



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra technických zařízení budov**

Světelné prostředí v budovách

Nevizuální vnímání světla a inter-individuální rozdíly

Lighting Environment in Buildings

Nonvisual Light Perception and Inter-Individual Differences

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. arch. Lenka Maierová

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Pozemní stavby

Školitel: Prof. Ing. Karel Kabele, CSc.

Mirjam Münch, Ph.D. (školitel-specialista)

Praha, 2015



PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. arch. Lenka Maierová

Název disertační práce: SVĚTELNÉ PROSTŘEDÍ V BUDOVÁCH
- NEVIZUÁLNÍ VNÍMÁNÍ SVĚTLA A INTER-INDIVIDUÁLNÍ ROZDÍLY

Prohlašuji, že jsem uvedenou doktorskou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele Prof. Ing. Karla Kabeleho, CSc .

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu:

- OP VaVpl č. CZ.1.05/2.1.00/03.0091 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov
- Fellowship Sciex-NMSch - Scientific Exchange Program NMS-CH, Švýcarsko
- SGS10/234/OHK1/3T/11 - Testování nových technologií pro zajištění vnitřního prostředí budov
- Doktorský grant GA ČR 103/09/H095

v Praze dne 10. 07. 2015

_____ podpis

Na tomto místě bych ráda poděkovala panu profesorovi Karlu Kabelemu za velkou odvahu, že mě, architektku, neváhal přijmout do doktorského studia na katedře TZB. Děkuji za odborné vedení, poskytnutou důvěru, svobodu k hledání vlastní cesty a podporu ve chvílích, kdy ji bylo třeba. Jsem neskutečně vděčná za jeho nápad věnovat se tématu světelného prostředí v budovách, které se časem ukázalo jako úžasná volba.

Panu profesorovi Jean-Louis Scartezzinimu děkuji za možnost práce a studia v Laboratoři solární energie a stavební fyziky Švýcarského federálního technologického institutu v Lausanne. Jsem nekonečně zavázána Dr. Mirjam Münch, která se v Lausanne stala mým školitelem – specialistou. Bez její odborné pomoci by tento výzkum nebyl možný. Děkuji jí za možnost nahlédnout do velmi fascinujícího a pro mě zcela nového vědního oboru chronobiologie. Děkuji jí za trpělivost, se kterou bez ohledu na denní či noční hodinu odpovídala tisíce mých otázek. V neposlední řadě děkuji Apiparn Borisuit za úžasnou spolupráci při vedení experimentu.

Je třeba také zmínit podporu švýcarské nadace Sciex-NMSch, která můj pobyt ve Švýcarsku podpořila. Výzkumný projekt jako takový bylo možno realizovat díky nadaci Velux Foundation. Mé poděkování patří také doktorskému grantovému projektu Udržitelná výstavba budov a udržitelný rozvoj sídel a Univerzitnímu centru energeticky efektivních budov za podporu při mé práci.

Velké díky patří také všem českým i švýcarským kolegům a kamarádům, kteří mi po celou dobu drželi palce. Děkuji všem za přátelské a inspirativní prostředí, bez kterého si svou práci nedokážu představit.

Největší díky patří mé rodině. Děkuji za nekonečnou podporu, bez které by tato práce nikdy nevznikla.

ABSTRAKT

Tato práce se věnuje vlivu světelného prostředí na člověka, zejména na jeho nevizuální vnímání. Ústředním cílem práce je popsat stav současného světelného prostředí ve vztahu k nevizuálnímu vnímání světla a hledat principy pro vytváření kvalitního světelného prostředí pro celou populaci i její jednotlivé příslušníky; proto práce ve větším detailu rozpracovává téma inter-individuálních rozdílů.

K dosažení vytčeného cíle práce v teoretické části sleduje proměnu světelného prostředí člověka v průběhu historie až do současnosti a zkoumá možný dopad světelného prostředí na člověka v moderní společnosti. Vzhledem k novosti tématu nevizuálního vnímání světla a jeho vlivu na vnitřní biologické hodiny je hlavní důraz teoretické části práce kladen na poznání souvislostí světelného prostředí, denní doby a regulace spánku a bdění.

Experimentální část práce je založena na chronobiologickém experimentu, prováděném v Laboratoři solární energie a stavební fyziky Švýcarského federálního technologického institutu v Lausanne (LESO-PB EPFL). Sleduje vliv světelného prostředí na jedince s výrazně odlišnými světelnými preferencemi – extrémními chronotypy. Díky tomuto modelu lze teoreticky posoudit možnou variabilitu reakcí v rámci celé zdravé populace.

Výsledky výzkumu zpochybňují schopnost jedince objektivně posoudit vliv světelného prostředí na vlastní výkonnost a biologické funkce řízené cirkadiánními hodinami v těle, zejména pokud se jedná o vlivy dlouhodobé. Současně výsledky práce naznačují, že světelné prostředí s trvalou hladinou osvětlenosti není vhodné z hlediska dlouhodobé regulace cirkadiánních rytmů v těle člověka. Pro zajištění kvalitního prostředí je v regulaci osvětlovacích systémů důležité zohlednění faktoru denní doby. Naopak denní světlo se ukázalo být optimálním synchronizátorem cirkadiánního systému. Nabízí se tedy možnost vytvořit regulaci osvětlení podle jeho vzoru.

Z celospolečenského pohledu a z pohledu každého jednotlivce je žádoucí pobývat v prostředí s dostatečnou intenzitou světla během dne a omezit rušivé světlo v noci. Tato světelná hygiena je zejména důležitá pro rizikové skupiny osob – extrémní chronotypy, adolescenty a seniory.

KLÍČOVÁ SLOVA: kvalita vnitřního prostředí, osvětlovací systémy, regulace spánku/bdění, cirkadiánní rytmus, bdělost/ospalost, kognitivní výkonnost, melatonin, spotřeba elektrické energie, extrémní chronotypy.

ABSTRACT

This thesis assesses the impact of the lighting environment on humans, focusing mainly on non-visual effects of light. Its main aim is to describe the possible impact of a contemporary lighting environment on the non-visual perception of light and to seek for principles for designing a quality lighting environment, suitable for the whole population as well as for individuals; the issue of inter-individual differences is investigated in detail.

The theoretical part of the work gives an overview of changes from historical to contemporary lighting conditions and investigates the impacts of the lighting environment on humans. As the theme of nonvisual light perception and its impact on the internal biological clock is novel, the theoretical part focuses on the relationship between lighting environment, time of the day and regulation of the sleep/wake rhythm.

The experimental part presents results of the chronobiological experiment performed at the Solar Energy and Building Physics Laboratory of the Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (LESO-PB, EPFL). It investigates the impact of the lighting environment on human subjects with different lighting preferences, thereby focusing on extreme chronotypes. The experimental model allows estimating the possible variability of reactions across the whole healthy population.

The research results question the capability of an individual to fully evaluate the impact of light on his/her own performance and physiological functions under the control of the circadian body clock, mainly with regard to the long-term effects. Concurrently our lighting study revealed that constant quantity and quality, provided by the artificial lighting systems without any further regulation, did not agree with user preferences. Furthermore, daylight was shown to be optimal for the regulation and synchronization of endogenous circadian rhythms. To provide a quality lighting environment, "time of the day" needs to become an integrated factor in the regulation of lighting systems.

According to all these findings, a dynamic lighting system that imitates the natural daylight profile could be an option in cases where access to daylight is limited. The society, as well as each individual, should extend the time spent in bright light conditions during the day and be protected from the disturbing effects of light during the night. This light hygiene is mainly important for recognized risk groups of individuals, such as extreme chronotypes, adolescents and seniors.

KEYWORDS: Quality of indoor environment, lighting systems, sleep/wake regulation, circadian rhythms, alertness/sleepiness, cognitive performance, melatonin, electrical energy consumption, extreme chronotypes.

Úvod¹

„Light is a metaphysical instrument, it's a tool of expression, it's a way to understand form and time. By tapping the light, you tap a cultural DNA of a place.“
Hani Rashid²

1.1 Osobní motivace

Moje profesní cesta začala na Fakultě architektury a praxí v atelieru interiérového designu, pokračovala postgraduálním studiem na Fakultě stavební se zaměřením na kvalitu vnitřního prostředí a úsporné technologie, včetně nedávno dokončené dvouleté práce na chronobiologické studii v rámci zahraniční stáže. Proto se v této disertační práci úzce prolíná téma architektury s kvalitou vnitřního prostředí, biologií a chronobiologií. Mou dlouhodobou motivací je hledání zásad pro vytváření vnitřního prostředí vhodného pro zdravý život, spolu se zodpovědným chováním ke spotřebě, ať už se jedná o energii elektrickou, přírodní zdroje obecně, nebo o lidskou práci využívající to, čemu se v posledních letech začíná říkat lidský kapitál.

1.2 Vymezení tématu práce

Při navrhování vnitřních prostor s trvalým pobytem lidí je součástí práce architekta/projektanta zajistit kvalitní osvětlení. Ale co to vlastně znamená „kvalitní osvětlení“? Je to osvětlení, které nám umožňuje dobře vidět předměty kolem nás, jejich polohu a vzdálenost, jejich strukturu povrchu a barvu? Je to osvětlovací systém, který je

¹ S ohledem na plynulost textu byly v úvodní části vynechány odkazy na zdroje jednotlivých tvrzení. Všechna tvrzení jsou podrobněji rozvedena v následujících kapitolách, a to včetně odkazů na příslušné publikace. Přesné zdroje přímých citací je možné nalézt v samostatném seznamu na straně 123.

² „Světlo je metafyzický prostředek, je to nástroj vyjádření, je to cesta k porozumění tvaru a času. Dotýkáním se světla se dotýkáme kulturní DNA místa.“
Hani Rashid, předseda poroty International VELUX Award

energeticky úsporný při provozu a má přiměřené pořizovací náklady? Je splnění všech legislativních požadavků zárukou kvalitního osvětlení?

Osvětlení prostoru kolem sebe považujeme v moderní společnosti často za samozřejmost. Přemýšlet o něm začínáme až ve chvíli, kdy nastane problém, ať už v dostupnosti nebo kvalitě osvětlení. Nepohoda nás vede k úvahám, jaké světlo je to „správné“. Je denní světlo lepší než umělé osvětlení? Je nutné mít v místnosti okna? Může mít umělé osvětlení negativní vliv na náš zrak? Je důležité vybírat zdroje světla podle funkce prostoru? A kolik světla je „správně“? Je to stejné kdykoli a pro kohokoli, nebo se mění v čase a v závislosti na jedinci? Liší se požadavky na osvětlení ve dne a v noci? V létě a v zimě? U dětí a u starých lidí? Má osvětlení vliv i na zdraví? Ovlivňuje naši náladu a naše soustředění? Je tma také důležitá? Proč jsme za světla vzhůru a za tmy spíme? Proč je pro někoho náročné pracovat na směny nebo cestovat proti časovým pásmům, a jiní se dokážou přizpůsobit?

Budovy navrhujeme v první řadě pro lidi. Kvalitní osvětlení by mělo být takové, aby zajišťovalo uživateli daného prostoru maximální míru spokojenosti. Neměla by tedy definice kvalitního osvětlení spíše znít: „... naplňuje potřeby uživatelů prostoru a vyhovuje architektonickým a provozně technickým požadavkům architekta a investora“.

Má to být uživatel, kdo nastavuje a ovládá intenzitu osvětlení v místnosti, jakož i jeho další parametry? Dokáže uživatel dostatečně posoudit, zda jeho světelné prostředí je kvalitní? Bude-li si moci neomezeně vybrat, bude jeho zvolené osvětlení skutečně dobré? Dovede uživatel posoudit vlivy krátkodobé i ty s dlouhodobými dopady?

Odpovědi na některé z této dlouhé řady otázek se snaží najít tato práce.

Vytvořit kvalitní světelné prostředí lze pouze ve spolupráci více vědních oborů. Je to proces hledání souvislostí a vazeb mezi poznáním z fyziky, biologie, psychologie a sociálních věd, mezi osvětlovací technikou, obory stavebními, výtvarnými, energetickými. Proces, který zahrnuje pozorné naslouchání zpětné vazbě od uživatele a učení se z ní. Pouze pravidelná komunikace, sdílení poznání a vzájemný respekt k práci ostatních může pomoci najít odpovědi.

Dosud se kvalita osvětlení většinou měří pomocí fotometrických veličin a splnění požadavků se posuzuje dle stavebních, hygienických a dalších předpisů. Tímto postupem se snažíme předejít vzniku negativních jevů, které známe díky poznatkům a zkušenostem z předchozích realizací a které jsou díky zkušenosti zohledněny v legislativě, což je jistě důležité. To však nemusí nezbytně postačovat k vytváření světelného prostředí opravdu optimálního z hlediska jeho uživatelů.

Zobecněním typických požadavků, získaných díky výzkumům hodnocení světelného prostředí od stovek i tisíců osob, je pravděpodobně možné vytvořit pravidla pro navrhování osvětlení vnitřních prostor tak, aby vyhovovala typickému uživateli. Na druhou stranu je také známa velká individuální variabilita, pokud je každému umožněno zvolit si světelné prostředí podle osobní preference. Co způsobuje tyto rozdíly v preferencích? Může to být pouze možnost zvolit své světelné prostředí. V tom případě by schopnost adaptace lidského oka dokázala tyto odchylky od průměru jednoduše

vyrovnat. Může se však také jednat o významný faktor, který vychází ze specifických fyziologických či psychologických vlastností konkrétního jedince, a pro zajištění kvalitního světelného prostředí je tedy třeba jej vzít v úvahu.

V populaci existují skupiny osob, které jsou výrazně citlivější na světelné prostředí. Tyto inter-individuální rozdíly mohou být dány například věkem, pohlavím nebo vrozeným chronotypem.

Biologické hodiny u dospívajících mívají tendence se zpožďovat, lidé kolem 20. roku věku mají biologickou tendenci chodit spát i vstávat později než běžná populace. Expozice světlem v nepřírozené denní době, zejména večer a v noci, může zpoždění vnitřních biologických hodin v této skupině populace ještě zvýraznit a tím způsobit vážný problém v regulaci spánku a bdění. Světelná hygiena zejména u adolescentů je tedy velmi důležitá.

Naopak u seniorů se nevizuální systém stává méně citlivý a pro dobrou synchronizaci potřebuje během dne vyšší hladiny osvětlenosti, než jsou běžné v jejich domovech. Poruchy spánku a denního rytmu jsou tak jedny z nejčastějších problémů seniorů.

Z předpokladu o individuální specifičnosti požadavků na světelné podmínky vychází tato práce. V centru jejího zájmu stojí člověk jako jednotlivec, jeho potřeby, světelné preference a reakce na světelné prostředí. Objektem zájmu jsou zejména vlivy nevizuální, jimiž světlo dopadající do lidského oka působí na fyziologické procesy v těle, aniž by se v mozku vytvářel obrazový vjem.

Práce se zaměřuje na osvětlení kancelářských prostor. Jsou to místnosti, ve kterých tráví významná část populace více než polovinu svého aktivního dne. Je tedy smysluplné sledovat výkonnost člověka jako jedno z hlavních objektivních kritérií vlivu osvětlení.

Přestože případný vliv osvětlení na produktivitu je velmi důležitý, význam člověka by neměl být redukován pouze na soubor ekonomických nebo výkonnostních ukazatelů. Subjektivní hodnocení jedincem je neméně významné, stejně jako případný vliv osvětlení na fyziologické procesy v lidském těle.

1.3 Současné výzvy pro kvalitu světelného prostředí

V průběhu velmi krátké doby, alespoň z hlediska historie člověka a jeho vývoje, došlo k několika zásadním změnám v našem světelném prostředí. Proměnilo se prostředí, ve kterém žijeme, objevily se nové světelné zdroje a zásadně se liší i činnosti, které vykonáváme. Některé v minulosti dominantní faktory ztratily v nových podmínkách svou důležitost, naopak jiné se staly určujícími pro dosažení potřebného vizuálního komfortu.

Jediné, co zůstává po tisíce let stejné, jsou fyziologické potřeby a požadavky člověka. Je tedy více než vhodné ověřit si, do jaké míry nové světelné podmínky odpovídají našim potřebám.

Již od doby, kdy pračlověk postavil svůj první úkryt, hledal způsob jak dovnitř přivést světlo. Dostatečné prosvětlení interiéru budov nebylo až do doby rozšíření elektrického osvětlení samozřejmostí, a právě proto si stavitelé i uživatelé velmi dobře uvědomovali jeho význam. Dnes nám díky technologickému rozvoji dostupné umělé osvětlení, spolu

s dalšími technologiemi pro zajištění kvality vnitřního prostředí (vytápění a větrání), umožnilo přesunutí většiny aktivit do interiéru budov. V průběhu posledních století se tím značně omezuje doba, kdy je lidský organismus vystaven bezprostřednímu vlivu denního světla. Jeho funkci dnes nahrazuje osvětlení umělé, které je schopno zajistit stálou kvalitu v kteroukoli hodinu během dne i noci. Umožňuje tak vykonávat náročné zrakové činnosti i mimo denní dobu, což bylo v minulosti téměř nemožné. Regulace osvětlení, řízení jeho intenzity, spektrální charakteristiky i rozložení v prostoru a v čase, které za nás v minulosti řešila příroda, jsou dnes v našich rukou.

„Dlouho jsme se snažili přivést maximum světla do budovy. Ted' bychom měli zajistit jeho kvalitu,“ říká Jean-Louis Scartezzini, vedoucí Laboratoře solární energie a stavební fyziky na švýcarské EPFL.

Co vlastně určuje kvalitu osvětlení? Stávající regulativy vycházejí pouze z vizuálního posouzení světelného prostředí – neberou v úvahu další vlivy světla na člověka. Vlivy nevizuálního vnímání, například na biologické hodiny člověka, které nedokážeme vědomě zcela posoudit, zůstávají při navrhování osvětlovacích systémů většinou nezohledněny. Rostoucí důraz je v současnosti kladen i na úsporu energie. Nejen návrh osvětlovací soustavy, ale i způsob řešení a případné stínění okenních otvorů, ovlivňují energetickou náročnost i světelné prostředí v interiéru. Dalším faktorem pro komplexní posouzení kvality vnitřního prostředí jsou možné zdravotní aspekty a vlivy na spokojenost uživatelů.

„Budovy stojí méně než lidé, spokojení a výkonní zaměstnanci jsou největší úsporou zaměstnavatele,“ píše Jennifer Veitch, která v Národním kanadském výzkumném centru v Ottavě zkoumá vliv vnitřního osvětlení na spokojenost a produktivitu zaměstnanců.

Typ zrakové činnosti, pro kterou je prostředí navrhováno, se v posledních dvaceti letech zásadně změnil. Tištěné dokumenty byly nahrazeny počítači. Práce před monitorem, který je sám o sobě zdrojem světla, má pravděpodobně zcela odlišné požadavky na světelné prostředí než čtení tištěného textu a současné předpisy postupně tyto změny zohledňují.

Podle posledních výzkumů má osvětlení prostoru více funkcí než jen umožnit zrakovou činnost. Pozitivní vliv jasného denního světla na psychiku i fyziologii člověka byl prokázán v řadě studií, zabývajících uživatelskými preferencemi, stejně jako byla zaznamenána výrazná obliba (pracovních) míst u okna. Jednoznačné příčiny tohoto chování nejsou prozatím známy.

Účinky jasného světla na psychiku a bdělost nejsou novým poznatkem. Již ve více než dva tisíce let starém Buddhově spise Capala Sutta doporučuje mistr svým žákům jak bojovat s ospalostí a otupělostí během meditace.

“Pokud cítíte přicházející ospalost, zkuste si představit denní světlo, aby projasnilo vaši mysl, protože jasné světlo člověka probouzí,“ říká Gautama Buddha.

Nevizuální systém vnímání světla, jehož receptory byly před nedávnem identifikovány v lidském oku, řídí biologické hodiny organismu a ovlivňuje řadu dalších fyziologických

funkcí. Vědecké studie potvrzují výrazný vliv na náladu, koncentraci, kvalitu spánku a spánkovou regulaci celkově.

„V konečném důsledku může světelné prostředí pozitivně i negativně ovlivnit zdraví a celkovou kvalitu našeho života,“ shrnuje Russell Foster, profesor cirkadiánní neurovědy z Oxfordské univerzity.

Řada biologických studií potvrdila i vliv na obezitu a zvýšení rizika některých typů rakoviny při desynchronizaci vnitřních biologických hodin. K poruše systému může dojít při dlouhodobé expozici jasnému světlu v nevhodnou denní (tedy přesněji noční) dobu současně s nedostatkem světla ve dne.

Současný životní styl moderního člověka, který pouze 10–20 procent času tráví v prostředí světelnou intenzitou dostatečnou pro zajištění nevizuálních funkcí, a současně až 20 procent populace přinejmenším částečně nějakým způsobem pracuje v noci, pod umělým osvětlením.

Cenou, kterou platíme za život ve společnosti aktivní 24 hodin / 7 dní v týdnu, je dlouhodobá spánková deprivace a poruchy denního rytmu u velké části populace. Projevuje se to jako stav trvalé ospalosti, jako neschopnost udržet pozornost a výrazně to zhoršuje kognitivní výkon během dne, následovaný nekvalitním spánkem v noci. S omezováním pobytu na denním světle souvisí nárůst případů sezónních depresivních poruch. Jedna z neúčinnějších metod léčby těchto poruch je právě světelná terapie.

Zdá se, že denní světlo nabízí něco, co umělé osvětlení (alespoň prozatím) zajistit nedokáže. Bylo by tedy logické v co největší míře zajistit přístup denního světla do interiéru budov. Nově vytvářená legislativa ale jde spíše opačným směrem a stávající požadavky na denní světlo v budovách spíše snižuje. Nedostatečné prosvětlení interiéru denním světlem se kompenzuje větším využitím umělého osvětlení. Toto je možné díky rozšíření moderních úsporných zdrojů světla, kompaktním úsporným zářivkám a zejména LED. V porovnání s klasickou žárovkou i vzájemně mezi sebou se tyto zdroje liší ve spektrálním složení světla, což ovlivňuje jejich podání barev a teplotu chromatičnosti. Osvětlovaný prostor může mít díky tomu jiný barevný nádech, což může anebo nemusí uživatelům vyhovovat. Odlišný však může být také vliv na nevizuální systém, který ovlivňuje vnitřní biologické hodiny člověka. Výběr vhodného zdroje tak může být velmi pozitivním faktorem, nevhodný světelný zdroj však může uškodit. Výběr zdroje umělého osvětlení se tedy stává daleko náročnějším, než tomu bylo v minulosti, všeobecná diskuze a osvěta tohoto tématu je nevyhnutelná.

1.4 Vymezení problému

Jak ukázala předchozí kapitola, v nedávné minulosti došlo k výrazné změně požadavků na světelné prostředí v budovách a současně se díky moderním technologiím rozšířily možnosti osvětlovacích systémů. Při hledání kvality světelného prostředí je v první řadě nutné identifikovat faktory světelného prostředí, kterým je třeba věnovat zvýšenou pozornost. Při posuzování kvality světelného prostředí je třeba zabývat se i vlivem na nevizuální vnímání světla. Z tohoto důvodu je nutné sledovat i faktory, které v dosavadní praxi posuzovány nejsou, protože vizuální vnímání neovlivňují nebo hrají

zanedbatelnou roli. Z hlediska vlivu na vnitřní biologické hodiny však mohou být zásadní.

Současná legislativa i další regulativy, podle kterých je navrhováno a posuzováno osvětlení v budovách, vznikla na základě naší vizuální zkušenosti a posuzuje osvětlení v kontextu vizuálního vnímání. Pro žádoucí zohlednění nových poznatků o nevizuálním vnímání světla bude třeba revidovat současné standardy a zavedené zvyklosti při navrhování světelných systémů v budovách jakož i navrhování budov samotných. Podkladem pro to bude identifikace fyziologických nebo psychických problémů, které se často mezi uživateli vyskytují, u kterých byla prokázána souvislost s nevhodným světelným prostředím.

Pro posouzení vhodnosti osvětlení tedy bude nutné zohlednit řadu faktorů. Bude nutno zajistit vizuální komfort pro činnosti, které budou v prostoru vykonávány. Pro synchronizaci systému nevizuálního vnímání světla bude nutno dodat vhodné množství světla ve vhodnou denní dobu a zohlednit při tom jak krátkodobé povzbuzující efekty, tak dlouhodobý vliv na cirkadiánní rytmus, tj. vnitřní přibližně 24hodinový rytmus v těle člověka, který ovlivňuje načasování řady fyziologických procesů. Současně je třeba zohlednit specifické potřeby osob, pro které je prostor vytvářen. Náklady na instalaci i provoz osvětlovacího systému jistě hrají významnou roli při navrhování ekonomicky a energeticky zodpovědných budov, přesto je třeba mít stále na zřeteli, že hlavním účelem budov je zajištění kvalitního a zdravého vnitřního prostředí pro jejich uživatele.

„Bez vzduchu vydržíme několik minut, bez vody řádově dny a bez potravy týdny. Nedostatkem denního světla a slunečního záření jsme schopni trpět celá léta. To ale neznamena, že sluneční záření a denní světlo při svém dlouhodobém působení nemají vliv na naše zdraví,“ shrnuje Jan Kaňka, expert na osvětlení působící na Fakultě stavební ČVUT v Praze. „Tak jako při nedostatku vzduchu, vody či potravy, chybí-li světlo, to není život, ale pouhé přežívání.“

2. Cíle a metodika

*"It's amazing how much data is out there.
The question is how do we put it in a form that's usable?"
William Ford Jr.³*

Ústředním cílem práce je hledat principy pro vytváření kvalitního světelného prostředí pro celou populaci i její jednotlivé příslušníky; proto práce ve větším detailu rozpracovává téma inter-individuálních rozdílů.

2.1 Teoretická část

K dosažení vytčeného cíle práce v teoretické části shromažďuje napříč několika obory potřebné podklady pro posouzení komplexního vlivu světelného prostředí na člověka. Vzhledem k novosti tématu nevizuálního vnímání světla a jeho vlivu na vnitřní biologické hodiny je hlavní důraz práce kladen na poznání souvislostí světelného prostředí, denní doby a regulace spánku a bdění.

2.1.1 Proměny světelných podmínek v průběhu historie až do současnosti – kapitola 3

Výzkumné otázky

Je v našem současném světelném prostředí více nebo méně světla, než tomu bylo v minulosti? Potřebujeme dnes světla více či méně?

³ *Je úžasné, kolik dat tam venku je. Otázka je, jak dát do formy, která by byla použitelná?"
William Ford Jr. v projevu k otevření nové laboratoře Silicon Valley, 25. června 2012*

Hypotéza

H1 – Z pohledu uživatele existují výrazné rozdíly v našem současném světelném prostředí ve srovnání s prostředím v dávné i nedávné minulosti. Nemáme stejné množství, stejnou kvalitu a rozložení světla v průběhu dne, jako mívali naši předkové v minulosti.

Strategie

Pomocí zmínek v literatuře zmapovat světelné prostředí, ve kterém naši předkové žili, jaké byly jejich budovy, dostupné zdroje světla a typické zrakové činnosti. Na tomto základě sestavit typický světelný profil 24hodinového dne v několika etapách historie střední Evropy.

2.1.2 Vizualní a biologické účinky světla na člověka – kapitola 4

Výzkumné otázky

Jaký je současný stav poznání vlivu světelného prostředí na fyziologii člověka? Jaké světelné prostředí potřebuje ke své činnosti nevizuální systém vnímání světla? Liší se kritéria kvality nevizuálního systému od kritérií na prostředí vhodné pro vnímání vizuální? Jaký má světelné prostředí vliv dobu aktivity člověka, na regulaci rytmu spánku a bdění? Do jaké míry se může reakce vnitřních biologických hodin na světelnou expozici lišit mezi jedinci?

Hypotéza

H2 – Vizualní a nevizuální systém vnímání světla se liší v citlivosti na jednotlivé atributy světelného záření.

Strategie

Ve formě přístupné i pro čtenáře bez hlubšího biologického vzdělání poskytnout základní informace o procesu vnímání světla okem člověka a zejména jeho vlivech na fyziologické procesy, jako je regulace rytmu spánku a bdění. Srovnat proces vizuálního a nevizuálního vnímání světla, popsat rozdíly v citlivosti na jednotlivé atributy světelného záření a shrnout formou tabulky.

2.1.3 Světelné prostředí v současných budovách a nevizuální vnímání světla – kapitola 5

Výzkumné otázky

Vyhovuje naše současné světelné prostředí požadavkům vizuálního i nevizuálního vnímání světla? Odpovídají požadavky současné legislativy také nevizuálním biologickým potřebám člověka? Může případně nevhodné světelné prostředí ovlivnit kvalitu života?

Hypotézy

H3 – Současné regulativy byly vytvořeny pro potřeby zraku jako nositele obrazové informace. Potřeby nevizuálního vnímání světla nejsou ve standardech zohledněny. Naše současné světelné prostředí je tak vytvořeno pouze s ohledem na zajištění

vizuálního komfortu, potřeby stimulace systému nevizuálního vnímání světla často nesplňuje.

H4 – Existují skupiny jedinců, u kterých nedostatečná synchronizace cirkadiánního rytmu, způsobená nevhodným rozložením osvětlenosti během dne, může negativně ovlivnit kvalitu života.

Strategie

Analýza světelných standardů v současných budovách z pohledu potřeb vizuálního a nevizuálního aparátu. Identifikace rizikových faktorů a skupin.

2.2 Experimentální část – kapitola 6

V experimentální části práce je formou chronobiologického experimentu sledován vliv světelného prostředí na jedince s výrazně odlišnými světelnými preferencemi – extrémními chronotypy. Díky tomuto modelu lze teoreticky posoudit možnou variabilitu reakcí v rámci celé zdravé populace.

2.2.1 Světelné preference osob s extrémním chronotypem

Výzkumné otázky

Do jaké míry se preference v subjektivní volbě osvětlení liší mezi jednotlivci? Je známo, že dostupnost denního světla během dne se zásadně liší pro osoby s extrémním chronotypem; zvolíme-li tedy extrémní chronotypy jako vědecký model pro stanovení míry variability osobních preferencí, bude rozdílné i jejich subjektivně zvolené světelné prostředí? Budou si volit odlišnou intenzitu osvětlenosti? Bude se jejich volba lišit podle časového rozložení světla během dne?

Hypotézy

H5 – Pokud je osvětlení řízeno subjektivními požadavky uživatele, očekáváme volbu proměnlivé hladiny osvětlenosti v průběhu dne, tj. snahu o vytvoření světelného prostředí blízkého přirozenému stavu.

H6 – Obě vybrané skupiny uživatelů (extrémně časně a extrémně pozdní chronotypy) mají odlišnou volbu osvětlenosti i rozdílné časové rozložení během dne.

H7 – V důsledku rozdílné dostupnosti denního světla během subjektivního dne mají pozdní chronotypy k dispozici nižší hladiny osvětlenosti v porovnání s časnými nebo neutrálními chronotypy. Tento nedostatek se pozdní chronotypy pokusí kompenzovat, pokud k tomu budou mít příležitost.

Strategie

Záznam světelných podmínek zvolených uživatelem po celou aktivní část dne – tj. 16 hodin trvání jednoho „dne“ experimentálního výzkumu. Srovnávání a analýza preferencí osob s extrémními chronotypy: zvolené osvětlenosti (vertikální osvětlenost rohovky oka), jejich načasování během dne a další faktory subjektivní volby osvětlení.

2.2.2 Vliv světelného prostředí na biologické funkce člověka

Výzkumné otázky

Jaké jsou efekty rozdílných světelných prostředí na biologické funkce člověka? Jak se tyto efekty proměňují v průběhu 16 hodin „experimentálního dne“? Liší se biologické reakce mezi chronotypy?

Hypotéza

H8 – Různé chronotypy rozdílně subjektivně hodnotí úroveň ospalosti v různých světelných režimech, liší se u nich čas významné změny úrovně ospalosti v průběhu dne.

H9 – Vyšší osvětlenost ve večerních hodinách (v režimu konstantního jasného světla ve srovnání s režimem dle volby uživatele) má vliv na kognitivní výkonnost. Tento vliv se liší mezi chronotypy.

H10 – Chronotypy se mezi sebou liší v načasování sekrece hormonu melatoninu během dne.

Strategie

Záznam a analýza subjektivního hodnocení bdělosti/ospalosti, objektivních výsledků testů, pravidelný odběr vzorků slin pro zjištění koncentrace melatoninu. Posouzení případných rozdílů podle chronotypu a podle světelných režimů. Sledování průběhu změn v čase.

2.2.3 Subjektivní hodnocení versus objektivní biologické efekty světla

Výzkumné otázky

Odpovídá subjektivní hodnocení bdělosti/ospalosti v různých světelných podmínkách objektivním vlivům světla na lidskou fyziologii? Do jaké míry jsme schopni zhodnotit vliv osvětlení na naše tělesné funkce? Je jedinec schopný posoudit komplexní účinky zvoleného světelného prostředí nebo si je uvědomuje pouze částečně?

Hypotéza

H 11 – Jedinci nejsou schopni vyhodnotit všechny účinky světla na svoji výkonnost a tělesné funkce. Subjektivní hodnocení bdělosti/ospalosti nekoreluje s objektivním měřením výkonnosti a hormonální sekrece.

Strategie

Během pobytu jedince ve třech rozdílných světelných režimech se pomocí dotazníků zjišťuje subjektivní hodnocení bdělosti/ospalosti zkoumaných osob. Objektivizace dat pomocí kognitivních počítačových testů a měřením biomarkerů (hormonální analýzou). Stanovení souvztažnosti změn mezi subjektivním a objektivním hodnocením korelační analýzou dat.

2.2.4 Spotřeba elektrické energie na osvětlení, vliv chronotypu a světelného režimu

Výzkumné otázky

Je spotřeba elektrické energie na osvětlení větší při udržování konstantní hladiny osvětlenosti nebo při ponechání volby v rukou uživatele? Ovlivňují inter-individuální rozdíly ve volbě světelného prostředí energetickou náročnost? Který ze dvou chronotypů spotřebuje na osvětlení více elektrické energie?

Hypotéza

H 12 – Světelný režim s jasným světlem a konstantní hladinou osvětlenosti je spojen s vyšší energetickou náročností v porovnání se světelným režimem dle volby uživatele.

H 13 – Odlišné světelné preference pozdních chronotypů vyvolají vyšší spotřebu energie pro umělé osvětlení.

Strategie

Měření a vyhodnocení energetické náročnosti osvětlení, porovnání mezi chronotypy a mezi světelnými režimy.

3. Proměny světelného prostředí člověka v průběhu historie až do současnosti (v oblasti střední Evropy)

*„I will love the light for it shows me the way,
yet I will endure the darkness because it shows me the stars.“
Og Mandino⁴*

Vědci předpokládají, že oko v podobě jak jej dnes známe u obratlovců, se vyvinulo přibližně před cca 500 miliony let. Původně jednoduchý senzor citlivý na světlo zajišťoval koordinaci endogenních procesů s denními a sezonními rytmy přírodního prostředí. Během historicky krátké doby méně než 100 milionů let vznikl opticky a neurologicky vyspělý zrakový orgán, výborně adaptovaný pro život v pozemských světelných podmínkách [Lamb 2007],

V posledních staletích došlo v našem životním stylu k zásadním změnám. Rozvoj moderní společnosti ovlivnil také světelné prostředí, ve kterém žijeme. Abychom byli schopni komplexně posoudit rozsah a dosah změn, které v našem světelném prostředí proběhly, mapuje tento příspěvek pomocí zachycených zmínek v odborné literatuře světelné prostředí člověka a jeho vztah ke světlu jako takovému v různých historických etapách. Životní prostředí jeskynních lidí končícího paleolitu bylo velmi blízké prostředí přírodnímu. Světelné prostředí člověka ve středověké vesnici se od přírodního stavu

⁴ *Budu milovat světlo, protože mi ukazuje cestu, ale přesto snesu temnotu, protože ta mi ukazuje hvězdy.”
Og Mandino in: The Greatest Salesman in the World, 1968*

lišilo jen málo. Teprve nástup průmyslové revoluce přivedl mnoho lidí do měst, se specifickými životními podmínkami a dopady na život v nich. Zásadní vliv na světelné prostředí člověka a na jeho denní životní rytmus ale mělo teprve rozšíření elektrického osvětlení od konce 19. a ve 20. století. Tento rychlý vývoj pokračuje až do současnosti.

Abychom mohli komplexně posoudit světelné prostředí člověka v dané historické době, potřebujeme poznat několik faktorů, které jej ovlivňují. 1 - Prostředí, ve kterém člověk se během dne pohybuje. 2 - Světelné zdroje, které jsou k dispozici, možnosti přístupu denního světla do bytových místností. 3 - Typ aktivity, vykonávané zrakové činnosti.

3.1 Před 10 tisíci lety – končící paleolit a jeskynní lidé

V období končící poslední doby ledové, před cca 10 tisíci lety, v poslední fázi paleolitu se biologický vývoj druhu *Homo sapiens* (člověk moudrý) se dostal do podoby, jak jej známe ze současnosti. Zdroje informací o životě paleolitického člověka jsou omezené a je velmi pravděpodobné, že se jeho způsob života mohl značně lišit i mezi jednotlivými lidskými společnostmi v rámci stejné geografické oblasti. Přesto je možné si vytvořit hrubou představu a přibližně rekonstruovat jeho každodenní život.

Lidé konce paleolitu obývali jeskyně a podobné přírodní kryty, živil se lovem a sběrem plodů. Žili ve skupinách, na stejném místě většinou zůstávali po dobu několika měsíců i déle, dokud to umožnila dostupnost potravy [Svoboda 2009]. (Obrázek 3.1 vlevo).



Obr. 3.1: Zdeněk Burian - Tábořiště lovců pozdního paleolitu, ilustrace (vlevo); Prehistorické vápencové nebo pískovcové miskové lampy s držátkem (dole) a bez držátka (nahore) - spalování živočišného tuku pro osvětlení. [de Beaune & White 1987].

Trávili celý den v exteriéru a plně využívali čas, kdy bylo dostupné denní světlo. Do temna jeskyně nebo zbudovaného krytu se uchýlovali pouze pro ochranu před nepříznivým počasím, predátory, případně v noci k bezpečnějšímu spánku. Vybudované

přístřešky byly bez okenních otvorů, vstupní otvor zakrytý jednoduchým krytem [Svoboda 2009].

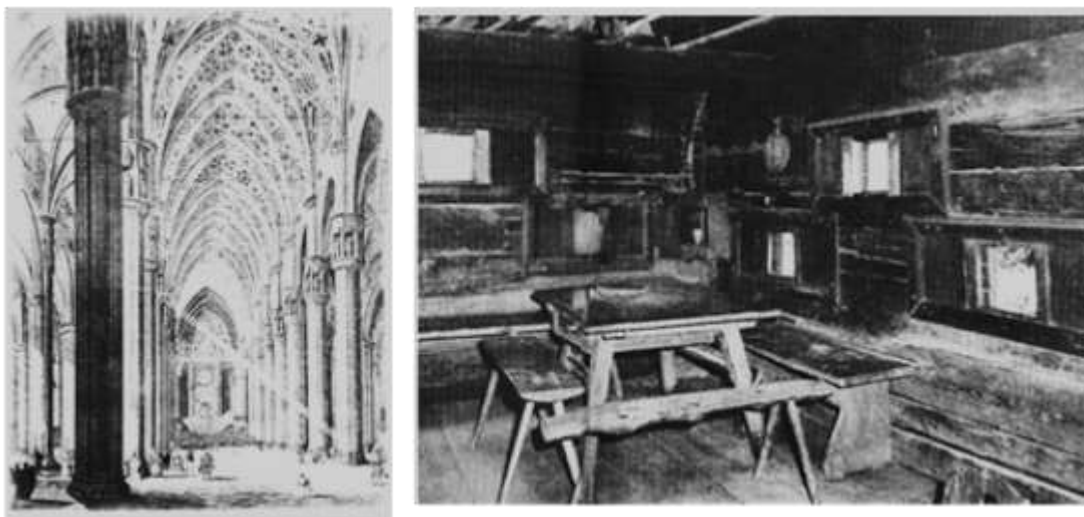
Osvětlení po západu slunce zajišťovaly dřevěné louče, otevřené ohniště nebo kamenný kahan s živočišným tukem (Obrázek 3.1 vpravo). I přesto, že kamenné lampy jsou výrazně slabší světelný zdroj než dnešní svíčky, díky velké přizpůsobivosti lidského oka bylo toto osvětlení dostatečné pro základní prostorovou orientaci a jednoduché úkony v nejbližším okolí [de Beaune & White 1987]. Dosahované hladiny osvětlenosti ani spektrální složení světla plamene (převážně dlouhé vlnové délky) nemohly ovlivnit vnitřní cirkadiánní rytmus, tedy přirozenou regulaci rytmu dne a noci. Stabilitu cirkadanního rytmu zajišťovalo denní světlo.

Život paleotického člověka byl zcela v souladu s rytmem přírody. Byl výrazně ovlivněn nejen denními, ale také sezonními vlivy, jako je výrazné střídání nižší a vyšší aktivity v průběhu roku v důsledku změny délky trvání denního světla [Wehr 2001]. Je pravděpodobné, že se sezónnost promítala i v biologických funkcích – např. střídání období s vyšší a nižší plodností, jak se dodnes vyskytuje u izolovaných přírodních národů [Foster & Roenneberg 2008]. Silný vztah k pohybu Slunce, střídání světla a tmy během dne i ročních období je možno najít také u nejstarších dochovaných staveb jako Stonehenge, kde hlavní princip celé konstrukce je znalost pohybu Slunce po obloze a určení slunovratu.

3.2 Středověké vesnice - světlo a vnímání času

Ani z období středověku se nám nezachovaly přímé záznamy světelného prostředí v budovách. Zmínky v historické literatuře, zachované fragmenty staveb i předmětů denní potřeby, stejně jako lingvistické stopy ale umožňují vytvořit poměrně přesný obrázek, jak zásadní postavení v životě středověkého člověka zaujímal světlo. Bylo vnímáno jako důležitá, až mystická (boží) substance. Stopy těchto emocí lze najít dodnes – svíce se užívají pro vyjádření slavnostního okamžiku, pojem „světec“ označuje vzor počestnosti, osvícení je synonymem pro dosažení duchovní spásy...

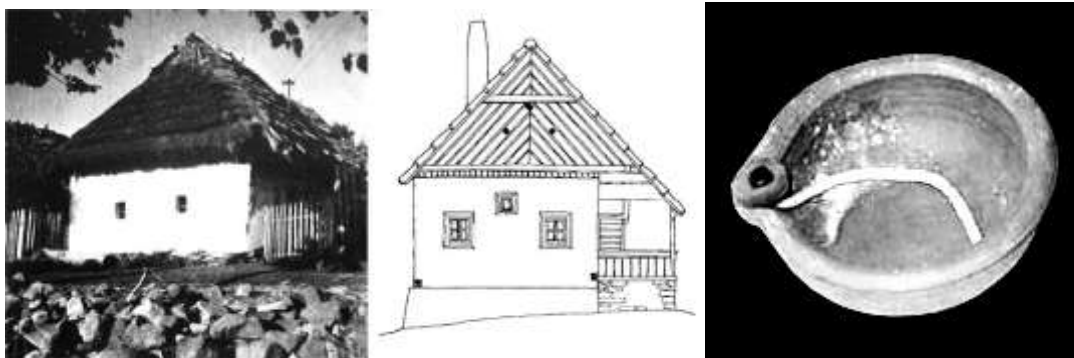
Světlo však přenášelo středověkého člověka z nebezpečné temnoty noci do přívětivého dne nejen duchovně. Technický pokrok se orientoval ke stále většímu podmanění světla. Jaký to musel být zázrak, když masivní kamenná zeď románského kostela ustoupila žebrové konstrukci gotické katedrály a velká vitrážová okna do interiéru pustila proudy barevného světla (Obrázek 3.2 vlevo). Dodnes se nám v gotických katedrálách tají dech. Jak se asi v tomto prostoru cítil středověký poutník, sám žijící v jednoduchém, většinou roubeném stavení. (Obrázek 3.2 vpravo).



Obr. 3.2: Srovnání interiéru gotické katedrály (vlevo) a rekonstrukce dymné jizby, s typickými osvětlovacími a kouřovými okny (vpravo), převzato z [Škabrada 2005].

V běžném středověkém stavení byla většinou vytápěná pouze jediná místnost, tzv. (dymná) jizba. Tam hořel otevřený oheň a jeho dým stoupal volně ke stropu. Dva typy okenních otvorů ve dvou řadách nad sebou (Obrázek 3.3) jsou dnes typickým výtvarným prvkem lidové architektury. Původně měla každá řada otvorů svou specifickou funkci: horní řada zajišťovala odvod kouře, spodními okny se dovnitř dostávalo denní světlo [Škabrada 2005]. Okenní sklo bylo pro běžnou populaci nedostupné, do otvorů pro přívod denního světla byla někdy napínána pergamenová mázdra, v zimě bývaly často vyplněny houněmi a utěsněny dřevěnými okenicemi. Do vytápěné místnosti se zejména v zimě soustředil veškerý život rodiny.

Otevřený oheň sloužil k vytápění, přípravě pokrmů i svícení, doplňován lojovými a olejovými lampami (Obrázek 3.3 vpravo) nebo svícemi ze včelího vosku. Voskovice byly velmi drahé, dostupné pouze pro bohaté rodiny a církve. Louče a pochodně představovaly zejména v převažujících dřevěných objektech velké riziko požárů. Umělé osvětlení bylo luxusem pro bohaté. Jedna hodina osvětlení dostatečného pro čtení, při použití rostlinného oleje jako paliva, měla hodnotu několika desítek hodin práce [Nordhaus 1997]. Kdo si mohl dovolit svítit, měl k dispozici více času a tím i potenciálně větší moc. Ne náhodou později osvícenci (= vzdělanci) pojmenovali středověk jako temný. Ve Francii je dochován zákoník, podle kterého jsou zločiny spáchané v noční temnotě postihovány dle speciálního, tvrdšího práva [Le Goff 1991].



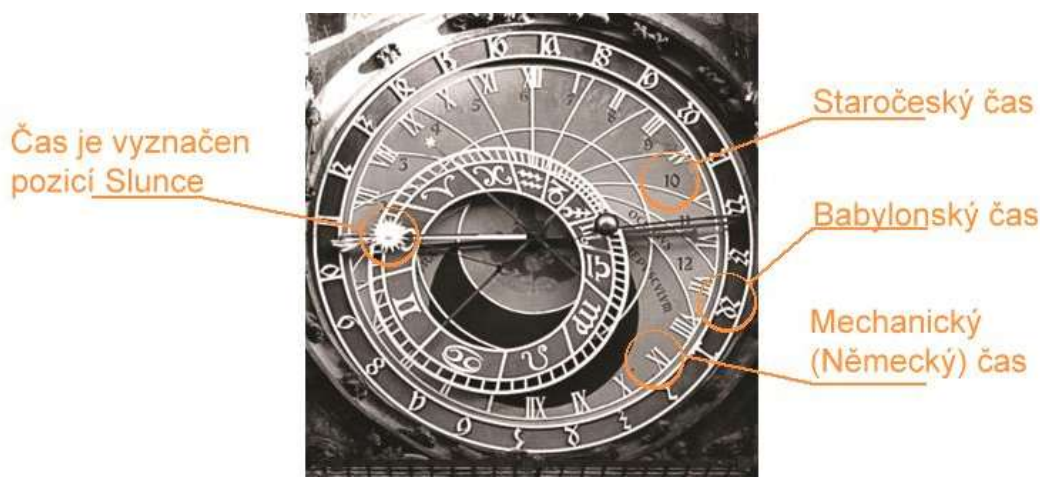
Obr. 3.3: Příklady fasád středověkých chalup ilustrují proporce oken (ve všech případech jde o novější příklady, objekty středověké vesnice nezůstaly v původní podobě zachovány). Bílá omítka na roubené stěně pomáhá přivést denní světlo do interiéru (vlevo). Klasické schéma na fasádě, dvě řady okenních otvorů, horní kouřové a spodní osvětlovací (uprostřed), obojí převzato z [Mencl 1980]. Jílová lampa pro spalování živočišného tuku nebo rostlinných olejů. Replika středověké keramiky (vpravo). Převzato se svolením z [Curiavítkov, nedatováno]

Středověký člověk žil ve velké míře na venkově, většinu času trávil prací na poli, tzv. „od slunka východu do slunka západu“. Celodenní pobyt v exteriéru na denním světle rytmizoval jeho život. Střídání dne a noci, zimy a léta bylo v našich zeměpisných šířkách hlavní odraz plynutí času. Nejdostupnějším měřidlem času byly sluneční hodiny, nejdůležitější časovou informací východ a západ slunce.

Jeden z nejstarších a nejvýznamnějších strojů měřících čas ve střední Evropě, pražský Staroměstský orloj (pochází z 15. století), není pouze významnou technickou památkou ale i dokladem, jak zásadní význam mělo denní světlo v životě středověkého člověka a jak velká změna ve vnímání denního světla se od té doby udála. Na astronomickém číselníku orloje (Obrázek 3.4) lze odečítat čas v několika systémech užívaných ve středověku. Nejstarší, tak zvaný babylonský čas [Šíma, nedatováno], udává pouze čas od východu do západu slunce, v noci je číselník prázdný. Délka „světlého“ dne se tak mění během roku a s ní se mění i délka „hodiny“ ($= 1/12$ dne): v létě může hodina trvat až 80 (současných) minut, zatímco v zimě pouze 40.

Další systém měření času, takzvaný staročeský čas, byl nejvíce rozšířený v době vzniku orloje. Počítá začátek dne v okamžiku západu slunce, tj. v Praze $18:08 \pm 2:06$ h našeho dnešního střeoevropského času. Počátek dne i jeho délka se opět mění v závislosti na ročním období, na délce dráhy slunce.

Oba dva tyto časové systémy udávají pro převážně zemědělskou společnost středověku jednu zásadní informaci – jak dlouho bude ještě denní světlo. Fakt, že právě tato informace chyběla, byla jedním z překážek obecného přijetí dalšího časového systému, tzv. mechanického (německého) času. Tento časový systém byl doplněn na orloj dodatečně a je našemu současnému způsobu měření času nejbližší [Šíma, nedatováno].



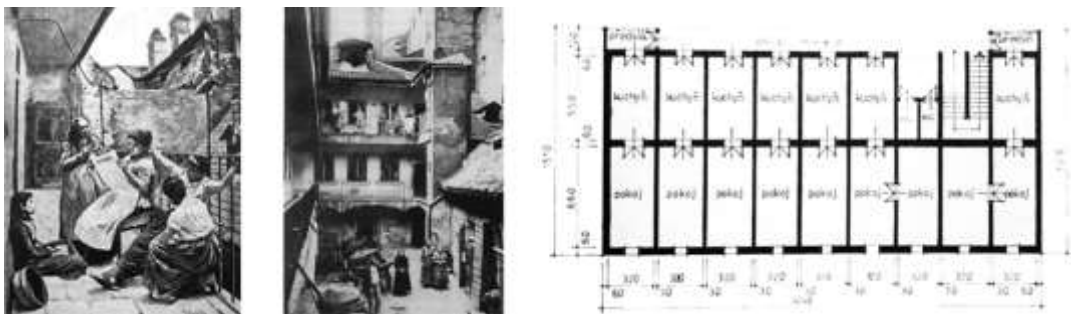
Obr. 3.4: Astronomický číselník Staroměstského orloje v Praze; ukazuje čas v několika časových systémech (archiv autora).

3.3 18. -19. století – průmyslová revoluce a dělnická předměstí

Osvětlení svítiplynem, využívané v průběhu průmyslové revoluce ve výrobních a následně i kancelářských objektech a pro veřejné osvětlení, bylo výrazně levnější a současně dosahovalo násobně vyšší osvětlenosti, než dříve používané svíce a olejové lampy. Otevřela se tak možnost prodloužení aktivního dne a člověk se stal méně závislý na dostupnosti denního světla. Řadu činností vyžadujících osvětlení bylo možno provádět po západu slunce nebo uvnitř budov, kde by samo o sobě prosvětlení denním světlem nebylo dostatečné. Dostupnost plynového osvětlení umožnila také prodloužení pracovní doby ve výrobě (vícesměnný i 24hodinový provoz), a tím zvýšení možné produkce. Pracovní den se již nepočítal od úsvitu do soumraku. Čas se stal penězi. Bez možnosti umělého osvětlení ve výrobě by byl pokrok průmyslové revoluce jen těžko představitelný.

Průmyslová revoluce přivedla mnoho lidí z venkova do měst. Ta se rychle rozrůstala, nejprve se stávající zástavba zahušťovala a později se přelila ven mimo původní obvod. Na periferiích průmyslových měst, často v návaznosti na areály továren, překotně vyrůstala dělnická sídliště, často s nekvalitní a přehuštěnou zástavbou. Drtivá většina rodin dělníků žila v bytech buď s jedinou místností, nebo s kuchyní a jedním pokojem. Byly to hluboké místnosti, s jediným oknem, nezřídka místo do volného prostoru orientovaným do společné pavlače anebo malého dvorku [Holubec 2009], Obrázek 3.5.

V druhé polovině 19. století umožnil rozmach tovární výroby a masovost budování bytů vyrábět cenově dostupné lité okenní kování. Tím bylo umožněno i u běžné výstavby dosáhnout větší plochy skleněné tabule v oknech. Současně se začalo osazovat druhé, vnější okno [Škabrada 2005]. Snížila se tak tepelná ztráta a zvětšila celková plocha okna. Díky přidané vrstvě skla se trochu snížila světelná prostupnost, ale zvětšení plochy prosklení tuto ztrátu více než kompenzovalo. Nicméně ani toto nepostačilo k dostatečnému prosvětlení a proslunění interiéru obytných místností v dělnických domech.



Obr. 3.5: Dělnická předměstí – většina denních aktivit se odehrává na pavlači či na dvoře (obrázky vlevo). Půdorysné řešení pavlačového domu 308 v Pražské Libni (vpravo), obojí převzato z [Robek 1981].

Dělnická rodina představovala mnohdy 10 osob. Pro zajištění dalšího příjmu se běžně pronajímalo místo pro nocleh dalších hostů, živnostníci měli v bytech dílny. Ještě v roce 1921 bylo při sčítání v Praze 27,6% všech bytů pouze s jednou místností a 41,2% bytů velikostní kategorie 1+1. Stav v Čechách byl výrazně horší než v okolních evropských zemích. Představu o podmínkách bydlení si lze udělat ze zachovaných vzpomínek v literatuře [Holubec 2009].

„... vcházím do bytu, jediné nízké nepatrné místnosti, přeplněné zašlým nábytkem, lidmi, pachy všeho druhu ... ta strašná stěsnanost, pach petroleje, lihu, čadících kamen, plen, vaření, pach vsáklý do stěn ... domov, jediná maličká místnost se zčernalými kouty, v níž se odbývá život tuctu lidí, v níž se vaří, pere, myje, spí, kde se skoro napořád ozývá dětský pláč a křik...jediná místnost s třemi okénky do ulice, z nichž jedno je zcela zakryto kredencí. Spoře osvětlená za dne, ještě ubožejí osvětlená za večerů mrkavou páchnoucí petrolejkou ...“

Marcel Kabát, Ten kouzelný čas dětství.

„Byl to pokoj a kuchyň. Ze začátku jsem študoval při petrolejce, že nebyla elektrika, která byla zavedena, asi když jsem dělal maturitu v tom roce 34. Kuchyň byla tmavá, okno na chodbu. No dohromady to mohlo mít takových ... 30 metrů ... pokoj i kuchyň.“

Stanislav Holubec, rozhovor s J. P.

Přestože Edison představil žárovku již v roce 1881, ještě ve dvacátých letech 20. století byla část městských domů ve městech a většina venkovských stavení bez elektřiny. K osvětlení městských bytů pro movitější obyvatele se od posledních desetiletí 19. století používal svítíplyn dodávaný nejprve soukromými a později hlavně městskými plynárnami, ale pro bydlení širokých vrstev bylo pořízení přívodu a rozvodu svítíplynu příliš nákladné. Pro svícení v běžných domácnostech se proto nejvíce využívalo lamp petrolejových, které nevyžadovaly žádnou speciální infrastrukturu – malý, většinou skleněný zásobník paliva byl součástí svítidla. Petrolej byl sice dražší než centrálně dodávaný svítíplyn, ale i tak nabízel zdroj světla dostupný i pro chudší obyvatele městské periferie. Oba zmiňované světelné zdroje vytvářely světlo při hoření plamenem. Jejich spektrum bylo souvislé, bohaté na dlouhé vlnové délky. Od denního světla se výrazně lišily teplotou chromatičnosti i světelným výkonem. V domácnostech používané petrolejové lampy (Obrázek 3.6) mohly poskytnout 20 - 100 lm, což bez dalších zařízení

mohlo zajistit osvětlenost až 10 lx na rovině vzdálené do 50 cm. Pro zesílení světelného toku do požadovaného směru se používala zrcátka.



Obr. 3.6: Hořák stolní (svítí)plynové lampy a celá lampa, Sun Gas Lamp Co./Kansas City, dle starých firemních katalogů pravděpodobně kol. 1910, P&A Mfg.Co (vlevo); Petrolejová lampa se skleněným cylindrem a zrcátkem; detail hořáku s ozdobnou skleněnou nádobkou na petrolej (vpravo), archiv autora.

Umělé osvětlení domácností umožnilo vznik řady nových aktivit ve večerních hodinách. Po večerech bylo možno vykonávat řadu domácích prací, ale také číst a vzdělávat se. Široká dostupnost umělého osvětlení mimo jiné přispěla k zpřístupnění vyšších stupňů studia i pro příslušníky středních a postupně i nižších vrstev, a také vzdělávání při zaměstnání pro dělníky. Velká potřeba nekvalifikované manuální pracovní síly sice stále zaměstnávala většinu obyvatel průmyslových aglomerací, ale postupně vznikaly i pracovní příležitosti pro kvalifikované dělníky a techniky, tedy pracovní sílu, která potřebovala především získat specifické vzdělání, které bylo předpokladem pro fyzicky méně namáhavou a lépe placenou práci.

Lidé z dělnických vrstev dělili všechn svůj čas mezi práci, jídlo a spánek. Pobývali v nedostatečně prosvětlených domovech a továrnách, jejichž světelné prostředí i přes užití plynového osvětlení nelze srovnat s našimi dnešními standardy. Večery trávili muži raději v hospodách než ve vlastních přelidněných bytech. Ženy, pokud nebyly také zaměstnané, utíkaly během dne z šerých a stísněných prostor bytů na společné pavlače, kde zastávaly část domácích prací v sousedské komunitě.

V kontrastu se světem dělníků se pro vyšší vrstvy společnosti stal pobyt v prostředí s dostatkem denního světla atributem jejich postavení. Domy bohatších vrstev se začaly otevírat dennímu světlu velkými okny obytných místností orientovaných pokud možno do otevřeného prostoru. Také umělé osvětlení bytů a dalších interiérových prostorů určených pro vyšší společenské třídy bylo nesrovnatelně intenzivnější a kvalitnější, nežli tomu bylo v bytech a zařízeních pro dělnický proletariát. Z bytů vyšších vrstev mizely těžké závěsy, které původně chránily před vyblednutím tmavý nábytek z orientálních dřev. Oblíbeným se stal světlý nábytek, kterému přítomnost slunce nevadila. Rozšířila se móda lázeňských pobytů s „terapií světlem“ (1853 Arnold Rikli založil první lázeňský dům ve švýcarských Alpách) [Schoof 2013].

3.4 Moderní města 20. století – regulace a plánování

Řešení hygienických podmínek bydlení pracujících vrstev se stalo politickým tématem posledních desetiletí 19. a počátku 20. století. Velké stavební zásahy, například asanace pražského Josefova, byly mj. zdůvodněny právě nepříjemnými hygienickými podmínkami, mezi jiným i nedostatečným přístupem denního světla. Města ve svých stavebních rádech stanovují závazné odstupy mezi obytnými domy v ulicích, vyjádřené poměrem mezi šířkou uličního prostoru a výškou zástavby. Počátkem 20. století vyústila kritika prostředí měst do urbanistického konceptu zahradních měst.

Trend zdůrazňující požadavky prosvětlení a proslunění bytů vrcholí v meziválečném období funkcionalismu. Standardy a normy funkcionalistické architektury a urbanismu ovládly rozvoj měst na řadu dalších desetiletí.

Rozšíření elektrického osvětlení v první třetině 20. století zásadně ovlivnilo způsob života celé společnosti. Technické systémy v budovách konečně dokázaly kontrolovat vnitřní prostředí tak, že lidé mohli komfortně trávit celý den uvnitř. Pohodlí nabízené v interiéru budov tak mělo vliv na pozvolné omezování času stráveného venku na denním světle. Levné a dostupné umělé osvětlení také posunulo konec aktivního dne o několik hodin do noci. „Delší den“ umožnil vznik řady nových volnočasových aktivit. Řada rekreačních a sportovních činností, které se tradičně odehrávaly ve vnějších prostorech, se postupně přesouvá do interiérů s umělým osvětlením. Umělé osvětlení se stalo běžnou, zcela samozřejmou součástí prostředí našeho života.

Výstavba domů po druhé světové válce probíhala striktně podle norem vytvářených s cílem dosáhnout co nejvyššího hygienického standardu, s důrazem na dostatečné prosvětlení a proslunění pobytových místností. Dostatek denního světla byl systematicky řešen i na úrovni urbanistických plánů tak, aby byly zajištěny dostatečné odstupy mezi budovami (Obrázek 3.7). Normové požadavky na denní světlo v budovách se postupně prohlubovaly. Předpis vydaný v roce 1955 [ČSN 73 0020 1955] specifikuje pouze doporučenou plochu oken ($1/8$ podlahové plochy místnosti), v 60. letech se v normách objevuje požadavek na průměrný činitel denní osvětlenosti v místnosti s velkými nároky na osvětlení (obývací pokoj, pracovna, dětský pokoj apod.) průměrně 3 %, v nejtemnějším místě bylo požadováno minimálně 1 % [ČSN 36 0048 1960]. Plocha prosklení oken v obytné místnosti byla normou doporučena na $1/8$ až $1/6$ půdorysné plochy místnosti. Běžné zasklení bylo dvojité čiré sklo, sklo se zrcadlovou folií se objevovalo pouze v malém množství luxusních realizací – bylo drahé. Stínění se v podmínkách střední Evropy ve fázi výstavby většinou neřešilo, v případě nutnosti se používalo stínění vnitřní či žaluzie vložené mezi dvě okenní skla. Velké průmyslové haly často prosvětlovaly střešní světlíky, hojně se používaly šedové střechy.



Obr. 3.7: Fasáda bytového domu (vlevo), urbanismus vymezuje odstupy mezi objekty (uprostřed); Projektanti, fotografie [Kruger 1957] (vpravo).

Počínaje šedesátými léty 20. století, automatizace průmyslové výroby ve vyspělých zemích umožnila přesunout značnou část pracovníků do administrativy a služeb. Typickou činností zde byla práce s textem na papíře. Pro dosažení vizuálního komfortu bylo nutné zajistit hladiny osvětlenosti tak, aby umožňovaly pohodlné rozlišení kritického detailu vizuální úlohy. Pro zajištění podmínek k vizuálně náročné zrakové činnosti (zejména práci s tištěným textem) byla požadovaná hodnota osvětlenosti postupně navyšována. Po roce 1986 požaduje norma jako hygienické minimum v místnostech 200 lx s denním světlem, určených pro trvalý pobyt osob a 300 lx v místnostech bez přístupu denního světla [ČSN 36 0450/1986]. Následující norma z roku 2003 stanovuje hodnotu osvětlenosti referenční roviny (pracovního stolu) minimálně 300 lx a pro zrakově náročnější činnosti (rýsování ...) adekvátně více [ČSN 12464-1/2003].

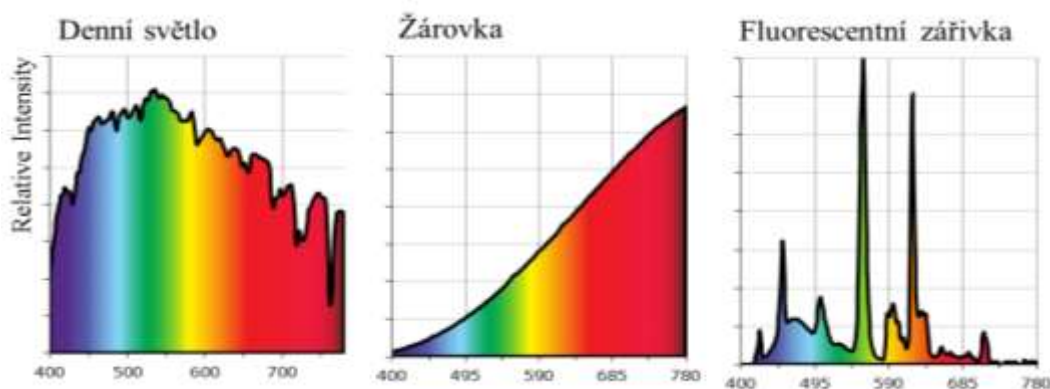
Nástup všeobecně dostupného a cenově nenáročného elektrického osvětlení znamenal velký zlom v oboru světelné techniky. Místo lokálního osvětlení v místě činnosti se prostory osvětlují v celé ploše, lokální osvětlení je chápáno pouze doplňkové. Zatímco u všech předchozích druhů osvětlení šlo při konstrukci svítidel o to, aby se svítivost plamene maximálně podpořila a zvýšila, u elektrických zdrojů světla již byl jas tak intenzivní, že je bylo naopak třeba stínit a chránit tak oko před oslněním. Nové typy svítidel používají stínidla, skla s matovanou nebo mléčnou úpravou, nepřímé osvětlení se začíná používat nejen pro výtvarné efekty.

Typickým světelným zdrojem v interiéru byla žárovka; ve větších instalacích, administrativních a výrobních prostorech se díky nižší energetické náročnosti prosadila trubcová zářivka. Měkké žlutavé světlo žárovky bylo svým spektrálním složením blízké ohni. Z hlediska nevizuálního vnímání má klasická žárovka jen malý povzbuzující účinek – krátké vlnové délky nejsou v jejím světle příliš zastoupeny. U 100W žárovky byl světelný výkon cca 1350 lm. Zářivky ve 20. století měly sice 5x menší spotřebu energie než klasické žárovky, ale zpravidla také nízký index podání barev⁵ (60 – 80 %) díky nespojitému spektrálnímu složení. Jejich světlo mělo vyšší teplotu chromatičnosti⁶,

⁵ Index podání barev Ra (CRI - color rendering index) je hodnocení věrnosti barevného vjemu, který vznikne osvětlením z nějakého zdroje, v porovnání s tím, jaký barevný vjem by vznikl ve světle slunce.

⁶ Teplota chromatičnosti viz kapitola 4.1

barevně bylo bližší dennímu světlu (Obrázek 3.8). U starších typů zářivek (bez předřadníku) se objevoval stroboskopický efekt, zářivka blikala v kmitočtu elektrické sítě. Blikající světlo mohlo způsobit vyšší únavu očí a zvýšit pocit vnitřního napětí - člověk si blikání nemusí uvědomovat, ale mozek ho přesto vyhodnocuje jako změny v prostředí a neustále se snaží přizpůsobit.



Obr. 3.8: Spektrální složení světelných zdrojů. Vlevo denní světlo, uprostřed klasická žárovka, vpravo fluorescentní trubicová zářivka. Horizontální osa – vlnová délka [nm], vertikální osa – relativní intenzita. Měření autora.

V průběhu 60. let se v domácnostech objevil nový zdroj světla – televizní obrazovka. Na přelomu 60. a 70. let zářila již ve většině domácností, sledování televize se stalo typickou večerní zábavou a hlavním zdrojem informací.

3.5 21. století - společnost digitálních technologií

Je tomu přibližně sto let, kdy společnost zjistila, jak nezbytný pro zdravý život je dostatek denního světla a slunce. Pomáhalo léčit choroby, udržovat obydlí teplá, suchá, hygienická. Dnes trávíme většinu svého času v budovách, naše společnost se stala díky propojení internetem globální, aktivní 24 hodin denně, 7 dní v týdnu. Hygienický vliv světla nahradily sanitární instalace, desinfekce, antibiotika. Naše budovy se opět začínají před sluncem uzavírat [Schoof 2013]. Je to reakce na rychlé rozšíření výpočetní techniky do administrativní práce. Monitory počítačů a LED displeje mobilních zařízení jsou dnes všudypřítomné a pro mnoho lidí se práce či zábava bez nich stala nemyslitelnou. Čtení z obrazovky je v kontextu ostatních zcela nový typ zrakového úkolu. Není již tak důležité dosažení minimální osvětlenosti v místě zrakového úkolu, tj. na ploše monitoru, který sám o sobě je světelným zdrojem (Obrázek 3.9 vlevo). V rámci výzkumu vizuální únavy při výkonu práce na počítači byla zjištěna nejvyšší výkonnost při osvětlenosti 300 lx [Bangor 2000]. Ve srovnání se čtením tištěného textu jsou uživatelé při této činnosti mnohem citlivější na rušivé jevy, například přímým oslněním zdroji světla, jejich odrazem například na monitoru nebo příliš velkým kontrastem v zorném poli (Obrázek 3.9, uprostřed). Při dlouhodobé práci může i zdánlivě malé, pouze rušivé oslnění

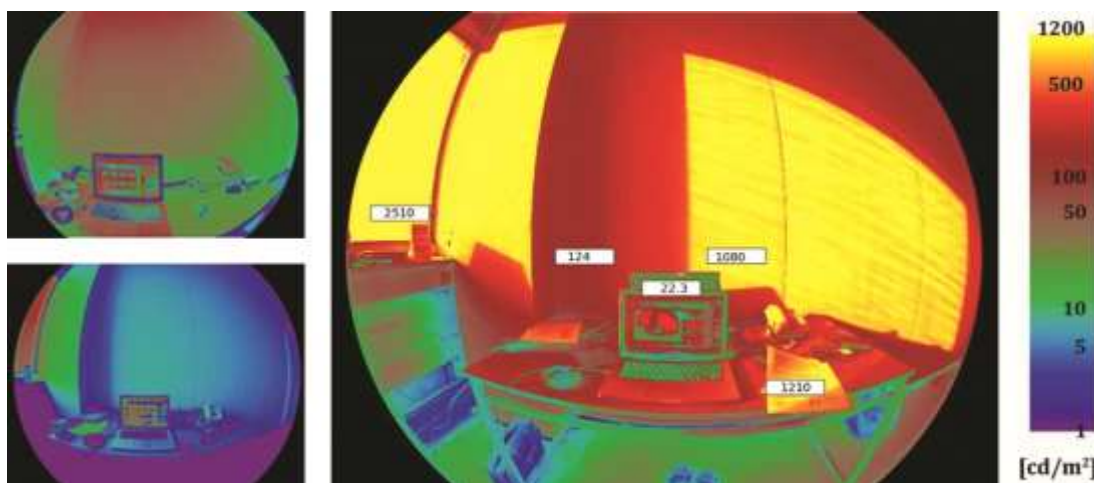
zapříčinit nepříjemný stav, často aniž bychom si uvědomovali jeho původce [Harrison 1945].



Obr. 3.9: Monitor je sám o sobě zdroj světla, které při čtení dopadá do oka z bezprostřední blízkosti (vlevo); Užití celoplošných interiérových rolet odcloní přímé slunce ve většině prostoru, při nedokonalém plánování v místě styku prvků často neřešitelné oslnění (uprostřed); manuálně ovládané stínící prvky jsou jen málokdy používány aktivně (vpravo). Archiv autora.

Maximální pozornost by tedy měla být věnována rovnoměrnému rozložení světla v místnosti. Na rozdíl od minulosti, kdy v interiéru požadovaná osvětlenost neměla horní limit a více bylo lépe, pro dnešní kanceláře je vhodné udržet v interiéru hladinu osvětlenosti 250 – 2000 lx, maximálně 2500 lx, a důsledně je chránit před oslněním [Mardaljevic 2009]. Z hlediska práce na počítači by bylo tedy nejjednodušší využití pouze umělého osvětlení, které jsme schopni zcela kontrolovat a které je na rozdíl od denního světla stále v čase. To se však zásadně neodpovídá nejen legislativě, která požaduje v pobytových místnostech využití denního světla, ale také mezi uživateli opakovaně prokázané jednoznačné preferenci míst u okna, v prostoru s denním světlem [Butler & Biner 1989]. Splnit tyto dva požadavky, tj. potřebu zajistit rovnoměrné rozložení světla v prostoru i v čase a současně umožnit kontakt s exteriérem a přístup denního světla, je největším úkolem pro dosažení kvalitního světelného prostředí v administrativních budovách.

V reálném životě, není-li distribuci světla v prostoru věnována zvláštní pozornost již ve fázi návrhu objektu, denní světlo lze těžko rovnoměrně rozptýlit po celé místnosti. Častý požadavek investora ve snaze o velké prosvětlení objektu jsou velké plochy prosklení na fasádě. Typický důsledek je přesvětlený prostor u fasády, kde je uživatel rušen oslněním a je tedy nutné využití stínících prvků. Nedostatečné osvětlení v hloubce traktu v důsledku stínění je paradoxně kompenzováno trvalým umělým osvětlením. Výzkumy uživatelského chování [Galasiu & Veitch 2006] také ukázaly, že jen málokdy dochází k aktivní úpravě nastavení stínících prvků zejména u manuálního ovládání. Lidé většinou v reakci na oslnění zastíní prostor, ale následně již nevrátí stínící prvky do původní otevřené pozice. (Obrázek 3.9 vpravo). Vzniká prostor s monotónním osvětlením, bez kontaktu s okolím, bez rozdílu, zda je ráno či večer, léto či zima, deštivo či slunečno. Umělé prostředí bez pocitu plynutí času. Obrázek 3.10 ukazuje rozdílné jasové poměry v prostoru v závislosti na působení osvětlení.

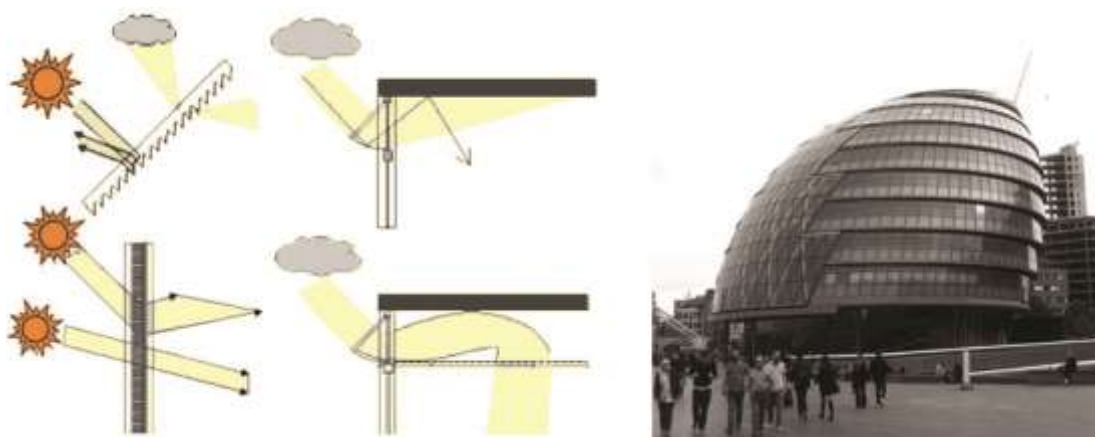


Obr. 3.10: Rovnoměrné rozložení světelného toku v prostoru – kontrast jasu v zorném poli. Vlevo nahoře umělé stropní osvětlení, vlevo dole denní světlo při zatažené obloze, vpravo jasové poměry při přímém večerním slunci, které vniká do interiéru. Přestože je slunce těsně nad obzorem, rozdíly mezi jasy v bezprostředním okolí (monitor x stěna za monitorem) i na okraji zorného pole (jas okna) přesahují povolené hodnoty. Archiv autora.

V současnosti jsou vyvíjeny speciální typy zasklení i komplexní fasádní systémy, které by zajistily rovnoměrnou distribuci denního světla a současně minimalizovaly riziko oslnění. Jeden z konceptů těchto inteligentních fasád je tzv. elektrochromatické zasklení. Ve skleněném souvrství je aplikována vrstva elektronicky ovládaných nanočástic. Nanočástice mohou ovlivnit zabarvení a světelnou prostupnost skla v závislosti na množství světla a sluneční energie, které proniká do místnosti. Obdobně jako všechny plošně stínící systémy, i u elektrochromatického zasklení je jeho kvalita přímo odvislá od kvality regulace, která systém ovládá.

