

## **Diplomová práce**

# **Hodnocení fotoluminiscenčních textilií zvyšující viditelnost chodce v silničním provozu**

*Studijní program:*

N0723A270001 Textilní inženýrství

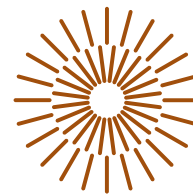
*Autor práce:*

**Bc. Monika Matějková**

*Vedoucí práce:*

Ing. Katarína Zelová, Ph.D.  
Katedra oděvnictví

Liberec 2023



## Zadání diplomové práce

# Hodnocení fotoluminiscenčních textilií zvyšující viditelnost chodce v silničním provozu

*Jméno a příjmení:*

**Bc. Monika Matějková**

*Osobní číslo:*

T20000040

*Studijní program:*

N0723A270001 Textilní inženýrství

*Zadávající katedra:*

Katedra oděvnictví

*Akademický rok:*

2020/2021

### Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši zaměřenou na hodnocení luminiscenčních vlastností textilií.
2. Realizujte průzkum trhu dostupných luminiscenčních materiálů a charakterizujte princip fungování fotoluminiscenčních materiálů.
3. Dopracujte návrh metodiky testování fotoluminiscenčních vlastností textilií pomocí digitálního fotoaparátu.
4. Navrhněte a realizujte experiment pro hodnocení fotoluminiscenčních vlastností textilií a intenzity vyzařování luminiscence.
5. Zhodnoťte schopnost vyhasínání luminiscence a intenzitu fotoluminiscenčních textilií. Formulujte závěrečné zjištění o možnosti vhodného testování fotoluminiscence.

*Rozsah grafických prací:* dle rozsahu dokumentace  
*Rozsah pracovní zprávy:* cca 60 stran  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* čeština

### **Seznam odborné literatury:**

- DVOŘÁK, L., KUPKA, Z. Fyzikální podstata a využití luminiscence. Praha: SPN – pedagogické nakladatelství, 1980.
- LI, J.Z.CH., GE, M. Computer-aided design of luminous fiber embroidered fabric and characterization of afterglow performance. Textile Research Journal. 2016, 86(11), 1162-1170.
- YAN, Y., GU, B., DU, L., ZHU, Y. Study on the equivalent luminance of luminous fibers in mesopic vision. The Journal of The Textile Institute. 2018, 110(2), 311-316.
- GUO, X., ZHANG, K., ZHANG, H., GE, M. Working Conditions on the Afterglow Characteristics of Rare-earth Luminous Fibers. Fibers and Polymers. 2018, 19(3), 531-537.
- DIN 67510-1. Langnachleuchtende Pigmente und Produkte: Teil 1: Messung und Kennzeichnung beim Hersteller. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2020.

*Vedoucí práce:* Ing. Katarína Zelová, Ph.D.  
Katedra oděvnictví

*Datum zadání práce:* 5. května 2021  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 2. června 2023

doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.  
děkan

L.S.

prof. Dr. Ing. Zdeněk Kůs  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.



## **Poděkování**

Mé poděkování patří Ing. Kataríně Zelové, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, ochotu a cenné rady, které mi v průběhu zpracování diplomové práce poskytovala. Děkuji také prof. Ing. Michalu Vikovi, Ph.D. a jeho kolegům za vstřícnost a pomoc s měřeními.

Velmi děkuji své rodině a přátelům mému srdci nejbližším, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

Hodnocení fotoluminiscenčních textilií zvyšující viditelnost chodce v silničním provozu

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá hodnocením luminiscenčních vlastností pletenin vyrobených z fotoluminiscenční příze, které by mohly zvýšit viditelnost chodce v silničním provozu za tmy. Práce je zaměřena na testování fotoluminiscenčních vlastností textilií pomocí digitálního fotoaparátu. Navržená metoda měření a metodika vyhodnocení digitální fotografie je dostatečně přesnou a cenově dostupnější alternativou měření luminiscence pomocí speciální přístrojové techniky. Hodnocen byl vliv parametrů pleteniny z fotoluminiscenční příze na intenzitu vyzařování luminiscence, schopnost jejího vyhasínání a účinek doby osvitů. Subjektivně byla hodnocena viditelnost pruhovaného vzoru s ohledem na obsah fotoluminiscenčního materiálu.

Klíčová slova:

viditelnost chodce, fotoluminiscence, pletenina, luminiscenční vlastnosti, digitální fotoaparát, spektrometr, vyhasínání luminiscence, intenzita luminiscence

Evaluation of photoluminescent textiles increasing pedestrian visibility in road traffic

## **Annotation**

The diploma thesis deals with the evaluation of luminescent properties of photoluminescent yarn knitted fabrics, which could increase the visibility of pedestrians in road traffic in the dark. The thesis is focused on testing the photoluminescent properties of the fabrics using a digital camera. The proposed measurement method and evaluation methodology of digital photography is a sufficiently accurate and cheaper alternative to measurement using special instrumentation. The influence of the parameters of knitted fabrics made from photoluminescent yarn on the intensity of luminescence emission, its afterglow ability and the effect of exposure time were evaluated. The visibility of the striped pattern was subjectively evaluated with as to the content of the photoluminescent material.

Keywords:

pedestrian visibility, photoluminescence, knitted fabric, luminescent properties, digital camera, spectroradiometer, luminescence afterglow, luminescence intensity

# Obsah

Seznam použitých zkratk, značek, symbolů .....	8
Úvod.....	9
REŠERŠNÍ ČÁST .....	11
1 Viditelnost chodce v silničním provozu .....	11
1.1 Význam viditelnosti chodce v silničním provozu .....	11
1.2 Prvky zvyšující viditelnost chodce v silničním provozu.....	12
1.2.1 Aktivní bezpečnostní prvky .....	13
1.2.2 Pasivní bezpečnostní prvky .....	13
1.2.3 Hybridní bezpečnostní prvky .....	15
1.3 Legislativa, normy, studie .....	16
2 Luminiscence.....	18
2.1 Princip luminiscence .....	18
2.2 Druhy luminiscence .....	19
2.3 Princip fungování fotoluminiscenčních materiálů .....	20
2.4 Hodnocení (foto)luminiscenčních vlastností textilií .....	21
2.4.1 Testování v laboratorních podmínkách.....	22
2.4.2 Metody hodnocení luminiscenčních vlastností textilií v laboratoři.....	26
2.4.3 Testování v reálných podmínkách v terénu .....	30
2.4.4 Metody hodnocení luminiscenčních vlastností textilií v terénu .....	30
2.5 Dostupnost luminiscenčních materiálů na trhu .....	31
2.5.1 Fotoluminiscenční nitě a příze .....	31
2.5.2 Fotoluminiscenční plošné textilie .....	33
2.5.3 Textilní drobná příprava .....	35
2.5.4 Hotové oděvy .....	37
Shrnutí rešeršní části .....	38
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	39
3 Charakteristika použitých materiálů.....	40
3.1 Charakteristika fotoluminiscenční nažehlovací folie .....	40
3.2 Charakteristika fotoluminiscenčních textilií .....	41
4 Měření fotoluminiscence .....	45
4.1 Měření č. 1 – měření fotoluminiscence pomocí spectroradiometru.....	45
4.1.1 Podmínky a charakteristika měření.....	45
4.1.2 Postup měření .....	47
4.1.3 Výsledky měření a vyhodnocení.....	47

4.2	Měření č. 2 – zjišťování vlivu delší doby osvitů na intenzitu a vyhasínání luminiscence.....	55
4.2.1	Podmínky a charakteristika měření.....	55
4.2.2	Postup měření .....	56
4.2.3	Výsledky měření a vyhodnocení.....	57
4.3	Měření č. 3 – měření v domácích podmínkách pomocí fotoaparátu.....	64
4.3.1	Podmínky a charakteristika měření.....	64
4.3.2	Postup měření .....	69
4.3.3	Výsledky měření a vyhodnocení.....	71
4.4	Fotografické testování viditelnosti luminiscenčního vzoru .....	78
4.4.1	Podmínky a charakteristika měření.....	78
4.4.2	Postup měření .....	82
4.4.3	Výsledky měření a vyhodnocení.....	82
5	Diskuze výsledků.....	85
	Závěr .....	90
	Použitá literatura .....	92
	Seznam obrázků.....	95
	Seznam tabulek .....	96
	Seznam vzorců.....	97
	Seznam příloh .....	97

## Seznam použitých zkratek, značek, symbolů

cca	cirka (přibližně)
CIE XYZ 1931	matematicky definovaný barevný prostor
cm	centimetr
cm <sup>2</sup>	centimetr čtvereční
D50	denní světlo
dtex	decitex
g.m <sup>-2</sup>	gram na metr čtvereční
hod	hodina
K	kelvin
KMI	katedra materiálového inženýrství
KOD	katedra oděvnictví
L	jas [cd/m <sup>2</sup> ]
LCAM	laboratoř měření barevnosti a vzhledu
LED	Light-Emitting-Diode (elektroluminiscenční dioda)
lm	lumen
lx	lux
m	metr
mcd/m <sup>2</sup>	milicandela na metrčtvereční
min	minuta
mm	milimetr
nm	nanometr
OOPP	osobní ochranné pracovní prostředky
PC	personal computer (osobní počítač)
px	pixel
r	pearsonův korelační koeficient
RAW	třída souborových formátů
RGB	barevné souřadnice
s	sekunda
S <sub>0</sub>	singletní stav elektronů
S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub>	excitované singletní stavy elektronů
SW	software
t	čas [min]
T <sub>1</sub>	tripletní stav elektronů
tex	tex
™	symbol ochranné známky
TUL	Technická univerzita v Liberci
UV	ultraviolet (ultrafialové záření)
V	volt
W	watt
λ	vlnová délka [nm]
τ	doba trvání [s]
%	procento
.CR2	datový formát pro ukládání obrazových informací
.JPG	datový formát pro ukládání obrazových informací
®	symbol registrované ochranné známky
°	stupeň
°C	stupeň celsia

## Úvod

Tato práce se zabývá tématem hodnocení fotoluminiscenčních textilií, které mají potenciál sloužit jako prostředek ke zvýšení viditelnosti chodce v silničním provozu za tmy. Výzkumu luminiscenčních vlastností se odborníci se věnují z různých hledisek. Společným cílem je vyvinout materiály se stabilními luminiscenčními vlastnostmi pro jejich lepší komerční využití. Předmětem současného výzkumu v oblasti textilních materiálů jsou zejména fotoluminiscenční vlákna a příze. Tato práce je zaměřena na hodnocení fotoluminiscenčních vlastností nově vyvinutých pletenin na Katedře oděvnictví vyrobených z fotoluminiscenční příze obsahující fotoluminiscenční pigment na bázi kovů alkalických zemin hlinitanu stroncia.

Rešeršní část ve zkratce objasňuje problematiku viditelnosti chodce za tmy. Dobrá viditelnost účastníků silničního provozu je základem prevence dopravní nehody. Pravděpodobně každý z řidičů zažil, že v noci na silnici málem někoho přehlédl právě z důvodu nedostatečné viditelnosti. Legislativa [1] ukládá chodci nosit za snížení viditelnosti retroreflexní prvky, pokud se pohybuje po komunikaci mimo obec po straně nebo krajnici kde není veřejné osvětlení. Funkčnost těchto prvků je však omezená pouze na dobu, kdy jsou přímo osvětleny externím zdrojem světla, např. reflektory automobilu. Ke zvýšení viditelnosti za dne se využívají oděvy z fluorescenčního materiálu. Ve tmě ale tyto materiály ztrácejí svou funkčnost. Vhodným prostředkem ke zvýšení viditelnosti za tmy by mohl být oděv ušitý z fotoluminiscenční textilie. Hlavní výhodou fotoluminiscenčních materiálů totiž je, že po nasvícení mohou spontánně světelně zářit i několik minut až hodin.

Další kapitola vysvětluje princip fungování fotoluminiscenčních materiálů a luminiscence obecně. Jsou zde charakterizovány současné metody, které se k výzkumu luminiscenčních vlastností využívají. Je zde také zpracován průzkum trhu dostupných textilních fotoluminiscenčních materiálů. Fotoluminiscenční materiály využívané v oděvnictví jsou v současné době na trhu k dispozici převážně ve formě barviv, nažehlovací folie a šicích nití. Tyto materiály však mají své limity použití. Např. folie má poměrně vysokou účinnost co se týká intenzity vyzařování luminiscence, avšak není dostatečně pružná a nelze ji na oděv aplikovat celoplošně. Níťe a z nich vytvořené výšivky naopak nemají potřebnou účinnost. Plošné textilie jsou v nabídce méně často, zcela ale chybí pletenina. Základem této práce jsou právě pleteniny, které nově vznikají.

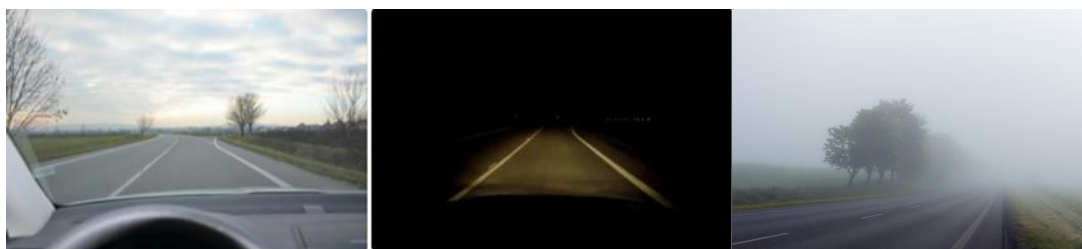
Jedním z cílů experimentální části je zhodnotit vliv parametrů pleteniny vyrobené z fotoluminiscenčních přízí (10 vzorků ze 100% polyesteru různé jemnosti a barvy) na její fotoluminiscenční vlastnosti. V oblasti výzkumu luminiscenčních vlastností se nejčastěji hodnotí emisní spektra, intenzita a životnost luminiscence s využitím scanovací elektronové mikroskopie, spektrofluorimetru, spektroradiometru. Jelikož pořízení této speciální přístrojové techniky k měření luminiscence je cenově poměrně nákladná záležitost, je tato práce zaměřena na možnosti testování fotoluminiscenčních vlastností textilií pomocí digitálního fotoaparátu. Ten se v současnosti využívá „jen“ pro vytvoření obrazového záznamu. Dalším z cílů tedy je navrhnout metodu měření fotoluminiscence pomocí digitálního fotoaparátu a k ní metodiku vyhodnocení fotografií. K vyhodnocení digitálních fotografií byly využity dva typy obrazové analýzy. Zpracovaná metoda měření pomocí digitálního fotoaparátu by mohla být dostupnější alternativou měření pomocí drahých přístrojů.

Digitální fotoaparát byl využit i k subjektivnímu hodnocení viditelnosti sedmi variant pruhovaného vzoru s ohledem na obsah fotoluminiscenčního materiálu. Výsledky tohoto experimentu, kterému se věnuje závěrečná část práce, mohou být základem ke stanovení optimálního poměru a množství fotoluminiscenčního materiálu z hlediska snížení výrobních nákladů při zajištění dostatečné účinnosti luminiscence.

# REŠERŠNÍ ČÁST

## 1 Viditelnost chodce v silničním provozu

Viditelnost chodce v silničním provozu lze definovat podle vzdálenosti, na kterou je viděn. Tento parametr je pro bezpečnost chodců i jiných účastníků silničního provozu stěžejní zejména pokud se po pozemní komunikaci pohybují za snížené viditelnosti nebo za tmy. Nedostatečné světlené podmínky totiž ovlivňují kvalitu vidění. Snížená viditelnost může být způsobena nepříznivými klimatickými podmínkami jako např. silný déšť, sněžení, mlha nebo vlivem vzdušného znečištění kouřem či prachem. Horší vnímání okolních podnětů může u řidiče nastat také při vjezdu do tunelu. [1] Na Obr. 1 je pro ilustraci zachycený výhled řidiče na vozovku za dne, v noci a za zhoršené viditelnosti způsobené mlhou.



