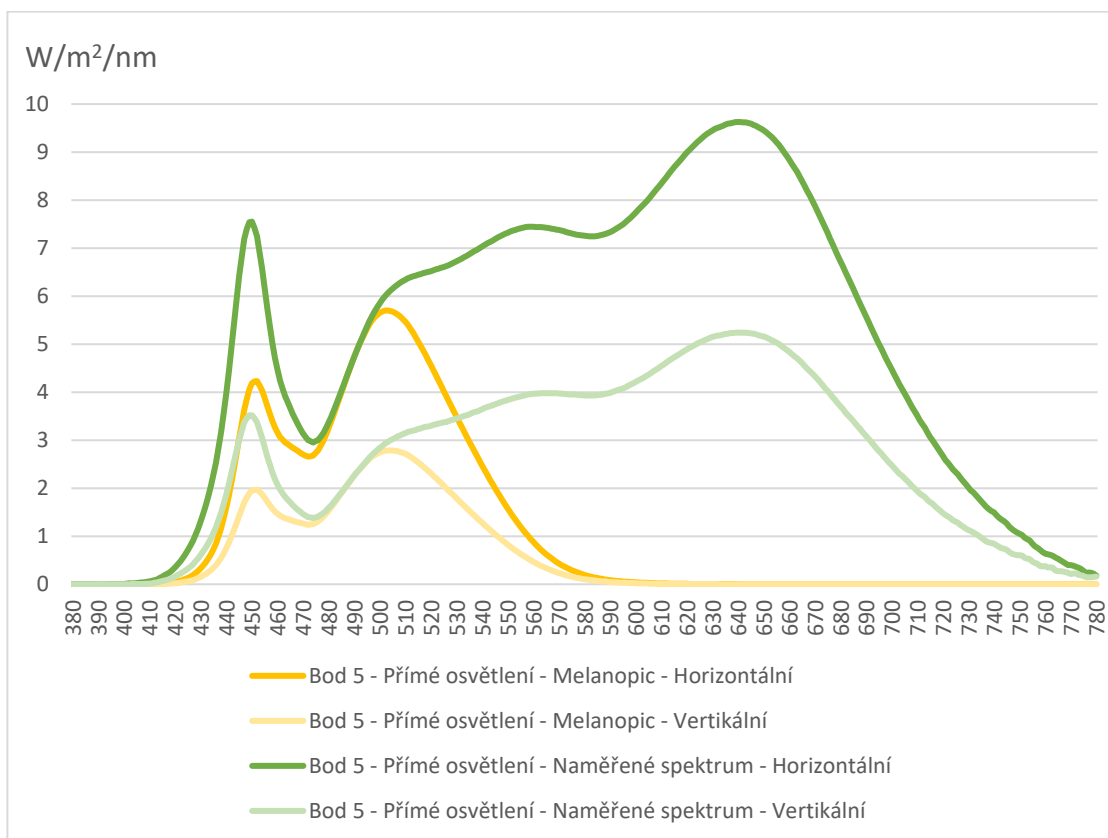
Největší rozdíl je patrný ve světelné scéně 3, která je osvětlena pouze přímým LED osvětlením. Zde je hlavní příčinou neúplný spektrální rozsah svítidla, viz grafy dále, kde je znázorněno naměřené spektrum doplnění o akční spektrum pro nevizuální vnímání.



Obr. 21 – Porovnání hodnot v bodě 5, světelná scéna 1: denní osvětlení



Obr. 22 – Porovnání hodnot v bodě 5, světelná scéna 2: nepřímé osvětlení



Obr. 23 – Porovnání hodnot v bodě 5, světelná scéna 3: přímé osvětlení

4. Diskuse

Práce se zabývá měřením a vyhodnocením kvality světelného prostředí z hlediska jeho vlivu na fyziologické procesy v organismu. V posuzované učebně je navrženo osvětlení s ohledem na obrazové i neobrazové vnímání světla. Protože tento typ osvětlení ovlivňuje i fyziologické procesy v organismu, požadavky na měření světla se liší od klasických metrologických postupů.