Fasádní prvky s prismatickými panely nebo panely s vnitřními zářezy představují další z možných konceptů. Jsou vyrobeny z čirého akrylického materiálu s řadou vnitřních laserových zářezů (Obrázek 3.11 vlevo). Povrch těchto zářezů se stává malým zrcadlem, schopným rozptýlit nebo odklonit směr přímého slunečního světla, i když panel zůstává víceméně průhledným [Kosto 2015].

Další možností, jak dosáhnout dobrého rozložení denního světla v místnosti a současně minimalizovat riziko oslnění, je využití anidolických prvků distribuce světla: fasádních panelů nebo celých fasádních a stropních systémů [Courret, 1999] (Obrázek 3.11 uprostřed). Existuje i možnost optimalizovat tvar budovy přesně dle pohybu slunce po obloze (Obrázek 3.11 vpravo).



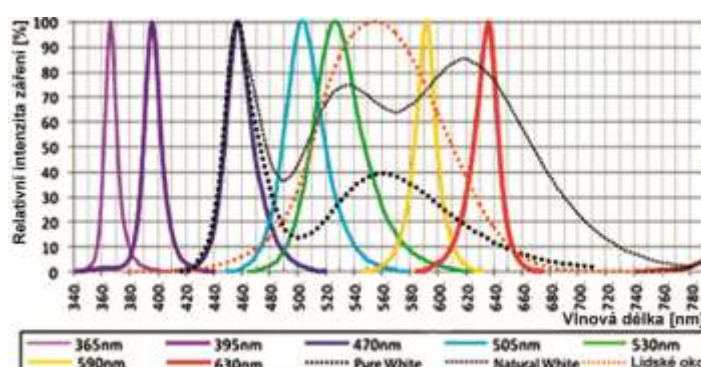
Obr. 3.11: Příklady fasádních systému pro přívod denního světla – prismatické panely (vlevo nahoře), laser cut panels (vlevo dole), anidolické fasádní systémy (uprostřed nahoře), anidolické stropy (uprostřed dole). Upraveno z [Kosto 2015, Scartezzini and Courret 2002]; Radnice Velkého Londýna (arch. Norman Foster) se svým tvarem podobá šišatému vejci (vpravo). Tvar budovy byl optimalizován tak, aby umožnil maximální přístup denního světla a současně zajistil ochranu před oslněním přímým sluncem (foto archiv autora).

Důraz na energetickou úspornost budov spolu se snahou snížit emise oxidu uhličitého na počátku tohoto století přinesl velký tlak na úspory provozních energií, týkající se také umělého osvětlení. Od roku 2009 byl postupně zakázán prodej běžných žárovek ve většině vyspělých zemí. Byly nahrazeny účinnějšími zdroji světla – zářivkami či LED zdroji. První kompaktní zářivky, které se objevují ke konci 20. století, ale i některé současné levné, méně kvalitní zdroje mohou mít velmi nízký index podání barev. Na obrázku 3.12 je vidět extrémní případ porovnání skleněného předmětu osvětleného denním světlem ve srovnání s osvětlením kompaktní zářivkou s velmi nízkým indexem podání barev (color rendering index; CRI).



Obr. 3.12: Fotografie skleněné vázy v denním světle a pod umělým osvětlením s nízkým CRI (archiv autora, foto z roku 2009).

Přestože vysokého podání barev klasické žárovky se v komerčně dostupných zdrojích stále nepodařilo dosáhnout, kvalita a možnosti dostupných zdrojů stále rostou a současně klesá jejich energetická náročnost. Dnešní technologie umí vytvořit nejrůznější světelné podmínky, světelné zdroje mohou mít spojité či nespojité spektrum, různé intenzity i rozložení světelného toku, je možné si volit teplotu chromatičnosti, od teple bílé (blízké žárovce, 2700°K) po denní bílou (napodobuje denní světlo, 6500°K) i více pro speciální zdravotní účely (Obrázek 3.13). Velký výběr mezi zdroji s různými vlastnostmi umožňuje vytvořit světelné prostředí dle vlastních potřeb, vyžaduje však také tyto potřeby znát. Rychlá změna v oboru světelné techniky, omezená zkušenost a široký výběr různých typů světelných zdrojů někdy vede k užívání zdrojů nevhodných pro daný účel.



Obr. 3.13: Příklady spektrálního složení LED zdrojů – bodová spektra monochromatických zdrojů, spektra složená z několika bodových zdrojů (Pure White – tečkované drobné, Natural White – tečkované velké) v porovnání s křivkou vizuální sensitivity oka (Human Eye, tečkovaná oranžová); horizontální osa – vlnová délka [nm], vertikální osa – relativní intenzita. Upraveno z podkladů výrobce [Spectrum Illumination 2011].

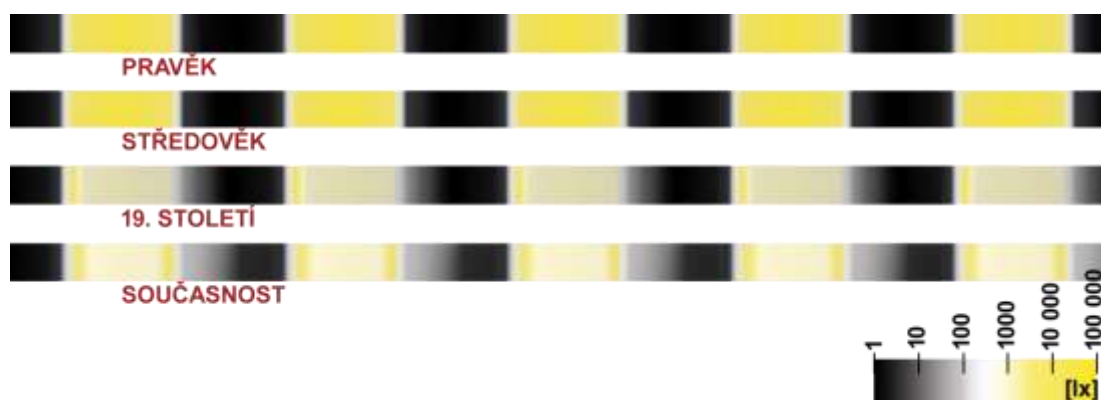
Pro hodnocení světelného prostředí v budovách se používá zejména činitel denní osvětlenosti (vyjadřuje poměr mezi vnější a vnitřní osvětleností při zatažené obloze, tedy bez vlivu přímého slunce), hodnota udržované osvětlenosti (osvětlenost na referenční rovině, v místě úkolu a v jeho okolí), jasové poměry v zorném poli a index oslnění dle metody UGR (Unified Glare Rating), který je však vhodný pouze pro umělé osvětlení. Pro hodnocení oslnění denním světlem česká legislativa jednotnou metodiku nespecifikuje, v zahraničí se pro posouzení oslnění denním světlem používají například výpočty DGI (Daylight Glare Index) a DGP (Daylight Glare Probability). Jak je vidět, vliv sluneční složky denního světla není v legislativě řešen. Spoléhá se na možnost stínění mobilními prvky. Přitom je to právě přímé sluneční záření, jeho intenzita a časová proměnlivost, které mohou zásadně ovlivnit kvalitu světelného prostředí v reálném provozu.

3.6 Shrnutí třetí kapitoly

„... Zeptejte se, jak dlouho byste museli pracovat, abyste si vydělali na hodinu světla pro čtení - řekněme, hodinu svícení 18 wattové kompaktní fluorescenční žárovky. Dnes to bude znamenat méně než půl sekundy vaší pracovní doby, pokud máte průměrnou mzdu: půl vteřiny práce na hodinu světla. V roce 1950 s klasickou žárovkou a tehdejší mzdou byste pro stejné množství světla museli pracovat po dobu osmi sekund. Kdybyste používali petrolejové lampy v roce 1880, museli byste pracovat asi patnáct minut. Ložová svíce v roce 1800 znamenala více než šest hodin práce. A získat tolik světla z lampy na sezamový olej v Babyloně v roce 1750 před našim letopočtem, by mělo cenu víc než padesát hodin práce...”

shrnuje britský novinář Matt Ridley (2011) údaje z publikace profesora ekonomie na Yale Univerzity Williama D. Nordhause (1997).

Dostupnost světla ovlivňuje vývoj společnosti. Proměnlivost světelných podmínek je důležitá pro vnímání času. Životní styl středověké společnosti určoval rytmus střídání dne a noci a pravidelný cyklus střídání ročních období. Čas byl vnímán cyklicky. Vše, co bylo pro člověka podstatné, patřilo do současnosti, anebo mimo tento svět. Lineární čas plynoucích dějin nebyl důležitý. Dostupnější plynové osvětlení v době průmyslové revoluce do určité míry narušilo noční tmu. Byl narušen rytmus dne a noci i středověký rytmus cyklického roku. Umělé osvětlení prodloužilo aktivní dobu na úkor noci. Společnost se mohla začít intenzivně rozvíjet, každý rok přinášel něco nového. Cyklický čas se pomalu změnil ve spirálu, s jedním koncem směřujícím do budoucnosti. Rozvoj průmyslu a nové vědecké objevy ve 20. století přetvořily svět. Elektrické osvětlení umožnilo naprostou nezávislost aktivity na denní době a ve svém důsledku napomohlo rychlému rozvoji všeobecné vzdělanosti společnosti. Historie začala být chápána jako neustále pokračující proces, jak se dostat z horšího k lepšímu. Vnímání času se stalo lineárním. Levné umělé osvětlení umožnilo globální společnosti stát se aktivní 24 hodin denně, sedm dní v týdnu. Zcela se vymanit z přírodního rytmu (Obrázek 3.14).



Obr. 3.14: Světelné prostředí ve zvolených historických obdobích: ilustrace předpokládané typické hladiny osvětlenosti, ve které se běžný člověk pohyboval; záznam 5 dnů (5 x 24 hodin). Zdroj autor.

Naše světelné prostředí a tím i způsob života se tedy výrazně změnilo. Avšak fyziologicky se současný člověk od svého jeskynního předchůdce téměř neliší. Naše vnímání světla se v podstatě nezměnilo. Zajištění biologických funkcí řízených světlem je optimalizováno pro světelné prostředí, v jakém žili naši předkové v době kamenné. Naš současný životní styl a naše aktivity jsou však velmi rozdílné od původních činností, pro které se naše zrakové ústrojí po tisíce let vyvíjelo. Moderní technologie vyžadují větší přesnost při vizuálních úkonech. Také čas, po který jsme během dne vystaveni světelnému záření, se díky umělému osvětlení výrazně změnil, a to jak v délce trvání tak i v časovém rozložení v průběhu dne. Naše tělo je však stále naladěno na původní, přírodní způsob života: střídání vysoké světelné intenzity ve dne a nepřítomnosti světla v noci.

Konflikt mezi skutečnými světelnými podmínkami v budovách s umělým osvětlením a požadavky našeho těla může mít v dlouhodobém důsledku vliv na naši psychiku i na náš zdravotní stav.

„... mezi roky 1950 a 2000 se náklady na produkci světla snížily na šestinu, spotřeba světla na osobu ve Velké Británii vzrostla čtyřnásobně. Tato rostoucí spotřeba světla je paralelní s nárůstem nedostatku spánku.“

Charles A. Czeisler (2013)

lékař, profesor spánkové medicíny Harvard Medical School v Bostonu.

4. Světlo, vizuální a biologické účinky

“Learn how to see. Realize that everything connects to everything else.”

Leonardo da Vinci⁷

Lidské oko je orgán zraku, nejdůležitějšího z lidských smyslů. Osmdesát procent všech informací o našem okolí přichází očima. Postižení zraku je jednou z nejčastějších komplikací u starší populace a zároveň je ze společenského hlediska jednou z nejvíce diskriminujících. Proces vzniku zrakového vjemu začíná v některém z fotoreceptorů na sítnici oka, odkud se informace přenáší do lidského mozku. Vizuální systém byl vždy ve velké oblibě vědy. Již řečtí filozofové Hippokrates, Platón a Aristoteles vytvořili první známé teorie funkce a anatomie oka [Polyak 1957]. Přesto byla v nedávné minulosti naše znalost o funkci oka doplněna o nové zásadní poznatky. Pro lepší porozumění souvislostem mezi světelným prostředím a fyziologií člověka považuji za užitečné vytvořit stručný přehled aktuálního stavu poznání procesu vizuálního a nevizuálního vnímání světla u člověka.

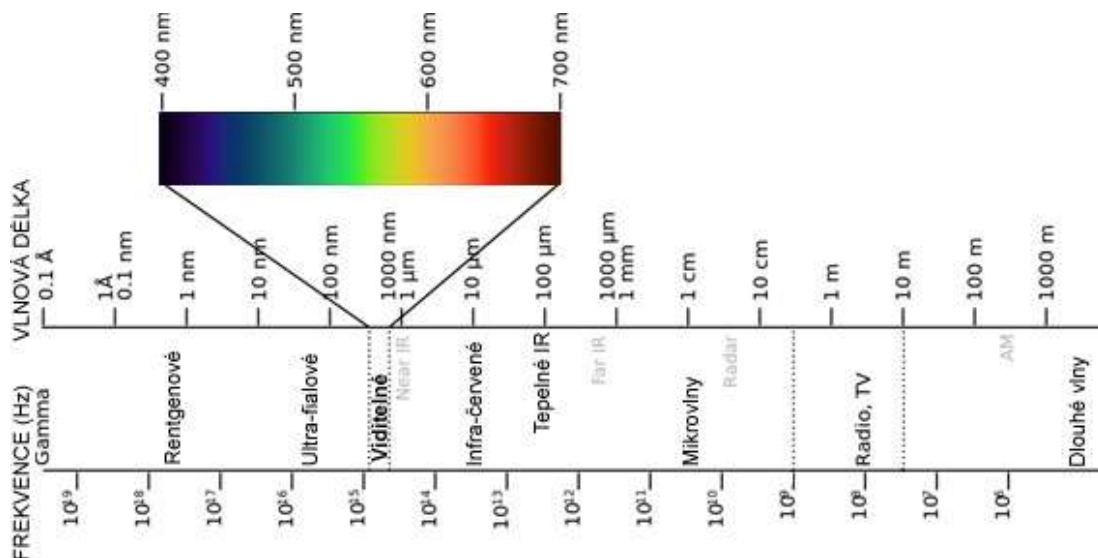
4.1 Viditelné elektromagnetické záření – světlo

Výraz "světlo" se vztahuje na tu část elektromagnetického spektra, která je pro oči viditelná, tj. vytváří vizuální vjem. Pro lidské oko se jedná přibližně o vlnové délky od 380 nm do 780 nm, viz Obrázek 4.1.

⁷ *“Učme se vidět. Uvědomme si, že vše je propojeno se vším.”*

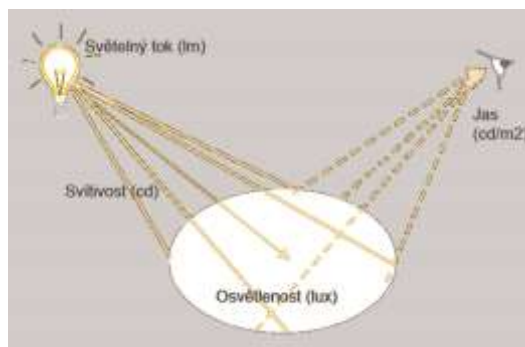
Leonardo da Vinci, Leonardovy deníky

Spektrální složení světla poskytuje objektivní charakteristiku viditelné části světla. Spektrometr zaznamenává hodnotu zářivého toku samostatně pro každou vlnovou délku mezi 380 nm až 780 nm, jako kdyby byly jednotlivé barevné složky světla odděleny prismatickým hranolem.



Obr. 4.1: Elektromagnetické spektrum s detailem viditelného světelného záření – editováno dle [Svoboda 2003].

Světelné záření může být měřeno a popisováno pomocí dvou systémů – radiometrie a fotometrie. Radiometrie interpretuje elektromagnetické záření (včetně viditelného světla) pomocí distribuce energie v prostoru. Popisuje je jako energii dodanou za jednotku času (zářivý světelný tok, jednotka watt), případně dle vlnových délek, dle energie dopadající na povrch apod. Na rozdíl od radiometrie, která užívá absolutní hodnoty, fotometrie pohlíží na světelné záření relativně vzhledem k jeho působení na lidské oko a jeho zrakovou funkci. Množství světelné energie přenesené zářením za jednotku času, vyjádřené relativně k citlivosti fotoreceptorů průměrného lidského oka, se označuje jako světelný tok (Φ). Jeho jednotka lumen (lm) je odvozenou jednotkou SI. Svítilivost (I) s jednotkou kandela (cd) udává prostorovou hustotu světelného toku zdroje v různých směrech. Množství světelného záření dopadající na jednotku dané plochy, osvětlenost s jednotkou lux (lx) je ve stavební praxi často používaná veličina. Osvětlenost jednoho luxu odpovídá světelnému toku 1 lumenu na plochu 1 m² (E ; $lx = lm \cdot m^{-2}$). Ias dané plochy lze definovat jako světelný tok do jednotkového prostorového úhlu vztažený na jednotkovou plochu zdroje, vyjadřuje se v kandelách na m² (L ; $cd \cdot m^{-2}$), viz Obrázek 4.2. Spektrální citlivost standardního fotometrického pozorovatele je stanovena dle rozdílů v citlivosti zrakových fotoreceptorů na různé vlnové délky [ISO 23539: 2005].



Obr. 4.2: Grafické znázornění fotometrických veličin a jejich jednotek (grafika archiv autora).

V přírodních podmínkách je osvětlenost během dne spíše nezávislá na pozici slunce. Pokud je slunce výše než 10 stupňů nad obzorem, více než jeho pozice se uplatňuje vliv aktuálního počasí. Osvětlenost nezastíněné horizontální roviny může v jasný slunečný den dosáhnout 100 000 lx, při silně zatažené obloze pak klesnout na pouhých několik tisíc luxů, více tabulka 4.1

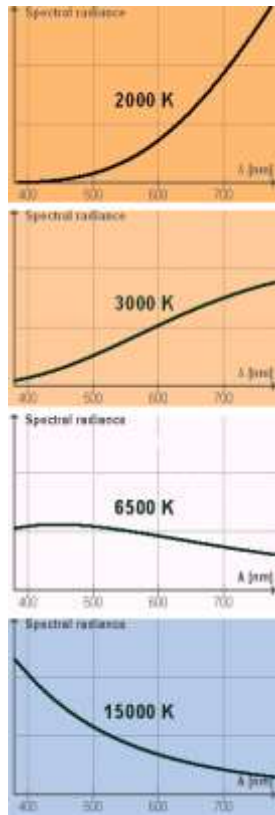
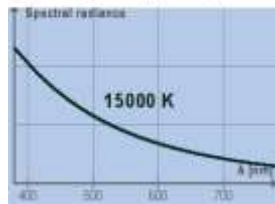
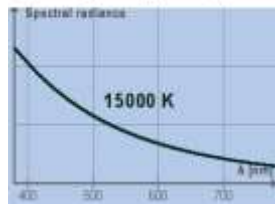
Jakmile se slunce přiblíží k horizontu, intenzita světla začne rychle klesat. Z osvětlenosti 1000 lx při výšce slunce 5 až 10 stupňů nad obzorem spadne na 300 lx v okamžiku západu slunce, kdy se jeho horní vrchlík stane neviditelným. V rozmezí následujících 20 až 100 minut (v závislosti na zeměpisné šířce a ročním období) se slunce dostane až 18 stupňů pod horizont (konec soumraku) a osvětlenost se změní o téměř 6 řádů (10^{-3} lx). V jasné bezměsíčné noci hvězdy poskytnou osvětlenost v řádu 10^{-4} lx. I tak slabé světelné záření odražené měsícem může mít významné důsledky na chování jedinců i celých živočišných druhů. Měsíc v úplňku při postavení v zenitu může zajistit osvětlenost více než 0,1 lx na horizontální ploše. S ustupující fází měsíce osvětlenost rychle klesá, při půlměsíci dosahuje pouze 0,01 lx. Výrazný vliv má počasí a stav oblohy [Leibowitz 1987].

Osvětlenost [lx]	Světelné podmínky
0,0001 lx	Hvězdné nebe
0,1 lx	Úplněk
1-10 lx	Pouliční osvětlení
1000 lx	Východ slunce
10 000 lx	Venkovní osvětlenost při zatažené obloze
100 000 lx	Jasný slunečný den

Tab. 4.1: Vliv vnějších světelných podmínek (stavu oblohy) na osvětlenost horizontální roviny. Upraveno z [Wirz-Justice 2010, Liebowitz 1987].

Bílé světlo (v přírodě denní světlo) je složeno z různých vlnových délek viditelného spektra v přibližně shodných intenzitách. Výsledný paprsek se jeví lidskému oku, jakoby

neměl žádnou specifickou barvu. Bílé světlo může být také generováno různými umělými zdroji světla. Teplota chromatičnosti (v Kelvinech) charakterizuje barevný tón bílého světla. Využívá k tomu tepelné záření srovnatelného odstínu, které vydává černé těleso s danou povrchovou teplotou. Teplota chromatičnosti se používá pro přírodní i umělé zdroje bílého světla. Pro světelné zdroje emitující světelné záření jiným způsobem než jako složku tepelného záření byla vytvořena tzv. „náhradní teplota chromatičnosti“ (Correlated Color Temperature; CCT), odpovídající nejbližšímu bodu na linii teplotních zářičů v chromatickém diagramu, viz tabulka 4.2.

CCT [°K]	Zdroj bílého světla	Spektrální složení a přibližný barevný tón
1 700 K	Plamen zápalky	
1 850 K	Plamen svíčky; Východ nebo západ slunce	
2 700 – 3 300 K	Klasická žárovka; „Teplá“ bílá kompaktní fluorescentní zářivka	
4 100 K	Měsíc	
5 000 K	Denní světlo na horizontu, (standardizovaná obloha D50 dle CIE) „Studená“ bílá, kompaktní fluorescentní zářivka	
5 800 K	Sluneční světlo bez vlivu atmosféry	
6 500 K	Denní světlo při zatažené obloze	
6 500 – 10 500 K	LCD nebo klasická obrazovka	
15 000 – 27 000 K	Jasná modrá obloha bez slunce	

Tab. 4.2: Spektrální složení a teplota chromatičnosti z různých zdrojů „bílého“ světla. Upraveno dle [Charity, nedatováno].

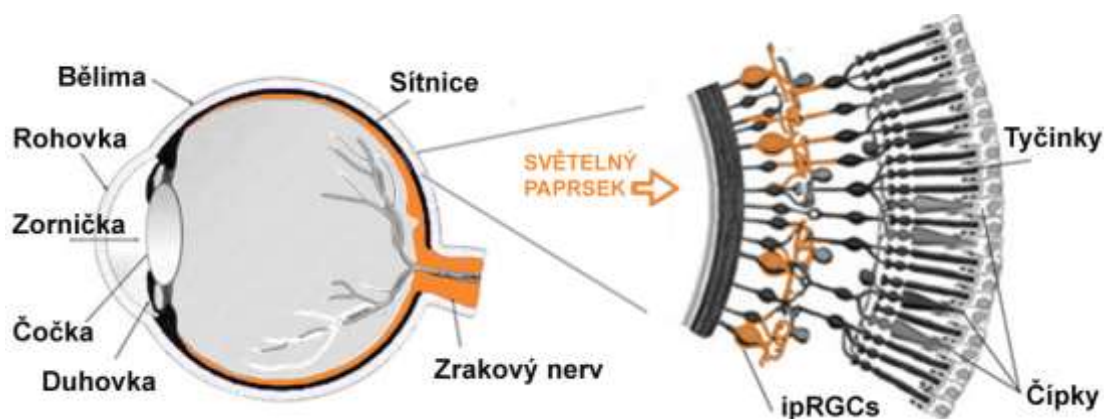
4.2 Lidské oko

Lidské oko (obrázek 4.3) se do současné podoby vyvinulo v historicky relativně krátké době. Před 600 miliony let existovalo jen jednoduché čidlo, schopné sledovat světelné změny v prostředí. O necelých 100 milionů let později máme prokázanu existenci oka jako sofistikované „kamery“, optického a neurologického orgánu, schopného vidění, zaostření a akomodace podle světelných podmínek. [Lamb, et al. 2007]

Struktura lidského oka může být rozdělena na dvě hlavní části podle jejich funkce - optickou a neurální. Optická část (čočka a rohovka pomáhá nasměrovat paprsek světla na nejcitlivější místo sítnice, minimalizuje jeho pohlcování a rozptyl. Neurální část (sítnice) je na světlo citlivé prodloužení mozku. V sítnici umístěné fotoreceptory obsahují proteiny citlivé na světlo - opsiny. Opsiny zajistí přeměnu světelné energie z fotonu světla na signál, který lze předat nervovým systémem do lidského mozku.

4.2.1 Tyčinky, čípky a vizuální vnímání světla

Naše schopnost zrakové percepce je zachována v různých typech světelných prostředí, která se mohou vzájemně výrazně lišit v hladině osvětlenosti nebo v jasových poměrech. Proto se vyvinul v sítnici oka duální systém fotoreceptorů. Tyčinky, čípky nebo oba typy se aktivují v závislosti na skutečném množství světelného záření, které dopadá na sítnici (Obrázek 4.5). U velmi malé osvětlenosti, pokud se procesu účastní pouze tyčinky, jedná se o skotopické vidění. Naopak přesáhne-li hladina osvětlenosti práh, kdy jsou transdukční schopnosti tyčinek satureované a tyčinky již nereagují, je vidění zajišťováno pouze čípky a jedná se o fotopické vidění. Při světelné intenzitě vyšší než práh citlivosti čípků, ale nižší než práh nasycení tyčinek se jde o mezopické vidění [Hurden, et al.. 1999]. Z tyčinek a čípků je signál přenášen prostřednictvím zrakového nervu do talamu a poté optickou radiací do zrakové kůry v mozku, kde je transformován do vizuálního vjemu.



Obr. 4.3: Schematický řez lidským okem, detail sítnice se třemi typy fotoreceptorů (tyčinky, čípky, ipRGC – viz 4.2.2).

Tři typy čípků, které se vyskytují v sítnici oka, zajišťují barevné vidění. Vjem barev vzniká díky kombinaci informací z jednotlivých typů čípků. Díky obsahu odlišných fotopigmentů má každý typ čípků vrchol citlivosti v jiné oblasti světelného spektra – v oblasti modré (445 nm), zelené (535 nm) a červené (575 nm). Celkově je vrchol citlivosti fotopického vidění kolem 555 nm [IES 2008]. Čípky se vzájemně liší v počtu (nejvíce, asi 64 %, je citlivých na červené vlnové délky, a pouze 2 % jsou citlivé na modré vlnové délky), v absolutní citlivosti i v rovnoměrnosti distribuce po sítnici oka. Obecně nejvyšší koncentrace čípků je na místě tzv. žluté skvrny.

Tyčinky neumožňují vnímat barvy, ale jsou citlivé už při velmi malých světelných intenzitách. Jsou dvacetkrát čtenější a tisíckrát citlivější než čípky, jejich akční spektrum

je posunuto směrem ke kratším vlnovým délkám, s maximem kolem 505 nm [IES 2008]. Převládají v periferní sítnici.

4.2.2 IpRGCs a nevizuální vnímání světla

Zrak nám poskytuje vizuální informaci o našem okolí. Současně byl potvrzen vliv světla pronikajícího do oka na fyziologické a psychologické procesy v těle člověka. Studium chování lidí prokázalo řadu vlivů světelného prostředí na bdělost, náladu a chování člověka [Cajochen 2007, Czeisler & Gooley 2007]. Toto tzv. nevizuální (nezrakové, neobrazové) vnímání světla nevytváří žádný vizuální obraz v mozku, poskytuje pouze informaci o přítomnosti nebo nepřítomnosti světla v našem prostředí [Foster & Hankins 2007]. Původně se předpokládalo, že tyto efekty jsou spojeny pouze s činností tyčinek a čípků. Pokusy s osobami a zvířaty trpícími ztrátou zraku ale prokázaly, že ani jeden z dosud známých fotoreceptorů není hlavním čidlem pro tyto procesy. V roce 1998 byl ze sítnice oka savců izolován další typ proteinů citlivých na světlo, melanopsin, vyskytující se odděleně od struktury známých fotoreceptorů [Provencio, et al. 1998]. V následných vědeckých pokusech [Brainard, et al. 2001, Thapan, et al. 2001] byl určen vrchol citlivosti nevizuálního vnímání v oblasti kolem 460 až 480 nm, která se liší od známé citlivosti tyčinek i čípků, ale současně odpovídá citlivosti melanopsinu. Brzy poté byl v oku popsán nový fotoreceptor [Hattar, et al. 2002]. Funkčně nezávislé fotoreceptory obsahující melanopsin jsou označovány jako vnitřně fotosenzitivní sítnicové gangliové buňky (intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells; ipRGCs). Ve vrstvě gangliových buněk formují rozptýlenou fotosenzitivní síť, která pokrývá prakticky celou sítnici [Provencio, et al. 2002]. Fotosenzitivní IpRGCs představují přibližně 2 % z celkového počtu gangliových buněk sítnice.

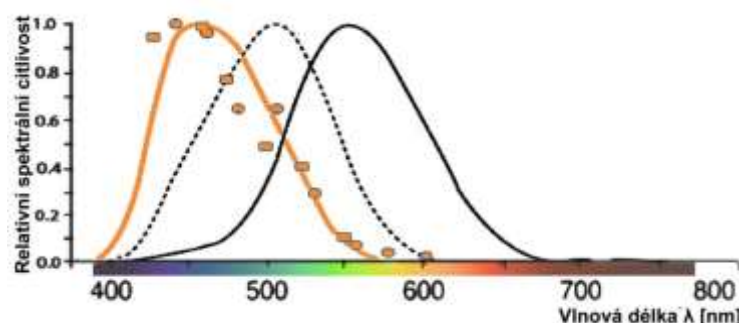
Denní doba, intenzita, spektrum, doba trvání, rozložení světla přijímaného okem a předchozí světelná historie jsou prozatím známé faktory, které ovlivňují konečný dopad na nevizuální zrakový systém člověka. Intenzita osvětlení potřebná pro aktivaci ipRGCs je obecně vyšší a spektrální citlivost je odlišná od vizuálního systému [Cajochen 2005]. Na rozdíl od tyčinek a čípků, kde denní doba hraje zanedbatelnou roli, pro nevizuální vnímání světla se v závislosti na čase osvětlení může zcela proměnit intenzita i druh reakce. Celková pomalejší reakce na světelný podnět vyžaduje pro aktivaci ipRGCs receptorů delší trvání světelného impulzu ve srovnání s tradičními fotoreceptory [IES 2008].

4.3 Spektrální složení

Průběh funkce spektrální citlivosti pro standardního fotometrického pozorovatele je určen pro dvě základní situace: typickou osvětlenost za denního světla pro fotopické vidění $V(\lambda)$ a nižší úroveň osvětlení, kdy jsou při skotopickém vidění aktivní pouze tyčinky $V'(\lambda)$.

Obecná fotopická funkce $V(\lambda)$ při sloučení citlivosti všech tří typů čípků vykazuje vrchol citlivosti v cca 555 nm. Skotopická funkce $V'(\lambda)$ dosahuje nejvyšší citlivosti při cca 505 nm. V oblasti mezopického vidění lze použít poměr skotopické a fotopické části pro posouzení intenzity reakce. [ISO 23539 2005]. Posun ve spektrální citlivosti, který se vyskytuje při nižší celkové osvětlenosti, je známý jako Purkyněho efekt.

Nevizuální vnímání světla má oblast nejvyšší citlivosti kolem 480 nm, tj. v modré oblasti viditelného světla. Proto je stimulace světlem obsahujícím kratší vlnové délky účinnější. Po prvních publikacích [Brainard, et al. 2001, Thapan, et al. 2001] následovalo několik výzkumných skupin, které představily vlastní funkce citlivosti $C(\lambda)$ pro ipRGCs [Enezi, et al. 2011, Gall & Bieske 2004], viz Obrázek 4.4. Různé přístupy byly vyvinuty za účelem vytvoření systému pro kvantifikaci vlivů různých zdrojů světla, zdrojů monochromatického nebo polychromatického světla nebo denního světla, například [Lucas, et al. 2014, Brown, et al. 2013]. Všeobecná shoda v rámci celé vědecké obce však nebyla doposud nalezena, je třeba další výzkum tohoto tématu.

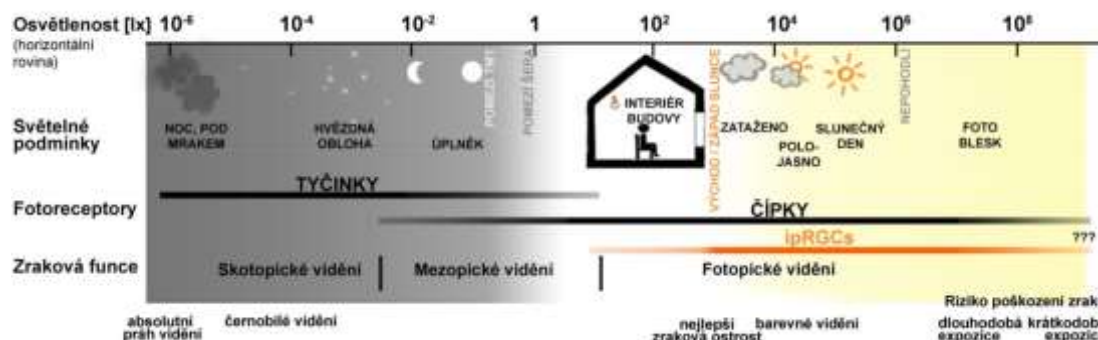


Obr. 4.4: Křivka spektrální citlivosti lidského oka: spektrální citlivost čípků (plná čára) a tyčinek (přerušovaná čára) ve srovnání s nevizuálním systémem (oranžové symboly a linie) adaptováno dle [Brainard, et al. 2001, Thapan, et al. 2001, Gall & Bieske 2004].

4.4 Kvantita

Systém dvou vizuálních receptorů (tyčinek a čípků) na sítnici umožňuje vizuální vnímání ve velmi rozdílných světelných podmínkách. Oko je schopno přizpůsobit se jasovým podmínkám v rozsahu přes 11 logaritmických řádů, od minima nutného pro základní orientaci při 10^{-6} cd.m⁻², schopnosti rozlišení barev od přibližně 1 cd.m⁻², až po plochy v přímém slunečním světle (přes 10^5 cd.m⁻²). K možnému poškození zraku může dojít, pokud je oko dlouhodobě vystaveno jasů kolem 10^7 cd.m⁻². Vyšší jas se stává nepříjemným, oko díky oslnění ztrácí schopnost rozlišovat detaily. Proto je nutná rychlá adaptace fotoreceptorů na okamžitou intenzitu světla. Pro rychlou adaptaci čípků na vyšší jas obvykle stačí milisekundy. Až několik sekund je nutno při přechodu do výrazně temnějšího prostředí. Důkladná adaptace na tmu může tyčinkám trvat 30 a více minut, ale následně jsou schopny reagovat již od úrovně jednotlivých fotonů. I přes velký rozsah citlivosti systém stále registruje náhlé, relativně malé změny světelného prostředí, jako například v důsledku pohybu mraků po obloze [Rushton 1972].

Obrázek 4.5 znázorňuje možnou osvětlenost vodorovné roviny v typických situacích, v relaci k citlivosti fotoreceptorů.



Obr. 4.5: Osvětlenost, vizuální a nevizuální funkce. Příklad možné osvětlenosti (v lx) horizontální roviny, za různých světelných podmínek, rozsah citlivosti lidského oka, režim zraku a aktivita fotoreceptorů. Vytvořeno na základě [Wirz-Justice 2010, Liebowitz 1987], grafika autor.

Nevizuální vnímání světla využívá převážně signál z fotoreceptorů ipRGCs, v nižších světelných hladinách je pravděpodobně kombinován s informacemi z tyčinek a čípků [Brainard & Hanifin 2005]. Reakce nevizuálního systému na přítomnost světla na sítnici jsou velmi odlišné. V průběhu dne se minimální osvětlenost potřebná k aktivaci nevizuálního systému pohybuje od několika set až jednoho tisíce luxů. Aby bylo posouzeno skutečné množství světla dopadající na sítnici oka, měření je třeba provádět na vertikální rovině, ve výšce oka, v dominantním směru pohledu jedince [Borisuit, et al. 2013a]. V noční době může být aktivace nevizuálního systému způsobena výrazně nižší osvětleností. V laboratorních podmínkách byla v rámci experimentů prováděných během biologické noci naměřena reakce systému o síle 50% maximální odezvy již při osvětlenosti 100 lx [Zeitzer, et al. 2000]. Vzhledem k řadě parametrů, jako je spektrální složení světla, délka trvání osvitů, denní doba, světelná historie a kombinovaný účinek na fyziologii, je velmi obtížné porovnat výsledky různých studií a vyvodit obecný závěr. [IES 2008, Lucas, et al. 2014, Borisuit 2013b]

4.5 Doba trvání, rozložení v prostoru, předchozí světelné prostředí

4.5.1 Rozložení v prostoru

Zrak nám umožňuje vnímat okolí pomocí světla odraženého od povrchů předmětů a dopadajícího na sítnici oka. Umístění zdroje světla výrazně ovlivňuje kvalitu prostorového vnímání. Nerovnoměrná prostorová distribuce světelného záření nebo výrazné rozdíly jasu povrchů v zorném poli mohou vést k oslnění a omezit vidění. Pro posouzení vhodného kontrastu se využívá křivka kontrastní citlivosti.

Ve srovnání s vizuálním není nevizuální systém příliš citlivý k prostorové distribuci světelného záření. IpRGCs jsou rozptýleny rovnoměrně po celé sítnici, systém reaguje na globální změny. Určitý rozdíl může být ve fyziologické reakci na osvětlení směrovým světlem a celkovým rozptýleným osvětlením prostoru, které zasahuje větší část sítnice oka. Studie také naznačují, že světelné záření z horní části zorného pole dopadající na sítnici v její spodní části, má výraznější efekt na oddálení přirozeného nástupu spánku, než je tomu u světelného záření směřujícího vzhůru [IES 2008].

4.5.2 Doba trvání

Vizuální systém reaguje na změny světelného prostředí v čase. Reakce na změnu intenzity osvětlení je velmi rychlá, většinou pouze několika stovek milisekund. Problém se může objevit při míhání světla (flicker) například u starších typů zářivek, jejichž jas v čase kolísá. Neustálé změny nutí fotoreceptory k rychlé adaptaci, čímž se energeticky vyčerpávají, může mít negativní vliv na zrakový systém jako celek. Z hlediska fyziologie oka je přijatelná frekvence míhání dosažena, když je opakovaný světelný podnět vnímán jako stabilní, ne jako přerušovaný.

V nevizuálním systému má doba trvání a časové rozložení světelné expozice (kontinuální, periody o délce několika minut nebo světelné záření ve formě krátkých impulzů) vliv na velikost fázového posunu vnitřních biologických hodin. Zdá se, že velikost fázového posunu narůstá s celkovou délkou světelné expozice a že první část expozice má vyšší účinek než v druhé polovině. Nevizuální systém je obecně velmi citlivý na světelné změny v prostředí. [IES 2008]

4.5.3 Předchozí světelné podmínky

Vizuální systém se umí rychle adaptovat. Vliv předchozího světelného prostředí zpravidla nepřesahuje několik sekund či minut, potřebných k přizpůsobení fotoreceptorů. [IES 2008]

Světelné podmínky v minulosti mohou ovlivnit nevizuální systém po dobu následujících hodin a dnů. Výrazné změny osvětlenosti jsou považovány za významný faktor stability a citlivosti celého systému. Vystavení slunečnímu světlu během několika dnů výrazně snižuje citlivost na světlo během noci. [Hebert 2002, Chang 2012, Münch 2012]

4.6 Časové rozložení světla během dne

Východ a západ slunce, 24hodinový rytmus proměn dne a noci, střídání světla a tmy, to vše jsou silné podněty pro všechny organismy žijící na planetě Zemi. Proměnlivost světla pomáhá vnímat čas. Změny intenzity světla během dne, které jsou z hlediska vizuálního vnímání v průběhu dne zanedbatelné, mají pro nevizuální systém zásadní vliv. Souvislost mezi změnami světelného prostředí a fyziologickými procesy v organismu člověka je hlavním tématem této práce.

4.6.1 Cirkadiánní rytmy v těle

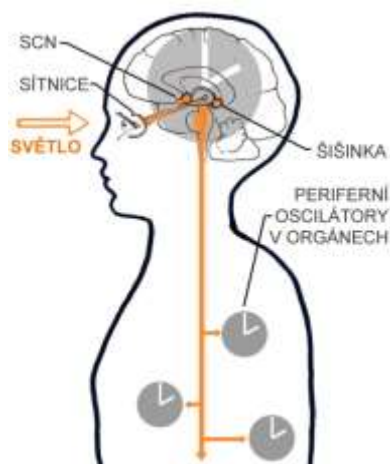
Život každého organismu na Zemi řídí vnitřní endogenní časový systém, tzv. cirkadiánní hodiny, s vlastním autonomním rytmem odvozeným z rytmických změn v přírodě, střídání dne a noci. Pravidelné změny v chování živých organismů je možné pozorovat u lidí, zvířat, rostlin, hub i sinic. Studium rytmických tělesných procesů v organismu je doménou chronobiologie [Halberg 1963]. Typickým příkladem rytmických změn je cyklus spánku a bdění, denní změny v hormonální sekreci, srdeční frekvenci, buněčné obnově nebo metabolické a tepelné regulaci, které probíhají v přibližně 24hodinové periodě, pro kterou se používá označení cirkadiánní rytmus. Výraz vznikl z latiny. "circa" znamená "přibližně" a "dies" znamená "den". Pokud je systém izolován od vnějších

podnětů, takzvaně volně běží (free-running), jedna perioda trvá v průměru 24,2 hodiny, ale její délka se může mezi jednotlivci lišit v rozsahu od 23,6 do 25,1 hodin. Délka periody je dána geneticky, lze tedy říci, že každý jedinec je charakterizován individuální délkou periody. Vedle cirkadiálního rytmu se v přírodě uplatňují i jiné biologické rytmy, jako měsíční nebo roční rytmus a naše tělo na ně reaguje [Illnerová & Sumová 2008].

Pouze několik tisíc neuronů tvoří malý orgán v lidském mozku a v mozku jiných savců, tzv. suprachiasmatické jádro (suprachiasmatic nucleus, SCN). Je to hlavní oscilátor, ústřední orgán vnitřních cirkadiálních hodin. V prostředí beze změn (v nepřítomnosti jakýchkoli environmentálních podnětů) udržuje SCN rytmus v konstantní periodě blízké 24 hodinám. SCN synchronizuje fyziologické rytmy například působením na šišinku (epifýzu) prostřednictvím paraventriculárního jádra (PVN). V závislosti na SCN je v šišince uvolňován hormon melatonin [Illnerová 1996], který ovlivňuje činnost všech periferních hodin v jednotlivých tělesných orgánech na buněčné úrovni (Obrázek 4.6). Každá detekovatelná funkce v těle je prováděna v cirkadiálním rytmu, řízeném ústředními nebo některými z periferních biologických hodin. Konkrétní načasování maxima a minima každé fyziologické funkce je optimalizováno pro zajištění požadované úlohy v celém systému. Příbuzné procesy jsou načasovány synergicky a protichůdné funkce jsou nastaveny s fázovým posunem, synchronizované z centrálních hodin v SCN. Díky této organizaci je možno synchronizovat časovou posloupnost biologických funkcí, a přesto umožnit velkou plasticitu a případné přizpůsobení se změnám ve vnějších podmínkách. [Roenneberg, et al. 2003a].

4.6.2 Podněty z vnějšího prostředí - časovače

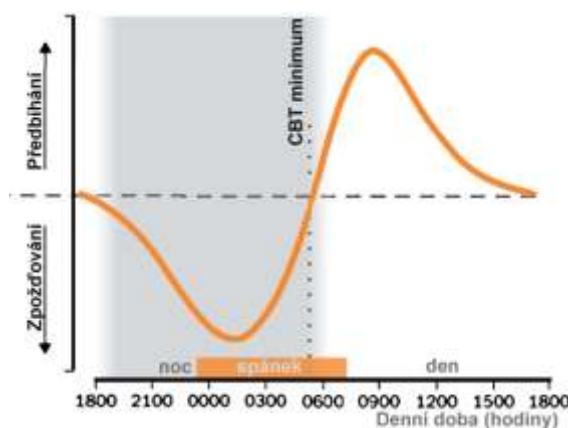
Jak již bylo zmíněno, jedna cirkadiální perioda netrvá přesně stejně dlouho jako jeden pozemský den. I když rozdíl je obvykle poměrně malý, nedojde-li k žádné korekci s vnějším světem a náš časový systém bude běžet volně, během několika týdnů se bude vnitřní čas výrazně lišit od času vnějšího. V přírodě se však případy volného běhu vnitřního času vyskytují velmi vzácně. Východ slunce, pravé poledne a západ slunce, jsou milníky v přírodním časovém systému - hodinách, kterými jsou obklopeny a ovlivněny rostliny, zvířata i lidé. Endogenní rytmus každého organismu je silně ovlivněn podněty z vnějšího prostředí, které se v chronobiologické terminologii nazývají „Zeitgebers“, časovače, neboli synchronizátory s vnějším rytmem dne a noci. Nejúčinnější zeitgeber pro vnitřní biologické hodiny je denní světlo vnímané okem. Cyklické střídání světla a tmy během dne, stejně jako sezonní změny ovlivňují chování jednotlivce. Jasné světlo během dne pomáhá udržet organismus v bdělém stavu, připraven na každodenní činnosti, soustředěný. Nepřítomnost světla v noci umožňuje tělu potřebný odpočinek, obnovu sil během spánku. [Aries 2005]. Na rozdíl od některých jiných zvířat, cirkadiální systém obratlovců je citlivý výhradně na světlo dopadající do oka. Jakmile je sítnice oka ozářena dostatečnou intenzitou světla o správné vlnové délce, melanopsin obsažený v ipRGCs vyšle nervové impulsy přes retinohypothalamický trakt do SCN v mozku, hlavních cirkadiálních hodin (Obrázek 4.6).



Obr. 4.6: Schéma organizace cirkadiálního systému - světlo přijímané okem ovlivňuje cirkadiální čas v lidském mozku a v těle pomocí hlavních a periferních oscilátorů (grafika autor).

Cirkadiální systém se chová velmi podobně jako mechanický oscilátor. Ve srovnání s prostou synchronizací je způsob jeho přizpůsobování složitější a může trvat i několik cyklů, než se vnitřní oscilátory sjednotí s rytmem přenášeným z vnějšího prostředí. Toto je možné cítit při cestování přes několik časových pásem - pocit známý jako jet lag. Jakmile jednotlivé oscilátory dosáhnou vzájemného souladu, běží vůči sobě ve stabilní a předvídatelné fázi. Tato fáze vyjadřuje relativní časový posun cirkadiálního procesu v rámci objektivního 24hodinového dne [Roenneberg 2003a].

Načasování dopadu světla na sítnici během subjektivního dne a noci ovlivňuje typ tělesné reakce a její intenzitu. Proměnlivá citlivost cirkadiálních hodin je znázorněna na křivce fázové odezvy, viz Obrázek 4.7. Ranní jasné světlo výrazně posouvá cirkadiální hodiny dopředu (cirkadiální perioda se zkrátí), jasné světlo ve večerních hodinách má opačný účinek - zpožďuje vnitřní hodiny, následná cirkadiální perioda bude delší. V průběhu subjektivního dne je u člověka vliv na fázový posun vnitřních hodin omezený. Silné světelné podněty během citlivé doby (subjektivní noc) mohou způsobit výrazný fázový posun, nebo dokonce úplné resetování vnitřních hodin [Roenneberg 2003a].



Obr. 4.7: Příklad křivky fázové odezvy (Phase response curve, PRC) u člověka, odezva na vnější světelné podněty. Šedé pozadí znázorňuje noc, oranžově je vyznačena přibližná doba spánku současného člověka. Největší vliv na fázový posun má světlo v pozdních večerních a brzkých ranních hodinách. Přesný tvar a amplituda PRC pro lidský organismus závisí na síle (tj. intenzitě a době trvání) světelného podnětu, dle [Jewett 1994].

Nejrobustnější zeitgeber je přítomnost světla v prostředí, ale cirkadiánní rytmus reaguje na řadu dalších faktorů z vnějšího prostředí. Pokud je světelný Zeitgeber omezený, také změny teploty, čas konzumace potravy a společenských aktivit hrají roli při usměrňování fáze cirkadiánních hodin [Roenneberg 2003a]. Některé z periferních oscilátorů v těle mohou být pod přímým vlivem externího zeitgeberu, který je pro něj fyziologicky významný. Například čas příjmu potravy ovlivňuje cirkadiánní systém zažívacího systému. Pokud je narušen rytmus řízený z SCN, například při dlouhodobé expozici jasnému světlu, uplatní se vlivy ostatních zeitgeberů na periferní oscilátory a ty se mohou dostat do rozdílných fází. Vzniká riziko, že amplitudy a fáze jednotlivých rytmických procesů v těle se mohou začít vzájemně mýjet a organismus může být desynchronizován viz Obrázek 4.8.



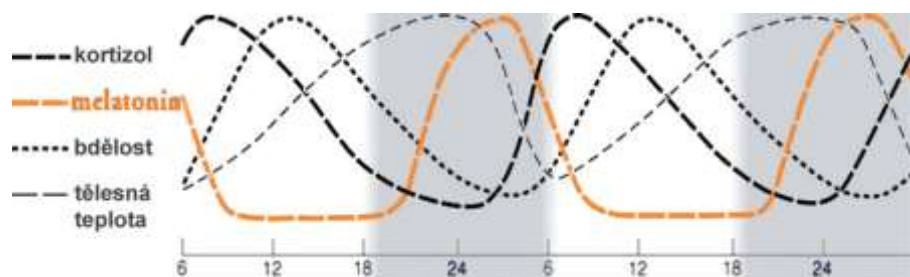
Obr. 4.8: Schéma synchronizace při více zeitgeberech: a/ Rytmy s různými fázemi (černé) se synchronizují do silného rytmu (červená čára). b/ Rytmy s různými fázemi vytvářejí slabší rytmus (červená čára). Převzato a upraveno z [Wirz-Justice 2010].

4.6.3 Hormon melatonin a kortizol

Melatonin je hormon produkovaný a vylučovaný v šišince (epifýze) [Illnerová 1996]. V organismu působí jako chronobiotikum [Illnerová 2008]. Změny v koncentraci melatoninu během dne se používají jako nepřímý marker vnitřních biologických hodin, určení jejich fázového posunu a sledování změn amplitudy. Při běžném rytmu spánku a bdění je koncentrace melatoninu v těle nízká v průběhu dne a výrazně narůstá v noci. Vykazuje charakteristické zvýšení koncentrace ve večerních hodinách a vrchol přibližně v půlce noci, viz Obrázek 4.9. Počátek produkce melatoninu ve večerních hodinách (Dim light melatonin onset, DLMO) je často používán v chronobiologických studiích pro výpočet fázového posunu mezi jednotlivci, například pokud je vhodné ve výzkumu zohlednit vnitřní čas jednotlivců. V porovnání s dalšími cirkadiánními markery, jako je například regulace tělesné teploty, zůstává melatonin poměrně spolehlivý i v přítomnosti různých vnějších vlivů. Může být objektivně měřen přímo i nepřímo prostřednictvím svých metabolitů v moči, krvi a slinách [Czeisler 1999, Lewy 2007].

Kortizol je v těle produkován jako reakce na stres, jeho základní hladina je ale regulovaná cirkadiánním systémem. Dává organismu podnět k probuzení a aktivitě. Mimo jiné zvyšuje hladinu cukru v krvi, aby tělo získalo energii a posílil se imunitní systém. Hladina kortizolu se zvyšuje brzo ráno, organismus se tak připravuje na nadcházející aktivitu. V průběhu dopoledne se hladina postupně snižuje, ale zůstává na

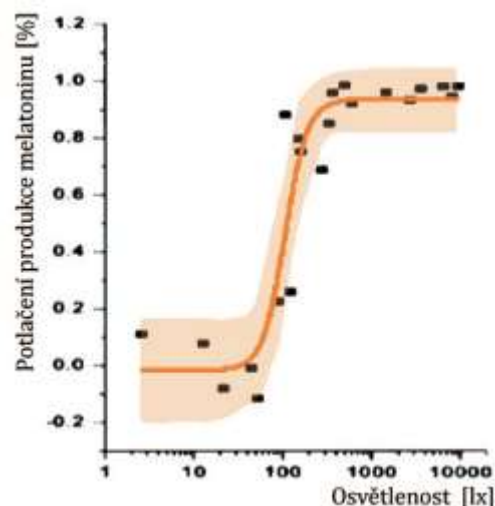
dostatečně vysoké úrovni po dobu dostupnosti (denního) světla. Nejnižší koncentrace dosahuje kortizol kolem půlnoci [Van Bommel 2004].



Obr. 4.9: Schematické znázornění rytmických změn v těle – typický denní průběh koncentrace hormonů melatoninu a kortizolu, tělesné teploty a subjektivní bdělosti (po dobu 2 x 24 hodin), pozadí naznačuje přírodní 12/12 hodinový rytmus střídání světla a tmy, upraveno z [Van Bommel 2004].

4.6.4 Krátkodobé, akutní účinky světla

Synchronizace cirkadiánních rytmů není jediný vliv světelného prostředí na naši fyziologii a chování. Světlo má také výrazné přímé okamžité vlivy na organismus. Ovlivňuje chování způsobem nezávislým na cirkadiánní regulaci, jako je například u nočních živočichů typické vyhýbání se pohybu při expozici jasného světla. Součástí je i rychlé potlačení produkce melatoninu po krátkém světelném pulsu v obě noci, kdy je jeho hladina vysoká [Lewy, et al. 1980], regulace tepové frekvence a tělesné teploty [Cajochen, et al. 2005], intenzivní podpora bdělosti u denních živočišných druhů a spánek u nočních. Expozice slunečnímu světlu může být spojována se zvýšenou subjektivní bdělostí [Badia 1991] a pozorností [Vandewalle, et al. 2006]. Akutní účinky jasného světla snižují ospalost nepřímo, pomocí rychlého potlačení produkce melatoninu, jak uvádí ve své hypotéze [Lockley, et al. 2006]. Toto je dáno především přímým působením světla na jiné hypothalamické struktury, než je SCN. V nedávné době se prokázalo spojení i do oblastí regulujících homeostatické funkce a motivační chování [LeGates 2014]. Reakce je také závislá na množství světla dopadajícího na sítnici oka. V laboratorních podmínkách byla v rámci experimentů prováděných během biologické noci naměřena reakce systému o síle 50% maximální odezvy (potlačení produkce melatoninu) již při osvětlenosti 100 lx [Zeitzer, et al. 2000]. Získaná křivka odezvy cirkadiánního systému je zobrazena na obrázku 4.10.



Obr. 4.10: Křivka závislosti odezvy cirkadiálního systému na osvětlenosti - akutní potlačení plazmatického melatoninu při světelné expozici během biologické noci. K reakci na světlo může dojít i při nízké intenzitě osvětlení. Nelze určit spodní práh, pod kterým již organismus nereaguje. Plnou reakci lze předpokládat při hladině osvětlenosti nad 1000 lx. Model – spojitá oranžová křivka, 95% interval spolehlivosti – světle oranžová výplň. Upraveno z [Zeitzer, et al. 2000].

Přímé účinky světla jsou jen obtížně odlišitelné od vlivů na cirkadiální regulaci. Označení "maskování" odkazuje na skutečnost, že mohou maskovat, upravovat nebo skrývat cirkadiální rytmus, nebo vytvořit zdání cirkadiálního rytmu u funkcí, které jsou jen přímým odrazem střídání světla a tmy během dne a noci a nemají endogenní genetickou podstatu.

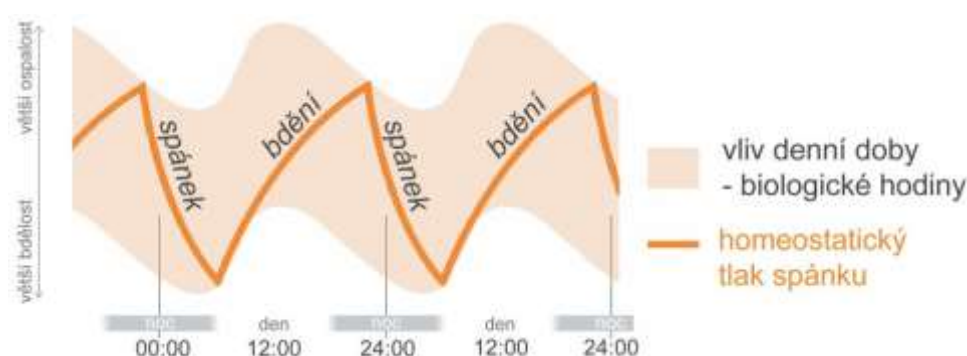
4.7 Vliv světla na rytmus spánku a bdění

24hodinový rytmus spánku a bdění je jedním z nejdůležitějších cirkadiálních rytmů v organismu, přirozeně synchronizovaný pomocí střídání denního světla a tmy na Zemi. U současného člověka jej tvoří přibližně 16 hodin bdělosti, převážně během dne, a 8 hodin nočního spánku.

Tak zvaný dvouprocesní model spánkové regulace, který poprvé popsal Borbély [Borbély 1982], sleduje cirkadiální regulaci a homeostatický tlak spánku, které společně formují celkovou úroveň bdělosti/ospalosti a ovlivňují délku, kvalitu a efektivitu spánku, viz Obrázek 4.11.

Dva endogenní procesy, homeostatický a cirkadiální, v kombinaci určují čas začátku a konce spánku. Homeostatický mechanismus sleduje, jak dlouho jsme byli vzhůru a jak dlouho jsme spali. Jeho tlak exponenciálně narůstá během doby bdělosti a klesá během spánku. Cirkadiální proces určuje optimální denní dobu pro spánek. Když se homeostatický tlak spánku zvýší nad určitou hranici, organismus usíná; když se sníží pod určitou (jinou) hranici, dojde k probuzení. Cirkadiální proces způsobuje úpravy obou těchto limit, viz Obrázek 4.11. Nesoulad těchto dvou procesů, který nastává například, když spánek probíhá z hlediska vnitřního rytmu v nevhodnou dobu (ve dne, kdy je cirkadiální rytmus připraven na aktivitu), může mít významný vliv na kvalitu spánku.

V optimálním případě se cirkadiánní rytmus a homeostatický tlak spánku podílí stejnou měrou na zvyšování ospalosti ve večerních hodinách [Cajochen, et al. 2014]. Oba procesy také souvisí s regulací mnoha aspektů chování a funkce mozku, včetně výkonnosti při kognitivních činnostech [Dijk, von Schantz 2005]. Stabilní a vysokou úroveň bdělosti lze udržet pouze tehdy, když fázový vztah mezi vnitřním cirkadiánním systémem a cyklem spánku/bdění je takový, že povzbuzující vlivy cirkadiánního rytmu v průběhu dne působí proti vlivu nahromaděného tlaku spánku, tj. zabraňují zhoršení bdělosti a výkonnosti během dne [Dijk, et al. 1992].



Obr. 4.11: Kombinace vlivu cirkadiánního rytmu a homeostatického tlaku spánku na regulaci spánku a bdění, tzv. dvouprocesní model, upraveno z [Borbély 1982].

Tyto dva procesy regulace spánku/bdění jsou často u člověka ovlivňovány vnějším prostředím - akutní (přímé) působení i dlouhodobé působení vnějších podnětů, mezi které patří vliv místního (společenského) času, fyzická aktivita, teplota okolního prostředí, konzumace kofeinu a jiných povzbuzujících látek a v neposlední řadě světelné podmínky.

V přirozeném prostředí ranní a odpolední slunce upravuje případné odchylky v rytmu vnitřních biologických hodin tak, aby spánek probíhal v čase, kdy je v okolí jedince tma, tedy v noci. Kvalita spánku v prostředí s jasným osvětlením není stejná jako kvalita spánku ve tmě [Gooley, et al. 2011, Lucas, et al. 2014]. Struktura spánku je ovlivněna akutními účinky světla. I když to nemusí být zřejmé na první pohled, pobyt v prostředí s vysokou intenzitou osvětlení během dne výrazně zlepšuje časovou distribuci aktivity a odpočinku během dne a noci. Několik hodin pobytu na denním světle nebo v prostředí se srovnatelnou hladinou osvětlení přináší následující noc pocit hlubšího a více uspokojující spánku [Wakamura & Tokura 2001, Viola, et al. 2008]. Komplexnost celého procesu činí spánkový cyklus velmi křehký a citlivý na porušení. Když jsou vnější a vnitřní vlivy v rozporu, může dojít k poruše cirkadiánního rytmu spánku. Přímé vazby existují mezi kvalitou spánku, náladou, výkonností a duševním zdravím [Kupermann, et al. 1995].

4.8 Vliv světla na výkonnost, bdělost/ospalost a náladu

Kognitivní výkon je spojený s činností, kdy provádíme úkol vyžadující zapojení vyšších mozkových funkcí, zpracování informací na vyšší úrovni než je "pouhé" vyhodnocení

senzorických signálů. Zahrnuje například udržování pozornosti, posouzení podnětů, uložení a vyvolání z paměti, proces rozhodování, nebo vyhodnocování senzorických informací. Kognitivní funkce jsou důležité pro aktivní práci s informacemi přicházejícími ze senzorických orgánů, nezbytné pro dlouhodobé soustředění a obranu před rozptylujícími vlivy. Jsou ovlivněny aktuálním poměrem bdělosti/ospalosti. Bylo prokázáno, že kvalitní a dostatečný spánek má zásadní vliv na zachování funkčnosti paměti [Alhola & Kantola 2007], nedostatek spánku způsobuje nižší přesnost a delší reakční dobu.

Hodnocení bdělosti/ospalosti popisuje stejný jev ze dvou protilehlých extrémních pólů a je často používáno zaměnitelně. V klinických studiích se subjektivní ospalost/bdělost obvykle stanovuje s použitím dotazníků pomocí indikace momentálního subjektivního hodnocení mezi dvěma extrémy (spánkem a plnou bdělostí). Neurofyzilogické testy pomocí elektroencefalografie (EEG), nebo EOG elektrookulografie (EOG) se používají vzhledem ke známé korelaci lidské bdělosti s aktivitou určitých mozkových center (EEG), četnosti pomalých pohybů očí a mrkání (EOG) [Cajochen 2014].

Akutní (přímé, non-cirkadiánní) vlivy světla se také podílejí na momentálním stavu bdělosti/ospalosti. Na jasné světlo v průběhu noci organismus reaguje dočasně zvýšenou bdělostí v důsledku relativně rychlého potlačení produkce melatoninu, zvýšením tělesné teploty, aktivity beta vln v EEG. To vše se odráží i v subjektivním hodnocení ospalosti [Badia, et al. 1991, Daurat, et al. 1996, Cajochen, et al. 2000]. Všechny z výše uvedených prací byly prováděny v nočních hodinách, kdy jsou sledovaní jedinci udržováni v prodloužené bdělosti a naměřené akutní účinky světla jsou robustní. Málo jsou popsány krátkodobé účinky světla v průběhu dne nebo subjektivního, kdy přítomnost (denního) světla výrazně potlačuje produkci melatoninu, nebo jeho produkce řízená z SCN je nízká a běžné hodnocení založené na sledování koncentrace melatoninu nelze použít.

Při výzkumu [Vandewalle, et al. 2006] pomocí funkční magnetické resonance byli sledovaní jedinci vystaveni tlumenému osvětlení o intenzitě menší než 5 lx po dobu celého 24 h dne a udržováni v bdělém stavu. Výsledky ukazují, že impulsy jasného bílého světla vytvořily dynamickou odezvu (trvala několik minut po impulsu) v mozkových strukturách zapojených do bdělosti a zabránily poklesu aktivity, který se jinak objevuje během pobytu v nepřetržité tmě. Studie [Phipps-Nelson, et al. 2003] ukazuje, že expozice jasnému světlu (asi 1000 lx) ve srovnání s osvětlením tlumeným (méně než 5 lx) v průběhu dne snižuje subjektivní ospalost a zlepšuje výkonnost v psychomotorickém testu udržované pozornosti (Psychomotor vigilance task, PVT) u jedinců, kterým byla v předcházející noci částečně omezena doba spánku. Na rozdíl od účinků světelné expozice během noci, nebyl nalezen žádný účinek jasného světla na výkonnost, EEG nebo subjektivní hodnocení ospalosti během dne u [Badia, et al. 1991]. Opačné zjištění je popsáno u [Rüeger, et al. 2006]. Podle [Figueiro, et al. 2013] má denní světlo během dne přetrvávající pozitivní účinek na výkonnost v průběhu následující noci při prodlouženém bdění, ale pouze mírný vliv na výkonnost a ospalost během dne. V rozporu s tím, výsledky prezentované uvádí [Smolders, et al. 2012], že i při běžném denním režimu, tedy nikoli při spánkově či světelně omezených podmínkách, může intenzivnější světlo (60 minut 1000 lx oproti 200 lx vertikální osvětlenosti v úrovni oka)

zlepšit pocit bdělosti a vitality, stejně jako objektivní výkonnost a fyziologické napětí. Všechna tato zjištění naznačují, že krátkodobé účinky světla musí být i nadále oblastí výzkumu. Pravděpodobně se nejedná jen o jednoduchou fyziologickou regulaci řízenou SCN pomocí produkce melatoninu, celý proces je nejspíše daleko komplexnější.

Byl prokázán také vliv jasného světla v průběhu dne na zlepšení nálady. Jasné světlo je úspěšně používáno pro léčbu sezonní deprese, například sezonní afektivní poruchy (Seasonal Affective Disorder, SAD). Mezi příznaky patří špatná nálada, nezáměr o okolí, snížená koncentrace, nedostatek energie a celková únava. I když jednoznačné příčiny a následky SAD zůstávají nejisté, světelná terapie se ukázala být účinnou terapeutickou intervencí. Mimo SAD se zdá být světelná terapie slibná i pro léčbu dalších depresivních poruch [Cajochen 2007].

Poté, co byly publikovány výsledky studií spektrální citlivosti nevizuálního systému a prokázán jeho vyšší citlivost kolem 480 nm, tj. v oblasti modrého světla, [Brainard, et al. 2001, Thapan, et al. 2001, Gall & Bieske 2004], řada světelných výzkumných týmů se zaměřila na vliv monochromatických zdrojů světla a zdrojů bílého světla s obohacenou aktivující modrou složkou (blue-enriched light). Studie [Cajochen, et al. 2005, Münch, et al. 2006, Lockley, et al. 2006] potvrdily v laboratorních podmínkách, že i krátkodobé fyziologické reakce, jako například potlačení produkce melatoninu, změny tepové frekvence a tělesné teploty jsou závislé na vlnové délce světla. Pozitivní efekt světelného prostředí s obohacenou modrou vlnovou délkou byl potvrzen ve 4 týdny trvající studii v kancelářském prostředí. Pracovníci pociťovali větší subjektivní pohodu, vyšší bdělost a kvalitu spánku [Viola, et al. 2008]. Není jasné, zda je za tyto změny zodpovědná cirkadiánní regulace nebo se jedná pouze o krátkodobé efekty, protože v rámci studie nebyly cirkadiánní profily sledovány. [Leichtfried, et al. 2015] ve studii prováděné v kancelářském prostoru s jasným osvětlením (6500 K / 5000 lx) zjistil, že změna světelného prostředí zvýšila bdělost a zlepšila náladu uživatelů, ale měla negativní dopad na jejich výkon - nejspíše došlo ke snížení vizuálního komfortu. Při návrhu osvětlení je tedy nutné zohlednit jak vizuální, tak i nevizuální potřeby, uzavírá autor.

4.9 Inter-individuální rozdíly ve světelných preferencích

Vedle rozdílů v preferovaném osvětlení, které jsou způsobeny rozdílem ve zrakové činnosti nebo zhoršenou funkcí zrakového aparátu, objevují se rozdíly mezi jedinci i ve fyziologické reakci na světlo a pocházejí z odchylky ve fungování nevizuálního vnímání světla. Známé faktory ovlivňující výkonnost nevizuálního systému jsou chronotyp, věk, pohlaví a genotyp [Roenneberg, et al. 2003a, Münch, et al. 2011, Jenni, et al. 2005, Duffy, et al. 2001, Chellappa, et al. 2014]

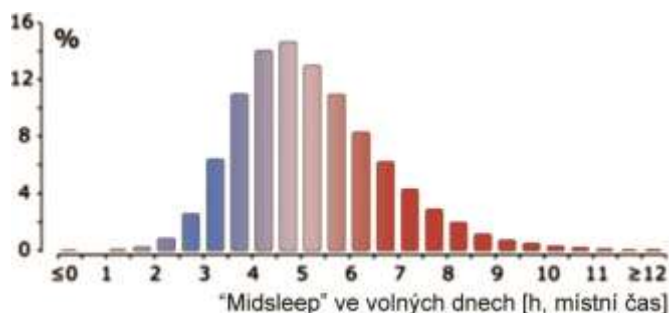
4.9.1 Lidské chronotypy

Vnitřní biologické hodiny jednotlivce mohou být vůči dennímu rytmu ve vnějším prostředí (např. rytmus denního světla) posunuty; mohou se trvale předbíhat nebo zpožďovat. Tuto osobní preferenci v časovém rozložení aktivity během dne vyjadřuje chronotyp. Subjektivní časový posun se týká také fyziologických procesů v těle, jako je spánková regulace, regulace tělesné teploty, hormonální sekrece, změny kognitivních schopností, zažívání a dalších. Relativní časový posun vůči lokálnímu času v daném

místě na Zemi, tzv. fáze synchronizace (phase of entrainment), je jedním z určujících znaků chronotypu. Téměř u poloviny populace je odchylka fáze vnitřních cirkadiánních hodin zanedbatelná, jedná se o takzvané neutrální chronotypy [Roenneberg, 2003a]. Při posunu vnitřního rytmu oproti vnějšímu času o méně než dvě hodiny se jedná o mírný chronotyp. Fáze posun vnitřního času o více než dvě hodiny způsobuje, že řada fyziologických procesů v těle probíhá v odlišné době než u většinové společnosti. Extrémně časný chronotyp, také označovaný jako "skřivani", vstávají brzo ráno. Doba jejich nejvyšší aktivity je před polednem a usínají relativně brzy večer. Oproti vnějšímu času jdou jejich vnitřní hodiny napřed. Extrémně pozdní chronotypy, takzvané "sovy", se samovolně probouzejí až během pozdního dopoledne. Potíže jim působí, pokud jsou nuceni vstávat v čase obvyklém pro běžnou společnost. Zažívají příliv energie odpoledne nebo večer a obvykle jsou připraveni usnout až pozdě v noci. Jejich vnitřní hodiny jsou zpožděné.

V přirozených podmínkách, kdy je jim umožněno přizpůsobit čas své aktivity a odpočinku subjektivním preferencím, jsou jedinci s extrémně časným a extrémně pozdním chronotypem vystaveni rozdílným světelným podmínkám. Zejména časová dostupnost denního světla během jejich subjektivního dne se mezi chronotypy výrazně liší. Jak již bylo popsáno dříve v tomto textu, účinky jasného světla na nevizuální systém se výrazně liší v závislosti na jeho časovém rozložení během subjektivního dne. Zejména účinky světla v brzkých ranních a pozdních odpoledních hodinách jsou téměř opačné, expozice jasným světlem v ranních hodinách posouvá vnitřní hodiny proti směru času a tím zkracuje denní periodu. Při dopadu jasného světla na sítnici v pozdním odpoledni se naopak denní perioda prodlužuje a tím se sníží rozdíl fáze mezi vnitřním cirkadiánním a vnějším (místním) časem. Tento aspekt je zejména důležitý pro zajištění synchronizace u extrémních chronotypů.

Posouzení chronotypu je možné pomocí auto-evaluačního dotazníku Mornigness-Eveningness Questionnaire – MEQ [Horne & Ostberg 1976] nebo výpočtem tzv. středu subjektivního spánku, korigovaného pro rozdíly mezi volnými a pracovními dny (Midpoint of Sleep on Freedays, MSF) [Zavada, et al. 2005]. Tento kalkulační nástroj byl vytvořen týmem T. Roenneberga a je volně dostupný na internetu. Od jeho zpřístupnění v roce 2005 do něj svá osobní data vložily desítky tisíc osob. Obrázek 4.12 ukazuje rozložení MSF v získaném vzorku populace.



Obr. 4.12: Zastoupení chronotypů v populaci (vzorek cca 60.000 osob). Ukazuje rozložení chronotypů dle výpočtu MSF. Upraveno z [Roenneberg & Merrow 2007].

Jednoznačné důvody vzniku chronotypů jsou dosud neznámé, pravděpodobně se jedná o řadu souvisejících aspektů. Existuje několik interpretací této preference. Předcházení vnitřních hodin je spojováno s kratší cirkadiánní periodou [Duffy, et al. 2001]. V laboratorních podmínkách, kde je možno zabránit vlivům vnějšího prostředí a vnitřní cirkadiánní hodiny mohou běžet volně, vykazují časné chronotypy kratší periodu než pozdní chronotypy [Roenneberg 2003a]. U časných chronotypů byl zjištěn během dne rychlejší nárůst homeostatického tlaku spánku a jeho rychlejší odbourání během spánku [Taillard 2003]. Podle [Brown 2007] může být chronotyp u člověka ovlivněn nejen délkou periody cirkadiánního oscilátoru, ale i složkami na buněčné úrovni, které ovlivňují jeho amplitudu a fázový posun. Vliv mohou mít také vnější podněty, jako sociální interakce (včetně budíku) a rozdílná citlivost k vnějším synchronizátorům.

Mohli bychom spolu s [Goulet 2007] uzavřít, že u těchto jedinců je časnější/pozdější cirkadiánní fáze spojena s krátkou/dlouhou cirkadiánní periodou, a že pravidelné prodlužování periody u časných a zkracování u pozdních chronotypů působením světla ve správném čase (večer pro časné a ráno pro pozdní chronotypy) je nezbytné pro zajištění stabilního 24hodinového denního rytmu.

4.9.2 Vliv věku

Starší lidé jsou skupinou osob se speciálními požadavky na osvětlení. Často kvůli zhoršení funkce zraku vyžadují pro vizuální aktivity vyšší osvětlenost. Ale není to jen zraková ostrost, která se v průběhu života snižuje. Chronotyp člověka se mění v průběhu života. Experimentální studie [Duffy, et al. 1999] ukázala, že starší jedinci sami sebe hodnotí více jako ranní typy. Bylo také zjištěno, že u nich dochází k poklesu teploty tělesného jádra dříve než u běžné populace, což je možné interpretovat jako známka nastavení vnitřních hodin na dřívější fázi. Ve vyšším věku začíná být noční spánek fragmentovaný, přibývá krátkých spánkových epizod během dne a večerní ospalost přichází velmi brzo [Münch, et al. 2011].

Oproti tomu adolescenti se vyznačují nápadným posunem vnitřních hodin směrem k pozdější denní době. V této věkové skupině převládají pozdní chronotypy, na konci adolescence dosahuje posun cirkadiánního času maxima. Kromě cirkadiánního systému prochází vývojovými změnami také spánková homeostáza. Pomalý nárůst tlaku spánku během dne a delší čas strávený vzhůru je typický pro starší teenagery. [Jenni, et al. 2005]

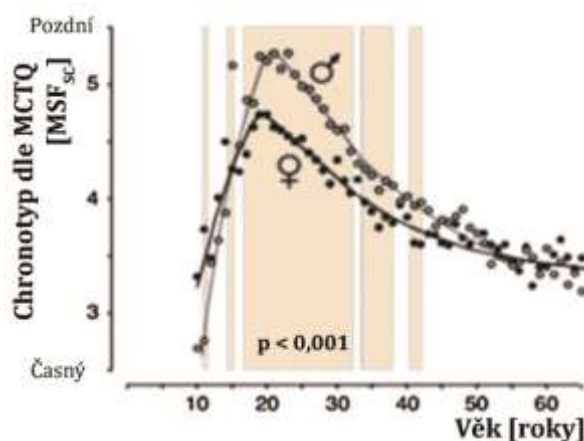
Jak je vidět, preferované rozložení aktivity během dne se mění s věkem. Děti jsou obecně ranní ptáčka, ale jejich preference se mění v průběhu dospívání. Preferovaný čas usínání se posouvá do pozdějších hodin. Na konci adolescence se projevuje největší vliv vlastního chronotypu. V průběhu stárnutí se spánková regulace posouvá opět do dřívějších, často až velmi časných hodin. Z předchozího je patrné, že subjektivní nastavení vnitřních cirkadiánních hodin je často odlišné mezi mladými a staršími jedinci. Tyto rozdíly by měly být brány v úvahu.