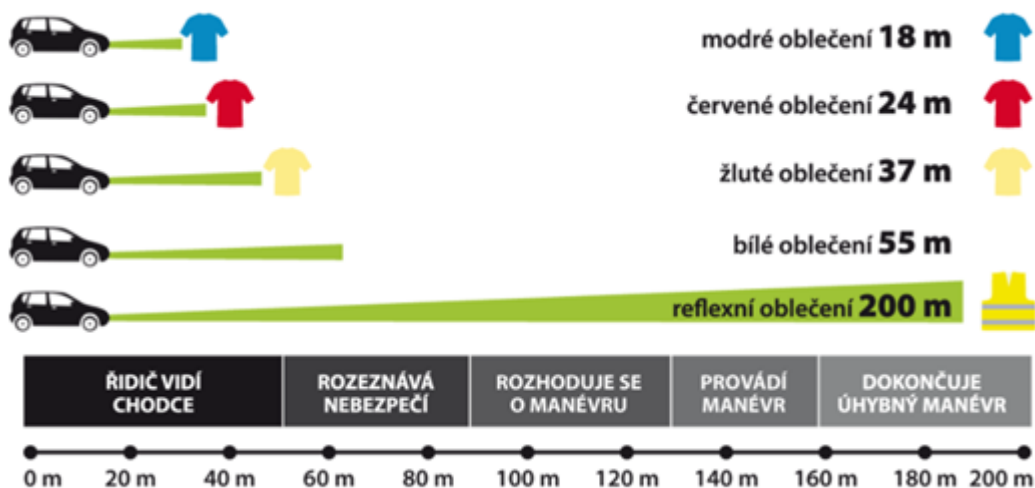
Obr. 1 Výhled řidiče z automobilu na vozovku ve dne, v noci a za mlhy [2; 3]

### 1.1 Význam viditelnosti chodce v silničním provozu

Dobrá viditelnost chodce, ale i jiných účastníků silničního provozu je základem prevence dopravních nehod často končících vážnými zdravotními následky nebo úmrtím. Zvláště ohroženi jsou chodci, děti, lidé s kočárky, vozíčkáři, osoby vykonávající práci na silnici a další. V silničním provozu je důležité nejen vidět, ale i být viděn. Bezpečnostní oděv, tzn. oděv s vysokou viditelností hraje v tomto zásadní roli. Pokud se člověk pohybuje na silnici za snížené viditelnosti, ve špatně osvětlených nebo jinak nebezpečných oblastech je třeba, aby svou viditelnost pro ostatní účastníky silničního provozu zvýšil. Z tohoto hlediska klade důraz na větší bezpečnost chodců i legislativa. Novela zákona o provozu na pozemních komunikacích (§ 53 zákona č. 361/2000 Sb.) [1] ukládá chodcům, pokud se pohybují po komunikaci mimo obec po straně nebo krajnici kde není veřejné osvětlení, nosit za snížené viditelnosti reflexní prvky. Bohužel tato novela nijak blíže nedefinuje velikost, umístění ani množství těchto reflexních materiálů.



Jak může oděv ovlivnit viditelnost chodce v noci je dobře patrné na Obr. 2. Je zde graficky znázorněno, jak jsou různé barvy pro řidiče viditelné z různé vzdálenosti. Reflexní materiál je v noci vidět na cca 3krát větší vzdálenost než bílý a více než na 10krát větší vzdálenost než modrý.



Obr. 2 Viditelnost chodce v noci v závislosti na barevnosti oděvu [4]

Z výše uvedeného vyplývá, že správně zvolený oděv může díky své dobré viditelnosti výrazně prodloužit vzdálenost na kterou řidič chodce uvidí a tím více času získá na reakci pro případný úhybný manévr, zpomalení nebo zastavení vozidla.

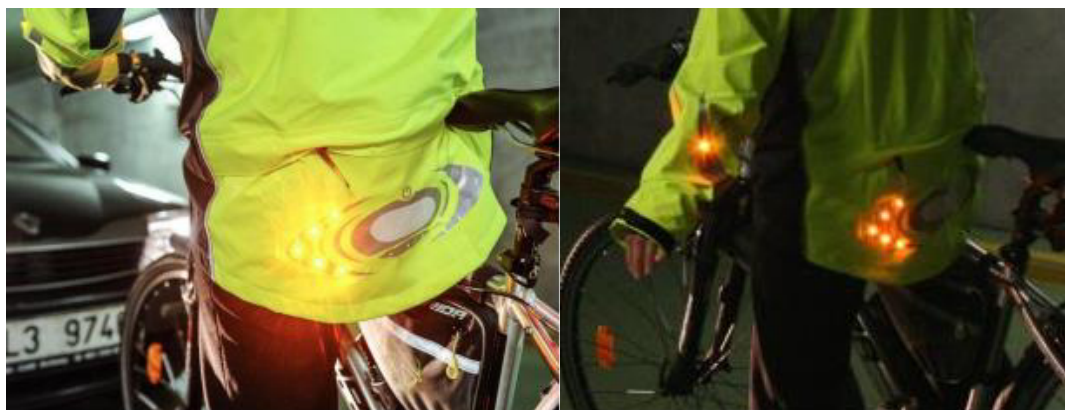
## 1.2 Prvky zvyšující viditelnost chodce v silničním provozu

V současnosti se pro zajištění viditelnosti osob za zhoršených světelných podmínek používají bezpečnostní prvky umístěné na svrchní vrstvě oděvu, které lze rozdělit do tří základních skupin [5; 6]:

- **aktivní bezpečnostní prvky** – aktivně světlo vyzařují pomocí vlastního světelného zdroje s napájením;
- **pasivní bezpečnostní prvky** – nemají aktivní zdroj světelného záření, ale mohou ho odrážet nebo emitovat;
- **hybridní bezpečnostní prvky** – kombinují předchozí dvě varianty.

### 1.2.1 Aktivní bezpečnostní prvky

Jedná se o aktivně vyzařující prvky s vlastním zdrojem světla (např. světelné LED diody, pásy apod), které jsou napájeny nejčastěji bateriově a jsou uchyceny na nosném prostředku (oděv, přilba apod). Oproti pasivním prvkům je jejich velkou výhodou, že jsou díky internímu energetickému napájení funkční i bez externího osvětlení. Prvky mohou vydávat světlo nepřerušovaně anebo přerušovaně a svým blikáním tak ještě lépe upoutat pozornost řidiče. Na Obr. 3 je ukázka aplikace aktivního prvku do cyklistické bundy. Hlavní nevýhodou aktivních prvků je, že je nutné zajistit jejich napájení. Bez něj se stávají nefunkční. Čím větší počet vyzařujících jednotek je pro zviditelnění použito, tím víc energie je nutné dodat. Nevýhodou může být finanční náročnost, omezení pohybu kvůli rozměru a hmotnosti, nízká mechanická odolnost, komplikovanější údržba oděvu. [5; 6]



Obr. 3 Reflexní cyklistická bunda s bodovými zdroji osvětlení [5; 7]

### 1.2.2 Pasivní bezpečnostní prvky

Pasivní bezpečnostní prvky jsou bez napájení a sami o sobě světlo nevyzařují. Jejich hlavní výhodou je jejich poměrně vysoká mechanická odolnost a nulová energetická náročnost.

#### Fluorescenční materiály

Jednoduchým a dostupným způsobem, jak zvýšit svou viditelnost je prostřednictvím výrazných barev s vyšším celkovým odrazem. Tímto se vyznačují fluorescenční barvy, které vyzařují elektromagnetické záření ve viditelných vlnových délkách delších, než které jsou pohlcovány a tím jsou vůči okolí vysoce kontrastní. Oděv z fluorescenčního materiálu zvyšuje viditelnost chodce za denního světla a za soumraku.

Ve tmě však tyto materiály ztrácejí svou funkčnost. Z toho důvodu jsou často doplněny o retroreflexní prvek. [5]



Obr. 4 Ukázka použití fluorescenční textilie – reflexní vesta [4]

### Retroreflexní materiály

Retroreflexní materiály jsou funkční za tmy a dokážou zvýšit viditelnost chodce až na vzdálenost 200 m [4]. Světlo dopadající na povrch retroreflexního materiálu se odráží zpět směrem ke světelnému zdroji, jak je patrné na Obr. 5. Nevýhodou u tohoto typu ochranných prvků je, že jejich funkčnost je omezená pouze na dobu, kdy je prvek přímo osvětlen externím zdrojem světla, např. reflektory automobilu. V oblasti OOPP jsou retroreflexní prvky běžnou součástí pracovních a ochranných oděvů, které ale podléhají časté údržbě. Bohužel znečištěním a častým praním může docházet ke snížení jejich účinnosti. [5; 6]



Obr. 5 Ukázka oděvu s reflexním prvkem [8]

## Luminiscenční materiály

Tyto materiály mají schopnost přeměnit absorbovanou energii na světelnou. U fotoluminiscenčních materiálů je světelné záření vybuzeáno ultrafialovým nebo viditelným světelným zářením. Blíže je princip luminiscenčních materiálů objasněn v kapitole 2. Výhodou těchto materiálů je, že jejich spontánní světelné záření může trvat i několik minut až hodin po ukončení excitace. Právě (foto)luminiscenční materiály, které jsou předmětem této práce, se jeví jako další možný prostředek k dosažení vyšší bezpečnosti účastníků silničního provozu nebo osob pohybujících se v jiných nebezpečných podmínkách za snížené viditelnosti.

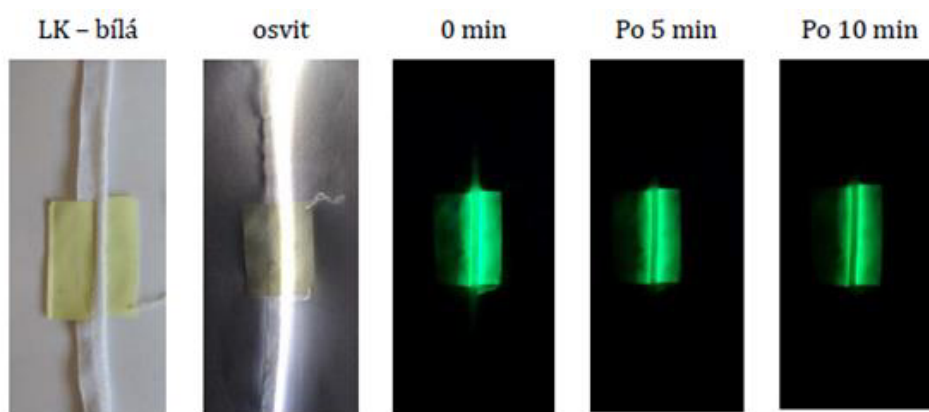


Obr. 6 Pracovní vesta s retroreflexní a fotoluminiscenční páskou [9]

### 1.2.3 Hybridní bezpečnostní prvky

Hybridní bezpečnostní prvky kombinují aktivní a pasivní prvky. Např. lze využít kombinace světelného zdroje LED v kombinaci s textilií opatřenou luminoforem. Jak bylo řečeno, nevýhodou aktivních bezpečnostních prvků je jejich časové omezení závislé na kapacitě zdroje napájení. Fotoluminiscenční materiály zase mají schopnost světélkovat i několik desítek minut po přerušení excitace. Společnou aplikací obou prvků na oděv lze prodloužit dobu viditelnosti uživatele. Zdroj LED během svého světelného

vyzařování aktivuje fotoluminiscenční záření textilie, která bude sekundárně vyzařovat světlo i po dočasném vypnutí aktivního LED osvětlení. Ukázka principu viz Obr. 7.



Obr. 7 Princip hybridního luminiscenčního prvku [5]

### 1.3 Legislativa, normy, studie

Jak již bylo zmíněno výše, zákon o provozu na pozemních komunikacích (§ 53 zákona č. 361/2000 Sb.) [1] ukládá chodcům za snížené viditelnosti při pohybu mimo obec nosit reflexní prvky. Tento ale konkrétně nespecifikuje, kde mají být prvky umístěny a jak velkou plochu oděvu mají pokrýt.

Umístění a velikost plochy bezpečnostních prvků ke zvýšení viditelnosti je předmětem řady mezinárodních norem. Standardy nastavené normou obvykle specifikují požadavky na pracovní oděvy. Typickým příkladem pracovního oděvu jsou bezpečnostní vesty, bundy, kalhoty a kombinézy. Evropská norma EN ISO 20471:2013 [10] specifikuje požadavky na oděvy s vysokou viditelností **pro profesionální oděvy**. Definuje nároky kladené na barvu a retroreflexi a také jak mají být oděvní materiály testovány na mechanické, fyzikální a chemické namáhání. Norma dělí výstražné oděvy do tří skupin, a to dle plochy oděvu zakrývající tělo a dle minimální plochy výskytu retroreflexních a fluorescenčních materiálů s ohledem na míru rizika. Norma ČSN EN 1150 [11] definuje zkušební metody a technické parametry výstražných oděvů s vysokou viditelností **pro neprofesionální použití**. Stanovuje minimální plochy a materiály jimiž lze docílit vysokého kontrastu oproti okolnímu pozadí ve dne, v noci, i při městském osvětlení.

Standardy oděvu s vysokou viditelností se mohou mezi uživatelskými zeměmi lišit a mohou podléhat místním předpisům. Americká norma ANSI/ISEA 107-2015 pro bezpečnostní oděvy a doplňky s vysokou viditelností poskytuje pokyny pro výběr

a používání ochranných oděvů. Specifikuje množství a umístění viditelných materiálů a další atributy návrhu oděvu a dělí je podle výkonnostní třídy, typu pracovního prostředí a účelu použití. Norma specifikuje požadavky na fotometrické a fyzikální vlastnosti materiálů s retroreflexní a kombinovanou výkonností. [12]

Uvedené normy věnují pozornost zvýšení viditelnosti za použití retroreflexních a fluorescenčních materiálů. Bohužel momentálně neexistuje standard, který by zohledňoval aplikaci i jiných bezpečnostních prvků, které by mohly výrazně zvýšit funkčnost těchto oděvů. Například aktivní bezpečnostní prvky nebo luminiscenční materiály by mohly v mnoha ohledech funkčnost ochranných oděvů zvýšit. Se stále vzrůstající hustotou dopravy a potažmo nehodovostí je zvyšování bezpečnosti chodců a dalších účastníků silničního provozu neustále aktuální téma. Nové způsoby vylepšení bezpečnostních oděvů a prvků jsou předmětem různých studií a patentů.

Kupříkladu Park [13] ve své studii srovnává různé fluorescenční textilie a retroreflexní materiály. Za účelem rozvoje bezpečnosti oblečení pro pracovníky silničního provozu a chodce se zabývá tím, zda materiály splňují viditelnost a pohodlí při nošení v souladu s normami ISO na mezinárodní úrovni.

Křemenáková, Militký a kol. [5] pracovali na vývoji hybridního osvětlovacího systému určeného pro oděvní účely, kde kombinovali aktivní a pasivní světelné prvky. Aktivním prvkem je zde speciálně vyvinutý a patentovaný lineární kompozit [6] z vyzařujícího optického vlákna pokrytý tkanou textilní vrstvou s napájecím zdrojem a světelným zdrojem LED. Jako pasivní prvek byla použita textilní páska potažená fluorescenčními pigmenty, které vyzařují světlo i po dočasném vypnutí aktivního osvětlení.

Pro zvýšení bezpečnosti osob se na oděv často aplikují reflexní textilní stuhy. Tyto textilie jsou však obvykle drsné, tuhé a méně prodyšné. Khattab a kol. [14] vyvinuli bavlněnou tkaninu opatřenou fotoluminiscenční vrstvou. Na bavlněný povrch byla nástřikem nanášena vrstva různých koncentrací fotoluminiscenčního pigmentu. Tato textilie by měla být použita na oděvy určené k pohybu v silničním provozu i za zhoršené viditelnosti. Stěžejní vlastností této textilie oproti retroreflexním prvkům je to, že pokračuje ve vyzařování světla ještě dlouhou dobu po odstranění zdroje osvětlení. Testováním bylo potvrzeno, že nástříkané textilní substráty vykazovaly dobré vlastnosti stálosti, prodyšnosti, pružnosti a reverzibilní luminiscenční záři ve tmě.