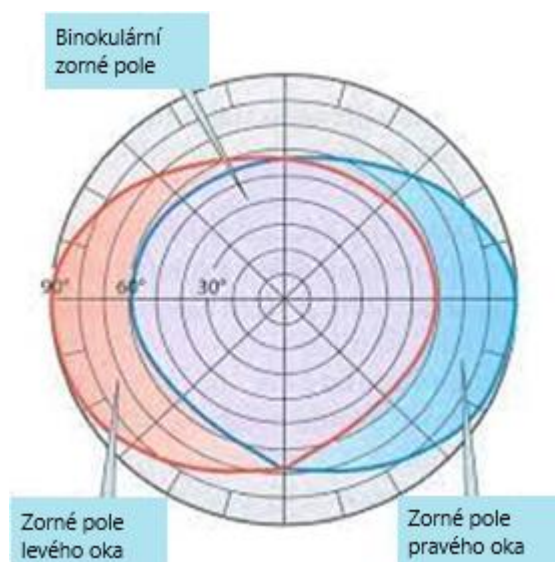
V rámci teoretické rešerše bakalářské práce byly získány poznatky potřebné pro vyhodnocení praktické části. V rámci praktické části bylo celkem posouzeno 6 bodů ve třech různých světelných scénách. V rámci každého bodu byla dále posouzena vertikální a horizontální rovina a v nich poté vypočteny míry obrazové a melanopické osvětlenosti.

První hypotézou v úvodu byl předpokládán rozdíl mezi osvětleností na vertikální a horizontální rovině, což se ve výpočtové části potvrdilo. I při uvážení možné chyby měření (popsáno v předchozí kapitole) jsou hodnoty naměřené na vertikální rovině v některých případech i poloviční vůči hodnotám osvětlenosti naměřených na horizontální rovině. Jako nejvýznamnější faktory ovlivňující poměr mezi vertikální a horizontální osvětleností bylo na základě měření a výpočtů identifikováno několik parametrů. Nejvýznamnějším parametrem je samotné umístění bodu v místnosti, tj. vzdálenost od oken a od čelní stěny. S tímto parametrem úzce souvisí i další, a to směr pohledu. Dalším významným parametrem je typ osvětlení světelné scény.

Další předpoklad se týkal nevizuálního vnímání světla. Bylo očekáváno, že míra nevizuálního vnímání světla bude značně vyšší ve světelné scéně s denním osvětlením, a naopak nejnižší míra bude ve světelné scéně s přímým LED osvětlením s nižší teplotou chromatičnosti. Výpočty tuto hypotézu potvrzují. I přesto, že přímá LED svítidla disponovala vysokým činitelem podání barev, došlo v případě třetí světelné scény k poklesu hodnot melanopické osvětlenosti vůči ftopické osvětlenosti přes 35 % na horizontální rovině a přes 40 % na vertikální rovině. Z tohoto vyplývá, že pro míru nevizuálního vnímání světla je kritické spektrální složení světla, kterým je daná světelná scéna osvětlena. Z tohoto hlediska se tedy jeví optimální použití plnospektrálních svítidel, která jsou do jisté míry schopna simulovat denní světlo, nikoliv však plnohodnotně.

4.1 Limity studie

V rámci měření se nepodařilo eliminovat vznik případných chyb. Jednou z pozorovaných odchylek je zaměření vertikální roviny, kdy použitý přístroj GL Spectis 1.0 Touch měří světelné záření dopadající do bodu z celého poloprostoru, zatímco zorné pole člověka nemá plný rozsah, viz obrázek 24. Z toho vyplývá předpoklad, že v případě zohlednění skutečného zorného pole by došlo k eliminování části osvětlení přímo nad měřeným bodem (stínění tvarem obličeje, např. nadočnicovými oblouky), a tedy i ke snížení míry osvětlenosti měřené vertikální roviny. Přesnější výsledky by dále poskytla jasová analýza, která umožňuje zaznamenat směr dopadání světelných paprsků a odfiltrovat paprsky dopadající do oka ze stíněných směrů. Jedním z limitů studie je tedy dostupnost měřicí techniky, která by byla kalibrovaná na měření melanopické osvětlenosti a současně zaznamenávala informaci o směru světelných paprsků.



Obr. 24 – Zorné pole lidského oka [30]

Další možnou odchylkou v naměřených hodnotách jsou černé rolety, které by v důsledku velké světelné pohltivosti, nízkého činitele odrazu a velké plochy mohly mít určitý dopad na hodnoty měřené v jejich blízkosti.

V případě větších časových kapacit se dále nabízí možnost posouzení dalších světelných scén, jako je například souběh přímého a nepřímého osvětlení, či doplnění denního osvětlení umělým v řadách dále od oken. Případně doplnění rozsahu posouzení o další měřené body. Další možností je zkoumání rozdílu denní osvětlenosti a nevizuálního vnímání světla při zatažené a jasné obloze doplněné o posouzení oslnění.