4.9.3 Vliv pohlaví

Mezi pohlavími existují rozdíly v anatomii, chemických procesech i ve funkci mozku. Existují také rozdíly v regulaci melatoninu. Ženy mají vyšší amplitudu rytmu melatoninu

než muži, což je spolu s dřívějším časem maximální produkce melatoninu [Cain, et al. 2010] důsledkem předbíhání cirkadiálních hodin oproti mužům a výrazně kratší denní periodu [Duffy 2001]. Ženy proto mohou spát ve stejnou denní dobu jako muži, ale jejich subjektivní čas je posunutý. Dřívější cirkadiální fáze může vést k častější nespavosti a objasnit, proč subjektivní hodnocení kvality spánku je u žen podstatně horší než u mužů. Rozdíly ve vnímání kvality spánku se neodráží v objektivních výsledcích polysomnografie. [Mong 2011]. Spánkový dluh se u žen hromadí rychleji [Armitage, et al. 2001], což může zvýraznit rozdíly ve schopnosti regenerace po spánkové deprivaci. Muži a ženy se také rozdílně vyrovnávají se změnami v denním rytmu. Přesné důvody pro tyto biologické odlišnosti jsou neznámé a ještě méně je objasněn vliv světelného prostředí na rozdílnosti mezi pohlavími.

Vývoj chronotypu v závislosti na pohlaví a věku v populaci je zobrazen na obrázku 4.13, který na základě shromážděných dat publikoval [Roenneberg, et al. 2004]. Z grafu mj. vyplývá větší posun cirkadiální fáze u mužů na počátku dospělosti a jeho postupné srovnávání v průběhu života.



Obr. 4.13: Závislost změn v chronotypu dle vlivu pohlaví a věku (plná kolečka a černá linie: ženy, otevřené kruhy a šedá linie: muži). Šedé oblasti ukazují období signifikantních rozdílů mezi muži a ženami (t-test, $p < 0,001$). Se svolením převzato z [Roenneberg, et al. 2004].

4.10 Shrnutí čtvrté kapitoly

Tato kapitola si dala za cíl podat základní přehled současného stavu poznání o vlivu světelného prostředí na člověka. Ve zkratce shrnuje funkce lidského oka, soustředí se zejména na porovnání vizuálních a nevizuálních aspektů vnímání světla člověkem. Následující tabulka 4.3 nabízí stručné shrnutí.

	VIZUÁLNÍ	NEVIZUÁLNÍ
Osvětlenost	Prahové hodnoty (osvětlenost referenční plochy) - od 10^{-6} lx – práh vidění - 1 lx – vnímání barev - 2000 lx – optimální zraková ostrost - do 10^5 lx – absolutní oslnění	Hodnoty nutné pro plnou aktivaci systému (osvětlenost na rohovce) 200 – 1000 lx v průběhu dne, dle dalších podmínek (spektrum, denní doba, světelná historie ...) výrazně méně v noci - 50 % aktivace již při 100 lx
Spektrální složení (vrchol citlivosti)	Fotopické – 555 nm Skotopické – 505 nm	cca 460 – 480 nm (dle potlačení melatoninu)
Délka expozice	Prevence mňhání	Aktivace systému po minutách/hodinách, trvání ovlivňuje intenzitu signálu pro SCN
Denní doba	Zanedbatelné	Zásadně ovlivňuje formu a intenzitu tělesné reakce, smysl fázového posunu cirkadiánní synchronizace a jeho velikost
Vliv světelného prostředí v minulosti	Adaptace během milisekund/sekund/minut	Vliv světelné historie (hodiny, dny) na citlivost celého systému
Distribuce v prostoru	Prevence oslnění Kontrast v zorném poli	Rozdíl ve vlivu mezi bodovým světelným paprskem a světlem rovnoměrně rozptýleným v prostoru

Tab. 4.3: Srovnání faktorů světelného prostředí a citlivosti vizuálního a nevizuálního vnímání světla na ně.

Kapitola se podrobněji věnuje vlivu změn světelného prostředí na vnitřní cirkadiánní časový systém člověka a zejména vlivu na regulaci rytmu spánku a bdění. Shrnuje faktory, které mohou způsobit výrazné inter-individuální rozdíly v cirkadiánní regulaci – vliv chronotypu, věku a pohlaví.

5. Světelné prostředí v budovách a nevizuální vnímání světla

*„We shape our buildings; thereafter they shape us.“
Winston Churchill⁸*

V závěru třetí kapitoly, kde byly popsány typické světelné podmínky v současném kancelářském prostředí, byl také zjištěn rozpor v přání uživatelů. Požadavek na velkou dostupnost denního světla lze jen obtížně skloubit s potřebou vizuálního prostředí bez výrazných kontrastů v zorném poli, které vyžaduje dlouhodobá práce na počítači. Tento sám o sobě nesnadný úkol je komplikován dalším požadavkem - potřebou zohlednit i nevizuální vnímání světla. Jak bylo popsáno v kapitole třetí, byl prokázán vliv časového rozložení světla, jeho kvantity a kvality na regulaci rytmu spánku/bdění u člověka. Aby vnitřní prostředí v budovách odpovídalo biologickým potřebám člověka, je nutno tyto nové poznatky začlenit do praxe. Bude to pravděpodobně znamenat podstatnou revizi současného přístupu k navrhování osvětlení v prostorech pro dlouhodobý pobyt osob. Následující čtvrtá kapitola se proto zaměřuje na možné důsledky pobytu člověka ve světelném prostředí, které se svými vlastnostmi významně liší od prostředí přírodního. Zabývá se požadavky platné legislativy, možnými riziky při nedodržení světelné hygieny. Popisuje také specifické skupiny osob, které jsou na vlastnosti světelného prostředí tak citlivé, že kvalita jejich života by mohla být nevhodným světelným prostředím citelně zhoršena.

⁸ „Formujeme naše domy. Ty pak následně formují nás.“

Winston Churchill
Proslov pro Sněmovnu lordů, Westminsterský palác, 28. října 1943.

5.1 Legislativní požadavky na světelné prostředí v budovách

Na úvod jsou rozebrány legislativní požadavky s cílem posoudit, do jaké míry odpovídají požadavky současné legislativy také biologickým potřebám lidského těla. Text se soustředí zejména na požadavky na světelné prostředí v administrativních budovách.

5.1.1 Závazná legislativa

Legislativa Evropské unie a na ni navazující česká legislativa řeší osvětlení v budovách z pohledu bezpečnosti, hygieny a ochrany zdraví. Evropská směrnice [Směrnice rady 89/391/ESH] implementovaná do zákona [Zákon 309/2006 Sb.] stanoví, že pracoviště musí pokud možno využívat přirozeného denního světla a musí být vybavena umělým osvětlením. Hlava II § 45 [Nařízení vlády 361/2007 Sb.] určuje bližší hygienické požadavky na osvětlení pracoviště. Na pracovišti s přístupem denního světla, kde by mohlo docházet k oslnění, se vyžaduje řešení regulace přímého slunečního záření například clonícím zařízením, které však nesmí bránit pohledu ven. Přesně specifikuje případy, ve kterých je možné zřídit trvalé pracoviště v prostoru nesplňujícím hodnoty pro denní nebo sdružené osvětlení. Stejně jako vyhláška o technických požadavcích na stavby [Vyhláška 268/2009 Sb.] požaduje, aby v obytných nebo pobytových místnostech bylo denní, umělé nebo sdružené osvětlení v souladu s normovými požadavky. Normy týkající se osvětlení [ČSN 73 0580-1:2007, ČSN 36 0020:2015, ČSN EN 12464-1:2012] tedy činí závaznými pro navrhování staveb. Vyhláška 268/2009 navíc specifikuje požadavek na proslunění všech obytných místností a těch místností pobytových, které to svým charakterem a způsobem využití vyžadují.

Dále je osvětlení v budovách řešeno z pohledu energetické náročnosti, ve smyslu [Směrnice Rady 2010/31/EU] o energetické náročnosti budov, která stanoví tzv. cíl 20/20/20. Jedná se o závazek snížení spotřeby energie Unie o 20 %, zvýšení energetické účinnosti o 20 % a využití energie z obnovitelných zdrojů ve výši 20 % z celkové spotřeby energie Unie, to vše do roku 2020. Vyhláška č. 148/2007 Sb. o energetické náročnosti budov stanoví požadavky na energetickou náročnost, srovnávací ukazatele a výpočtovou metodu pro stanovení energetické náročnosti budov. Její součástí je i energetická náročnost na osvětlení, které se v současnosti globálně podílí na celkové spotřebě elektrické energie přibližně 19%. [CIE 2015].

ČSN 73 0580-1:2007, Z1:2011 Denní osvětlení budov - Část 1: Základní požadavky

Norma stanoví požadavky na osvětlení budov denním světlem. Podle převažujícího směru světla (boční / horní) a předpokládané zrakové činnosti (7 tříd) definuje požadovanou úroveň a rovnoměrnost denního osvětlení pomocí činitelů denní osvětlenosti (D_m = průměrný; D_{min} = nejmenší) a poměru nejmenšího a největšího činitele. Vysoký jas oken nebo povrchů v zorném poli může být příčinou oslnění. Pro jeho prevenci byly stanoveny maximální poměry průměrných jasů v zorném poli pozorovatele a požadavky na povrchy, zejména činitele odrazu povrchů. Případné překročení stanovených limitů je zpravidla řešeno použitím mobilních stínících prvků – žaluzií apod. Norma také požaduje, aby materiál světlopropustné konstrukce osvětlovacích otvorů neměnil spektrální složení světla, pokud to není záměrem. Předpis obsahuje normativní výpočet činitele denního osvětlení, prováděný při rovnoměrně

zatažené obloze. Případné mobilní stínící prvky se posuzují v otevřené pozici. Vliv přímého slunce není ve výpočtu zohledněn. Z pohledu nevizuálního vnímání je zejména důležitý požadavek na zajištění dostatečného přístupu denního světla a zachování jeho spektrálního složení.

ČSN EN 12464-1:2012 Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory

Norma řeší osvětlení vnitřních pracovních prostorů z hlediska zrakové pohody a zrakového výkonu osob. Nerozlišuje, zda se jedná o světlo denní či umělé.

Osvětlení musí vyhovovat pro všechny vykonávané úkoly, při administrativní práci to znamená čtení na obrazovce a současně práci s tištěným textem. V reakci na rozšíření počítačů se oproti předchozím předpisům tato norma podrobně zabývá požadavky na vhodné prostředí pro čtení z monitoru (DSE, display screen equipment). Rozložení jasu v prostoru je hlavním parametrem pro zajištění kvalitního pracovního prostředí. Nevhodné umístění světelného zdroje může snížit kontrast zobrazení na DSE, odlesky způsobené nevhodným rozložením jasů v prostoru mohou znamenat omezující nebo rušivé oslnění. Pro hodnocení rušivého oslnění svítidly uvnitř prostoru je v závislosti na zrakovém úkolu zaveden podle CIE index UGR (unified glare rating). Pro zajištění kvality umělého osvětlení jsou specifikovány požadavky na minimální index podání barev. Minimální udržovaná osvětlenost v místě zrakového úkolu se měří na srovnávací rovině, která může být vodorovná, svislá nebo nakloněná. Od této hodnoty se v daných poměrech odvozují požadavky na osvětlenost bezprostředního okolí a pozadí úkolu. Samostatně jsou specifikovány požadavky na minimální osvětlenost povrchů, osvětlenost vnitřního prostoru pomocí střední válcové osvětlenosti a další. Pro posouzení energetické náročnosti osvětlení se norma odvolává na metodiku pro výpočet číselného ukazatele energetické náročnosti (lighting energy numeric indicator; LENI) uvedenou v předpisu Energetická náročnost budov – Energetické požadavky na osvětlení [EN 15193:2008], který je tímto také závazný pro navrhování.

Z hlediska tématu této disertační práce je podstatný jeden ze závěrečných odstavců normy, kde je konstatována důležitost variability světla pro lidské zdraví a celkovou pohodu. Je zde zaveden pojem takzvaných „osvětleností nevytvářejících obrazy“ (non-image forming) a konstatováno, že světelné stavy mohou také podporovat a nastavovat cirkadiánní rytmy a ovlivňovat fyziologický a psychologický stav člověka.

„Světelné podmínky mění se v čase s větší osvětleností, rozložením jasu a větším rozsahem teplot chromatičnosti, než je stanoveno v této evropské normě, zajištěné denním osvětlením a/nebo umělým osvětlením mohou stimulovat lidi a zlepšovat jejich celkovou pohodu. Doporučený rozsah těchto změn je předmětem studia.“

ČSN EN 12464-1 (2012), str. 19

ČSN 36 0020 Sdružené osvětlení (2015)

Normativní předpis stanoví požadavky na sdružené osvětlení vnitřních pracovních prostorů s trvalým pobytem osob, tj. stav, kdy úroveň denního osvětlení je nižší než požaduje norma [ČSN 73 0580-1:2007], ale stále je zachován dostatečný podíl denní složky. Činitel denní osvětlenosti musí vyhovovat stanoveným sníženým požadavkům a

denní světlo je doplněno umělým osvětlením tak, aby bylo dosaženo minimálně udržované osvětlenosti dle [ČSN EN 12464-1:2012]. V případě požadavku na 200 až 500 lx v prostoru s bočními osvětlovacími otvory se udržovaná osvětlenost navíc navyšuje o jeden stupeň řady osvětleností. Současně musí být splněny požadavky na rovnoměrnost, jasové poměry a další.

ČSN EN 15193:2008, Z1:2010 (73 0327) - Energetická náročnost budov - Energetické požadavky na osvětlení

Tato norma zavádí postupy pro stanovení energetických požadavků na osvětlení. Její součástí je metodologie výpočtu číselného ukazatele spotřeby energie v budovách, jako kalkulační nástroj pro splnění požadavků směrnice EC pro spotřebu energie v budovách č. 2002/91/EC.

Přestože normu ČSN EN 15193 nelze použít pro návrh umělého osvětlení v objektech, obsahuje z hlediska kvality prostředí v informativní Příloze H „Další důležité úvahy“, v naší legislativě prozatím nejobsáhlejší informaci, jak navrhovat osvětlení vhodné pro tzv. *„mimovizuální biologické účinky světla, související s regulací určitých hormonů v lidském těle“*, str. 54 v [ČSN EN 15193:2008]. Krátký text konstatuje, že na fyziologii člověka má také vliv časové rozložení světla během dne. Je zde zmíněn požadavek na vyšší úroveň osvětlení v denních hodinách a souvislost s teplotou chromatičnosti světla. Systém je označen jako biodynamické osvětlení (Algorithmic Lighting) [ČSN EN 15 193:2008]. Další odstavce v Příloze H poukazují na možnost dosažení energetických úspor při využití osvětlení s možností individuálního stmívání nebo přiváděním denního světla do objektu pomocí světlovodů.

5.1.2 Mezinárodní projekční podklady

CIE (Commission Internationale de l'Eclairage / The International Commission on Illumination)

CIE je nezávislá mezinárodně uznávaná organizace profesionálů v oboru světla a osvětlování. Výsledkem práce expertů CIE jsou například evropské standardy ISO. V současnosti vznikají v rámci CIE ve spolupráci divize 3 (Vnitřní prostředí a světelný design; Interior Environment and Lighting Design) a divize 6 (Fotobiologie a fotochemie; Photobiology and Photochemistry) souborné dokumenty. Cílem je poskytnout odborné veřejnosti informace potřebné pro navrhování a hodnocení světelného prostředí v budovách. Odborné týmy CIE zpracovávají např. přehled poznatků o přínosnosti oken v budovách (včetně vlivu na regulaci cirkadiánních rytmtů), shromažďují podklady pro posouzení vlivu spektrálního složení světla, hledají konsenzus pro vytvoření dozimetrické veličiny týkající se biologicky účinného záření a ozáření. Hledá se také vhodná strategie k minimalizaci negativního dopadu práce na směny, jet lag a poruch spánkového rytmu. Jako součást systému modelování denního světla dle místních klimatických poměrů připravuje CIE metodiku pro posouzení cirkadiánní účinnosti osvětlení [CIE 2015].

DIN SPEC Technical Report 67600 [DIN 2013]

Informativní dokument DIN SPEC Technical Report 67600 "Biologically effective illumination – Design guidelines" vytvořila německá normalizační komise DIN. Jedná se pravděpodobně o nejucelenější přehled, který shrnuje současný stav poznání vlivu světla na nevizuální vnímání člověka a poskytuje základní projekční pokyny.

5.1.3 Systémy hodnocení kvality budov

Snaha o energetickou úspornost a celkové zvýšení kvality budov přinesla vznik několika komplexních systému hodnocení kvality budov. Jejich cílem je zviditelnění nadstandardních projektů a realizací. Hodnotící kritéria těchto evaluačních systémů jsou často používána jako soubor doporučených opatření pro zajištění vysoké kvality budov a jejich prostředí. Dále uvádíme kritéria kvality osvětlení obsažená v jednotlivých systémech hodnocení budov.

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)

LEED je mezinárodně uznávaná značka kvality, za kterou stojí Americká rada pro šetrné budovy (U. S. Green Building Council, USGBC). Nejnovější verze jejich systému hodnocení budov LEED v4 byla zpřístupněna 1. 4. 2015 [LEED 2015].

Pro získání vyššího ratingu z hlediska osvětlení je třeba splnit stanovená kritéria:

K posouzení, zda budova umožňuje dostatečné osvětlení denním světlem (pro posílení cirkadiánních rytmtů, pro kontakt uživatelů s vnějším prostředím a pro úsporu elektrické energie na osvětlení), se používá roční simulace autonomie denního světla v prostoru (spatial daylight autonomy, sDA; [Mardaljevic, et al. 2009]). Pro splnění sDA_{300/50%} je třeba, aby alespoň po 50 % pracovní doby (9:00 – 15:00) byla dosažena požadovaná hladina osvětlenosti (300 lx) na alespoň na 55 % (75 % a 90 % pro vyšší standard) podlahové plochy místnosti. Do výpočtu se nezahrnuje vliv žaluzií. Současně se hodnotí, zda nedojde k oslnění sluncem na více jak 10 % podlahové plochy místnosti.

Interiérové osvětlení má podporovat produktivitu, komfort a celkovou pohodu uživatele, umožnit regulaci osvětlení uživatelem, splnit požadavky na způsob ovládání, rozmístění a kvalitu zdrojů světla a distribuci světla v prostoru.

Pro lepší viditelnost noční oblohy, zlepšení noční viditelnosti a snížení následků rozvoje pro lidi a volně žijící živočichy nesmí budova zatížit své okolí nadměrným světelným znečištěním.

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)

BREEAM určuje standardy osvědčených postupů v oblasti udržitelného stavebního projektování, výstavby a provozu. Dnes mezinárodně uznávané komplexní environmentální hodnocení budovy [BREEAM 2011] bylo původně publikováno britskou vládní agenturou Building Research Establishment v roce 1990. Pro získání hodnocení kvality je třeba splnit následující požadavky na osvětlení.

Pro denní osvětlení stanoví BREEAM minimální činitele denní osvětlenosti na dané ploše (dle typu budovy, administrativa 2 % na 80 % podlahové plochy) a požaduje dodržení rovnoměrné distribuce v prostoru.

Kontrola rizika oslnění doporučuje zabezpečit pomocí pevných nebo mobilních stínících prvků. Jejich návrh je nutno řešit ve vazbě na osvětlovací systém tak, aby byl minimalizován možný konflikt v jejich regulaci a předešlo se vysoké spotřebě energie.

Ovládání umělého osvětlení se doporučuje v zónách vždy pro maximálně 4 pracovní místa, se samostatnou zónou v prostoru u oken [BREEAM 2011].

V hodnocení BREEAM se zohledňuje také ochrana před nepotřebným světelným znečištěním v noci, způsobujícím zvýšenou spotřebu energie a obtěžování okolí.

DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen)

Certifikaci DGNB jako další multikriteriální hodnocení kvality sestavila nezisková nevládní organizace Německá společnost pro udržitelnou výstavbu budov, která se snaží vytvářet způsoby a řešení pro udržitelné navrhování, výstavbu a užívání budov [DGNB 2015]. Hodnocení vynikajícího řešení obsahuje až 50 kritérií udržitelnosti, od ekologie, ekonomie, sociálně-kulturních aspektů, technologie, procesu pracovních toků a místa.

V rámci hodnocení sociokulturní a funkční kvality se v sekci SOC1.4 Visual comfort stanoví, že spokojenost uživatele je úzce spojena s pocitem pohodlí. Dostupnost denního světla do interiéru ovlivňuje fyzické a duševní zdraví člověka. Z tohoto důvodu je třeba zajistit vhodné a nepřerušované dodávky denního světla do vnitřních prostorů. Hodnotí se dostupnost denního světla v budově a na pracovištích, ochrana před oslněním denním světlem i umělým osvětlením a podání barev.

Shrnutí legislativních požadavků

Současná platná legislativa řeší osvětlení v budovách z pohledu bezpečnosti, hygieny a ochrany zdraví. Odkazuje se na normové požadavky, jejichž splnění je díky tomu v České republice závazné. Osvětlení je v podstatě posuzováno pro dva extrémní případy: 1/ zajištění dostatku denního světla (výpočet činitele denní osvětlenosti při zatažené obloze) včetně jeho rovnoměrné distribuce v prostoru, 2/ zajištění vhodného světelného prostředí při použití umělého osvětlení (dostatečné osvětlenosti). Posuzuje se tedy minimální požadovaná hladina osvětlenosti a vůbec nejsou řešeny případy, kdy je světla příliš. Možný rušivý vliv přímé sluneční složky denního světla není zohledněn, pro ochranu před oslněním sluncem či denním světlem se spoléhá na využití mobilních stínících prvků. Jak již bylo v této práci uvedeno, mobilní stínící prvky mohou být dočasným řešením v případě akutního vizuálního nepohodlí. Tím, že brání přístupu denního světla do interiéru a blokují vizuální kontakt s vnějším prostředím, nevytvářejí z dlouhodobého hlediska světelné prostředí odpovídající fyziologickým potřebám člověka. Ani splněním všech požadovaných normových hodnot tedy nemusí vzniknout světelné prostředí, které odpovídá našim fyziologickým potřebám. Potřeba zajistit vhodné prostředí i pro nevizuální vnímání světla člověkem *per se* je v současné legislativě zmíněna, nejsou však specifikována ani základní vodítka, jak takové prostředí zajistit. V Evropě v rámci práce normalizačních komisí (CIE, DIN) v současnosti vznikají dokumenty, které shrnují dostupné informace o vlivu světla na fyziologii člověka. Význam těchto dokumentů je zásadní mimo jiné proto, aby bylo možné zvážit etické otázky při navrhování biologicky aktivního osvětlení, zejména dopad využívání technologie pro zvýšení produktivity pracovníků.

Mezinárodně uznávané systémy komplexního hodnocení kvality budov (LEED, BREEAM, DGNB), jejichž nejvyšší certifikace by měla být zárukou nadstandardní kvality objektu i vnitřního prostředí v něm, nahrazují posouzení vlivu světelného prostředí na nevizuální systém požadavkem na dostupnost denního světla v interiéru. S výjimkou systému LEED, který pomocí podrobné simulace autonomie denního světla hodnotí vliv slunečního záření v interiéru, ostatní systémy sledují pouze požadavek na dostatečný přístup denního světla odkazem na splnění činitele denní osvětlenosti při zatažené obloze. Vliv umělého osvětlení není v rámci komplexních systémů hodnocení kvality budov posuzován vůbec.

5.2 Měření světelného prostředí pro posouzení vlivu na cirkadiánní systém

Abychom mohli zodpovědně posoudit vliv světelného prostředí na nevizuální vnímání světla člověkem, je třeba provádět měření a zavést vhodné veličiny tak, aby byly navzájem srovnatelné a v případě potřeby opakovatelné. Řada studií nevizuálních reakcí člověka na světelné podněty kvantifikovala podněty pomocí fotopické osvětlenosti měřené luxmetry. Bohužel praxe ukázala, že tento způsob měření neposkytuje odpovídající výsledky. Ve srovnání s měřením osvětlenosti pro vizuální funkce se požadavky na měření u nevizuálního vnímání světla liší v referenčním bodě i ve vlastnostech používaných přístrojů. Pro sledování skutečného vlivu osvětlení na fyziologii člověka a také pro možnost opakovat a srovnávat jednotlivé výzkumy, je nutné vytvořit novou metodiku a používat měřicí techniku kalibrovanou dle citlivosti nevizuálního systému vnímání světla člověkem.⁹

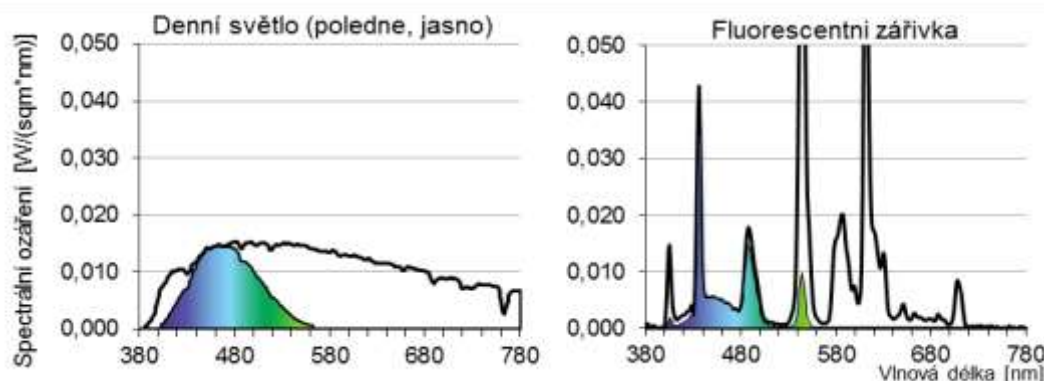
5.2.1 Vliv spektrální sensitivity

Přesné měření množství světla pro výzkum jeho vlivu na funkce nevizuálního systému nelze provádět pomocí měřicích přístrojů běžně užívaných k měření osvětlenosti (luxmetr). Zatímco citlivost luxmetru je přizpůsobena vizuálnímu systému s maximální citlivostí kolem 555 nm, fotoreceptory iPRGCs reagují na kratší vlnové délky než tyčinky a čípky. Jejich maximální citlivost se pohybuje v oblasti modré části světelného spektra, kolem 460 nm [Lockley, et al. 2003], viz obrázek 4.4. Speciální, na citlivost cirkadiánního systému kalibrované měřicí přístroje jsou teprve vyvíjeny [Borisuit, et al. 2013a]. Jednotná metodika měření prozatím neexistuje. V současnosti také existuje několik výpočtových metod a navrhovaných proměnných pro hodnocení vlivu na nevizuální systém, žádná z nich nebyla doposud uznána napříč vědeckou komunitou [Rea, et al. 2005, Gall 2004].

Alternativou speciálního měřicího přístroje je používání spektrometrů s cirkadiánní kalibrací nebo následný výpočet vlivu na cirkadiánní systém. Příklad tohoto posouzení dle křivky $C(\lambda)$ [Rea, et al. 2005] viz obrázek 5.1. Přestože osvětlenost měřená standardním luxmetrem je pro oba světelné zdroje shodná (1000 lx), vliv

⁹ Tomuto faktu navzdory jsou i v rámci této disertační práce, zejména v popise výzkumů převzatých z literatury, užívány hodnoty ne zcela přesné – měřené tradičními přístroji, často není jednoznačně specifikována poloha senzoru. Jsou to bohužel jediná dostupná data a je třeba brát tuto skutečnost v úvahu.

denního světla (5900K) na nevizuální systém je téměř dvojnásobný v porovnání s fluorescentní zářivkou o teplotě chromatičnosti 3700K.

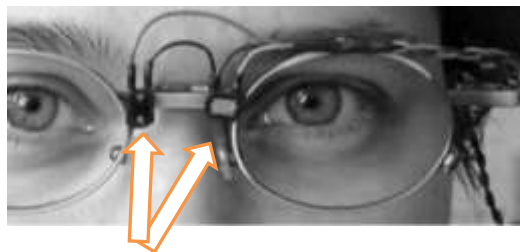


Obr. 5.1: Srovnání spektrální sensitivity nevizuálního vnímání při osvětlenosti V_E 1000lx . Váznamu spektrometru (nevyplněná černá křivka) je vyznačena cirkadiánně účinná část spektra (barevně vyplněná plocha). Vpravo příklad denního světla (CCT 5900K; $C(\lambda)$ 1,256 $W \cdot m^{-2}$), vlevo příklad umělého osvětlení – fluorescentní zářivky (CCT 3700K; $C(\lambda)$ 0,685 $W \cdot m^{-2}$). (vlastní výzkum).

Při použití luxmetru pro posouzení vlivu umělého osvětlení je nutná znalost spektrálního složení zdroje světla. Lze tak zvážit nejistotu měření a velikost případné chyby. Zatímco při hodnocení denního světla a dalších zdrojů se spojitým spektrem je rozdíl mezi hodnotou naměřenou na luxmetru a skutečnou intenzitou pro nevizuální systém zanedbatelný, u zdrojů s bodovým spektrem může být skutečná intenzita až tisícinásobně odlišná od naměřené hodnoty.

5.2.2 Vliv referenčního bodu

Pro hodnocení intenzity osvětlení nelze v případě nevizuálního systému použít běžný údaj osvětlenosti na referenční ploše. Pro cirkadiánní systém je rozhodující množství světelného záření dopadající do oka. V ideálním případě by měření bylo prováděno přímo na rohovce, nebo co nejbližší oku, ve směru pohledu, viz Obrázek 5.2. Z praktických důvodů jsou v chronobiologických výzkumech pro tato měření využívány světelné senzory osazené např. na brýlové obruby, nosiči na helmě, případně k připnutí na límec či jako přívěšek na krku.

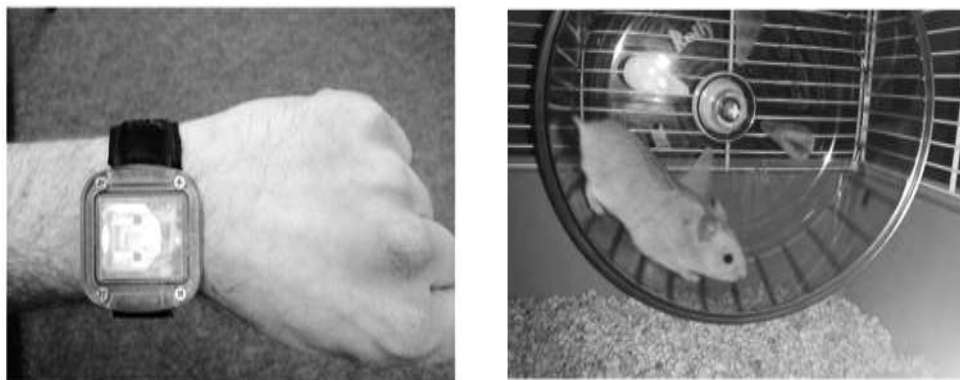


Obr. 5.2: Daysimeter-S; vytvořeno LRC, Rensselaer Polytechnic Institute, NY, USA [Bierman, et al. 2005] (vlevo). LuxBlick; vyvinuté na ETH Zurich [Hubalek, et al. 2006] (vpravo).

5.3 Metoda záznamu rytmu denní aktivity - aktigrafie

Aktigrafie, technika pro měření rytmu spánku/bdění, zachycuje vnitřní cirkadiánní rytmus organismu na základě vyhodnocení pohybové aktivity jedince.

Pro chronobiologické experimenty se často využívá laboratorních zvířat, u kterých je jednodušší vytvořit prostředí zcela bez přítomnosti vnějších synchronizátorů, nebo s jejich kontrolovaným vlivem. Sledování chování laboratorního zvířete v takovém prostředí umožňuje vyhodnotit vliv jednotlivých vnějších i vnitřních faktorů na jeho organismus. Při experimentech s hlodavci se pro záznam jejich aktivity využívá například běhací kolo (Obrázek 5.3 vpravo). U člověka se většinou měří akcelerace zápěstí nedominantní paže (Obrázek 5.3 vlevo). Akcelerometr v zařízení podobném hodinkám zaznamená akceleraci ruky a tím umožňuje sledovat změny v aktivitě během dne nebo v noci, vyhodnotit kvalitu spánku, posoudit pravidelnost denního rytmu, délku periody a případně určit posunutí fáze synchronizace. Měření je také možno doplnit o světelné čidlo pro záznam světelného prostředí, užitečné jako kontrolní měření při chronobiologických výzkumech. Díky mobilnímu provedení lze využít pro dlouhodobá měření (týdny, měsíce), i u jedinců se specifickými nároky (dětí, dementní jedinci). Aktuálně se obdobné funkce staly veřejně dostupné jako aplikace pro mobilní telefony apod. Při dosažení potřebné přesnosti by mohly v budoucnu umožnit získávání dat o rytmu denní aktivity jedinců v daleko větším rozsahu.



Obr. 5.3: Aktigrafické monitory: Actiwatch - zaznamenává akceleraci končetiny u člověka, Daqtix®, Oetzen-Süttorf, SRN (vlevo). Aktivita v běhacím kole, užití zejména při laboratorních experimentech s hlodavci (vpravo).

Dlouhodobý záznam graficky upravený do aktogramu (obrázek 5.4) zobrazuje denní rytmus, vnitřní periodu, tj. délku cirkadiánního dne jedince, a případně jeho citlivost na světlo s měnící se intenzitou nebo spektrálním složením. Laboratorní výzkumy s hlodavci mimo jiné zkoumají buněčnou podstatu celého systému nevizuálního vnímání světla. Malé rozměry záznamového modulu umožňují dlouhodobý monitoring člověka při běžných činnostech v jeho přirozeném prostředí mimo laboratorní podmínky.



Černé stopy – záznam aktivity
 Žluté pozadí – prostor je osvětlen
 Šedé pozadí – prostor není osvětlen

Protokol studie:
 10 dní pravidelného střídání 12h světla / 12h tmy,
 16 dní konstantní tmy,
 7 dní opět střídání 12h světla / 12h tmy, následně
 opět konstantní tma až do konce experimentu.
 Řádek aktigramu zachycuje 24 hodin.
 Celkem zobrazeno 42 dní trvání.

Obr. 5.4: Záznam denní aktivity myši v běhacím kole. Upraveno, převzato z [Zheng, et al. 2001]

Jak je názorně vidět na obrázku 5.4, pravidelné střídání světla a tmy synchronizuje denní rytmus se světlem. Aktivita živočicha probíhá v době bez přítomnosti světla (myš je noční tvor), za přítomnosti světla je zvíře neaktivní. Pokud chybí světelný impuls z vnějšího prostředí (tma po celých 24 hodin), vnitřní den jedince se zkracuje, protože jeho vnitřní biologické hodiny se oproti pozemskému času předcházejí (délka subjektivního dne živočicha vypočtena na 23,8 h).

5.4 Vliv denního světla a umělého osvětlení v moderní společnosti

Podle průzkumů uživatelských preferencí uživatelé upřednostňují prostředí s denním světlem, kde také tolerují prokazatelně vyšší vizuální nepohodlí ve srovnání s osvětlením umělým [Borisuit, et al. 2011]. Přesto, jak již bylo řečeno, pouze 10 – 20 % času tráví lidé v prostředí se světelnou intenzitou srovnatelnou s denním světlem a více než 20 % lidí ve vyspělém světě pracuje v noční době, pod umělým osvětlením [Hubalek, et al. 2010]. Umělé osvětlení tedy v našem prostředí převládá. Jeho vlastnosti můžeme upravit podle našeho přání a tím ovlivnit nejen vizuální komfort, ale i řadu účinků spojených s nevizuálním vnímáním světla.

Přestože již od osvětlenosti kolem 10 lx můžeme bez obtíží číst, náš cirkadiánní systém potřebuje 1000 lx pronikajících do našeho oka po určitou dobu během dne, aby byl trvale a stabilně synchronizován vnějšímu 24 hodinovému rytmu dne a noci [Foster 2011]. Vysoké denní hladiny osvětlenosti také mohou pozitivně ovlivnit kvalitu spánku v následné noci. Při osvětlenosti nad 2500 lx má světlo prokázané antidepresivní účinky [Ariës 2005]. Vertikální osvětlenost vyšší než 1000 lx byla dosažena pouze ve 20 procentech ze sledovaných kanceláří při rozsáhlém nizozemském výzkumu [Ariës 2005] a současně, jak již bylo řečeno, v prostředí s osvětleností dostatečně vysokou, aby stimulovala náš nevizuální systém, tráví současní lidé pouze 10 až 20 procent svého času [Hubalek, et al. 2010]. Aby upozornil na tento fakt, používá Till Roenneberg, jeden z prominentních vědců v oboru chronobiologie, termín „biologická tma“ [Burnett 2012].

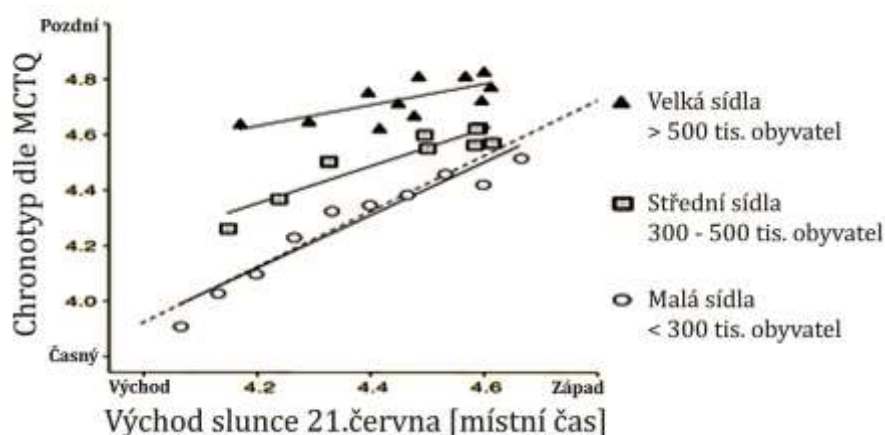
Oproti tomu v nočních hodinách může vyvolat již osvětlenost 100 lx reakci nevizuálního systému o síle 50% maximální odezvy (měřeno dle potlačení produkce melatoninu)

[Zeitzer, et al. 2000]. Jedním z důsledků může být například nežádoucí posun doby, kdy usínáme, způsobený pobytem v prostředí se světlem o intenzitě nižší než 100 lx, tj. méně než je běžně užíváno v domácnostech. I takto nízká osvětlenost může ovlivnit fázi cirkadiánních hodin – večerní expozice vnitřní hodiny zpožďuje [Jelínková-Vondrášová, et al. 1999], zatímco ranní, byť i relativně slabé světlo může způsobit předbíhání [Samková, et al. 1997]. Jak z řady výzkumů vyplývá, nelze stanovit práh citlivosti, pod kterým by nevizuální systém nevykazoval žádnou reakci. Spánek v prostředí s naprostou tmou má tedy své opodstatnění [Lucas, et al. 2014].

5.4.1 Vliv změny délky fotoperiody na denní rytmus člověka

V přírodním prostředí člověk využíval dostupnost denního světla, jeho aktivita jím byla podmíněna a jeho chování se výrazně proměňovalo v průběhu roku v souvislosti se změnou délky dne – tzv. fotoperiody. Rozdíl v průběhu roku se netýká jen délky fotoperiody, bylo prokázáno také rozdílné zastoupení aktivizující (modré) části spektra v denním světle ve večerních hodinách. Zatímco v létě podíl modré spektrální složky dosahoval přes 40%, v zimě to bylo pouze 20%. [Thorne, et al. 2009]. Umělé osvětlení je během dne i roku konstantní, informace o denní či roční době zde není obsažena.

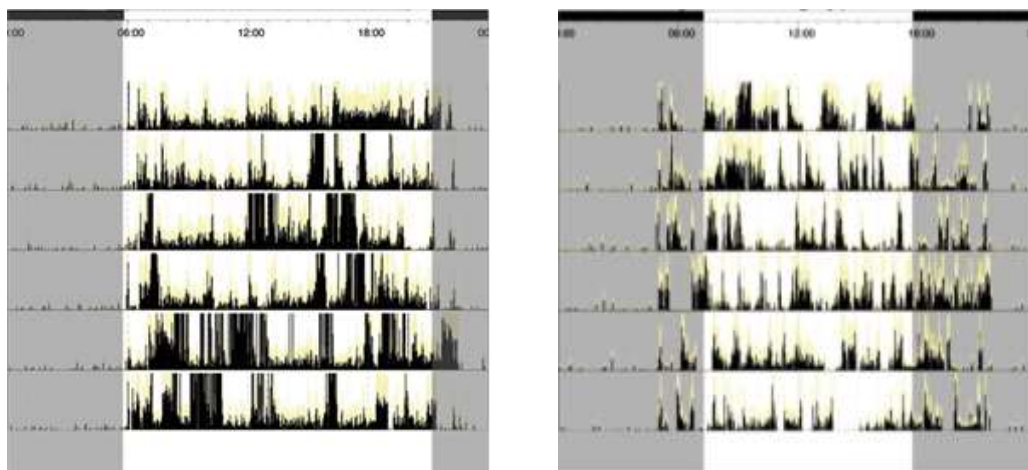
Přesto i dnes, navzdory vlivu umělého osvětlení, je možné sledovat vliv přirozeného denního světla. Srovnání distribuce chronotypů ve společnosti (vyjádřené v závislosti na zeměpisné délce) prokazuje, že lidské biologické hodiny jsou ovlivněny více slunečním časem než sociálními vlivy. Je však možné sledovat odlišnost mezi územím s nižší urbanizací a oblastmi velkoměstského charakteru. Zatímco v „přírodním“ prostředí jsou chronotypy přiměřeně rozloženy podle postupujícího úsvitu, v městském území je vliv pohybu slunce po obloze znatelně redukován [Roenneberg et al 2007b], Obrázek 5.5.



Obr. 5.5: Závislost chronotypů dle času východu Slunce (dle zeměpisné délky) v SRN. Průměrný chronotyp osob ze sídel menších než 300tis. obyvatel (kroužky), sídel menších než 500tis. obyvatel (čtverce) a větších měst (trojúhelníky), Čárkovaná čára ukazuje poměr 1:1 mezi změnou chronotypu a změnou času východu Slunce. Upraveno z [Roenneberg & Merrow 2007a].

Také aktivita člověka v moderní společnosti odpovídá původnímu rytmu pouze v letním období (Obrázek 5.6 vlevo). Po zbytek roku je pro prodloužení aktivity v době

nedostatku denního světla využíváno umělé osvětlení (Obrázek 5.6 vpravo). Je pravděpodobné, že k tomuto prodloužení aktivitní fáze dne došlo částečně na úkor času, který byl původně určen odpočinku. Předpokládá se, že rozdíl mezi letní a zimní délkou produkce melatoninu v přirozeném denním rytmu ve střední Evropě může být až 4 hodiny [Vondrašová et al 1997].



Obr. 5.6: Srovnání dostupnosti denního světla, využití umělého osvětlení a aktivity člověka v dlouhé fotoperiodě (květen, vlevo) a v krátké fotoperiodě (únor, vpravo); Lausanne CH, N46°31', E6°38'. Černá – záznam aktivity; žlutá – záznam světelného čidla; bílé pozadí – denní doba; šedé pozadí – noční doba. (vlastní výzkum).

Důsledky omezené přítomnosti přirozených synchronizátorů (zeitgeberů) lze sledovat při pobytu v polárních oblastech Arktidy a Antarktidy. V zimních měsících, tj. v době kdy je oblast téměř bez dosahu denního světla, bylo zaznamenáno vedle negativního vlivu na psychiku a zhoršení kvality spánku také časté zpoždování cirkadiánní fáze. Příčinou je pravděpodobně desynchronizace jedince s vnějším časem, volný běh vnitřních biologických hodin (u většiny jedinců je vnitřní perioda delší než 24 hodin). Expozice jasnému bílému světlu hodinu ráno a večer byla prokázána jako dostatečná pro obnovení synchronizace. Zajímavým poznatkem je, že v podmínkách polární noci byli pracovníci během jednoho týdne plně adaptováni na práci v noční době, což není v běžných podmínkách dosažitelné ani po mnoha týdnech [Arendt 2012].

Naopak, vliv expozice dennímu světlu na stabilizaci rytmu spánku/bdění byl testován v experimentu se skupinou mladých jedinců z městského prostředí [Wright 2013]. Čas aktivity a hodnoty melatoninu v jejich běžném prostředí byly porovnány s hodnotami získanými při pobytu v přírodním prostředí, bez přístupu k umělému osvětlení. Po týdnu života v přirozeném rytmu denního světla se všechny sledované hodnoty cirkadiánního rytmu posunuly průměrně o dvě hodiny směrem k normálu. U jedinců s extrémně pozdním chronotypem došlo k ještě výraznější úpravě směrem k neutrálním hodnotám. Jejich fázový posun se působením přirozených zeitgeberů zredukoval natolik, že se blížil běžné populaci. Výrazný rozdíl mezi intenzivním světem během dne a tmou v noci pomohl synchronizovat vnitřní biologické hodiny těchto jedinců.

5.4.2 Světelné prostředí mimo dosah přirozených pozemských zeitgeberů

V pozemských podmínkách lze jen těžko vytvořit prostředí zcela izolované od přirozených synchronizátorů životních rytmtů, tzv. zeitgeberů. Zkoumat chování člověka zcela bez vlivu zeitgeberů je proto velmi náročné. Unikátní možnost se však nabízí díky dlouhodobému pobytu člověka mimo planetu Zemi, např. na oběžné dráze při pobytu na mezinárodní vesmírné stanici ISS. Jedna rotace stanice kolem Země trvá cca 90 minut, 24hodinový den, tak jak jej známe na Zemi, zde neexistuje. Podle zpráv NASA mají astronauti v umělém prostředí na orbitě vážné problémy se spánkem, přestože mají pro odpočinek vymezený dostatečný čas. Vzhledem k zodpovědné práci, kterou astronauti vykonávají, považuje NASA tuto skutečnost za závažný problém. Proto byla při NSBRI (National Space Biomedical Research Institute) založena nová neurologická laboratoř. Významní specialisté z oboru se podílejí na vývoji nového osvětlení stanice, jehož instalace by měla letos začít. Původní zářivkové osvětlení bude nahrazeno programovatelnými LED zdroji, nový systém bude simulovat průběh pozemského 24hodinového dne. Vědci předpokládají, že nové osvětlení bude fungovat jako prevence poruch cirkadiánního rytmu, bude mít pozitivní efekt na kvalitu spánku, případně umožní zkrácení doby potřebné pro usnutí. Je testována kombinace programovatelného LED osvětlení a užívání kofeinu, s cílem zlepšit výkonnost a snížit chybovost v průběhu nočních směn. Technologie testované na orbitě mohou být následně využity i při pozemských aplikacích. [Worth 2012, Brainard, et al. 2012].

5.4.3 Shrnutí

Snížení vlivu ročního období, menší vliv pohybu Slunce na obloze (například okamžik úsvitu) na počátek aktivity člověka, zpoždování cirkadiánní fáze a malá stabilita vnitřních biologických hodin při nízké osvětlenosti během dne, všechny tyto jevy by bylo možno interpretovat jako důsledek oslabení vlivu přirozených zeitgeberů. Méně přirozeného světla ve dne a více umělého osvětlení v noci snižuje míru cirkadiánní synchronizace současné společnosti, zejména v silně urbanizovaných oblastech. U některých jedinců se tak vnitřní biologické hodiny mohou začít předbíhat/zpožďovat v závislosti na délce vnitřní cirkadiánní periody. Tento proces by mohl vyvolat nárůst počtu extrémních chronotypů v populaci, a to zejména chronotypů extrémně pozdních, neboť cirkadiánní perioda delší než 24 hodin je zastoupena častěji. Fakt, že pozdní nástup spánku a obtíže s usínáním a ranní ospalost jsou častý stav u osob v produktivním věku, by tento závěr podporoval.

5.5 Světelná hygiena

Současné průzkumy ukazují, že 35–40% dospělé populace v USA během týdne spí méně než 7 hodin [CDCP 2011]. Pouze 31 % obyvatel USA považuje délku svého spánku jako postačující [CDCP 2008]. Spánek kratší než 7 hodin denně u dospělého člověka byl opakovaně prokázán jako nedostatečný pro plnou regeneraci organismu. Vede k dlouhodobému hromadění spánkového deficitu, snížení bdělosti v pozornosti během dne [Czeisler 2015]. Dostatečně dlouhý, souvislý a kvalitní spánek je třeba pro k zajištění dlouhodobé pozornosti a kognitivní výkonnosti během dne. Současně je

prevencí řady fyziologických změn, které by mohly predisponovat vznik nepříznivých zdravotních poruch [Buxton, et al. 2012]. Aby bylo možno i přes chronický nedostatek spánku vykonávat běžnou denní aktivitu, je náš životní styl spojen s nadměrným používáním stimulantů – např. kofeinu [Basner 2011] a ve večerních hodinách jsou pro kompenzaci stimulantů užívány látky se sedativními účinky, ať už se jedná o alkohol nebo medikamenty. Tyto látky umožní rychleji usnout, ne vždy však přinášejí kvalitní spánek – naopak, běžným důsledkem jejich užívání je ranní malátnost a zvýšená potřeba stimulantů. Lidé v moderní společnosti tak pomocí nekonečné smyčky povzbuzujících a tlumících látek nahrazují přirozený rytmus dne a noci, rytmus aktivity a odpočinku. Spánek je vnímán jako flexibilní komodita, lze za něj směnit čas pro jiné aktivity, které jsou považovány za naléhavější, více důležité [Foster & Wulff 2005]. Cenou, kterou se platí za život ve společnosti aktivní 24 hodin/7 dní v týdnu, je dlouhodobá spánková deprivace a poruchy denního rytmu u velké části populace. Projevuje se jako stav trvalé ospalosti, jako neschopnost udržet pozornost a výrazně zhoršuje kognitivní výkon během dne, následovaný nekvalitním spánkem v noci. S omezováním pobytu na denním světle souvisí nárůst případů sezónních depresivních poruch.

Spánek, přestože je často vnímán jako automatický biologický proces, je ve skutečnosti proces kontrolovaný také vědomým jednáním, přímo ovlivněný životním stylem, chováním a okolním prostředím.

Pokud se chceme vyhnout narušení rytmu spánku a bdění, je důležité dodržovat tzv. „světelnou hygienu“. To znamená poskytnout tělu dostatek světla ve dne a omezit rušivé světlo v noci. Současný vědecký výzkum potvrzuje, že vliv mohou mít i činnosti a situace zcela běžné v každodenním životě moderní společnosti.

Expozice dennímu světlu [Wright, et al. 2013] i umělé osvětlení o vysoké intenzitě v denních hodinách [Hubalek, et al. 2010] přirozeně stabilizuje rytmus a má pozitivní vliv na kvalitu spánku během následující noci. Použití světelných zdrojů s větším zastoupením modré složky pro denní osvětlení kanceláře zlepšuje kvalitu nočního spánku a vyšší bdělost ve dne [Viola, et al. 2008].

Naopak večer po setmění, v době počátku produkce melatoninu, může pouhých 30 minut pobytu v prostředí osvětleném běžně užívanými zdroji světla (intenzita osvětlení <200 lx) potlačit produkci melatoninu, do pozdějších hodin odsunout počátek jeho produkce a s tím spojený i nástup spánku. Ranní konec produkce melatoninu nebyl večerním světlem ovlivněn. Celkově se tedy zkrátila doba, kdy je melatoninu produkován, a to až o 90 minut [Gooley, et al. 2011]. Nejvýznamnější efekt byl nalezen při expozici světelnému záření s vyšším podílem modré složky, tj. u zdrojů s vyšší CCT (5000 K), často označované jako „daylight white“ nebo „studená bílá“. Výrazný efekt byl však zaznamenán například i u „teple bílého“ zdroje Planon s CCT 2800 K, pokud byl zdroj umístěn ve vzdálenosti 1 m od oka [Wahnschaffe, et al. 2013], jak je to běžné například v koupelně u osvětlení zrcadla. Negativní vliv však může mít i tlumené světlo v ložnici během spánku [Kloog, et al. 2011].

Aniž bychom si toho byli vědomi, kvalitu spánku můžeme ovlivnit pouhým zapnutím televizoru nebo prací na počítači ve večerních hodinách [Burnett 2012]. Televizní obrazovka, vzdálená od diváka většinou několik metrů, má na nevizuální vnímání světla

omezený vliv, avšak světlo emitující přístroje, které bývají umístěny velmi blízko obličeji (oku), tj. mobilní telefony, touchpady nebo monitor počítače mohou ovlivnit již významně [Cajochen, et al. 2011]. Také byl prokázán větší vliv energeticky úsporných LED monitorů v porovnání se staršími typy monitorů bez LED zdrojů. Na světlo citlivé IPRGC's receptory v oční sítnici jsou velmi citlivé právě v oblasti modrých vlnových délek, typicky vyzařovaných LED zdroji [Czeisler 2013]. Je pravděpodobné, že svou roli hraje také venkovní osvětlení. Nejen vliv na omezenou synchronizaci cirkadiánních hodin s denním rytmem [Roenneberg, et al. 2007b], řada studií potvrzuje také vztah mezi vyšší hladinou venkovní osvětlenosti v urbanizovaných oblastech a zvýšeným výskytem rakoviny prsou u žen [Bauer, et al. 2013].

S dlouhodobou správnou funkcí vnitřních biologických hodin jsou jen velmi těžko slučitelné opakované výrazné změny denního rytmu. (noční práce ve směnném provozu, časté časové posuny při přeletech mezi časovými pásmy – jet lag), které je nejlépe omezit na minimum.

Časový posun při přeletu několika časových pásem způsobuje pásmovou nemoc, tzv. jet lag. Projevuje se jako zvýšená únava a poruchy spánku v důsledku narušení cirkadiánního rytmu. U leteckého personálu, tj. osob, které se pravidelně po mnoho let pohybují napříč časovými pásmy, se tento syndrom může stát chronickým. Nepravidelný spánkový režim a opakované časové posuny mají vliv na zhoršení kognitivní výkonnosti. Byly zjištěny také vyšší hladiny kortizolu a po pěti letech tohoto pracovního režimu byly zjištěny znatelně zmenšené spánkové laloky mozku, centra důležitá pro dlouhodobou paměť a schopnost učení se [Cho 2001].

Práce na směny, která znamená aktivitu večer, v noci nebo stálé změny pracovní doby, je spojována s narušeným nebo zkráceným spánkem, většinou v nepříznivé cirkadiánní fázi [Driscoll 2007]. Pro negativní vliv na vnitřní biologické hodiny v organismu byla již v roce 2007 noční práce klasifikována jako zdravotně riziková, prokazatelně zvyšující riziko některých nádorových onemocnění. I přes toto závažné zdravotní riziko je dnes například v USA ve směnném (nočním) provozu na plný úvazek zaměstnáno přibližně 15 % všech pracujících [Costa 2010].

Jak již bylo několikrát řečeno, jak akutní spánková deprivace i chronické omezení spánku zvyšuje homeostatický tlak spánku. Tím způsobené zhoršení neurobehaviorálních funkcí se odráží v celkové ospalosti, může se objevit mikrospánek, nebo náhlá neodvratná potřeba spánku. Objevuje se vyšší tendence nepřiměřeně riskovat, což v kombinaci s vyšším úsilím, které musí vynaložit na udržení pozornosti a zhoršenou kognitivní výkonností může mít vážné následky. Spánkově deprivovaní jedinci vykazují výrazně zhoršenou funkci krátkodobé i dlouhodobé paměti, omezenou schopnost řešit více úloh nebo komplexnější problémy. Jejich sociální a komunikační schopnosti mohou být ovlivněny, ztrácí smysl pro humor, kreativitu. V důsledku dlouhodobě nedostatečného spánku dochází často k náhlým změnám nálady a celkové emoční nestabilitě, zvýšené podrážděnosti, úzkostným i depresivním stavům. [Foster 2011].

Řada dalších, ještě závažnějších zdravotních komplikací se objevuje při dlouhodobé spánkové nedostatečnosti nebo poruše cirkadiánní synchronizace. Prozatím byly

prokázány poruchy metabolismu a související nárůst tělesné hmotnosti [Arble, et al. 2009], zvýšené riziko obezity [Kobayashi, et al. 2012], diabetes [Chao, et al. 2011], vysokého krevního tlaku [Wang, et al. 2012], poruchy termoregulace a snížení imunity vůči chorobám a virovým infekcím. Jediná noc bez spánku stačila ke snížení aktivity bílých krvinek o 28 % [Irwin, et al. 1996].

S poruchami cirkadiánních rytmů je spojováno také zvýšení rizika poruch buněčné obnovy. V důsledku expozice jasnému světlu v době subjektivní noci dochází k potlačení produkce melatoninu, který je mimo jiné prokázán jako ochranný faktor proti rakovinnému bujení v těle [Cos & Sanchez-Barcelo 2000]. Toto je pravděpodobně jedna z příčin zdravotních rizik spojených s noční prací, prací na směny apod. Ve srovnání s běžnou populací je u žen dlouhodobě pracujících v noci prokazatelně vyšší výskyt karcinomu prsou [Hansen 2001, Schernhammer, et al. 2001], u mužů naopak zvýšený výskyt karcinomu prostaty [Conlon, et al. 2007]. U pracovníků ve směnném provozu se také objevuje diabetes druhého typu, je sledováno vyšší riziko vysokého tlaku, kardiovaskulárních chorob a obezity [Chen, et al. 2010].

5.6 Rizikové skupiny osob

Při každém uživatelském hodnocení vnitřního prostředí se i v tom nejlépe navrženém a kontrolovaném prostoru objeví určité procento nespokojených. Tito lidé mají odlišné požadavky než typický, "průměrný" uživatel. Je otázkou, na základě čeho tyto rozdílné požadavky vznikají a do jaké míry ovlivňují chování daného jedince – zda se jedná o dočasné nepohodlí, nebo jsou to faktory, které významně snižují kvalitu jejich života a mají vliv na produktivitu, případně i na zdraví.

Soustředíme-li se na světelné prostředí, mohou být důvodem netypických požadavků například rozdíly ve vykonávané zrakové činnosti nebo zhoršená funkce zrakového ústrojí jedince. Rozdíly se však objevují i v důsledku odlišných fyziologických reakcí na podněty zprostředkované nevizuálním vnímáním světla. Známé faktory, způsobující odlišné reakce mezi jedinci (věk, pohlaví a chronotyp), již byly popsány v kapitole 4.9.

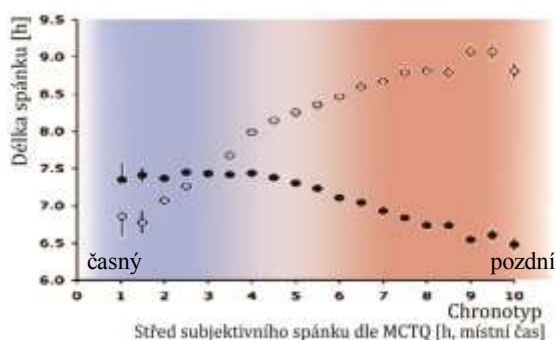
5.6.1 Extrémní chronotypy

Již v roce 1997 zaznamenala studie uživatelských preferencí kancelářského osvětlení [Begemann, et al. 1977] významné rozdíly u dvou jedinců ve srovnání s většinovou populací. Begemann tyto osob označil jako Mr. Bright Light (pan Jasný) a Mr. Dim Light (pan Šerý). Při následných rozhovorech potvrdili tito jedinci sklon k velmi vysokým respektive nízkým hladinám osvětlenosti. Tyto netypické světelné preference byly doprovázeny také specifickým chováním. Oba jedinci uvedli nestandardní rozložení časů nejvyšší produktivity během dne a výrazný vliv světla na kvalitu spánku v noci. Pozdější výzkum potvrdil tyto typické odlišnosti u tzv. extrémních chronotypů (viz kapitola 4.9), jejichž zastoupení v populaci se odhaduje v řádu procent, viz Obrázek 4.12. Jednou z příčin vzniku tohoto jevu může být vnitřní cirkadiánní perioda, která je u extrémních chronotypů výrazně kratší/delší než 24hodinový den. Odchylka od 24hodinového rytmu způsobuje trvalé předcházení/zpoždování vnitřních centrálních i periferních hodin organismu [Nováková, et al. 2013]. Důsledkem může být kratší/delší subjektivní den a

tendence vstávat každý den o něco dříve/později. Pokud nedochází k pravidelné synchronizaci, fázový posun vůči majoritní společnosti narůstá každý den. Omezení vlivu přirozených zeitgeberů v současné společnosti (např. snížená hladina světla přes den při pobytu v budovách, snížená fyzická aktivita) může znamenat zhoršení podmínky pro synchronizaci vnitřních hodin s denním rytmem. Vhodný světelný režim, tj. jasné světlo v době, kdy je nevizuální systém citlivý na synchronizaci (večerní světlo u časných a ranní světlo u pozdních chronotypů) pomáhá tomuto jevu předcházet.

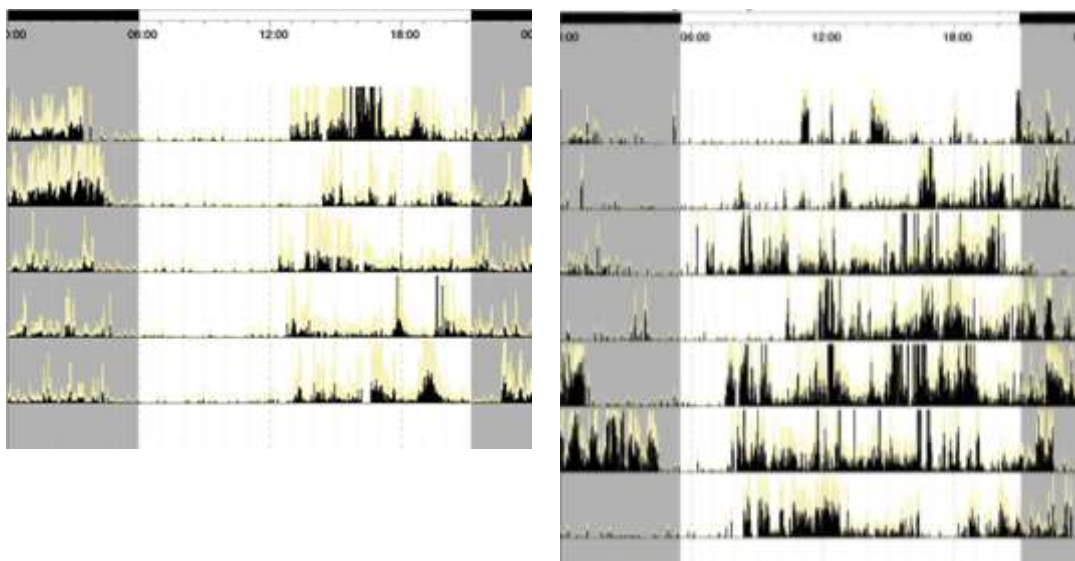
Sociální jet leg

Při nedostatečné synchronizaci může být aktivní fáze dne pozdních chronotypů posunuta do odpoledních, večerních nebo i nočních hodin a jejich subjektivní noc končí výrazně později než je v majoritní společnosti běžné. Díky společenskému tlaku je možné v takto posunutém denním rytmu žít pouze o víkendech a v čase volna. Naopak v pracovních dnech jsou lidé s pozdním chronotypem nuceni vstávat v době subjektivní noci. Vnitřní hodiny v celém těle se dostávají do nesouladu s denní dobou, což může negativně ovlivnit řadu fyziologických funkcí, dlouhodobě způsobit i některé patologické stavy [Plháková, et al. 2013]. Spánkový dluh, naakumulovaný během pracovního týdne, bývá kompenzován prodlouženou dobou spánku o víkendech. Till Roenneberg popisuje tento stav jako „sociální jet leg“ [Wittmann, et al. 2006]. Obrázek 5.7 dokumentuje rozdíl mezi spánkem během pracovního týdne a ve dnech volna. Zatímco lidé s časným chronotypem mohou být spánkově deprivováni o volných dnech, pozdní chronotypy v době volna kompenzují výrazný spánkový dluh z pracovních dní.



Obr. 5.7: Vztah mezi chronotypem (dle MCTQ) a délkou spánku, analyzováno odděleně pro pracovní (uzavřené kruhy) a volné dny (otevřených kruhy). Převzato z [Roenneberg & Merrow 2007a].

Obdobně jako dlouhodobý jet leg u leteckého personálu či pracovníků ve směnném provozu, i chronický sociální jet leg může vyústit do závažné spánkové poruchy, poruchy cirkadiánního rytmu s dlouhodobými zdravotními následky. Pokud se faktor vrozeného chronotypu zkombinuje s nevhodným světelným prostředím, může dojít k destabilizaci vnitřních hodin. Vlivem působení dalších (např. společenských) faktorů může dojít k porušení koordinace jednotlivých procesů v těle (Obrázek 5.8), kdy je narušen pravidelný rytmus biologických procesů včetně cirkadiánní regulace spánku a bdění.



Obr. 5.8: Aktogram jedince s extrémně pozdním chronotypem. Jedinec může být aktivní a odpočívat v preferovaném čase, jeho výkonost se neliší od běžné populace, přestože aktivita probíhá v nočních hodinách.(vlevo). Aktogram jedince s porušeným rytmem cirkadiánních hodin (záznam vysokoškolského studenta v letním zkouškovém období). Možný důsledek kombinace pozdního chronotypu, tlaku společnosti, dlouhodobé spánkové deprivace, stresu a nedostatečné stimulace cirkadiánního aparátu (např. nevhodného světelného prostředí). (vpravo), vlastní výzkum.

5.6.2 Vliv věku

Jak už bylo naznačeno v kapitole 3.9, chronotyp nemusí být stejný po celý život. Malé děti bývají většinou ranní ptáčata, v průběhu dospívání se doba preferované aktivity jedinců posouvá do extrémně pozdních hodin. Ve vyšším věku se aktivní fáze pomalu vrací zpět do ranních hodin. Posun chronotypu v určitém období života v kombinaci s přirozeným nastavením biologických hodin může přinést vysokou citlivost na dodržování světelné hygieny. Věk uživatelů tvoří tedy další významný faktor při navrhování světelného prostředí a hodnocení jeho vlivu na nevizuální vnímání.

Adolescenti

Dnešní životní styl mladých lidí je spojen s omezením fyzické aktivity i času na denním světle a narůstajícím časem stráveným u počítače, často odpoledne a ve večerních hodinách. Právě používání elektroniky těsně před spánkem, hraní počítačových her, online komunikace nebo surfování po internetu přímo v posteli bylo prokazatelně spojeno s nespavostí a s odsouváním spánku do pozdních hodin. [Fossum 2014] Displej sledovaný z relativní blízkosti (kolem 50cm) může představovat pro cirkadiánní systém poměrně intenzivní zdroj světla a lze jej obdobně jako televizní obrazovku v ložnici zařadit do kategorie rušivého osvětlení. Současné LED obrazovky mají velké zastoupení aktivujících modrých vlnových délek, které mohou potlačit produkci melatoninu a tím i oddálit přirozený nástup spánku. Jako částečnou prevence vlivu LED obrazovek na spánek některé výzkumy doporučují použití brýlí s filtrem blokujícím modré světlo [van der Lely, et al. 2015].

V období dospívání dochází v lidském těle k řadě fyziologických a psychologických změn. Lidé jsou v tomto věku citliví k nejrůznějším vlivům ve svém okolí i k sociálním vlivům. Z hlediska chronobiologie dochází v dospívání k výrazné změně v chronotypu, k posunu aktivity až do extrémně pozdních hodin. Z toho to důvodu je mezi mladými dospělými největší zastoupení extrémně pozdních chronotypů. Kombinace této biologické predispozice se současným životním stylem společnosti aktivní 24/7, vlivem rušivého světla ve večerních a nočních hodinách a naopak omezeného pobytu v prostředí s intenzivním světlem během dne znamená, že jsou to právě mladí lidé, kteří častěji prožívají sociální jet lag, dlouhodobou cirkadiánní desynchronizaci způsobenou tlakem společnosti.

Statistiky potvrzují, do jaké míry se jedná o globální problém. V celosvětovém průměru spí současné děti ve všední dny o 1,2 hodiny denně méně než před sto lety [Matricciani, et al. 2012]. Boston College provedla v 2013 celosvětový sběr dat pro hodnocení vzdělávacích systémů s účastí více než 50 zemí. Výsledky mimo jiné poukázaly na fakt, že 46,5% dětí ve věku 9-10 let je dlouhodobě spánkově deprivováno. Toto číslo se ještě zvyšuje v nejvíce rozvinutých zemích: celkově nejvyšší je v USA se 73 % spánkově deprivovaných dětí. Toto se následně projevuje na jejich studijních výsledcích. V důsledku ospalosti ztrácejí schopnost soustředění, snižuje se jejich kognitivní výkonost, ale ovlivňuje i emoční vývoj [Martin & Mullis 2013, Dewald, et al. 2010]. To vše v období, které je velmi důležité pro vzdělávání a celkový rozvoj osobnosti.

Senioři

Ve vyšším věku zpravidla dochází ke zkracování cirkadiánní periody (viz Obrázek 4.13), vnitřní hodiny se začínají předbíhat oproti dennímu rytmu společnosti. Člověk se budí brzo ráno, často se objevují krátké spánkové epizody během dne, večer přichází velmi brzy ospalost. V důsledku stárnutí zrakového aparátu se postupně snižuje kvalita zraku. Pro stejnou zrakovou činnost proto senioři potřebují vyšší osvětlenost, než je nutné u běžné populace. Zhoršení funkce oka nepostihuje jen vizuální aparát; také nevizuální systém se s věkem stává méně citlivý na vnější podněty [Heeg & Striffler 2010]. Vedle častých menších či větších poškození receptorů na sítnici dochází s věkem k postupnému žloutnutí čočky oka. Ta propouští stále méně světla, zejména modré složky světelného spektra. Oko 90letého jedince může jen díky snížené prostupnosti čočky blokovat více než polovinu krátkých vlnových délek v porovnání s 25letým jedincem. [van de Kraats, van Norren 2007]. Snížená schopnost pohybu často brání seniorům v dostatečné aktivitě a tím omezuje dobu jejich pobytu na denním světle. Přesto řada studií prokázala, že typické hladiny osvětlenosti v obytných místnostech seniorů nedosahují často ani hodnot běžných u ostatní populace, natož aby byla kompenzována snížená schopnost vnímání způsobená věkem. Např. měřením v japonském domě pro seniory bylo zjištěno, že průměrný čas, který obyvatelé trávili v osvětlenosti vyšší než 400 lx, byl pouze 59 minut denně. Data také potvrdila pozitivní korelaci mezi delším časem v prostředí s vyšší osvětleností a pocitem větší životní spokojenosti [Ichimori, et al. 2013]. Při pobytu v nízké osvětlenosti (tzv. biologické tmě) ztrácí vnitřní biologické hodiny schopnost synchronizace. Postupně může dojít k celkové destabilizaci vnitřního rytmu, zhoršení kvality spánku se všemi již popsány důsledky.

Aby byla zachována synchronizace, je u seniorů důležité zajištění vyšších osvětleností, zejména v průběhu dne. Vzhledem k typicky kratší vnitřní periodě může být vhodná i vyšší osvětlenost ve večerních hodinách [Münch, et al. 2006, Staedt, et al. 2009]. Studie prokazují souvislost mezi porušeným vnitřním rytmem a nemocemi ovlivňujícími paměť a myšlení, jako je například Alzheimerova demence [Münch, et al. 2011]. Naopak, zlepšení synchronizace, orientace v čase a kvality spánku bylo pozorováno u seniorů s pokročilou poruchou paměti po pouhých třech týdnech terapie s použitím simulátorů rozbřesku a západu slunce (Down Dusk Simulator) [Gasio, et al. 2003].

5.7 Cirkadiánní dynamické osvětlovací systémy

Současná osvětlovací technika nám dává možnost ovlivnit pomocí světelného prostředí fyziologické funkce člověka. Přináší však s sebou také řadu etických otázek. Vhodné osvětlení může výrazně prospět stabilizaci denního rytmu. Napomáhá ke zvýšení pozornosti ve dne a kvalitnímu spánku v noci, k fyziologické i psychické pohodě člověka. Světlo lze využívat i k léčbě některých typů depresivních onemocnění. Avšak stejně jako většina léků, totéž světlo v jiné situaci může člověku uškodit. Není vždy jednoznačné, zda je v daném okamžiku vhodné využívat nebo naopak potlačovat povzbuzující efekty světla. Tyto protichůdné požadavky se mohou objevit současně a u téže osoby. Například při noční práci na směny může intenzivní osvětlení podpořit vizuální komfort, zvýšit výkonnost a snížit počet chyb v důsledku ospalosti. Současně však dochází v těle k potlačení produkce melatoninu a posunutí vnitřních biologických hodin do nežádoucí fáze. Naopak při tlumeném světle bude minimalizován vliv na cirkadiánní rytmus, ale také snížen okamžitý výkon.

Vyrovňování žádoucích a nežádoucích účinků světla nebo tmy vyžaduje pečlivé, informované zvážení souvislostí a nesčetných účinků světla. Jednoduchá řešení mají stejnou pravděpodobnost, že ublíží nebo že pomohou, a dokonce i odborníci mohou mít odlišné představy o nejlepším opatření v rámci stejné situace [Lucas, et al. 2014].

5.7.1 Biodynamické osvětlení

Evropská norma 15193 používá v příloze H [EN 15 193:2008] bez podrobnější specifikace termín „Algorithmic Lighting“, s českým ekvivalentem „Biodynamické osvětlovací soustavy“ užívaným v českém překladu normy. Smyslem tohoto konceptu osvětlení by mělo být vytvoření vnitřního prostoru v budovách tak, aby světelné prostředí bylo blízké svým časovým, spektrálním a případně i směrovým průběhem dynamickému dennímu světlu. Pro konkrétní lokalitu vytvořený řídicí algoritmus by upravoval osvětlení v závislosti na denní i roční době. Tento typ osvětlení je vhodný pro prostory určené k dlouhodobému pobytu osob, zejména pokud není možné vytvoření okenních otvorů [Žák 2015]. Synchronizace cirkadiánního systému člověka je zajištěna časovým rozložením, které napodobuje denní světlo. Nabízí se však i využití krátkodobých účinků jasného světla na bdělost člověka.

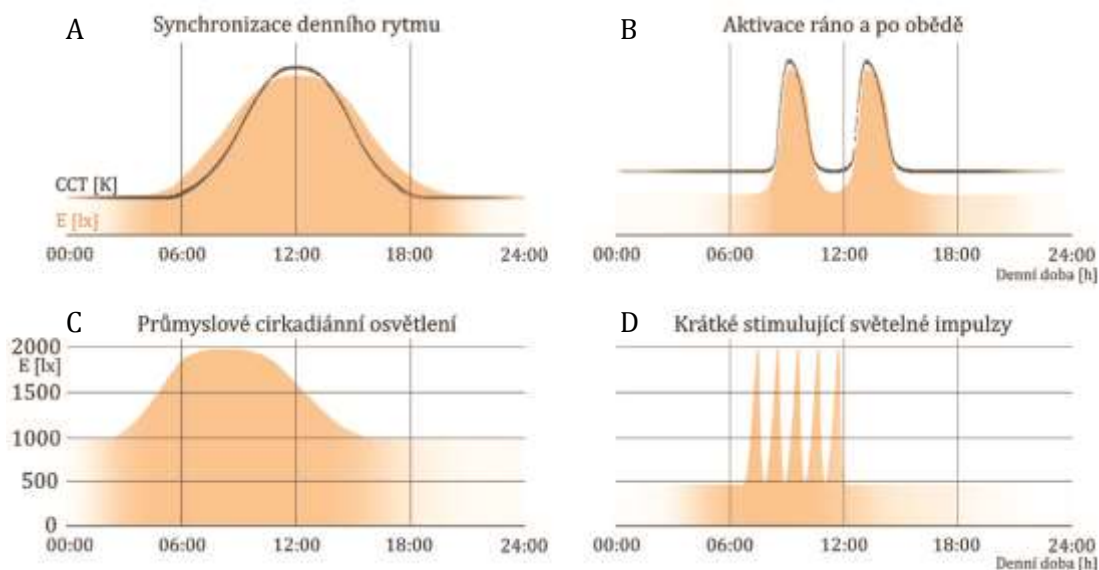
Aby světelná instalace mohla vytvořit biodynamické osvětlení, musí být schopna naprogramování průběhů dynamických změn intenzity osvětlení i teploty chromatičnosti během celého dne. Musí umožnit vyšší osvětlenosti než je běžné

u klasických soustav (často 1000–2000 lx), dovolit plynulou regulaci intenzity osvětlení, teploty chromatičnosti (většinou 2700–6500°K) a případně i změnu směru dopadajícího světla. V ideálním případě pak toto vše optimalizovat dle aktuální kvantity a kvality dostupného denního světla. Při navrhování řídicího algoritmu, tj. při definování konkrétních požadovaných hodnot v daný čas, je třeba také zohlednit spektrální citlivost nevizuálního vnímání světla lidským okem (Obrázek 4.4), závislost odezvy cirkadiánního systému na osvětlenosti (Obrázek 4.10) a jeho odezvu dle fáze vnitřních biologických hodin (Obrázek 4.7).