## 2 Luminiscence

Slovo luminiscence je odvozeno z latinského lumen = světlo. Tento pojem lze přeložit jako světélkování. Jedná se o fyzikální jev způsobený absorpcí energie, při kterém dochází k samovolnému vyzařování fotonů obvykle pevnými či kapalnými látkami, a který se projevuje světelným zářením. Na rozdíl od tepelného záření je luminiscence nezávislá na teplotě. Právě proto, že luminiscenci můžeme pozorovat i u studených objektů, se tento jev také často nazývá „studeným světlem“. [15; 16]

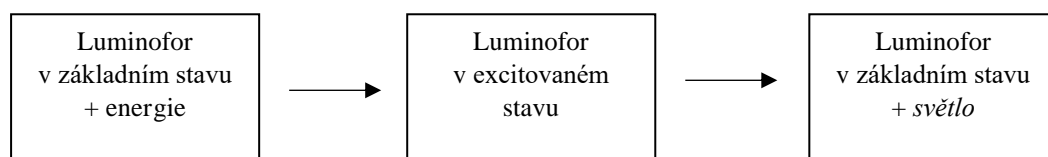
### 2.1 Princip luminiscence

Luminiscence je druh světelného nerovnovážného záření, při kterém nevzniká doprovodná tepelná energie a vyskytuje se i v oblastech spektra, ve kterých je rovnovážné teplotní vyzařování vyjádřené Planckovým zákonem nulové. Vyvoláno je vnějším vlivem tzv. excitací, kdy dochází k vybuzení elektronů v atomech do excitovaného stavu a trvá určitou dobu i po skončení budícího účinku. Luminiscenci můžeme pozorovat u látek, které hůře vedou elektrický proud (izolátory a polovodiče). Kovy, které jsou dobrými elektrickými vodiči luminiskovat nemohou. Aby bylo látku možné klasifikovat jako luminiscenční musí v ní existovat systém diskrétních energetických hladin (čárový či pásový), mezi kterými mohou přecházet elektrony. Energetický rozdíl mezi těmito stavy musí být takový, aby při přechodu elektronu z vyššího stavu do nižšího došlo k vyzáření fotonu z viditelné oblasti spektra. Látka, u které nastává luminiscence se nazývá luminofor. [15; 16]

Dvořák a Kupka [15 str. 33] vychází z Vavilovovy definice upravené A. M. Gurvičem a definují luminiscenci jako „*spontánní záření, představující přebytek nad teplotním zářením, které je charakterizováno dozníváním, jehož trvání značně převyšuje periodu světelných kmitů*“. [15]

Luminiscenční děj probíhá v několika fázích. Nejprve je **absorbováno určité množství energie** což vyvolá budící reakci (excitaci) luminiscenčního systému. Excitace může být dosažena různými způsoby a v závislosti na zdroji lze rozlišit různé druhy luminiscence popsané dále v textu. Následně dochází k **přenosu excitační energie** mezi absorpčními a luminiscenčními centry. Excitované atomy se vrací na základní hladinu energie, což vede k emisi luminiscenčního záření. **Vyzáření fotonů luminiscence** pak probíhá spontánně a nezávisle na vnějších vlivech. Intenzita záření po ukončení buzení

postupně klesá. Doba doznívání světelné emise může trvat od  $10^{-15}$  sekundy až po několik hodin či dní. [15; 16]



Obr. 8 Ilustrace luminiscenční reakce

## 2.2 Druhy luminiscence

Dle typu energie vyvolávající excitaci atomů a dle způsobu jejího dodávání lze rozlišit následující základní druhy luminiscence [15; 16]:

- **fotoluminiscence** – je vyvolána ozářením světlem (elektromagnetickým vlněním);
- **elektroluminiscence** – je vyvolána účinkem elektrického pole nebo průchodem elektrického proudu;
- **chemiluminiscence** – je vyvolána exotermní chemickou reakcí;
- **bioluminiscence** – je vyvolána chemickou reakcí v živých organismech;
- **katodoluminiscence** – je vyvolána dopadajícími urychlenými elektrony;
- **termoluminiscence** – je vyvolána změnou teploty;
- **radioluminiscence** – je vyvolána jadernou reakcí;
- **rentgenoluminiscence** – je vyvolána ozářením rentgenovými paprsky;
- **mechanoluminiscence** – je vyvolána mechanickou energií;
- **triboluminiscence** – je vyvolána třením dvou těles;
- **krystaloluminiscence** – je vyvolána při krystalizaci z roztoku;
- **sonoluminiscence** – vyvolána zvukovým vlněním.

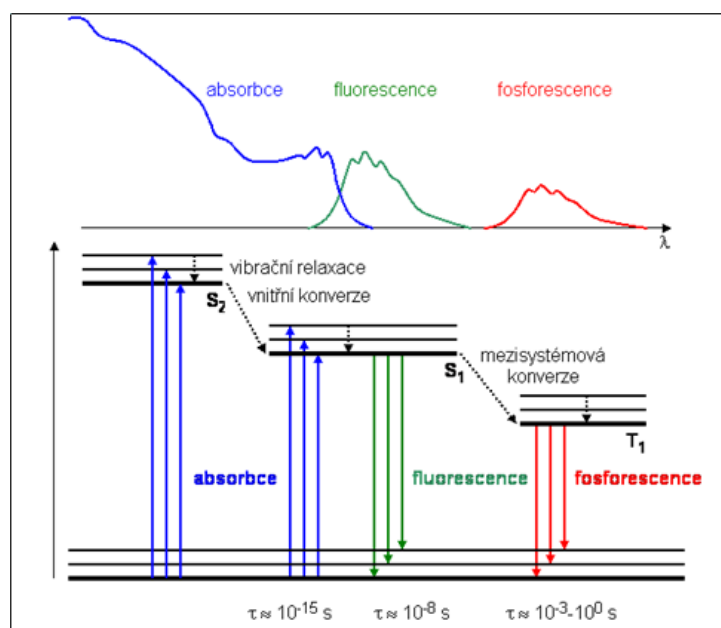
Dle doby trvání luminiscence po skončení excitace lze luminiscenci dělit na [15; 16]:

- **fluorescence** – se vyznačuje tím, že s přerušením excitace luminiscence téměř ihned vymizí. Doznívání luminiscenčního záření trvá cca  $10^{-15}$  až  $10^{-8}$  sekundy. Tento jev můžeme pozorovat např. pokud UV lampou osvítlíme ochranné prvky na bankovkách či dokladech, které jsou za denního světla neviditelné.



- **fosforescence** – je typ luminiscence, která trvá několik minut až hodin i po přerušení excitace.
- **zpožděná fluorescence** – jedná se o fluorescenci, ale s delší dobou dohasínání, po kterou je molekula v metastabilním tripletovém stavu.

Na Obr. 9 je uvedeno schéma energetických stavů, které znázorňuje princip složité molekuly. Jsou zde znázorněny tvary absorpčních a emisních spekter (vlnová délka  $\lambda$  [nm]) a zjednodušené schéma zářivých a nezářivých přechodů mezi elektronově vibračními stavy složité molekuly s uvedením délky trvání jednotlivých procesů (doba trvání  $\tau$  [s]). Přechod elektronů ze singletního stavu  $S_0$  do excitovaných singletních stavů  $S_1$ ,  $S_2$  a tripletních stavů  $T_1$  po absorpci budící energie představují modré šipky. Zářivé přechody (luminiscenci) vyjadřují zelené a červené šipky. Přechody nezářivé (vnitřní konverze, mezisystémová konverze, vibrační relaxace) jsou zakresleny černou přerušovanou šipkou. [17]



Obr. 9 Forma Jablonského diagramu – schéma zářivých a nezářivých přechodů mezi elektronově vibračními stavy [17]

### 2.3 Princip fungování fotoluminiscenčních materiálů

Jak bylo zmíněno výše v textu, fotoluminiscence je luminiscencí vyvolanou elektromagnetickým zářením. Buzení (excitace) je prováděno ultrafialovým nebo viditelným světelným zářením. Pro laboratorní účely se k vybuzení fotoluminiscence často využívá laserový paprsek o vhodné vlnové délce. [15; 16]

Principem fotoluminiscence je absorpce energie ve formě elektromagnetického záření, kdy při excitaci luminiscenčního centra dochází k přechodu atomu na vyšší energetickou hladinu. Jeho následným navrácením na původní energetickou hladinu dochází k vyzařování částic světla (emise). Budící elektromagnetické záření ( $\lambda_{\text{bud}}$ ) s kratší vlnovou délkou a větší frekvencí vyvolává ve fotoluminiscenčním materiálu vznik luminiscenčního záření ( $\lambda_{\text{lum}}$ ) o delší nebo shodné vlnové délce a nižší frekvenci. Tato nerovnost  $\lambda_{\text{lum}} \geq \lambda_{\text{bud}}$  je nazývána **Stokesovým zákonem**. [16]

Zjednodušeně lze říci, že fotoluminiscence je děj, kdy osvit látky denním světlem či UV zářením vyvolává její následné záření. Schopnost vyzařovat pohlcenou energii ve formě viditelného světla se u fotoluminiscenčních materiálů liší. Pokud luminiscenční vyzařování zaniká téměř současně s přerušením budícího záření je označováno jako fluorescence, pokud trvá podstatně déle označuje se jako fosforescence. [16]

Fotoluminiscenční způsob excitace se využívá převážně u látek s malými či středními koncentracemi luminiscenčních center. Důvodem je skutečnost, že u látek s vysokou koncentrací luminiscenčních center dochází k excitaci pouze úzkých povrchových vrstev luminiscenční látky, jelikož mají horší pronikavost budícího záření. Fotoluminiscenční buzení u látek s vysokou koncentrací luminiscenčních center je tudíž neefektivní. K látkám s malou až střední koncentrací luminiscenčních center patří práškové luminofory či některá luminiscenční skla. Schopnost excitovat absorbovaným zářením a následně tuto excitační energii vyzářit opět ve formě elektromagnetického záření o stejné či větší vlnové délce má široká škála organických, ale i anorganických sloučenin. Typickým zástupcem organických látek jsou fluorescenční barviva jako např. chlorofyl (zeleň listová), hemoglobin (červené krevní barvivo), fluorescein, kumarin, rhodamin B, eosin Y. Z anorganických látek vykazující fotoluminiscenci lze uvést např. NaCl (chlorid sodný) nebo stříbrné halogenidy AgCl (chlorid stříbrný), AgBr (bromid stříbrný), u kterých se fotoluminiscence projevuje za nízkých teplot (pod  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) nebo také polovodiče jako např. ZnS (sulfid zinečnatý), ZnSe (selenid zinečnatý) a CdS (sulfid kademnatý). [15; 16]

## 2.4 Hodnocení (foto)luminiscenčních vlastností textilií

Měřením fotoluminiscenčních vlastností materiálů lze získat řadu důležitých informací o procesech, které probíhají v jejich mikrostrukturu. Tyto informace lze zjišťovat z naměřených absorpčních, excitačních a emisních spekter. Díky tomu, že

měření probíhá bezkontaktně, nedestruktivně a poměrně rychle, jedná se o vhodnou metodu ke studiu optických vlastností látek. Většinu vzorků lze měřit při atmosférickém tlaku, pokojové teplotě a na vzduchu. Pracovat lze se vzorky libovolného skupenství, velikosti a tvaru. [16; 19]

Parametry měření a klasifikace fotoluminiscenčních pigmentů a z nich vyrobených fotoluminiscenčních produktů standardizuje německá norma DIN 67510-1 [18]. Norma definuje metodiku, prostředky a další kritéria pro vybuzení luminiscence a pro hodnocení intenzity a vyhasínání jasu luminiscence v čase (doba rozpadu). Česká varianta této normy zatím není k dispozici.

Luminiscenci lze nejlépe měřit objektivně pomocí přístrojů určeným k hodnocení míry jasu. Intenzitu, dobu a rychlost rozpadu luminiscence lze také do jisté míry hodnotit subjektivně zrakem. Např. několik excitovaných vzorků lze umístit vedle sebe a srovnávat rychlost a čas jejich dosvitu nebo lze u vzorků průběh vyhasínání zaznamenávat pomocí fotoaparátu a následně vizuálně vyhodnotit.

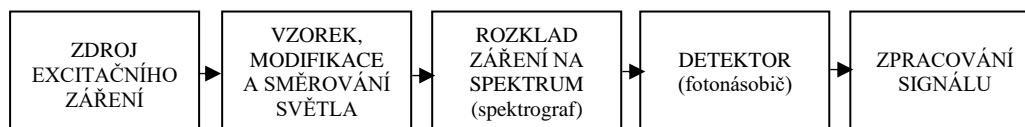
### 2.4.1 Testování v laboratorních podmínkách

V laboratorních podmínkách se pro zjišťování fyzikálních parametrů luminiscenčních látek využívají různá zařízení, která lze použít k [15]:

- vybuzení luminiscence;
- měření intenzity luminiscence;
- měření absorpčních, excitačních a emisních spekter;
- měření doznívání luminiscence.

Ve fotoluminiscenční spektroskopii obecně se k měřením používají **fotoluminiscenční aparatury**, které se obvykle skládají ze zdroje excitačního záření (k vybuzení luminiscence), dále pak ze soustavy optických čoček nebo zrcadel prostřednictvím nichž je fotoluminiscenční záření nasměrováno do monochromátoru (spektrografu), kde dochází za pomoci skleněného hranolu či podobného zařízení rozloženo do paprsků o jednotlivých vlnových délkách. Ty jsou na výstupu z monochromátoru prostřednictvím detektoru záření přeměněny na elektrický signál. Jako detektor se nejběžněji používá fotonásobič, který má schopnost detekovat i nejmenší možné množství záření (jeden foton). V konečné fázi je pak elektrický signál zpracován a zobrazen např. na obrazovce PC jako graf závislosti intenzity luminiscence na vlnové

délce budícího záření. Zjednodušené schéma možného uspořádání je graficky znázorněno viz Obr. 10. Uspořádání se může lišit podle konkrétně použitých zařízení a jejich rozmístěním. [16]



Obr. 10 Schéma obecného uspořádání fotoluminiscenční aparatury

### Zdroje excitačního záření k vybuzení luminiscence

S ohledem na téma této práce je následující text zaměřen na fotoluminiscenci. Buzení fotoluminiscence se provádí zdrojem ultrafialového nebo viditelného záření. Nejčastěji se k tomuto účelu používají rtuťové výbojky, halogenové výbojky, xenonové výbojky nebo lasery. V současnosti se také využívají LED diody a laserové diody. Pro excitaci je třeba zvolit vhodnou excitační vlnovou délku  $\lambda$  [nm] s ohledem na typ luminoforu. Vhodná vlnová délka lze zjistit pomocí monochromátoru. Typicky lasery vyzařují na jedné či několika málo diskrétních vlnových délkách a využívají se zejména tam, kde se měří za pevně daných podmínek. Oproti tomu LED a laserové diody emitují v části spektra v rozpětí několik desítek nm. U výbojek je spektrum vlnových délek nejširší a závisí na tlaku plynu ve výbojové trubici. Co se týká výkonu zdroje nejvýkonnější jsou lasery. Vysokotlaké výbojky také poskytují vysoký výkon, avšak ten je rozložen přes širokou spektrální oblast a pokud se vybere úzká oblast spektra monochromátorem, výkon se tím o několik řádů sníží. Jako kompromis se jeví použití kvalitní LED diody. [15; 19]

Norma DIN 67510-1 [18] uvádí, že vzorky by před samotným měřením měly být přivedeny k nasycení excitací luminoforu. Teprve následně lze porovnávat výsledky měření dosvitu s různými zdroji excitačního světla. Norma předepisuje: uložit vzorky před excitací ve tmě (počáteční jas luminiscence vzorku  $\leq 0,3 \text{ mcd/m}^2$ ); vybuzení pomocí Xe lampy (parametry dle DIN 5033-7: 1983-07) nebo LED lampy (cca 6500 K), případně zářivkou (cca 6500 K); excitační intenzita osvětlení  $1000 \pm 30 \text{ lx}$ ; doba excitace 5 min; zahájení měření do 10 s po skončení excitace; teplota při buzení a měření  $22 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Dvořák a spol. [15] upozorňují, že komplikací při fotoluminiscenčních měřeních může být odražené či rozptýlené ultrafialové záření, které může ovlivnit výsledky měření. Zabránit tomu lze užitím dvou zkřížených polarizačních filtrů. V případě, že je pro

excitaci fotoluminiscence třeba použít monochromatické záření doporučují použít optické filtry nebo monochromátor s dispersním prvkem (odrazová mřížka nebo křemenný hranol).