5. Závěr

V rámci bakalářské práce bylo provedeno vyhodnocení světelného prostředí ve školní učebně podle nového standardu CIE pro hodnocení integrativního osvětlení. Bylo zjištěno, že pro hodnocení biologických účinků světla jsou současné postupy nedostačující. Měření by pro zohlednění těchto účinků mělo být prováděno v jiném místě, než je tomu doposud. Dále nelze měřit celý poloprostor v daném bodě, ale je žádoucí zohlednit směry, které jsou u průměrného člověka stíněny částmi obličeje. Biologické účinky světla rovněž není možné měřit běžným luxmetrem, jelikož se vrchol systému pro nevizuální vnímání nachází jinde než u fotopického systému. Z tohoto důvodu je zapotřebí zaznamenat celé světelné spektrum a následně spočítat potřebné biologické hodnoty, jako tomu bylo například v této bakalářské práci. Další možnou cestou k dosažení přesných výsledků hodnotící biologické účinky světla je speciální kalibrace přístrojů na citlivost melanopsinových receptorů. Nedodržení těchto zásad může vést k nezanedbatelným chybám v měření.

Seznam použité literatury

- [1] sliney, D H. "What is light? The visible spectrum and beyond." Eye (London, England) vol. 30,2 (2016): 222-9. doi:10.1038/eye.2015.252
- [2] Ing. Ladislav Chmel, Ing. Ivo Hamerník Fotovoltaika, fotomerika. Digitální obrázek, Code Creator, s.r.o.; distribuce publi.cz; s. l. 2016, Web. dostupné z: <https://publi.cz/books/91/01.html>
- [3] Maierová, L. Světelné prostředí a jeho vliv na společnost v průběhu historie. Praha, 2018. Web.
- [4] Maierová, L. Světelné prostředí v budovách, nevizuální vnímání světla a inter-individuální rozdíly. Praha, 2015. Disertační práce. ČVUT v Praze.
- [5] Krčmář, J. Hynek Medřický: Povídání o modrém světle a jeho dopadu na naše zdraví. Praha, 2017. Web.
- [6] Reichl, J. Encyklopedie Fyziky, kap. Fotometrické veličiny. S.l. 2006-2021. Web. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>
- [7] Holek. Color temperature hue scale. Digitální obrázek, s.l. 2007. Web. Dostupné z: https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:Color_temperature.svg
- [8] Anon. Parametry LED osvětlení. s.l. 2021. Web. Dostupné z: <http://www.techniled.cz/19-parametry-led-osvetleni/>
- [9] Šobra, P. Inteligentní systémy řízení osvětlení. Digitální obrázek. s. l. 2009. Web. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-inteligentni-systemy-rizeni-osvetleni.html>
- [10] Gaston, Kevin & Visser, Marcel & Hölker, Franz. The biological impacts of artificial light at night: The research challenge. Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences. (2015): 370. 20140133. 10.1098/rstb.2014.0133. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/273700719_The_biological_impacts_of_artificial_light_at_night_The_research_challenge
- [11] Přibáňová, H. Lajčíková, A. Umělé osvětlení vnitřního prostředí. Praha. 2003. Web. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/osvetleni/1303-umele-osvetleni-vnitriho-prostredi>

- [12] Anon. 9. Umělé osvětlení. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. S. I. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_09.pdf
- [13] Maierová, L. Světlo v budovách – nevizuální vnímání světla. Digitální obrázek. Praha. 2017. Web. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/okna-dvere/svetlo-v-budovach-nevizualni-vnimani-svetla>
- [14] Sokanský, K. a kolektiv. Základy základů světelné techniky. Ostava, 2007. Web. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/vuee/VUEE_Zaklady_svetelne_techniky.pdf
- [15] Brainard, George & Hanifin, John & Greeson, Jeffrey & Byrne, Brenda & Glickman, Gena & Gerner, Edward & Rollag, Mark. Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience. (2001). 21. 6405-12. 10.1523/JNEUROSCI.21-16-06405.2001. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/11854925_Action_Spectrum_for_Melatonin_Regulation_in_Humans_Evidence_for_a_Novel_Circadian_Photoreceptor
- [16] Hattar, Samer & Liao, H.W. & Takao, Motoharu & Berson, David & Yau, King-Wai. Hattar S, Liao HW, Takao M, Berson DM, Yau KW. Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. Science (2002). 295: 1065-1070. Science (New York, N.Y.). 295. 1065-70. 10.1126/science.1069609. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/11525664_Hattar_S_Liao_HW_Takao_M_Berson_DM_Yau_KW_Melanopsin-containing_retinal_ganglion_cells_architecture_projections_and_intrinsic_photosensitivity_Science_295_1065-1070
- [17] Wirz-Justice, Anna. The implications of chronobiology for psychiatry. Psychiatric Times. (2011). 28. 56-61. Dostupné z: https://www.chronobiology.ch/wp-content/uploads/publications/Wirz_Justice_2011_2.pdf