Současná platná legislativa ani dostupné projekční podklady však nepřináší konkrétní pokyny, jak navrhnout dynamické osvětlení s pozitivními vlivy na cirkadiánní rytmus. Ani vědecká komunita se prozatím neshodla na způsobu, jak vyhodnotit vliv osvětlení na nevizuální vnímání člověka, a při testech v reálných podmínkách nebyl pozitivní vliv dynamického osvětlení na vitalitu a bdělost vždy jednoznačně prokázán [Kort & Smolders 2010]. Dnes je možné do určité míry posoudit účinky jednotlivých parametrů izolovaně, ale celkový, dlouhodobý efekt, tj. důsledky na nepřeborné množství fyziologických i psychologických procesů v těle a souvislosti mezi nimi, prozatím určit neumíme [Lucas, et al. 2014].

5.7.2 Produkty na trhu

Přesto myšlenka dynamického, cirkadiánně korigovaného světelného prostředí zaujala několik velkých výrobců osvětlovacích systémů, kteří aktivně vytvořili vlastní varianty dynamického osvětlení. Pod různými jmény (Human Centric Lighting, Circadian Adaptive Lighting, AML-based lighting systems) jsou podle funkce budovy vyvíjeny časové křivky řídicích algoritmů, které jsou okamžitě využívány jako základ pro řízení osvětlovacích systémů [Burnett 2012, LightingEurope 2013, Žák 2015, Walerczyk 2012]. První aplikace byly realizovány ve zdravotnictví, v lůžkové péči a v centrech pro seniory, kde cirkadiánně korigované dynamické osvětlení (Obrázek 5.9 A) pomáhá synchronizovat vnitřní biologické hodiny a celkově přispívá k časové orientaci. Koncepty cirkadiánního osvětlení vznikají také pro kancelářské prostory a školy. Mimo simulace rytmu denního světla se tyto aplikace snaží využít i jeho krátkodobých povzbuzujících efektů, proto jsou do algoritmu vloženy periody s vyšší osvětleností (E_v) a vyšší teplotou chromatičnosti (CCT) většinou na počátku dne a po polední pauze (Obrázek 5.9 B). Studie [LightingEurope 2013] předpokládá, že dynamické osvětlovací systémy s regulací zohledňující cirkadiánní rytmy budou do roku 2020 osazeny až ve 20 % instalací ve zdravotnictví a až v 16 % prostor pro vzdělávání. Další uplatnění vidí ve výrobních prostorách, administrativě, službách, rekreačních i obytných objektech. Alarmující statistiky odhadují ekonomické ztráty způsobené nespavostí a následnou spánkovou deprivací pracovníků [Kessler, et al. 2011], které prokazatelně souvisí se světelným prostředím. Příslib snížení těchto ztrát činí z konceptu dynamického osvětlení potenciálně úspěšný produkt s uplatněním na globálním trhu.



Obr. 5.9: Příklady světelných konceptů pro různé funkce budov; A/ simulace průběhu denního světla - zdravotnictví; B/ využití povzbuzujících efektů pro aktivaci organismu a vyšší produktivitu práce - světelný impuls ráno a po obědě; C/ průmyslová aplikace - cirkadiánní rytmus je upraven pro ranní směnu; D/ krátké povzbuzující impulzy - srovnatelný povzbuzující účinek při nižší energetické náročnosti. Graficky upraveno na základě www.licht.de, [Lichtwissen Heft 19, nedatováno].

Specifické použití získalo světlo v léčebných aplikacích. Díky jeho vlivu na psychiku člověka a prokázaným antidepresivním účinkům je světelná terapie úspěšně využívána například pro léčbu SAD - sezónní afektivní poruchy [Staedt, et al. 2009]. Vhodně načasovaná světelná expozice má pozitivní vliv na poruchy spánku. Pro použití ve spánkových laboratořích nebo léčbu depresivních poruch byly vyvinuty speciální světelné režimy (např. světelná terapie aplikuje v ranních hodinách několikaminutový impuls intenzivního světla s vysokou CCT). Expozice jasnému světlu ve vhodnou dobu může také předcházet poruchám cirkadiánního rytmu spojeným s prací na směny, cestováním přes více časových pásem (jet lag) i pobytem ve vesmíru [Lucas, et al. 2014].

5.8 Shrnutí páté kapitoly

Izolace od přirozených zeitgeberů během dne a častá expozice umělému osvětlení nebo světlo vyzařující elektronice v nočních hodinách může u některých jedinců ovlivnit schopnost vnitřních biologických hodin synchronizovat se s vnějším prostředím. Rytmus aktivity a odpočinku, který původně stimulovaly přírodní zeitgebry, se díky způsobu života v moderní společnosti stává méně výrazným. Proto je často uměle posilován užíváním stimulantů a sedativ, ať už ve formě kofeinových/alkoholických nápojů nebo jako medikamenty.

"Technologie nás fakticky oddělila od přirozeného 24 hodinového dne, pro který jsou naše těla vyvinuta. Díky jejímu vlivu chodíme spát stále později. Ráno pak používáme kofein, abychom byli schopni vstát stejně brzy, jako jsme vstávali dříve. Náš spánek se dostal do sevření."

Charles A. Czeisler (2013)

Účinnou prevencí proti poruchám cirkadiánního rytmu, které mohou být iniciátorem závažných zdravotních problémů, je dodržování světelné hygieny, tj. respektování rytmu denního světla, pobyt v prostředí s dostatečnou intenzitou světla během dne a omezení rušivého světla v noci. Světelná hygiena je zejména důležitá pro rizikové skupiny osob – extrémní chronotypy, adolescenty a seniory.

Na základě všech těchto zjištění je možná načase zamyslet se, do jaké míry jsou pravdivá ujištění na cedulkách, která byla dle Helen C. Long [Long 1993] umisťována v místnostech při zavádění elektrického osvětlení v době Thomase Edisona.

„The use of electricity for lighting is in no way harmful to health, nor does it affect the soundness of sleep.“¹⁰

Jedním z cílů této kapitoly bylo zjistit, do jaké míry odpovídají současné stavební předpisy potřebám nevizuálního vnímání světla. Podrobný rozbor zjistil, že požadavek zajistit vhodné prostředí i pro nevizuální vnímání světla je sice v současné legislativě zmíněn, není však dále specifikován. Rozbor prokázal, že ani splnění všech hodnot a požadavků platné legislativy nezaručuje, že světelné prostředí v navrhovaném nebo hodnoceném prostoru bude odpovídat fyziologickým potřebám člověka. I mezinárodně uznávané systémy komplexního hodnocení kvality budov zpravidla zjednodušují posouzení vlivu světelného prostředí na nevizuální systém požadavkem na dostupnost denního světla v interiéru. Vliv umělého osvětlení není v rámci komplexních systémů hodnocení kvality budov posuzován vůbec.

Projekční podklady, které by architektům/projektantům umožnily v praxi řídit se při návrhu budov a osvětlení zohlednit potřeby nevizuálního vnímání světla, nejsou prozatím k dispozici. Vytvořením souborů podkladů s informacemi o vlivu světla na fyziologii člověka se v současné době zabývají odborné týmy normalizačních komisí CIE a DIN. Jejich práci komplikuje stále omezený stav vědeckého poznání komplexního systému cirkadiánní regulace v těle člověka a širokého spektra reakcí, které přítomnost/absence světla vyvolává.

Při tvorbě podkladů a doporučení pro navrhování biologicky aktivního osvětlení je nutné také zvážit etické otázky, zejména dopad využívání technologie pro zvýšení produktivity pracovníků. Vhodně použité světlo může být velmi účinný lék pro posílení či obnovení poškozeného zdraví. Avšak obdobně jako většina léků, při nevhodném zacházení lze i světlem zdraví poškodit. Při navrhování osvětlovacích systémů a jejich řídicích algoritmů je třeba zvažovat vliv často protikladných požadavků a volit kompromisy mezi nimi. Zejména u osvětlovacích systémů pro noční provoz a další aplikace využívající krátkodobé povzbuzující efekty jasného světla v době, která není pro člověka zcela přirozená, je třeba posoudit dlouhodobý vliv na cirkadiánní rytmus a celkově na zdraví člověka. Je namístě vzpomenout Hippokratovu přísahu a „*v první řadě neublížovat*“.

¹⁰ „Využití elektřiny pro osvětlení není v žádném případě zdraví škodlivé, ani neovlivňuje hloubku spánku.“

6. Experimentální část – výzkum vlivu světelného prostředí v kanceláři, vliv na extrémní chronotypy

*„Life is a constant struggle between being individual and being a member of the
community”
Sherman Alexie¹¹*

6.1 Motivace

Řada klinických studií prokázala vliv světelného prostředí na tělesné funkce člověka. V publikacích [Lockley 2009, Cajochen, et al. 2007, Vandewalle, et al. 2009, Münch & Kawasaki 2013] je popisován vliv osvětlení na změny v bdělosti, náladě, krátkodobé paměti, na potlačení produkce melatoninu a další. Četné chronobiologické studie dokumentují důležitost načasování řady fyziologických funkcí v rámci 24hodinového dne. Modely a měření zkoumají vliv osvětlení na energetickou spotřebu budov a její souvislosti s kvalitou vnitřního prostředí [Linhart 2009]. Vyvážený přístup je nutný k vytvoření světelného prostředí, které zajistí vysokou kvalitu pro vizuální i nevizuální vnímání světla, a současně bude úsporné z energetického hlediska.

Teoretická část této práce poskytla přehled toho, jak lidské oko vnímá světlo. Soustředila se zejména na nevizuální vnímání světla poskytující našemu tělu informace, které umožňují synchronizovat vnitřní cirkadiánní hodiny s vnějším rytmem střídání

¹¹ *Život je neustálý boj mezi tím, být jednotlivcem a být členem společenství.“
Sherman Alexie, Ellen Forney. In: The Absolutely True Diary of a Part-time Indian, 2007*

dne a noci. Byl také proveden rozbor světelného prostředí v dnešních kancelářských prostorech ve vztahu k nevizuálním potřebám uživatele. Následující kapitola popisuje experimentální výzkum vlivu světelného prostředí v kancelářském prostoru na osoby s extrémním chronotypem.

6.2 Hlavní cíle výzkumu

Sledováním chování a preferencí uživatelů bylo prokázáno, že ve společnosti existují jednotlivci se značně odlišnými požadavky na světelné prostředí. Důvody stojící v pozadí tohoto jevu nejsou stále dostatečně prozkoumány. Pro výzkum prezentovaný v této kapitole jsme využili jedince označované jako „extrémní chronotypy“, tzn. osoby, které díky posunutí fázi svých „vnitřních hodin“ upřednostňují aktivitu buď velmi brzo ráno (časný chronotyp) nebo pozdě večer a v noci (pozdní chronotyp). Tito lidé jsou vystaveni v době své aktivní bdělosti díky velkému podílu nedostupnosti denního světla, a tudíž velmi rozdílným světelným podmínkám. Rozložení světla během jejich subjektivního dne se pro extrémní chronotypy velmi liší. Tato skutečnost nabízí unikátní možnost studovat vlivy světla na hodnocení ospalosti, na produktivitu při různých typech kognitivních činností, popřípadě i na spánkovou regulaci.

Náš výzkum se zabýval osvětlením v kancelářských prostorech, zaměřil se na nevizuální vnímání světla a jeho vliv u extrémních chronotypů. Snahou bylo sledovat dopad tří rozdílných světelných prostředí na subjektivní hodnocení bdělosti/ospalosti, kognitivní výkonnost a biologické markery (produkci melatoninu) v průběhu dne. Zajímalo nás, zda a do jaké míry se subjektivní hodnocení bdělosti/ospalosti jedince shoduje s objektivními výsledky při testování jeho kognitivního výkonu a s naměřenými hodnotami biomarkerů.

Experimentální část výzkumu byla členěna do čtyř témat:

1. Světelné preference osob s extrémním chronotypem
2. Vliv světelného prostředí na biologické funkce člověka
3. Subjektivní hodnocení versus objektivní biologické efekty světla
4. Spotřeba elektrické energie na osvětlení, vliv chronotypu a světelného režimu

Výzkumné otázky, podrobné hypotézy a strategie výzkumu jsou podrobně rozvedeny v části 2.2.

6.3 Návrh výzkumu

Členy výzkumného týmu pod vedením Jean-Louise Scartezziho (stavební fyzika) a Mirjam Münch (chronobiologie) byla Apiparn Borisiut (vizuální komfort) a Lenka Maierová (nevizuální vnímání světla, biologické aspekty).

Výzkum se zabýval osvětlením v kancelářských prostorech, pro tuto práci byla zpracována jeho část zaměřená na nevizuální vnímání světla. Měření vlivu tří rozdílných

režimů světelného prostředí na člověka bylo prováděno vždy po celou aktivní část dne (3x16 hodin).

6.3.1 Charakteristika výzkumné laboratoře, vybavení

Výzkum byl prováděn v experimentální budově Laboratoře solární energie a stavební fyziky Švýcarského federálního technologického institutu v Lausanne (Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment, École polytechnique fédérale de Lausanne - LESO-PB, EPFL).

Výzkumná laboratoř je vybavena dvěma horizontálními pásy oken, horní okno je součástí anidolického fasádního systému [Scartezzini and Courret 2002]. V porovnání se standardním zasklením umožňuje tento systém distribuci denního světla hlouběji do místnosti. Jak již bylo změřeno v rámci předchozích studií v této laboratoři [Linhart 2009], činitel denní osvětlenosti určený na referenční rovině ve středu místnosti, tedy přibližně v prostoru vymezeném pro testovanou osobu, dosahuje hodnoty 5%. Při standardním zasklení dvojsklem dosáhl činitel v referenční místnosti a stejném místě v prostoru pouze 3,5%. Dva pásy oken na fasádě umožňují přivést horními okny do prostoru denní světlo, a současně díky stínění průsvitnými žaluziemi v dolních oknech zabránit přímému výhledu testované osoby do exteriéru (obrázek 6.1).



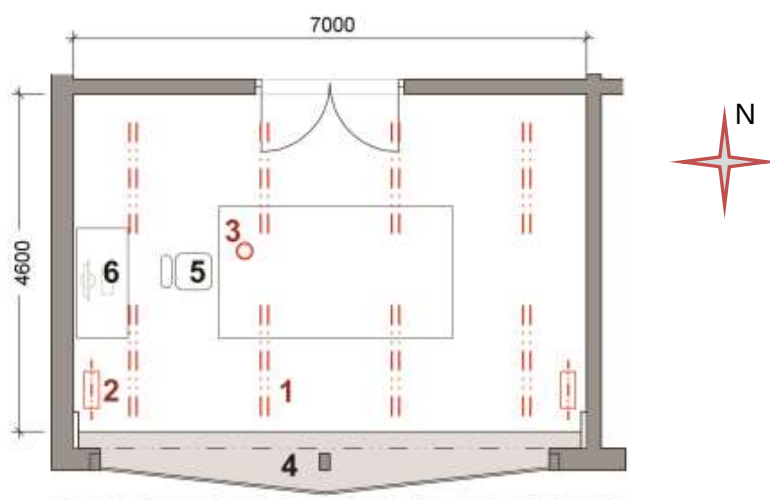
Obr. 6.1: Anidolický systém pro přívod denního světla (ADS). Instalován na fasádě LESO-PB, EPFL v Švýcarsku. Anidolický fasádní systém se dvěma liniemi horizontálních oken – horní okno ADS zajišťuje přístup a zlepšuje distribuci denního světla v interiéru, spodní standardní okno umožňuje optický kontakt s okolím. Každý z pásů oken může být samostatně stíněn semitransparentní roletou (A, B). Světlá výška místnosti je 3m. Vlevo řez fasádou, vpravo fotografie. Šipka označuje pozici výzkumné laboratoře ve třetím nadzemním podlaží (archiv autora).

Přístup denního světla do prostoru

Budova LESO-PB je umístěna v kampusu Švýcarského federálního technologického institutu v Lausanne (zeměpisná šířka N 46,5°). Okna výzkumné laboratoře jsou obrácena k jihu a nejsou stíněna žádnými okolními objekty.

Anidolický fasádní systém nabízí následující možnosti stínění:

- A) Venkovní stínění oken anidolického systému: rolety před pásem anidolických oken byly polohovány dle potřeby k zajištění požadovaných světelných podmínek.
- B) Venkovní stínění spodní řady oken: semitransparentní rolety, po dobu výzkumu byly po celou dobu staženy, aby se zabránilo optickému kontaktu s exteriérem.
- C) Vnitřní kalifornské žaluzie: pohyblivé žaluzie instalované bylo možno použít k řízení toku světla do místnosti, pro kontrolu světelného toku denního světla okny anidolického systému.
- D) Vnitřní těžké závěsy pro úplnou blokaci vnějšího světla.



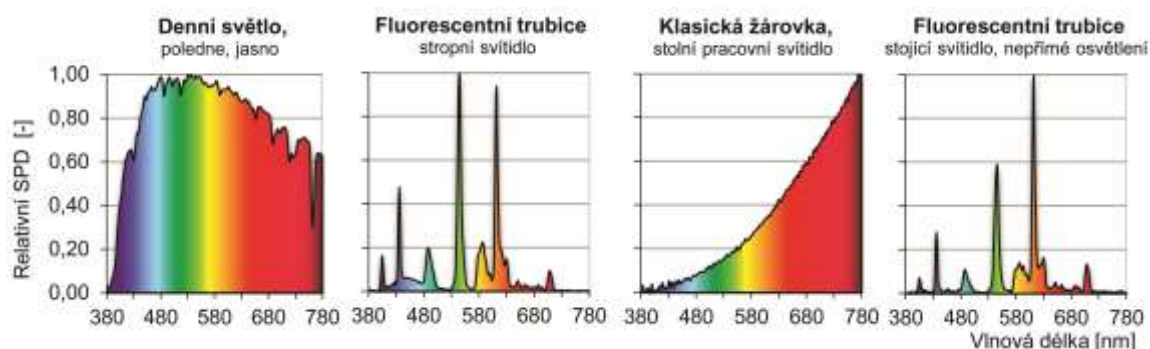
Obr. 6.2: Půdorys výzkumné laboratoře – testovací kancelářský prostor. Legenda: [1] stropní zářivková svítidla, [2] svítidla nepřímého osvětlení, [3] stolní lampa, [4] anidolické okno s možností stínění, [5] pracovní místo testované osoby, [6] místo pro práci na počítači (archiv autora).

Umělé osvětlení

Ve výzkumné laboratoři je k dispozici více alternativ nezávislých osvětlovacích systémů, které lze vzájemně kombinovat (tabulka 6.1). Jejich rozmístění v prostoru viz obrázek 6.2. Spektrální kompozice všech světelných zdrojů jsou zobrazeny na obrázku 6.3.

Svítidlo	Zdroj světla	Počet kusů v prostoru	CCT	CRI	Ev
Stropní	Fluorescentní trubcová zářivka Regent, 80 W (T16)	8 x 2 trubice	4000 K	> 80	16 – 1280 lx
Nepřímé, stojací	Fluorescentní trubcová zářivka	2 x 2 trubice	3000 K	> 80	1,1 – 52,5 lx
Stolní lampa	Klasická žárovka	1	2300 K	> 95	95 – 1425 lx

Tab. 6.1: Umělé osvětlení: CCT – Teplota chromatičnosti, CRI – Index podání barev, E_v – Vertikální osvětlenost v úrovni oka sedícího subjektu.



Obr. 6.3: Relativní spektrum zářivého toku (spectral power distribution, SPD) světelných zdrojů instalovaných ve výzkumné laboratoři. Zleva doprava denní světlo, stropní svítidlo, stolní lampa a stojací lampa. Měřena E_v - osvětlenost svislé referenční roviny v hlavním směru pohledu a úrovni očí sedící osoby (archiv autora).

Vnitřní mikroklima

Prostor je přirozeně větrán okny, vnitřní mikroklima odpovídá požadavkům norem pro kancelářské prostory. V místnosti byla po dobu celého výzkumu udržována konstantní teplota v komfortní zóně, 21 – 24 °C v zimním období a maximálně 26°C v letním období. Nastala jediná výjimka z tepelného komfortu, v průběhu jedné studie během letního odpoledne teplota v místnosti vystoupila na 26,7°C.

6.3.2 Světelné režimy

Všechny testované osoby podstoupily tři různé světelné režimy, každý v trvání 16 hodin, viz tabulka 6.2 a obrázek 6.5. Osvětlenost (E_v) byla měřena na svislé rovině ve výšce oka jedince. Tento způsob měření osvětlenosti byl používán v průběhu celé studie.

	Tlumené osvětlení (DIM)	Jasné osvětlení (BL)	Dle volby uživatele (SSL)
Vertikální osvětlenost	< 5 lx	~ 1000 lx	dle uživatele
Přístup denního světla	ne	ano	možné
Umělé osvětlení	ano	ano	možné

Tab. 6.2: Kritéria pro tři světelné režimy (DIM, BL, SSL). Cílové hodnoty vertikální osvětlenosti (CI) byly měřeny ve výšce oka sedící osoby, ve vodorovném směru.

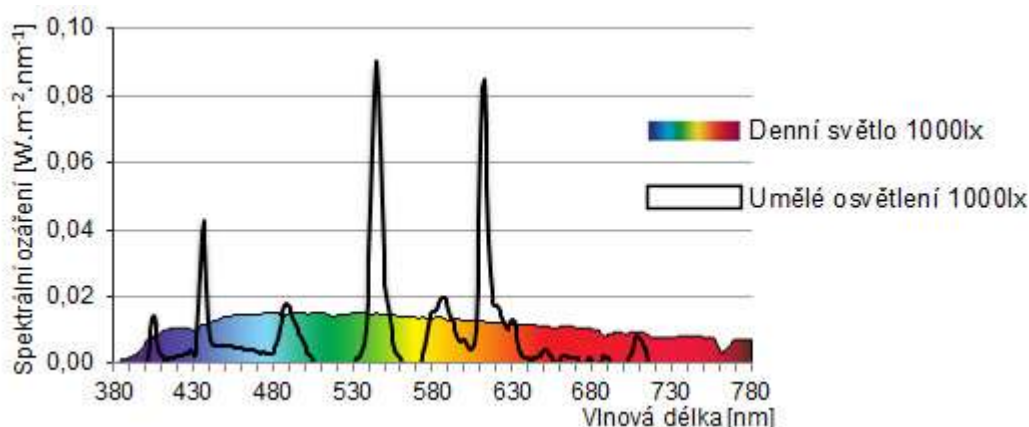
1) Tlumené osvětlení (dim light; DIM). osvětlenost E_v byla udržována nižší než 5 lx. Tento světelný režim byl vždy plánován jako první, byl používán jako kontrolní měření pro sledování fyziologických a kognitivních reakcí bez vlivu světla. Zdrojem světla byla pouze nepřímá svítidla, která zajistila velmi nízké hladiny vertikální osvětlenosti.

K zatemnění místnosti byly použity vnitřní těžké závěsy pro úplnou blokaci vnějšího světla.

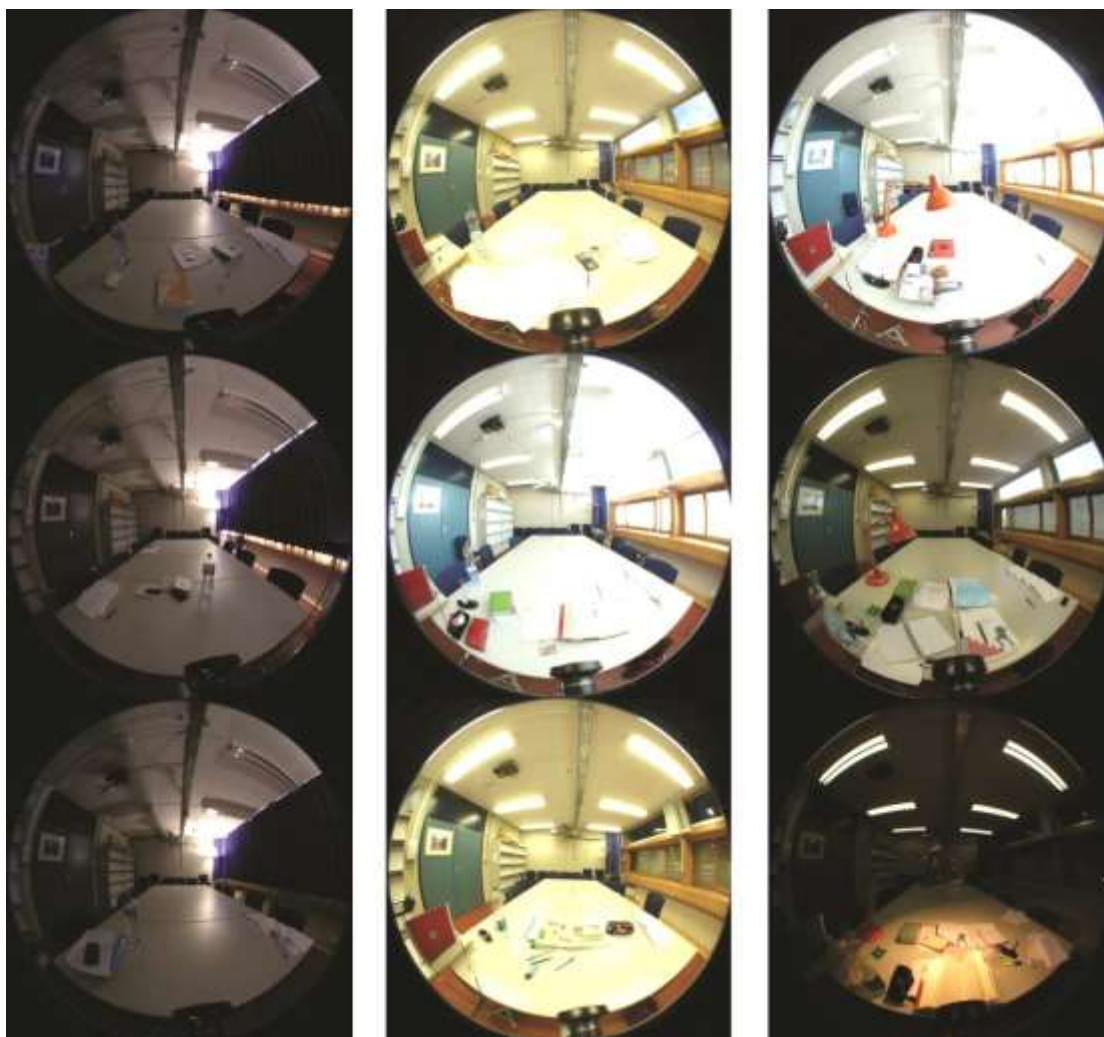
2) Konstantní jasné osvětlení (constant bright light; BL), s osvětleností E_v přibližně 1000 lx. V režimu jasného osvětlení bylo využito denního světla. V případě jeho nedostatečnosti bylo doplněno či zcela nahrazeno umělým osvětlením (stropní polychromatické zdroje bílého světla 4000 K). Cílová osvětlenost E_v 1000 lx má prokazatelně povzbuzující účinky na fyziologii člověka [Zeitzer, et al. 2000] a byla zvolena v souladu s [Phipps-Nelson, et al. 2003, Cajochen, et al. 2005] tak, aby zajistila stimulaci nevizuálního systému vnímání světla.

3) Světelný režim dle volby uživatele (self-selected lighting; SSL): intenzita světla, jeho barevnost a způsob distribuce v prostoru byly závislé na preferencích uživatele. Testovaná osoba mohla volit mezi užitím denního světla, elektrického osvětlení nebo jejich kombinací, využít přímé i nepřímé osvětlení nebo stolní lampu (viz tabulka 6.1). Umělé osvětlení v místnosti umožňuje dosáhnout vertikální osvětlenosti až 1200 lx. Uživatelé byli každou hodinu upozorněni na možnost přizpůsobit světelné prostředí aktuálním potřebám.

V režimech jasného osvětlení (BL) a dle volby uživatele (SSL) osvětlení sestávalo z denního světla (pokud bylo k dispozici) a umělého osvětlení (pokud bylo potřeba). Srovnání spektrálního složení na obrázku 6.4 ilustruje světelné podmínky v prostoru při dvou extrémních případech: užití výhradně denního světla nebo výhradně světla umělého (stropní zářivky).



Obr. 6.4: Příklad spektrální distribuce zářivého toku ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$) v BL. Graf znázorňuje dva případy nastavení: 100% denní světlo (barevné spektrum) a 100% umělé osvětlení (černá linie bez výplně), v obou případech zajišťující osvětlenost E_v 1000 lx (archiv autora).



Obr. 6.5: Ilustrační fotografie pořízené objektivem s rybím okem během tří světelných režimů; vždy ráno (nahore), v poledne (uprostřed) a večer (dole). Vlevo DIM, uprostřed BL, vpravo SSL (archiv autora).

Pro záznam světelného prostředí byl využit spectroradiometr Specbos 1201, JETI, Jena, Německo. Kontrolní měření vertikální a horizontální osvětelnosti bylo prováděno pomocí kalibrovaného luxmetru LMT (Lichtmesstechnik GmbH Berlin, Německo) s rozsahem až 200 000 lx. Rozložení světla v prostoru bylo zaznamenáno pomocí CCD camery (Nikon Coolpix 5400, Tokyo, Japonsko) osazené objektivem FC-E9 (rybí oko, Nikon, Japonsko) a IcyCAM s CSEM (Camera-Like Light Sensor; Neuchâtel, Švýcarsko), viz [Borisuit 2013b]). Vyhodnocení takto zajištěných dat, včetně vizuálního komfortu a analýzy uživatelských preferencí v souvislosti např. s počasím, lze nalézt v [Borisuit 2013b], kapitola 5.2.

6.3.3 Účastníci studie

Pro výzkum rozdílů mezi jedinci v mladé zdravé populaci jsme se rozhodli využít model založený na extrémně časných a extrémně pozdních chronotypech (označování také "skřivani" a "sovy"). Jsou to osoby se známými behaviorálními rozdíly. [Morgain, et al.

2006, Schmidt, et al. 2009] a viz kapitola 3.9. Časové rozložení subjektivního dne se mezi těmito dvěma skupinami výrazně liší, přirozený počátek denní aktivity - čas procitnutí - je u časných chronotypů přibližně o 4 až 5 hodin dříve než u pozdních chronotypů. S tím souvisí i rozdíl v dostupnosti denního světla. Extrémně časná a extrémně pozdní chronotypy jsou vystaveny rozdílným světelným podmínkám. Využití extrémních chronotypů pro výzkum vlivu světelných podmínek umožňuje zobrazit celé spektrum možných reakcí zdravé mladé populace. Abychom zohlednili cirkadiánní fázi vnitřních hodin každého jedince, byla celá studie prováděna v subjektivním čase jednotlivých účastníků.

Výběr účastníků

Nábor účastníků probíhal formou inzerátů umístěných na veřejných místech zejména v prostoru univerzitního kampusu ve švýcarském městě Lausanne. Na oznámení reagovalo více než 1100 lidí, kterým byla jim zaslána podrobnější informace a sada dotazníků. Zpět se vrátilo celkem 521 sad vyplněných dotazníků, na základě kterých jsme si vybrali 40 účastníků na osobní pohovor. 37 osob začalo výzkum a 32 osob dokončilo všechny tři samostatné denní studie. Výzkum včetně všech dokumentů byl veden ve francouzštině. Anglické verze dotazníků lze nalézt v přílohách Q1-Q3.

Posouzení ranní či večerní preference

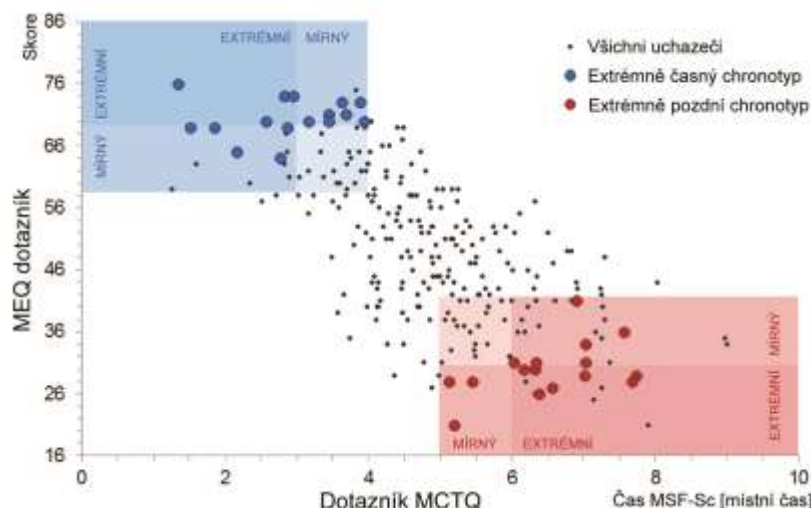
Pomocí dvou validovaných dotazníků jsme na základě subjektivních preferencí v načasování denní aktivity a odpočinku vybrali dvě skupiny extrémních chronotypů: časná chronotypy (Morning Types, MT) a pozdní chronotypy (Evening Types, ET).

Dotazník ranních a večerních typů (Morningness-Eveningness Questionnaire, MEQ; příloha Q1), vyvinuli v roce 1976 Horne a Östberg [Horne Östberg 1976]. Pomocí stanovení subjektivních času vysoké bdělosti a analýzy preferencí rytmu spánku a bdění rozlišuje ranní typy (časná chronotypy; MT) a večerní typy (pozdní chronotypy; ET). Z celkem 19 sebehodnotících otázek s volbou varianty nejvhodnější odpovědi lze získat minimálně 16 a maximálně 86 bodů. Pro náš výzkum byly vhodné jedinci se ziskem více než 70 bodů (extrémně ranní typy) nebo méně než 30 bodů (extrémně večerní typy).

Mnichovský dotazník chronotypů (Munich Chronotype Questionnaire, MCTQ; příloha Q2) byl vyvinut týmem T. Roenneberga [Roenneberg, et al. 2003b]. Jeho on-line verze je k dispozici od roku 2005 [MCTQ 2005]. Dotazník určuje subjektivní čas tzv. „středu spánku“ (mid-sleep), spánkový dluh a fázi vnitřních cirkadiánních hodin na základě výpočtu z času usnutí a probuzení. V porovnání s MEQ bere v úvahu i rozdíl mezi pracovními dny a dny volna. MCTQ tedy zohledňuje některé sociální aspekty cirkadiánní regulace, které považujeme za velmi důležité pro hodnocení chování extrémních chronotypů. Statistické srovnání mezi MEQ a MCTQ [Zavada, et al. 2005] potvrdilo dobrou míru korelace mezi hodnocením MEQ a vypočítaným středem spánku ve volných dnech (korigovaného pro rozdíly mezi volnými a pracovními dny).

V naší studii jsme použili jako referenční hodnotu výpočet "času středu spánku o volných dnech s korigovanou délkou spánku" (time of mid-sleep on free days; sleep duration corrected; MSF-Sc). Hodnoty mezi 4 a 4,99 byly považovány za neutrální chronotypy, nižší hodnoty identifikují časný a vyšší hodnoty pozdní chronotyp. Za

extrémní chronotypy uvažujeme hodnoty méně než 3,0 a 6,0 a více. Pro účast v našem výzkumu jsme zvolili jedince, u kterých bylo vyhodnocení alespoň jednoho z dotazníků jako „extrémní“ chronotyp a druhé minimálně „mírný“ chronotyp, viz Obrázek 6.6.



Obr. 6.6: MEQ skóre všech žadatelů a vybraní účastníci výzkumu. Legenda: MCTQ = Mnichovský dotazník chronotypů, MEQ = Dotazník ranních a večerních typů, MSF-Sc= střed spánku o volných dnech; korigovaná délka spánku (archiv autora).

Do výzkumu jsme přijali pouze zdravé jedince, nekuřáky, bez medikace (s výjimkou perorální antikoncepce). Další kritéria pro vyloučení byly lety přes více časových pásem nebo práce v nočním směnném provozu v posledních třech měsících, nadměrná konzumace alkoholu nebo kofeinu nebo užívání drog. Aby nedocházelo k nežádoucím účinkům spánkové deprivace, kontrolovali jsme kvalitu nočního spánku a úroveň denní ospalosti pomocí následujících dotazníků.

Pittsburská škála kvality spánku (The Pittsburg Sleep Quality Index; PSQI; příloha Q3), je autoevaluační dotazník, který hodnotí kvalitu spánku a poruch za poslední měsíc [Buysse, et al. 1989]. Autoři považují dobrý spánek při zisku maximálně 5 bodů (z 21 možných). U extrémních chronotypů časně nebo pozdní vstávání/uléhání nezřídka vede ke konfliktu s pracovními a společenskými povinnostmi. Proto byla v rámci výzkumu PSQI hranice posunuta na maximum 6 bodů (celkem bylo dosaženo u 4 jedinců, ve všech případech u pozdních chronotypů). Jedinci s PSQI skóre vyšším než 6 nebyli do výzkumu přijati.

Epworthská spánková škála (The Epworth Sleepiness Scale; ESS; příloha Q4) vyjadřuje subjektivní vnímání denní ospalosti. V několika otázkách jsou jedinci žádáni, aby posoudili pravděpodobnost, že by se u nich mohl dostavit mikrosnánek (případně spánek) v různých situacích každodenního života. ESS skóre odlišuje zdravé jedince od pacientů různých diagnostických skupin s vysokým sklonem ke spánku, včetně syndromu obstrukční spánkové apnoe, narkolepsie a idiopatické hypersomnie [Johns

1991]. Skóre zdravého jedince by mělo být maximálně 10 bodů (z 24 možných); pouze jedinci splňující tento požadavek byli zahrnuti do výzkumu.

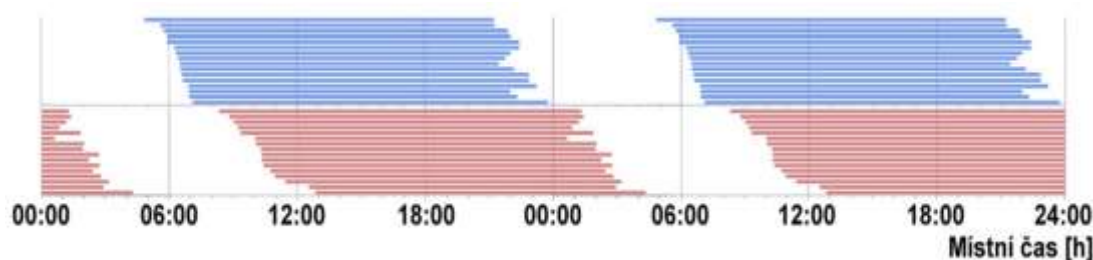
Naším záměrem bylo vytvořit vzorek o velikosti 32 jedinců, 16 časných a 16 pozdních chronotypů. Z celkových 37 zahrnutých do výzkumu museli být tři jedinci během studie vyloučeni, protože nebyli schopni dodržovat časové schéma (protokol) výzkumu a dva jedinci odstoupili z vlastního rozhodnutí. Celkem 32 jedinců výzkum dokončilo (16 extrémně časných a 16 extrémně pozdních chronotypů: 14 mužů a 18 žen), věk $22,7 \pm 3,5$ roku; průměr $\pm$ SD; nejmladší 18 let, nejstarší 31 let; Tabulka 6.3).

	Časné typy (n=16)	Pozdní typy (n=16)
Pohlaví (M/Ž)	7/9	7/9
Věk (průměr $\pm$ SEM)	$22 \pm 0,94$ (SD3,8)	$23,3 \pm 0,78$ (SD 3,1)
Čas probuzení	$06:19 \pm 0:36$	$10:18 \pm 1:14$
Čas usnutí	$22:13 \pm 0:42$	$02:10 \pm 0:57$
Spánkový střed	$2:16 \pm 0:35$	$6,15 \pm 1:02$
Začátek měření	$07:15 \pm 0:34$	$11:14 \pm 1:01$
Konec měření	$23:15 \pm 0:34$	$03:14 \pm 1:01$
MCTQ	$2,88 \pm 0,204$	$6,53 \pm 0,21$
PSQI	$2,94 \pm 0,28$	$3,50 \pm 0,47$
MEQ	$70,5 \pm 0,8$	$30,2 \pm 1,2$
ESS	$5,38 \pm 0,72$	$5,56 \pm 0,53$

Tab. 6.3: Charakteristika denních rytmů spánku/bdění: průměry obvyklého času usínání a vstávání, počátek a konec výzkumného dne (průměr $\pm$ SD) extrémně časných chronotypů (MT; N=16) a extrémně pozdních chronotypů (ET; N=16).

MCTQ= Mnichovský dotazník chronotypů; PSQI = Pittsburská škála kvality spánku; MEQ= Dotazník ranních a večerních typů; ESS= Epworthská spánková škála

Pro kontrolu předběžných výpočtů pomocí dotazníků a pro přesné určení časů probuzení a usínání byli všichni účastníci požádáni, aby po dobu sedmi dnů před a mezi jednotlivými studijními dny nosili aktigrafický monitor (actiwatch) pro záznam denní aktivity (viz Obrázek 6.7). Na základě tohoto měření, a dle kontrolních zápisů ve spánkovém deníku, jsme vypočítali dobu MSF-Sc pro každého účastníka výzkumu.



Obr. 6.7: Obvyklé časy aktivity a odpočinku u extrémních chronotypů, dle měření aktigrafu pro 32 účastníků studie. Každý řádek představuje subjektivní den jedné osoby. Dvojnásobně vyneseno, modrá barva představuje časné chronotypy, červená barva pozdní chronotypy (archiv autora).

Výzkumné postupy byly schváleny místní etickou komisí v Lausanne, Švýcarsko a jsou v souladu s Helsinskou deklarací. Všichni účastníci výzkumu obdrželi podrobné písemné informace o postupech a dali písemný informovaný souhlas před začátkem výzkumu. Po dobu všech tří studijních setkání byl přítomen ve zkušební místnosti vyškolený asistent, který zajišťoval dodržování studijních postupů.

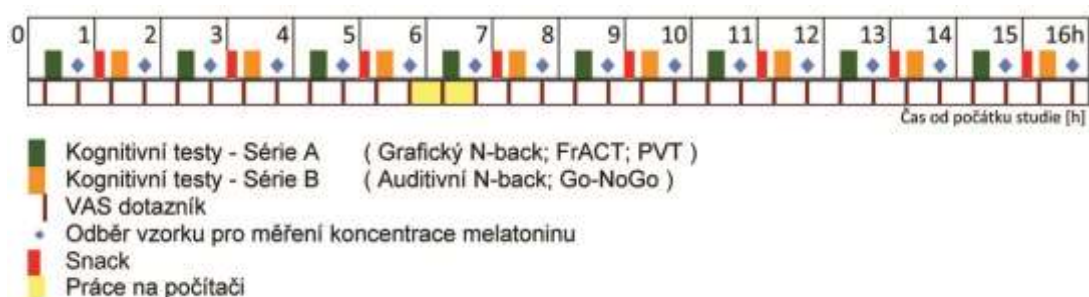
6.3.4 Výzkumná metoda a protokol

Sedm dní před každou ze tří samostatných denních studií byli účastníci výzkumu požádáni o dodržení velmi pravidelného denního rytmu. Spali přibližně 8 hodin denně, vyvarovali se spánku během dne. Vstávali a spát chodili v čase, který si předem dle vlastní preference zvolili, s maximální odchylkou ± 30 minut. Zvolený rytmus vycházel ze screeningových údajů a byl potvrzen validovaným výpočtem dle MCTQ [Roenneberg, et al. 2003b]. Dodržování dohodnutého denního rytmu bylo kontrolováno pomocí záznamníku aktivity na zápěstí nedominantní ruky (Daqtix®, Oetzen-Süttorf, Germany) a vedením spánkového deníku. Pravidelný spánkový rytmus byl prevencí proti nežádoucím vlivům spánkové deprivace a zajistil plnou synchronizaci subjektivní cirkadiánní fáze u testovaných osob. Počátek všech tří samostatných studií byl naplánován maximálně hodinu po probuzení. Každá studie trvala celkem 16 hodin. U časných chronotypů byl počátek v $7:15 \pm 0:33$, u pozdních chronotypů v $11:14 \pm 1:01$ (místní čas, průměr $\pm$ SD). První výzkumný den byl vždy plánován v režimu tlumeného osvětlení (DIM), pořadí režimu jasného osvětlení (BL) a režimu dle volby uživatele (SSL) se pravidelně střídalo druhý a třetí výzkumný den. Výzkum byl vyvážen mezi všechna roční období. Abychom zabránili ovlivnění mezi režimy, byly mezi jednotlivými dny výzkumu vždy vloženy minimálně tři dny volna.

Po dobu výzkumu seděla sledovaná osoba v testovacím kancelářském prostoru. Bylo jí umožněno číst, psát a pracovat s tištěnými dokumenty nebo poslouchat hudbu, přibližně v polovině času mohla po dobu jedné hodiny pracovat na počítači. V místnosti byl k dispozici po celou dobu studie vyškolený asistent.

Protokol výzkumu byl identický pro všechny tři světelné režimy. Každých 30 minut byla testovaná osoba požádána o vyplnění souboru dotazníků, kde pomocí vizuální analogové stupnice hodnotila svůj aktuální stav. Kognitivní testy byly prováděny každou hodinu, střídaly se dva testovací oddíly (Obrázek 6.8). Přibližně 15 minut po

kognitivních testech byl odebrán vzorek slin pro hormonální analýzu. Pravidelně byly podávány nealkoholické nápoje a malé porce jídla (sendviče).



Obr. 6.8: Protokol výzkumu. Legenda zkratk: PVT = Psychomotor Vigilance Test, Fract = Freiburg Visual Acuity Test, VAS = Visual Analogue Scale (archiv autora).

Vertikální osvětlenost (E_v) byla pravidelně (v intervalu 5 minut) zaznamenávána po celou dobu výzkumu pomocí spektorradiometru (Specbos 1201, JETI, Jena, SRN). Spektorradiometr byl umístěn na stativu vedle testované osoby. Spotřeba elektrické energie na osvětlení místnosti byla zaznamenávána vždy před a po skončení výzkumného dne v režimu BL a SSL.

6.3.5 Subjektivní hodnocení bdělosti/ospalosti (dotazníky)

Hladina subjektivní ospalosti je důsledkem spolupůsobení minimálně dvou procesů regulace spánku/bdění v lidském těle [Borbély 1982]. Subjektivní pocit ospalosti postupně narůstá po celou dobu bdělosti díky rostoucímu tlaku spánku a současně kolísá v rytmu cirkadiánních hodin. Ospalost může být vyjádřena nepřímým měřením pomocí elektroencefalogramu, nebo subjektivně hodnocena pomocí dotazníku [Mathis & Hess 2009].

Sledované osoby v našem výzkumu hodnotily svou subjektivní ospalost pravidelně každých 30 minut pomocí dotazníku s vizuální analogovou stupnicí. Jejich úkolem bylo na horizontální úsečce o délce 100 mm mezi dvěma extrémy (0 mm extrémně čilý/čilá, 100 mm extrémně ospalý/ospalá) graficky vyznačit svislou čárkou svůj aktuální stav, viz Obrázek 6.9.



Obr. 6.9: Lineární nečíselná 100 mm bipolární vizuální analogová stupnice (VAS), použitá pro vyhodnocení subjektivní ospalosti.

6.3.6 Kognitivní výkon

Kognitivní výkon se měří pomocí kognitivních testů. Opakováním testů lze posoudit možný vliv světla na změny výkonnosti v průběhu dne. Abychom získali komplexní data,

byly kognitivní schopnosti účastníků výzkumu testovány po celý den pomocí dvou sad počítačových testů střídaných v hodinovém intervalu, tj. stejný typ testu se opakoval pravidelně každé dvě hodiny. Celkem byly obě testovací sady provedeny osmkrát během jednoho výzkumného dne (viz protokol studie na obrázku 6.8).

Použity byly různé typy kognitivních úloh prokazatelně citlivých na spánkovou deprivaci, vliv denní doby a přímé vlivy osvětlení [Jaeggi, et al. 2003, Schmidt, et al. 2009, Dinges & Powell 1985, Cajochen, et al. 2003, Lockley, et al. 2006, Vandewalle, et al. 2006]. Abychom minimalizovali vliv vizuální náročnosti, byly použity auditivní verze testů, s jedinou výjimkou testu FrACT.

Auditivní psychomotorický test bdělosti (Auditory Psychomotor Vigilance Task, PVT)

Původně byl tento test vyvinut pro sledování udržované pozornosti [Dinges & Powell 1985], ale díky velké citlivosti ke změnám v bdělosti se stal jedním z nejčastěji používaných neurobehaviorálních testů při výzkumu spánku a cirkadiánních rytmtů [Schmidt, et al. 2009, Blatter & Cajochen 2007]. V našem výzkumu byla použita desetiminutová verze auditivního PVT, úkolem testované osoby bylo po zaznění tónu co nejrychleji stisknout tlačítko na klávesnici. Zaznamenána byla reakční doba (RT). Pro následnou analýzu byla použita průměrná hodnota 10% nejrychlejších RT, která dle [Drummond 2005] odráží optimální schopnost rychlé reakce. Jakékoliv anticipace odpovědi (RT <100 ms) a dlouhé výpadky (RT > 500 ms), byly odstraněny z dat před počátkem analýzy.

Auditivní N-back test

Test N-back „n kroků zpět“ je běžný a dobře zavedený test výkonnosti. Posuzuje vyšší kognitivní funkce jako například pracovní paměť [Schmidt, et al. 2009, Vandewalle, et al. 2006]. Bylo prokázáno, že je citlivý na vliv světelných podmínek. Během našeho výzkumu byly použity tři úrovně obtížnosti (n-back): 0 kroků, 2 kroky a 3 kroky zpět. Varianta 0 kroků zpět je obdobná měření prosté reakční doby (testovaná osoba má co nejrychleji stisknout "ano", pokud slyší konkrétní hlásku – v našem případě „K“ – v řadě 30 různých pomalu a zřetelně vyslovovaných hlásek. Ve variantách 2 kroky a 3 kroky zpět byla řada 30 hlásek (celkem 9 různých souhlásek) uspořádána v náhodném pořadí. Účastník byl požádán, aby stisknutím příslušného tlačítka na klávesnici stanovil, zda hlásky, kterou právě uslyšel, je či není totožná s hláskou vyslovenou dva (varianta n=2) nebo tři (varianta n=3) kroky zpět. Byla zaznamenávána správná rozhodnutí a doba odezvy. Celkový výsledek byl stanoven jako čas potřebný ke správné odpovědi (Corrected Response Time, CRT) a byl vypočten dle rovnice (1).

$$CRT_{\text{auditivní Nback}} = \frac{\text{reakční čas správných odpovědí}}{\% \text{ všech správných odpovědí}} \quad (1)$$

Před každou řadou hlásek bylo oznámeno, o jakou variantu náročnosti se jedná. Celkem se každý test skládal z pěti řad každé z variant obtížnosti (tj. 15 řad) a byl opakován každé dvě hodiny, celkem 8x během jednoho dne výzkumu. Číselné řady byly unikátní

pro každé opakování a světelný režim. V této práci budou prezentovány výsledky variant $n=2$ a $n=3$.

Freiburský test zrakové ostrosti (Freiburg Visual Acuity Test, FrACT)

Tento test byl použit pro hodnocení zrakové ostrosti a prahu kontrastu ve třech světelných režimech. Během testu byly testované osoby požádány, aby pomocí šipek na klávesnici co nejrychleji a nejpresněji určily orientaci tzv. „Landoltových prstenců“. Proměňovala se buď velikost prstenců, nebo jejich kontrast k pozadí monitoru. FrACT byl vyvinut v laboratoři ve Freibourgu [Bach 1996]. Počítačovou verzi testu lze stáhnout zdarma z webových stránek autora, www.michaelbach.de/fract.

6.3.7 Hormonální analýzy - melatonin

Melatonin je hormon "temna", produkovaný a vylučovaný epifýzou zejména v průběhu noci. 24hodinový rytmus produkce melatoninu bývá využíván jako biologický marker pro sledování fáze a amplitudy vnitřních biologických hodin.

Při běžném rytmickém střídání spánku a bdění je koncentrace melatoninu cirkulujícího v těle nízká v průběhu dne a vysoká v průběhu noci, vykazuje charakteristické zvýšení koncentrace ve večerních hodinách a vrchol koncentrace uprostřed noční doby [Illnerova 2008]. V podmínkách, kdy není cirkadiánní rytmus v organismu ovlivněn vnějšími vlivy (např. v režimu DIM), bývá večerní počátek zvýšené produkce melatoninu označován jako Dim Light Melatonin Onset (DLMO). DLMO je často používán v chronobiologických studiích. Pomocí času DLMO lze porovnat výsledky různých jednotlivců relativně k jejich subjektivnímu času, k fázi vnitřních cirkadiánních hodin. V porovnání s dalšími cirkadiánními markery (například regulace tělesné teploty), zůstává melatonin poměrně stabilní v přítomnosti různých vnějších vlivů. Měření koncentrace lze spolehlivě provádět přímo nebo nepřímo prostřednictvím vzorků moči, krve a slin [Czeisler, et al. 1999]. Pro sledování vlivu světelných podmínek byl stejným postupem zjišťován počátek produkce melatoninu (Melatonin Onset, MO) i ve zbylých dvou světelných režimech (BL, SSL).



Obr. 6.10: Zpracovávání vzorků slin pro zjištění koncentrace melatoninu. Fotografie zpracování surových vzorků slin (vlevo); fotografie zmrazených vzorků, připravených k odeslání do laboratoře pro RIA analýzy (vpravo), foto archiv autora.

Pro zjištění koncentrací melatoninu jsme použili vzorky slin. Testované osoby byly každou hodinu požádány, aby odebraly malé množství slin (5 až 10 ml). Celkem se jedná o 3 x 16 vzorků v průběhu celého výzkumu. Všechny vzorky byly odstředěním v centrifuze vyčištěny od pevných částí (Obrázek 6.10) a ve zmrazeném stavu při teplotě -20°C odeslány do externí laboratoře pro radio-imunologické testy (RIA) melatoninu a kortizolu (Dr. B. Middleton, University of Guildford, Surrey, Velká Británie). Ze vzorků bylo stanoveno DMLO jako čas, kdy koncentrace melatoninu ve vzorku slin překročí 5 pg/ml, posouzeno individuálně pro každého jedince a světelný režim, s využitím lineární interpolace pomocí software Hockey Stick, vytvořeným a validovaným Dr. K. Danilenkem [Danilenko, et al. 2013].

6.3.8 Související spotřeba elektrické energie

Celosvětová snaha o snížení energetické náročnosti budov se odrazila také v diskuzi o požadavcích na osvětlení pracovních míst. Spotřebu energie na osvětlení ovlivňuje nejen geografická poloha a vlastnosti budovy, ale liší se významně i mezi jednotlivci. Je obtížné definovat obecně platný "zlatý standard", a to zejména s ohledem na nové poznatky o vlivu nevizuálního vnímání světla na člověka. Energetických úspor v osvětlení (nejen) pracovních prostor by se nemělo dosahovat na úkor kvality vnitřního prostředí. Je nutné vytvořit odpovídající světelné prostředí pro výkon zrakových činností, zajištění vhodných parametrů pro potřeby biologických nevizuálních funkcí, a současně respektovat specifické potřebám jedince v populaci [Linhart 2009, Borisuit 2013b].

Abychom zobrazili vliv jednotlivých chronotypů, zaznamenávali jsme v průběhu studie spotřebu elektrické energie na osvětlení v místnosti před začátkem a po skončení každého dne v režimech BL a SSL. Pravidelné zaznamenávání spotřeby energie začalo po dokončení testů u prvních čtyř osob, proto jejich data nejsou k dispozici (z toho důvodu $n = 28$). Spotřeba byla měřena samostatným elektroměrem, spotřeba jednotlivých zdrojů světla nebyla oddělena. Získaná data byla statisticky porovnána mezi světelnými režimy a mezi oběma extrémními chronotypy.

6.3.9 Statistika

Pro statistické analýzy byl použit program Statistica V9 (StatSoft, USA).

Všechna měření osvětlení a výsledky subjektivního hodnocení byla uspořádána do hodinových intervalů. Výsledky kognitivních testů byly ponechány ve dvouhodinových intervalech, jak byly pořízeny.

Výsledky byly analyzovány pomocí opakované analýzy rozptylu (rANOVA), využitím obecného lineárního modelu (GLM) s faktory čas 'time' (1-16 h); světelný režim 'condition' (DIM, BL, SSL); pohlaví 'sex' (M, Ž); chronotyp 'chronotype' (MT, ET). Pro doplnění malého množství chybějících dat v dotazníku subjektivního hodnocení byla použita lineární interpolace. Následkem technických problémů se nepodařilo zaznamenat některé výsledky kognitivních testů. Jedná se o méně než 3,5% z auditivních 3-back testů a méně než 1,8% z testů 2-back testů. Abychom dosáhli jednotně vyrovnané velikosti vzorku pro statistickou analýzu, byla chybějící data

nahrazena průměrem skupiny. Pro post-hoc analýzy byla použita Duncanova metoda mnohonásobného porovnávání a jednovýběrový t-test.

Naším zájmem bylo zejména sledování změn v bdělosti/ospalosti jako projevu spánkové regulace v průběhu subjektivního dne. V dalším stupni analýzy jsme proto ve snaze minimalizovat rozdíly přítomné již do počátku měření vyjádřili hodnocení v průběhu dne jako rozdíl vůči hodnocení v první hodině daného dne. Tato normalizace byla provedena samostatně pro každého jednotlivce a pro každý světelný režim před výpočtem průměru skupiny. V případech, kdy byl nalezen statisticky významný vliv denní doby, byl použit jednovýběrový t-test. Výsledné p-hodnoty byly upraveny pro vícenásobné porovnávání pro kontrolu pravděpodobnosti výskytu falešně pozitivního výsledku (false discovery rate, FDR), [Curran-Everett 2000]. Podrobné statistiky (F, p, t-hodnoty) viz tabulka v příloze této práce.

Začátek sekrece melatoninu po setmění (DLMO) byl stanoven pomocí lineární interpolace naměřených hodnot jako čas, kdy koncentrace melatoninu ve slinách dosáhla 5 pg/ml. Výpočet byl proveden samostatně pro každou osobu a světelný režim. V několika případech byla prahová hodnota snížena na 4 pg/ml, a pro jednu osobu zvýšena na 10 pg/ml.

Pro korelační analýzy byla použita neparametrická Spearmanova korelace.

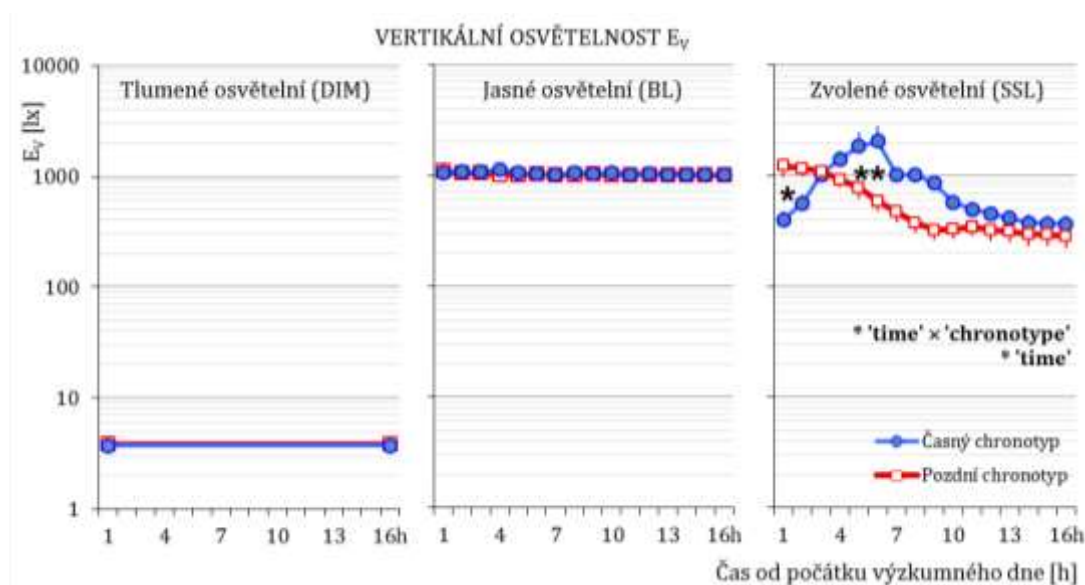
6.4 Výsledky

Všechna zde publikovaná data byla zpracována autorem této práce.

6.4.1 Světelné preference osob s extrémním chronotypem

První otázka se věnovala rozdílům mezi extrémními chronotypy a jejich preferovanému osvětlení v průběhu bdělé periody dne, dlouhé 16 hodin.

Každý z 32 účastníků výzkumu absolvoval celkem tři setkání, každé v délce 16 hodin (tj. jeden bdělý den) v naší kanceláři – výzkumné laboratoři. Jednotlivé dny se vzájemně lišily ve světelných podmínkách (viz oddíl 6.3.2 Světelné podmínky). V režimu tlumeného osvětlení (DIM) byla E_v v průměru $3,07 \pm 0,4$ lx (průměr $\pm$ SEM), v režimu konstantního jasného světlení (BL), dosahovala E_v v průměru 1033 ± 6 lx pro oba chronotypy. V režimu dle vlastního výběru uživatele (SSL) si s ohledem na aktuální subjektivní preference světelné podmínky určovali samotní uživatelé. Mohli využívat všechny možnosti osvětlení v testovací místnosti (Table 5.1) a upravovat je kdykoli během dne. Tato možnost jim byla pravidelně připomínána. V průměru během SSL režimu volili účastníci E_v 699 ± 112 lx, (průměr $\pm$ SEM; medián: 430 lx, chronotypy nejsou odděleny), viz Obrázek 6.11.



Obr. 6.11: E_v během tří světelných režimů. Osvětlenost je zobrazena na ose y v logaritmickém měřítku, měřena pro BL a SSL v intervalu 5 minut a složena do hodinových kroků (průměr $\pm$ SEM). Osa x představuje uplynulý čas od začátku studie (h). Časné chronotypy (MT; $n = 16$) se zobrazují jako vyplněné (modré) kruhy; pozdní chronotypy (ET; $n = 16$) jako otevřené (červená) čtverce.

Podrobnější rozbor byl proveden pro režim SSL. Významná interakce byla zjištěna u faktorů 'chronotyp' a 'čas'. Časový průběh E_v zvoleného osvětlení se mezi chronotypy lišil. Osvětlenost byla významně nižší pro MT během první hodiny studie, a významně vyšší pro MT během 5 až 6 hodiny od počátku studie, ve srovnání s ET (2-way rANOVA; interakce 'condition' $\times$ 'time'; Duncan's multiple rank test; $p < 0,05$; Obrázek 6.11, vpravo). Žádný významný rozdíl ve zvolené osvětlenosti nebyl nalezen mezi muži a ženami. Podrobnější statistiky viz tabulka X1 v příloze této práce.

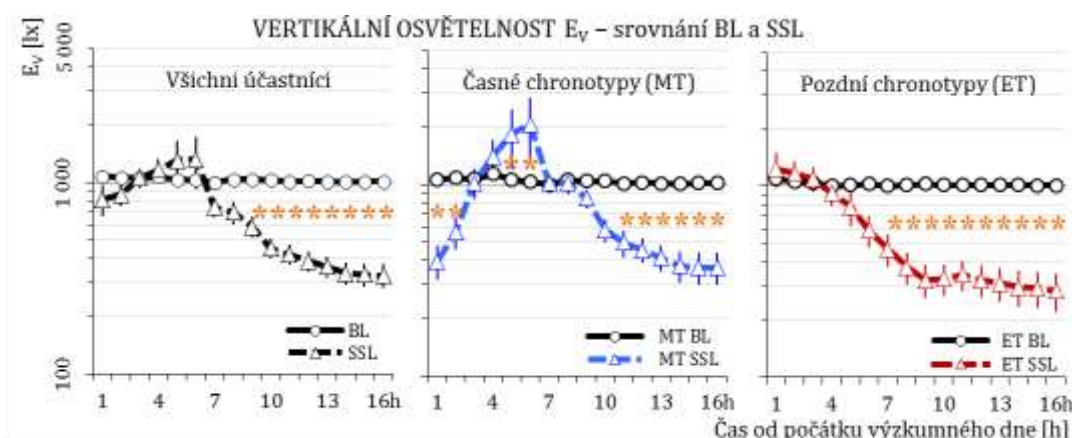
Zvolená E_v (SSL, E_v)	Časné chronotypy (MT) Průměr $\pm$ SEM, [lx]; Čas výskytu [studijní hodina]	Pozdní chronotypy (ET) Průměr $\pm$ SEM, [lx]; Čas výskytu [studijní hodina]
Celkový průměr	828 $\pm$ 74	571 $\pm$ 36
Hodinové maximum	2066 $\pm$ 768 (hodina 6)	1232 $\pm$ 255 (hodina 1)
Hodinové minimum	369 $\pm$ 70 (hodina 16)	284 $\pm$ 54 (hodina 16)

Tab. 6.4: Průměrná, maximální a minimální E_v ($\pm$ SEM) a časy jejich výskytu, v rámci SSL pro jednotlivé chronotypy.

V průměru si v režimu SSL po dobu 16 hodin MT zvolili E_v 828 $\pm$ 74 lx ve srovnání s ET, kteří zvolili E_v pouze 571 $\pm$ 36 lx ($p = 0,17$). Ale ET zvolili výrazně vyšší intenzitu osvětlení na samém začátku dne, ve srovnání s MT, kteří se rozhodli nejvyšší osvětlení

mezi 4. a 6. hodinou od počátku studie. Časy, minimum, maximum a průměry E_v zvoleného osvětlení u obou skupin jsou uvedeny v tabulce 6.4.

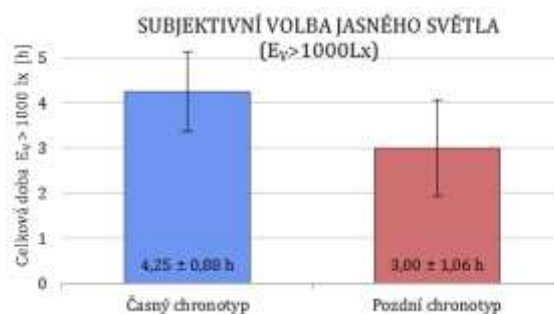
V dalším kroku byl posuzován rozdíl mezi režimy SSL a BL. Celkově byla významně nižší E_v v režimu SSL než režimu BL (3-way rANOVA, hlavní efekt 'condition'; $p < 0,0001$). Dále byla osvětlenosti jinak časově rozložena (interakce 'condition' $\times$ 'time'; $p < 0,0001$). V druhé polovině dne, v průběhu studijních hodin 8 - 16, byla signifikantně vyšší osvětlenost v režimu BL (Duncan's multiple rank-test; Obrázek 6.12, vlevo).



Obr. 6.12: E_v v režimech BL a SSL; pro všechny testované osoby (vlevo, $n = 32$), časné chronotypy a pozdní chronotypy (uprostřed a vpravo). Osvětlenost (lx), zobrazená na ose y v logaritmickém měřítku, byla zprůměrována do hodinových kroků (průměr $\pm$ SEM). Osa x představuje čas uplynulý od počátku výzkumného dne (hodiny). Hvězdičky označují časy signifikantního rozdílu mezi BL a SSL režimem ($p < 0,05$).

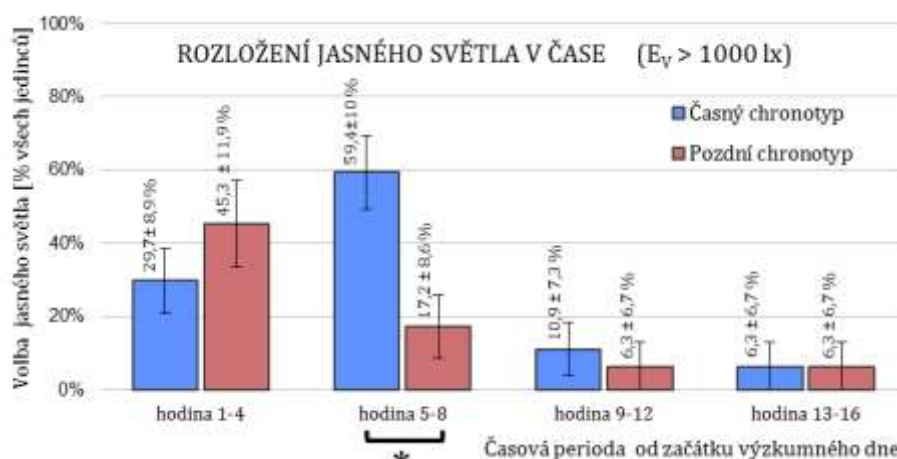
Byly také zjištěny významné rozdíly mezi preferencemi obou chronotypů v rámci SSL. Ve srovnání s režimem BL, MT volili v režimu SSL vyšší osvětlenost v páté a šesté hodině od počátku studie, a výrazně nižší osvětlenost v průběhu prvních dvou hodin a po desáté hodině od počátku (interakce 'condition' $\times$ 'chronotype' $\times$ 'time', $p < 0,0001$; Obrázek 6.12, uprostřed a vpravo). ET volili v režimu SSL oproti režimu BL výrazně nižší intenzitu osvětlení od sedmé hodiny až do konce studie. Statistika viz příloha, tabulka X1.

Světelné prostředí v režimu jasného světla (BL, $E_v \approx 1000$ lx) má prokazatelně povzbuzující účinky na fyziologii člověka [Zeitzer, et al. 2000, Phipps-Nelson, et al. 2003, Cajochen, et al. 2000]. Pro další analýzu rozdílů mezi chronotypy byla prahová hodnota $E_v \approx 1000$ lx využita také pro posouzení záznamu ze subjektivně zvolené E_v během režimu SSL. Záznam E_v zvolené během SSL režimu byl rozdělen do dvou částí: čas, kdy byla E_v vyšší než 1000 lx, tedy „jasné světlo“ s prokazatelně povzbuzujícími účinky, a čas s nižší intenzitou osvětlení (tj. omezené povzbuzující účinky na nevizuální vnímání světla). MT volili v průměru 4,25 hodiny v prostředí s jasným světlem, zatímco ET v tomto prostředí volili průměrně pouze 3 hodiny. Rozdíl mezi oběma chronotypy byl statisticky nesignifikantní ($p = 0,394$), viz Obrázek 6.13.



Obr. 6.13: Průměrný čas strávený v prostředí s $E_v > 1000 \text{ lx}$ (jasné světlo) pro extrémně časně (MT, modrá barva) a extrémně pozdní (ET, červená barva) chronotypy; (průměr, SEM).

V dalším kroku bylo procento jedinců, kteří se rozhodli pro jasné světlo s E_v vyšší než 1000 lx , sledováno v průběhu dne a jejich volba byla rozdělena do čtyř stejně dlouhých časových úseků (Obrázek 6.14). Byl zjištěn významný rozdíl ve druhé čtvrtině dne (tj. ve studijních hodinách 5 až 8), kde téměř 60 % MT zvolilo jasné světlo, což bylo 3,5krát častěji než ET ve stejném časovém období. Rozdíl v první čtvrtině dne není statisticky významný, v druhé polovině subjektivního dne se volba mezi chronotypy téměř neliší.



Obr. 6.14: Časové rozložení subjektivně vybrané $E_v > 1000 \text{ lx}$ během dne. Vyjádřeno jako procento všech jedinců, rozděleno dle chronotypu ($n_{MT}=16$, $n_{ET}=16$). Hvězdičky označují významné rozdíly mezi oběma chronotypy ($p < 0,05$).

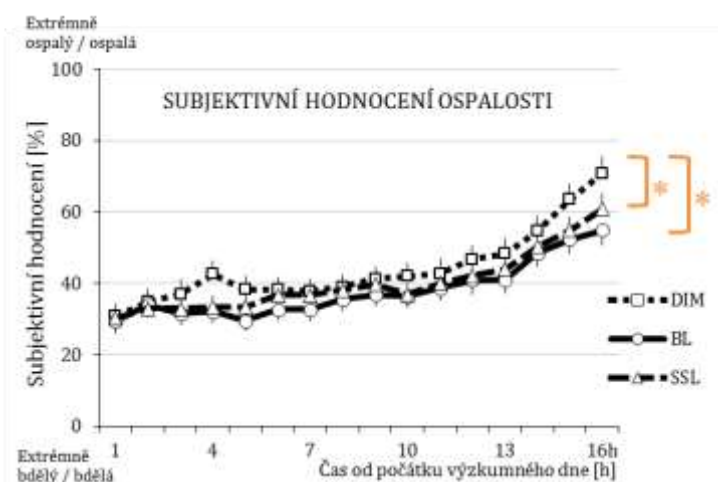
6.4.2 Vliv světelného prostředí na biologické funkce člověka

Aby bylo možné hodnotit vliv různých světelných podmínek na biologické funkce člověka, sledovali jsme subjektivní hodnocení ospalosti, měřili jsme kognitivní výkonnost a zrakovou ostrost v testech na počítači a sledovali jsme koncentraci melatoninu ve slinách.

6.4.2.1 Subjektivní ospalost

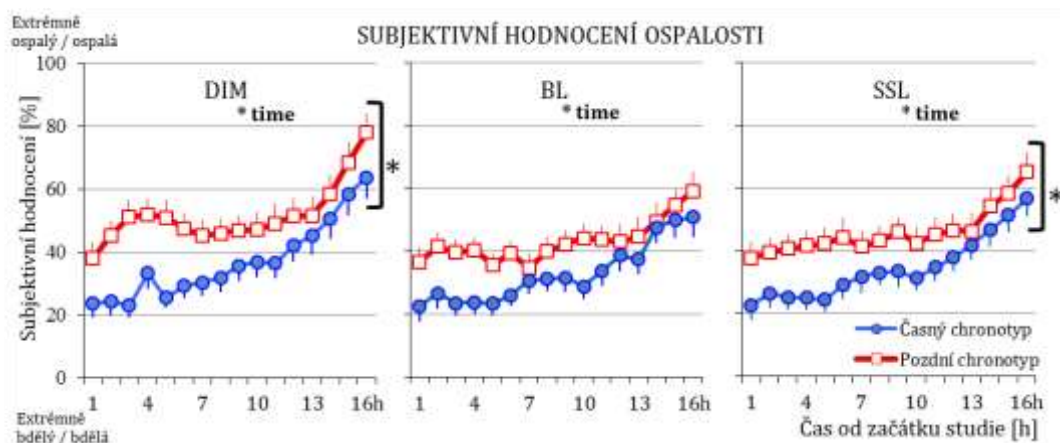
V hodnocení subjektivní ospalosti jsme zjistili významné interakce mezi faktory 'condition', 'time', 'sex' (3-way ANOVA; Tabulka X2). U všech jedinců byla zaznamenána vyšší subjektivní ospalost v režimu DIM v porovnání s BL i SSL (2-way mANOVA, hlavní

efekt 'chronotype'; $p < 0,01$). Nebyl zjištěn žádný významný rozdíl mezi BL a SSL. Subjektivní ospalost se v průběhu dne zvyšovala ve všech světelných režimech (hlavní efekt 'time'; $p < 0,0001$), viz Obrázek 6.15. Byl zjištěn významný rozdíl mezi chronotypy, pozdní chronotypy (ET) se cítily celkově ospalejší než časné chronotypy (MT) za všech světelných režimů (3-way rANOVA; hlavním efekt 'chronotype'; $p < 0,05$), viz Obrázek 6.16.