### **Měření intenzity luminiscence**

Měření intenzity luminiscence klade vysoké nároky jak na použité vybavení (citlivost a spolehlivost) tak na přesnost upořádání experimentu a tím velice komplikuje absolutní měření intenzity záření. Na výsledky měření má vliv zejména [15]:

- spektrální citlivost použitého detektoru;
- kvalita vzorku;
- geometrické uspořádání experimentu.

Je tedy zapotřebí všechny vzorky připravit stejnou metodikou a pro jejich měření zajistit neměnné podmínky geometrického uspořádání. Parametry geometrického uspořádání, možné metodiky měření a nároky na měřicí techniku konkretizuje norma DIN 67510-1 [18]. Pokud jsou porovnávány vzorky s různým průběhem emisního spektra je třeba provést korekce na citlivost použitého detektoru, jelikož detektor je na záření různých vlnových délek citlivý a výsledky experimentu by byly zkreslené. Vliv spektrální citlivosti detektoru se neprojeví v případě, že všechny měřené vzorky mají stejné emisní spektrum vlnových délek. [15]

### **Měření absorpčních, excitačních a emisních spekter**

Absorpční spektrum nám podává informaci o vnitřní struktuře luminoforu. Udává, jaké vlnové délky dopadajícího záření jsou v látce absorbovány. Zjišťují se stanovením poměru záření prošlého látkou vůči intenzitě záření na látku dopadajícího, v závislosti na vlnové délce dopadajícího záření. K měření absorpčních spekter luminoforů lze použít např. spektrofotometr. [15]

Excitační spektrum udává závislost intenzity luminiscence na vlnové délce excitačního záření a měří se při konstantní vlnové délce luminiscenčního záření. Z excitačního spektra lze zjistit, jakou vlnovou délku excitačního zdroje použít, aby vzorek vykazoval co největší intenzitu luminiscence. Pro měření se obvykle používá měřicí technika složená ze zdroje budícího záření, monochromátoru, polopropustné destičky (dělí dopadající světelný svazek na dva, jeden zachycuje fotonásobič, druhý budí luminiscenci u měřeného vzorku) a fotonásobiče (detektor). Využít lze také

spektrofotometr za předpokladu, že se pomocí filtru nebo dalšího monochromátoru oddělí budící signál od luminiscence. [15; 17]

Emisní spektrum vyjadřuje závislost intenzity luminiscence na vlnové délce emitovaného záření a měří se při konstantní vlnové délce excitačního záření. Z emisního spektra lze vyčíst, jak intenzivní luminiscenci je schopen u měřené látky vybudit použitý excitační zdroj a jakou barvu bude tato luminiscence mít. K měření se používají zařízení, která obvykle obsahují zdroj budícího záření, disperzní soustavu (hranolový nebo mřížkový monochromátor), fotonásobič, zesilovač a zapisovač. [15; 17]

### **Měření doznívání luminiscence**

Další charakteristikou luminiscence, kterou lze sledovat je její čas vyhasínání, tj. časový interval od začátku zářivého přechodu po jeho skončení. Doba vyhasínání je dána vnitřní dobou života excitovaného stavu, z něhož dochází k emisi. Ke sledování procesů doznívání luminiscence se nejběžněji využívá spektrofluorimetr, který umožňuje měřit mimo jiné i časově rozlišenou luminiscenci (fluorescence, fosforescence). Metody časově rozlišené spektroskopie lze rozdělit do dvou hlavních skupin (emisní metoda a metoda excitace a sondování). Podstatou emisní metody je sledování časového vývoje jasu luminiscenčního záření emitovaného excitovanou látkou. Do této skupiny patří právě měření doznívání fluorescence a doby života fosforescence. Metody excitace a sondování používají ke studiu změn probíhajících v látce excitační pulz a sondovací pulz. [15; 20]

Metodiky měření vyhasínání luminiscence a nároky na měřicí techniku konkretizuje norma DIN 67510-1 [18].

### **Příklady techniky použitelné ve fotoluminiscenční spektroskopii**

Přístroje na měření fluorescence [17]:

- **spektrofluorimetry** – měří fluorescenční spektra (emisní a excitační), umožňuje změřit střední signál celého vzorku, který je umístěn v kyvetě nebo v prohlubni mikrodestičky; jejich součástí obvykle bývá zdroj budícího záření, excitační monochromátor, kyvety, emisní monochromátor a detektor; k měření fluorescence pouze o určité vlnové délce a kvantitativní analýze se používají **fluorimetry**;
- **fluorescenční mikroskopy** – umožňují pozorovat fluorescenci objektů na mikroskopické úrovni;

- **fluorescenční skenery** – umožňují měřit fluorescenci dvojrozměrných makroskopických objektů;
- **průtokové cytometry** – měří fluorescenci velkého množství jednotlivých buněk nebo částic biologického původu a umožňuje rychlou analýzu fyzikálně-chemických vlastností (velikost, pH, enzymatická aktivita apod.).

Prvky, které zajišťují rozklad pozorovaného záření na spektrum jsou monochromátor a spektrograf. **Monochromátor** pomocí disperzního prvku (mřížka nebo hranol) rozkládá vstupující záření na spektrum. Skládá se ze vstupní štěrbinu a výstupní štěrbinu, která propouští jen úzké spektrální pásmo. Monochromátor lze využít i pro výběr vhodné vlnové délky použité k excitaci vzorku. Výběr požadované vlnové délky je dán natočením mřížky a šířka spektrálního pásu je dána šířkou výstupní štěrbinu. **Spektrograf** je monochromátor, kde je výstupní štěrbinu nahrazena mnohokanálovým detektorem (dříve s fotografickou deskou), který na výstupu vytváří spektrum v pevné poloze. [5; 15]

Dále se využívá **polychromátor**, který na výstupu vytváří více neproměnných vlnových délek. A pomocí **spektrometru** (monochromátor s detektorem na výstupu) lze určovat spektrální rozložení intenzity záření zdroje. [5]

K zachycení, případně k zesílení studovaného záření slouží **detektory**. V minulosti se pracovalo hlavně s fotografickými deskami, dnes se využívají výhradně mnohokanálové detektory nebo fotonásobiče. Pomocí **fotonásobiče** lze zesílit detekované optické záření. Spektrální rozsah citlivosti fotonásobiče se pohybuje v rozmezí cca 150 nm až 1100 nm. K detekci optického záření se využívá vnějšího fotoelektrického jevu a sekundární emise elektronů. [15; 19]

## 2.4.2 Metody hodnocení luminiscenčních vlastností textilií v laboratoři

Vědecké týmy se věnují výzkumu luminiscenčních vlastností z různých hledisek. Společným cílem těchto studií je napomoci vývoji materiálů se stabilními luminiscenčními vlastnostmi pro jejich lepší komerční využití.

Například studie Li a kol. [21] řeší **parametry vzoru fotoluminiscenční výšivky** zhotovené pomocí vyšívacího stroje podporovaného počítačem. Kombinovali jednu

polyesterovou a dvě luminiscenční nitě a různé typy stehů, rozteče stehů a superpozice stehů ve více vrstvách s cílem zjistit jaké parametry budou nejvhodnější k dosažení co největší intenzity a délky dosvitu výšivky z luminiscenčních nití. Intenzita dosvitu byla hodnocena pomocí fluorimetru PR-305. Před testováním byly vzorky umístěny na tmavé místo po dobu 24 hod. Měření probíhalo za následujících podmínek: pokojová teplota, intenzita osvětlení excitace 1000 lx, doba buzení 15 min. Celková doba měření byla 60 min, testovací interval 1 s a doba dosvitu byla počítána jako čas, ve kterém se jas světla po odstranění světelného zdroje sníží na 0,005 cd/m<sup>2</sup>. Výsledky měření ukázaly, že typ stehu, rozteč stehů a superpozice stehů mají velký vliv na dosvit. Velikost rozteče stehů je nepřímo úměrná intenzitě dosvitu. Výšivka s nejmenší roztečí stehů dosáhla nejlepších výsledků. Vzor vytvořený stehy superponovanými ve srovnání se stehy nepřekrývanými ve vrstvách vykazoval vyšší jas, delší dobu vyzařování světla a stabilnější luminiscenční vlastnosti.

Výzkum Yan a kol. [22] byl zaměřen na **jas luminiscenčních vláken a analýzu účinku emisních barev** luminiscenčních vláken na ekvivalentní jas v mezopickém vidění. Měření fotoluminiscence bylo prováděno spektrofluorimetrem typu F-4600 s 150 W xenonovou lampou jako zdrojem excitace při pokojové teplotě. Šířka emisní štěrbiny byla 5 nm s napětím 380 V a měřicí fotofyzikální parametry byly konzistentní pro všechny vzorky. Průběh dosvitu vzorků byl měřen pomocí fluorescenčního testeru PR-305 s excitačním osvětlením 1000 lx po dobu 15 min. Po 10 s od ukončení excitace bylo zahájeno měření po dobu 3600 s v intervalu 1 s. Výsledky ukazují, že emisní spektra světelných vláken vykazovala široké pásmo od 480 do 600 nm s vrcholem od 510 do 580 nm. Byl potvrzen účinek emisních barev bílých, žlutých, modrých a zelených světelných vláken na ekvivalentní jas. Jejich účinek se snížením osvětlení sítnice nejprve zvyšuje a poté klesá. Emisní barva červeného světelného vlákna má zjevné účinky na ekvivalentní jas a pro vyhodnocení skutečné viditelnosti by měl být plně brán v úvahu faktor emisní barvy. Svítivost vláken klesá s časem rozpadu v oblasti rychlého rozpadu a oblasti pomalého rozpadu. Počáteční jas rozpadu byl u jednotlivých vláken velmi odlišný.

Guo a kol. [23] testovali možné **účinky fyzikálních a chemických vlivů na stabilitu dosvitu** textilních luminiscenčních vláken. Simulovali působení dlouhodobého skladování, praní/žehlení, dlouhodobého vystavení vlivu světla a působení chemikálií na vlákna. Před každým testováním byly vzorky na 24 hod vloženy do světlo-nepropustného



boxu, aby bylo zajištěno úplné vyhasnutí luminiscence (počáteční jas luminiscence byla nižší než  $\pm 0,01 \text{ cd/m}^2$ ). Vyhasínání luminiscence bylo měřeno 2 s po zastavení excitace v pravidelných intervalech pomocí fluorimetru PR-305 (intenzita excitace 1 000 lx při teplotě okolí). Thermo-luminiscenční spektra byla měřena pomocí termoluminiscenčního fluorimetru FJ27A-I (zvýšení teploty o  $1 \text{ }^\circ\text{C/s}$  z pokojové teploty až na  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ; světelný zdroj: 25 W D65 studené světlo Philips s intenzitou excitace 1000 lx a doba excitace 15 min). Jejich analýza prokázala, že skladování po dobu 12 měsíců za konstantní teploty a vlhkosti, nepřetržité působení světla po dobu 5 hod nebo namáčení ve vodě po dobu 4 hod nemá významný vliv na mechanismus dosvitu testovaných vláken. Kontakt s kyselinou nebo zásadou po dobu 5-15 min vedl pouze k mírnému snížení intenzity dosvitu. Určité změny počáteční intenzity luminiscence a doby dosvitu byly pozorovány při vystavení teplotě.

Analýzou a srovnáváním luminiscenčních vlastností dvou druhů luminiscenčních vláken emitujících červené světlo se zabýval Pang a kol. [24]. V rámci své studie charakterizovali jejich morfologii a světelné vlastnosti. Za pomoci hlinitanu strontnatého  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  a vláknotvorného polymeru s disperzním činidlem jako matricí bylo vyrobeno vlákno A ( $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ /činidlo pro konverzi světla-PET) a vlákno B ( $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ -činidlo pro konverzi světla-PET). K charakterizaci a analýze složení vzorků byla použita skenovací elektronová mikroskopie (SEM, Hitachi, S-1510, Japonsko) spojená s energeticky disperzní rentgenovou analýzou (Vantage od Thermo Electron Corporation). Spektra fotoluminiscence a souřadnice CIE vzorků byly získány pomocí Spektrofluorimetru FS-5 (Edinburgh Instruments) s 450 W xenonovou obloukovou lampou (Xe 900) jako zdrojem světla. Pro záznam stálých luminiscenčních křivek rozpadu byl použit fluorimert PR-305 poté, co byly vzorky ozařovány pomocí 1000 lx zdroje umělého světla po dobu 15 min. Snímky luminiscenčních jevů reagujících na foto-podněty byly získány pomocí fotoaparátu Canon G15. Výsledky ukázaly, že emisní spektrum mělo široké pásmo od 450 do 590 nm s nejvyšší intenzitou buzení při 520 a 580 nm pro vlákno B a při 520 a 605 nm pro vlákno A. Jas a doba dosvitu vlákna B byly nižší než u vlákna A.

Chen a kol. [25] připravili luminiscenční vlákna  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  o různých hmotnostních koncentracích  $\text{SiO}_2$  RECC. V rámci experimentu **analyzovali snímky ze scanovací elektronové mikroskopie, emisní spektra fotoluminiscence, barevné souřadnice RGB, fotografie luminiscence a životnost luminiscence**. Uvádí, že

životnost luminiscence těchto vláken může být cca 3-5 hod v závislosti na koncentraci luminiscenční složky a mají tak potenciál využití v různých aplikacích (sportovní oděvy, obuv, výšivky apod.).

V rámci své práce Mejsnarová [26] použila **metodu postupného zakrývání fotoluminiscenčních vzorků**. Tato metoda zobrazuje intenzitu vyzařování luminiscence v jedné fotografii. Takto hodnotila vzorek nažehlovací fotoluminiscenční folie a dva vzorky s krycím stehem z fotoluminiscenční nitě. Excitace byla provedena UV lampou po dobu 5 min. Následně byl vzorek postupně po 2 cm zakrýván v minutovém intervalu. Po úplném zakrytí vzorku byly pořízeny fotografie (fotoaparát Canon EOS 100D), které byly následně vyhodnoceny vizuálně zrakem a pomocí programu Fiji, který pracuje na principu šedé škály. Došla k závěrům, že lze pozorovat **průběh** dosvitu luminiscence; lze odhadnout **dobu počáteční fáze** vyhasínání; lze mezi sebou **porovnávat** průběh dosvitu různých vzorků; poměr **poklesu intenzity v čase** lze vyjádřit pomocí hodnot z programu Fiji.

Salačová [27] ve své práci zaměřené na vliv barvy podkladu na luminiscenční efekt navrženého vzoru **měří jas, intenzitu a dobu vyhasínání záření luminiscenčního pigmentu s ohledem na barevnost podkladové textilie**. Měření realizovala v zatemněné místnosti. Excitace byla prováděna v kolorimetrické skříni GretagMacbeth SpectraLight® III pomocí denního D65 a UV světla po dobu 10 min. Bezprostředně po skončení excitace bylo zahájeno měření Spectroradiometrem PR-740 SpectraScan po dobu 15 min. Spektrální rozsah přístroje činí 380-780 nm. K přístroji byl připojen PC, na kterém byly následně výsledky zpracovány. Druhé kontrolní měření pak bylo provedeno za pomoci přístroje Spektrometr Avantes USB2000. K excitaci, která trvala 2 min byl použit přístroj Lumos 2004 (rozsah  $\lambda = 350-1100$  nm; halogenová zářivka + UV záření). Následně byl vzorek snímán po dobu 10 min pomocí integrátoru pro přímou a difúzní emisi ve tvaru koule o průměru 30 mm připojeného ke spektrometru. Vzorky už cca po 1 min měření vykazovaly konzistentní výsledky a do práce byly proto vloženy hodnoty pouze z prvních 50 s. Měřením pomocí Spektrometru Avantes USB2000 bylo prokázáno, že barva podkladu ovlivňuje relativní intenzitu emise. Nejlepší viditelnost byla zjištěna na zeleném podkladu (210 jednotek) a nejhůře na červeném podkladu (115 jednotek). Jako dlouhodobě nejjasnější byla vyhodnocena nit na černém podkladu (115 jednotek/po dobu 40 s). Výsledky těchto barev korespondují s daty zjištěnými u těchto barev pomocí Spectroradiometru PR-740 SpectraScan.