- [18] Blume, C., Garbazza, C. & Spitschan, M. Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood. *Somnologie* **23**, 147–156 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11818-019-00215-x>
- [19] Hescong, Lisa. Daylighting in Schools An Investigation into the Relationship Between Daylighting and Human Performance Condensed Report. (1999). 10.13140/RG.2.2.31498.31683. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/328416721_Daylighting_in_Schools_An_Investigation_into_the_Relationship_Between_Daylighting_and_Human_Performance_Condensed_Report
- [20] Illnerová, Helena, a Alena Sumová. Vnitřní časový systém. *Solen* 8.9 (2011): 374-8. Print. Dostupné z https://www.solen.cz/artkey/med-201109-0007_Vnitri_casovy_system.php
- [21] CIE. CIE S 026 Toolbox – v1.049a -2020/11 [software]. Web. Dostupné z: <https://cie.co.at/news/launch-cie-s-026-toolbox-and-user-guide>
- [22] ČSN 73 0580-1:2007 Denní osvětlení budov – Část 1: Základní požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007, 24 s. Print.
- [23] ČSN 73 0580-2:2007 Denní osvětlení budov – Část 2: Denní osvětlení obytných budov. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007, 4 s. Print.
- [24] ČSN EN 17 037 Denní osvětlení budov. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019, 56 s. Print.
- [25] ČSN 36 0020 Sdružené osvětlení – Základní požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015, 12 s. Print.
- [26] ČSN EN 12464-1 - Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Print.
- [27] Zwiener, V. Umělé osvětlení z pohledu projektanta. Praha, 2011., Web. Dostupné z: <https://atelier-dek.cz/umele-osvetleni-z-pohledu-projektanta-203>

- [28] Dvořáček, V. Stanovisko CIE k neobrazovým účinkům světla. Praha, 2020. Web. Dostupné z : <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/stanovisko-cie-k-neobrazovym-ucinkum-svetla--5029>
- [29] CIE S 026:2018. *CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light*. 2018.
- [30] Silbernagl, Stefan a Despopoulos, Agamemnon. Atlas fyziologie člověka. Digitální obrázek. Praha: Grada, 2004. 448 s. ISBN 978-80-247-0630-6.

Seznam obrázků

- Obr. 1 Viditelné spektrum světla
- Obr. 2 Spektrální složení světla světelných zdrojů
- Obr. 3 Světlené prostředí ve zvolených historických obdobích
- Obr. 4 Sdružené osvětlení v interiéru
- Obr. 5 Schématický řez lidským okem, detail sítnice se třemi typy fotoreceptorů
- Obr. 6 Citlivosti jednotlivých čípků a tyčinek
- Obr. 7 Spektrální citlivost melanopsinu
- Obr. 8 Tvary křivek svítivosti
- Obr. 9 Teplota chromatičnosti
- Obr. 10 Půdorys místnosti s vyznačenými měřenými body
- Obr. 11 Pohled na světelnou scénu 1: denní osvětlení
- Obr. 12 Naměřené světelné spektrum denního světla
- Obr. 13 Pohled na světelnou scénu
- Obr. 14 Naměřené světelné spektrum nepřímého umělého osvětlení
- Obr. 15 Pohled na světelnou scénu
- Obr. 16 Naměřené světelné spektrum přímého umělého osvětlení
- Obr. 17 Znázornění polohy měřených bodů
- Obr. 18 Rozhraní CIE S 026 α -opic Toolbox
- Obr. 19 Porovnání hodnot v bodě 5 napříč světelnými scénami
- Obr. 20 Porovnání hodnot v bodě 1 napříč světelnými scénami
- Obr. 21 Porovnání hodnot v bodě 5, světelná scéna 1: denní osvětlení
- Obr. 22 Porovnání hodnot v bodě 5, světelná scéna 2: nepřímé osvětlení
- Obr. 23 Porovnání hodnot v bodě 5, světelná scéna 3: přímé osvětlení

Seznam tabulek

- Tab. 1 Přibližné hodnoty E_v pro různá světelná prostředí
- Tab. 2 Požadavky na udržovanou osvětlenost vybraných prostorů, úkolů nebo činností dle ČSN EN 12464-1
- Tab. 3 Osvětlenosti úkolu a bezprostředního okolí úkolu dle ČSN EN 12464-1
- Tab. 4 Světelná scéna 1: denní osvětlení – Naměřené hodnoty osvětlenosti
- Tab. 5 Světelná scéna 2: Nepřímé osvětlení – Naměřené hodnoty osvětlenosti
- Tab. 6 Světelná scéna 3: Přímé osvětlení – Naměřené hodnoty osvětlenosti
- Tab. 7 Procentuální rozdíl mezi horizontální a vertikální rovinou v jednotlivých světelných scénách
- Tab. 8 Procentuální snížení melanopické osvětlenosti v porovnání s naměřenou osvětleností napříč světelnými scénami