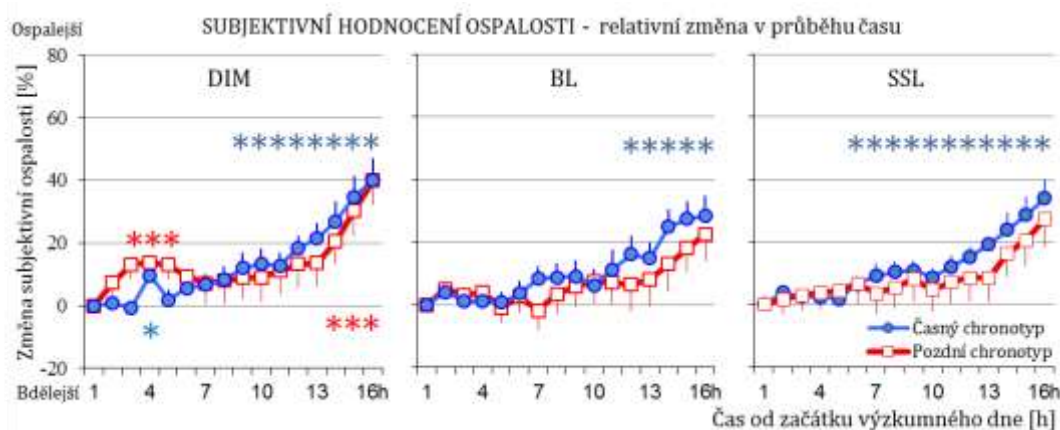
Obr. 6.15: Hodnocení subjektivní ospalosti ve všech třech světelných režimech (průměr $\pm$ SEM, $n = 32$, absolutní data). Čtverce = DIM; kruhy = BL; trojúhelníky = SSL. Hvězdy ukazují významné rozdíly mezi DIM a dalšími světelnými režimy (hlavní efekt 'condition', $p < 0,05$). Osa x představuje čas uplynulý od počátku studie (hodiny), osa y představuje subjektivní hodnocení (0% extrémně bdělý, 100% extrémně ospalý).

V dalším kroku jsme analyzovali rozdíly mezi oběma chronotypy podrobněji, samostatně pro každý světelný režim. Pro DIM a SSL pozdní chronotypy byly ospalejší než časné chronotypy, ale rozdíl mezi těmito skupinami nebyl zjištěn v BL (2-way mANOVA; hlavním efekt 'chronotype'; $p < 0,05$ v DIM a SSL), (Obrázek 6.16). Podrobnější statistiky viz příloha, tabulka X2).



Obr. 6.16: Subjektivní ospalost u časných chronotypů (MT; $n = 16$, modrá plná kolečka) a pozdních chronotypů (ET; $n = 16$; červené otevřené čtverce), v absolutních hodnotách. Osa x představuje čas uplynulý od počátku studie (hodiny), osa y představuje subjektivní hodnocení (0% extrémně bdělý, 100% extrémně ospalý). Hvězdičky označují významné rozdíly mezi oběma chronotypy ($p < 0,05$).

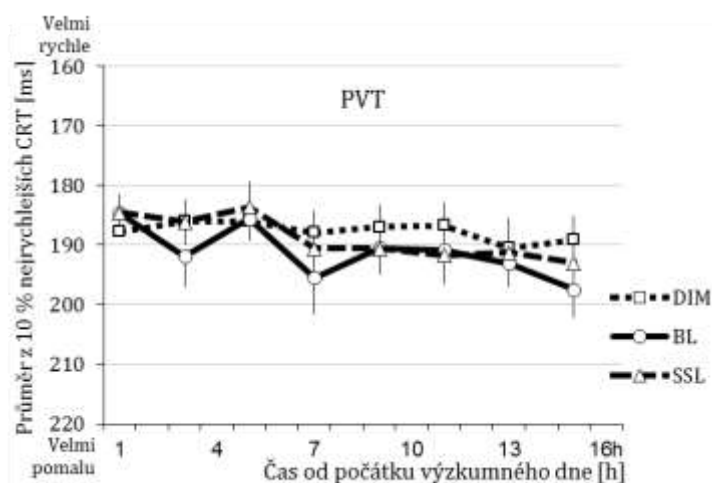
V posledním kroku jsme analyzovali dynamiku subjektivní ospalosti samostatně pro jednotlivé chronotypy a pro jednotlivé světelné režimy. Změna v hodnocení subjektivní ospalosti byla vyjádřena relativně vzhledem k hodnocení v první hodině studie. Zjistili jsme, že subjektivní ospalost začala růst výrazně dříve u MT než u ET, a to ve všech světelných režimech. V režimu BL byl zaznamenán významný nárůst subjektivní ospalosti u MT po 11 hodinách (což odpovídá 12 hodinám od probuzení), ve srovnání s ET, které nevykazovaly významný nárůst subjektivní ospalosti během celé doby záznamu v BL (tedy ani 17 hodin od probuzení). V SSL režimu se staly MT významně ospalejší po 6 hodinách od počátku studie, zatímco u ET opět nedošlo k významnému zvýšení subjektivní ospalosti (t-test, $p < 0,05$; Obrázek 6.17). Podrobné statistiky viz příloha, tabulka X2.



Obr. 6.17: Časový průběh změn v hodnocení subjektivní ospalosti, relativně k hodnocení na počátku studie. Samostatně určeno pro všechny tři světelné režimy; t-test byl proveden odděleně pro oba chronotypy (průměr $\pm$ SEM). MT = plná kolečka a ET = prázdné čtverce (obě skupiny $n = 16$). Významné změny od počátku studie jsou označeny modrými hvězdičkami pro MT a červenými hvězdičkami pro ET ($p < 0,05$). Výsledné p-hodnoty byly upraveny pro vícenásobné porovnávání pro kontrolu pravděpodobnosti výskytu FDR.

6.4.2.2 Kognitivní výkonnost – psychomotorický test bdělosti (PVT)

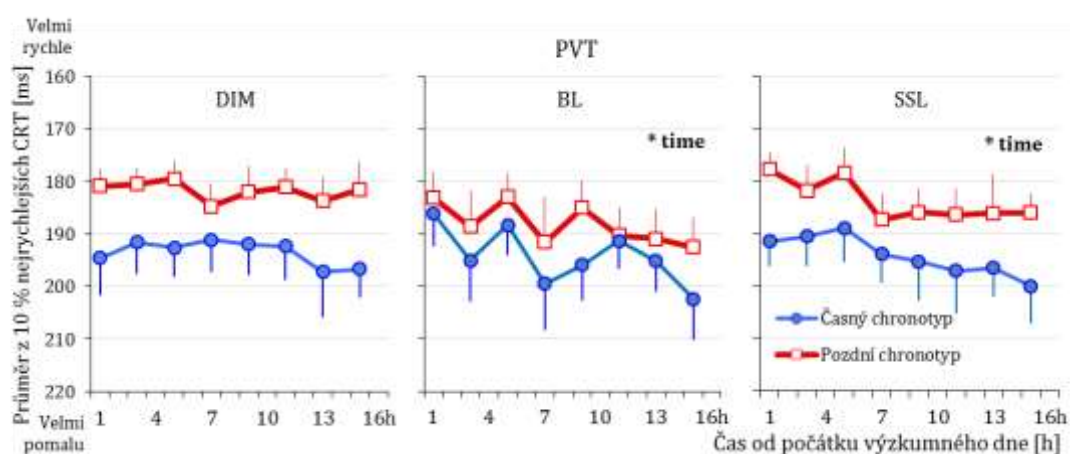
Analýza nejrychlejších 10 % korigovaných reakčních časů v auditivním testu PVT ($CRT_{TOP10\%}$), odhalila významnou interakci mezi faktory 'time', 'chronotype' a 'sex' (3-way rANOVA). $CRT_{TOP10\%}$ poklesl v průběhu dne ve všech světelných režimech (hlavní efekt 'time'; $p < 0,0001$). Výsledky všech účastníků neprokázaly žádný významný rozdíl mezi světelnými režimy ($p > 0,1$). (Obrázek 6.18).



Obr. 6.18: CRT_{TOP10%} - 10% z nejrychlejších reakčních časů v PVT, očištěných od výpadků a anticipace (CRT; průměr ± SEM, n = 32), absolutní data.

Nebyl zjištěn žádný významný efekt 'chronotype'. Když jsme analyzovali výsledky ze tří světelných režimů samostatně pro každý chronotyp, zjistili jsme významné interakce v režimech DIM a SSL pro faktory 'sex' a 'chronotype'. Dle výsledků byly MT ženy pomalejší než MT muži a také než ET ženy. (CRT_{TOP10%}: $F_{MT} > M_{MT}$ a $F_{MT} > F_{ET}$, data nejsou uvedena. Rozdíly mezi pohlavími nejsou předmětem této práce. Statistiky jsou uvedeny v příloze, tabulka X3).

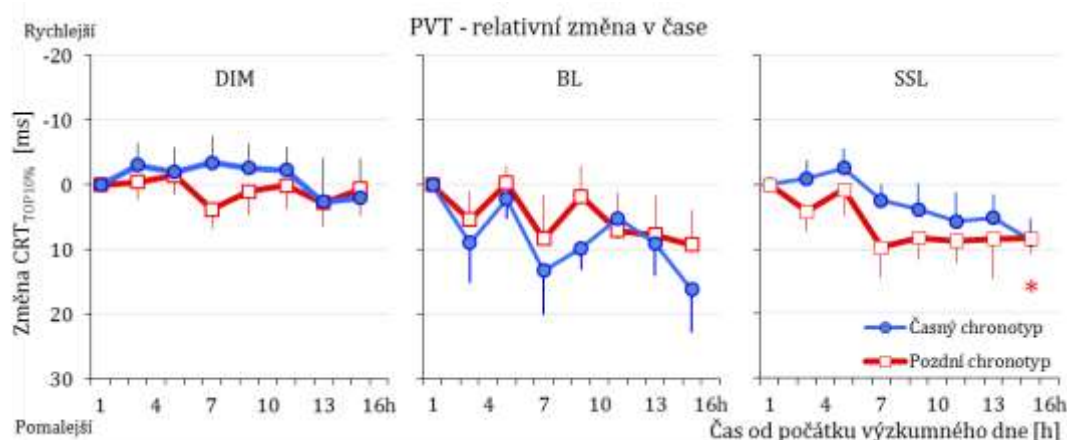
V BL a SSL režimech se reakce obou chronotypů zpomalovaly v průběhu dne (2-way rANOVA; hlavní efekt 'time'; $p < 0,001$, Obrázek 6.19).



Obr. 6.19: CRT_{TOP10%} - odděleně časné chronotypy (MT; n = 16; plná kolečka) a pozdní chronotypy (ET; n = 16; prázdné čtverečky), v absolutních hodnotách. Osa X představuje čas uplynulý od počátku studie (hodiny).

V posledním kroku jsme analyzovali dynamiku změn v průběhu dne, samostatně pro každý chronotyp. K významnému zpomalení CRT_{TOP10%}, vyjádřeno relativně k prvnímu

testu na počátku dne, došlo pouze v ET během poslední hodiny SSL (t-testy, $p < 0,05$, Obrázek 6.20, pro detailní statistiky viz příloha, tabulka X3).

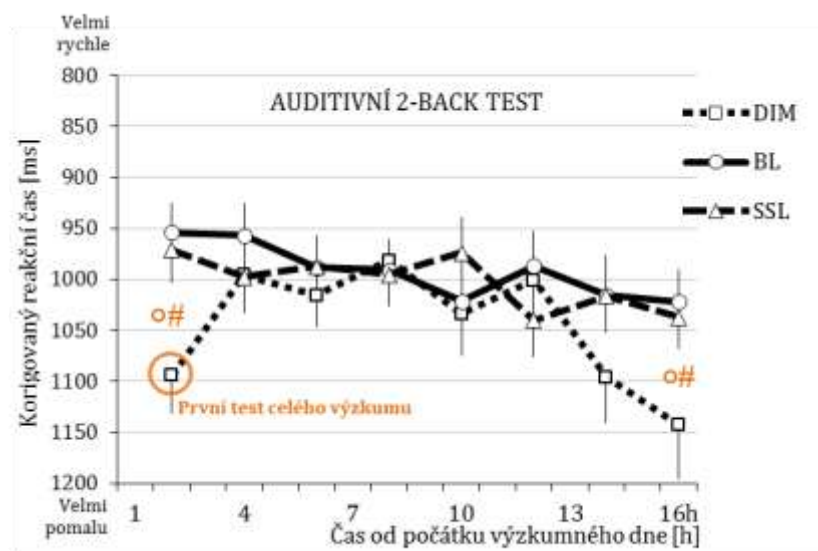


Obr. 6.20: Relativní změna v průběhu času v $CRT_{TOP10\%}$, pro všechny tři světelné režimy; t-testy byly provedeny samostatně pro oba chronotypy (průměr $\pm$ SEM). MT = plná kolečka a ET = prázdné čtverce (obě skupiny $n = 16$). Doba významné změny je označena modrými hvězdičkami pro MT a červenými hvězdičkami pro ET ($p < 0,05$). Výsledné p-hodnoty byly upraveny pro vícenásobné porovnávání pro kontrolu pravděpodobnosti výskytu (FDR).

6.4.2.3 Kognitivní výkonnost – auditivní n-back test

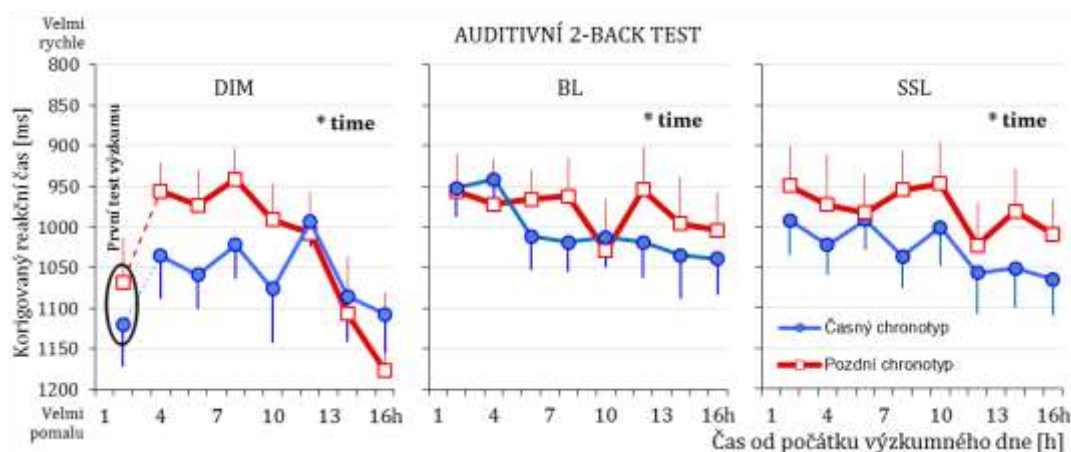
V auditivním n-back testu byly zaznamenávány všechny správné odpovědi včetně reakčního času. Celkový výkon byl stanoven jako Korigovaný reakční čas (Corrected Response Time, CRT) a vypočten podle rovnice (1). V této práci jsou publikovány výsledky 2-back a 3-back verze testu. První test v režimu DIM (tj. zcela první auditivní n-back test, který jedinci vykonávali) vykazoval v obou verzích velmi pomalé CRT, což svědčí o vlivu učení se novému úkolu. Proto byly výsledky tohoto prvního testu z další analýzy vyloučeny.

Ve verzi 2-back auditivního testu byla nalezena významná interakce pro faktory 'condition' a 'time' (3-way rANOVA). V režimu DIM byl CRT významně delší (tj. horší výsledek) v prvním a posledním testu ve srovnání s režimy BL a SSL. Celkově byl CRT v DIM také výrazně delší ve srovnání s ostatními světelnými režimy (hlavní efekt 'condition', $p > 0,01$) a docházelo k celkovému prodloužení CRT v průběhu dne ve všech světelných režimech (hlavní efekt 'time'; $p < 0,001$, Obrázek 6.21).



Obr. 6.21: Korigovaný reakční čas (CRT) pro auditivní 2-back test. (průměr $\pm$ SEM, $n = 32$). Významné rozdíly ($p < 0,05$) mezi světelnými režimy jsou označeny jako "#" pro DIM x BL a jako "o" pro DIM x SSL. První test 2-back v DIM (zakroužkován) byl ovlivněn učením se nové úloze.

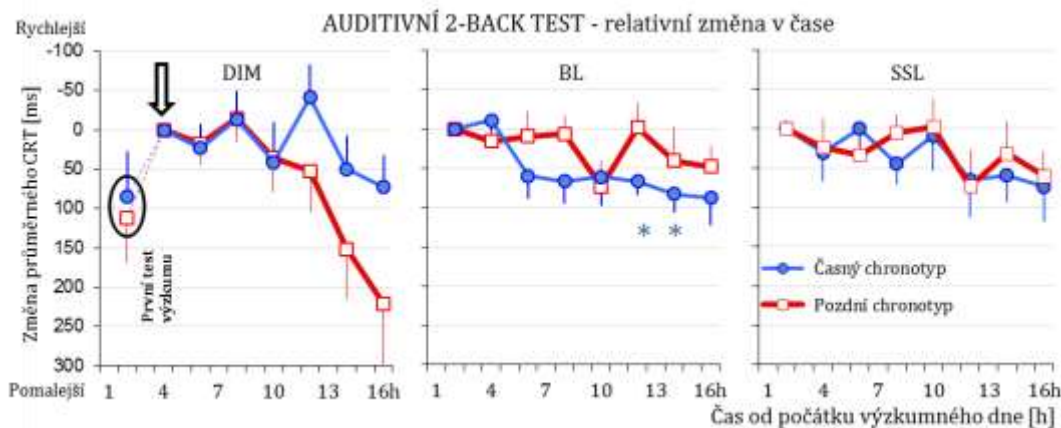
Celkově nebyl nalezen žádný významný vliv chronotypu. V rámci posuzování dat odděleně pro jednotlivé chronotypy a světelné režimy bylo zjištěno významné zpomalení CRT v průběhu dne a to ve všech světelných režimech (Obrázek 6.22; 2-way rANOVA, hlavní efekt 'time' pro všechny světelné režimy, další statistiky viz příloha, tabulka X4).



Obr. 6.22: Korigovaný reakční čas (CRT) pro auditivní 2-back test, posuzováno odděleně pro jednotlivé chronotypy (průměr $\pm$ SEM, $n = 32$). První testy 2-back v DIM (zakroužkováno) byly ovlivněny učením se nové úloze a byly vyňaty ze statistických výpočtů.

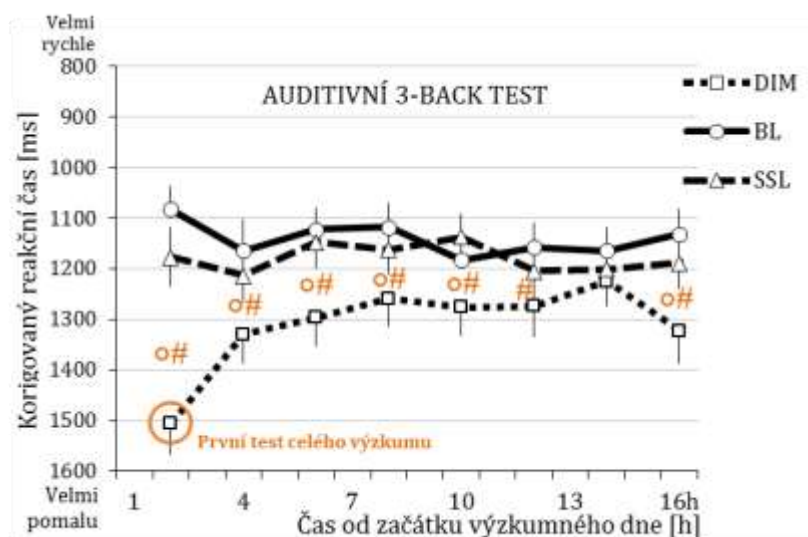
V posledním kroku jsme analyzovali dynamiku odděleně pro každou skupinu extrémních chronotypů. Vyjádřili jsme změnu v čase jako rozdíl vůči výsledku prvního (v režimu DIM druhého) testu. K signifikantní změně došlo pouze u časných chronotypů

v režimu BL, kde bylo ve 13. až 15. hodině po probuzení zaznamenáno významné zpomalení CRT, což odpovídá zhoršení výkonu (t-test; $p < 0,05$) Viz Obrázek 6.23, pro detailní statistiky příloha, tabulka X4).



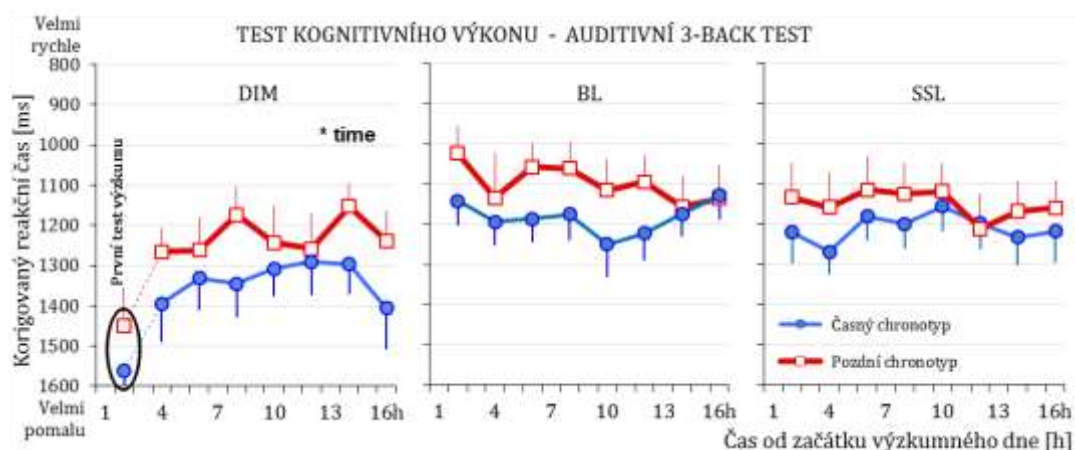
Obr. 6.23: Časový průběh relativní změny CRT v auditivním 2-back testu, vyjádřeno relativně rozdílem vůči prvnímu (v DIM druhému) testu; t-test proveden odděleně pro všechny tři režimy a oba chronotypy (průměr $\pm$ SEM). MT = plná kolečka, ET = prázdné čtverce (obě skupiny $n = 16$). První testy 2-back v DIM (zakroužkováno) byly ovlivněny učení se nové úloze a byly vyňaty ze statistických výpočtů. Šipka ukazuje čas na počátek výpočtu v DIM. Významné změny od počátku studie jsou označeny modrými hvězdičkami pro MT a červenými hvězdičkami pro ET ($p < 0,05$). Všechny p-hodnoty byly upraveny pro vícenásobné porovnávání pro kontrolu pravděpodobnosti výskytu FDR.

Výsledky nejnáročnějšího kognitivního testu – auditivního 3-back testu - prokázaly významné interakce mezi faktory 'condition' a 'time' (2-way rANOVA; $p < 0,001$). Po většinu dne byl CRT významně pomalejší v režimu DIM v porovnání s režimem BL v 1. až 6. a poslední sérii testu, a také v porovnání se SSL v 1. až 5. a v poslední sérii testu ($p < 0,001$). Současně byly zjištěny významné rozdíly mezi výsledky jednotlivých světelných režimů (DIM > SSL > BL; hlavní efekt 'condition', $p < 0,001$; Obrázek 6.24).



Obr. 6.24: CRT v nejtěžší verzi testů kognitivního výkonu: auditivního 3-back testu (průměr $\pm$ SEM, $n = 32$). Časy významného rozdílu mezi světelnými režimy jsou označeny jako "#" pro DIM x BL a jako "o" pro DIM x SSL ($p < 0,05$).

V auditivním 3-back testu nebyl pozorován žádný vliv denní doby ani chronotypu na výkonnost v žádném ze světelných režimů (Obrázek 6.25; pro detailní statistiky viz příloha, tabulka X5). Vzhledem k tomu, že nebyl nalezen ani vliv denní doby, byly u této verze testu vynechány další analýzy dat, jako je posuzování změny výkonnosti během dne relativně vůči počátku výzkumného dne.



Obr. 6.25: CRT ve verzi 3-back auditivního testu (průměr $\pm$ SEM, $n = 32$), vyjádřeno samostatně pro jednotlivé chronotypy a světelné režimy.

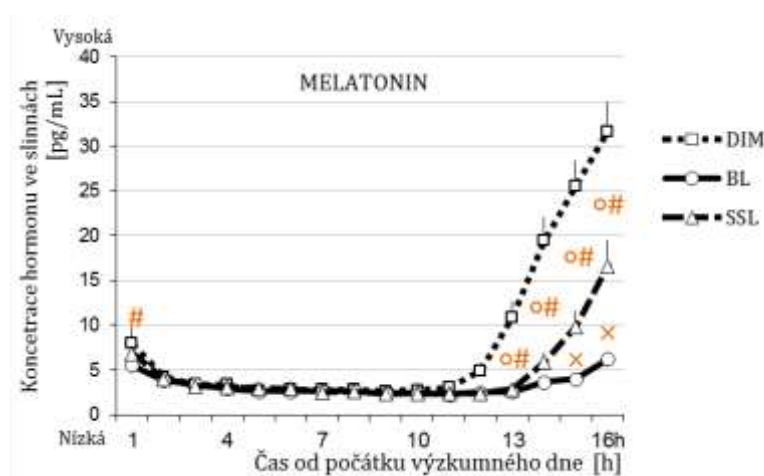
6.4.2.4 Freiburský test zrakové ostrosti (FrACT)

Nebyl zjištěn významný statistický rozdíl v testech zrakové ostrosti mezi chronotypy ani vliv denní doby ve světelných režimech BL a SSL. Test FrACT je velmi citlivý na celkovou osvětlenost a proto není divu, že byl naměřen výrazně nižší výkon v režimu DIM

($p < 0,001$). Výkon v DIM byl výrazně ovlivněn denní dobou, významně se snižoval v pozdějších hodinách). Protože byly v našem výzkumu použity auditivní verze testů, nemělo by tlumené osvětlení v DIM ovlivnit naše výsledky. Podrobnosti viz příloha, tabulka X8.

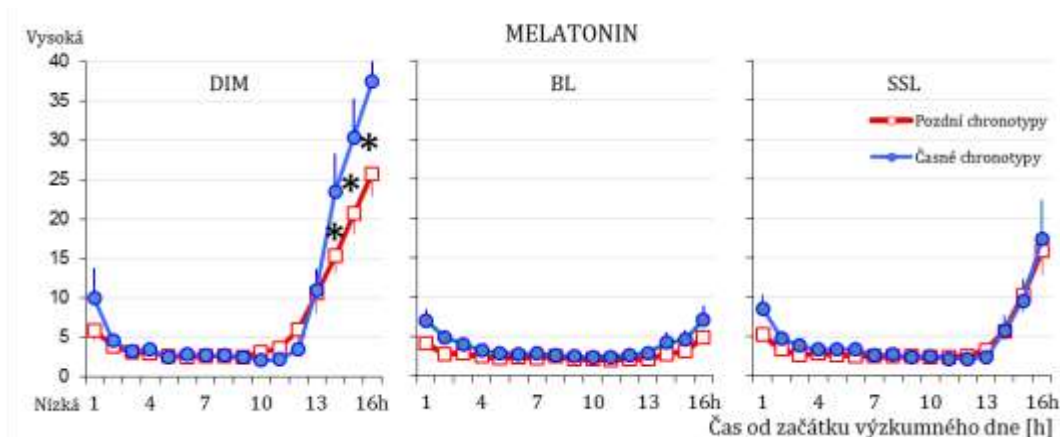
6.4.2.5 Hormonální analýzy – koncentrace melatoninu ve slinách

Čas počátku i konce jednotlivých výzkumných dní byl pro každého účastníka výzkumu stanoven individuálně dle výpočtu tak, aby odpovídal jeho subjektivním preferencím (viz tabulka 6.3, Obrázek 6.7). Tímto bylo zajištěno, aby vzorky byly u všech testovaných osob odebírány ve shodném cirkadiánním čase a průměrné hodnoty koncentrací melatoninu ve slinách mohly být stanoveny v odpovídající cirkadiánní fázi pro obě skupiny osob s extrémním chronotypem. V dopoledních hodinách, 45 minut po příchodu do laboratoře, koncentrace melatoninu byly významně nižší ve světelném režimu BL v porovnání s režimem DIM. V druhé polovině dne byly zjištěny významně vyšší koncentrace v DIM než ve světelných režimech BL a SSL již od 13. hodiny výzkumu až do konce měření, tj. po 16. hodině výzkumu. Během posledních dvou hodin byly zjištěny významné rozdíly i mezi režimy BL a SSL (Obrázek 6.26; statistika viz tabulka X6 přílohy).



Obr. 6.26: Koncentrace melatoninu ve slinách pro všechny tři světelné režimy (průměr $\pm$ SEM, $n = 32$). Významné rozdíly jsou označeny jako "#" pro DIM x BL, "o" pro DIM x SSL a "x" pro BL x SSL.

Když jsme zkoumali časový průběh odděleně pro každý světelný režim a chronotyp, zjistili jsme významné interakce mezi faktory 'time', 'chronotype' a 'sex' v režimu DIM (2-way rANOVA, data nejsou zobrazena, viz statistika v příloze, tabulka X6). Během posledních tří hodin výzkumu v DIM byly také zjištěny výrazně vyšší koncentrace melatoninu u MT v porovnání s ET (Duncanova metoda mnohonásobného porovnávání), na rozdíl od ostatních světelných režimů, ve kterých nebyly žádné rozdíly mezi chronotypy zaznamenány (Obrázek 6.27). Vliv času byl významný ve všech světelných režimech, což odráží cirkadiánní variaci koncentrace melatoninu ve slinách.



Obr. 6.27: Koncentrace melatoninu ve slinách, vyjádřeno odděleně pro chronotypy ve třech světelných režimech (průměr $\pm$ SEM, $n=32$). Významné rozdíly v koncentracích melatoninu mezi chronotypy jsou označeny hvězdičkami ($p < 0,05$).

Počátek zvýšené produkce melatoninu (DLMO) byl určen jako okamžik, kdy koncentrace melatoninu ve slinách překročili hodnotu 5 pg/ml. Aby bylo možné určit DLMO pro všechny testované osoby, byla v jednom případě (MT) použita snížená hodnota 4 pg/ml a ve dvou případech (MT a ET) musela být naopak hraniční koncentrace zvýšena na 10 pg/ml. Časy nástupu produkce melatoninu (MO) byly vypočteny samostatně pro každého jedince v každém světelném režimu. Časy DLMO a MO v BL a SSL byly vyjádřeny relativně vzhledem k počátku výzkumného dne. V režimu DIM byl čas DLMO stanoven u všech testovaných osob, rozdíl mezi chronotypy byl v průměru 23 minut, což není signifikantní ($p = 0,3820$). Během světelných režimů BL a SSL nebylo možno určit čas MO u některých osob. Zvýšení koncentrace melatoninu nastalo až po ukončení měření, tedy více jak 16 hodin od začátku výzkumu, tj. 17 hodin po probuzení jedince. V režimu BL nebylo možno určit čas MO u více než 60% a v režimu SSL u téměř 20% testovaných osob. Průměrný čas MO v těchto režimech nebylo možno přesně určit. Výpočet byl proveden na základě dostupných dat, včetně počtu zahrnutých jedinců, viz tabulka 6.5. Takto získané časy zvýšení sekrece melatoninu se mezi chronotypy ve světelných režimech BL a SSL významně nelišily. Rozdíl mezi světelnými režimy BL a SSL nebyl statisticky významný (MANOVA; $p = 0,163$), významně se však lišil režim DIM (MANOVA; $p < 0,001$). Podrobnější informace obsahuje tabulka X7 v příloze.

Relativní časy, vztažené k počátku studie, byly převedeny do běžného místního času. V tabulce 6.5 je zřetelně viditelný posun v časovém rozložení aktivity jednotlivých chronotypů v průběhu dne a vliv světelných režimů na čas, kdy se organismus začíná připravovat ke spánku (čas DLMO a MO).

	Časné chronotypy (MT)			Pozdní chronotypy (ET)		
	Čas od počátku výzkumného dne (místní čas)			Čas od počátku výzkumného dne (místní čas)		
	průměr ± SD			průměr ± SD		
DIM	13,4 ± 1,0	(20:42 ± 1:02)	16	13,1 ± 1,3	(00:14 ± 1:20)	16
BL	14,5 ± 0,8	(21:15 ± 0:50)	6	15,2 ± 1,0	(02:24 ± 1:01)	6
SSL	14,8 ± 0,9	(22:00 ± 0:52)	12	14,8 ± 1,3	(02:01 ± 1:15)	14

Tab. 6.5: Vypočítané časy DLMO a MO, pro tři světelné režimy a oba chronotypy; průměr ± SD; n udává počet jedinců, u kterých bylo možno DLMO nebo MO změřit. Pro ilustraci byly relativní časy převedeny také do běžného místního času (v závorce).

Shrnutí vlivu světelného prostředí na biologické funkce člověka

Sledovali jsme možný vliv tří různých světelných režimů na subjektivní hodnocení ospalosti a na výkonnost. Tlumené osvětlení v režimu DIM zhoršilo většinu sledovaných parametrů – zvýšila se subjektivní ospalost, prodloužily se reakční časy v testech. Mezi režimy SSL a BL byla nalezena statisticky významná odlišnost pouze u nejnáročnějšího kognitivního testu, 3-back testu. Vliv chronotypu byl nalezen pouze v subjektivním hodnocení ospalosti. Výsledky některých kognitivních testů zaznamenaly vliv pohlaví.

Máme-li shrnout část zabývající se vlivem světelných podmínek na koncentraci melatoninu ve slinách, lze říci, že rozdíly mezi chronotypy byly zjištěny pouze ve světelném režimu DIM, kde přestože se čas DLMO (relativní k počátku studie) mezi chronotypy významně nelišil, nárůst koncentrací byl rychlejší u MT v porovnání s ET. V režimech BL a SSL nebylo možné určit čas MO, protože u některých jedinců nedošlo ke zvýšení koncentrace melatoninu ve slinách před ukončením měření. Počet těchto jedinců je výrazně vyšší v podmínkách konstatního jasného světla (BL).

6.4.3 Subjektivní hodnocení versus objektivní biologické efekty světla

V posledním kroku jsme zjišťovali vztah subjektivních aspektů (hodnocení subjektivní ospalosti) s objektivními výsledky měření (PVT jako velmi jednoduchého úkolu a auditivního testu 3-back jako velmi obtížného úkolu) a biomarkerů (hormonální sekreci melatoninu). Výsledky korelačních analýz jsou uvedeny v tabulce 6.6.

	vyšší subjektivní ospalost	vyšší výkonnost v jednoduchých testech	vyšší výkonnost v náročných testech	vyšší koncentrace melatoninu ve slinách	vyšší osvětlenost E _v
DIM					
vyšší subjektivní ospalost	-	0,066	-0,044	0,264	-
vyšší výkonnost v jednoduchých testech	0,066	-	0,065	0,199	-
vyšší výkonnost v náročných testech	-0,044	0,065	-	-0,041	-
vyšší koncentrace melatoninu ve slinách	0,264	0,199	-0,041	-	-
vyšší osvětlenost E _v	-	-	-	-	-
BL					
vyšší subjektivní ospalost	-	0,167	0,118	0,140	-0,201
vyšší výkonnost v jednoduchých testech	0,167	-	0,110	0,075	-0,044
vyšší výkonnost v náročných testech	0,118	0,110	-	-0,036	-0,066
vyšší koncentrace melatoninu ve slinách	0,140	0,075	-0,036	-	0,142
vyšší osvětlenost E _v	-0,201	-0,044	-0,066	0,142	-
SSL					
vyšší subjektivní ospalost	-	0,158	0,102	0,152	-0,264
vyšší výkonnost v jednoduchých testech	0,158	-	0,042	0,120	0,037
vyšší výkonnost v náročných testech	0,102	0,042	-	-0,016	-0,105
vyšší koncentrace melatoninu ve slinách	0,152	0,120	-0,016	-	-0,041
vyšší osvětlenost E _v	-0,264	0,037	-0,105	-0,041	-
	p > 0,05	p < 0,05	p < 0,01	p < 0,001	p < 0,0001

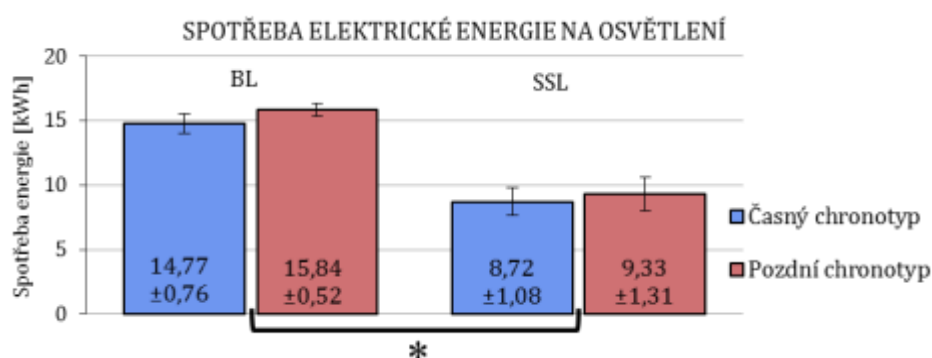
Tab. 6.6: Korelace mezi subjektivními a objektivními proměnnými byly vypočteny provedením Spearmanovy neparametrické korelace; hodnoty R byly určeny pro všech 32 testovaných osob, samostatně pro každý světelný režim. Barevná pole zachycují signifikantní R-hodnoty (tučně): pro tmavší barvy p < 0,05; světlejší barvy p < 0,0001.

V režimu DIM vyšší koncentrace slinného melatoninu významně korelovala s vyšší subjektivní ospalostí a s pomalejšími reakčními časy v jednoduchém testu (PVT). V režimech SSL a BL vyšší osvětlenost E_v negativně korelovala s vyšší subjektivní ospalostí. Vyšší subjektivní ospalost naopak pozitivně korelovala s vyššími

koncentracemi melatoninu a lepším výkonem v PVT. Naše data neprokázala korelaci mezi subjektivní ospalostí a výkonností v obtížném kognitivním úkolu (3-back test). Další podrobnosti korelační statistiky lze nalézt v příloze, tabulka X9.

6.4.4 Spotřeba elektrické energie na osvětlení, vliv chronotypu a světelného režimu

Vzhledem ke konstantní vysoké hladině osvětlenosti v průběhu celých 16 hodin světelného režimu BL jsme předpokládali vyšší spotřebu elektrické energie v porovnání se SSL. To se potvrdilo. Spotřeba v SSL dosáhla pouze 59% spotřeby v BL. (BL $15,3 \pm 0,46$ kWh; SSL $8,96 \pm 0,93$ kWh; průměr $\pm$ SEM) Mezi MT a ET nebyl ve spotřebě elektrické energie pro osvětlení zjištěn signifikantní rozdíl ($p > 0,4$; Obrázek 6.28).



Obr. 6.28: Průměrná celková elektrická energie spotřebovaná pro osvětlení během jednoho výzkumného dne, tj. 16 hodin (kWh). Vyjádřeno odděleně pro světelné režimy BL a SSL a oba chronotypy (modrá = MT, červená = ET, $n = 14$ v obou skupinách, průměr $\pm$ SEM). Hvězdička vyznačuje významné rozdíly mezi světelnými režimy ($p < 0,05$).

Pro shrnutí této části lze konstatovat výrazně nižší spotřebu elektrické energie, pokud si jednotlivci mohli zvolit světelné podmínky v porovnání s konstantní osvětleností. Rozdíl nebyl zjištěn ve spotřebě energie na osvětlení mezi chronotypy.

6.5 Shrnutí a diskuse výsledků experimentální části

6.5.1 Světelné preference u osob s extrémním chronotypem

Jedním z cílů naší studie bylo zjistit, jaké osvětlení preferují jedinci s extrémním chronotypem. Umožní nám to rozpoznat, do jaké míry mohou být rozdílné světelné preference v rámci mladé zdravé populace.

Během jednoho výzkumného dne si účastníci sami volili parametry světelného prostředí. Umožnili jsme jim nastavit osvětlovací systém tak, aby co nejvíce odpovídal jejich požadavkům. Aby byli ve své volbě světelných podmínek co nejméně omezeni, byla naše výzkumná laboratoř (podobná kanceláři) vybavena nadstandardním

osvětlovacím systémem - k dispozici bylo několik typů světelných zdrojů s vysokým instalovaným výkonem a plynulou regulací. Ve večerní či noční době, kdy je to u běžných systémů umělého osvětlení nedostupné, naše vybavení umožňovalo zajistit jasné světlo, tj. světlo s prokázanými povzbuzujícími účinky na člověka.

Ze získaných hodnot preferované osvětlenosti lze vysledovat výrazný rozdíl ve volbě osvětlení mezi první a druhou polovinou dne, tj. mezi prvními osmi a druhými osmi hodinami bdělosti. Zatímco v první části dne se jasné světlo zdá být důležité pro oba chronotypy – bylo zvoleno po téměř čtyři hodiny (50 % možného času), v průběhu druhé poloviny dne byla úroveň osvětlení celkově snížena a volba jasného světla byla vzácná. Ve skutečnosti se vyskytli pouze dva účastníci, kteří se rozhodli pro jasné světlo v druhé polovině dne. V těchto dvou případech (po jednom z každé skupiny chronotypů) bylo jasné světlo zvoleno po celých 16 hodin. Na náš dotaz v rámci rozhovoru po dokončení studie první z těchto jedinců uvedl, že si vybral jasné světlo, aby si zlepšil světelné podmínky pro zvolenou činnost (rýsování) a druhý nám připustil, že chtěl s jasným světlem experimentovat, ale nakonec se svou volbou nebyl spokojen. Celkové výsledky naznačují, že osvětlenost konstantní po celý den, jak je běžná u systémů umělého osvětlení bez možnosti regulace, neodpovídá uživatelským preferencím. Osvětlení je buď příliš tlumené v průběhu dne, nebo příliš jasné ve večerních a nočních hodinách.

Podrobnější zkoumání výsledků z první poloviny dne ukázalo významné rozdíly v načasování jasného světla mezi extrémními chronotypy. Pozdní chronotypy zvolily jasné světlo na samém počátku dne a pak osvětlenost postupně snižovaly až do konce studie. Časné chronotypy dosáhly své maximální denní osvětlenosti až o pět hodin později a jasné světlo udržovaly až do konce první poloviny dne, což je výrazně později než pozdní chronotypy. Budeme-li předpokládat, že osvětlenost preferovaná neutrálními chronotypy by se měla pohybovat mezi preferencemi dvou sledovaných extrémních skupin, nabízí se závěr, že v reálných podmínkách jasné světlo v průběhu druhé poloviny subjektivního dne většinou neodpovídá preferencím uživatelů.

Je známo, i když přesné důvody stále nebyly objasněny, že pracovní místa u oken v přímém kontaktu s denním světlem jsou mezi uživateli nejoblíbenější [Galasiu & Veitch, 2006] a denní světlo v pracovním prostředí je dle výzkumů uživatelských preferencí považováno za důležité [Veitch, et al. 1993]. Na druhou stranu pokud byl přístup denního světla během výzkumu blokován a dostupné bylo pouze osvětlení umělé [Juslén, et al. 2005, Boyce, et al. 2000], ve zvolené osvětlenosti se neobjevily výrazné změny v průběhu času. Bez kontaktu s denním světlem maximální zvolená osvětlenost dosahovala výrazně nižších hodnot a chybělo výrazné polední maximum, které jsme mohli vidět ve výsledcích našeho výzkumu. Uživatelé se tedy nepokoušeli napodobit průběh denního světla. Pokud byly splněny vizuální potřeby, a nevyskytovaly se žádné rušivé vlivy, byl dosažen přiměřený vizuální komfort a další úpravy osvětlení se děly vzácně [Boyce, et al. 2000]. Také srovnání několika výzkumů uživatelských preferencí při umělém osvětlení [Fotios & Cheal 2010] ukazuje, že stávající nebo právě minulé světelné podmínky a míra možné volby hrají v subjektivním výběru světla důležitější roli než skutečná hodnota osvětlenosti.

Všechna tato zjištění potvrdila, že dosažení vizuálního komfortu je určující pro dosažení spokojenosti s aktuálním světelným prostředím a míra adaptace na aktuální podmínky výrazně ovlivňuje případnou volbu nové hladiny osvětlení. Nabízí se otázka, do jaké míry jsou uživatelé schopni posoudit také vliv nevizuálního vnímání osvětlení, které si ve svém prostředí zvolili. Ve chronobiologické studii s neutrálními chronotypy (viz kapitola 5.1 ve [Borisuit 2013b]) byla zjištěna silná korelace mezi subjektivním hodnocením spokojenosti se světelným prostředím a lepším vizuálním komfortem, ale spíše nízká (avšak signifikantní) korelace mezi mírou spokojenosti a nevizuálními hledisky, jako je například vyšší subjektivní bdělost. V naší studii s extrémními chronotypy byla v režimu jasného světla korelace mezi subjektivní spokojeností a subjektivní bdělostí ještě menší, než u neutrálních chronotypů (kapitola 5.1 v [Borisuit 2013b]), a zmizela zcela, jakmile si účastníci mohli vybrat světlo dle vlastní volby. Toto zjištění je možno interpretovat tak, že extrémní chronotypy upřednostnily cirkadiánní synchronizaci před vizuálním komfortem a akutními účinky jasného světla, například snížení subjektivní ospalosti ve večerních hodinách. Aspekty vizuálního komfortu s ohledem na preferované osvětlení byly popsány v kapitole 5.2 disertační práce A. Borisuit [Borisuit 2013b].

Při převedení záznamu subjektivně zvolené osvětlenosti do místního času sledovaly změny osvětlenosti přibližně změny v denním světle; maximum bylo dosaženo kolem poledne a osvětlenost pozvolně klesala až do soumraku. Pokud však byla data analyzována relativně k fázi cirkadiánních hodin jednotlivých účastníků, samostatně pro jednotlivé chronotypy, objevil se zřetelný rozdíl mezi časnými a pozdními chronotypy. Obvyklé doby probuzení se lišily přibližně o 4 hodiny, což je v souladu s literaturou [Schmidt, et al. 2009, Mongrain, et al. 2006]. Lišila se také hodina maximální zvolené osvětlenosti stejně jako doba, kdy zvolená osvětlenost poklesla pod prahovou hodnotu 1000 lx. To znamená, že vyšší hladiny přirozeného osvětlení se z pohledu extrémních chronotypů vyskytují v různých denních dobách. U pozdních chronotypů začal pokles zvolené osvětlenosti v dřívější cirkadiánní fázi než u časných chronotypů. Náš původní předpoklad, že pozdní typy by mohly kompenzovat jakýsi „světelný deficit“ volbou jasného světla ve večerních hodinách se nepotvrdil. Ve skutečnosti opak byl pravdou. Pozdní chronotypy volily jasné světlo po kratší čas, vybraly si nižší maximální, nižší minimální a také nižší průměrnou osvětlenost, a začaly ve srovnání s časnými chronotypy snižovat osvětlenost v dřívější cirkadiánní fázi. Vzhledem k tomu, že jsou pozdní chronotypy relativně zpožděny v čase usínání a probuzení, může toto chování znamenat formu kontrastrategie, která má zabránit dalšímu světlem způsobenému fázovému posunu.

Subjektivně zvolené světelné prostředí se také odrazilo v době nástupu sekrece melatoninu. Přestože světelné prostředí se mezi oběma skupinami chronotypů významně lišilo, nebyl zjištěn (vzhledem k cirkadiánní fázi) žádný rozdíl mezi časem nástupu sekrece melatoninu. U obou chronotypů k tomu došlo přibližně jednu hodinu před koncem studie. Jedná se o optimální načasování, jedinec byl fyziologicky připraven k spánku bezprostředně po ukončení denní aktivity.

Ve srovnání se světelným režimem dle vlastní volby, v režimu stálého jasného světla byl nástup sekrece melatoninu posunut do subjektivní noci jedinců. Toto zjištění by mohlo

vysvětlit volbu nižší osvětlenosti v druhé polovině režimu SSL, jak to bylo popsáno dříve. Také potvrzuje, že jasné světlo ve večerních hodinách by mohlo mít velmi negativní dopad na regulaci spánku a bdění, a to zejména u pozdních chronotypů s již zpožděnou fází synchronizace. Zřetelně je tento dopad vidět, pokud se čas nástupu melatoninu vyjádří v místním čase na hodinách.

6.5.2 Vliv světelného prostředí na biologické funkce člověka

V experimentu byl sledován vliv nevizuálního vnímání světla na fyziologické funkce člověka. V laboratoři byla zaznamenávána subjektivní ospalost, kognitivní výkonnost a změny v koncentraci melatoninu v průběhu denní doby, tj. po dobu 16 hodin. Výsledky byly analyzovány s ohledem na vliv světelných režimů, denní dobu, typ úlohy a jejich obtížnost a s ohledem na chronotyp.

Krátkodobé účinky v různých světelných režimech

Světlo vnímané nevizuálním systémem má známé silně povzbuzující účinky na řadu biologických funkcí. V režimu tlumeného světla (DIM) nízká hladina osvětlenosti negativně ovlivnila téměř všechny sledované aspekty: sledované osoby udávaly celkově vyšší subjektivní ospalost, jejich výsledky v kognitivních úlohách vykazovaly horší celkovou výkonnost a byl zaznamenán dřívější nástup sekrece melatoninu (DLMO).

Ostatní dva světelné režimy byly zvoleny tak, aby simulovaly dva koncepty osvětlení s vysokým standardem, které bývají instalovány v kancelářském prostředí – centrální systém s konstantní osvětleností a systém osvětlení pod kontrolou uživatele. Přestože se světelné podmínky v těchto dvou režimech významně lišily, nebyl zjištěn žádný vliv na celkovou úroveň subjektivní ospalosti nebo kognitivního výkonu (alespoň u jednoduchých kognitivních úloh). Ve velmi obtížné úloze (test 3-back) byly zjištěny statisticky významné rozdíly naznačující, že konstantní jasné světlo po dobu 16 hodin pomohlo testovaným osobám k lepším kognitivním výkonům. Dle zjištěných výsledků by bylo možno dojít k závěru, že čím byla náročnější úloha, tím větší pozitivní vliv na výkonnost mělo jasné osvětlení.

Vliv světelných režimů byl také zjištěn u koncentrace slinného melatoninu včetně ovlivnění doby, kdy dochází ke zvýšení sekrece melatoninu v noci. Nástup sekrece melatoninu v režimu dle vlastní volby (SSL) byl zaznamenán u obou chronotypů přibližně jednu hodinu před koncem šestnáctihodinového výzkumného dne, což bylo později než v režimu DIM. V režimu BL nedošlo během 16 hodin výzkumu k počátku sekrece melatoninu u více než 60 % testovaných osob. Toto naznačuje odsunutí počátku produkce melatoninu do pozdních nočních hodin a možný vliv na zpoždění cirkadiánní fáze, jev doložený v literatuře [Illnerová, et al. 2000, Schmidt, et al. 2009, Lewy 2007].

Krátkodobé účinky světla ve vztahu k denní době

Bylo prokázáno, že načasování cirkadiánních a homeostatických procesů v těle působí jako rozhodující faktor pro subjektivní ospalost. Výsledky experimentu potvrdily nárůst subjektivní ospalosti během dne za všech světelných režimů. Účinek světla bylo možno pozorovat v dynamice změn - významné zvýšení subjektivní ospalosti v režimu stálého jasného světla nastal později a relativní rozdíl mezi hodnocením na začátku a na konci

dne byl nižší v porovnání s ostatními dvěma světelnými režimy. Trvalá přítomnost jasného světla po dobu 16 hodin snížila subjektivní nárůst ospalosti.

V případě měření kognitivní výkonnosti nebyla jednoznačná souvislost mezi načasováním světla během dne a změnou výsledků zaznamenána. Vliv osvětlenosti na nárůst nebo pokles výkonnosti během dne byl zjištěn pouze u některých typů úkolů. V jednoduché úloze testující pouze schopnost udržet pozornost (PVT) se reakční časy (RT) během dne zpomalily v BL a SSL režimech; avšak ve velmi obtížné kognitivní úloze (3-back) nedošlo v průběhu dne k žádné změně RT. To je v souladu s výsledky předchozích výzkumů [Daurat, et al. 1993], kde se uvádí, že jasné světlo v denní době zlepšilo náladu a motivaci, ale účinky na kognitivní výkon nebyly zaznamenány. Také nedávno publikovaná studie [Smolders, et al. 2012] uvádí, že přítomnost jasného světla po dobu 60 minut ráno zvýšila pocit bdělosti a vitality, stejně jako objektivní výkon v testu PVT. Vliv na výkonnost v náročnější úloze (Test přiřazování čísel, Digit Substitution Test) však nebyl zaznamenán.

V režimech BL a SSL, které je možno považovat za simulaci skutečného osvětlení v budovách, nebyla nalezena jednoznačná souvislost mezi změnou kognitivní výkonnosti v průběhu času a osvětleností. Tento experiment byl zaměřen na aktivitu během subjektivního dne, účinky světla při např. práci v noci nebyly zjišťovány. Je třeba poznamenat, že silné účinky (jasného) světla na výkonnost byly zjištěny ve výzkumech prováděných v noci nebo u osob s prodlouženou dobou bdělosti. Vyvolaná spánková deprivace u těchto pokusů vedla k vysokým úrovním subjektivní ospalosti, což může způsobit fyziologické a kognitivní změny [Åkerstedt, et al. 1990]. Pokles výkonnosti, který se objevil u našich testů (2- a 3-back) během poslední hodiny DIM, tj. téměř 2 hodiny po DLMO, je v souladu s výsledky Åkerstedt. Další studie [Phipps-Nelson, et al. 2003] pracovala s osobami, jejichž doba spánku během předchozí noci byla významně zkrácena. Autoři dospěli k závěru, že účinek jasného světla na snížení ospalosti a vyšší výkon se zdá být zprostředkován mechanismy, které jsou odděleny od těch, které vyvolává potlačení sekrece melatoninu. Z tohoto úhlu pohledu hraje denní případně noční doba klíčovou roli při určování nevizuálních vlivů osvětlení.

Je také třeba zdůraznit, že všechny osoby v našem výzkumu byly testovány v jejich preferované cirkadiánní fázi s ohledem na jejich vnitřní cirkadiánní regulaci. Pečlivé posouzení cirkadiánní fáze u jednotlivých osob nám umožnilo nejen porovnávat jednotlivce ve shodné endogenní cirkadiánní fázi, ale také předejít nežádoucím účinkům spánkové deprivace. Tím bylo zaručeno, že účastníci výzkumu budou plně synchronizováni s vnějším časem. Pokud by byly extrémní chronotypy testovány ve stejné denní době (stejném místním čase) například v běžných úředních hodinách (9 – 17 h), mohli bychom najít odlišné výsledky, ovlivněné zejména u pozdních chronotypů jevem zvaným sociální jet lag. Sociální lag jet definovala výzkumná skupina T. Roenneberga [Wittmann, et al. 2006] jako vysoký společenský tlak vycházející z odlišných preferencí v načasování denní aktivity mezi jedincem a společností. Po zkušenostech z našeho výzkumu bychom považovali za nesmírně zajímavé srovnat kognitivní výkonnost u extrémních chronotypů v jejich preferovaném čase s výkonností v běžné pracovní době. Pro extrémně pozdní chronotypy by bylo nejspíše obtížné

dosáhnout dobrých výsledků v brzkých ranních hodinách, zatímco pro časné chronotypy by bylo obtížné fungovat v pozdních večerních hodinách nebo během nočních směn.

Vliv typu a úrovně obtížnosti úlohy na kognitivní výkon

Dále byly v experimentu sledovány účinky světelných podmínek v průběhu dne na výkon hlavně u auditivních testů. Ne všechny sledované aspekty se měnily shodně v průběhu dne. Současně se získané výsledky lišily pro různé typy testů. Konkrétně v těch nejobtížnějších testech nedošlo k žádné změně kognitivního výkonu v průběhu celých 16 hodin, zatímco v jednodušším testu pozornosti bylo možno sledovat pokles výkonnosti v průběhu dne. Zdá se, že vliv denní doby na výkonnost byl převážen velkým úsilím, které bylo třeba ke splnění obtížného úkolu, nebo velmi jasné světlo umožnilo udržet výkonnost na konstantní úrovni po celou dobu experimentu.

Naše výsledky naznačují, že vztah mezi světlem a výkonností v průběhu dne je komplexní záležitost a nelze jej vyjádřit jednoduchým výpočtem nebo na základě jednoho typu testu. Odlišná citlivost na světelné podmínky u různých typů testů by mohla být interpretována jako důsledek zapojení rozdílných procesů v mozku při provádění těchto testů. Při testování udržení pozornosti (PVT) není potřeba zapojení paměti nebo rozhodování, na rozdíl od složitější úlohy, která vyžaduje použití krátkodobé paměti a procesu rozhodování (test n-back) a při které jsou zapojeny také další oblasti mozku. Rozdíly v aktivitě mozku by tak mohly být spojeny s odlišnou citlivostí na světelné podmínky a jejich změny v průběhu dne.

Psychomotorický test bdělosti (PVT) je oblíben pro svou nenáročnost při provádění a vyhodnocení. Otázkou však zůstává, nakolik jsou jeho výsledky vhodné pro testování výkonnosti u typické současné administrativní práce, která vyžaduje více než jen udržovat pozornost a zajistit rychlou reakci. Chceme-li hodnotit účinky jasného světla na administrativní pracovníky a následně optimalizovat světelné prostředí, aby byla podpořena jejich kognitivní výkonnost, je nutno vyhodnotit konkrétní typ úkolu a identifikovat důležité aktivity, aby bylo možno posoudit jejich skutečné potřeby. Zároveň je nutná hlubší znalost krátkodobých účinků světla na nevizuální systém, zejména v denní době.

Chronotypy

Jednou z našich hlavních motivací v tomto výzkumu bylo posoudit různé dopady světelných podmínek na extrémní chronotypy, s cílem stanovit možný rozsah citlivosti na světlo u této mladé zdravé populace. Účastníci výzkumu byli testováni v jejich preferované cirkadiánní fázi s ohledem na posun jejich vnitřního rytmu spánku a bdění. Pravidelný a kontrolovaný spánkový režim v období před výzkumem byl prevencí spánkové deprivace. Za těchto podmínek nebyly mezi oběma chronotypy zjištěny významné rozdíly v subjektivním hodnocení ani v kognitivním výkonu, s výjimkou rozdílu v hodnocení subjektivní ospalosti. Extrémně časné chronotypy vykazují rychlejší nárůst subjektivní ospalosti během dne. Tento jev souvisí s rychlejším hromaděním homeostatického tlaku spánku u časných chronotypů, které již bylo popsáno v literatuře [Mongrain, et al. 2006]. Také se u časných chronotypů předpokládá kratší endogenní perioda.

Pro další výzkum by bylo zajímavé sledovat, jakou významnou roli v inter-individuálních rozdílech hraje faktor pohlaví.

6.5.3 Subjektivní hodnocení versus objektivní biologické efekty světla

Schopnost správně posoudit vliv světelného prostředí se stane důležitou, pokud chceme dát uživatelům plnou kontrolu nad osvětlením v prostoru. Pokud si uživatelé nejsou vědomi toho, jak světlo může ovlivnit jejich biologické funkce, nebo nejsou schopni správně jeho účinky vyhodnotit, mohou regulovat osvětlovací systému nevhodně.

V tomto výzkumu osvětlení administrativních prostor bylo cílem zjistit, do jaké míry subjektivní hodnocení ospalosti odpovídá objektivní výkonnosti v kognitivních úlohách nebo stavu biomarkerů, jako je například sekrece melatoninu. Souvislost mezi počátkem sekrece melatoninu v noci a zvýšení subjektivní ospalosti byla již popsána v řadě publikací [Lewy 1980, Schmidt, et al. 2009].

Výsledky naznačují souvislost mezi volbou jasného světla (potenciálně ovlivněnou subjektivním hodnocením ospalosti) a zvýšenou výkonností v jednoduchých testech, avšak u složitějších úloh se vliv jasného světla zmenšuje. Je známo, že hromadění homeostatického tlaku spánku po dobu bdělosti je zodpovědné za nárůst subjektivní ospalosti na konci dne. Subjektivní ospalost lze potlačit povzbuzujícím vlivem jasného světla. Pokud by byla volba osvětlení plně v rukou uživatele, mohl by tedy nastat následující scénář: nárůst subjektivní ospalosti ke konci dne by mohl přimět uživatele zvolit vyšší osvětlenost, pokud chce pomocí povzbuzujícího vlivu jasného světla snížit subjektivní pocit ospalosti. Večer je však také období, kdy jsou cirkadiánní hodiny vysoce citlivé na synchronizaci světlem. Proto může současně se subjektivním snížením ospalosti dojít také k nezáměrnému ovlivnění vnitřních cirkadiánních hodin, může být nezáměrně oddálen přirozený nástup spánku. Snížení subjektivní ospalosti však nemusí znamenat vyšší produktivitu, neboť výsledky našeho experimentu neprokázaly jasnou souvztažnost mezi intenzivnějším osvětlením a lepší kognitivní výkonností v obtížných úlohách. Typ úloh použitých v experimentech, tj. úlohy vyžadující hodnocení, rozhodování a používání krátkodobé paměti, jsou hlavní činností v typické kancelářské práci 21. století.

Bude-li osvětlení v budovách výhradně pod kontrolou uživatele, odkázaného na nedokonalé subjektivní hodnocení, mohlo by to ve svém důsledku znamenat, že osvětlení bude voleno dle vizuálních potřeb, případně s ohledem na jeho krátkodobé povzbuzující vlivy. Avšak výsledky našeho výzkumu ukázaly, že extrémní chronotypy se, pokud jim to bylo umožněno, zcela vyhýbaly jasnému světlu ve večerních hodinách a v noci. Nabízí se proto vysvětlení, že (zejména) pozdní chronotypy volily světelné podmínky, které sice nepodpořily jejich kognitivních výkonnost a nepotlačily subjektivní ospalost, ale pomohly zajistit lepší cirkadiánní synchronizaci. Nicméně, nebude-li udržitelnost regulace cirkadiánních rytmtů brána v úvahu, mohlo by to mít za následek poruchy cirkadiánního rytmu, dlouhodobě negativně ovlivnit regulaci spánku, celkovou pohodu a potenciálně i zdraví a pracovní výkonnost člověka.

6.5.4 Spotřeba elektrické energie na osvětlení, vliv chronotypu a světelného režimu

V hypotéze jsme předpokládali, že konstantní světelné podmínky budou energeticky náročnější ve srovnání s osvětlením dle volby uživatele. Z našeho měření osvětlenosti je zřejmé, že při vlastní volbě osvětlení (SSL) účastníci výzkumu obecně sledovali dostupnost denního světla a profitovali z kvalitně prosvětlené místnosti s vysokým činitelem denní osvětlenosti. V druhé polovině dne, tedy v době, kdy se především využívá umělé osvětlení, obě dvě skupiny extrémních chronotypů zvolily výrazně nižší osvětlenost a proto spotřeba elektrické energie byla významně nižší v režimu SSL ve srovnání s režimem konstantní osvětlenosti (BL). Považujeme významné úspory energie v rámci režimu SSL jako jednoznačnou výhodu při porovnání se spotřebou energie při konstantním jasném světle. Na druhou stranu srovná-li se spotřeba energie v rámci režimu SSL se spotřebou při pouhém dodržení současných požadavků na osvětlení v administrativním prostoru (500 lx na srovnávací vodorovné rovině), je spotřeba elektrické energie v režimu SSL podstatně vyšší. To naznačuje, že velmi vysoký standard osvětlení zvolený účastníky výzkumu v rámci režimu SSL je spojen s vyšší spotřebou energie na osvětlení v porovnání se světelným prostředím, které pouze splňuje hygienická minima.

Překvapivě a v rozporu s naší původní hypotézou nebyl nalezen rozdíl ve spotřebě energie na osvětlení mezi časnými a pozdními chronotypy. Toto zjištění naznačuje, že rozdíly v osobních preferencích světelného prostředí je možné zohlednit v návrhu osvětlení v pracovních prostorech, aniž by to znamenalo vyšší spotřebu elektrické energie.

6.5.5 Omezení

Za jeden z limitů této práce je možné považovat fakt, že podrobněji nesleduje některé rozdíly mezi pohlavími, které se objevily v našich výsledcích. Stále máme nedostatečné znalosti problematiky, do jaké míry pohlaví ovlivňuje naši fyziologii za různých světelných podmínek. Bylo by zajímavé získaná data analyzovat i z tohoto úhlu pohledu.

Dalším omezením mohou být velké rozdíly ve výsledcích různých typů kognitivních testů. Analýza výsledků dalších, zde nepublikovaných testů (například vizuální testy) by mohla přispět k jasnějším, ucelenějším závěrům.

7. Závěrečné shrnutí výsledků výzkumu

*„I know this is a weak answer. But it is the only one I have at the moment.“
Samer Hattar¹²*

7.1 Souhrnný přehled dosažených výzkumných cílů, verifikace hypotéz

Práce je členěna na část teoretickou, zpracovávanou na základě literatury, a část experimentální.

7.1.1 Teoretická část

Proměny světelných podmínek v průběhu historie až do současnosti (ad 2.1.1 – Kapitola 3)

Na základě analýzy světelných podmínek, v nichž lidé ve střední Evropě žili v různých obdobích historie až do současnosti, je mapován vztah člověka k dennímu světlu i možnosti umělého osvětlení a vliv dostupnosti osvětlení na každodenní život společnosti. Upozorňuje se na zásadní změnu světelného prostředí člověka, ke které došlo v posledních stoletích.

Analýza světelných podmínek v historii poukazuje na fakt, že člověk se vyvinul v prostředí s denním světlem, tj. s daleko vyšší celkovou intenzitou osvětlenosti během

¹² *“Vím, že je to nedostatečná odpověď. Je to ale ta jediná, kterou v této chvíli mám.”*

Samer Hattar, SLTBR Annual Meeting, Vídeň 2014

dne a s velkými rozdíly osvětleností mezi dnem a nocí. Toto prostředí je pro nás z biologického hlediska optimální. V našem současném světelném prostředí je denní rytmus světla a tmy redukován, jak názorně ilustruje simulace typického světelného profilu osvětlenosti ve sledovaných etapách historie. Fyziologicky tedy nepotřebujeme více či méně světla, ale aby se intenzita osvětlenosti měnila v závislosti na denní době. Hypotéza **H1** o odlišnosti světelného prostředí v současnosti oproti minulosti byla analýzou potvrzena.

Vizuální a biologické účinky světla na člověka (ad 2.1.2 – Kapitola 4)

Východiskem je obecná informace o procesu vnímání světla okem člověka a jeho vlivech na fyziologické procesy, jako je regulace rytmu aktivity a odpočinku. Pozornost se soustřeďuje na nevizuální vnímání, jehož poznání je relativně nové.

Pomocí systému nevizuálního vnímání světla ovlivňuje světelné prostředí významně synchronizaci vnitřních biologických hodin s vnějším prostředím, s rytmickým střídáním pozemského dne a noci. Pro zajištění správné synchronizace je třeba, aby se intenzita osvětlenosti měnila v závislosti na denní době. Postupným rozborem jednotlivých atributů světelného prostředí je popsán a porovnán proces vizuálního a nevizuálního vnímání světla, jsou zjištěny rozdíly v citlivosti na jednotlivé atributy světelného prostředí, což potvrzuje hypotézu **H2** o odlišnosti vizuálního a nevizuálního vnímání světla. Získaná fakta jsou shrnuta v přehledné tabulce v závěru kapitoly.

Pozornost je věnována také inter-individuálním rozdílům v populaci, tj. specifickým skupinám jedinců, jako jsou senioři, adolescenti nebo extrémní chronotypy. Vnitřní biologické hodiny se u těchto osob mohou chovat atypicky ve srovnání s většinovou společností, což může mít nezanedbatelný vliv mimo jiné na jejich spánkovou regulaci.

Světelné prostředí v současných budovách a nevizuální vnímání světla (ad 2.1.3 – Kapitola 5)

Jsou sledovány dopady světelného prostředí v budovách na fyziologii člověka a vliv nevizuálního vnímání světla na celkovou pohodu i zdraví. Kapitola ukazuje vliv změny světelného prostředí na funkci cirkadiánního systému, vede k zamyšlení nad důsledky našeho současného světelného prostředí a upozorňuje na aktuálnost tohoto tématu ve společnosti. Pozornost je věnována negativním jevům, které se v současné společnosti objevují a které mohou být důsledkem nevhodného světelného prostředí.

Provedená analýza potvrzuje hypotézu **H3**, že současná legislativa, podle které je světelné prostředí v budovách navrhováno, je vytvořena pouze s ohledem na zajištění vizuálního komfortu, ale nevizuální efekty světla na člověka nebere v úvahu. Přehled výsledků vědeckých výzkumů popisuje rizika dlouhodobého pobytu v nevhodném světelném prostředí a jeho možný vliv na zhoršení kvality života i zdraví jedinců. Adolescenti, senioři a lidé s extrémním chronotypem jsou zde identifikováni jako citlivé skupiny osob, u kterých může nevhodné světelné prostředí vyvolat nedostatečnou synchronizaci cirkadiánního rytmu, což potvrzuje hypotézu **H4**. Pomocí záznamů z aktigrafie jsou ilustrována rizika nedostatečné synchronizace cirkadiánního rytmu.

7.1.2 Experimentální část (Kapitola 6)

Chronobiologický experimentální výzkum byl prováděn v letech 2011-2013 v laboratoři LESO-PB Švýcarského federálního technologického institutu v Lausanne. Jednalo se o studii vlivu světelného prostředí v kanceláři na osoby s extrémním chronotypem. Studie v reálných podmínkách sledovala individuální světelné preference s cílem určit míru jejich variability mezi jedinci. Subjektivní hodnocení, objektivními výsledky v kognitivních úlohách a fyziologické reakce na světelné prostředí byly srovnávány s cílem zjistit schopnost jednotlivce komplexně posoudit světelné prostředí. Měřena byla také energetická náročnost jednotlivých světelných režimů.

Inter-individuální rozdíly ve světelných preferencích (ad 2.2.1)

Pokud si testované osoby mohly přizpůsobit světelné prostředí svým aktuálním preferencím, potvrdila se hypotéza **H5**, že zvolené světelné prostředí bude blízké přirozenému vnějšímu prostředí, tvořenému denním světlem. Při vyjádření výsledků relativně vzhledem k subjektivnímu času jedince, které umožnilo porovnání v odpovídající cirkadiánní fázi, byly mezi časnými a pozdními chronotypy zjištěny významné rozdíly v osvětlenosti a její časové distribuci během dne, zejména v jeho druhé čtvrtině. Toto zjištění potvrzuje hypotézu **H6**. Výsledky studie nepotvrdily hypotézu **H7**, která očekávala kompenzaci nižší hladiny osvětlenosti u pozdních chronotypů, opak byl pravdou. Možným příčinám tohoto jevu se podrobněji věnuje diskuse výsledků v závěru kapitoly 6.

Vliv světelného prostředí na biologické funkce člověka (ad 2.2.2)

Světelné prostředí ovlivňuje zkoumané biologické funkce člověka, může mít například vliv na rychlost změny jejich stavu v průběhu dne. Na výsledném působení se podílí celá řada faktorů, z nichž některé jsou podrobněji popsány v diskusi výsledků experimentu (viz část 6.5.2). Vliv chronotypu na subjektivní, objektivní a fyziologické reakce nebyl jednoznačný: byl prokázán jen u některých typů testů a často jako součást působení více faktorů.

Výrazné rozdíly mezi chronotypy byly zjištěny v hodnocení subjektivní ospalosti (potvrzena hypotéza **H8**) a v načasování produkce hormonu melatoninu (potvrzena hypotéza **H10**), avšak pouze v režimu tlumeného světla. Pro posouzení režimu jasného světla a režimu dle volby uživatele nebyla získána dostatečná data. Pozitivní vliv režimu konstantního jasného světla na výkonnost se prokázal pouze v nejnáročnějším kognitivním testu. Ani vliv denní doby nebyl jednoznačně prokázán u všech typů kognitivních testů. Nebyl zjištěn výrazný vliv chronotypu na kognitivní funkce, pokud je sledujeme relativně k vnitřnímu času jedinců. Hypotéza **H9** byla vyvrácena.

Vztah mezi subjektivním a objektivním hodnocením bdělosti (ad 2.2.3)

Korelační analýza nepotvrdila (v souladu s hypotézou **H11**, která tímto byla potvrzena) přímou vazbu mezi subjektivním hodnocením bdělosti/ospalosti a objektivními výsledky testů kognitivní výkonnosti. Jen velmi slabá korelace byla nalezena mezi vyšší subjektivní bdělostí a nižší koncentrací hormonu melatoninu ve slinách za běžných

světelných podmínek. Toto zjištění zpochybňuje schopnost jedince objektivně posoudit komplexní vliv světelného prostředí.

Spotřeba elektrické energie na osvětlení, vliv chronotypu a světelného režimu (ad 2.2.4)

Jedním z cílů práce bylo také srovnání světelných režimů z hlediska energetické náročnosti. Výrazně vyšší naměřená spotřeba v režimu s konstantní osvětleností potvrdila hypotézu **H12**. Naopak v rozporu s původní hypotézou (**H13**) bylo zjištění, že se spotřeba elektrické energie neliší mezi chronotypy. Srovnatelná spotřeba u obou chronotypů poukazuje na možnost optimalizovat světelné prostředí dle inter-individuální preferencí bez zvýšení energetické náročnosti systému.

7.2 Shrnutí poznatků

Rytmičné změny osvětlenosti, typické pro střídání dne a noci v přírodním prostředí na Zemi, jsou značně redukovány v prostředí uměle vytvořeném v interiéru budov. Střídání světla a tmy je také nositelem časové informace pro naše vnitřní biologické hodiny. Tato proměnlivost pomáhá pomocí systému nevizuálního vnímání světla synchronizovat vnitřní čas v organismu s časem vnějším. Nedostatečná synchronizace, ať už způsobená kombinací nevhodného světelného prostředí s extrémním fázovým posunem vnitřních cirkadiánních hodin, sníženou citlivostí systému nevizuálního vnímání světla, nebo vnějšími vlivy jako například noční práce či tzv. jet lag, může mít negativní vliv na spánkovou regulaci, výkonnost, náladu a celkově na kvalitu života i zdraví jedince.

Náš výzkum odhalil, že konstantní osvětlení poskytované systémy bez další regulace neodpovídá zcela preferencím uživatelů. U těchto jednoduchých systémů je hladina osvětlenosti buď příliš nízká v průběhu dne, nebo je naopak příliš vysoká navečer a v noci, případně obojí. Výsledky výzkumu podporují skutečnost, že osvětlení, které umožňuje rozložit maximální a redukované hladiny osvětlenosti v denních dobách obdobně jako je tomu u denního světla, je vhodné pro synchronizaci endogenních rytmů biologických hodin u obou skupin extrémních chronotypů. A tedy, pokud považujeme preference extrémních chronotypů jako krajní body možného rozsahu preferencí obecně, měl by tento způsob regulace odpovídat i potřebám běžné populace.

Naše výsledky také ukazují, že někteří jedinci jsou v určitých obdobích subjektivního dne velmi citliví na jasné světlo, které na ně může mít pozitivní nebo negativní dopad v závislosti na fázi jejich vnitřních cirkadiánních hodin. V rámci experimentu osoby s extrémním chronotypem svojí volbou ukázaly, že jsou s ohledem na dlouhodobou cirkadiánní synchronizaci ochotny i k částečným kompromisům ve svém vizuálním komfortu. Rozdíly mezi jedinci je třeba brát v úvahu a umožnit přizpůsobení světelného prostředí pro individuální potřeby. Využití vlivu světla na krátkodobé zvýšení bdělosti je přijatelné pouze s vědomím potenciálního dopadu na dlouhodobou regulaci cirkadiánního systému.

Jako vhodná pro správnou synchronizaci vnitřních biologických hodin u extrémně časných i pozdních chronotypů se osvědčila osvětlenost blízká časovému rozložení denního světla. Toto zjištění podporuje potenciál využití denního světla pro zajištění kvalitního světelného prostředí v budovách. Další možností je navrhování systémů

dynamického osvětlení, které přírodní profil denního světla napodobují. Maximální osvětlenost u těchto systémů je dosahována kolem poledne a v průběhu odpoledne pak dochází k pomalému poklesu až po výrazné snížení osvětlenosti ve večerních hodinách.