### **2.4.3 Testování v reálných podmínkách v terénu**

Převážná většina hodnocení fotoluminiscenčních vlastností textilií se v současnosti realizuje v laboratorních podmínkách. Jak bylo již zmiňováno všechny vzorky je třeba připravit stejnou metodikou a pro jejich měření zajistit neměnné podmínky po celou dobu experimentu. Během měření musí být co nejvíce vyloučen dopad cizího světla na povrch testovaného vzorku. Toho se v reálných podmínkách dosahuje velmi obtížně. Měření může být ovlivněno měsíčním zářením, světelným znečištěním nebo nějakým jiným světelným zdrojem.

### **2.4.4 Metody hodnocení luminiscenčních vlastností textilií v terénu**

Experiment k hodnocení luminiscenčních vlastností v terénu navrhla a v reálných podmínkách provedla Mejsnarová [26]. V rámci své práce zabývající se schopností vyhasínání luminiscence fotoluminiscenčních šicích nití mimo jiné také porovnávala oděvy s různými a rozdílně aplikovanými luminiscenčními prvky. Jednalo se tři varianty trik – triko A (luminiscenční prvek byl krycí steh z fotoluminiscenční nitě), triko B (luminiscenční prvek byl fotoluminiscenční nažehlovací folie) a triko C (luminiscenční prvek byl kombinace fotoluminiscenční nitě + folie). Pro vizuální porovnání, zda by navržená trika mohla splňovat bezpečnostní třídu 2 byla doplňkově měřena viditelnost také na bundě bezpečnostní třídy 2 s fotoluminiscenční páskou. Testování probíhalo na silnici 3. třídy ve tmě s poznámkou, že měření mohlo být ovlivněno měsícem v úplňku. Byla hodnocena viditelnost fotoluminiscenčních prvků aplikovaných na oděv na vzdálenost 25, 50, 100 a 200 m. Excitace byla zajištěna prostřednictvím dvou nabíjecích svítlen EMOS LED P4526 (světelný výkon 300 lm) s délkou osvětlení 3 min. Pomocí fotoaparátu (Canon EOS 80D) pak zachytila figuranta v oděvu postupně v čase 1, 3 a 5 min od přerušení excitace. Hodnocení fotografických snímků bylo provedeno subjektivně. Jako nejlépe viditelné bylo klasifikováno triko B s fotoluminiscenční fólií. Jeho viditelnost byla srovnatelná s viditelností doplňkového oděvu (bunda). Nejhůře viditelné bylo triko A. Autorka neuvádí, zda po vyfotografování figuranta na danou vzdálenost pokračovala s dalším osvětlením nebo zda nechávala oděv úplně vyhasnout (např. ve tmě po dobu 24 hod) a až následně fotografovala na další vzdálenost.

Do jisté míry se pro realizaci experimentu v reálném prostředí lze inspirovat ze studií, které v terénu testují viditelnost bezpečnostních prvků z retroreflexních materiálů.

## 2.5 Dostupnost luminiscenčních materiálů na trhu

Luminiscenční materiály obecně mají díky své světelné energii škálu možného uplatnění, např. ve světelných zdrojích, ve výpočetní a zobrazovací technice, v optické elektronice, v lékařské, chemické a biologické oblasti. Praktické uplatnění nalézá luminescence také v textilním a oděvní průmyslu, kde se nejběžněji využívají fotoluminiscenční materiály. Nalézají své praktické využití v oděvních materiálech (smarttextil, ochranné oděvy) nebo také na dekoračních materiálech pro estetické účely.

Právě fotoluminiscenční materiály mají potenciál k využití pro oděvy nejen pro chodce, ale např. i pro cyklisty a další účastníky silničního provozu, při sportu (turistika, běh, cyklistika za tmy a snížené viditelnosti). Uplatnění mohou nalézt také lze na oděvech pro profese, kde dochází k přechodu osob z osvětleného provozu do provozu se sníženou viditelností jako např. sklady, kina, tunely, hornické šachty, řidiči vystupující z automobilu na vozovku v odlehlých oblastech apod.

V současné době jsou fotoluminiscenční materiály aplikovatelné v textilním a oděvním průmyslu k dispozici v různých formách. Jako plošné a délkové textilie nebo jako výrobky spadající do textilní drobné přípravy. Průzkum trhu ukázal, že poměrně velké zastoupení mezi výrobci fotoluminiscenčních materiálů je v Asii.

### 2.5.1 Fotoluminiscenční nitě a příze

Na trhu je k dispozici poměrně široká škála fotoluminiscenčních přízí, ze kterých lze vyrobit plošnou textilií i nití určených zejména k dekorativním účelům.

Na českém trhu je dostupná **fotoluminiscenční nit Isa Texlight** [28] od společnosti AMANN group. Isa Texlight určená pro vyšívání, která je vyfotografovaná na Obr. 11. Nit o jemnosti 30 tex se skládá z 50 % polybutylentereftalatu a 50 % polypropylenu. Je certifikována podle STANDARD 100 společností OEKO-TEX®. Doporučený účel použití: vyšívací nit pro speciální efekty, použití např. na dětských pyžamech nebo na oděvy pro bary a noční kluby, fotoluminiscenční prvky na pracovních oděvech, doplňky a bytový textil.



Obr. 11 Vyšivací nit Isa Texlight [28]

Český výrobce LANEX a.s. se zaměřuje na vývoj a výrobu lan a vláken. V nabídce mají luminiscenční polypropylenové multifilamentní vlákno s obchodním názvem MULTITEX [29]. Vlákno se vyrábí v jemnosti 466 dtex-3300 dtex. Jedná se o vlákno primárně určené k výrobě nití a šňůr, lan, popruhů, sítí a filtračních tkanin. Je odolné vůči povětrnostním vlivům, kyselinám, alkáliím a rozpouštědlům. Zdravotní nezávadnost je deklarována certifikací STANDARD 100 společností OEKO-TEX®.



Obr. 12 Fotoluminiscenční vlákno MULTITEX [29]

Společnost Coats [30] sídlící ve Velké Británii vyrábí polyesterovou **přízi s luminiscenčním efektem s názvem CoatsKnit™ Lucence**. Fotoluminiscenční pigmenty se k polymeru polyesteru přimíchávají během procesu zvláknování. Příze je certifikovaná STANDARD 100 společností OEKO-TEX® (třída 1). Výrobce uvádí jako hlavní možnost využití na výrobu svrchní části obuvi viz Obr. 13, pro oděvní výrobky a příslušenství.

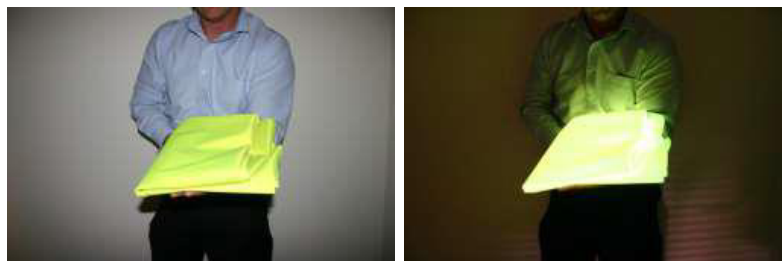


Obr. 13 Ukázka využití CoatsKnit™ Lucence na výrobu svrchní části sportovní obuvi [30]

## 2.5.2 Fotoluminiscenční plošné textilie

Plošné textilie s fotoluminiscenčními vlastnostmi mohou být vyráběny jako tkanina, pletenina i netkaná textilie. Fotoluminiscenční pigmenty se do textilie zavádějí buď dovnitř vlákna, ze kterého je plošná textilie vyrobena a to difúzí (např. barvením) nebo se látka přidává během procesu zvlákňování případně fixováním na povrchu vlákna. Nebo se aplikuje na plošnou textilií jejím obarvením nebo tiskem [31] odst. 1.4.1.

Australská společnost The Specialty Group [32] je výrobce technických a průmyslových textilií. Vyrábí **potahovanou fotoluminiscenční tkaninu Energlo s nepromokavou úpravou**. Textilie je vyráběná na zakázku a je k dispozici ve 12 různých typech tkanin. Technologie Energlo získala v roce 2008 certifikaci OEKO-TEX® třídy 3.



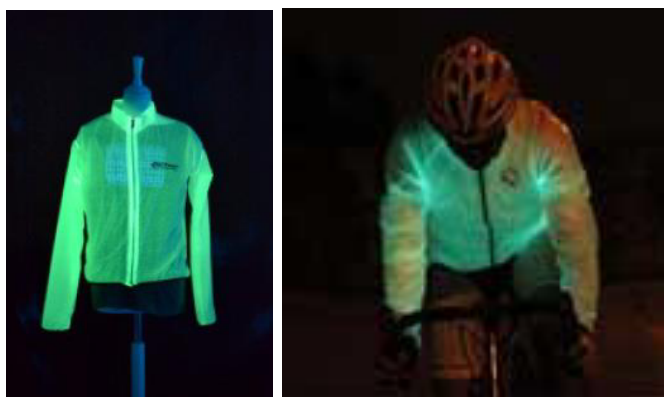
Obr. 14 Fotoluminiscenční textilie Energlo [32]

Čínská společnost Hangzhou Chinastars Reflective Material Co., Ltd. [33] se specializuje na výrobu reflexních tkanin a bezpečnostních vest v Číně. Tato společnost dodává na trh také **textilií, která má reflexní a zároveň i fotoluminiscenční vlastnosti.**



Obr. 15 Textilie kombinující reflexní a fotoluminiscenční vlastnosti [33]

Italské společnosti Lucedentro Srl [34] a Akkotex Srl ve spolupráci vyrobili **fotoluminiscenční tkaninu**, ze které byla vyrobena cyklistická bunda. Tato bunda získala několik ocenění za inovativní oděv s fotoluminiscenčními pigmenty. Aplikaci fotoluminiscence je možné využít na širokou škálu outdoorového sportovního oblečení, horského oblečení, plachtění a volnočasového oblečení.



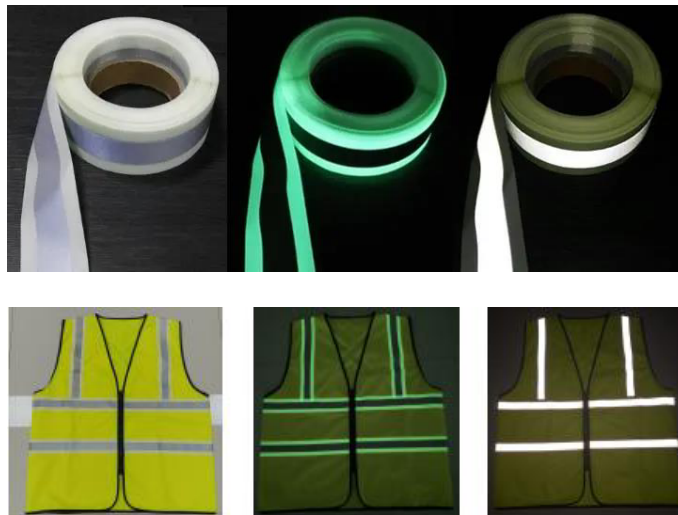
Obr. 16 Ukázka využití fotoluminiscenční textilie na cyklistickou bundu [34]

Videoukázka použití bundy v reálných podmínkách je k nahlédnutí zde: <https://www.youtube.com/watch?v=UJCCKyYbp2uM>

### 2.5.3 Textilní drobná příprava

Na trhu jsou také k dispozici textilní fotoluminiscenční prvky určené k aplikaci na oděvní nebo textilní výrobek, které lze zařadit do textilní drobné přípravy. Jedná se např. o textilní pásy, paspule, či nažehlovací fólie.

Čínská společnost Zhejiang Minhui Luminous Technology Co., Ltd. [35] se zaměřuje na výzkum a vývoj, výrobu a prodej fotoluminiscenčních produktů s dlouhým dosvitem. Kromě plošné textilie je jedním z textilních výrobků v jejich nabídce také **textilní páska kombinující retroreflexní a fotoluminiscenční prvek**. Jedná se o textilní nepružnou pásku vhodnou k našití na oděv. Na Obr. 17 je vyfotografovaná páska a její aplikace na ochrannou vestu za denního světla, za tmy při luminiscenci a za tmy při odrazu světla.



**Obr. 17 Fotoluminiscenční reflexní páska za denního světla, při luminiscenci a retroreflexi [35]**

Páska se dodává v šíři 5 cm v 50 m rolích. Další příklad, jak lze pásku využít na oděvu a zvýšit tak viditelnost je patrné z Obr. 18.



**Obr. 18 Ukázka použití fotoluminiscenční reflexní pásky na oděvu [35]**



Zhejiang Minhui Luminous Technology Co., Ltd. [35] má ve svém sortimentu ještě jiný **typ fotoluminiscenční reflexní pásky (mřížka)**, který je uveden na Obr. 19. Tato páska se vyrábí ve dvou šířkách 2,5-5 cm v 50 rolích. V nabídce jsou různé varianty geometrických tvarů.



**Obr. 19 Fotoluminiscenční reflexní mřížková páska [36]**

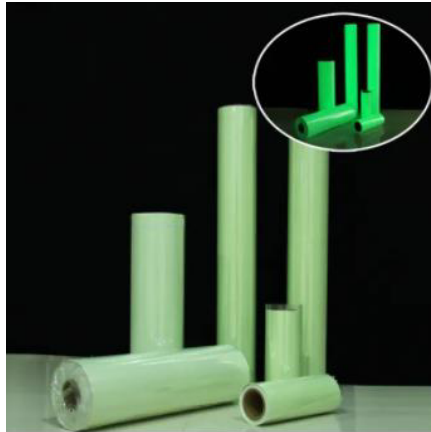
Čínská společnost Dongguan Cheng Wei Reflective Material Co., Ltd. nabízí prostřednictvím webových stránek Alibaba.com [37] **fotoluminiscenční paspulku**, která je vhodná ke vsutí do členících švů oděvu nebo např. tašek a batohů. Paspulka uvedená na Obr. 20 se dodává pouze velkoobchodně v šíři 1 cm a v délce 1000 m. Textilie má složení 30 % bavlna + 70 % polyester.



**Obr. 20 Fotoluminiscenční paspulka [37]**

Mezi fotoluminiscenční materiály aplikovatelné na oděv lze zařadit i **fotoluminiscenční zažehlovací folii**. Ve své nabídce ji má také již uvedená společnost Zhejiang Minhui Luminous Technology Co., Ltd. [32]. Folie viz Obr. 21 je vyrobena z vysoce kvalitního luminiscenčního pigmentu hlinitanu stroncia. Vyznačuje se dobrou odolností proti tření, ručnímu praní, praní v pračce a je odolná i vůči vysokým teplotám.

Je vhodná k nažehlení na oděvy a oděvní výrobky spíše z méně pružných textilií. Výhodné je, že se dodává v rolích a lze ji tak nařezat na míru dle potřeby.



Obr. 21 Fotoluminiscenční nažehlovací folie [38]

Oba dva typy výše uvedené fotoluminiscenční reflexní pásky i tento typ nažehlovací folie lze také objednat přes český e-shop <https://eshop.photoluminescenceurope.cz>

#### 2.5.4 Hotové oděvy

Na trhu lze také zakoupit již hotové oděvy obsahující fotoluminiscenční prvky. Jako příklad lze uvést certifikovanou **pracovní bundu a vestu Portwest Glowtex™ Triple Technology** uvedenou na Obr. 22. Tyto oděvy obsahují fluorescenční textilií pro dokonalou viditelnost za denního světla, retroreflexní pásku, která při osvětlení světlometů odráží světlo zpět ke zdroji, a fosforescenční pásku Glowtex™, která svítí ve tmě. [9; 39]



Obr. 22 Ukázka pracovního oděvu s fosforescenční páskou Glowtex™ [9; 39]

## Shrnutí rešeršní části

Rešeršní část objasňuje problematiku viditelnosti chodce za tmy a snížené viditelnosti. Dobrá viditelnost účastníků silničního provozu je základem prevence dopravních nehod. V souvislosti s tím byl vypracován přehled bezpečnostních prvků momentálně dostupných a využívaných pro zvýšení viditelnosti. Jelikož nejsou normy upravující aplikaci luminiscenčních materiálů pro zvýšení viditelnosti chodce v silničním provozu byla provedena rešerše současného stavu v oblasti problematiky viditelnosti chodce obecně. Aktuálně využívané bezpečnostní prvky lze rozdělit do tří základních skupin – aktivní, pasivní a hybridní. Zákona [1] ukládá použití reflexních prvků, není ale definováno, kde mají být prvky umístěny a jak velkou plochu oděvu mají pokrýt. Umístění a velikost plochy bezpečnostních prvků ke zvýšení viditelnosti upravují normy [10; 11; 12].

Dále je zde vysvětlen pojem luminiscence a popis druhů luminiscence. Je zde blíže specifikován princip fungování fotoluminiscence. Jsou zde uvedeny měřicí metody a používaná technika, které se využívají k hodnocení luminiscenčních vlastností. Parametry měření a klasifikace fotoluminiscenčních pigmentů a z nich vyrobených fotoluminiscenčních produktů standardizuje německá norma DIN 67510-1 [18]. Norma definuje metodiku, prostředky a další kritéria pro vybuzení luminiscence a pro hodnocení intenzity a vyhasínání jasu luminiscence v čase. Česká varianta této normy zatím není k dispozici. Vzorky je k testování nutné připravit všechny stejnou metodikou a pro jejich měření je nezbytné zajistit neměnné podmínky geometrického uspořádání. Manipulace se vzorky a samotné měření musí probíhat ve tmě. Toto je obtížné v reálných podmínkách zrealizovat, a proto se měření provádí primárně v laboratorních podmínkách. K měření luminiscenčních vlastností se využívá převážně speciální přístrojová technika, která je cenově nákladná (v řádech statisíc korun). Fotoaparát je využíván víceméně jen pro obrazový záznam. Výzkum je aktuálně zaměřen převážně na testování a vývoj fotoluminiscenčních vláken a přízí.

Také je zde zpracován přehled fotoluminiscenčních textilních materiálů v současnosti dostupných na trhu. Nabídka fotoluminiscenčních materiálů je soustředěna především v Asii. Je možné zakoupit převážně fotoluminiscenční příze a nitě, drobnou textilní přípravu ve formě pásek, paspulí a nažehlovací folie. Koupit lze také tkaniny a hotové oděvní výrobky. V nabídce zcela chybí pleteniny z fotoluminiscenční příze.

## EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části bylo zjistit fotoluminiscenční vlastnosti vzorků pletenin vytvořených z několika typů fotoluminiscenční příze o různých jemnostech a barvách. Záměrem bylo vyhodnotit vliv parametrů pleteniny na intenzitu fotoluminiscence a schopnost jejího vyhasínání. Za tímto účelem byl navržen experiment v laboratorních podmínkách s využitím spectroradiometru SpectraScan PR740.

Jako možná alternativa, která by mohla měření pomocí spectroradiometru nahradit byla navržena metoda testování luminiscenčních vlastností textilií pomocí digitálního fotoaparátu. Naměřená data jsou pak klasifikována s úmyslem zjistit, zda jsou výsledky srovnatelné a zda je přístrojovou metodu možné nahradit fotografickou.

Dále byla hodnocena viditelnost vzorků s ohledem na použité množství fotoluminiscenčního materiálu. V rámci tohoto experimentu byly navrženy a hodnoceny různé varianty pruhovaných vzorů. Cílem bylo zjistit optimální kombinaci a velikost plochy fotoluminiscenčního materiálu.

Experimentální část je rozdělena na tyto stěžejní části:

- měření fotoluminiscenčních vlastností textilií pomocí spectroradiometru;
- zjišťování vlivu delší doby osvětlení na intenzitu a vyhasínání luminiscence;
- návrh metody měření fotoluminiscenčních vlastností pomocí fotoaparátu;
- zhodnocení výsledků spectroradiometr/fotoaparát
- testování viditelnosti pruhovaného vzoru s ohledem na poměr použitého luminiscenčního materiálu;
- diskuze výsledků, doporučení pro další pokračování na toto téma.

Zjištěné výsledky by bylo vhodné zohlednit při návrhu luminiscenčního oděvu způsobitelnému ke zvýšení viditelnosti chodce v silničním provozu.

### 3 Charakteristika použitých materiálů

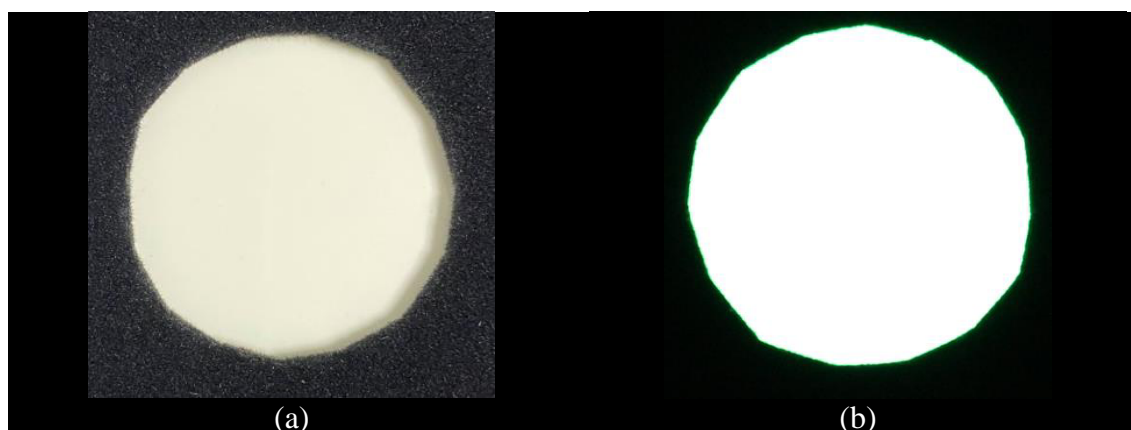
Pro realizaci experimentální části byly použity vzorky pleteniny nově vyvinuté na Katedře oděvnictví Technické univerzity v Liberci vyrobené z fotoluminiscenční příze. Jako referenční materiál pro porovnání byla použita fotoluminiscenční nažehlovací folie.

#### 3.1 Charakteristika fotoluminiscenční nažehlovací folie

Fotoluminiscenční folie byla zakoupena od společnosti Photoluminiscent Europe s.r.o. Jedná se o vinylovou fotoluminiscenční nažehlovací folii obsahující fotoluminiscenční pigment na bázi kovů alkalických zemin hlinitanu stroncia. Tato folie je vhodná k aplikaci na mírně pružné textilie. Prodejce uvádí [32] vlastnosti viz Tabulka 1.

Tabulka 1 Vlastnosti nažehlovací fotoluminiscenční folie (vzorek F1)

Označení vzorku	Obchodní název/kód výrobku	Tloušťka [mm]	Rozměr [m]	Intenzita záření [mcd/m <sup>2</sup> ]		Barva ve dne	Barva vyzařovaná
				po 10 min od nasvícení	po 60 min od nasvícení		
F1	Nažehlovací folie/PLE-TF-B150	0,2	0,5*10 0,5*25 0,5*50	>150	>20	světle žlutá	žlutozelená


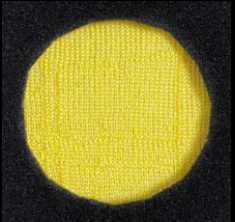
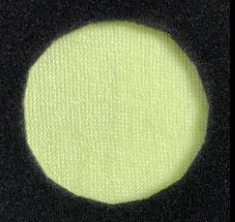
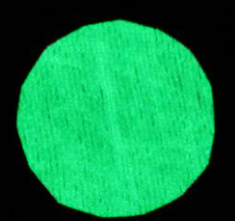
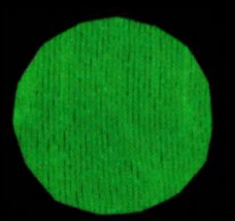
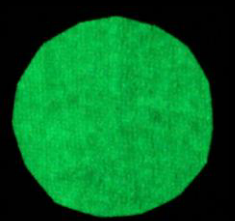


Obr. 23 fotoluminiscenční folie (a) před a (b) 2 min po nasvícení



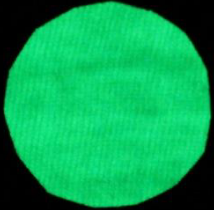
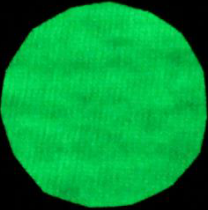
### 3.2 Charakteristika fotoluminiscenčních textilií

Vzorky pletenin byly získány od vedoucí práce Ing. Kataríny Zelové, Ph.D. v rámci projektu VidTex. Pleteniny jsou vyrobené z fotoluminiscenčních přízí ze 100% polyesteru různé jemnosti a barvy. Příze obsahují fotoluminiscenční pigment na bázi kovů alkalických zemin hlinitanu stroncia. Jejich podrobná specifikace je uvedena viz Tabulka 2 až 5.


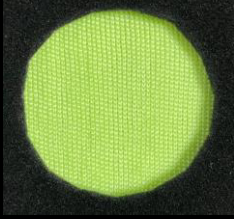
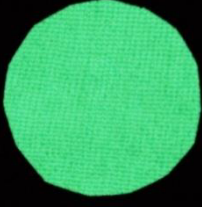
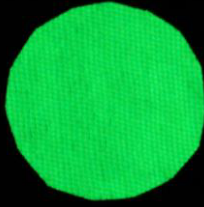
**Tabulka 2** Charakteristika testovaných pletenin (vzorek M1, M2, M3)

Označení vzorku	M1	M2	M3
Kód výrobce	1A JH-X-01	1B JH-X-09	1C JH-X-06
Struktura plošné textilie	Jednolícní zátažná pletenina	Jednolícní zátažná pletenina	Jednolícní zátažná pletenina
Typ použité délkové textilie	Multifil	Multifil	Multifil
Materiálové složení	100 % polyester	100 % polyester	100 % polyester
Jemnost použité délkové textilie [dtex]	150	150	150
Barva	bílá	žlutá	zelená
Plošná hmotnost textilie [g.m <sup>-2</sup> ]	163	169	181
Tloušťka textilie [mm]	1,01	1,15	1,12
Hustota sloupků /10 cm	98	97	104
Hustota řádků /10 cm	120	120	120
Fotografie před nasvícením			
Fotografie 2 min po nasvícení			

Tabulka 3 Charakteristika testovaných pletenin (vzorek M4, M5)

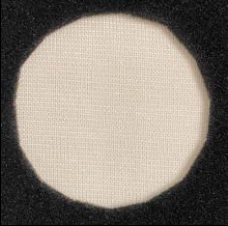
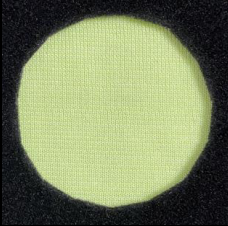
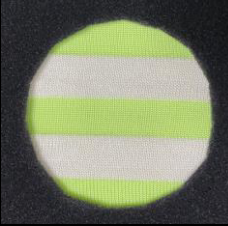
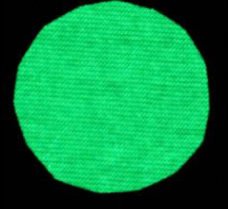
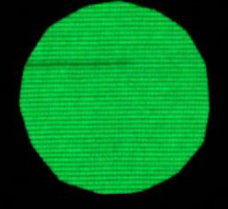

Označení vzorku	M4	M5
Kód výrobce	3A JH-X-01	3B JH-X-09
Struktura plošné textilie	Jednolícní zátažná pletenina	Jednolícní zátažná pletenina
Typ použité délkové textilie	Staplová příze	Staplová příze
Materiálové složení	100 % polyester	100 % polyester
Jemnost použité délkové textilie [dtex]	210	210
Barva	bílá	zelená
Plošná hmotnost textilie [g.m <sup>-2</sup> ]	251	226
Tloušťka textilie [mm]	1,32	1,27
Hustota sloupků /10 cm	92	92
Hustota řádků /10 cm	120	120
Fotografie před nasvícením		
Fotografie 2 min po nasvícení		

**Tabulka 4 Charakteristika testovaných pletenin (vzorek M6, M7)**

Označení vzorku	M6	M7
Kód výrobce	4A JH-X-01	4B JH-X-09
Struktura plošné textilie	Jednolícní zátažná pletenina	Jednolícní zátažná pletenina
Typ použité délkové textilie	Nízkoroztažný multifil	Nízkoroztažný multifil
Materiálové složení	100 % polyester	100 % polyester
Jemnost použité délkové textilie [dtex]	300	300
Barva	bílá	zelená
Plošná hmotnost textilie [g.m <sup>-2</sup> ]	221	239
Tloušťka textilie [mm]	1,05	1,14
Hustota sloupků /10 cm	90	90
Hustota řádků /10 cm	100	100
Fotografie před nasvícením		
Fotografie 2 min po nasvícení		



Tabulka 5 Charakteristika testovaných pletenin (vzorek M8, M9, M10)

Označení vzorku	M8	M9	M10
Kód výrobce	1A JH-X-01	1C JH-X-06	1C JH-X-06
Struktura plošné textilie	Jednolícní zátažná pletenina krytá řádek 1/1	Jednolícní zátažná pletenina krytá řádek 1/1	Jednolícní zátažná pletenina krytá 1cm/1cm
Typ použité délkové textilie	MicroModal + VS Crabyon	MicroModal + VS Crabyon	MicroModal + VS Crabyon
Materiálové složení	100 % polyester	100 % polyester	100 % polyester
Jemnost použité délkové textilie [dtex]	167	167	167
Barva	bílá	zelená	bílá/zelená (luminisc. zelená)
Plošná hmotnost textilie [g.m <sup>-2</sup> ]	246	213	236
Tloušťka textilie [mm]	0,68	0,60	0,65
Hustota sloupků /10 cm	130	130	130
Hustota řádků /10 cm	220	220	220
Fotografie před nasvícením			
Fotografie 2 min po nasvícení			

## 4 Měření fotoluminiscence

Jedním z cílů experimentu bylo u vzorků zhodnotit intenzitu vyzařování a průběh vyhasínání luminiscence. Měření bylo provedeno v laboratorních podmínkách pomocí spectroradiometru. Následně byl ještě zjišťován vliv delší doby osvětlení na intenzitu a vyhasínání luminiscence.

### 4.1 Měření č. 1 – měření fotoluminiscence pomocí spectroradiometru

Cílem tohoto měření bylo zhodnotit intenzitu fotoluminiscenčního záření a průběh jeho vyhasínání. Testování bylo realizováno ve spolupráci s prof. Ing. Michalem Vikem, Ph.D. v laboratoři KMI/LCAM FT Technické univerzity v Liberci. Zvolené parametry měření vycházejí z normy DIN 67510-1.

#### 4.1.1 Podmínky a charakteristika měření

##### Podstata zkoušky

Podstatou zkoušky je měření jasů fotoluminiscence jako funkce času.

##### Sledované veličiny

L jas [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]: fyzikální veličina používaná ve fotometrii kvantitativně popisující vizuální vjem světla. Je definována jako měrná veličina svítivosti.