Experimentální výsledky potvrdily také hypotézu, že jednotlivec nemusí být schopen subjektivně posoudit celkovou vhodnost světelného prostředí. Nebyla nalezena jednoznačná korelace mezi subjektivním hodnocením a objektivními výsledky. Toto zjištění může ve svém důsledku ovlivnit míru, kterou by se měl jednotlivec podílet na regulaci osvětlení. Pokud není schopen vzít v potaz i dlouhodobé účinky světelného prostředí, mohla by jeho subjektivní volba mít v konečném důsledku negativní vliv na kvalitu jeho života. V tomto případě by bylo vhodnější řídit osvětlenost v budovách pomocí algoritmu, ve kterém budou zahrnuty známé souvislosti osvětlení a fyziologických procesů v těle. Jednotlivec by pak měl možnost pouze částečného přizpůsobení podle svých preferencí. Pro jednoznačné doporučení v tomto ohledu je však nejdříve nutné provést podrobný výzkum v mnohem lépe kontrolovaném prostředí, než byla studie.

Výzkum nepotvrdil očekávané rozdíly ve spotřebě energie na osvětlení mezi chronotypy. Zjistil však, že všechny testované osoby preferovaly jasné světlo v době, kdy je dostupné světlo denní. Toto naznačuje potenciál snížení spotřeby elektrické energie na osvětlení navrhováním objektů s maximálním využitím denního světla. Vhodným řešením mohou být pokročilé systémy, které budou schopné přivádět do budov denní světlo a současně zajistit vysoký vizuální komfort pro uživatele.

7.3 Možnosti pro další výzkum

V experimentu byla získána další data, která nebyla zahrnuta do této práce, a jejichž postupné vyhodnocování na ni plynule naváže. Pro závěry publikované v této práci jsme si mohli dovolit, vzhledem k poměrně vyváženému zastoupení mužů a žen v našem výzkumu (7 mužů a 9 žen v obou skupinách), podrobněji nesledovat zjištěné rozdíly ve vlivu pohlaví. Další analýza dat by se tedy měla soustředit právě na tento faktor. Obecně jsou rozdíly mezi pohlavími stále nedostatečně popsány. Naše data by v tomto ohledu mohla být cenným příspěvkem k objasnění toho, do jaké míry se vliv nevizuálního vnímání světla v různých světelných podmínkách liší mezi pohlavími.

Jak už bylo naznačeno dříve, náš výzkum sledoval vliv světelného prostředí na kognitivní výkonnost a zjistil odlišné efekty dle různých typů a obtížností kognitivních testů. Analýza výsledků dalších, zde nepublikovaných testů (například vizuální testy) by mohla přispět k jasnějším, ucelenějším závěrům.

Při zkoumání světelných preferencí je do značné míry důležité zohlednit vliv ročního období, délky fotoperiody. Náš experiment byl prováděn vyváženě během celého roku, proto jsme tento vliv nezohledňovali. V dalším kroku bychom získaná data chtěli roztrždit s ohledem na vliv ročního období, období stabilní dlouhé/krátké (léto/zima) fotoperiody, stejně jako reakce na změny délky fotoperiody (jarní a podzimní měsíce).

Možnost případného rozšíření o další experiment sledující vliv společnosti na extrémní chronotypy považujeme za přínosné a velmi aktuální. V naší studii byly extrémní chronotypy sledovány v jejich preferovaném cirkadiánním čase, nebyly tedy ovlivněny

jevem zvaným sociální jet lag. Cílem při pokračování výzkumu by bylo srovnání jejich výkonnosti a dalších parametrů při aktivitě v preferované denní době a v denní době běžné ve společnosti (typická pracovní doba od devíti do sedmnácti hodin).

Nejdůležitějším však je předání vědeckých poznatků do praxe, zpřístupnění informací odborné veřejnosti, projektantům a investorům/stavebníkům. Je třeba převést poznatky o dopadech nevizuálního vnímání světla na kvalitu života člověka z odborné řeči biologů do formy přístupné technické veřejnosti tak, aby neztratily svou pravdivost a přesto byly srozumitelné i pro osoby bez biologického vzdělání. Technická univerzita, kde se se základy světelné techniky seznamují mladí lidé, budoucí inženýři, projektanti budov a osvětlovacích systémů, je to pravé místo pro předávání informací. I pro tento účel vznikla tato disertační práce.

7.4 Význam pro praxi navrhování budov

Náš výzkum potvrdil, že z biologického hlediska optimální světelné prostředí zajišťuje denní světlo. Jeho kvalita i kvantita se mění během dne tak, že přirozeně synchronizuje vnitřní biologické hodiny člověka. Pomáhá také redukovat extrémní fázové posuny cirkadiánního rytmu u některých jedinců.

Z pohledu architekta/projektanta budovy je tedy důležité navrhovat objekty tak, aby bylo možno denní světlo využívat v maximální míře. To znamená vytvářet budovy, které umožňují přivádět velké množství denního světla do interiéru, podporují jeho rovnoměrnou distribuci a současně chrání před nežádoucími efekty, jako oslnění nebo vysoký kontrast v zorném poli.

Volbu konkrétního řešení je nutno provádět s ohledem na navrhované využití jednotlivých prostor dané budovy a podle místních podmínek. Univerzální řešení neexistuje. Řešení ochrany před nadměrným kontrastem a oslněním pouze pomocí žaluzií či jiných dodatečných stínících prvků se opakovaně ukazuje jako dlouhodobě nefunkční. Tyto prvky sice zamezí vizuálnímu diskomfortu v okolí osvětlovacích otvorů, ale současně zabrání jejich hlavnímu účelu – přívodu denního světla do interiéru - a ruší vizuální kontakt s vnějším prostředím. Systémy pro přívod denního světla do budovy je proto nutno integrovat již do prvotních fází návrhu a řešit je v úzké spolupráci se specialisty na stavební fyziku a dalšími profesemi, protože často výrazně ovlivňují celkový koncept budovy. Práce architekta je tak náročnější, ale o to důležitější.

V neposlední řadě využití denního světla, které je obnovitelným zdrojem energie a je zcela zdarma, pomáhá snížit spotřebu elektrické energie na osvětlení.

Využití pouze denního světla, zcela bez umělého osvětlení, nepochybně není v dnešní společnosti dosažitelné. Je tedy třeba hledat strategie a koncepty optimalizující využití denního a umělého osvětlení, které umožní soudobý životní způsob, současně ale minimalizují možné nežádoucí efekty a zajistí dostatečnou synchronizaci vnitřních biologických hodin. Systémy umělého osvětlení by měly sloužit jako doplnění denního světla v místě a době jeho nedostatečnosti, nikoli jako hlavní osvětlení prostoru.

Výsledky práce naznačují, že světelné prostředí s trvalou hladinou osvětlenosti není vhodné z hlediska dlouhodobé regulace cirkadiánních rytmů v těle člověka. Pro zajištění

kvalitního prostředí je v regulaci osvětlovacích systémů důležité zohlednění faktoru denní doby. Obdobně jako již dnes používané osvětlení výzkumné stanice na oběžné dráze Země, i běžné osvětlovací systémy budoucnosti by měly být dynamickými, ve své regulaci zohledňovat denní (cirkadiánní) rytmus člověka a upravovat kvantitu a kvalitu světla podle denní či noční doby. To vše doplněné možnostmi zohlednit specifické potřeby citlivých jedinců.

Z pohledu světelného technika, projektanta osvětlovacího systému je důležité zjištění, že výsledky našeho výzkumu zpochybňují schopnost jedince objektivně posoudit vliv světelného prostředí na výkonnost a biologické funkce řízené cirkadiánními hodinami v těle, zejména pokud se jedná o vlivy dlouhodobé. Naopak denní světlo se ukázalo být optimálním synchronizátorem cirkadiánního systému. Nabízí se tedy možnost vytvořit regulaci osvětlení podle jeho vzoru. To v praxi znamená upřednostnění světelných zdrojů se spektrální charakteristikou blízkou dennímu světlu v době jeho dostupnosti a naopak v noci využití zdrojů světla s nízkým podílem biologicky aktivujícího světla v modré oblasti spektra. Současně je žádoucí zvýšit hladinu osvětlenosti v průběhu dne a snížit ji ve večerních a nočních hodinách.

Pro zajištění vhodné regulace je nutno vytvořit sofistikované algoritmy založené na poznatcích z výzkumu fungování nevizuálního systému vnímání světla. Toto je úkol pro další intenzivní biologický a chronobiologický výzkum.

7.5 Širší využitelnost výsledků práce

Zajištění dostatečného vizuálního komfortu, který je nezbytný pro dobrou funkci prostoru, je zakotveno v legislativě. Byl však také prokázán vliv světelného prostředí a zejména jeho změn na cirkadiánní rytmus, regulaci spánku a bdění i řadu dalších fyziologických procesů v organismu člověka. Celý systém je označován jako nevizuální vnímání světla. Přestože jeho potřeby nejsou v současné legislativě zmíněny, nevizuální vnímání světla potenciálně ovlivňuje naši výkonnost, náladu, vnitřní pohodu a při dlouhodobém působení i zdraví. Z těchto důvodů je třeba při navrhování světelného prostředí zohlednit nejen požadavky architektury a stavebnictví, osvětlovací technologie, fyziky a optiky, ale je nutné vzít v potaz i poznatky z biologie a v současné době i z velmi progresivního oboru chronobiologie. Mezioborový přístup napomáhá hledání trvale udržitelných řešení. Je nezbytný pro navrhování budov a osvětlovacích systémů, které budou optimalizovány z hlediska vizuálního komfortu, krátkodobých i dlouhodobých vlivů na uživatele i z hlediska energetické a ekonomické náročnosti. Pochopení a vyvážení všech těchto aspektů, doplněné respektem k rozdílným mezi jedinci, je cestou k zajištění kvalitnějšího světelného prostředí v budovách.

Z celospolečenského pohledu a z pohledu každého jednotlivce stojí za zvážení udržitelnost současného životního stylu moderní společnosti. Faktory jako omezená doba pobytu na denním světle, rozšířená práce v noci, všeobecně (alespoň z biologického pohledu) nízká hladina osvětlenosti v budovách a naopak všudypřítomnost elektrického osvětlení v noční době, to vše lze shrnout do pojmu „světelná hygiena“. Její nedodržování se může projevit zvýšením výskytu poruch spánkové regulace, problému se spánkem, sezonní deprese i jiných psychických a nejen psychických onemocnění. Společnost by také měla věnovat pozornost specifickým

skupinám jedinců, jako jsou senioři, adolescenti nebo extrémní chronotypy, u kterých při nedodržení vhodného rozložení osvětlenosti během dne hrozí výrazné negativní důsledky na kvalitu života.

Seznam přímých citací v textu

- Str. 5 Rashid Hani (2014). *10 years of daylight*, in: Daylight & Architecture magazine by Velux Group, summer 2014, issue 21, p. 25.
- Str. 8 Jean-Louis Scartezzini (2004). In: Andersen, M (2004). *Innovative bidirectional video-goniophotometer for advanced fenestration systems* Doctoral Thesis, École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL n° 2941.
- Str. 8 Veitch Jennifer (1999). Chapter 13: *Lighting for high-quality workplaces*. In: Creating the productive workplace, CRC Press, ISBN: 978-0419236900, p. 208.
- Str. 9 Gautama Buddha (AN 7.58). *Capala (Pacala) Sutta*: Nodding. translated from the Pali by Thanissaro Bhikkhu. [online cit. 5.5.2015] Access to Insight (Legacy Edition), 30 November 2013, Dostupné z <http://www.accesstoinight.org/tipitaka/an/an07/an07.058.than.html>
- Str. 9 Russell Foster (2011). Lecture: *Body clocks, light, sleep and health*. Daylight symposium, Lausanne, 4.5.2011. [online 20.3.2014] Dostupné z <http://thedaylightsite.com/symposium/2011-2/presentations/>
- Str. 9 Kaňka Jan (2014). Přednáška: *Denní osvětlení a oslunění bytů v České republice v průběhu desetiletí*. 10. 10. 2014 v rámci LUMEN V4, Světelné konference vyšegradských států. Visegrad, Maďarsko
- Str. 11 William Ford Jr (2012) at the opening ceremony of new Silicon Valley lab, 25th June 2012.
- Str. 16 Og Mandino (1968). *The Greatest Salesman in the World*, New York: Bantam Books, ISBN 9780553277579.
- Str. 22 Marcel Kabát (1974). *Ten kouzelný čas dětství*, Melantrich, Praha 1974, p. 168.
- Str. 22 Stanislav Holubec (2009). *Lidé periferie*. Západočeská universita v Plzni, ISBN 978-80-7043-834-3, p. 97.
- Str. 31 Matt Ridley (2011). *The Rational Optimist: How Prosperity Evolves*, Harper Perennial, ISBN 978-0061452062, p. 20-21.
- Str. 32 Charles A. Czeisler (2013). *Perspective: casting light on sleep deficiency*. Nature 23;497(7450), p13.
- Str. 33 Leonardo Da Vinci (2013). *Leonardo's Notebooks. Writing and Art of the Great Master*. ISBN 978-1579129460 Black Dog & Leventhal Publishers.

- Str. 54 Winston Churchill (1943). The talk at House of Commons (meeting in the House of Lords), 28th October 1943.
- Str. 56 odstavec 4.13, *Variabilita světla*. In: ČSN EN 12464-1 (2012). Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory. Česká technická norma (ČSN), str. 19
- Str. 57 Příloha H, odstavec H.2 *Biodynamické osvětlení*. In: ČSN EN 15193 (2008). Energetická náročnost budov – Energetické požadavky na osvětlení. Česká technická norma (ČSN), p. 54.
- Str. 75 Charles A. Czeisler (2013). *Perspective: casting light on sleep deficiency*. Nature 23;497(7450), p13.
- Str. 76 Helen C. Long (1993). *The Edwardian House: The Middle-class Home in Britain, 1880-1914*. Manchester University Press, ISBN-13: 978-0719037290, p. 91.
- Str. 77 Sherman Alexie, Ellen Forney (2007). *The Absolutely True Diary of a Part-time Indian*, New York: Little, Brown. Print .
- Str. 175 Samer Hattar (2014). Keynote lecture: *Retinal and Brain circuits underlying the effects of light on mood*. SLTBR Annual Meeting, Wien, June 2014.

Seznam použité literatury

Åkerstedt T, Gillberg M (1990). *Subjective and objective sleepiness in the active individual*. Intern J Neuroscience, 52: p. 29-37.

Alhola P, Polo-Kantola P (2007). *Sleep deprivation: Impact on cognitive performance*. Neuropsychiatric Disease and Treatment, 3(5), 553–567.

Andersen, M (2004). Innovative bidirectional video-goniophotometer for advanced fenestration systems Doctoral Thesis, École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL n° 2941. doi:10.5075/epfl-thesis-2941.

Arble DM, Bass J, Laposky AD, Vitaterna MH, Turek FW. (2009). *Circadian timing of food intake contributes to weight gain*. Obesity. 2009;17:2100–2102.

Arendt J (2012). *Biological Rhythms During Residence in Polar Regions*. Chronobiology International, 29(4): 379–394.

Ariës MBC (2005). *Human lighting demands: healthy lighting in an office environment*. Dept Architect, Build Plann 2005:158.

Aries, MBC (2005) *Human lighting demands, healthy lighting in an office environment*, in Department of the Built Environment. 2005, University of Technology Eindhoven: Eindhoven, The Netherlands.

Armitage R, Smith C, Thompson S, Hoffman R (2001). *Sex differences in slow wave activity in response to sleep deprivation*. Sleep Res Online. 4:33–41.

Badia P, et al. (1991). *Bright light effects on body temperature, alertness, EEG and behavior*. Physiology & Behavior. 50(3): p. 583 - 588.

Bach M (1996). *The Freiburg visual acuity test-automatic measurement of visual acuity*. Optometry & Vision Science, 73(1):49.

Basner M (2011). *Sleep duration and chronic sleep debt: are 6 hours enough?* Biol Psychol. 2011;87:15–16.

Bauer SE, Wagner SE, Burch J, Bayakly R and Vena JE (2013). *A case-referent study: light at night and breast cancer risk in Georgia*. International Journal of Health Geographics 12:23, doi:10.1186/1476-072X-12-23.

Begemann SHA, et al. (1997). *Daylight, artificial light and people in an office environment. Overview of visual and biological responses*. International Journal of Industrial Ergonomics, 20, p 231–9.

Bierman A, Klein TR, Rea MS (2005). *The Daysimeter: a device for measuring optical radiation as a stimulus for the human circadian system*. Meas Sci Technol 16: 2292–9, doi: 10.1088/0957-0233/16/11/023

Blatter K, Cajochen C (2007). *Circadian rhythms in cognitive performance: Methodological constraints, protocols, theoretical underpinnings*. Physiology & Behavior 90 196–208.

Bommel WJM van, van den Beld GJ (2004). *Lighting for work: a review of visual and biological effects*. Lighting Res. Technol. 36/4, p. 255–269.

- Borbély AA (1982). *A two process model of sleep regulation*. Hum Neurobiol. 1(3):195-204.
- Borisuit A (2013b) *The impact of light including non-image forming effects on visual comfort*. Disertační práce 6007. EPFL - Ecole Polytechnique Federal de Lausanne. doi:10.5075/epfl-thesis-6007
- Borisuit A, et al. (2011). *Comparison of objective and subjective visual comfort and associations with non-visual functions in young subjects*. in Proceedings of CISBAT 2011. International Scientific Conference. Lausanne, Switzerland.
- Borisuit A, et al. (2013a). *Assessment of circadian weighted radiance distribution using a cameralike light sensor*. in Proceedings of CISBAT 2013 International Scientific Conference. Lausanne, Switzerland.
- Boyce PR, Eklund NH, Simpson SN (2000). *Individual lighting control: Task performance, mood and illuminance*. Journal of the Illuminating Engineering Society 29(1): p. 131-142.
- Brainard GC, et al. (2001). *Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor*. Journal of Neuroscience 21:16, p. 6405-6412.
- Brainard GC, Coyle W, Ayers M, Kemp J, Warfield B, Maida JC, Bowen C, Bernecker C, Lockley SW, Hanifin JP (2012). *Solid-state lighting for the International Space Station: Tests of visual performance and melatonin regulation*. Acta Astronautica. 92(1): p. 21-28. doi: 10.1016/j.actaastro.2012.04.019.
- Brainard GC, Hanifin JP (2005). *Photons, clocks, and consciousness*. J Biol Rhythms. 20(4):314-25.
- BREEAM, 2011. *Health and Wellbeing, 01 Visual comfort*. [online, 20. 4. 2015] Dostupné z http://www.breeam.org/BREEAM2011SchemeDocument/Content/05_health/hea01.htm
- Brown TM, Allen AE, al-Enezi J, Wynne J, Schlangen L, Hommes V, et al. (2013) *The melanopic sensitivity function accounts for melanopsin-driven responses in mice under diverse lighting conditions*. PLoS ONE 8(1): e53583. doi:10.1371/journal.pone.0053583.
- Burnett D (2012), *Circadian adaptive lighting (USA)*, promoted by <http://www.deborahburnett.com> [online 20. 4. 2015]. Dostupné z http://www.photonstartechnology.com/Main_Upload/2012_Circadian_Adaptive_Lighting_Burnett.pdf
- Butler DL & Biner PM (1989). *Effects of setting on window preferences and factors associated with those preferences*. Environment and Behavior, 21, 17-31.
- Buxton OM, Cain SW, O'Connor SP, et al. (2012). *Adverse metabolic consequences in humans of prolonged sleep restriction combined with circadian disruption*. Sci Transl Med. 4:129ra143.
- Buysse DJ, et al.. (1989). *The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research*. Psychiatry Res. 28(2):193-213.
- Cain SW, Dennison CF, Zeitzer JM, Guzik AM, Khalsa SBS, Santhi N, et al. (2010). *Sex differences in phase angle of entrainment and melatonin amplitude in humans*. J. Biol. Rhythms 25 (4), 288–296.
- Cajochen C (2007). *Alerting effects of light*. Sleep Medicine Reviews, 11(6): p. 453 - 464.
- Cajochen C, et al. (2005). *High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light*. The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 90, 1311-6.

Cajochen C, et al. (2011). *Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance*. Journal of Applied Physiology, 110(5): p. 1432-1438.

Cajochen C, Chellappa SL, Schmidt C (2014). *Circadian and Light Effects on Human*. In: Garbarino S, Nobili L, Costa G. *Sleepiness and Human Impact Assessment*. Springer-Verlag. p. 9 - 22. DOI: 10.1007/978-88-470-5388-5_2.

Cajochen C, Kräuchi K, Wirz-Justice A. (2003). *Role of melatonin in the regulation of human circadian rhythms and sleep*. J Neuroendocrinol;15:432-7

Cajochen C, Zeitzer JM, Czeisler CA, Dijk DJ (2000). *Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness*. Behavioural Brain Research, 115 75-83.

CDCP - Centers for Disease Control and Prevention (2008). *Perceived insufficient rest or sleep among adults—United States (2008)*. MMWR 2009;58(42):1175–9.

CDCP - Centers for Disease Control, Prevention (2011). *Effect of short sleep duration on daily activities – United States, 2005–2008*. MMWR Morb Mortal Wkly Rep. 2011;60:239–242.

CIE, 2015. *Technical Committees*. [online, 20. 4. 2015]. Dostupné z <http://www.cie.co.at/index.php/Technical+Committees>.

Conlon M, Lightfoot N, Kreiger N (2007). *Rotating shift work and risk of prostate cancer*. Epidemiology 18: p.182–183.

Cos S, Sanchez-Barcelo EJ (2000). *Melatonin, experimental basis for a possible application in breast cancer prevention and treatment*. Histol Histopathol 15(2):637–47.

Costa G, Haus E, Stevens R. (2010). *Shift work and cancer—considerations on rationale, mechanisms, and epidemiology*. Scand J Work Environ Health 36:163–179.

Curran-Everett D (2000). *Multiple comparisons: philosophies and illustrations*. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. 2000 Jul;279(1):R1-8.

Czeisler CA (2013). *Perspective: casting light on sleep deficiency*. Nature. 2013 May 23;497(7450):S13. doi: 10.1038/497S13a.

Czeisler CA (2015). *Duration, timing and quality of sleep are each vital for health, performance and safety*. Sleep Health 1, p. 5–8. Doi: 10.1016/j.sleh.2014.12.008

Czeisler CA, Gooley JJ (2007). *Sleep and circadian rhythms in humans*. Cold Spring Harbor Symposia Quantitative Biology 72:579-97.

Czeisler CA, et al. (1999). *Stability, precision and near-24-hour period of the human circadian pacemaker*. Science, 284(5423): p. 2177-2181.

ČSN 36 0048 (1960). *Osvětlování obytných budov*. Československá státní norma.

ČSN 36 0450 (1986) *Umělé osvětlení vnitřních prostorů*. Československá státní norma. (ČSN).

ČSN 360020 (2015). *Sdružené osvětlení*. Česká technická norma (ČSN).

ČSN 73 0020 (1955) *Obytné budovy*. Československá státní norma.

ČSN 73 0580-1 (2007). *Denní osvětlení budov – Část 1: Základní požadavky*. Česká technická norma (ČSN).

ČSN EN 12464-1 (2003) *Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory*. Česká technická norma (ČSN). Kat. čís.: 67592.

ČSN EN 12464-1 (2012). *Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory*. Česká technická norma (ČSN).

ČSN EN 15193 (2008). *Energetická náročnost budov – Energetické požadavky na osvětlení*. Česká technická norma (ČSN).

Curiavtkov (nedatováno), Technická keramika. [online 10.4.2015]. Dostupné z <http://www.curiavtkov.cz/prace81.html>

Danilenko KV, Verevkin EG, Antyufeev VS, Anna Wirz-Justice A, Cajochen C (2013). *The hockey-stick method to estimate evening dim light melatonin onset (DLMO) in humans*. Chronobiology International, Early Online: 1–7.

Daurat A, et al. (1993). *Bright light affects alertness and performane rhythms during a 24–h constant routine*. Physiology & Behavior, 53(5): p. 929–936.

Daurat, A., Foret, J., Touitou, Y., Benoit, O. (1996). *Detrimental influence of bright light exposure on alertness, performance, and mood in the early morning*. Neurophysiol Clin 26(1): p. 8–14.

de Beaune SA, White R (1987). *Paleolithic lamps and their specialization: A hypothesis*. Current Anthropology, Vol 28, No. 4, pg 569–577.

de Kort YAW, Smolders KCHJ (2010). *Effects of dynamic lighting on office workers: First results of a field study with monthly alternating settings* Lighting Research & Technology; Sep2010, Vol. 42 Issue 3, p345 2010.

Dewald JF, Meijer AM, Oort FJ, Kerkhof GA, Bögels SM (2010). *The influence of sleep quality, sleep duration and sleepiness on school performance in children and adolescents: a meta-analytic review*. Sleep Med Rev, 14, p. 179–89.

DGNB, 2015. *DGNB criteria*. [online, 20. 4. 2015]. Dostupné z <http://www.dgnb-system.de/en/system/criteria/core14/>

Dijk DJ, Duffy JF, Czeisler CA. (1992). *Circadian and sleep/wake dependent aspects of subjective alertness and cognitive performance*. J Sleep Res. Jun;1(2):112–7.

Dijk DJ, von Schantz M (2005). *Timing and Consolidation of Human Sleep, Wakefulness, and Performance by a Symphony of Oscillators*. J Biol Rhythms August 20(4): p. 279–290.

DIN (2013), *Biologisch wirksame Beleuchtung - Planungsempfehlungen, in Biologically Effective Illumination -Design Guidelines*. DIN: Germany.

Dinges DF, Powell JW (1985). *Microcomputer analyses of performance on a portable, simple visual RT task during sustained operations*. Behav Res Methods Instrum Comput. 1985;17:625–55.

Driscoll TR, Grunstein RR, Rogers NL. (2007). *A systematic review of the neurobehavioural and physiological effects of shiftwork systems*. Sleep Med Rev 11:179–194.

Duffy JF, Dijk DJ, Hall EF, Czeisler CA (1999). *Relationship of endogenous circadian melatonin and temperature rhythms to self-reported preference for morning or evening activity in young and older people*. J Investig Med. 1999 Mar;47(3):141–50.

Duffy JF, Rimmer DW, Czeisler CA (2001). *Association of intrinsic circadian period with morningness-eveningness, usual wake time, and circadian phase*. Behav Neurosci 115:8895–899.

Enezi J al., et al., (2011) A "melanopic" spectral efficiency function predicts the sensitivity of melanopsin photoreceptors to polychromatic lights. *Journal of Biological Rhythms*. 26(4): p. 314-323.

Figueiro M, et al. (2013). *Comparisons of three practical field devices used to measure personal light exposures and activity levels*. *Lighting Research and Technology*, 45(4): p. 421-434.

Fossum IN, Nordnes LT, Storemark SS, Bjorvatn B, Pallesen S (2014). *The association between use of electronic media in bed before going to sleep and insomnia symptoms, daytime sleepiness, morningness, and chronotype*, *Behavioral Sleep Medicine*, 12:5, p. 343-357.

Foster GR, Roenneberg T (2008). *Human responses to the geophysical daily, annual and lunar cycle*. *Curr Biol*.18(17):R784-R794. doi: 10.1016/j.cub.2008.07.003.

Foster R (2011). *Body clocks, light, sleep and health*. Lecture at Daylight symposium, Lausanne, 4.5.2011. [online 20.3.21014] Dostupné z <http://thedaylightsite.com/symposium/2011-2/presentations/>

Foster RG, Hankins MW (2007). *Circadian vision*. *Current Biology* Vol 17 No 17 R746

Foster RG, Wulff K (2005). *The rhythm of rest and excess*. *Nat Rev Neurosci*. 6:407-414.

Fotios S, Cheal C (2010). *Stimulus range bias explains the outcome of preferred-illuminance adjustments*. *Lighting Research and Technology* 42, no. 4: p. 433-447.

Galasiu AD and Veitch JA (2006). *Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review*. *Energy and Buildings* 38: p. 728-742.

Gall D (2004). *Die Messung circadianer Strahlungsgrößen*. In: *Proceeding of the Licht und Gesundheit 2004*. Berlin.

Gall, D. and K. Bieske (2004). *Definition and measurement of circadian radiometric quantities*. in *CIE Symposium 2004 on Light and Health: Non-Visual Effects*. Vienna, Austria: Commission internationale de l'éclairage.

Gasio PF, Kräuchi K, Cajochen C, van Someren E, Amrhein I, Pache M, Savaskan E, Wirz-Justice A (2003). *Dawn-dusk simulation light therapy of disturbed circadian rest-activity cycles in demented elderly*. *Experimental Gerontology*. Volume 38, Issues 1-2, p. 207-216.

Gooley JJ, Chamberlain K, Smith KA, Khalsa SB, Rajaratnam SM, Van Reen E, Zeitzer JM, Czeisler CA, Lockley SW (2011). *Exposure to room light before bedtime suppresses melatonin onset and shortens melatonin duration in humans*. *J. Clin. Endocrinol. Metab*. 96, E463-E472.

Goulet G, et al.. (2007) *Daily light exposure in morning-type and evening-type individuals*. *Journal of Biological Rhythms* 22, 151-8.

Halberg, F. (1963). *Circadian (about Twenty-four-hour) Rhythms in Experimental Medicine* [Abridged]. *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, 56(4), 253-257.

Hansen J (2001). *Increased breast cancer risk among women who work predominantly at night*. *Epidemiology* 12, p. 74-77.

Hattar, S., et al., *Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity*. *Science*, 2002. 295(5557): p. 1065-70.

Hébert, M., Martin, S. K., Lee, C., & Eastman, C. I. (2002). *The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans*. *Journal of Pineal Research*, 33(4), 198-203.

Heeg S, Striffler C (2010). *Überblick: lichtgestaltung in Pflegesettings für Menschen mit Demenz*. In DeSS, Licht und Demenz 1: 10, p. 7-16.

Holubec S (2009). *Lidé periferie*. Západočeská universita v Plzni, s. 97, 121, 168. ISBN 978-80-7043-834-3.

Horne JA, Östberg O, (1976). *A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms*. Int. J. Chronobiol. 4:97-110.

Hubalek S, Brink M, Schierz C (2010). *Office workers' daily exposure to light and its influence sleep quality and mood*. Lighting Research & Technology 42, 43-50.

Hubalek S, Zöschg D, Schierz C (2006). *Ambulant recording of light for vision and nonvisual biological effects*. Lighting Research and Technology, 38(4): p. 314-324.

Hurden A, et al. (1999). *Visual performance at mesopic light levels: An empirical model*. Lighting Research and Technology, 31(3): p. 127-131.

Chang, A-M, Santhi N, St Hilaire M, Gronfier C, Bradstreet DS, Duffy JF, Lockley SW, Kronauer RE, Czeisler CA (2012). *Human responses to bright light of different durations*. The Journal of Physiology, 590: 3103–3112. doi: 10.1113/jphysiol.2011.226555.

Chao CY, Wu JS, Yang YC, et al. (2011). *Sleep duration is a potential risk factor for newly diagnosed type 2 diabetes mellitus*. Metabolism. 2011;60:799–804.

Charity M (nedatováno). What color is a blackbody?- some pixel rgb values. [online 10.10.2014]. Dostupné z <http://www.vendian.org/mncharity/dir3/blackbody/>.

Chellappa SL, Viola AU, Schmidt C, Bachmann V, Gabel V, Maire M, Reichert CF, Valomon A, Landolt HP, Cajochen C (2014). *Light modulation of human sleep depends on a polymorphism in the clock gene Period3*. Behav Brain Res. 271:23-9.

Chen JD, Lin YC, Hsiao ST (2010) *Obesity and high blood pressure of 12-hour night shift female clean-room workers*. Chronobiol Int 27: 334–344.

Cho K (2001). *Chronic 'jet lag' produces temporal lobe atrophy and spatial cognitive deficits*. Nature Neuroscience 4, p. 567 – 568. doi:10.1038/88384.

IES (2008) Light and human health committee, *Light and human health: an overview of the impact of optical radiation on visual, circadian, neuroendocrine, and neurobehavioral responses*, IES of North America, ISBN 978-0-87995-228-0.

Ichimori A, Tsukasaki K, Koyama E (2012). *Measuring illuminance and investigating methods for its quantification among elderly people living at home in Japan to study the relationship between illuminance and physical and mental health*. Geriatr Gerontol Int. 13(3):798-806. doi: 10.1111/ggi.12021.

Illnerová H (1996). *Melatonin a jeho působení*. Vesmír 75, 266-269.

Illnerová H, Borbély AA, Wirz-Justice A, Prasko J (2000). *Circadian rhythmicity: from basic science to clinical approach*. Suppl Clin Neurophysiol. 53, p.339-47.

Illnerová H, Sumová A. (2008). *Vnitřní časový systém*; 10 (7 a 8). Interní Med. 2008; 10 (7 a 8): 350–352.

Illnerová H. (2008). *Melatonin, jeho tvorba a působení*. [online] Chemické listy 27/ 3. Bulletin Asociace českých chemických společností 273. [cit 06.04.2015]. Dostupné z <http://chemicke-listy.cz/Bulletin/bulletin273/melaton.html>

Irwin M., et al. (1996). *Partial night sleep deprivation reduces natural killer and cellular immune responses in human*. FASEB J. 10, p. 643-653.

ISO 23539 (2005) E /CIE S 010/E:2004 standard: *Photometry — The CIE system of physical photometry*. CIE Cental Bureau, Vienna.

Jaeggi SM, Seewer R, Nirkko AC, Eckstein D, Schroth G, Groner R, Gutbrod K. (2003). *Does excessive memory load attenuate activation in the prefrontal cortex? Load-dependent processing in single and dual tasks: functional magnetic resonance imaging study*. Neuroimage. Jun 19(2 Pt 1):210-25.

Jelínková-Vondrášová D, Hájek i, Illnerová H (1999) *Adjustment of the human circadian system to changes of the sleep schedule under dim light at home*. Neuroscience Letters 265, p. 111-114.

Jenni OG, Achermann P, Carskadon MA (2005). *Homeostatic sleep regulation in adolescents*. Sleep. Nov;28(11):1446-54.

Jewett ME, Kronauer RE, Czeisler CA (1994). *Phase-amplitude resetting of the human circadian pacemaker via bright light: a further analysis*. J Biol Rhythms 9: 295–314.

Johns MW. (1991). *A new method for measuring daytime sleepiness: The Epworth sleepiness scale*. Sleep, 14(6):540-545.

Juslén HT, Wouters MCHM, Tenner AD (2005). *Preferred task-lighting levels in an industrial work area without daylight*. Lighting Research & Technology. 37,3, 219-233.

Kessler RC, Berglund PA, Coulouvrat C, Hajak G, Roth T, Shahly V, Shillington AC, Stephenson JJ, Walsh JK. (2011). *Insomnia and the performance of US workers: results from the America insomnia survey*. Sleep. 34(9):1161-71. doi: 10.5665/SLEEP.1230

Kloog I, Portnov BA, Rennert HS, Haim A (2011). *Does the modern urbanized sleeping habitat pose a breast cancer risk?* Chronobiol Int. 28(1):76-80. doi: 10.3109/07420528.2010.531490.

Kobayashi D, Takahashi O, Deshpande GA, Shimbo T, Fukui T. (2012). *Association between weight gain, obesity, and sleep duration: a large-scale 3-year cohort study*. Sleep Breath. 16, p. 829–833.

Kosto A (2015). *Microstructured glazing for daylighting, glare protection, seasonal thermal control and clear view*. Doctoral Thesis, École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL, n° 6465.

Kupermann M, et al. (1995). *Sleep problems and their correlates in a working population*. J Gen Intern Med.10(1) p.25-32.

Lamb TD, Collin SP, Pugh EN (2007). *Evolution of the vertebrate eye: opsins, photoreceptors, retina and eye cup*. Nature Reviews Neuroscience 8, 960-976. doi:10.1038/nrn2283.

Le Goff J (1991). *Kultura středověké Evropy*. Odeon, p.317-318. ISBN 80-7021-808-8.i89

LEED v4, 2015. *LEED v4 for building design and construction*. [online], publikováno a platné od 1.4.2015. Dostupné z <http://www.usgbc.org/resources/leed-v4-building-design-and-construction-current-version>

LeGates TA, Fernandez DC, Hattar S (2014). *Light as a central modulator of circadian rhythms, sleep and affect*. Nature Reviews Neuroscience 15, 443–454. doi:10.1038/nrn3743

Leibowitz HW. (1987) *Ambient illuminance during twilight and from the moon*. In: *Night vision: current research and future directions*. Symposium proceedings. National Academy Press. Washington D. C. ISBN: 978-0-309-07796-5.

Leichtfried V, et al. (2015). Intense illumination in the morning hours improved mood and alertness but not mental performance. *Applied Ergonomics* 46, p. 54-59.

Lewy AJ (2007) *Melatonin and human chronobiology*. Cold Spring Harb Symp Quant Biol. 2007;72:623-36. doi: 10.1101/sqb.2007.72.055.

Lewy AJ, et al. (1980). *Light suppresses melatonin secretion in humans*. *Science*, 210(4475): p. 1267 - 1269.

LightingEurope (2013). *Market study: human centric lighting*. [online 21. 4. 2015]. Dostupné z http://www.lightingeurope.org/uploads/files/Market_Study-Human_Centric_Lighting_Final_July_2013.pdf

Lichtwissen Heft 19(nedatováno). *Wirkung des Lichts auf den Menschen*. [online 21. 4. 2015]. ISBN 978-3-926193-97-1. Dostupné z <http://www.licht.de/de/service-info/publikationen-und-downloads/heftreihe-lichtwissen/>

Linhart F (2009). *Energetic, visual and non-visual aspects of office lighting*, Doctoral Thesis, École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL, n° 4634 .

Lockley SW, et al. (2003). *High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light*. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 88, 4502–4505 44.

Lockley SW, Evans EE, Scheer FA, Brainard GC, Czeisler CA, Aeschbach D. (2006) *Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans*. *Sleep*. 29(2):161-8.

Lockley SW (2009). *Circadian rhythms: influence of light in humans*. *Encyclopedia of Neuroscience* p. 971-988.

Lucas RJ, et al. (2014). *Measuring and using light in the melanopsin age*. *Trends in Neurosciences*, Vol. 37, No. 1.

Lucas RJ, Peirson SN, Berson DM, Brown TM, Cooper HM, Czeisler CA, Figueiro MG, Gamlin PD, Lockley SW, O'Hagan JB, Price LLA, Provencio I, Skene D and Brainard GC (2014). *Measuring and using light in the melanopsin age*. *Trends in Neurosciences* 37/1, p.1-9.

Mardaljevic J, Heschong L, Lee E (2009). *Daylight Metrics and Energy Savings*. *Lighting Res. Technol.* 41(3): p. 261–283.

Martin MO & Mullis IVS (Eds.) (2013). *TIMSS and PIRLS 2011: Relationships among reading, mathematics, and science achievement at the fourth grade—Implications for early learning*. Chestnut Hill, MA: TIMSS & PIRLS International Study Center, Boston College.

Mathis J, Hess CW (2009) *Sleepiness and vigilance tests*. *Swiss Med Wkly*, 139(15–16):214–219

Matricciani L, Olds T, Petkov J (2012). *In search of lost sleep: secular trends in the sleep time of school-aged children and adolescents*. *J. Sleep Med. Rev.* 16, p. 203–211.

MCTQ 2005, [online] *Munich Chronotype Questionnaire*, [cit. 20. 3. 2015] Dostupné z: https://www.bioinfo.mpg.de/mctq/core_work_life/core/introduction.jsp?language=eng

Mencl V (1980). *Lidová architektura v Československu*. Academia 20-061-79.

Mong JA, et al. (2011). *Sleep, Rhythms, and the Endocrine Brain: Influence of Sex and Gonadal Hormones*. *J Neurosci.* 31(45): 16107–16116. doi:10.1523/J Neurosci.4175-11.2011.

Mongrain V, Carrier J, Dumont M (2006). *Circadian and homeostatic sleep regulation in morningness-eveningness*. Journal of Sleep Research, 15: 162–166. doi: 10.1111/j.1365-2869.2006.00532.

Münch M, et al. (2006). *Wavelength-dependent effects of evening light exposure on sleep architecture and sleep EEG power density in men*. American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology 290, 1421–8.

Münch M, Kawasaki A (2013). *Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells: classification, function and clinical implications*. Curr Opin Neurol. 26(1):45–51. doi: 10.1097/WCO.0b013e32835c5e78.

Münch M, Linhart F, Borisuit A, Jaeggi SM, Scartezzini JL. (2012). *Effects of prior light exposure on early evening performance, subjective sleepiness, and hormonal secretion*. Behav Neurosci. 126(1):196–203. doi: 10.1037/a0026702. Epub 2011 Dec 26.

Münch M, Scheuermaier KD, Zhang R, Dunne SP, Guzik A, Silva EJ, Ronda JM, Duffy JF (2011). *Effects on subjective and objective alertness and sleep in response to evening light exposure in older subjects*. Behavioural Brain Research. 224(2):272–8.

Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanovují podmínky ochrany zdraví při práci, novela č. 68/2010 Sb., č. 93/2012 Sb., č. 9/2013 Sb.

Nordhaus WD (1997). *Do Real-Output and Real Wage Measures Capture Reality? The History of Lighting Suggests Not*. Cowles Foundation Paper no. 957, Yale.

Nováková M, Sládek M, Sumová A (2013). *Human chronotype is determined in bodily cells under real-life conditions*. Chronobiology International, 30(4): 607–617.

Phipps-Nelson J, Redman JR, Dijk DJ, Rajaratnam SM. (2003). *Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance*. Sleep. 26(6):695–700.

Plháková A, Dostál D, Janečková D (2013). *Cirkadiánní preference ve vztahu k depresivitě, subjektivní kvalitě spánku a cloningrovým dimenzím osobnosti*. Čes a slov Psychiat, 109(3): 107–114.

Polyak S (1957). *The vertebrate visual system*. Univ. Chicago Press, Chicago.

Provencio I, Cooper HM, Foster RG (1998). *Retinal projections in mice with inherited retinal degeneration: Implications for circadian photoentrainment*. Journal of Comparative Neurology, 395(4): p. 417–439.

Provencio I, Rollag MD, Castrucci AM (2002). *Photoreceptive net in the mammalian retina. This mesh of cells may explain how some blind mice can still tell day from night*. Nature 415(6871):493.

Rea MS, et al. (2005). *A model of phototransduction by the human circadian system*. Brain Research Reviews, 50(2): p. 213–228.

Robek A, Moravcová M, Šťastná J (1981). *Stará dělnická Praha, život a kultura pražských dělníků 1848–1939*. Academia, 1981, s. 121, 158. 509–21–858.

Roenneberg T, Merrow M (2007a). *Entrainment of the human circadian clock*. Cold Spring Harb Symp Quant Biol. 72:293–9.

Roenneberg, T, Kumar CJ, and Merrow M (2007b). *The human circadian clock entrains to sun time*. Curr. Biol. 17, R44–45.

Roenneberg, T, Wirz-Justice A, Mellow M, (2003b). *Life between clocks: daily temporal patterns of human chronotypes*. Journal of Biological Rhythms, 18(1): p. 80-90.

Roenneberg T, Kuehnle T, et al. (2004). *A marker for the end of adolescence*. Curr. Biol. 14 (24), p. 1038–1039.

Roenneberg T, Daan S, Mellow M (2003a). *The art of entrainment*. Journal of Biological Rhythms, 18(3): p. 183 - 194.

Rüger M, Gordijn MC, Beersma DG, de Vries B, Daan S. (2006) *Time-of-day-dependent effects of bright light exposure on human psychophysiology: comparison of daytime and nighttime exposure*. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. 290(5) p. 1413-20.

Rushton WAH (1972). Light and dark adaptation. Investigative Ophthalmology 11 (6), p. 503-517.

Samková L, Vondrašová D, Hájek I, Illnerová H (1997). *A fixed morning awakening coupled with a low intensity light maintains a phase advance of the human circadian system*. Neuroscience Letters 224, p. 21–24.

Scartezzini JL, Courret G (2002). *Anidolic daylighting systems*. Solar Energy, 73(2):123–135.

Schernhammer ES, Laden F, Speizer FE, Willett WC, Hunter DJ, et al. (2001). *Rotating night shifts and risk of breast cancer in women participating in the nurses' health study*. J Natl Cancer Inst 93: 1563–1568.

Schmidt C, et al. (2009), *Homeostatic sleep pressure and responses to sustained attention in the suprachiasmatic area*. Science 324 (5926), 516-9.

Schoof, J. (2013). *Daylight as a driving force for urban transformation*. Daylight & Architecture, Velux, issue 19, s. 106-115 ISSN 1901-0982

Směrnice Rady 2010/31/EU, o energetické náročnosti budov (přepřevládání 2002/91/ES).

Směrnice Rady 89/391/ESH, o zavádění opatření pro zlepšení bezpečnosti a ochrany zdraví zaměstnanců při práci (11/1989).

Smolders KC, de Kort YA, Cluitmans PJ (2012). *A higher illuminance induces alertness even during office hours: findings on subjective measures, task performance and heart rate measures*. Physiology and Behaviour, 107(1): p. 7–16.

Spectrum Illumination (2011). LED Information [online 20.5.2014] Dostupné z <http://www.spectrumillumination.com/>

Staedt J, et al. (2009), *Einfluss erhöhter Lichtintensität auf die Verweildauer von stationär behandelten depressiven Patienten*. Nervenheilkunde, 2009. 28(4): p. 223-226.

Svoboda E a kol (2003). *Přehled středoškolské fyziky*. Dotisk 3. vydání. Prometheus, s. 352, 396. ISBN 80-7196-116-7.

Svoboda J (2009). *Čas lovců. Aktualizované dějiny paleolitu*. 1. vyd. Brno: Nadace Universitas; Akademické nakladatelství CERM, 298 s. Panorama biologické a sociokulturní antropologie. ISBN 978-80-7204-628-7.

Šíma Z (nedatováno). *Staroměstský orloj - hi-tech 14. století*. <http://www.lhainz.cz/staromestsky-orloj/> on 19.11.2013.

Škabrada J (2005). *Lidové stavby, architektura českého venkova*. ARGO. s. 20-22. ISBN 80-7203-082.

- Thapan K, Arendt J, Skene DJ (2001). *An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor*. Journal of Physiology 535, no. 1, p. 261-267.
- Thorne HC, Jones KH, Peters SP, Archer SN, Dijk DJ (2009) *Daily and seasonal variation in the spectral composition of light exposure in humans*. Chronobiol Int. 26(5) p. 854-66.
- Morgrain V, et al. (2006). *Circadian and homeostatic sleep regulation in morningness-eveningness*. Journal of Sleep Research 15, p. 162-6.
- van de Kraats J, van Norren D (2007). *Optical density of the aging human ocular media in the visible and in the UV*. In: journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision 24 (7), 1842-1857.
- van der Lely S, Frey S, Garbazza C, Wirz-Justice A, Jenni OG, Steiner R Wolf S, Cajochen C, Bromundt V, Schmidt C (2015). *Blue Blocker Glasses as a Countermeasure for Alerting Effects of Evening Light-Emitting Diode Screen Exposure in Male Teenagers*. J Adolesc Health. 56(1):113-9.
- Vandewalle G, et al. (2006). *Daytime light exposure dynamically enhances brain responses*. Current Biology. 16(16): p. 1616 - 1621.
- Vandewalle G, Maquet P, Dijk DJ (2009). *Light as a modulator of cognitive brain function*. Trends in Cognitive Sciences, 13(10): p. 429-438.
- Veitch JA, Hine DW, Gifford R (1993). *End users' knowledge, beliefs, and preferences for lighting*. Journal of Interior Design 19 (2): 15-26. 1993.
- Viola AU, et al. (2008). *Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality*. Scandinavian Journal of Work, Environment & Health. 34(4): p. 297-306.
- Vondrašová D, Hájek I, Illnerová H (1997). *Exposure to long summer days affects the human melatonin and cortisol rhythms*. Brain Research 759, 166-170.
- Vyhláška č. 148-2007, o energetické náročnosti budov.
- Wahnschaffe A, Haedel S, Rodenbeck A, Stoll C, Rudolph H, Kozakov R, Schoepp H and Kunz D (2013). *Out of the Lab and into the Bathroom: Evening Short-Term Exposure to Conventional Light Suppresses Melatonin and Increases Alertness Perception*. Int. J. Mol. Sci. 14, p. 2573-2589; doi:10.3390/ijms14022573
- Wakamura T, Tokura H. (2001) *Influence of bright light during daytime on sleep parameters in hospitalized elderly patients*. J Physiol Anthropol Appl Human Sci. 20(6):345-51.
- Walerczyk S (2012). *Human centric lighting*. Architectural SSL Issue 06/12, p20-26.
- Wang Q, Xi B, Liu M, Zhang Y, Fu M (2012). *Short sleep duration is associated with hypertension risk among adults: a systematic review and meta-analysis*. Hypertens Res. 2012;35:1012-1018.
- Wehr TA (2001). *Photoperiodism in Humans and Other Primates: Evidence and Implications*. doi: 10.1177/074873001129002060. J Biol Rhythms August 2001 vol. 16 no. 4 348-364
- Wirz-Justice A and Fournier C. (2010). *Light, health and wellbeing: Implications from chronobiology for architectural design*. World Health Design. 8: p. 44-49.
- Wittmann M, Dinich J, Mellow M, Roenneberg T (2006). *Social jetlag: misalignment of biological and social time*. Chronobiol Int. 23:497-509.
- Wittmann M, Dinich J, Mellow M, Roenneberg T (2006). *Social jetlag: misalignment of biological and social time*. Chronobiol Int. 2006;23:497-509.

Worth K (2012). *Casting Light on Astronaut Insomnia: ISS to get sleep-promoting lightbulbs*. *Scientific American* [online 17.2.2015]. Dostupné z <http://www.scientificamerican.com/article/casting-light-on-astronaut-insomnia-iss-to-get-sleep-promoting-lightbulbs/>

Wright KP, McHill AW, Birks BR, Griffin BR, Rusterholz T, Chinoy E (2013). *Entrainment of the human circadian clock to the natural light-dark cycle*. *Current Biology* 23.

Zákon 309/2006 Sb., o zajištění dalších podmínek bezpečnosti a ochrany zdraví při práci.

Zavada A, Gordijn MCM, Beersma DGM, Daan S, Roenneberg T (2005). *Comparison of the Munich chronotype questionnaire with the Horne-Östberg's morningness-eveningness score*. *Chronobiology International*, 22(2): 267-268.

Zeitzer JM, Dijk DJ, Kronauer RE, Brown EN, Czeisler CA (2000). *Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression*. *The Journal of Physiology*, 526(Pt 3), 695–702. doi:10.1111/j.1469-7793.2000.00695.x

Zheng B, Albrecht U, Kaasik K, Sage M, Lu W, Vaishnav S, Li Q, Sun ZS, Eichele G, Bradley A, Lee CC (2001). *Nonredundant roles of the mPer1 and mPer2 genes in the mammalian circadian clock*. *Cell*, 105/5, p. 683–694.

Žák P (2015). *Biodynamické systémy osvětlení*. Světlo 2/2015.

Vlastní publikace vztahující se k této práci

Maierová L, Kabele K (2014) *Vliv osvětlení na aktivitu člověka*. Zborník prednášok z 25. vedeckej konferencie Vnútorná klíma budov 2014. NITRA: SSTP - Slovenská spoločnosť pro techniku prostředí, p. 35-38. ISBN 978-80-89216-67-3.

Maierová L (2014). *Světlo a biologické funkce člověka*. Kurz osvětlovací techniky XXXI. Ostrava: Česká společnost pro osvětlování, p. 1-6. ISBN 978-80-248-3553-2.

Maierová L (2013). *Potřebují dnes lidé více světla než před 10/100/1000/10000 lety?* Sborník přednášek Letní školy TZB: TZB v historických budovách s nízkou spotřebou energie. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2013, ISBN 978-80-02-02475-0.

Maierová L, Borisuit A, Scartezzini J-L, Muench M (2013). *Indoor lighting conditions and interindividual light preferences: effects on subjective alertness, physical wellbeing and electrical energy consumption*. Clima 2013 - 11th REHVA World Congress & 8th International Conference on IAQVEC - "Energy Efficient, Smart and Healthy Buildings". Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2013, ISBN 978-80-260-4001-9.

Maierová L, Kabele K, Muench M (2012). *Člověk a non-vizuální vnímání světla*. 10. Letní škola TZB 2012. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2012, ISBN 978-80-02-02396-8.

Maierová L, Kabele K (2011). *Hodnocení světelného prostředí v administrativních budovách*. Sborník přednášek 9. Letní školy TZB 2011. Praha: Společnost pro techniku prostředí, ISBN 978-80-02-02334-0.

Maierová L, Kabele K (2010). *Daylight in the building*. Central Europe towards Sustainable Building. Prague: Czech Technical University, 2010, p. 483-486. ISBN 978-80-247-3624-2.

Maierová L (2010). *Evaluation of the indoor environment in terms of light and daylight*. Indoor Climate of Buildings '10, Indoor Environment, Energy Auditing and Certification of Buildings. Bratislava: Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia ZSVTS, p. 65-72. ISBN 978-80-89216-37-6.

Maierová L (2010). *Energetické souvislosti osvětlení budov, možnosti integrace denního světla*. Sborník přednášek 8. Letní školy TZB 2010. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2010, s. 45-52. ISBN 978-80-02-02256-5.

Seznam ilustrací

Obr. 3.1 vlevo	Zdeněk Burian - Tábořiště lovců pozdního paleolitu, ilustrace.
Obr. 3.1 vpravo	Prehistorické vápencové nebo pískovcové miskové lampy.
Obr. 3.2 vlevo	Interiéru gotické katedrály.
Obr. 3.2 vpravo	Rekonstrukce dymné jizby, s typickými osvětlovacími a kouřovými okny.
Obr. 3.3 vlevo	Příklady fasád středověkých chalup.
Obr. 3.3 vpravo	Jílová lampa pro spalování živočišného tuku nebo rostlinných olejů.
Obr. 3.4	Astronomický číselník Staroměstského orloje v Praze.
Obr. 3.5 vlevo	Dělnická předměstí – ilustrace.
Obr. 3.5 vpravo	Půdorysné řešení pavlačového domu 308 v Pražské Libni.
Obr. 3.6 vlevo	Hořák stolní (svítí)plynové lampy a celá lampa, Sun Gas Lamp Co./Kansas City.
Obr. 3.6 vpravo	Petrolejová lampa se skleněným cylindrem a zrcátkem, detail hořáku.
Obr. 3.7 vlevo	Fasáda bytového domu.
Obr. 3.7 střed	Urbanismus sídliště – fotografie.
Obr. 3.7 vpravo	Projektanti, fotografie Kruger, 13.4.1957, Bundesarchiv, Bild 183.45693.004.
Obr. 3.8	Spektrální složení světelných zdrojů: denní světlo, klasická žárovka, fluorescentní trubcová zářivka.
Obr. 3.9 vlevo	Monitor jako zdroj světla – fotografie.
Obr. 3.9 střed	Oslnění v místě styku celoplošných interiérových rolet – fotografie.
Obr. 3.9 vpravo	Nevyužívané manuálně ovládané stínící prvky – fotografie.
Obr. 3.10	Rovnoměrné rozložení světelného toku v prostoru – kontrast jasu v zorném poli.
Obr. 3.11 vlevo	Příklady fasádních systému pro přívod denního světla.
Obr. 3.11 vpravo	Radnice Velkého Londýna – fotografie.
Obr. 3.12	Fotografie skleněné vázy v denním světle a pod umělým osvětlením s nízkým CRI.
Obr. 3.13	Příklady spektrálního složení LED zdrojů.
Obr. 3.14	Světlené prostředí ve zvolených historických obdobích: ilustrace předpokládané typické hladiny osvětlenosti, ve které se běžný člověk pohyboval.

Obr. 4.1	Elektromagnetické spektrum s detailem viditelného světelného záření.
Obr. 4.2	Grafické znázornění fotometrických veličin a jejich jednotek.
Obr. 4.3	Schematický řez lidským okem, detail sítnice se třemi typy fotoreceptorů
Obr. 4.4	Křivky spektrální citlivosti lidského oka.
Obr. 4.5	Osvětlenost, vizuální a nevizuální funkce. Příklad možné osvětlenosti (v lx) horizontální roviny, za různých světelných podmínek, rozsah citlivosti lidského oka, režim zraku a aktivita fotoreceptorů.
Obr. 4.6	Schéma organizace cirkadiálního systému.
Obr. 4.7	Příklad křivky fázové odezvy u člověka, odezva na vnější světelné podněty.
Obr. 4.8	Schéma synchronizace při více zeitgeberech.
Obr. 4.9	Schematické znázornění rytmických změn v těle – typický denní průběh koncentrace hormonů melatoninu a kortizolu, tělesné teploty a subjektivní bdělosti (po dobu 2 x 24 hodin).
Obr. 4.10	Křivka závislosti odezvy cirkadiálního systému na osvětlenosti - akutní potlačení plazmatického melatoninu při světelné expozici během biologické noci.
Obr. 4.11	Kombinace vlivu cirkadiálního rytmu a homeostatického tlaku spánku na regulaci spánku a bdění, tzv. dvouprocesní model.
Obr. 4.12	Zastoupení chronotypů v populaci (vzorek cca 60.000 osob).
Obr. 4.13	Závislost změn v chronotypu dle vlivu pohlaví a věku.
Obr. 5.1	Srovnání spektrální sensitivity nevizuálního vnímání při osvětlenosti V_E 1000 lx.
Obr. 5.2	Měřiče cirkadiální osvětlenosti Daysimeter-S (vlevo), LuxBlick (vpravo).
Obr. 5.3	Aktigrafické monitory: Actiwatch (vlevo); běhací kolo (vpravo).
Obr. 5.4	Záznam denní aktivity myši v běhacím kole.
Obr. 5.5	Graf závislosti chronotypů dle času východu slunce (dle zeměpisné délky) v SRN.
Obr. 5.6	Srovnání dostupnosti denního světla, využití umělého osvětlení a aktivity člověka v dlouhé fotoperiodě (květen, vlevo) a v krátké fotoperiodě (únor, vpravo).
Obr. 5.7	Vztah mezi chronotypem (dle MCTQ) a délkou spánku.
Obr. 5.8 vlevo	Aktogram jedince s extrémně pozdním chronotypem
Obr. 5.8 vpravo	Aktogram jedince s porušeným rytmem cirkadiálních hodin (záznam vysokoškolského studenta v letním zkouškovém období).
Obr. 5.9	Příklady světelných konceptů pro různé funkce budov.
Obr. 6.1	Anidolický systém pro přívod denního světla (ADS). Vlevo řez fasádou, vpravo fotografie.
Obr. 6.2	Půdorys výzkumné laboratoře – testovací kancelářský prostor

- Obr. 6.3 Relativní spektrum zářivého toku světelných zdrojů instalovaných ve výzkumné laboratoři: denní světlo, stropní svítidlo, stolní lampa a stojací lampa.
- Obr. 6.4 Ilustrační fotografie pořízené objektivem s rybím okem během tří světelných režimů.
- Obr. 6.5 Příklad spektrální distribuce zářivého toku ($W.m^{-2}.nm^{-1}$) v BL.
- Obr. 6.6 MEQ skóre všech žadatelů a vybraní účastníci výzkumu.
- Obr. 6.7 Obvyklé časy aktivity a odpočinku u extrémních chronotypů.
- Obr. 6.8 Protokol výzkumu.
- Obr. 6.9 Lineární nečíselná 100 mm bipolární vizuální analogová stupnice (VAS).
- Obr. 6.10 Zpracovávání vzorků slin pro zjištění koncentrace melatoninu.
- Obr. 6.11 Ev během tří světelných režimů.
- Obr. 6.12 EV v režimech BL a SSL.
- Obr. 6.13 Průměrný čas strávený v prostředí s $Ev > 1000$ lx pro extrémně časně a extrémně pozdní chronotypy.
- Obr. 6.14 Časové rozložení subjektivně vybrané $EV > 1000$ lx během dne.
- Obr. 6.15 Hodnocení subjektivní ospalosti ve všech třech světelných režimech.
- Obr. 6.16 Subjektivní ospalost u časných chronotypů a pozdních chronotypů v absolutních hodnotách.
- Obr. 6.17 Časový průběh změn v hodnocení subjektivní ospalosti, relativně k hodnocení na počátku studie.
- Obr. 6.18 Graf $CRT_{TOP10\%}$ - 10% z nejrychlejších reakčních časů v PVT, očištěných od výpadků a anticipace.
- Obr. 6.19 $CRT_{TOP10\%}$ - odděleně časně chronotypy a pozdní chronotypy v absolutních hodnotách.
- Obr. 6.20 Relativní změna v průběhu času v $CRT_{TOP10\%}$, pro všechny tři světelné režimy.
- Obr. 6.21 Korigovaný reakční čas (CRT) pro auditivní 2-back test.
- Obr. 6.22 Korigovaný reakční čas (CRT) pro auditivní 2-back test, posuzováno odděleně pro jednotlivé chronotypy.
- Obr. 6.23 Časový průběh relativní změny CRT v auditivním 2-back testu, vyjádřeno relativně rozdílem vůči prvnímu (v DIM druhému) testu.
- Obr. 6.24 CRT v nejtěžší verzi testů kognitivního výkonu: auditivního 3-back testu.
- Obr. 6.25 CRT ve verzi 3-back auditivního testu, vyjádřeno samostatně pro jednotlivé chronotypy a světelné režimy.
- Obr. 6.26 Koncentrace melatoninu ve slinách pro všechny tři světelné režimy.
- Obr. 6.27 Koncentrace melatoninu ve slinách, vyjádřeno odděleně pro chronotypy ve třech světelných režimech.
- Obr. 6.28 Spotřeba elektrické energie (kWh) pro osvětlení ve světelných režimech BL a SSL, vyjádřeno odděleně pro oba chronotypy.

Seznam tabulek

Tab. 4.1	Vliv jasu oblohy na osvětlenost horizontální roviny.
Tab. 4.2	Spektrální složení a teplota chromatičnosti z různých zdrojů bílého světla.
Tab. 4.3	Srovnání faktorů světelného prostředí a citlivosti vizuálního a nevizuálního vnímání světla na ně.
Tab. 6.1	Charakteristika zdrojů umělého osvětlení.
Tab. 6.2	Kritéria pro tři světelné režimy (DIM, BL, SSL).
Tab. 6.3	Charakteristika denních rytmy spánku/bdění účastníků studie.
Tab. 6.4	Průměrná, maximální a minimální Ev ($\pm$ SEM) a časy jejich výskytu, v rámci SSL pro jednotlivé chronotypy.
Tab. 6.5	Vypočítané časy DLMO a MO, pro tři světelné režimy a oba chronotypy.
Tab. 6.6	Spearmanova neparametrické korelace mezi subjektivními a objektivními proměnnými.
Tab. X1:	Výsledky statistického výpočtu 3way rANOVA pro osvětlenost v BL a SSL režimu a výpočtu 2-way rANOVA samostatně pro jednotlivé světelné režimy.
Tab. X2:	Výsledky statistického výpočtu 3way rANOVA pro subjektivní hodnocení ospalosti ve všech 3 režimech a výpočet 2-way rANOVA samostatně pro jednotlivé světelné režimy.
Tab. X3:	Výsledky statistického výpočtu 3way rANOVA pro Psychomotorický test bdělosti ve všech 3 světelných režimech a výpočtu 2-way rANOVA samostatně pro jednotlivé světelné režimy.
Tab. X4:	Výsledky 3way rANOVA for auditivní 2back test ve všech 3 režimech a výpočet 2-way rANOVA samostatně pro jednotlivé světelné režimy.
Tab. X5:	Výsledky statistického výpočtu 3way rANOVA pro auditivní 3back test ve všech 3 režimech a 2-way rANOVA samostatně pro jednotlivé světelné režimy.
Tab. X6:	Výsledky statistického výpočtu 3way rANOVA pro koncentrace melatoninu ve slinách ve všech 3 režimech a samostatně pro jednotlivé světelné režimy.
Tab. X7:	Výpočet času zvýšení produkce melatoninu (DLMO a MO).
Tab. X8:	Výsledky statistického výpočtu 3way rANOVA pro Freiburský test zrakové ostrosti (FrACT) ve 3 režimech.
Tab. X9:	Neparametrická Spearmanova korelace, odděleno dle světelných režimů.

Seznam zkratek

ADS	Anidolický systém pro přívod denního světla; Anidolic daylighting systém
ANOVA	analýza rozptylu
Audi nBack	Auditivní N-back test; Auditory n-Back Test.
BL	Jasné osvětlení; Bright light
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
C(λ)	Cirkadiánní funkce citlivosti
CBT	Teplota tělesného jádra [$^{\circ}\text{C}$]; Core body temperature
CCT	Náhradní teplota chromatičnosti; Correlated Color Temperature [$^{\circ}\text{K}$]
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování; Commission Internationale de l'Eclairage
CRI	Index podání barev; Color Rendering Index
CRT	Korigovaný reakční čas [s]; Corrected response time
CRT _{TOP10%}	nejrychlejších 10% korigovaných reakčních časů
ČSN	Česká technická norma
DGI	Index oslnění denním světlem; Daylight Glare Index
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DGP	Index pravděpodobnosti oslnění denním světlem; Daylight Glare Probability
DIM	Tlumené osvětlení
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DLMO	Přirozený počátek produkce melatoninu; Dim light melatonin onset
D _m	Průměrný činitel denní osvětlenosti [%]
D _{max}	Největší činitel denní osvětlenosti [%]
D _{min}	Nejmenší činitel denní osvětlenosti [%]

DSE	Obrazovka zařízení; Display screen equipment
E	Osvětlenost [lx]
EEG	Elektroencefalografie
E _{max}	Největší osvětlenost v kontrolních bodech na srovnávací rovině [lx]
E _{min}	Nejmenší osvětlenost v kontrolních bodech na srovnávací rovině [lx]
EOG	Elektrookulografie
EPFL	Švýcarský federální technologický institut v Lausanne; École polytechnique fédérale de Lausanne
ESS	Epworthská spánková škála; Epworth Sleepiness Scale
ET	Pozdní chronotyp; Evening type
E _v	Vertikální osvětlenost v úrovni oka [lx]
FDR	Pravděpodobnost výskytu falešně pozitivního výsledku; False discovery rate
FrACT	Freiburský test zrakové ostrosti; Freiburg Visual Acuity Test
GLM	obecný lineární model
IES	Illuminating Engineering Society
ipRGCs	Vnitřní fotosenzitivní sítnicové gangliové buňky; intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci; International Organization for Standardization
L	Jas [cd.m ⁻²]
LCD	Displej z tekutých krystalů; liquid crystal display
LED	Dioda emitující světlo; Light-emitting diode
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LENI	Číselný ukazatel energetické náročnosti; Lighting Energy Numeric Indicator
LESO-PB	Laboratoř solární energie a stavební fyziky; Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment
MCTQ	Mnichovský dotazník chronotypů; Munich Chronotype Questionnaire
MEQ	Dotazník ranních a večerních typů; Mornigness-Eveningness Questionnaire

MO	Časy nástupu produkce melatoninu
MSF	Střed subjektivního spánku, korigovaného pro rozdíly mezi volnými a pracovními dny; Midpoint of Sleep on Freedays
MSF-Sc	Střed subjektivního spánku, korigovaného pro rozdíly mezi volnými a pracovními dny, korigováno pro délku spánku; Midpoint of Sleep on Freedays, sleep duration corrected
MT	Časný chronotyp; Morning type
n	počet členů skupiny; number of members of sample or population
PRC	Křivka fázové odezvy; Phase response curve
PSQI	Pittsburská škála kvality spánku; The Pittsburgh Sleep Quality Index
PVN	Paraventrikulárního jádro
PVT	Psychomotorický test udržované pozornosti bdělosti Psychomotor Vigilance Test
RT	Reakční čas; Response time
SAD	Sezonní afektivní porucha; Seasonal Affective Disorder
SCN	Suprachiasmatické jádro
SD	Směrodatna odchylka; Standard deviation
SEM	Střední (směrodatná) chyba průměru; Standard error of the mean
SPD	Relativní spektrum zářivého toku; Spectral power distribution
SSL	osvětlení dle volby uživatele; Self-selected lighting
UGR	Index oslnění; Unified Glare Rating
$V(\lambda)$	Fotopická funkce citlivosti
$V'(\lambda)$	Skotopická funkce citlivosti
VAS	Vizuální analogová stupnice; Visual Analogue Scale
V_e	Vertikální osvětelnost v úrovni oka; Vertical illuminance at the eye level
Φ	Světelný tok [lm]
λ	Vlnová délka [nm]

8. Biological effects of light on humans

-

an office lighting study with extreme chronotypes

"Life is a constant struggle between being individual and being a member of the community".
Sherman Alexie

8.1 Study motivation

Several *clinical studies* have already shown that there is an impact of perceived light on humans in terms of non-visual light responses such as changes in alertness, mood, working memory, melatonin suppression, and other variables (see for example [Lockley 2009, Cajochen, et al. 2007, Vandewalle, et al. 2009, Münch & Kawasaki 2013]). In addition to these reports, several *chronobiological studies* illustrated the importance of the circadian variation of different physiological functions across 24 hours. And finally, *Engineering models* and measurements proved the effect of electric lighting on the energy consumption in the building [Linhart 2009]. However, when the focus would be on the energy savings then there could result poor indoor quality for other purposes. A balanced approach is needed to provide high quality lighting for both visual and non-visual light perception and with respect to energy consumption.

The theoretical part of this thesis gave an overview of the way the human eye perceives light. At least two pathways are known to transmit the lighting information from the receptors via the eyes to different parts of the human brain. The two pathways serve to

different purposes – to provide visual information and to entrain the circadian clock. Since a large part of the adult population worldwide spends more than eight hours at working places inside of office buildings, it becomes crucial to determine optimal lighting conditions for vision but to also take into account the so called “non-visual” light perception and its impact on the circadian clock. For this reason an analysis of lighting conditions and its relations to non-visual needs of the office users was performed and the lighting requirements in offices were inspected.

The following chapter addresses the question, whether (office) users chose certain lighting conditions based on visual comfort solely, or if they also consider their physiological needs. In this experimental research we investigate the effects of lighting environment in the office space on individuals with extreme chronotype.

8.2 General hypotheses of the study, expected results

It is well known that there exist significant differences between individual lighting preferences but the reasons behind have not been sufficiently investigated yet. Within the general population we can find individuals called “extreme chronotypes”, i. e. individuals who get up early and perform best early in the morning (‘larks’), whereas others are more alert later in the evening and go to bed late (‘owls’). The fact that these individuals experience very different (day-) lighting conditions during their subjective wake periods provides a unique way to study the effects of light on subjective sleepiness, cognition and hormonal secretion.

We performed an office lighting study with extreme chronotypes, where we focused on non-visual light perception in office workers. The study was aimed to reveal the impact of three very different lighting conditions on subjective sleepiness, cognitive performance and hormonal secretion throughout a working day. We were especially interested, whether the subjects’ evaluation corresponded with more objective measures of performance and hormones under three different lighting conditions.

Question A: Difference in lighting preferences between extreme chronotypes

If we choose extreme chronotypes as a natural model of extreme behavior, would they have different light preferences? Is there a difference in light intensity or in the timing of the light?

Hypothesis

- During the self-selected lighting we predicted that this condition would have dynamic day light with variation over the day, creating the most natural, possibly optimal lighting environment.
- Between the two groups of subjects (extreme morning and evening types) we expected to see different lighting preferences in overall illuminance, dependent on the time of day.
- Due to the different daylight availability across the day, we predicted that late chronotypes receive less light during the day if compared to morning types. The

expectation was that evening types would compensate this 'light deficiency' (if possible) during the self-selected light condition.

Strategy

We wanted to compare the preference of the two groups of subjects (extreme chronotypes) across a whole working day (16 hours) with one experimental session of a self-selected lighting condition. We aimed to record and analyze preferred vertical illuminance at the eye, the timing and other factors of subjective lighting choices.

Question B: Effects of three different lighting conditions on biological functions

How do these effects vary in the course of a 16-h day? Do the biological responses to different lighting conditions vary between extreme chronotypes? If they can choose the lighting according to their own preference, would there be some positive effects in their subjective evaluation or objective measures like for example a better performance in cognitive tests?

Hypothesis

- We predicted different subjective evaluations of sleepiness as well as differences in its variation during the day, between both groups and between lighting conditions.
- We expected differences between the two groups in objective measurements – cognitive tests and the hormonal secretion.
- We assumed that these dynamic changes during the study will be in correlation with the subjective circadian time and will not occur at the same clock time for both chronotypes.

Strategy

We aimed to record and analyse subjective evaluations, results in performance tasks and effects on hormonal secretion of melatonin. We then wanted to assess the possible differences between the lighting conditions and between the two chronotype groups. Lastly, we tracked these changes over the time of the day.

Question C: Subjective evaluations versus objective biological effects of light

To what extend are we able to assess the biological effects of light on bodily functions? Do our subjective evaluations of the lighting comfort correspond to actual physiological responses? Is an individual able to consciously assess the complex effects of the chosen light? Are the changes over the day similar for all aspects or are there different responses?

Hypothesis

- We assumed that subjects are not able to fully evaluate all the effects of light on their performance and biomarkers. Their subjective evaluation of sleepiness does not necessarily correlate with all objective measures, such as their actual performance or hormonal production.

Strategy

We aimed to perform correlation analyses for changes of subjective evaluation (questionnaires), objective measures (cognitive testing) and biomarkers (hormonal analyses) dependent on three different lighting conditions.

Question D: The effects on electricity consumption

Which of the lighting condition has higher electrical energy demands? Which of the chronotype groups consumes more electrical energy for lighting?

Hypothesis

We assumed higher energy demands during the bright light condition when compared to self-selected lighting conditions.

- We expected higher energy consumption from the evening types then from the morning types.

Strategy

We aimed to analyse the records of lighting energy consumption throughout the study and determine the differences between both subject groups under the different lighting conditions.

8.3 General study design

The experimental study was performed in the testing room at the Solar Energy and Building Physics Laboratory (LESO-PB), at the Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, Switzerland. Members of scientific team led by Jean-Louise Scartezzini (building physics) and Mirjam Münch (chronobiology) were Apiparn Borisuit (visual comfort) and Lenka Maierová (non-visual effects of light).

The study investigated the effects of three different lighting conditions on office workers with different lighting preferences, such as extreme early/late chronotype, over the whole 16 hours wake period. In this thesis the focus was set to non-visual effects of light.

8.3.1 Study room and equipment

The testing room was equipped with upper and lower windows. The upper windows are part of the anidolic daylighting system [Scartezzini 2002]. This system distributes daylight deeper into the room, when compared with standard glazing. Daylight factor of the study room was assessed by Linhart [Linhart 2009]. With the anidolic daylighting system, the DF reached 5% in the center of the room (approximately at the position of our subjects). In a comparable room with standard double-glazed façade the DF reached 3.5%. The system of two horizontal lines of windows provides daylight into the room and to prevent direct vertical outside view, the lower windows were covered with semi-translucent blinds (Fig. 8.1).

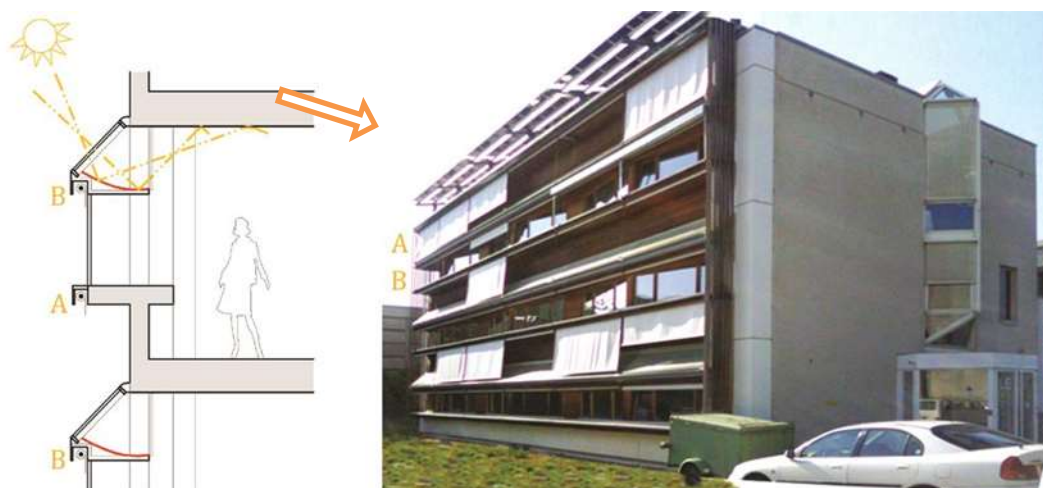


Fig. 8.1: Anidolic daylighting system (ADS). Installed at LESO-PB, EPFL, Switzerland. The section of the anidolic façade with the two lines of horizontal windows – lower standard window provides the view, upper window with ADS helps to deliver the light deeper into the room (left); photo of the façade (right), arrow indicates the testing room in the third floor.