##### Zkušební zařízení a pomůcky

Měření bylo provedeno pomocí Spectroradiometru SpectraScan PR740 + objektiv MS-75. K osvětlení vzorků bylo použito normované světlo D50 s chromatičností 5000 K. Přístroj byl připojen k PC, kde byla naměřená data automaticky ukládána a zpracována pomocí SW SpectraWin. Celá měřicí sestava je znázorněna na Obr. 24.



**Obr. 24** Sestava zařízení pro měření luminiscence



**Obr. 25** Uchycení vzorku

### **Zkušební vzorky**

Měření bylo provedeno na vzorcích F1 a M1-M10. Před zahájením zkoušky byly všechny vzorky klimatizovány ve tmě po dobu minimálně 24 hodin. Na každém materiálu byla provedena 3 měření v různých místech vždy po směru osy sloupků. Části vzorků, na kterých v daném okamžiku neprobíhalo měření byly zakryty černou neprůsvitnou deskou tak, aby nedošlo k osvětlení.

### **Podmínky měření**

Manipulace se vzorky a samotné měření probíhalo při pokojové teplotě v místnosti uzpůsobené pro práci se světlocitlivými materiály. Místnost byla zatemněná venkovními roletami bez použití osvětlení. Stejná geometrie měření pro všechny vzorky byla zajištěna uchycením podkladové textilie a krycí desky k pracovní ploše pomocí lepicí pásky (Obr. 25).

#### Nastavené parametry měření:

- Plocha textilie snímaná senzorem: kruhový otvor o průměru 35 mm
- Spektrální rozsah přístroje: 380-780 nm
- Úhel zorného pole: 2°
- Světlo: D50 s chromatičností 5000 K
- Doba osvětlení: 5 min
- Zahájení měření: ihned po skončení excitace (do 10 s)
- Interval snímání jasu: 60 s
- Počet provedených záznamů měření: 20
- Počet měření na jednom vzorku: 3

#### **4.1.2 Postup měření**

Vzorek pleteniny byl beznapětově rozložen na černou podkladovou textilií a uchycen krycí destičkou. Pracovní deska byla zasunuta dovnitř boxu a tím došlo k jeho uzavření. Na definovanou dobu bylo zapnuto osvětlení. Po uplynutí doby excitace bylo osvětlení vypnuto. Ve stejné chvíli byl v PC spuštěn program a tím bylo zahájeno měření SpectraScanem. Průběh vyhasínání byl snímán v pravidelných intervalech a byl postupně zobrazován na monitoru. Po ukončení měření byly výsledky uloženy. Následně byla data zpracována v programu Microsoft Excel. Celková doba měření byla nastavena na 20 minut. Tato doba byla stanovena experimentálně na základě provedeného zkušebního měření. Původní délka měření byla nastavena na 60 minut, avšak po 20 minutách bylo zjištěno, že přístroj má u nízkých jasů problém se zaostřováním. Doba expozice se neustále prodlužovala a následně nekorespondoval čas záznamu s reálným časem.

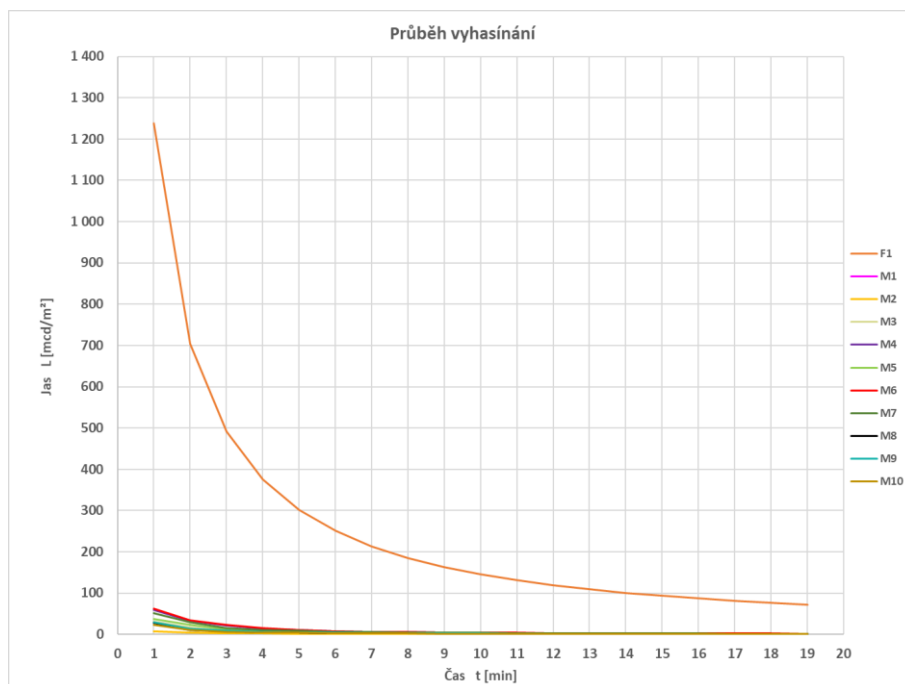
#### **4.1.3 Výsledky měření a vyhodnocení**

Měření luminiscence bylo provedeno na každém vzorku 3krát. Získané hodnoty byly statisticky zpracovány v Microsoft Excel. Naměřená data a jejich statistické zpracování jsou k dispozici v samostatné příloze této práce (Příloha C). Průměrné hodnoty jasu luminiscence  $\bar{L}$  [mcd/m<sup>2</sup>] jsou pak uvedeny viz Tabulka 6.

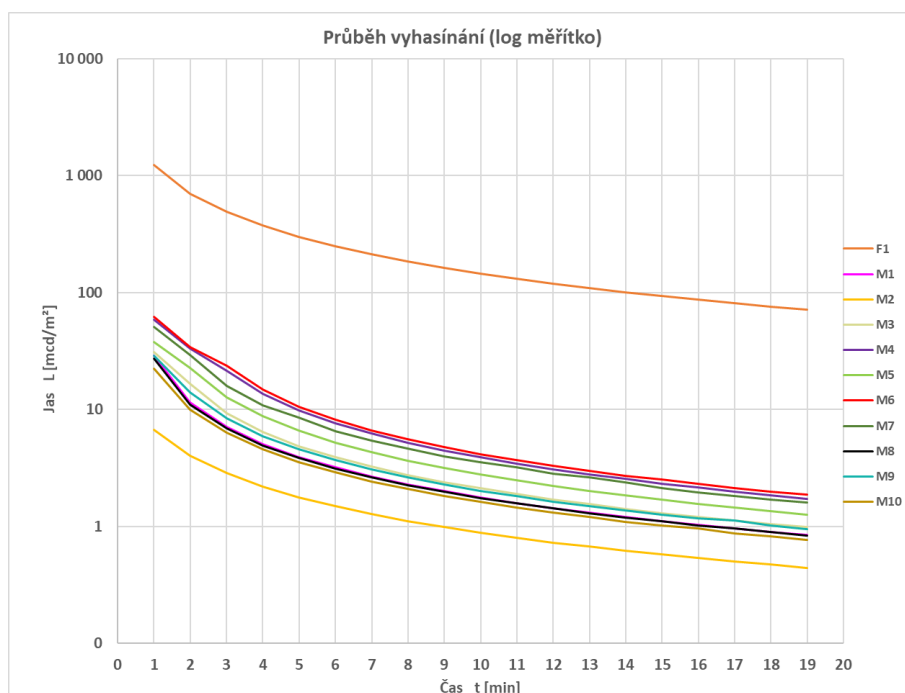
**Tabulka 6 Průměrné hodnoty jasu  $\bar{L}$  [ $\text{mcd}/\text{m}^2$ ]**

Čas t [min]	Jas $\bar{L}$ [ $\text{mcd}/\text{m}^2$ ]										
	F1	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
0	4846,33	175,47	21,35	144,71	250,97	133,07	328,97	220,07	151,27	118,40	80,59
1	1238,00	28,74	6,69	31,05	58,77	37,74	62,24	51,03	27,48	28,98	22,48
2	703,73	11,49	4,03	16,58	33,18	22,68	34,34	29,23	11,11	14,08	9,97
3	492,17	7,10	2,85	9,34	21,44	12,76	23,81	16,04	6,90	8,41	6,31
4	375,63	5,09	2,21	6,44	13,61	8,75	14,76	10,96	4,96	5,95	4,58
5	301,00	3,94	1,78	4,88	9,91	6,59	10,59	8,60	3,85	4,56	3,56
6	250,33	3,20	1,50	3,91	7,67	5,24	8,20	6,56	3,14	3,69	2,90
7	213,70	2,68	1,28	3,25	6,23	4,33	6,65	5,43	2,64	3,08	2,44
8	185,80	2,30	1,12	2,77	5,23	3,68	5,58	4,65	2,27	2,64	2,09
9	163,80	2,01	0,99	2,40	4,48	3,18	4,79	4,00	1,98	2,30	1,84
10	146,03	1,78	0,89	2,12	3,91	2,80	4,17	3,56	1,76	2,03	1,63
11	131,67	1,59	0,80	1,91	3,46	2,49	3,70	3,22	1,58	1,82	1,46
12	119,67	1,44	0,73	1,71	3,10	2,24	3,31	2,84	1,43	1,64	1,32
13	109,60	1,32	0,67	1,55	2,80	2,03	2,99	2,62	1,30	1,49	1,20
14	100,90	1,21	0,62	1,42	2,55	1,85	2,73	2,40	1,20	1,37	1,10
15	93,45	1,12	0,58	1,31	2,33	1,70	2,51	2,13	1,11	1,26	1,02
16	86,92	1,04	0,54	1,21	2,15	1,57	2,31	1,97	1,03	1,17	0,96
17	81,18	0,96	0,50	1,13	1,99	1,46	2,14	1,83	0,96	1,12	0,88
18	76,10	0,90	0,47	1,05	1,85	1,36	2,00	1,71	0,90	1,02	0,83
19	71,56	0,85	0,44	0,99	1,73	1,27	1,87	1,60	0,84	0,95	0,77

Z Tabulka 6 je na první pohled patrné, že hodnoty u nažehlovací pásy (F1) jsou o jeden až dva řády vyšší než u vzorků pletenin. Na základě těchto hodnot byl vytvořený graf, který průběh dosvitu v čase u referenční nažehlovací pásy (F1) a všech vzorků pletenin (M1 až M10) znázorňuje graficky. V grafech na Obr. 26 a Obr. 27 lze pozorovat, že referenční nažehlovací páska (F1) dosahuje po 5minutovém nasvícení v čase 1 minuta od ukončení excitace cca 20–185krát vyšší intenzity jasu než vzorky testovaných pletenin (M1–M10).



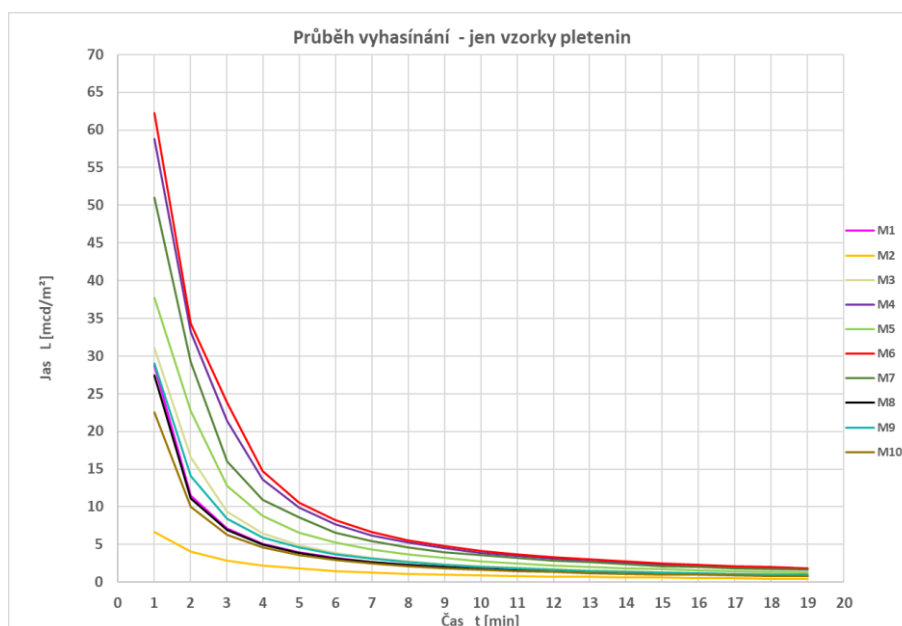
Obr. 26 Průběh vyhasínání luminiscence (pleteniny + referenční páska)



Obr. 27 Průběh vyhasínání luminiscence (pleteniny + referenční páska) – log měřítko

U referenčního vzorku F1 hodnota jasu v 1. minutě experimentu dosahuje  $1\,238\text{ mcd/m}^2$  a v 10. minutě  $146,03\text{ mcd/m}^2$ . Oproti tomu u pleteniny M6, která vykazovala ze všech vzorků nevyšší hodnoty byla zjištěna hodnota jasu v 1. minutě „pouze“  $62,24\text{ mcd/m}^2$  a v 10. minutě  $4,17\text{ mcd/m}^2$ .

Jelikož z Obr. 26 nelze jasně vyčíst výsledky jednotlivých pletenin a log měřítka použité na Obr. 27 zkresluje tvar křivky vyhasínání, byly výsledky zpracovány samostatně (bez hodnot referenčního vzorku F1) do grafu viz Obr. 28.

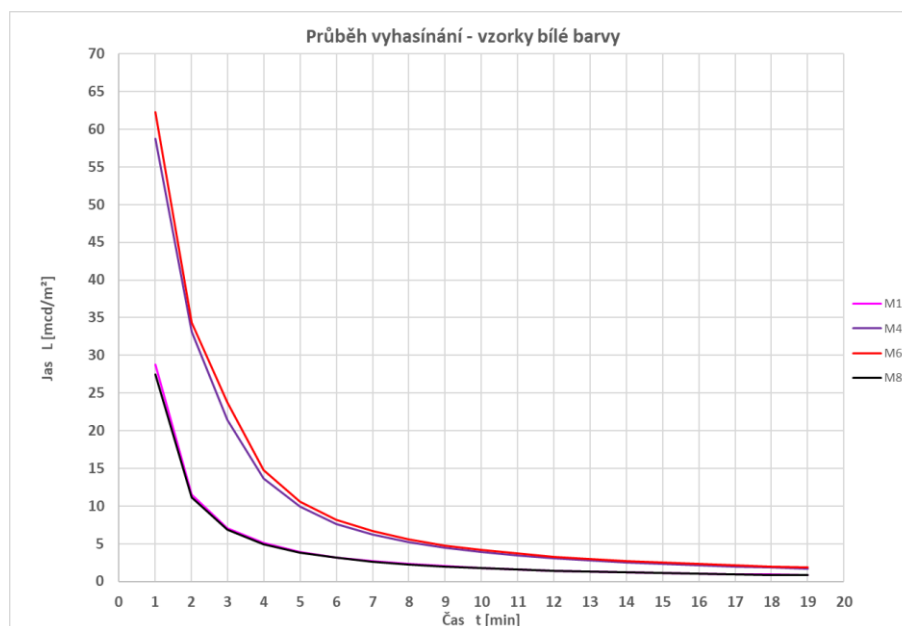


**Obr. 28 Průběh vyhasínání luminiscence (jen pleteniny)**

Z Obr. 28 je patrné, jak již bylo výše uvedeno, že nejvyšší jas v 1. minutě měření, tj.  $62,24 \text{ mcd/m}^2$  vykazuje vzorek M6. Druhý nejlepší výsledek v pořadí, tj.  $58,77 \text{ mcd/m}^2$  dosáhl vzorek M4 což je o 6 % méně než M6. V obou případech se jedná o vzorek bílé barvy. Nejhorší výsledek vykazuje vzorek M2 žluté barvy, u kterého byla zjištěna intenzita jasu v 1. minutě pouze  $6,69 \text{ mcd/m}^2$  což je o 89 % méně než u M6. Kromě M2 všechny vzorky vykazují podobný trend klesání. U ostatních vzorků intenzita jasu luminiscence klesá nejrychleji během prvních 5 min (pokles průměrně -83 %). Následně je mezi 5. až 10. min patrná oblast s pomalejším a pozvolným poklesem (průměrně -10 %). Od 10. minuty dále je pak pokles velmi pomalý (průměrně -2 %). V 19. minutě jen čtyři vzorky (M4, M5, M6 a M7) vykazují hodnotu jasu nad  $1 \text{ mcd/m}^2$ . Žlutý vzorek M2 v 19. minutě vyzařuje nejméně ( $0,44 \text{ mcd/m}^2$ ). Jelikož norma [18] hovoří o hodnotě  $0,3 \text{ mcd/m}^2$  jako o limitu rozpoznání jasu lidským okem, lze předpokládat, že žlutý vzorek M2 bude v 19. minutě měření již velmi špatně viditelný.