Daylighting conditions:

The LESO-PB building is situated at the campus of the Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, Switzerland, (latitude N 46.5°). The windows of the study room are south oriented and have no direct obstacles in front of the building.

The anidolic façade contained the following shading possibilities:

- A) External semi-translucent blinds in the upper part, in front of the anidolic system, were controllable by the subjects.
- B) The lower external semi-translucent blinds, located in front of the vertical window were fully lowered in order to prevent any outside view.
- C) Internal Californian blinds: movable blinds, installed on the upper part of the window. They could be used to control the daylight flux (in front of the anidolic daylighting system).
- D) Internal heavy curtains for total blocking of the exterior light.

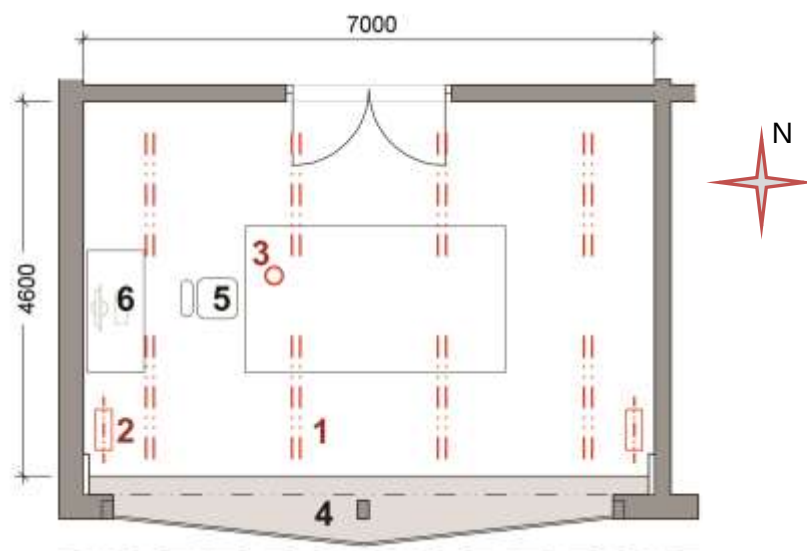


Fig. 8.2: Sketch of the study room, with light sources. [1] ceiling luminaires, [2] indirect lamp, [3] desk lamp, [4] anidolic window with curtains, [5] subject's workplace, [6] workplace for computer tasks

Artificial light equipment:

The available light sources are described in Table 8.1. and its positionig could be seen at Figure 8.2. Spectral compositions of all the light sources are shown in Fig. 8.3.

Luminaire	Light source	Installed pieces	CCT	CRI	Ev
Ceiling mounted	Fluorescent tubes Regent, 80 W (T16)	8 x 2 tubes	4000 K	> 80	16 – 1280 lx
Indirect standard	Fluorescent tubes	2 x 2 tubes	3000 K	> 80	1.1 – 52.5 lx
Desk lamp	Incandescent bulb	1	2300 K	> 95	95 - 1425 lx

Tab. 8.1: Artificial lighting equipment; CCT - Correlated Colour Temperature, CRI - Colour Rendering Index, E_v - Vertical illuminance at the eye level

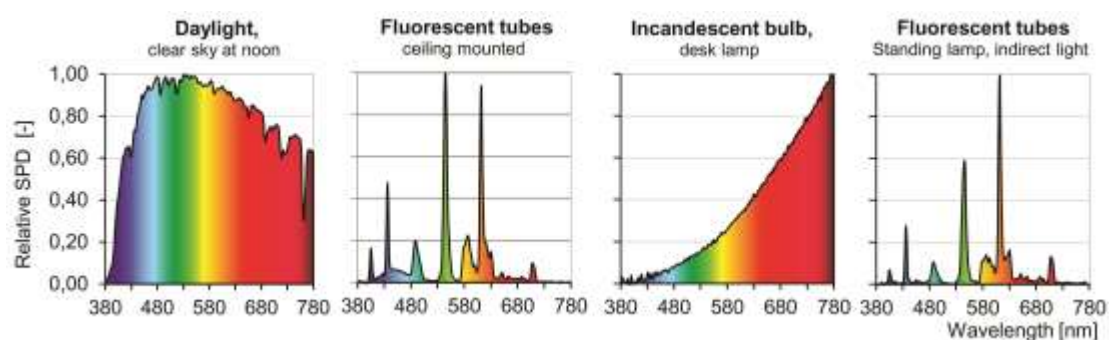


Fig. 8.3: Relative spectral power distribution (SPD; relative to the maximum power of each light source) of light sources installed in the study room. Figures of daylight (left), ceiling light (second Figure on the left), desk lamp (third Figure) and standard lamp (right side). Recordings were made on a vertical plane, at the eye level of a sitting subject, and in the main direction of the view.

The room temperature was kept constant (by mean of a portable air condition) in a comfortable range for the entire study duration, between 21° and 24° C during winter and lower than 26°C during summer time. One exception occurred during high summer (one study session) when the peak afternoon temperature reached 26.7°C.

8.3.2 Study set-up - lighting conditions

All subjects underwent three different lighting conditions, for 16 hours; see Table 8.2 and Figure 8.5. Illuminance was measured on a vertical plane at the level of subjects' eye. Therefore the term E_v will be used for the rest of this chapter.

	Dim light (DIM)	Bright light (BL)	Self-selected light (SSL)
Vertical illuminance	< 5 lx	~1000 lx	subjects' choice
Daylight	no	yes	available
Artificial lighting	yes	yes	available

Tab. 8.2: Criteria for the three different lighting conditions (DIM, BL and SSL). Set-points of vertical illuminance values were targeted at the subjects' eye level on a vertical plane (E_v)

1) Dim light (DIM): E_v was less than 5 lx; this lighting condition was always scheduled for the first study session and was used as a control condition under unmasking lighting conditions (i.e. to measure any physiological and cognitive responses without the impact of bright light). Only indirect luminaires were used in order to provide very low vertical illuminance at the subject's eyes. Internal heavy curtains were used to block completely from the influence of the exterior light.

2) Constant bright light (BL), approximately 1000 lx (E_v) on a vertical plane at the subjects' corneal level. The BL condition consisted of mixed daylight and electrical light for most of the day. The preference was set to use daylight and at times of insufficient daylight ceiling lights with polychromatic white light source of 4000K were used to provide the target illuminance (see Tab. 5.1). The target threshold of 1000 lx was chosen

based on the literature [Cajochen 2000, Phipps-Nelson 2003], and was aimed to provide a highly saturated stimulation of the non-visual system.

3) The third condition was the self-selected lighting (SSL). During this condition light intensity and colour temperature were dependent on the subject's choice. Subjects could choose daylight and/or electrical light from all the available sources of light (See Tab 6.1). Artificial light sources in the room provided maximal V_e of 1200 lx. Subjects were asked to assess their lighting preference every 60 min, which was then adapted accordingly.

In the BL and SSL conditions, the lighting consisted of daylight (if available) and electrical light was added (if needed). Comparisons of the spectral composition of 100% daylight with 100% artificial light (ceiling mounted fluorescent tubes) are shown on Fig-8.4

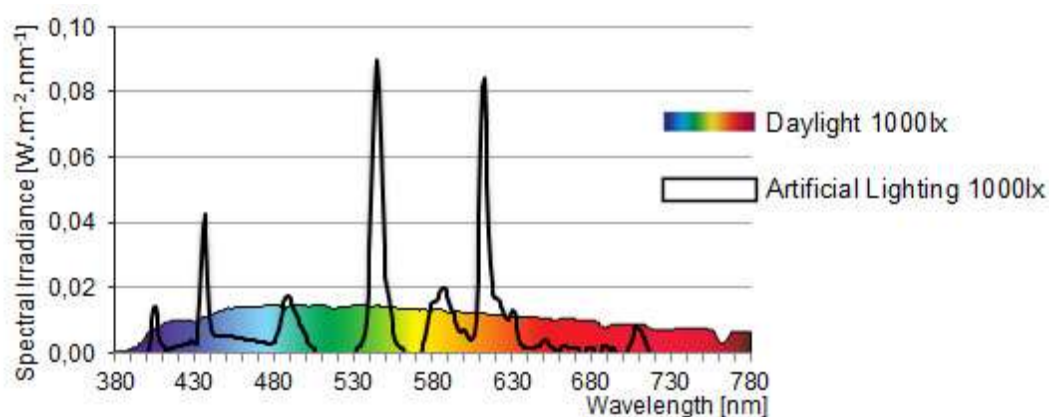


Fig. 8.4: Examples of the spectral irradiance ($\text{W.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}$) for the bright light condition (BL). The graph shows two cases of lighting set-up: 100% of daylight (coloured) and 100% of artificial light (black lines no fill), both providing E_v of 1000 lx.

Illuminance on a vertical plane at the approximate corneal level of the participant (E_v) was continuously recorded in 5 min intervals throughout the study by using a spectroradiometer (Specbos 1201, JETI, Jena, Germany), placed on a tripod next to the subject. Calibrated luxmeter LMT (Lichtmeßtechnik GmbH Berlin, Germany) with the range up to 200 000 lx was used for the control measurement of the illuminance on the vertical and horizontal plane. Spatial distribution of the light was recorded by CCD camera (Nikon Coolpix 5400, Tokyo, Japan) with the fisheye lens FC-E9 (Nikon, Japan) and IcyCAM with CSEM (Camera-Like Light Sensor; Neuchâtel, Switzerland). More records and analyses of the lighting conditions and subjective assessments under different sky conditions can be found in chapter 5.2 in [Borisuit 2013b].

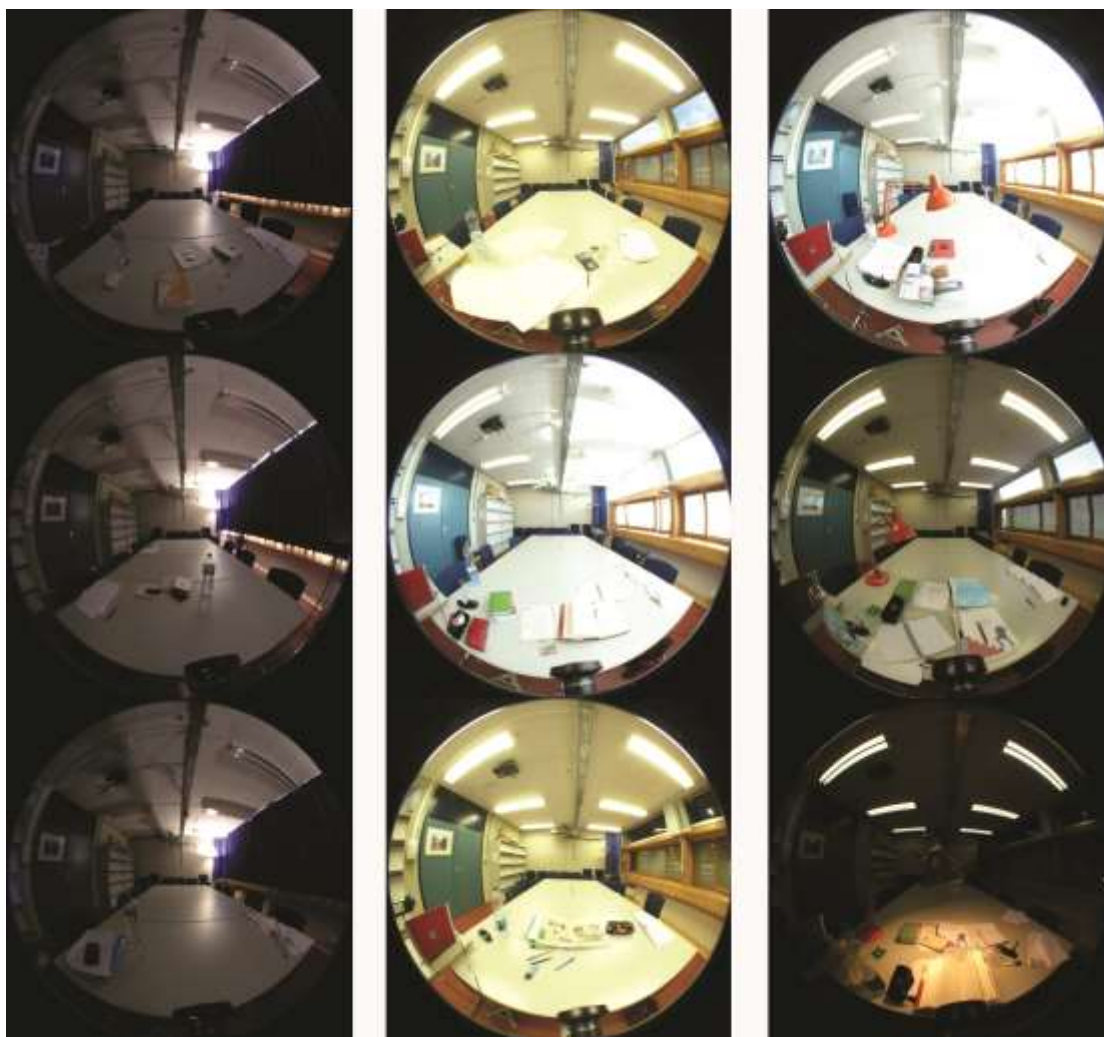


Fig. 8.5: Exemplary pictures taken with a fish eye lens at three different times of the day from the three different lighting conditions. Left side: DIM; middle: BL and SSL (right side) in the morning (upper panels), afternoon (middle panels) and the evening (lower panels).

8.3.3 Study participants

To illustrate the inter-individual differences among a young healthy population we performed the study with extreme morning and evening types (also referred to as 'Larks' and 'Owls') with known behavioral differences [Morgrain, et al. 2006, Schmidt, et al. 2009]. Extreme morning types prefer wake-times and bed-times, which are approximately 4-5 hours earlier than in extreme evening types and thus, the two groups, vary substantially in their individual work schedules and exposure duration to (day-) light. This allowed us to measure the entire range of potential reactions. We tested them relative to their habitual wake- and bedtimes.

The Pre-study screening process

For recruiting purposes we used announcements placed in public places, mainly university areas in the region of Lausanne, Switzerland. Over 1100 people responded to our announcements. In our reply we sent them more detailed information and a set of

questionnaires. From those, 521 responded with questionnaires. Out of those we selected 40 participants for a personal interview and a total of 37 participants started the study, and 32 subjects completed all 3 sessions of the study. The study and all study procedures were performed in French. The English versions of the questionnaires can be found in the annexes Q1-Q3.

Assessment of Eveningness / Morningness

We chose extreme morning types (MT) and extreme evening types (ET) based on their extreme diurnal sleep-wake preferences, as assessed by two validated questionnaires.

Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ), was developed by Horne and Östberg [Horne 1976] in 1976 to discriminate of morningness/eveningness determined from the analyses of subjective preferences in the sleep/wake routine and times of peak alertness (Q1 in annex). A total of 19 self-assessments multi-choice questions were collected with a minimum score of 16 and a maximum score of 86 points. For our study we were interested in the two extreme groups with scores higher than 70 (=extreme morning types and scores lower than 30 (=extreme evening types).

Munich Chronotype Questionnaire (MCTQ) was developed by Roenneberg et al. [Roenneberg 2003b] and its online version is collecting questionnaire data since 2005. The questionnaires primarily asks for sleep and wake times on working days and on free days to determine the subjective time of mid-sleep, sleep debt and individual phase of entrainment. Compared to the MEQ above, it takes into account also the difference between workdays and free days. Thus, the MCTQ also considers some social aspects of the circadian entrainment which we consider as being very important for the evaluation of behaviour in extreme chronotypes. Statistical comparisons between the MEQ and MCTQ [Zavada 2005] found good correlations between MEQ scores and the assessment of mid-sleep time on free day and on work days.

In our study, we used the “time of mid-sleep on free days; sleep duration corrected” (MSF-Sc) as the reference value for the screening process. Values between 4 and 4.99 were assumed to be intermediate types; scores greater than 5.99 were considered as extreme evening types and scores lower than 3 as extreme morning types. For participation in our study we chose subjects with at least one of the two scores from both questionnaires to be extreme (MEQ or MCTQ) see Figure 8.6.

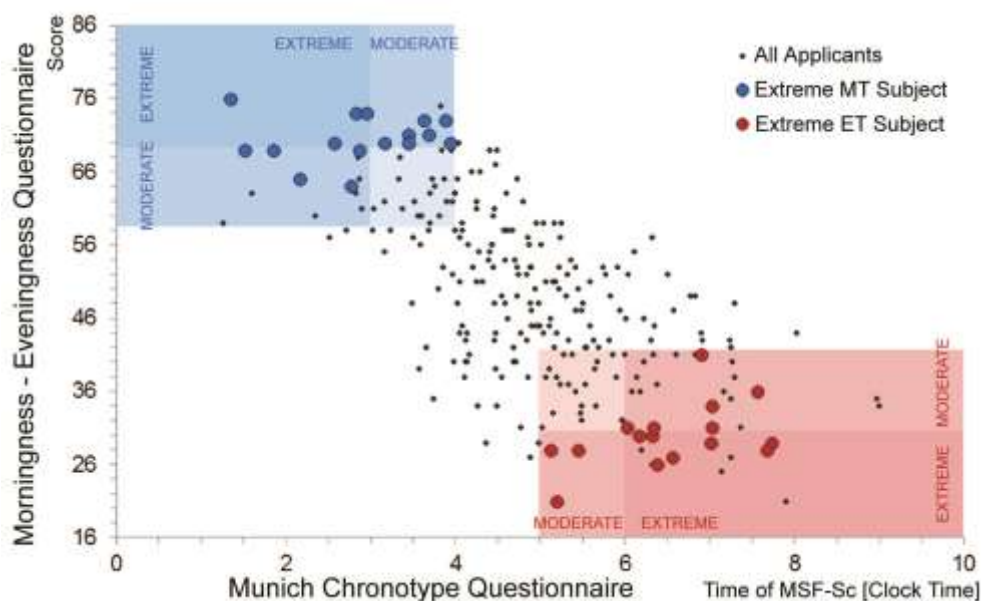


Fig. 8.6: MEQ and MCTQ scores of all applicants and chosen subjects of the study. The red and blue symbols indicate the respective scores on the two questionnaires; MSF-Sc= midsleep on freedays, sleep duration corrected.

We only included healthy subjects, non-smokers, without any medications (except for oral contraceptives). Other exclusion criteria were transmeridian flights or shift work within the last 3 months, excessive alcohol or caffeine consumption, or any drug consumption. To prevent unwanted effects of sleep deprivation resulting from low sleep quality, we used the Pittsburg Sleep Quality Index (PSQI). For the assessment of (excessive) daytime sleepiness we used Epworth Sleepiness Scale (ESS).

The Pittsburg Sleep Quality Index (PSQI), is a self-rated questionnaire which assesses sleep quality and disturbances over the last month [Buysse, et al. 1989]. According to the authors, a person with a global PSQI score < 5 is considered a good sleeper. Due to the known very late or early habitual bed-and wake-times in extreme chronotypes, which often results in difficulties to stay entrained with normal work and social duties, we decided to extend the cut-off to a maximum of 6 points (which occurred in 4 cases, all in extreme evening types). Subjects with PSQI scores > 6 were not include to the study.

The Epworth Sleepiness Scale (ESS), indicates the subjective perception of daytime sleepiness. In several questions subjects are asked to rate the chance that they would dose off or fall asleep in different situations commonly encountered in daily life. The ESS score significantly distinguishes normal subjects from patients with high sleep propensity, such as various diagnostic groups including obstructive sleep apnea syndrome, narcolepsy and idiopathic hypersomnia [Johns 1991]. Scores of 10 and lower are assumed to be normal and subjects with these scores were included in our study.

We targeted to have a sample size of 32 subjects (half morning and half evening types). Out of 37 included subjects, three subjects were excluded during the study, because they were not able to follow the study protocol and two subjects resigned from the study. A total of 32 subjects completed the entire study (16 extreme morning and 16 extreme

evening types: 14 men and 18 women), age 22.7 ± 3.5 years; mean $\pm$ SD, range 18 – 31 years; Table 8.3).

	Morning Types (n=16)	Evening Types (n=16)
Gender (M / F)	7/9	7/9
Age (mean $\pm$ SEM)	22 ± 0.94 (SD 3.8)	23.3 ± 0.78 (SD 3.1)
Waketime (mean $\pm$ SD)	$06:19 \pm 0:36^*$	$10:18 \pm 1:14$
Bedtime	$22:13 \pm 0:42^*$	$02:10 \pm 0:57$
Midsleep	$2:16 \pm 0:35^*$	$6:15 \pm 1:02$
Study begin	$07:15 \pm 0:34^*$	$11:14 \pm 1:01$
MCTQ	$2.88 \pm 0.20^*$	6.53 ± 0.21
PSQI	2.94 ± 0.28	3.50 ± 0.47
MEQ	$70.5 \pm 0.8^*$	30.2 ± 1.2
ESS	5.38 ± 0.72	5.56 ± 0.53

Tab. 8.3: Demographic and sleep-wake characteristics. Averaged habitual wake- and bedtimes, study begin and end times (mean $\pm$ SD) of extreme morning types (MT; N=16) and extreme evening types (ET; N=16). MCTQ=Munich Chronotype Questionnaire; PSQI = Pittsburg Sleep Quality Index; MEQ= Morningness-Eveningness Questionnaire; ESS= Epworth Sleepiness Scale. *= significant differences between both chronotypes.

To control the preliminary calculation based on the questionnaires and for the exact determination of wake-times and bed-times, all subjects were asked to wear actigraphy watch for seven days and in between study sessions (see Figure 8.7). Based on these measurements and from sleep logs, we calculated the time of midsleep for each subject.

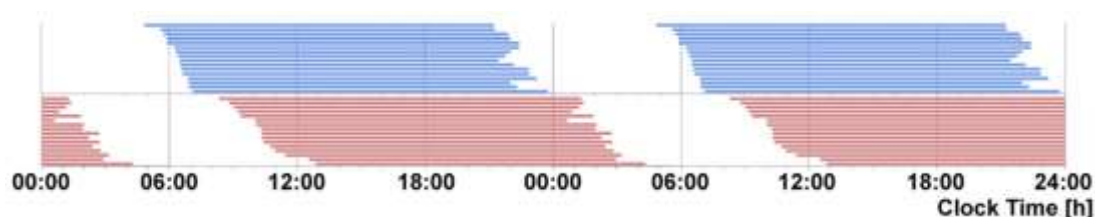


Fig. 8.7: The habitual wake and sleep time routine of extreme chronotypes, taken from the activity rest-activity measurements of 32 subjects. Each line represents the subjective day of 1 subject, and the white space in between shows the habitual sleep episode. The data is double plotted, blue colored lines represent extrem morning types and red colored lines represent evening types.

The study procedures were approved by the local ethical review board in Lausanne, Switzerland and were in agreement with the Declaration of Helsinki. All subjects received detailed written information about the procedures and gave their written informed consent before the study start. During all three study sessions a trained assistant was present in the test room to ensure compliance with the study procedures.

8.3.4 Study methods and protocol

Seven days before each of the study sessions subjects were asked to maintain a very regular sleep-wake rhythm – with approximately 8 hours of sleep, within ± 30 min of self-selected target times, initiated at their habitually chosen bed times and confirmed with validated calculations from the Munich ChronoType Questionnaire [Roenneberg 2003b]. Compliance was controlled by a wrist worn activity monitor (Daqtix®, Oetzen-Süttorf, Germany) and sleep logs. This prevented us from any undesired effects of existing sleep deprivation and allowed us to have the subjects being fully entrained to their preferred circadian phase (morning or evening type). The three study sessions were scheduled to begin one hour after the habitual subjective wake-time and lasted for 16 hours. The study began for MT at $7:15 \pm 0:33$, and for ET $11:14 \pm 1:01$ (clock times, mean $\pm$ SD). The study always started with the DIM condition, followed by the BL and the SSL conditions in a balanced cross-over design. The study days were balanced across all seasons. The in-between-study days ranged from three to six days.

During the study sessions, subjects remained seated in the testing room. They were allowed to read, perform paper work or listen to music (including one hour of scheduled computer work in the middle of the day). A trained assistant stayed in the testing room throughout the study.

The study protocol was identical for all three sessions. Every 30 minutes, subjects were asked to fill a set of visual analogue scale questionnaires (VAS) on paper. These questionnaires contained a horizontal line of 100 mm where the subject had to indicate with a vertical line his/her current perception of subjective sleepiness between two extremes (0 mm: very alert; 100 mm: very sleepy). Cognitive tests were performed every hour with two alternating test batteries (Figure 8.8). Approximately 15 minutes after the cognitive tests a saliva sample was taken. Small meals (sandwiches) and water were provided regularly.

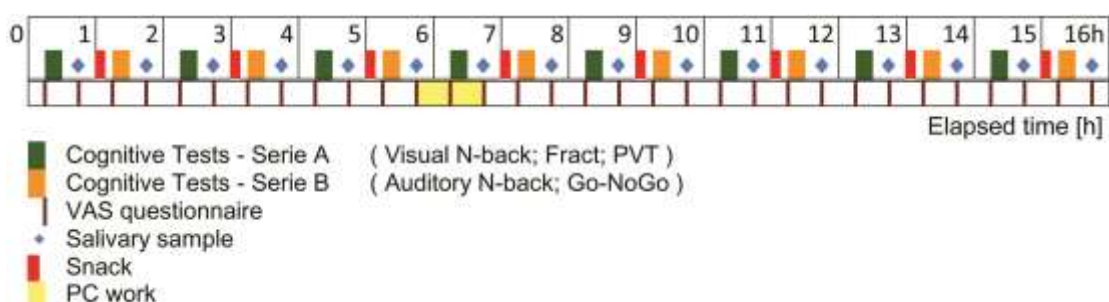


Fig. 8.8: Overview of the study protocol. Abbreviations: PVT = Psychomotor Vigilance Test, Fract = Freiburg Visual Acuity Test, VAS = Visual Analogue Scale, MERS = Mental Effort Rating Scale, Audi nBack = Auditory n-Back Test. PC work: = short time when subjects were asked to perform some computer work.

Vertical illuminance at the approximate eyes' level (E_v) was continuously recorded in 5 min intervals throughout the study by using a spectroradiometer placed on a tripod next to the subject. Electricity consumption for the electrical lighting was monitored for all of the BL and SSL sessions.

8.3.5 Subjective evaluation of sleepiness (with questionnaires)

Subjective sleepiness is a result of at least two processes of sleep/wake regulation in humans [Borbely 1982]. Due to build-up of sleep pressure during the day subjective sleepiness increases with time awake and varies with the 24-h variation of the circadian clock. It can be expressed by indirect measurements of the electroencephalogram, and also be assessed subjectively with questionnaires [Mathis 2009].

Our subjects assessed their subjective sleepiness every 30 minutes on visual analogue scales (VAS) throughout the study. They graphically indicated their acute state of subjective sleepiness between two extremes on a line of 100 mm (“extremely alert”= 0 mm and “extremely sleepy”= 100 mm, Figure 8.9).



Fig. 8.9: Example of the continuous 100-mm bipolar visual analogue scale (VAS) used for evaluation of subjective sleepiness.

8.3.6 Cognitive performance

Cognitive performance can be measured with cognitive tests. Repeated testing assesses possible effects of light on time-of-day changes of performance. In order to gather complex data, all our subjects had to perform two different sets of computer based cognitive tasks, alternating at 1h intervals, i.e. each set was repeated every 2 hours. Altogether, both test batteries were executed 8 times during one study session (see study protocol at Figure 8.8).

We used different cognitive performance tasks from which is known that they are sensitive to sleep deprivation, time-of-day effects as well as acute impacts of light [Jaeggi 2003, Schmidt 2009, Dinges 1985, Cajochen 2003, Lockley 2006, Vandewalle 2006]]. In order to minimize the impact of visually presented cognitive performance tests with lighting conditions, we presented all but one test in an auditory version.

Auditory Psychomotor Vigilance Task: PVT

The PVT was originally developed as a measure for sustained attention [Dinges 1985], and thanks to its sensitivity to sleepiness related decrements it became one of the most widely used for neurobehavioral testing also in sleep and chronobiological studies [Schmidt 2009, Blatter 2006]. We used the auditory 10-minutes version of the PVT, where the subject had to press a button on the key board as fast as possible, when he/she heard a tone. Reaction time (RT) was recorded as the main outcome variable. According to [Drummond 2005], the fastest 10 % of RTs reflect the optimum response capabilities. Any anticipatory responses (RT <100 ms) and lapses (RT >500 ms) were removed from the data prior to analyses.

The auditory N-back test

The N-back test is a common and well-established performance test and appeals to higher cognitive functions such as working memory [Schmidt 2009, Vandewalle 2006, Cajochen 2003]. It has been shown to be sensitive in response to different lighting conditions. Three levels of difficulty were used during the study: 0, 2-back and 3-back test. The 0-back test is similar to a simple reaction time task (the subject had to press as fast as possible 'yes' when he/she heard the spoken letter 'K' in a series of 30 spoken letters). For the 2- and 3-back task, a series of 30 different spoken letters (out of 9 different letters) were continuously presented in a random order. The participant was asked to indicate whether the current presented stimulus was identical to the one presented two (=2-back) or three (=3-back) trials before or not (by pressing the respective button on the keyboard). Correct decisions and response times were recorded, and the overall performance was determined as Correct Response Time (CRT) and was calculated according to equation (1).

$$\text{Corrected Response Time}_{\text{nback}} = \frac{\text{reaction time of correct responses}}{\% \text{ of total correct responses}} \quad (1)$$

Before each trial, it was indicated whether it was a 2- or a 3-back task. A total of 5 different trials for each version of the task had to be completed in each test session, and for each session, different versions of the test were used. To equalize the learning effect to the same lighting condition, all subjects started with the dim light condition and were trained at the beginning of the first session with all 3 tests variations. In this thesis, the results of the 2-back and 3-back task will be presented.

Freiburg Visual Acuity Test (FrACT)

The FrACT test was used to assess visual acuity and contrast threshold under three different lighting conditions. The computerized test can be downloaded free of charge on www.michaelbach.de/fract. During the test, the subjects were asked to determine the orientation of the so called 'Landolt rings' and to respond as fast as possible by indicating the correct orientation with different key board buttons (arrows). The rings were either changed in the size or in contrast. The FrACT test was developed by the Fribourg laboratory [Bach 1996] to assess visual acuity.

8.3.7 Hormonal analyses - melatonin

Melatonin is a 'dark' hormone, primarily produced and secreted by the pineal gland during night time. The timing of the 24-h melatonin rhythm is an indirect marker of the internal biological clock, with its phase position and amplitude. During the typical sleep/wake period circulating melatonin concentration is low during the day and high at night, exhibiting a characteristic rise in concentration in the evening and peaks near the midpoint of the dark interval [Illnerova 2008]. The onset of melatonin production under unmasking lighting condition each evening is called the dim-light melatonin onset (DLMO). The DLMO is often used in chronobiological studies to align results of different

subjects and calculate the phase shift between individuals. Among other circadian markers (such as core body temperature), it remains comparatively robust in the presence of various external influences, except for light. It can be reliably measured directly and indirectly through its metabolites in urine, blood, and saliva [Czeisler 1999]. To monitor the effect of lighting, the same method was used to assess the melatonin onset (MO) under the other two lighting conditions (BL, SSL).



Fig. 8.10: Processing of salivary melatonin samples. Photograph of processing of the raw saliva samples (left); photograph of some frozen samples ready for shipping to the laboratory for the RIA analyses (right).

For the analyses of melatonin concentrations we used salivary melatonin. Our subjects were asked to produce small amounts of saliva (5-10ml) every 60 minutes, which corresponds to 3 x 16 samples during the entire study. All samples were centrifuged (Figure 8.10), frozen at -20°C and sent to an external laboratory for radio-immuno assays (RIA) of melatonin and cortisol (Dr. B. Middleton, University of Guildford, Surrey, UK). We assessed the DMLO as the time when salivary melatonin concentrations reached the threshold of 5 pg/ml in dim light. The DLMO was assessed per subject and study session by linear interpolation using the software 'Hockey Stick'; developed and validated by Dr. K. Danilenko [Danilenko 2012]. For the two lighting conditions (BL; SSL) the same procedure was applied, except that subjects were not in dim light and therefore the onset is solely called melatonin secretion onset.

8.3.8 Electrical energy consumption

The worldwide need to lower energy consumption from electrical lighting has also challenged discussions of new lighting requirements at work places. Since electrical lighting requirements vary not only across climate zones and building related variables, but also between individuals, it is difficult to define a 'golden standard' for humans, especially with regards to non-visual light effects. It still remains to be elucidated, how indoor lighting scenarios could be optimized for visual functions, energy efficiency in buildings and biological non-visual functions in different populations. [Linhart 2009] [Borisuit 2013]

In order to see the effects of different chronotypes we simultaneously assessed total energy consumption from lighting. Before and after the end of each BL or SSL session we measured total electrical energy for lighting in the study room, where a separate meter was installed. For the first four subjects, the measurements were not taken and these data sets are missing (therefore $n=28$). Energy consumption of different light sources was not separated. Acquired data was compared between lighting conditions and between the two chronotype groups.

8.3.9 Statistics

The software Statistica v9 (StatSoft, USA) was used for statistical analyses.

All light measurements and self-evaluated data were collapsed in hourly bins, with the exception of the results from performance tasks. Those were kept in 2-hour bins as they were collected only every two hours.

The results were analyzed by performing repeated analyses of variance (rANOVA) with the general linear model (GLM) and the repeated factor 'time' (1-16 h), the factors 'condition' (DIM, BL, SSL), 'gender' and 'chronotype' (MT, ET). A few missing data due to incomplete questionnaires (subjective assessments) were linearly interpolated. When performance tests failed due to technical problems, the missing data was replaced with the group mean in order to obtain homogeneously balanced sample sizes. This happened for less than 3.5% of the auditory 3-back tests and less than 1.8% of the 2-back tests. For post-hoc analysis, the Duncan's multiple range test and simple t-tests were applied.

We were especially interested in the dynamic changes of sleepiness/alertness (sleep regulation) during the day. In a second step and in order to minimize group differences which were already present at the beginning of the study, we expressed the evaluations at specific times of the day as the difference to the first assessment of the respective study session. This normalization was made for each subject before averaging across groups. In cases where statistically significant effects of time were found, a simple t-test analysis was run, and p-values were adjusted for multiple comparisons based on the false discovery rate [Current-Everett 2000]. For detailed statistics (F, p and t-values) see tables in the annex of this thesis. For correlation analysis, a nonparametric Spearman's correlation was used.

8.4 Results

All the further described data analyses and conclusions originate solely from the author of this publication.

8.4.1 Question A: Difference in lighting preferences between extreme chronotypes

Our first question addressed the differences between extreme chronotypes concerning their preferred lighting across a 16-h wake-time of a day.

Each of the 32 subjects spent 3 sessions of 16 hours (= an entire wake episode) in our study room, in three, significantly different lighting conditions (see Methods). The dim

light (DIM) was on average of 3.07 ± 0.4 lx (E_v ; mean $\pm$ SEM), the bright light (BL) was on average 1033 ± 6 lx for both chronotypes. In the self-selected lighting condition (SSL), where we asked our subjects to choose the light according to their current subjective preference, they could change the illuminance and type of the lighting (Table 6.1) at any moment of the study and they were regularly reminded to ask the assistant to do this if needed. On average, subjects (not separated per chronotypes) chose 699 ± 112 lx, (mean $\pm$ SEM; median: 430 lx) during the SSL condition (see Figure 8.11).

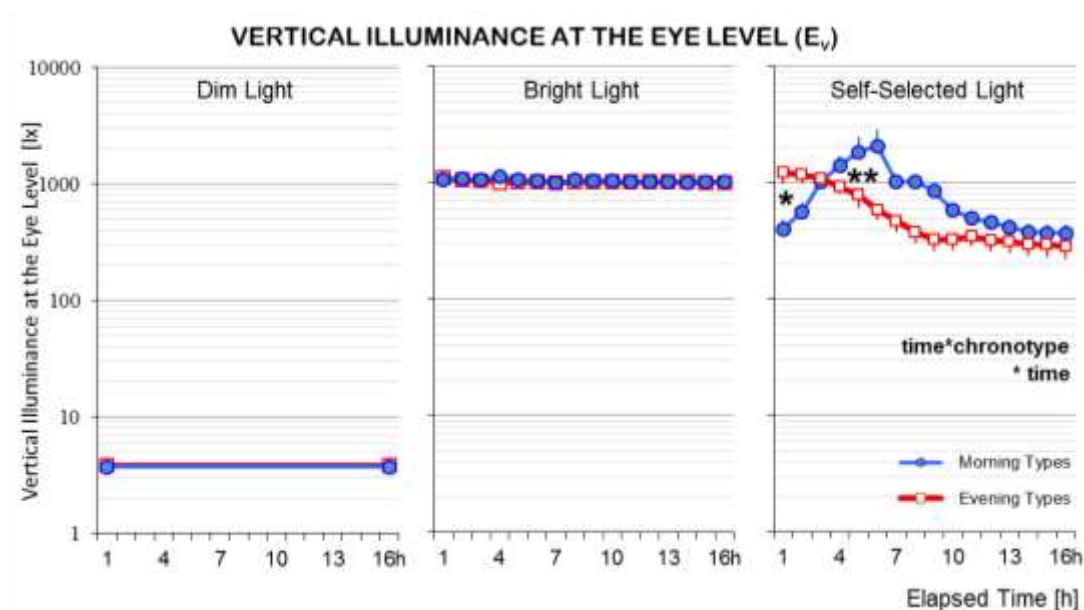


Fig. 8.11: Illuminance under the three lighting conditions, E_v is shown on a log-scale and measured for BL and SSL every 5 min, averaged in hourly bins (means $\pm$ SEM). The x-axis represents elapsed time since study begin (h). Morning types (MT; $n=16$) are shown as filled (blue) circles; and evening types (ET; $n=16$) as open (red) squares.

Deeper analysis was performed for the self-selected lighting (SSL) condition. A significant interaction was found for the factors 'chronotype' and 'time' such that the time course of self-selected illuminance varied for both chronotypes differently. Illuminance was significantly lower for MT during the first hour of the study, and significantly higher for MT after 5 and 6 hours, when compared to ET (2-way rANOVA; 'condition' x 'time'; Duncan's multiple rank test; $p < 0.05$; Figure 8.11, right) No significant difference of light preference was found between men and women. For details on the statistics see Table X1 in the annex of this thesis.

Chosen Illuminance (SSL Condition, E_v)	Morning Types Mean $\pm$ SEM, [lx]; Time of occurrence [study hour]	Evening Types Mean $\pm$ SEM, [lx]; Time of occurrence [study hour]
Study Average	828 $\pm$ 74	571 $\pm$ 36
Hourly Maximum	2066 $\pm$ 768 (hour 6)	1232 $\pm$ 255 (hour 1)
Hourly Minimum	369 $\pm$ 70 (hour 16)	284 $\pm$ 54 (hour 16)

Tab. 8.4: The average, maximum and minimum E_v ($\pm$ SEM); the times of occurrence, according to subject's choice in the self-selected light condition for both chronotypes.

On average and across 16 hours, morning types chose 828 $\pm$ 74 lx compared to evening types, who chose only 571 $\pm$ 36 lx ($p=0.17$). But evening types chose significantly higher illuminance at the very beginning of the day compared to morning types, who chose highest illuminance between the 4th to 6th study hour. The times, minimum, maximum and averages of the chosen illuminance for both groups are shown on Table 8.4.

In a next step, the difference between SSL and BL conditions was assessed. Overall, there was a significantly lower illuminance in the SSL than the BL condition (3-way rANOVA, main effect of 'condition'; $p<0.0001$). In addition, illuminance was differently distributed over the day (interaction 'condition' x 'time'; $p<0.0001$). In the second half of the day, e.g. from study hours 8 to 16, there was higher illuminance in the BL condition (Duncan's multiple rank-test; Fig. 8.12, left).

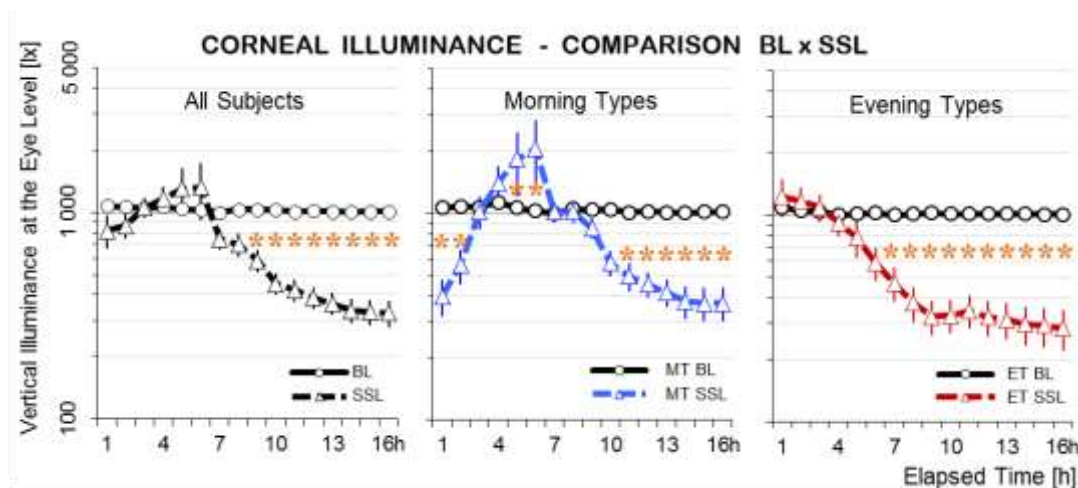


Fig. 8.12: E_v shown for BL and SSL; for all subjects (left; $N=32$), for morning and evening types (middle and right). Illuminance (lx) is shown on a log-scale and was averaged in hourly bins (means $\pm$ SEM). The x-axis represents elapsed time since study begin (hrs). * = significant differences between BL and SSL conditions ($p<0.05$).

We also found significant differences between the two chronotypes for the SSL condition. When compared to BL, MT had in SSL higher illuminance 5 to 6 hours after

the study begin and significantly lower illuminance during the first two hours of the study, as well after study hour 10 (interaction 'condition' x 'chronotype' x 'time', $p < 0.0001$; Fig. 8.12, middle and right side). When analyzing the same with ET, they had significantly lower illuminance after 7 study hours until the end of the study in SSL, compared to BL. For more statistics see annex, Table X1.

Based on our study design and according to the literature [Zeitzer, et al. 2000, Phipps-Nelson 2003, Cajochen 2000] our BL condition of 1000 lx was considered as being clearly above the alerting threshold of light in human. We therefore divided our illuminance recordings from SSL conditions into two groups of participants: Those with illuminance higher than 1000 lx, i.e. with saturated alerting effects and in those with lower illuminance (i.e. with less alerting effects via non-visual light perception). We found that the difference between both chronotypes was statistically not significant ($p = 0.394$), morning types chose on average 4,25 hours with E_v higher than 1000 lx, compared to evening types who chose only 3 hours. (Fig. 8.13)

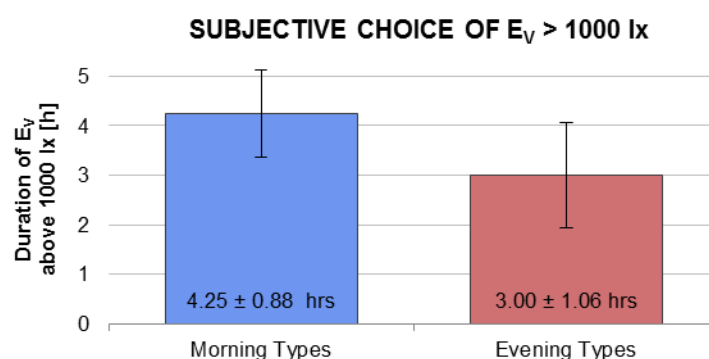


Fig. 8.13: Higher overall E_v during daytime (>1000 lx), for extreme morning (MT; blue bar) and evening types (ET; red bar) means, SEM.

In the next step, the percentage of subjects who chose bright light with E_v higher than 1000 lx was expressed in four time bins of 4 hours across the study time (Figure 8.14). There was a significant difference in the middle of the study (i.e. between study hours 5–8), where almost 60 % of the morning types chose bright light (which was 3.5 times more often the case when compared to evening types). No difference was found in the second half of the day.

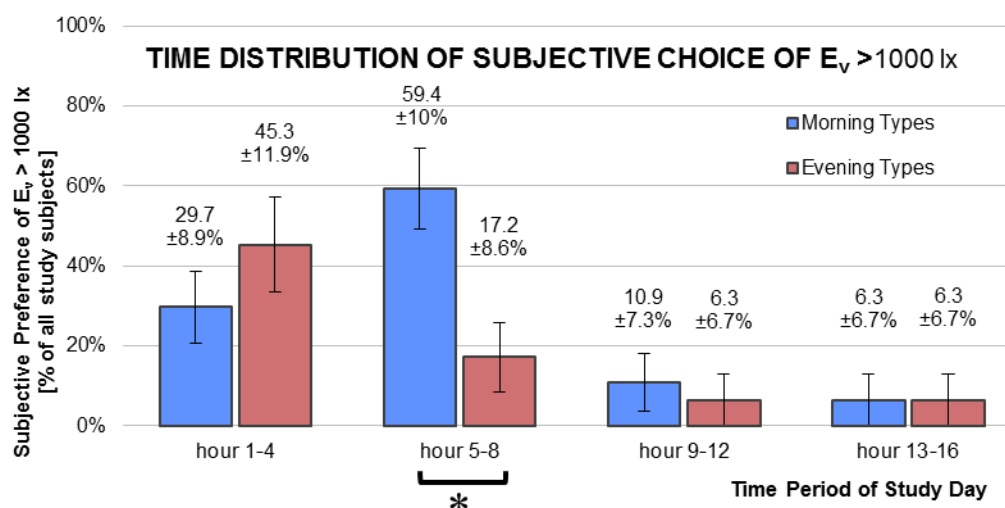


Fig. 8.14: Time distribution of self selected bright light with high E_v (above 1000 lx), plotted as percentage of all study subjects, separated per chronotype ($n_{MT}=16$, $n_{ET}=16$).

8.4.2 Question B: The effects of three different lighting conditions on biological functions

In order to measure the effects of different lighting conditions on biological functions, we analysed subjective sleepiness, cognitive performance and salivary melatonin secretion as well as visual acuity.

8.4.2.1 Subjective Sleepiness

For subjective sleepiness we found a significant interaction between the factors 'condition', 'time' and 'sex' (3-way rANOVA; Table X2). Across all subjects, higher subjective sleepiness was reported in DIM, compared to BL and to SSL conditions (2-way rANOVA, main effect of 'condition'; $p<0.01$). There was no significant difference between BL and SSL. Subjective sleepiness increased over time in all lighting conditions (main effect of 'time'; $p<0.0001$) see Figure 8.15. Across all lighting conditions, ET felt overall sleepier than MT (3-way rANOVA; main effect of 'chronotype'; $p<0.05$), see Figure 8.16.

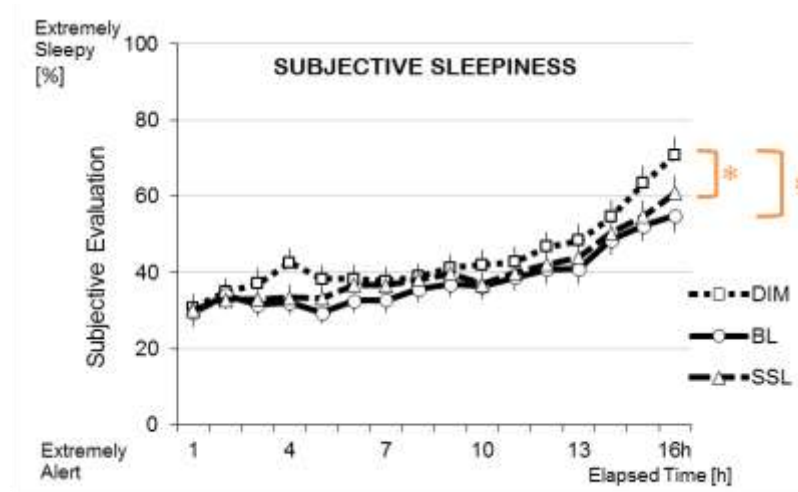


Fig. 8.15: Subjective sleepiness ratings for all three lighting conditions, (mean values $\pm$ SEM, $n=32$; absolute values). Squares = DIM; circles = BL; triangles = SSL. The stars indicate significant differences between the DIM to both other lighting conditions (main effect of 'condition'; $p<0.05$). The x-axis represents elapsed time since study begin (h), the y-axis represents subjective evaluations (0% extremely alert, 100% extremely sleepy)

In the next step, we analysed the differences between both chronotypes more in detail, for each lighting condition separately. For the DIM and the SSL condition, evening types were sleepier than morning types, but this was not the case for the BL condition (2-way rANOVA; main effect of 'chronotype'; $p<0.05$ in DIM and SSL). (Fig. 8.16). For statistics see the Annex; Tab. X2).

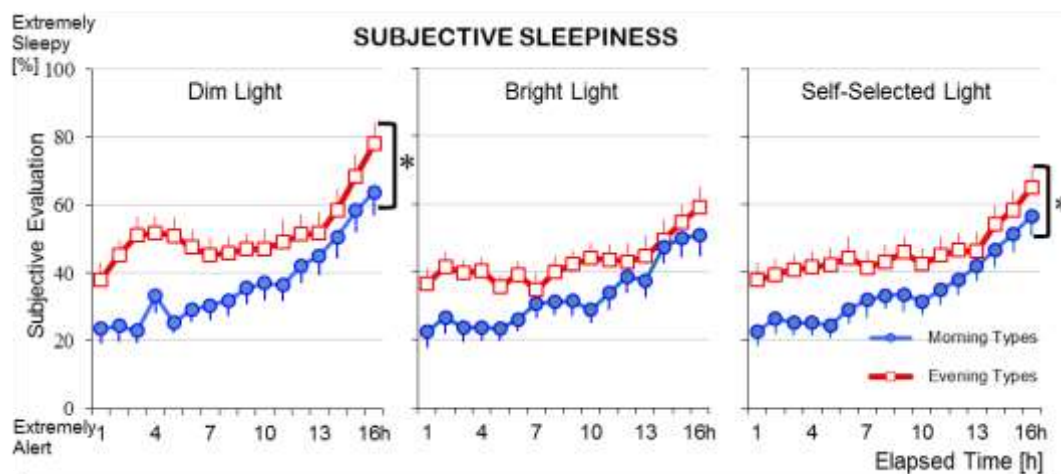


Fig. 8.16: Subjective sleepiness for morning types (MT; $n=16$; blue filled circles) and evening types (ET; $n=16$; red open squares), absolute values. The x-axis represents elapsed time since study begin (hrs), y-axis represents subjective evaluations (0% extremely alert, 100% extremely sleepy). Stars indicate significant differences between both chronotypes ($p<0.05$).

In a last step, we analysed the dynamics of subjective sleepiness within both chronotypes for each lighting condition separately. Therefore, subjective sleepiness

ratings were expressed relative to the first rating of the study. We found that subjective sleepiness increased significantly earlier for morning types in all lighting conditions. In BL conditions, MT became significantly sleepier after 11 hours, (which equals 12 hours after habitual wake time) compared to ET, who did not show a significant increase of subjective sleepiness during the entire recording period in BL, (i.e. up to 17 hours since their habitual wake time). During SSL conditions, MT became significantly sleepier after 6 study hours, and again, there was no significant increase of subjective sleepiness in ET (t-tests; $p < 0.05$; Figure 8.17). For detailed statistics see annex, Table X2.

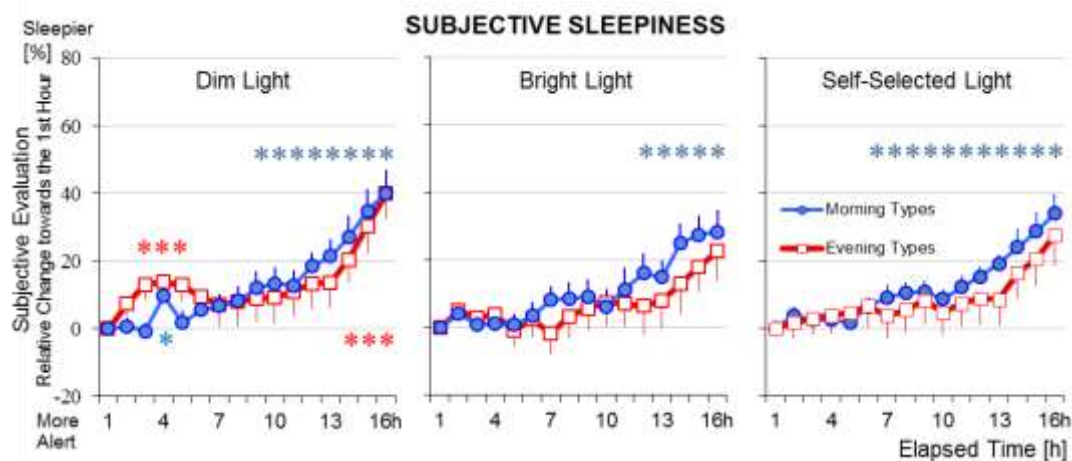


Fig. 8.17: Time course for changes in subjective sleepiness since the beginning of the study. It was separately determined for all three lighting conditions; t-tests were performed for both chronotypes separately (mean values $\pm$ SEM). MT= filled circles and ET=open squares (both $n=16$). Significant changes since the beginning of the study are indicated with blue stars for MT and red stars for ET ($p < 0.05$). All p-values were adjusted for multiple comparisons based on the false discovery rate.

8.4.2.2 Cognitive performance: the psychomotor vigilance task (PVT)

For the fastest 10% of the RT in the PVT, a significant interaction was found with the factors 'time', 'chronotype' and 'sex' (3-way rANOVA). The RT decreased over time in all lighting conditions (main effect of 'time'; $p < 0.0001$). The results (across all subjects), showed that here was no significant difference between lighting conditions ($p > 0.1$). (Fig 8.18).

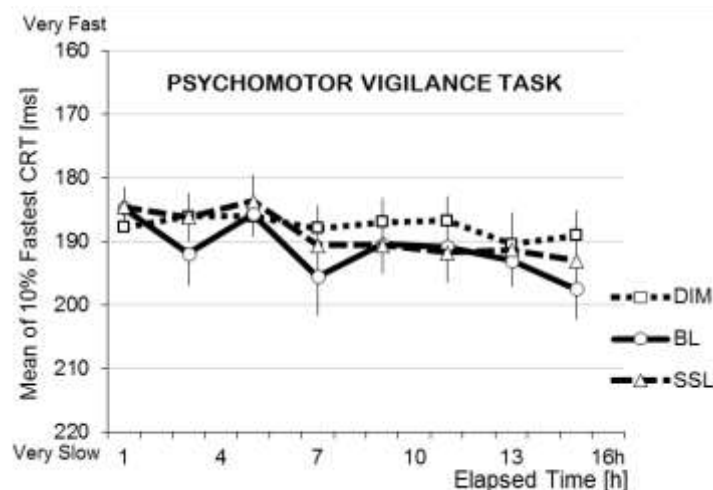


Fig. 8.18: The 10% of the fastest reaction times in PVT, corrected for lapses and anticipation (CRT; mean values $\pm$ SEM, $n=32$).

There was no significant main effect of 'chronotype'. When we analysed the results from the three lighting conditions for each chronotype separately, we found a significant interaction in the DIM as well as in the SSL condition for the factors 'sex' and 'chronotype'. The differences were such that MT women were slower than MT men and ET women. ($CRT_{PVT}: F_{MT} > M_{MT}$ and $F_{MT} > F_{ET}$; data not shown since any sex differences will not be discussed further in this thesis; statistics are shown in the annex, tab. X3).

In BL and SSL conditions, both chronotypes became slower in the course of the study (2-way rANOVA; main effect of 'time'; $p < 0.001$; Fig. 8.19).

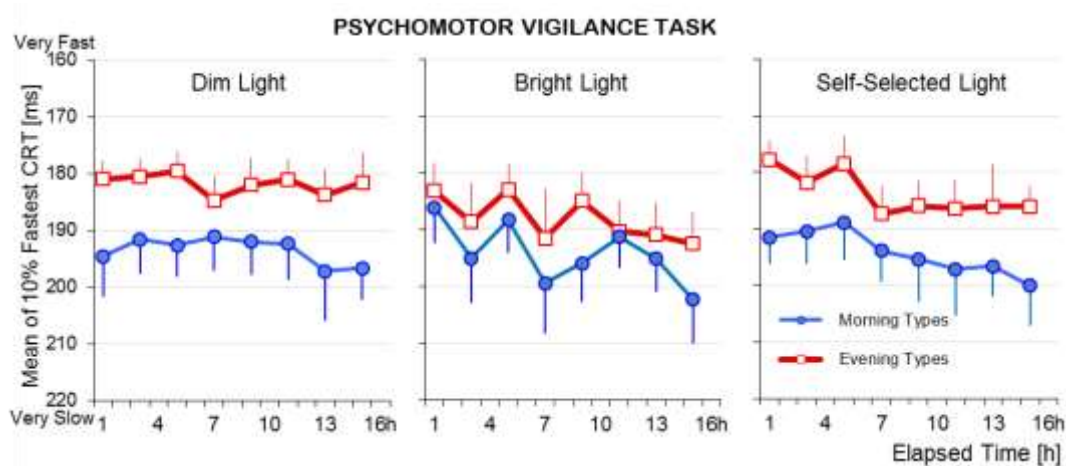


Fig. 8.19: The 10% of fastest CRT in the PVT, for morning types (MT; $n=16$; filled circles) and evening types (ET; $n=16$; open squares). the x-axis represents elapsed time since study begin (hrs).

In the last step we analyzed further the dynamics of the PVT, within each chronotype separately. Relative slower CRT (expressed as difference to the score during the first

study hour), occurred only in ET, during the last hour of SSL conditions (t-tests; $p < 0.05$; Fig. 8.20; for detailed statistics see annex, Table X3).

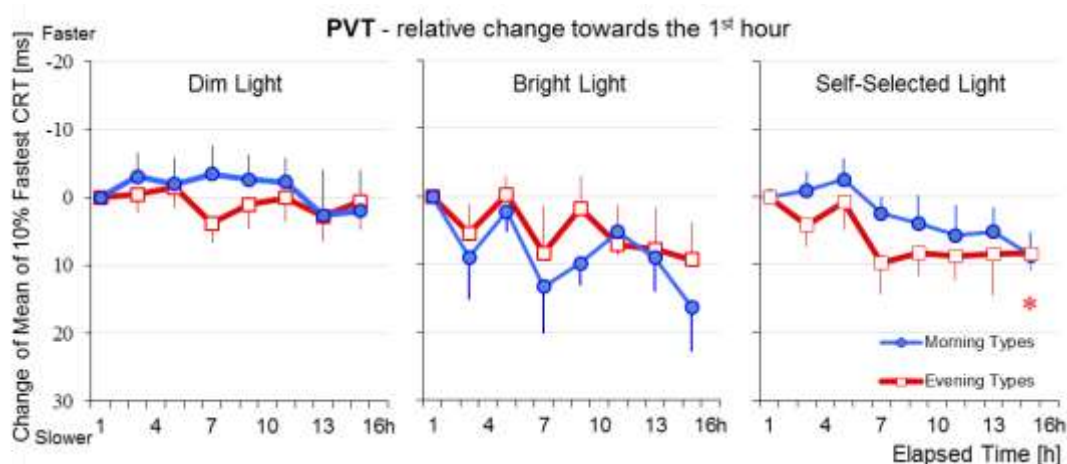


Fig. 8.20: Time course of the relative changes in the 10% of the fastest CRT in PVT, for all three lighting conditions; t-tests were performed for both chronotypes separately (mean values $\pm$ SEM). MT= filled circles and ET=open squares (both $n=16$). Significant changes since the beginning of the study are indicated with blue stars for MT and red stars for ET ($p < 0.05$). All p-values were adjusted for multiple comparisons based on the false discovery rate (FDR).

8.4.2.3 Cognitive performance: the auditory n-back test

During the auditory n-back test, all correct decisions and response times were recorded. The overall performance was determined as Corrected Response Time (CRT), and was calculated according to equation (1). The results of the 2- and 3-back versions are presented here. Both the very first 2-back and 3-back tests in DIM at the beginning of the study were very slow, indicating a training effect. This first assessment of each test version was excluded from further analysis.

For the auditory 2-back test a significant interaction was found for the factors "condition" and "time" (3-way rANOVA), such that in DIM conditions, CRT were, significantly longer in the first and last test sessions when compared to BL and SSL conditions. There was a significant lower CRT for DIM compared to the other light conditions (main effect of condition, $p > 0.01$), and overall slowing down of CRT in the course of the day in all lighting conditions (main effect of 'time'; $p < 0.001$; Fig. 8.21).

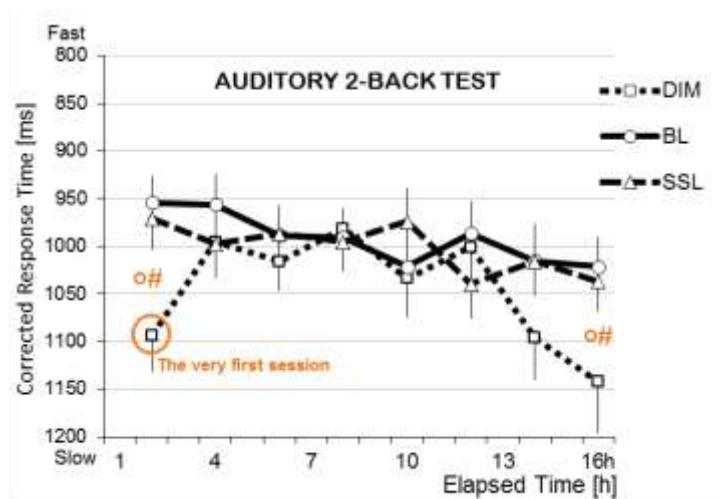


Fig. 8.21: Corrected response times (CRT) for the auditory 2-back test. (mean values $\pm$ SEM, $n=32$). Significant differences ($p<0.05$) between conditions are indicated as '#' for DIM x BL, 'o' for DIM x SSL. The very first 2-back test is circled, since it served as training session for the test.

There was no significant difference between chronotypes. When we then tested within each chronotype and lighting condition separately, we found a significant slowing down of the CRT during all conditions (Fig. 8.22; 2-way rANOVA, main effect of 'time' for all conditions; more statistics in the Annex on Table X4).

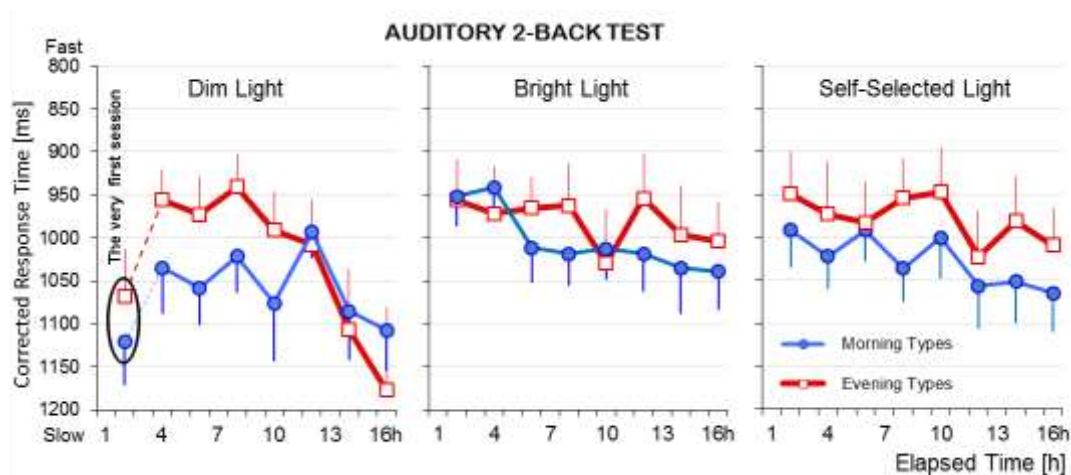


Fig. 8.22: Corrected response time (CRT) for the auditory 2-back test. (mean values $\pm$ SEM, $n=32$).

In the last step we analyzed further the dynamics separately within each of the chronotypes. We expressed the time course as the difference to the result of the first test of the session. There was a significant slower CRT only in MT, 13 to 15 hours after habitual wake-time in the BL condition (t-tests; $p<0.05$; Figure 8.23; for detailed statistics see annex, Table X4).

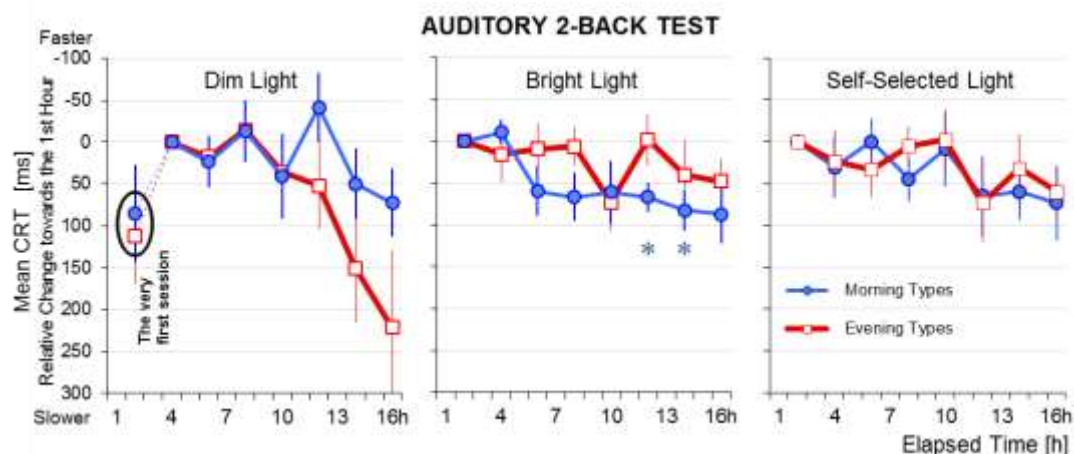


Fig. 8.23: Time course of the relative change of CRT for the auditory 2-back test since the beginning of the study, for all three conditions; t-tests for both chronotypes were done separately (mean values $\pm$ SEM). MT= filled circles and ET=open squares, both $n=16$. Significant changes since the beginning of the study are indicated with blue stars for MT and red stars for ET ($p<0.05$). All p-values were adjusted for multiple comparisons based on the false discovery rate (FDR).

In the auditory 3-back test we also found a significant interaction for the factors 'condition' and 'time' ($p<0.001$; 2-way rANOVA). We found significantly faster CRT for BL and SSL than DIM for most of the day (BL: faster from test session 1 to 6 and in session 8; SSL faster from test session 1 to 5 and in the test session 8; $p<0.001$). There were also significant differences between lighting conditions (DIM>SSL>BL, main effect of 'condition', $p<0.001$; Fig. 8.24).

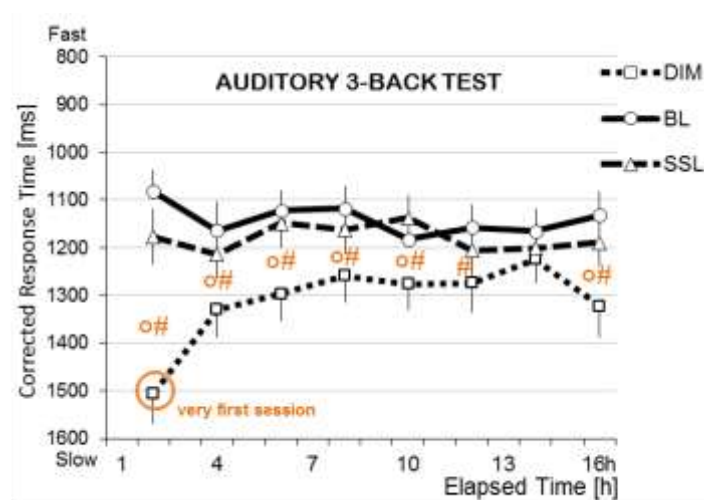


Fig. 8.24: The CRT in the most difficult working memory task version: the 3-back test (mean values $\pm$ SEM, $n=32$). Stars indicate significant differences between lighting conditions. Significant difference are indicated as '#' for DIM x BL and 'o' for DIM x SSL ($p<0.05$).

For the 3-back test, there was no effect of time within both chronotypes and lighting conditions (Figure 8.25; for detailed statistics see annex, Table X5).

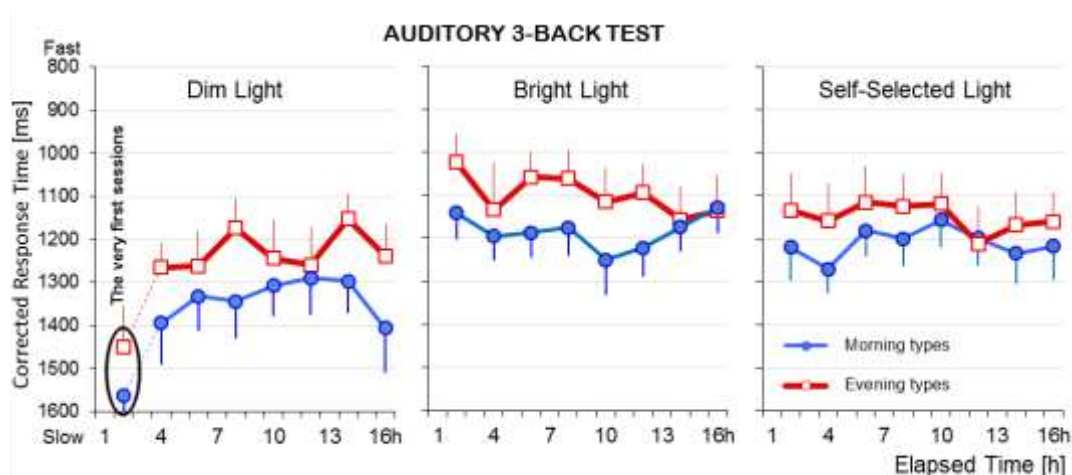


Fig. 8.25: Corrected response time (CRT) for the auditory 3-back test. (mean values $\pm$ SEM, $n=32$), performed separately for each lighting condition chronotype

8.4.2.4 Freiburg Visual Acuity Test (FrACT)

For Visual acuity, there was no significant statistical difference between chronotypes, or any effect of time in the Freiburg Visual Acuity Test (FrACT) for BL and SSL conditions. The test is highly sensitive for background illuminance and it was therefore not surprising that we found significantly lower performance in the DIM condition ($p<0,001$), which turned out to be significantly influenced by time (lower later in the evening). However, since we mainly used auditory versions for our performance tests a lower vision in DIM was not a bias of our study. For details see annex, Table X9.

8.4.2.5 Hormonal analyses: Salivary melatonin concentrations

The timing of the study, its beginning and end, was calculated for each participant individually according to the individual habitual wake times (see Tab 8.3, Fig 8.7). This procedure was to ensure that all the samples were taken in the same circadian time and the average concentrations of the salivary melatonin could be assessed in the relevant circadian phase for both chronotypes.

In the morning, 45 minutes after arrival at the laboratory, melatonin concentrations were significantly lower in the BL compared to the DIM condition. In the second half of the day, we found significantly higher concentrations in DIM than in both BL and SSL from the 13th study hour till the end of the study. There were significant differences between BL and SSL during the last two hours of the study (Figure 8.26; Table X6 of the annex).

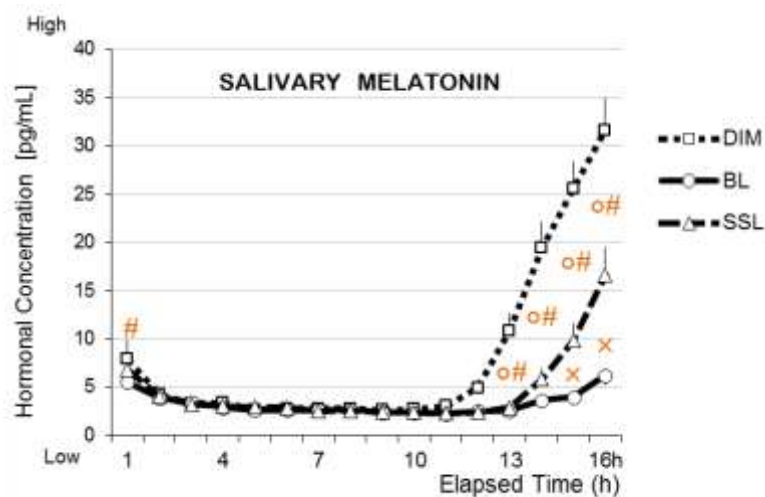


Fig. 8.26: Time courses of salivary melatonin concentrations for all 3 lighting conditions (mean values $\pm$ SEM, $n=32$). Significant differences are indicated as '#' for DIM x BL, 'o' for DIM x SSL and 'x' for BL x SSL.

When we explored the time course separately for each lighting condition and chronotype, we found a significant interaction between factors 'time', 'chronotype' and 'gender' in DIM (2-way rANOVA, data not shown, see statistics in annex, Tab. X6). Significantly higher melatonin concentrations were found during the last three study hours in MT than in ET in DIM (Duncan's multiple rank-tests). But there were no significant differences between chronotypes in BL and SSL conditions (Fig. 8.27). The main factor for time was significant in all conditions, indicating a circadian variation of salivary melatonin concentrations.

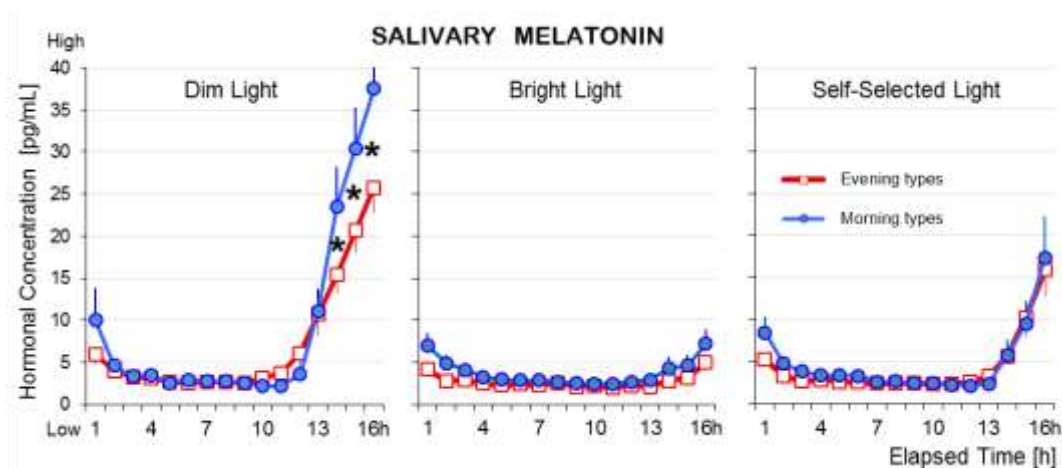


Fig. 8.27: Salivary melatonin concentrations in all 3 lighting conditions (mean values $\pm$ SEM, $n=32$). Significant differences in salivary melatonin concentrations between chronotypes are indicated with stars ($p<0.05$).

The time of the dim light melatonin onset in the evening (DLMO; i.e. the time when the melatonin secretion starts to raise), was assessed as the first time point when salivary melatonin concentrations had trespassed 5 pg/ml. In order to be able to verify the DLMO for each subject, one 4 pg/ml threshold and one 10 pg/ml threshold had to be taken for two MT subjects as well as one 10 pg/ml threshold for one ET subject. These times were calculated for each subject in dim light but also for the two light sessions (and is called melatonin onset for the latter).

DLMO and melatonin onsets in BL and SSL were at first assessed and expressed according to the relative time of the study session. In DIM light occurred the DLMO in all subjects within the study time, and the difference between ET and MT was not significant ($p=0.3820$), on average 23 minutes. In the other two lighting condition could not be the melatonin onset assessed for all subjects. In BL less than 40 % and in SSL only 80 % of subjects showed the onset during the 16 hours of the study. Therefore the mean time for all subjects could not be calculated. For results of calculation based on the available data see Table 6.5. There was no significant differences in the calculated onset times between BL and SSL conditions but there was a significant difference to DIM ($p<0.001$); for more detailed information see annex, table X7.

Additionally, the DLMO and MO were expressed as the local clock time. Clear shift in the timing of the activity could be found between the chronotypes as well as between some of the lighting conditions (Table 6.5).

	Morning Types (MT)		Evening Types (ET)	
	Study time (Clock time)		Study time (Clock time)	
	mean $\pm$ SD	n	mean $\pm$ SD	n
DIM	13,4 $\pm$ 1,0 (20:42 $\pm$ 1:02)	16	13,1 $\pm$ 1,3 (00:14 $\pm$ 1:20)	16
BL	14,5 $\pm$ 0,8 (21:15 $\pm$ 0:50)	6	15,2 $\pm$ 1,0 (02:24 $\pm$ 1:01)	6
SSL	14,8 $\pm$ 0,9 (22:00 $\pm$ 0:52)	12	14,8 $\pm$ 1,3 (02:01 $\pm$ 1:15)	14

Tab. 8.5: Results for DLMO and melatonin onset calculations, for three lighting conditions and MT and ET; mean $\pm$ SD; n indicates the number of subjects. For more clarification, the averaged clock times were calculated for each group and lighting condition (in brackets)

Summary

We investigated the possible impact of the three lighting condition on subjective sleepiness and performance. Under the DIM light worsened majority of the monitored parameters – subjective sleepiness increased earlier and the reaction times were longer

compared to BL and SSL. Between the chronotypes we found significant differences in subjective sleepiness rating but not in any of the cognitive tests presented here. According to our results, a statistically significant difference between the SSL and the BL condition was found only in the very difficult task, the auditory 3-back test.

Salivary melatonin concentrations were only different between MT and ET in the DIM conditions. Timing of DLMO was not significantly different, but the increase of concentration in the evening hours was faster in the MT than in ET. For BL and SSL lighting conditions, not all subjects contributed to the assessments, since the lighting conditions delayed the onset of salivary melatonin secretion in the evening. The number of participants with MO delayed after the study finished was 2x higher in the constant bright light condition than in SSL.

8.4.3 Question C: Subjective evaluation versus objective biological effects of light

In a final step, we determined inter-individual relationships of subjective aspects (subjective sleepiness) with objective measures (PVT as a very simple task, and the auditory 3-back test as a more difficult performance task), and a biomarker (hormonal secretion of melatonin). The results of the correlation analyses are shown on Table 8.6.

	Subjectively more sleepy	Better performance in a simpler task	Better response in a more difficult task	Higher salivary melatonin concentrations	Brighter environment (E_v)
DIM					
Higher subjective sleepiness	-	0,066	-0,044	0,264	-
Better performance in a simpler task	0,066	-	0,065	0,199	-
Better performance in a more difficult task	-0,044	0,065	-	-0,041	-
Higher salivary melatonin concentrations	0,264	0,199	-0,041	-	-
Brighter environment (E_v)	-	-	-	-	-
BL					
Higher subjective sleepiness	-	0,167	0,118	0,140	-0,201
Better performance in a simpler task	0,167	-	0,110	0,075	-0,044
Better performance in a more difficult task	0,118	0,110	-	-0,036	-0,066
Higher salivary melatonin concentrations	0,140	0,075	-0,036	-	0,142
Brighter environment (E_v)	-0,201	-0,044	-0,066	0,142	-
SSL					
Higher subjective sleepiness	-	0,158	0,102	0,152	-0,264
Better performance in a simpler task	0,158	-	0,042	0,120	0,037
Better performance in a more difficult task	0,102	0,042	-	-0,016	-0,105
Higher salivary melatonin concentrations	0,152	0,120	-0,016	-	-0,041
Brighter environment (E_v)	-0,264	0,037	-0,105	-0,041	-
p > 0,05 p < 0,05 p < 0,01 p < 0,001 p < 0,0001					

Tab. 8.6: Correlations between subjective and objective variables were calculated by performing the Spearman's Correlation; R values were calculated for all 32 subjects, for each condition separately. Coloured fields depict significant R-values (in bold): for darker colours: $p < 0.05$ light and lighter colours (orange): $p < 0.0001$.

In DIM, higher salivary concentrations were significantly correlated with higher subjective sleepiness ratings and worse reaction times in a simpler cognitive task. Under SSL and BL, higher E_v was negatively correlated with higher subjective sleepiness. Higher subjective sleepiness was positively correlated with higher melatonin

concentrations and better performance in the PVT. In our data there was no correlation between subjective sleepiness and performance in the more difficult cognitive task (auditory 3-back). Further details of the correlation statistics can be found in Annex, Tab.X10.

8.4.4 Question D: The effects on electricity consumption

Due to the constant high illuminance levels over the entire 16 hours, we predicted higher consumption of electrical energy in BL conditions. This turned out to be true since there were significant lower energy consumption in the SSL condition, which reached only 59% of the consumption in BL. (In BL, the total energy consumption for lighting reached 15.3 ± 0.46 kWh compared to SSL, with 8.96 ± 0.93 kWh, mean $\pm$ SEM) Between MT and ET, there was no significant difference in energy consumption from electrical lighting ($p > 0.4$; Figure 8.28).

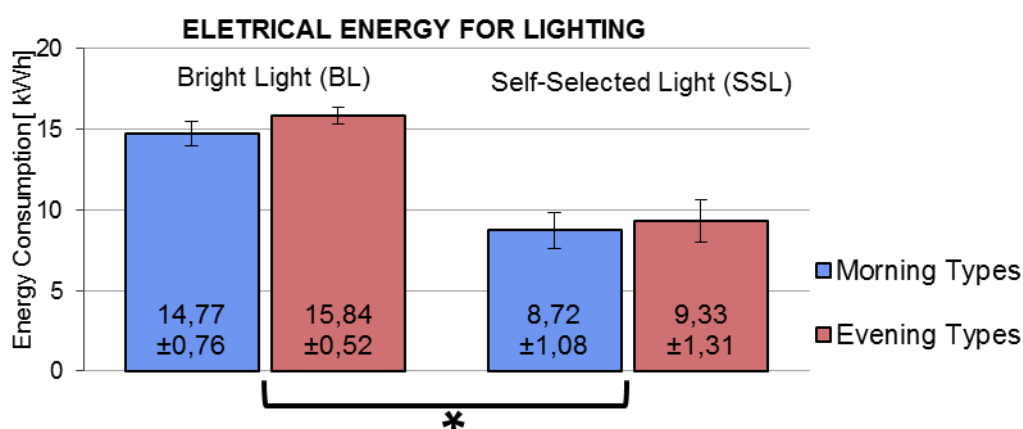


Fig. 8.28: Energy consumption (kWh) from electrical lighting for both lighting conditions according for both chronotypes (blue=MT; red=ET, $n=14$ in both groups, mean $\pm$ SEM). * = Significant differences between conditions ($p < 0.05$).

Taken together the results in this section, we found significantly lower electrical energy consumption under SSL conditions than under constant BL conditions. There was no difference in energy consumption from electrical lighting between chronotypes in both conditions.

8.5 Summary and discussion

8.5.1 Preferred temporal distribution of light during the day

One of the aims of our study was to investigate the preferred lighting of two extreme chronotypes in order to illustrate the possible range of preferences within the young healthy population.

During one of the 16-hour long study session we encouraged subjects to control their lighting environment and let them set up the system according to their best feeling. In order to minimize the limitation of subject's choice, our office-like study room was equipped with high standard lighting installations – several types of light sources with

high installed luminous power and steeples regulation were available. This set-up allowed subjects to choose bright light, i. e. light with alerting effects, even at times when this option is missing with regular lighting installations.

In the results, some differences of choices between the first and the second half of the study day could be found. Bright light seems to be important for both chronotypes in the first half of the day; they chose it for almost 4 hours (almost half of the time). In contrary, during the second half of the day, lighting levels were overall lowered and the choice of bright light was rare among both groups of subjects. In fact, we had only two subjects who chose bright light in the later hours. In these two cases (one from each chronotype group) bright light was chosen over the entire 16-hours period. In the after study interview, one subject stated that he did chose the bright light in order to have better visual standard for the chosen activity (detailed drawing) and the other wanted to experiment a bright light in the evening, but finally did not like it. These findings suggests that constant illuminance provided by the artificial lighting systems without any further regulation does not go along with the users' preference. It is either too dim during the daytime or too bright during the evening/night.

Further analyses of the first half of the day revealed significant differences in the temporal preference of bright light between the extreme chronotypes. Evening types had chosen bright light at the very beginning of the day and then, their preferred illuminance decreased until the end of the study. Morning types reached their daily illuminance maximum five hours later and they kept the bright light until their subjective midday, i. e. significantly later than evening types. If we assume that the preferred lighting choice of intermediate chronotypes would be between the preferences of the two extreme groups, we could conclude that in real life conditions the bright light during the second half of the subjective day is mostly not in line with the subjective preference of the users.

It is well known that, even though the reasoning behind is not clear, strong preference of workplaces with daylight was found in general, not only among office users [Galasiu & Veitch, 2006] and that daylight at the workspace is considered as important [Veitch, et al. 1993]. Nonetheless, once the access to daylight was restricted, the dynamic changes of illuminance (as we could see in our results) were not found and the peak of bright light in the midday was missing in the subjectively chosen lighting profile [Juslén 2005, Boyce 2000]. The users did not attempt to mimic it with their subjective choice; demand for increase of illuminance in the midday did not occur in their self-chosen lighting profiles. Once the visual needs were fulfilled and no disturbances occurred, the adequate visual comfort was found and further adjustments of the illuminance became rare [Boyce 2000]. Comparisons of several lighting studies made by Fotios [Fotios & Cheal 2010] suggested that the current/previous lighting conditions and the range of possible adjustments played a more important role in the subjective choice of light than the actual illuminance.

All of these studies confirmed the crucial role of visual perception and adaptation of the visual system while determining the choice of lighting. The important question is to what extend are office users able to determine the non-visual impacts of light they chose

in their environment. In another chronobiological study with intermediate chronotypes, (see chapter 5.1 in [Borisuit 2013b]), a strong correlation between higher light preference and better visual comfort was found, but rather a low (however significant) correlation between higher light preference and non-visual aspects such as higher subjective alertness was shown. In our study with extreme chronotypes the correlation between light preference and subjective alertness became even smaller in bright light (chapter 5.2 in [Borisuit 2013b]) and disappeared once these subjects could choose the light according to their preference. Is it possible that these extreme chronotypes had opted for a rather stable circadian entrainment and compromised on visual comfort and the acute effects of light, such as a reduction of subjective sleepiness in the evening hours? Further aspects of visual comfort with regards to the lighting preference were described in chapter 5.2 of the thesis of A. Borisuit [Borisuit 2013b].

The lighting pattern of chosen illuminance expressed in clock time followed approximately the pattern of daylight, with a bright peak around noon and slow decrease of illuminance towards dusk. Habitual wake times differed between the two chronotypes. They were more than 4 hours apart, which is in accordance with the literature [Schmidt, et al. 2009, Mongrain, et al. 2006]. Once the pattern of chosen illuminance was analyzed according to the subjects' habitual timing, i.e. starting at habitual wake time, the calculation revealed a difference between MT and ET for the time with maximum E_v as well as for the time when the E_v gets lower than the threshold of 1000 lx. The time course of natural illumination occurs at different circadian times for both chronotypes. This suggests that ET started to decrease the lighting levels at an earlier circadian phase compared to MT. There was no evidence that ET would compensate some sort of (day-) 'light deficiency' in the evenings, with brighter electrical lighting, as we hypothesized. Indeed, the contrary was true. Evening types chose bright light for shorter periods of the day, they chose lower maximal, lower minimal and lower average illuminance and they started to decrease the illuminance at an earlier circadian phase when compared to MT. Since evening types are relatively delayed with their sleep and wake times, this might indicate some sort of counterstrategy to avoid further light induced phase delays by bright evening light.

The effect of their light choice was also illustrated by its impact on the onsets of melatonin secretion. Even though the lighting environment was significantly different between both chronotypes, there was no difference between the timing of their melatonin secretion onset relative to circadian phase. For both chronotypes, it occurred approximately one hour before the end of the study day and provided optimal timing for sleep onset immediately after the end of active day.

In comparison to the self-selected light condition, the onset of melatonin secretion under the bright light was shifted into subjective night. These findings could explain the subjective lower lighting preference in the SSL condition in the second part of the day, as it was discussed earlier. Also it confirmed the fact, that bright light in the evening could have very negative impact on sleep/wake regulation, especially for late chronotypes with already late phases of entrainment, as could be seen once we express the times of melatonin onset as local clock time.

8.5.2 Effects of light on cognition and biological markers

In our study we were interested in the effects of three different lighting conditions on non-visual functions. In our office-like laboratory we tested subjective sleepiness, performance, melatonin concentration and their changes during daytime for 16 hours. The results were analyzed with respect to the effects of the lighting conditions, the effects of the time of day, the effects of task and its difficulty levels and the effects of the chronotype.

Acute effects of different lighting conditions

Light is known to be a powerful alerting tool with significant effects on many other non-visual functions. Under DIM, low illuminance negatively impacted almost all the monitored aspects: subjects reported overall higher subjective sleepiness, their results in working memory tasks revealed worse overall performance and earlier DLMO was found.

The other two lighting conditions were chosen to simulate two concepts of high quality standards of lighting that could be installed in the office environment – a constant lighting system and a user-controlled lighting system. Although the lighting pattern of the two conditions was significantly different, no impact on the overall level of subjective sleepiness or performance (at least in the simpler cognitive tasks) was found. In the very difficult task (3-back) we found significant differences indicating that constant bright light over 16 hours helped subjects to perform better. We can say that the more difficult the task was the bigger effect of a brighter lighting condition was found.

A different impact from the three lighting conditions was also found for salivary melatonin concentrations and the onset of melatonin secretion in the evening. The melatonin onset in the self-selected lighting condition occurred for both chronotypes approximately one hour before the end of study, which was later than in DIM. In the BL condition, melatonin onset did not occur in most of the subjects before the end of the study, which indicated a very late onset with an assumed circadian phase delay the next day, corroborating reports from the literature Illnerová, et al. 2000, Schmidt, et al. 2009, Lewy 2007].

Acute effects of light in relation to the time of the day

It is well known, that the timing of the circadian and homeostatic drives act as a determining factor for subjective sleepiness. In our results we could see the increase of subjective sleepiness during the day in all lighting conditions. The effect of light could be seen in the dynamics of the changes - the significant raise of sleepiness under constant bright light started later and the relative difference between the first and the last rating was lower compared to the other two conditions. Constant bright light exposure therefore lowered the subjective increase of sleepiness across 16 hours of wakefulness.

Such a clear link between the timing within the day and the changes of the results did not occur for cognitive performance. A significant time course was only found in some of the performance tasks. The RT in the (simpler) sustained attention task (PVT), slowed

down in the BL and SSL conditions; but in the very difficult working memory task (3-back), there was no change over time. This is consistent with results of Daurat et al. [Daurat 1993], who stated that bright light during the day only improved mood and motivation levels but did not reveal any effects on cognitive performance. Recently published results by Smolders et al. [Smolders 2012] indicated that bright light exposures for 60 minutes in the morning improved feelings of alertness and vitality, as well as objective performance in the PVT, but showed no change in a more demanding task (the Digit Substitution Test).

In our study we were focused on daytime activity and we did not find an unequivocal connection between time course, light and cognitive performance under realistic lighting conditions (BL, SSL). It has to be noted that strong effects of (bright-) light on performance were found in studies performed during night time, or with subjects under extended wakefulness conditions. The induced sleep deprivation in such studies led to high levels of subjective sleepiness and physiological and cognitive changes were likely to occur [Åkerstedt, et al. 1990]. The drop in performance found in our results (2- and 3-back test) during the last hour of DIM, might be in accordance with the finding by Åkerstedt. In another daytime study with sleep restricted subjects [Phipps-Nelson, et al. 2003], the authors concluded that the impact of bright light on the reduction of sleepiness and improved performance appeared to be mediated by mechanisms that are separate from those induced by melatonin suppression. From this perspective, the timing within the day or night plays a crucial role in determining non-visual effects of lighting.

It is also important to emphasize that all our subjects were tested during their preferred habitual circadian phase, with respect to their endogenous sleep/wake rhythm. This prevented us from any undesired effects of existing sleep deprivation, and allowed us having the subjects being fully entrained for the study. We thus compared the subjects at their same endogenous circadian phases. If extreme chronotypes would have been tested at the same local clock time, for example during normal office hours (9-5pm) we might find different results due to misalignment problems, especially of the ET and due to so-called social jet lag effects. Social Jet Lag means high social pressure based on different preferences in timing of activity, as defined by the group of T. Roenneberg [Wittmann, et al. 2006]. We would find it extremely interesting to perform a study testing cognitive performance of extremes chronotypes at their preferred time with those during general working hours. For evening types it would be for example difficult to perform well in the early morning, whereas for morning types it would be difficult to perform well in the late evening or during night shifts.

Effects of the type of the task and its level of difficulty on cognitive performance

In our study we investigated the effects of daytime lighting condition on the performance mainly in auditory tasks. Not all the measured aspects changed identically during the day and we obtained different results for different tests. In the most difficult tasks for example, there was no change in performance across the entire 16 hours of the study, compared to the simpler reaction task, where we could see a decrease over time. It seems that time-of-day variation in cognitive performance was some sort of knocked

out by a very difficult task (which required a great effort) or by very bright light, which allowed high level cognitive output at a constant level during the whole study day.

Our results suggest that the relation between light and performance during the day is a complex issue and cannot be expressed in one simple calculation or in a single task. Different effects in different tasks can be interpreted as the consequence of different processes involved in the brain while performing the task. For easy sustained attention tasks (PVT) no memory or decision making process is needed, compared to the more complex (n-back) task, where the usage of short term memory and decision making process are required, and thus more brain regions are involved. Differences in brain activity could be connected with differences in sensitivity to the lighting condition, timing etc.

The PVT is broadly used in studies due to its easy execution. The question however remains whether results of this form of evaluation are valid for the typical modern office work, as it requires more than a sustained attention and fast response. If we want to rate effects of bright light on office users, and optimize the lighting conditions in order to support their cognitive performance, more focus on the particular performance task has to be set to identify and select important activities to meet their particular needs. At the same time we need better understanding of daytime acute effects of light on the non-visual system.

Chronotypes

One of our main motivations in this study was to assess the different impacts of lighting conditions on extreme chronotypes in order to test the range of light sensitivity within this young healthy population. Well entrained subjects were tested at their preferred circadian phase, with respect to the shift of their endogenous sleep/wake rhythm. Under these circumstances, no significant differences between both chronotypes were found in their subjective evaluations or cognitive performance, except for differences in reported subjective sleepiness. Extreme MT showed a steeper build-up of homeostatic sleep pressure and thus faster increase of subjective sleepiness later in the day. This goes along with a significant difference in the homeostatic build-up of sleep pressure between morning and evening types, as it was already described in the literature [Mongrain, et al. 2006]. Secondly, MT are assumed to have shorter endogenous periods and even though we did not measure endogenous period, the visually later offset of melatonin in the morning and the earlier DLMO in the evening could be in line with this as well.

For the further research work, very interesting role in inter-individual differences might play the 'sex' factor.

8.5.3 Subjective evaluation versus objective measures

The ability to correctly evaluate lighting effects is important if we want to give full control of lighting to the users. In case the users are not aware that light might influences their biological functions or they are unable to evaluate its effects correctly, they might regulate the lighting system in their environment inappropriately, creating no positive or even negative impact on their physiology.

In our office lighting study we were interested to what extent is subjective evaluation of sleepiness correlated with real performance in cognitive tasks and/or with biomarkers, such as the melatonin secretion. The relationship between the onset of melatonin secretion in the evening and the increase of subjective sleepiness in the evening has been already seen in different studies [Lewy 1980, Schmidt, et al. 2009].

Our results suggested a link between light choice (possibly influenced by the subjective rating of sleepiness) and simple performance tasks, but diminishing influence of the task with increasing difficulty. It is known that build-up of homeostatic sleep pressure during the wake episode is responsible for the progression of subjective sleepiness towards the end of the day. Subjective sleepiness can be suppressed with acute alerting effects of bright light. If the choice of lighting is fully in hands of users, the following scenario could occur: at the end of the subjective day, the increased subjective sleepiness could motivate users to choose higher illuminance in order to use the alerting ability of light and reduce the feeling of “being sleepy”. Evening hours are the period of the day when circadian clock is highly sensitive to entrainment by light. By choosing the bright light, subjects might experience its acute alerting effects, but unintentionally impact simultaneously the other process of sleep regulation, the circadian rhythmicity, and delay their sleep onset into the late evening or night time. Moreover, according to the results of our experiment, during the daytime there is no correlation between brighter light and better cognitive performance in more difficult tasks. And these tasks, involving decision making process, evaluation, reasoning and using working memory are the major activity in the office work of 21st century.

To leave the control entirely with the users and their subjective evaluation would mean that lighting inside of buildings would be regulated according to visual needs and acute light effects. We already saw that extreme chronotypes were implicitly avoiding very bright light in the evening if they could (ET for example), and therefore it is tempting to speculate that extreme chronotypes chose a lighting condition which made them worse in cognitive performance tests for the sake of a better circadian entrainment. However, such sustainability of circadian regulation might not be taken always in account. This could result in circadian disturbance and on long term negatively impact sleep regulation, wellbeing and potentially health.

8.5.4 Effects on energy consumption

Least but not last, in our hypothesis we expected that the constant lighting condition would be more energy demanding compared to the self-selected light. In our light measurement is clear that in their preferred lighting environment our subjects generally followed the daylight availability and profited from the well daylight room with high daylight factor. In the second half of the day, i.e. the time, when mainly the artificial light is being used, both chronotype groups chose lower illuminance and therefore the lighting electrical energy consumption was significantly lower in the self-selected light compared to the constant bright light. We considered the significant energy savings under self-selected lighting as a clear advantage, compared to the energy consumption during constant bright light. On the other hand, when we compared energy consumption under the SSL condition with current standard lighting conditions (500 lx on a

horizontal plane, at desk height), there is significantly higher electrical energy consumption during the self-selected light. This suggests that the very good lighting standard with higher illuminance chosen in the SSL condition also comprised higher energy consumption than a lighting situation solely fulfilling the lighting requirements.

Surprisingly, in contrary to our hypothesis, there was no difference between MT and ET in energy consumption from electrical lighting. This finding suggests that inter-individual aspects of light requirements could be integrated in lighting design at work spaces, without drawbacks from electrical energy consumption.

8.5.5 Limitations

One of the limitations of this thesis was that we did not follow up some of the gender differences we found in our results. There is still a lack of knowledge in the question, how gender influences our physiology under different lighting conditions. It would be interesting to perform some more analyses with our data.

Another limitation might be that we found differences between results of performance tasks, according to their difficulty level. Analyses of the other results from other tasks, such as the visual tasks, could be useful to have our conclusion more complete.

8.6 Conclusion

Worldwide, an increasing part of populations spend the majority of their time awake inside of buildings, in many cases in an office working space. The quality of the indoor environment has become crucial for health and wellbeing, and well-designed lighting system is one of its keystones. To determine optimal lighting conditions, non-visual effects of light on human physiology have to be taken into account, and special attention should be focused on the temporal distribution of light during the day.

Our office lighting study revealed that constant illuminance provided by the artificial lighting systems without any further regulation did not go along with the users' preference. It is either too dim during the daytime or too bright during the evening/night. Results of our study support the fact that light with temporal distribution close to the daylight is optimal for regulation of endogenous rhythms for both groups of extreme chronotypes. And thus, as we consider extreme chronotypes as two edges of the possible range of preferences within in the society, this method of regulation should meet the needs of the whole young healthy population.

A clear relationship between subjective ratings of sleepiness, which influenced the choice of light and actual performance, was not unambiguously revealed by our results. To leave the control entirely in hands of users and their (according to our results, limited) subjective evaluation would mean that lighting in the buildings would be regulated according to the visual needs and acute effects of light. Sustainability of circadian regulation might not be taken in account. This could result in circadian disturbance and on long term negatively impact sleep regulation, wellbeing and potentially health.

As we could see in our results, some individuals (such as extreme chronotypes) are very sensitive to (bright-) light in certain periods of the day and therefore the inter-individual differences need to be taken into consideration.

According to all these findings, a dynamic lighting system that imitates the natural daylight profile with a peak of bright light around midday, a slow decrease during the afternoon and reduced illuminance in the evening, should be a good solution for office users working during daytime. The possibility to adjust the lighting levels and timing according to the preferred inter-individual differences is important. Also short term alterations in order to induce acute alerting effects of light if needed should be allowed to the users, but may be only with the knowledge of the possible impact on the long term circadian regulation.

The close temporal association of the maximal indoor illuminance and the daylight availability also suggest the potential of cutting back the demands of electrical energy for lighting through designing rooms with high use of daylight. This requires developing daylighting systems capable to provide high visual comfort for the office users.

Přílohy

Tab. X1: Výsledky statistického výpočtu 3way rANOVA pro **osvětlenost** v BL a SSL režimu a výpočtu 2-way rANOVA samostatně pro jednotlivé světelné režimy. STATISTICA software počítal s faktory „ct“ = chronotyp MT x ET; „COND“ = režim BL x SSL; „TIME“ = čas uplynulý od počátku studie, zaokrouhlo na celé hodiny; „sex“ = pohlaví F x M.

VŠECHNY REŽIMY	SS	DF	MS	F	p	Pozn. (Duncan's, FDR)
sex	1,76E+04	1	1,76E+04	0,01	0,924	
ct	4,29E+06	1	4,29E+06	2,24	0,145	
sex*ct	1,14E+06	1	1,14E+06	0,6	0,445	
COND	2,83E+07	1	2,83E+07	15,49	.000*	BL > SSL
COND*sex	3,34E+04	1	3,34E+04	0,02	0,893	
COND*ct	3,06E+06	1	3,06E+06	1,67	0,206	
COND*sex*ct	1,24E+06	1	1,24E+06	0,68	0,417	
TIME	3,22E+07	15	2,14E+06	7,77	.000*	
TIME*sex	1,35E+06	15	9,01E+04	0,33	0,993	
TIME*ct	1,80E+07	15	1,20E+06	4,34	.000*	
TIME*sex*ct	1,74E+06	15	1,16E+05	0,42	0,973	
COND*TIME	2,73E+07	15	1,82E+06	6,52	.000*	BLxSSL T 9-16
COND*TIME*sex	9,86E+05	15	6,57E+04	0,24	0,999	
COND*TIME*ct	1,67E+07	15	1,11E+06	3,98	.000*	SSL: MTxET T1, 5-6 MT: BLxSSL T1-2, T5-6, T11-16 ET: BLxSSL T7-16
COND*TIME*sex*ct	1,66E+06	15	1,11E+05	0,4	0,98	

SSL	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	4,98E+04	1	4,98E+0	0,013	0,909	
ct	7,29E+06	1	7,29E+0	1,955	0,173	
sex*ct	2,38E+06	1	2,38E+0	0,639	0,431	
TIME	5,92E+07	15	3,95E+0	7,169	.000*	
TIME*sex	2,30E+06	15	1,54E+0	0,279	0,997	
TIME*ct	3,45E+07	15	2,30E+0	4,176	.000*	MT x ET T5 -6
TIME*sex*ct	3,35E+06	15	2,23E+0	0,405	0,978	

Výsledky výpočtu 2-way rANOVA pro zvolené $E_v > 1000$ lx. v SSL; STATISTICA software počítal s faktory „ct“ = chronotyp MT x ET; „DAY-QUAR“ = čtvrtiny (4hodinové periody) dne; „sex“ = pohlaví F x M.

SSL	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	1,67	1	1,67	0,42	0,525	
ct	3,02	1	3,02	0,75	0,394	
sex*ct	0,02	1	0,02	0	0,947	
DAY-QUAR	47,58	3	15,86	16,23	.000*	Q1, Q2 * Q3, Q4
DAY-QUAR*sex	0,71	3	0,24	0,24	0,867	
DAY-QUAR*ct	21,44	3	7,15	7,31	.000*	* Q2
DAY-QUAR*sex*ct	7,94	3	2,65	2,71	0,05	

Tab. X2: Výsledky statistického výpočtu 3way rANOVA pro **subjektivní hodnocení ospalosti** ve všech 3 režimech a výpočet 2-way rANOVA samostatně pro jednotlivé světelné režimy. Software STATISTICA9 počítal s faktory „COND“ = světelný režim DIM x BL x SSL; „ct“ = chronotyp; „TIME“ = čas uplynulý od počátku studie, zaokrouhлено na celé hodiny; „sex“ = pohlaví F x M.

VŠECHNY REŽIMY	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	6,84E+03	1	6,84E+03	7,20E-01	0,403	ET>MT
ct	5,83E+04	1	5,83E+04	6,14E+00	.019*	
sex*ct	1,99E+03	1	1,99E+03	0,21	0,651	
COND	9,18E+03	2	4,59E+03	5,03E+00	.010*	DIM*BL,SSL
COND*sex	2,61E+03	2	1,30E+03	1,43E+00	0,248	
COND*ct	1,39E+03	2	6,94E+02	7,60E-01	0,473	
COND*sex*ct	165	2	83	0,09	0,914	
TIME	1,12E+05	15	7468	22,09	0.000*	nárůst
TIME*sex	3461	15	231	0,68	0,802	
TIME*ct	6184	15	412	1,22	0,253	
TIME*sex*ct	8,38E+03	15	559	1,65	0,058	
COND*TIME	3,87E+03	30	129	1,27	0,155	
COND*TIME*sex	5,32E+03	30	177	1,74	.008*	
COND*TIME*ct	1,88E+03	30	63	0,62	0,948	
COND*TIME*sex*ct	2,61E+03	30	87	0,85	0,692	

DIM	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	7,86E+03	1	7,86E+03	2	0,168	ET > MT
ct	2,86E+04	1	2,86E+04	7,28E+00	.012*	
sex*ct	4,25E+02	1	4,25E+02	0,11	0,744	
TIME	5,18E+04	15	3452	16,28	0.000*	Ttest T3-6, T9-16 Ttest MT: T4, T9-16 ET: T3-5, T14-16
TIME*sex	4146	15	276	1,3	0,196	
TIME*ct	4446	15	296	1,4	0,144	
TIME*sex*ct	2,72E+03	15	181	0,85	0,616	

BL	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	407	1	407	1,20E-01	0,733	
ct	1,40E+04	1	1,40E+04	4,08E+00	0,053	
sex*ct	1,31E+03	1	1,31E+03	0,38	0,542	
TIME	2,97E+04	15	1983	12,3	0.000*	Ttest T2, T14-16 Ttest MT: T12-16 ET: ---
TIME*sex	2,24E+03	15	149	0,92	0,536	
TIME*ct	2,13E+03	15	142	0,88	0,585	
TIME*sex*ct	5526	15	368	2,29	.004*	

SSL	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	1185	1	1185	0,3	0,589	ET > MT
ct	1,71E+04	1	1,71E+04	4,32E+00	.047*	
sex*ct	413	1	413	0,1	0,749	
TIME	3,44E+04	15	2291	13,61	0.000*	Ttest T9, T11-16 Ttest MT: T6-16 ET: ---
TIME*sex	2,40E+03	15	160	0,95	0,507	
TIME*ct	1,49E+03	15	99	0,59	0,884	
TIME*sex*ct	2744	15	183	1,09	0,367	

Tab. X3: Výsledky statistického výpočtu 3way rANOVA pro **Psychomotorický test bdělosti** ve všech 3 světelných režimech a výpočtu 2-way rANOVA samostatně pro jednotlivé světelné režimy. Software STATISTICA9 počítal s faktory „COND“ = světelný režim DIM x BL x SSL; „ct“ = chronotyp; „TIME“ = čas uplynulý od počátku studie, zaokrouhleno na celé hodiny; „sex“ = pohlaví F x M.

VŠECHNY REŽIMY	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	8,29E+03	1	8,29E+03	1,00E+00	0,326	F,MT > M,MT F,MT > F,ET
ct	1,08E+04	1	1,08E+04	1,31E+00	0,263	
sex*ct	4,32E+04	1	4,32E+04	5,22	.030*	
COND	2,30E+03	2	1,15E+03	1,77E+00	0,179	
COND*sex	3,85E+03	2	1,93E+03	2,97E+00	0,059	
COND*ct	1,11E+03	2	5,56E+02	8,59E-01	0,429	
COND*sex*ct	1	2	1	0,001	0,999	
TIMES	5,60E+03	7	801	7,901	.000*	nárůst
TIMES*sex	1207	7	172	1,702	0,11	
TIMES*ct	685	7	98	0,965	0,458	
TIMES*sex*ct	3,29E+03	7	470	4,636	.000*	
COND*TIMES	2,47E+03	14	177	1,408	0,146	
COND*TIMES*sex	2,06E+03	14	147	1,175	0,292	
COND*TIMES*ct	8,36E+02	14	60	0,476	0,945	
COND*TIMES*sex*ct	5,16E+02	14	37	0,294	0,994	

DIM	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	9,27E+03	1	9,27E+03	3,939	0,057	
ct	6,13E+03	1	6,13E+03	2,60E+00	0,118	
sex*ct	1,44E+04	1	1,44E+04	6,136	.020*	
TIME	4,24E+02	7	61	0,543	0,801	(Ttest ALL - - -)
TIME*sex	713	7	102	0,914	0,497	(Ttest MT - - -; ET - - -)
TIME*ct	467	7	67	0,599	0,757	
TIME*sex*ct	9,77E+02	7	140	1,252	0,276	

BL	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	72	1	72	1,80E-02	0,894	
ct	1,12E+03	1	1,12E+03	2,77E-01	0,603	
sex*ct	1,42E+04	1	1,42E+04	3,53	0,071	
TIME	4,77E+03	7	681	4,378	.000*	Ttest ALL T8
TIME*sex	1,11E+03	7	159	1,02	0,419	Ttest MT - - -; ET - - -
TIME*ct	6,12E+02	7	87	0,562	0,786	
TIME*sex*ct	1617	7	231	1,486	0,174	

SSL	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	2,80E+03	1	2,80E+03	0,875	0,357	
ct	4,67E+03	1	4,67E+03	1,46E+00	0,236	
sex*ct	1,46E+04	1	1,46E+04	4,562	.042*	
TIME	2,89E+03	7	413	4,838	.000*	Ttest ALL T8
TIME*sex	1,45E+03	7	207	2,426	.021*	Ttest MT - - -; ET T8
TIME*ct	4,41E+02	7	63	0,739	0,639	
TIME*sex*ct	1211	7	173	2,027	0,053	

Tab. X4: Výsledky 3way rANOVA for **auditivní 2back test** ve všech 3 režimech a výpočet 2-way rANOVA samostatně pro jednotlivé světelné režimy. Software STATISTICA9 počítal s faktory „COND“ = světelný režim DIM x BL x SSL; „ct“ = chronotyp; „TIME“ = čas uplynulý od počátku studie, zaokrouhleno na celé hodiny; „sex“ = pohlaví F x M.

VŠECHNY REŽIMY	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	6,91E+05	1	6,91E+05	1,30E+00	0,264	
ct	1,46E+05	1	1,46E+05	2,74E-01	0,605	
sex*ct	8,10E+05	1	8,10E+05	1,519	0,228	
COND	4,36E+05	2	2,18E+05	6,38E+00	,003*	DIM > BL, SSL
COND*sex	4,60E+04	2	2,30E+04	6,74E-01	0,514	
COND*ct	1,40E+04	2	7,01E+03	2,05E-01	0,815	
COND*sex*ct	4,81E+04	2	2,40E+04	0,704	0,499	
TIMES	4,96E+05	7	7,08E+04	3,945	,000*	nárůst
TIMES*sex	6,45E+04	7	9,22E+03	0,513	0,824	
TIMES*ct	6,26E+04	7	8,95E+03	0,498	0,835	
TIMES*sex*ct	5,46E+04	7	7,80E+03	0,434	0,88	
COND*TIMES	5,83E+05	14	4,16E+04	2,806	,001*	DIM*BL+SSL @ T1, T8
COND*TIMES*sex	1,45E+05	14	1,03E+04	0,697	0,778	
COND*TIMES*ct	2,52E+05	14	18000	1,216	0,261	
COND*TIMES*sex*ct	1,45E+05	14	10300	0,696	0,778	

DIM	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	372E3	1	372E3	2,070	,161	
ct	515E2	1	515E2	,287	,597	
sex*ct	168E3	1	168E3	,935	,342	
TIMES	540E3	6	899E2	4,274	,000*	# T1 vyřazen # Ttest ALL T7-8
TIMES*sex	730E2	6	122E2	,578	,747	
TIMES*ct	143E3	6	239E2	1,135	,344	# Ttest MT - - - ; ET -
TIMES*sex*ct	841E2	6	140E2	,666	,677	

BL	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	1,46E+05	1	1,46E+05	0,701	0,409	
ct	1,92E+04	1	1,92E+04	0,092	0,764	
sex*ct	1,60E+05	1	1,60E+05	0,769	0,388	
TIME	1,54E+05	7	2,19E+04	2,104	,045*	Ttest ALL T5, T7-8
TIME*sex	7,72E+04	7	1,10E+04	1,057	0,393	
TIME*ct	7,96E+04	7	1,14E+04	1,09	0,371	Ttest MT T6-7; ET -
TIME*sex*ct	2,22E+04	7	3170	0,304	0,951	

SSL	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	1,62E+05	1	1,62E+05	0,767	0,389	
ct	9,36E+04	1	9,36E+04	4,42E-01	0,511	
sex*ct	4,83E+05	1	4,83E+05	2,281	0,142	
TIMES	1,62E+05	7	2,32E+04	2,32	,027*	Ttest - - -
TIMES*sex	5,22E+04	7	7,46E+03	0,745	0,634	
TIMES*ct	2,68E+04	7	3,83E+03	0,383	0,911	Ttest MT - - - ; ET - -
TIMES*sex*ct	9,28E+04	7	1,33E+04	1,325	0,24	

první test v režimu DIM vyřazen z výpočtu – vliv učení se novému úkolu. Výpočet T-test v DIM vztažen relativně k druhému testu v pořadí.

Tab. X5: Výsledky statistického výpočtu 3way rANOVA pro **auditivní 3back test** ve všech 3 režimech a 2-way rANOVA samostatně pro jednotlivé světelné režimy. Software STATISTICA9 počítal s faktory „COND“ = světelný režim DIM x BL x SSL; „ct“ = chronotyp; „TIME“ = čas uplynulý od počátku studie, zaokrouhlo na celé hodiny; „sex“ = pohlaví F x M.

VŠECHNY REŽIMY	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	581E4	1	581E4	4,21	,050*	M > F
ct	140E4	1	140E4	1,01	,323	
sex*ct	18,	1	18,	,00	,997	
COND	426E4	2	213E4	23,91	,000*	DIM > SSL > BL
COND*sex	185E3	2	927E2	1,04	,360	
COND*ct	915E2	2	458E2	,51	,601	
COND*sex*ct	342E2	2	171E2	,19	,826	
TIME	421E3	7	602E2	1,87	,076	
TIME*sex	332E3	7	474E2	1,47	,179	
TIME*ct	777E2	7	111E2	,35	,932	
TIME*sex*ct	127E3	7	181E2	,56	,785	
COND*TIME	161E4	14	115E3	5,12	,000*	DIM*BL @T1-6, T8 DIM*SSL @ T1-5, T8
COND*TIME*sex	393E3	14	280E2	1,25	,236	
COND*TIME*ct	356E3	14	255E2	1,14	,325	
COND*TIME*sex*ct	366E3	14	261E2	1,16	,300	

DIM	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	265E4	1	265E4	5,347	,028*	M > F
ct	695E3	1	695E3	1,403	,246	
sex*ct	8405,	1	8405,	,017	,897	
TIME	276E3	6	461E2	1,582	,155	# T1 vyřazen (Ttest ALL - - -)
TIME*sex	324E3	6	539E2	1,853	,092	
TIME*ct	157E3	6	262E2	,901	,496	
TIME*sex*ct	250E3	6	416E2	1,428	,207	

BL	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	1,27E+06	1	1,27E+06	2,49E+00	0,126	
ct	4,86E+05	1	4,86E+05	9,53E-01	0,337	
sex*ct	7,72E+03	1	7,72E+03	0,015	0,903	
TIME	2,46E+05	7	3,52E+04	2	0,057	(Ttest ALL T5)
TIME*sex	1,88E+05	7	2,69E+04	1,527	0,16	
TIME*ct	1,96E+05	7	2,80E+04	1,594	0,139	
TIME*sex*ct	1,49E+05	7	2,13E+04	1,211	0,299	

SSL	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	1,67E+06	1	1,67E+06	2,995	0,095	
ct	1,85E+05	1	1,85E+05	3,32E-01	0,569	
sex*ct	1,35E+04	1	1,35E+04	0,024	0,878	
TIMES	1,93E+05	7	2,75E+04	1,463	0,182	(Ttest ALL - - -)
TIMES*sex	1,91E+05	7	2,73E+04	1,45	0,187	
TIMES*ct	1,29E+05	7	1,85E+04	0,981	0,446	
TIMES*sex*ct	6,74E+04	7	9632	0,512	0,825	

první test v režimu DIM vyřazen z výpočtu – vliv učení se novému úkolu. Výpočet T-test v DIM vztažen relativně k druhému testu v pořadí. Při vyloučení T1 nebyla nalezena významná změna v průběhu času.

Tab. X6: Výsledky statistického výpočtu 3way rANOVA pro **koncentrace melatoninu ve slinách** ve všech 3 režimech a samostatně pro jednotlivé světelné režimy. Software STATISTICA9 počítal s faktory „COND“ = světelný režim DIM x BL x SSL; „ct“ = chronotyp; „TIME“ = čas uplynulý od počátku studie, zaokrouhleno na celé hodiny; „sex“ = pohlaví F x M.

VŠECHNY REŽIMY	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	2860	1	2860	13,33	,001*	F>M
ct	354	1	354	1,65	0,21	
sex*ct	809	1	809	3,77	0,062	
COND	5877	2	2938	60,71	,000*	DIM > SSL > BL
COND*sex	1026	2	513	10,6	,000*	
COND*ct	97	2	48	1	0,374	
COND*sex*ct	194	2	97	2	0,144	
TIME	2,73E+04	15	1819	50,33	0,000*	
TIME*sex	2840	15	189	5,24	,000*	
TIME*ct	847	15	56	1,56	0,081	
TIME*sex*ct	936	15	62	1,73	,044*	
COND*TIME	1,66E+04	30	554	32,14	0,000*	DIMxBL T1, T13-16 DIMxSSL T13-16 BLxSSL T15-16
COND*TIME*sex	2300	30	77	4,45	,000*	
COND*TIME*ct	974	30	32	1,89	,003*	
COND*TIME*sex*ct	1229	30	41	2,38	,000*	

DIM	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	3234	1	3234	19,97	,000*	F>M
ct	330	1	330	2,03	0,165	
sex*ct	772	1	772	4,77	,038*	
TIME	3,68E+04	15	2454	58,59	0,000*	MTxET T14-16
TIME*sex	4590	15	306	7,31	,000*	
TIME*ct	1658	15	111	2,64	,001*	
TIME*sex*ct	1961	15	131	3,12	,000*	

BL	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	237,2	1	237,2	6,72	,015*	F>M
ct	102,8	1	102,8	2,913	0,099	
sex*ct	124,6	1	124,6	3,53	0,071	
TIME	588,4	15	39,2	9,218	0,000*	
TIME*sex	61,3	15	4,1	0,96	0,497	
TIME*ct	60,1	15	4	0,942	0,517	
TIME*sex*ct	88,6	15	5,9	1,389	0,149	

SSL	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	415	1	414,5	3,64	0,067	
ct	18	1	18,4	0,16	0,691	
sex*ct	107	1	106,5	0,93	0,342	
TIME	6501	15	433,4	17,72	0,000*	
TIME*sex	489	15	32,6	1,33	0,178	
TIME*ct	104	15	6,9	0,28	0,997	
TIME*sex*ct	115	15	7,7	0,31	0,994	

Tab. X7: Výpočet času zvýšení produkce melatoninu (DLMO a MO). Jako významná byla změna koncentrace melatoninu označena v době, kdy koncentrace dosáhla prahu 5 pg / ml (v jednom případě 4 pg / ml a u dvou jedinců 10 pg / ml), počítáno pro každého jedince a každý světelný režim. V několika případech MO nebylo možné změřit; sekrece melatoninu byla potlačena až do skončení studie (prázdné pole). Pro skupinu byl vypočten průměr ze známých výsledků a označena nejistota vyplývající z nižšího počtu hodnocených subjektů.

	Čas DLMO (MO) [hodina od počátku studie]							
	Časné chronotypy (MT)				Pozdní chronotypy (ET)			
	subj	DIM	BL	SSL	subj	DIM	BL	SSL
	MT1	15	-	-	ET1	15	-	16
	MT2	14	-	-	ET2	12	-	12
	MT3	13	-	-	ET3	14	14	14
	MT4	12	14	14	ET4	14	-	15
	MT5	14	-	15	ET5	13	15	14
	MT6	15	-	16	ET6	12	-	15
	MT7	13	15	14	ET7	12	-	14
	MT8	13	-	16	ET8	14	16	15
	MT9	13	14	14	ET9	12	-	16
	MT10	14	-	15	ET10	12	-	-
	MT11	12	16	14	ET11	14	14	15
	MT12	12	14	14	ET12	15	-	-
	MT13	15	-	16	ET13	10	16	13
	MT14	13	14	14	ET14	13	16	16
	MT15	14	-	15	ET15	13	-	16
	MT16	13	-	-	ET16	14	-	16
Počet změřených jedinců		16	6	12		16	6	14
Procento ze všech jedinců		100%	37,5%	75%		100%	37,5%	87,5%
Čas DLMO (MO) - průměr		13,4	14,5	14,8		13,1	15,2	14,8
STD		1,0	0,8	0,9		1,3	1,0	1,3

Two tail T-test pro nezávislé proměnné, rozděleno na skupinu MT a ET v DIM režimu.

	Průměr	Std.Dev.	Validní N	t-value	df	p	F-poměr variance	P variance
DLMO _{MT}	13,437	1,0307	16	0,8872	30	0,3820	1,6901	0,3202
DLMO _{ET}	13,062	1,3401	16					

mANOVA; vliv tří světelných režimů na čas významného zvýšení koncentrace melatoninu ve slinách (DLMO, MO)

Čas DLMO, MO	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	0,15	1	0,154	0,132	0,726	
ct	1,03	1	1,026	0,878	0,376	
sex*ct	0,36	1	0,359	0,308	0,594	
COND	16,14	2	8,072	8,442	,003*	DIM x BL, SSL
COND*sex	0,86	2	0,431	0,451	0,645	
COND*ct	0,04	2	0,021	0,022	0,978	
COND*sex*ct	0,96	2	0,482	0,505	0,613	

Tab. X8: Výsledky statistického výpočtu 3way rANOVA pro **Freiburský test zrakové ostrosti (FrACT)** ve 3 režimech. Software STATISTICA9 počítal s faktory „COND“ = světelný režim DIM x BL x SSL; „ct“ = chronotyp; „TIME“ = čas uplynulý od počátku studie, zaokrouhleno na celé hodiny; „sex“ = pohlaví F x M.

ZRAKOVÁ OSTROST	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	1,04E+08	1	1,04E+08	4,70E-01	0,498	
ct	1,57E+08	1	1,57E+08	7,10E-01	0,405	
sex*ct	6,64E+08	1	6,64E+08	3,01	0,094	
COND	6,68E+09	2	3,34E+09	8,11E+01	0.000*	DIM > BL, SSL
COND*sex	5,36E+07	2	2,68E+07	6,50E-01	0,526	
COND*ct	5,99E+07	2	3,00E+07	7,30E-01	0,488	
COND*sex*ct	3,08E+07	2	1,54E+07	0,37	0,69	
TIME	2,61E+08	7	3,72E+07	6,25	.000*	Pokles v průběhu času
TIME*sex	6,90E+07	7	9,85E+06	1,65	0,122	
TIME*ct	5,66E+07	7	8,08E+06	1,36	0,226	
TIME*sex*ct	1,10E+08	7	1,57E+07	2,63	.013*	
COND*TIME	3,08E+08	14	2,20E+07	4,11	.000*	DIM > BL, SSL@ T1-16
COND*TIME*sex	7,09E+07	14	5,06E+06	0,95	0,507	
COND*TIME*ct	6,65E+07	14	4,75E+06	0,89	0,57	
COND*TIME*sex*ct	1,10E+08	14	7,87E+06	1,47	0,118	

KONTRAST	SS	DF	MS	F	p	Pozn.
sex	1,89E-01	1	1,89E-01	4,70E-01	0,498	
ct	6,59E-01	1	6,59E-01	1,65E+00	0,21	
sex*ct	0,00E+00	1	0,00E+00	0	0,996	
COND	7,87E+00	2	3,94E+00	1,87E+01	.000*	DIM > BL, SSL
COND*sex	3,71E-01	2	1,85E-01	8,80E-01	0,421	
COND*ct	2,80E-01	2	1,40E-01	6,60E-01	0,519	
COND*sex*ct	1,90E-01	2	9,50E-02	0,45	0,64	
TIME	1,17E-01	7	1,70E-02	0,65	0,716	
TIME*sex	3,19E-01	7	4,60E-02	1,76	0,097	
TIME*ct	2,57E-01	7	3,70E-02	1,42	0,199	
TIME*sex*ct	4,10E-01	7	5,90E-02	2,26	.031*	
COND*TIME	3,29E-01	14	2,30E-02	1,09	0,368	
COND*TIME*sex	5,59E-01	14	4,00E-02	1,85	.031*	
COND*TIME*ct	3,38E-01	14	2,40E-02	1,12	0,34	
COND*TIME*sex*ct	3,52E-01	14	2,50E-02	1,16	0,301	

Tab. X9: Neparametrická Spearmanova korelace, odděleno dle světelných režimů.

DIM				
Pair of Variables	Valid - N	Spearman - R	t(N-2)	p-value
a3back & a3back	-	-	-	-
a3back & PVT	256	0,064713	1,033526	0,302341
a3back & subj. ospalost	256	-0,044498	-0,709879	0,478431
a3back & melatonin	256	-0,041039	-0,654603	0,513316
a3back & osvětlenost	256	-	-	-
PVT & a3back	256	0,064713	1,033526	0,302341
PVT & PVT	-	-	-	-
PVT & subj. ospalost	256	0,06599	1,054	0,292884
PVT & melatonin	256	0,198646	3,230269	0,0014
PVT & osvětlenost	256	-	-	-
subj. ospalost & a3back	256	-0,044498	-0,709879	0,478431
subj. ospalost & PVT	256	0,06599	1,054	0,292884
subj. ospalost & subj. ospalost	-	-	-	-
subj. ospalost & melatonin	256	0,264153	4,364947	0,000019
subj. ospalost & osvětlenost	256	-	-	-
melatonin & a3back	256	-0,041039	-0,654603	0,513316
melatonin & PVT	256	0,198646	3,230269	0,0014
melatonin & subj. ospalost	256	0,264153	4,364947	0,000019
melatonin & melatonin	-	-	-	-
melatonin & osvětlenost	256	-	-	-
osvětlenost & a3back	256	-	-	-
osvětlenost & PVT	256	-	-	-
osvětlenost & subj. ospalost	256	-	-	-
osvětlenost & melatonin	256	-	-	-
osvětlenost & osvětlenost	-	-	-	-

BL				
Pair of Variables	Valid - N	Spearman - R	t(N-2)	p-value
a3back & a3back	-	-	-	-
a3back & PVT	256	0,110025	1,76423	0,078895
a3back & subj. ospalost	256	0,117739	1,88959	0,059952
a3back & melatonin	256	-0,035865	-0,57196	0,567855
a3back & osvětlenost	256	-0,06645	-1,06138	0,289524
PVT & a3back	256	0,110025	1,76423	0,078895
PVT & PVT	-	-	-	-
PVT & subj. ospalost	256	0,166713	2,69468	0,007516
PVT & melatonin	256	0,075351	1,20433	0,229583
PVT & osvětlenost	256	-0,043506	-0,69403	0,488296
subj. ospalost & a3back	256	0,117739	1,88959	0,059952
subj. ospalost & PVT	256	0,166713	2,69468	0,007516
subj. ospalost & subj. ospalost	-	-	-	-
subj. ospalost & melatonin	256	0,140219	2,25702	0,024857
subj. ospalost & osvětlenost	256	-0,201107	-3,27196	0,001216
melatonin & a3back	256	-0,035865	-0,57196	0,567855
melatonin & PVT	256	0,075351	1,20433	0,229583
melatonin & subj. ospalost	256	0,140219	2,25702	0,024857
melatonin & melatonin	-	-	-	-
melatonin & osvětlenost	256	0,141891	2,28448	0,023168

osvětlenost & a3back	256	-0,06645	-1,06138	0,289524
osvětlenost & PVT	256	-0,043506	-0,69403	0,488296
osvětlenost & subj. ospalost	256	-0,201107	-3,27196	0,001216
osvětlenost & melatonin	256	0,141891	2,28448	0,023168
osvětlenost & osvětlenost	-	-	-	-

SSL				
Pair of Variables	Valid - N	Spearman - R	t(N-2)	p-value
a3back & a3back	-	-	-	-
a3back & PVT	256	0,041607	0,66368	0,507495
a3back & subj. ospalost	256	0,102215	1,63762	0,102739
a3back & melatonin	256	-0,015957	-0,25435	0,799432
a3back & osvětlenost	256	-0,105408	-1,68933	0,092383
PVT & a3back	256	0,041607	0,66368	0,507495
PVT & PVT	-	-	-	-
PVT & subj. ospalost	256	0,157893	2,54837	0,011412
PVT & melatonin	256	0,120414	1,93315	0,054329
PVT & osvětlenost	256	0,036834	0,58744	0,55743
subj. ospalost & a3back	256	0,102215	1,63762	0,102739
subj. ospalost & PVT	256	0,157893	2,54837	0,011412
subj. ospalost & subj. ospalost	-	-	-	-
subj. ospalost & melatonin	256	0,152495	2,45914	0,014595
subj. ospalost & osvětlenost	256	-0,264069	-4,36345	0,000019
melatonin & a3back	256	-0,015957	-0,25435	0,799432
melatonin & PVT	256	0,120414	1,93315	0,054329
melatonin & subj. ospalost	256	0,152495	2,45914	0,014595
melatonin & melatonin	-	-	-	-
melatonin & osvětlenost	256	-0,041293	-0,65867	0,510704
osvětlenost & a3back	256	-0,105408	-1,68933	0,092383
osvětlenost & PVT	256	0,036834	0,58744	0,55743
osvětlenost & subj. ospalost	256	-0,264069	-4,36345	0,000019
osvětlenost & melatonin	256	-0,041293	-0,65867	0,510704
osvětlenost & osvětlenost	-	-	-	-

Dotazník Q1: Munich Chronotype Questionnaire (MCTQ)

Please enter your age, gender, etc. This information is important for our evaluations

Age: _____ female male Height: _____ Weight: _____

On work days...

I have to get up at... _____ o'clock
I need... _____ min to wake up
I regularly wake up... _____ before the alarm with the alarm
From... _____ o'clock I am fully awake
At around... _____ o'clock, I have an energy dip
On nights before workdays, I go to bed at _____ o'clock...
...and it then takes me... _____ min to fall asleep
If I get the chance, I like to take a siesta/nap...
Correct I then sleep for... _____ min
Not correct I would feel terrible afterwards

On free days (please only judge normal free days, i.e., without parties etc)...

My dream would be to sleep until... _____ o'clock
I normally wake up at... _____ o'clock
If I wake up at around the normal (workday) alarm time, I try to get back to sleep...
Correct Not correct

If I get back to sleep, I sleep for another... _____ min
I need... _____ min to wake up
From... _____ o'clock I am fully awake
At around... _____ o'clock, I have an energy dip
On nights before free days, I go to bed at _____ o'clock...
...and it then takes me... _____ min to fall asleep
If I get the chance, I like to take a siesta/nap...
Correct I then sleep for... _____ min
Not correct I would feel terrible afterwards

Once I am in bed, I would like to read for... _____ min...
...but I generally fall asleep after no more than... _____ min

I prefer to sleep in a completely dark room Correct Not Correct
I wake up more easily when morning light shines into my room Correct Not Correct
How long per day do you spend on average outside (really outside) exposed to daylight?
On work days: _____ hrs. _____ min On free days: _____ hrs _____ min

Self Assessment

After you have answered the preceding questions, you should have a feeling to which chronotype (time-of-day-type) you belong to. If, for example, you like (and manage) to sleep quite a bit longer on free days than on workdays, or if you cannot get out of bed on Monday mornings, even without a Sunday-night-party, then you are more a late go to bed early type. If, however, you regularly wake up and feel perky once you jump out of bed, and if you would rather than to an evening concert then you are an early type. In the following questions, you should categorise yourself and your family members.

Please tick only one possibility!

Description of categories:	extreme	early type = 0
	Moderate	early type = 1
	Slight	early type = 2
		Normal type = 3
	Slight	late type = 4
	Moderate	late type = 5
	Extreme	late type = 6

I am...	0	1	2	3	4	5	6
As a child, I was...	0	1	2	3	4	5	6
As a teenager, I was...	0	1	2	3	4	5	6
In case you are older than 65: in the middle of my life, I was...	0	1	2	3	4	5	6

Zdroj: originalní verze [Roenneberg, et al. 2003b], v rámci experimentu byl použit validovaný francouzský překlad, zdroj [Shahid, et al.]

Dotazník Q2: Horne-Östberg Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ)

For each question, please select the answer that best indicates how you have felt in recent weeks.

1. *Approximately what time would you get up if you were entirely free to plan your day?*
 - ☐ 5:00 AM – 6:30 AM
 - ☐ 6:30 AM – 7:45 AM
 - ☐ 7:45 AM – 9:45 AM
 - ☐ 9:45 AM – 11:00 AM
 - ☐ 11:00 AM – 12:00 noon

2. *Approximately what time would you go to bed if you were entirely free to plan your evening?*
 - ☐ 8:00 PM – 9:00 PM
 - ☐ 9:00 PM – 10:15 PM
 - ☐ 10:15 PM – 12:30 AM
 - ☐ 12:30 AM – 1:45 AM
 - ☐ 1:45 AM – 3:00 AM

3. *If you usually have to get up at a specific time in the morning, how much do you depend on an alarm clock?*
 - ☐ Not at all
 - ☐ Slightly
 - ☐ Somewhat
 - ☐ Very much

4. *How easily do you find it to get up in the morning (when you are not awakened unexpectedly)?*
 - ☐ Very difficult
 - ☐ Somewhat difficult
 - ☐ Fairly easy
 - ☐ Very easy

5. *How alert do you feel during the first half hour after you wake up in the morning?*
 - ☐ Not at all alert
 - ☐ Slightly alert
 - ☐ Fairly alert
 - ☐ Very alert

6. *How hungry do you feel during the first half hour after you wake up?*
 - ☐ Not at all hungry
 - ☐ Slightly hungry
 - ☐ Fairly hungry
 - ☐ Very hungry

7. *During the first half hour after you wake up in the morning how do you feel?*
 - ☐ Very tired
 - ☐ Fairly tired
 - ☐ Fairly refreshed
 - ☐ Very refreshed

8. *If you had no commitments the next day, what time would you go to bed compared to your usual bedtime?*
- ☐ Seldom or never later
 - ☐ Less than 1 hour later
 - ☐ 1 – 2 hours later
 - ☐ More than 2 hours later
9. *You have decided to do physical exercise. A friend suggests that you do this for one hour twice a week, and the best time for him is between 7:00 and 8:00 AM. Bearing in mind nothing but your own internal "clock," how do you think you would perform?*
- ☐ Would be in good form
 - ☐ Would be in reasonable form
 - ☐ Would find it difficult
 - ☐ Would find it very difficult
10. *At approximately what time in the evening do you feel tired, and, as a result, in need of sleep?*
- ☐ 8:00 PM – 9:00 PM
 - ☐ 9:00 PM – 10:15 PM
 - ☐ 10:15 PM – 12:45 AM
 - ☐ 12:45 AM – 2:00 AM
 - ☐ 2:00 AM – 3:00 AM
11. *You want to be at your peak performance for a test that you know is going to be mentally exhausting and will last two hours. You are entirely free to plan your day. Considering only your "internal clock," which one of the four testing times would you choose?*
- ☐ 8:00 AM – 10:00 AM
 - ☐ 11:00 AM – 1:00 PM
 - ☐ 3:00 PM – 5:00 PM
 - ☐ 7:00 PM – 9:00 PM
12. *If you got into bed at 11:00 PM, how tired would you be?*
- ☐ Not at all tired
 - ☐ A little tired
 - ☐ Fairly tired
 - ☐ Very tired
13. *For some reason you have gone to bed several hours later than usual, but there is no need to get up at any particular time the next morning. Which one of the following are you most likely to do?*
- ☐ Will wake up at usual time, but will not fall back asleep
 - ☐ Will wake up at usual time and doze thereafter
 - ☐ Will wake up at usual time, but will fall asleep again
 - ☐ Will not wake up until later than usual
14. *One night you have to remain awake between 4:00 AM and 6:00 AM in order to carry out a night watch. You have no time commitments the next day. Which one of the alternatives would suit you best?*
- ☐ Would not go to bed until the watch is over
 - ☐ Would take a nap before and sleep after
 - ☐ Would take a good sleep before and nap after
 - ☐ Would sleep only before the watch

15. *You have two hours of hard physical work. You are entirely free to plan your day. Considering only your internal "clock," which of the following times would you choose?*
- ☐ 8:00 AM – 10:00 AM
 - ☐ 11:00 AM – 1:00 PM
 - ☐ 3:00 PM – 5:00 PM
 - ☐ 7:00 PM – 9:00 PM
16. *You have decided to do physical exercise. A friend suggests you do this for one hour twice a week. The best time for her is between 10:00 PM and 11:00 PM. Bearing in mind only your internal "clock," how well do you think you would perform?*
- ☐ Would be in good form
 - ☐ Would be in reasonable form
 - ☐ Would find it difficult
 - ☐ Would find it very difficult
17. *Suppose you can choose your own work hours. Assume that you work a five hour day (including breaks), your job is interesting, and you are paid based on your performance. At approximately what time would you choose to begin?*
- ☐ 5 hours starting between 4:00 AM and 8:00 AM
 - ☐ 5 hours starting between 8:00 and 9:00 AM
 - ☐ 5 hours starting between 9:00 AM and 2:00 PM
 - ☐ 5 hours starting between 2:00 PM and 5:00 PM
 - ☐ 5 hours starting between 5:00 PM and 4:00 AM
18. *At approximately what time of day do you usually feel your best?*
- ☐ 5:00 AM – 8:00 AM
 - ☐ 8:00 AM – 10:00 AM
 - ☐ 10:00 AM – 5:00 PM
 - ☐ 5:00 PM – 10:00 PM
 - ☐ 10:00 PM – 5:00 AM
19. *On hears about "morning types" and "evening types." Which one of these types do you consider yourself to be?*
- ☐ Definitely a morning type
 - ☐ Rather more a morning type than an evening type
 - ☐ Rather more an evening type than a morning type
 - ☐ Definitely an evening type

Source: [Horne 1976]

Dotazník Q3: Pittsburg Sleep Quality Index

Subject's Initials _____ ID# _____ Date _____ Time _____ AM
PM

PITTSBURGH SLEEP QUALITY INDEX

INSTRUCTIONS:

The following questions relate to your usual sleep habits during the past month only. Your answers should indicate the most accurate reply for the majority of days and nights in the past month. Please answer all questions.

1. During the past month, what time have you usually gone to bed at night?
BED TIME _____
2. During the past month, how long (in minutes) has it usually taken you to fall asleep each night?
NUMBER OF MINUTES _____
3. During the past month, what time have you usually gotten up in the morning?
GETTING UP TIME _____
4. During the past month, how many hours of actual sleep did you get at night? (This may be different than the number of hours you spent in bed.)
HOURS OF SLEEP PER NIGHT _____

For each of the remaining questions, check the one best response. Please answer all questions.

5. During the past month, how often have you had trouble sleeping because you . . .
 - a) Cannot get to sleep within 30 minutes

Not during the past month _____	Less than once a week _____	Once or twice a week _____	Three or more times a week _____
------------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------------
 - b) Wake up in the middle of the night or early morning

Not during the past month _____	Less than once a week _____	Once or twice a week _____	Three or more times a week _____
------------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------------
 - c) Have to get up to use the bathroom

Not during the past month _____	Less than once a week _____	Once or twice a week _____	Three or more times a week _____
------------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------------
 - d) Cannot breathe comfortably

Not during the past month _____	Less than once a week _____	Once or twice a week _____	Three or more times a week _____
------------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------------
 - e) Cough or snore loudly

Not during the past month _____	Less than once a week _____	Once or twice a week _____	Three or more times a week _____
------------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------------
 - f) Feel too cold

Not during the past month _____	Less than once a week _____	Once or twice a week _____	Three or more times a week _____
------------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------------

- g) Feel too hot
- | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Not during the
past month _____ | Less than
once a week _____ | Once or twice
a week _____ | Three or more
times a week _____ |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
- h) Had bad dreams
- | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Not during the
past month _____ | Less than
once a week _____ | Once or twice
a week _____ | Three or more
times a week _____ |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
- i) Have pain
- | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Not during the
past month _____ | Less than
once a week _____ | Once or twice
a week _____ | Three or more
times a week _____ |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
- j) Other reason(s), please describe _____
-

How often during the past month have you had trouble sleeping because of this?

Not during the past month _____	Less than once a week _____	Once or twice a week _____	Three or more times a week _____
------------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------------

6. During the past month, how would you rate your sleep quality overall?

Very good _____

Fairly good _____

Fairly bad _____

Very bad _____

7. During the past month, how often have you taken medicine to help you sleep (prescribed or "over the counter")?

Not during the past month _____	Less than once a week _____	Once or twice a week _____	Three or more times a week _____
------------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------------

8. During the past month, how often have you had trouble staying awake while driving, eating meals, or engaging in social activity?

Not during the past month _____	Less than once a week _____	Once or twice a week _____	Three or more times a week _____
------------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------------

9. During the past month, how much of a problem has it been for you to keep up enough enthusiasm to get things done?

No problem at all _____

Only a very slight problem _____

Somewhat of a problem _____

A very big problem _____

10. Do you have a bed partner or room mate?

No bed partner or room mate _____

Partner/room mate in other room _____

Partner in same room, but not same bed _____

Partner in same bed _____

If you have a room mate or bed partner, ask him/her how often in the past month you have had . . .

a) Loud snoring

Not during the past month_____	Less than once a week_____	Once or twice a week_____	Three or more times a week_____
-----------------------------------	-------------------------------	------------------------------	------------------------------------

b) Long pauses between breaths while asleep

Not during the past month_____	Less than once a week_____	Once or twice a week_____	Three or more times a week_____
-----------------------------------	-------------------------------	------------------------------	------------------------------------

c) Legs twitching or jerking while you sleep

Not during the past month_____	Less than once a week_____	Once or twice a week_____	Three or more times a week_____
-----------------------------------	-------------------------------	------------------------------	------------------------------------

d) Episodes of disorientation or confusion during sleep

Not during the past month_____	Less than once a week_____	Once or twice a week_____	Three or more times a week_____
-----------------------------------	-------------------------------	------------------------------	------------------------------------

e) Other restlessness while you sleep; please describe_____

Not during the past month_____	Less than once a week_____	Once or twice a week_____	Three or more times a week_____
-----------------------------------	-------------------------------	------------------------------	------------------------------------

Epworth Sleepiness Scale

Name: _____

Date: _____

Your age: (Yr) _____ Your sex: ☐ Male ☐ Female

How likely are you to doze off or fall asleep in the situations described below, in contrast to feeling just tired?

This refers to your usual way of life in recent times.

Even if you haven't done some of these things recently try to work out how they would have affected you.

Use the following scale to choose the most appropriate number for each situation:-

- 0 = would never doze
- 1 = Slight chance of dozing
- 2 = Moderate chance of dozing
- 3 = High chance of dozing

Situation

Chance of dozing

Sitting and reading	
Watching TV	
Sitting, inactive in a public place (e.g. a theatre or a meeting)	
As a passenger in a car for an hour without a break	
Lying down to rest in the afternoon when circumstances permit	
Sitting and talking to someone	
Sitting quietly after a lunch without alcohol	
In a car, while stopped for a few minutes in the traffic	
Total	

Score:

0-10 Normal range
10-12 Borderline
12-24 Abnormal

Obsah práce

1.	Úvod	1
1.1	<i>Osobní motivace.....</i>	1
1.2	<i>Vymezení tématu práce.....</i>	1
1.3	<i>Současné výzvy pro kvalitu světelného prostředí.....</i>	3
1.4	<i>Vymezení problému.....</i>	5
2.	Cíle a metodika	7
2.1	<i>Teoretická část.....</i>	7
2.1.1	<i>Proměny světelných podmínek v průběhu historie až do současnosti</i>	7
2.1.2	<i>Vizuální a biologické účinky světla na člověka.....</i>	8
2.1.3	<i>Světelné prostředí v současných budovách a nevizuální vnímání světla</i>	8
2.2	<i>Experimentální část.....</i>	9
2.2.1	<i>Světelné preference osob s extrémním chronotypem.....</i>	9
2.2.2	<i>Vliv světelného prostředí na biologické funkce člověka</i>	10
2.2.3	<i>Subjektivní hodnocení versus objektivní biologické efekty světla</i>	10
2.2.4	<i>Spotřeba elektrické energie na osvětlení, vliv chronotypu a světeln. režimu</i>	11
3.	Proměny světeln. prostředí člověka v průběhu historie až do současnosti... 13	
3.1	<i>Před 10 tisíci lety – končící paleolit a jeskynní lidé</i>	14
3.2	<i>Středověké vesnice - světlo a vnímání času</i>	15
3.3	<i>18. -19. století – průmyslová revoluce a dělnická předměstí</i>	18
3.4	<i>Moderní města 20. století – regulace a plánování</i>	21
3.5	<i>21. století - společnost digitálních technologií.....</i>	23
3.6	<i>Shrnutí třetí kapitoly</i>	28
4.	Světlo, vizuální a biologické účinky	31
4.1	<i>Viditelné elektromagnetické záření – světlo.....</i>	31
4.2	<i>Lidské oko.....</i>	34
4.2.1	<i>Tyčinky, čípky a vizuální vnímání světla</i>	35
4.2.2	<i>IpRGCs a nevizuální vnímání světla</i>	36
4.3	<i>Spektrální složení.....</i>	36
4.4	<i>Kvantita.....</i>	37
4.5	<i>Doba trvání, rozložení v prostoru, předchozí světelné prostředí.....</i>	38
4.5.1	<i>Rozložení v prostoru.....</i>	38
4.5.2	<i>Doba trvání.....</i>	39
4.5.3	<i>Předchozí světelné podmínky</i>	39
4.6	<i>Časové rozložení světla během dne.....</i>	39
4.6.1	<i>Cirkadiánní rytmy v těle.....</i>	39
4.6.2	<i>Podněty z vnějšího prostředí - časovače.....</i>	40
4.6.3	<i>Hormon melatonin a kortizol</i>	42
4.6.4	<i>Krátkodobé, akutní účinky světla</i>	43
4.7	<i>Vliv světla na rytmus spánku a bdění.....</i>	44
4.8	<i>Vliv světla na výkonnost, bdělost/ospalost a náladu</i>	45
4.9	<i>Inter-individuální rozdíly ve světelných preferencích.....</i>	47
4.9.1	<i>Lidské chronotypy.....</i>	47
4.9.2	<i>Vliv věku</i>	49

4.9.3 Vliv pohlaví.....	49
4.10 Shrnutí čtvrté kapitoly	50
5. Světelné prostředí v budovách a nevizuální vnímání světla.....	53
5.1 Legislativní požadavky na světelné prostředí v budovách.....	54
5.1.1 Závazná legislativa	54
5.1.2 Mezinárodní projekční podklady.....	56
5.1.3 Systémy hodnocení kvality budov	57
Shrnutí legislativních požadavků.....	58
5.2 Měření světelného prostředí pro posouzení vlivu na cirkadiánní systém	59
5.2.1 Vliv spektrální sensitivity	59
5.2.2 Vliv referenčního bodu	60
5.3 Metoda záznamu rytmu denní aktivity - aktigrafie	61
5.4 Vliv denního světla a umělého osvětlení v moderní společnosti	62
5.4.1 Vliv změny délky fotoperiody na denní rytmus člověka	63
5.4.2 Světelné prostředí mimo dosah přirozených pozemských zeitgeberů.....	65
5.4.3 Shrnutí	65
5.5 Světelná hygiena	65
5.6 Rizikové skupiny osob.....	68
5.6.1 Extrémní chronotypy	68
5.6.2 Vliv věku	70
5.7 Cirkadiánní dynamické osvětlovací systémy.....	72
5.7.1 Biodynamické osvětlení	72
5.7.2 Produkty na trhu.....	73
5.8 Shrnutí páté kapitoly	74
6. Experimentální část – výzkum vlivu světelného prostředí v kanceláři, vliv na extrémní chronotypy	77
6.1 Motivace.....	77
6.2 Hlavní cíle výzkumu.....	78
6.3 Návrh výzkumu.....	78
6.3.1 Charakteristika výzkumné laboratoře, vybavení	79
6.3.2 Světelné režimy.....	81
6.3.3 Účastníci studie.....	83
6.3.4 Výzkumná metoda a protokol	87
6.3.5 Subjektivní hodnocení bdělosti/ospalosti (dotazníky)	88
6.3.6 Kognitivní výkon	88
6.3.7 Hormonální analýzy - melatonin	90
6.3.8 Související spotřeba elektrické energie.....	91
6.3.9 Statistika.....	91
6.4 Výsledky.....	92
6.4.1 Světelné preference osob s extrémním chronotypem.....	92
6.4.2 Vliv světelného prostředí na biologické funkce člověka	95
6.4.3 Subjektivní hodnocení versus objektivní biologické efekty světla	105
6.4.4 Spotřeba elektrické energie na osvětlení, vliv chronotypu a světel. režimu ..	107
6.5 Shrnutí a diskuse výsledků experimentální části.....	107
6.5.1 Světelné preference u osob s extrémním chronotypem.....	107
6.5.2 Vliv světelného prostředí na biologické funkce člověka	110
6.5.3 Subjektivní hodnocení versus objektivní biologické efekty světla	113
6.5.4 Spotřeba elektrické energie na osvětlení, vliv chronotypu a světel. režimu ..	114
6.5.5 Omezení	114
7. Závěrečné shrnutí výsledků výzkumu	115
7.1 Souhrnný přehled dosažených výzkumných cílů, verifikace hypotéz.....	115
7.1.1 Teoretická část	115

7.1.2 Experimentální část	117
7.2 Shrnutí poznatků	118
7.3 Možnosti pro další výzkum	119
7.4 Význam pro praxi navrhování budov	120
7.5 Širší využitelnost výsledků práce	121
Seznam přímých citací v textu	123
Seznam použité literatury	125
Vlastní publikace vztahující se k této práci	137
Seznam ilustrací	138
Seznam tabulek	141
Seznam zkratk	142
 8. Experimental Part: Biological effects of light on humans	
- an office lighting study with extreme chronotypes	145
8.1 Study motivation	145
8.2 General hypotheses of the study, expected results	146
Question A: Difference in lighting preferences between extreme chronotypes	146
Question B: Effects of three different lighting conditions on biological functions	147
Question C: Subjective evaluations versus objective biological effects of light	147
Question D: The effects on electricity consumption	148
8.3 General study design	148
8.3.1 Study room and equipment	148
8.3.2 Study set-up - lighting conditions	151
8.3.3 Study participants	153
8.3.4 Study methods and protocol	157
8.3.5 Subjective evaluation of sleepiness (with questionnaires)	158
8.3.6 Cognitive performance	158
8.3.7 Hormonal analyses - melatonin	159
8.3.8 Electrical energy consumption	160
8.3.9 Statistics	161
8.4 Results	161
8.4.1 Question A	161
8.4.2 Question B	165
8.4.3 Question C	175
8.4.4 Question D	177
8.5 Summary and discussion	177
8.5.1 Preferred temporal distribution of light during the day	177
8.5.2 Effects of light on cognition and biological markers	180
8.5.3 Subjective evaluation versus objective measures	182
8.5.4 Effects on energy consumption	183
8.5.5 Limitations	184
8.6 Conclusion	184
 Přílohy	186
Tabulky statistického výpočtu	
Dotazníky použité pro stanovení chronotypů	