Graf na Obr. 28 také ukazuje, že první dva vzorky s nejvyšší intenzitou jasu luminiscence jsou bílé barvy a na třetím až šestém místě se umístily vzorky zelené barvy. Proto bylo dále podrobněji sledováno, jak intenzitu jasu luminiscence ovlivňuje jemnost použité příze u vzorků stejné barvy. A také byl hodnocen vliv barvy u vzorků z příze

shodné jemnosti. U materiálů bílé barvy viz Obr. 29 lze pozorovat, že nejlepší hodnoty vykazuje M6 (nízkoroztažný multifil/jemnost 300 dtex). Velmi podobný průběh vyhasínání vykazuje M4 (staplová příze/jemnosti 210 dtex). Oproti nim měl o 50 % nižší počáteční jas vzorek M1 (multifil/jemnost 150 dtex) a vzorek M8 (micromodal + VS crabyon/jemnost 167 dtex).

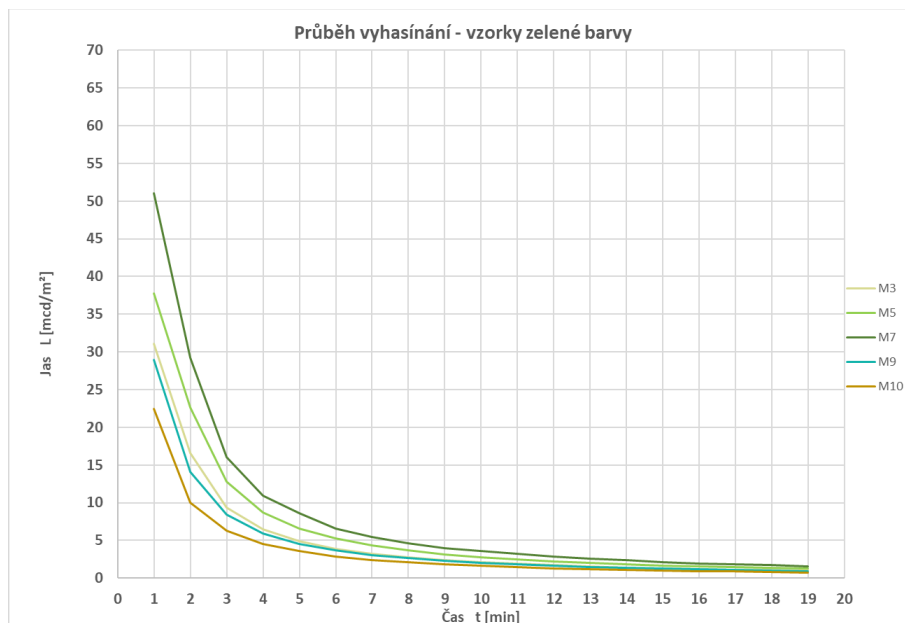


Obr. 29 Vzorky bílé barvy

Taktéž u materiálů zelené barvy v grafu na Obr. 30 je patrné, že nejlepších hodnot dosáhl vzorek z nízkoroztažného multifilu o jemnosti 300 dtex (M7) a druhý je vzorek (M5) ze staplové příze o jemnosti 210 dtex. Stejně jako u bílých vzorků i zde dosahují vzorky z multifilu o jemnosti 150 dtex (M3) a z micromodal+VS crabyon o jemnosti 167 dtex (M9) velmi podobný průběh vyhasínání. Nejnižší hodnoty byly zjištěny u vzorku M10 (micromodal+VS Crabyon/jemnosti 167 dtex). Pravděpodobně je to vlivem vazby, jelikož oproti M8 a M9, které mají vazbu s krytím „řádek 1/1“ má vzorek M10 vazbu s krytím „1 cm/1 cm“.

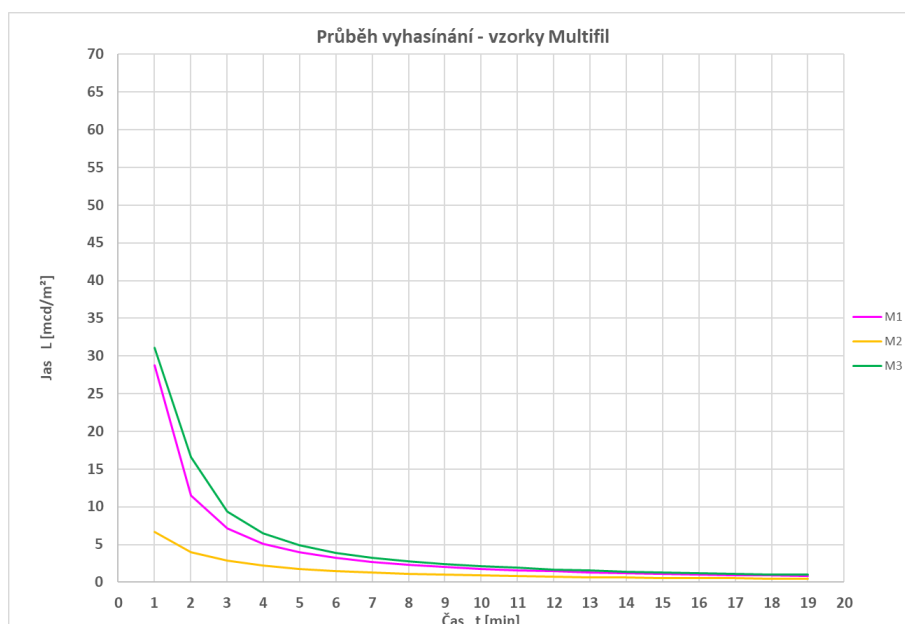
Dle zjištěných výsledků lze říci, že pleteniny stejných barev vyrobené z příze o hrubších jemnostech (300 dtex) vykazují o 40–50 % vyšší intenzitu jasu než pleteniny z jemnější příze (150 dtex). Rozdíl v počáteční hodnotě jasu u pleteniny o jemnosti 300 dtex a 150 dtex je cca 40-50 %.





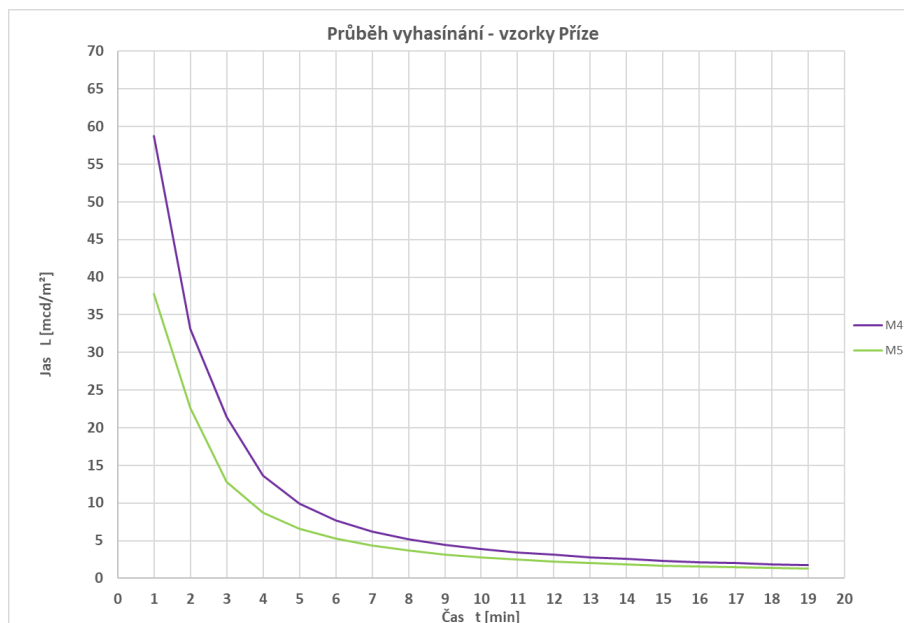
Obr. 30 Vzorky zelené barvy

Na následujících grafech viz Obr. 31 až Obr. 34 jsou porovnávány různé barevné vzorky z přízí o shodné jemnosti. Mezi materiály z multifilu o jemnosti 150 dtex (Obr. 31) vykazoval nejlepší hodnoty vzorek zelené barvy M3. Vzorek bílé barvy M1 vykazuje o cca 7 % nižší hodnoty počátečního jasu s rychlejším průběhem počátečního vyhasínání. Oproti předchozím dvěma materiálům dosahuje vzorek žluté barvy M2 výrazně nižších hodnot jasu. Jeho počáteční jas je o cca 80 % nižší.



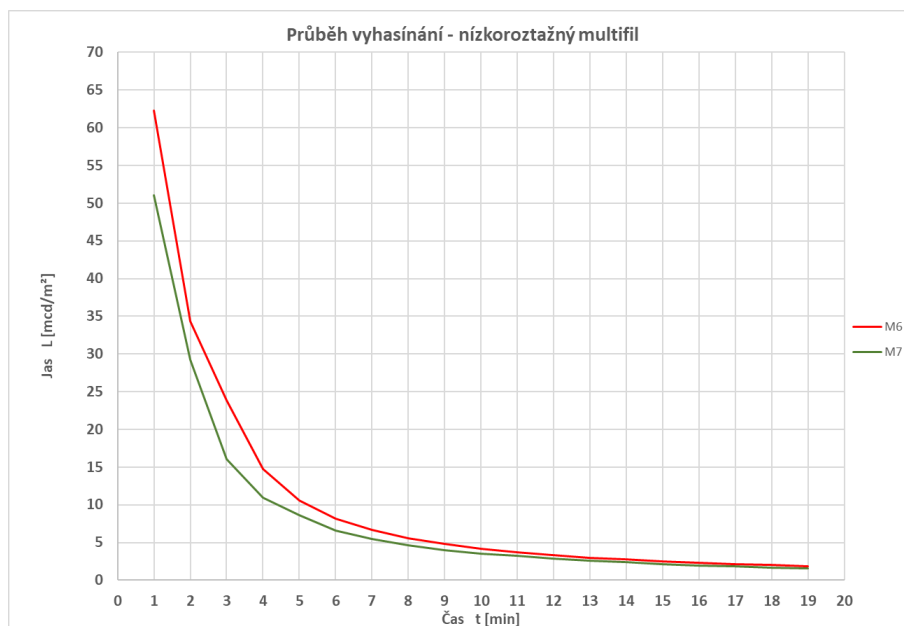
Obr. 31 Vzorky multifil 150 dtex

U vzorků ze staplové přize o jemnosti 210 dtex viz Obr. 32 je patrné, že vzorek M4 bílé barvy má lepší počáteční luminiscenční vlastnosti než zelený vzorek M5. Jas u vzorku M5 je oproti M4 v 1. minutě nižší o 36 %, v 5. minutě nižší o 34 % a v 10. minutě nižší o 28 %.

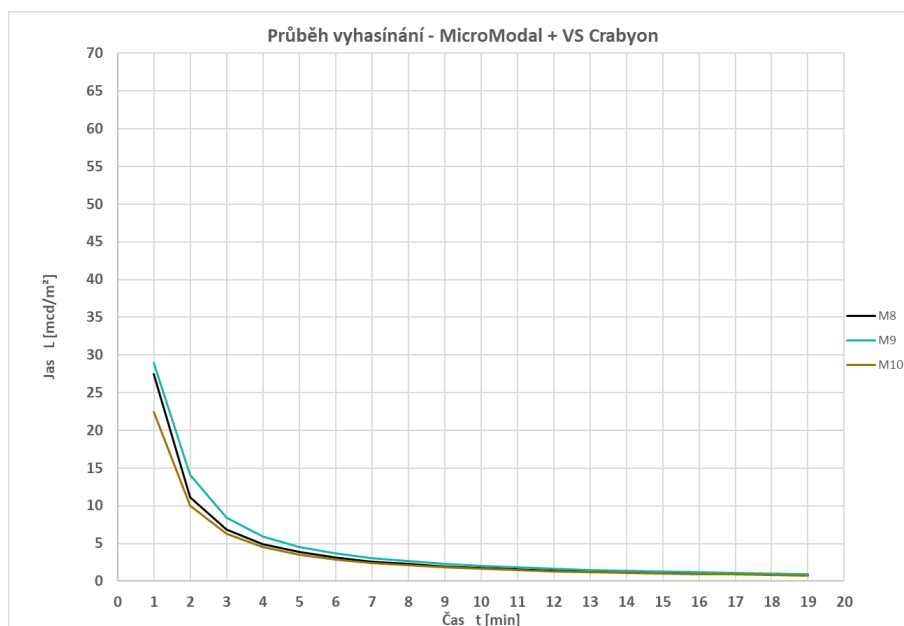


Obr. 32 Vzorky staplová přize 210 dtex

Podobný trend byl zjištěn i u vzorků z nízkoroztažného multifilu o jemnosti 300 dtex (Obr. 33). Zde taktéž vyšší hodnoty vykazuje vzorek bílé barvy M6 oproti M7 zelené barvy. Jas u vzorku M7 je oproti M6 v 1. minutě nižší o 18 %, v 5. minutě nižší o 19 % a v 10. minutě nižší o 15 %.



Obr. 33 Vzorky nízkoroztažný multifil 300 dtex



**Obr. 34** Vzorky micromodal + VS crabyon 167 dtex

U vzorků z micromodal + VS crabyon o jemnosti 167 dtex (Obr. 34) byla zjištěna nejvyšší intenzita jasu (tj. v 1. minutě 28,98 mcd/m<sup>2</sup>) u vzorku zelené barvy M9. O 5 % nižší hodnoty jasu s rychlejším počátečním průběhem vyhasínání má vzorek bílé barvy M8. Nejnižší intenzita jasu luminiscence byla naměřena u vzorku M10. Vzorek M10 vykazoval oproti vzorku M9 cca o 20 % nižší jas v 1. minutě experimentu. Pravděpodobně je to způsobeno tím, že vzorek M10 má vazbu s krytím „1 cm/1 cm“ oproti M8 a M9 kde je krytí „řádek 1/1“.

Dle zjištěných výsledků nelze vliv barvy jednoznačně potvrdit. Bílé vzorky oproti zeleným měly lepší počáteční jas u jemností 300 dtex (+18 %) a 210 dtex (+36 %). Naopak zelené vzorky oproti bílým vykazovaly vyšší počáteční jasy u jemností 150 dtex (+7 %) a 167 dtex (+5 %).

## **4.2 Měření č. 2 – zjišťování vlivu delší doby osvitu na intenzitu a vyhasínání luminiscence**

V rámci tohoto měření byl u vzorků bílé barvy (M1, M4, M6 a M8) zaznamenáván průběh vyhasínání za účelem zjistit vliv delší doby osvitu na intenzitu a průběh vyhasínání luminiscence. Doba osvitu byla prodloužena na 15 min a doba měření na 60 min. Vzorky bílé barvy byly zvoleny na základě výsledků z měření č. 1 (první a druhý nejlepší výsledek byl zjištěn u bílých vzorků). Měření probíhalo ve spolupráci s prof. Ing. Michalem Vikem, Ph.D. v laboratoři KMI/LCAM FT TUL. V tomto experimentu byl spektrometr SpectraScan nahrazen digitálním fotoaparátem. Během zkušebního měření bylo totiž zjištěno, že SpectraScan při nízkých jasech prodlužoval expoziční čas. Čas pořízení záznamu neodpovídal reálnému času a tím docházelo k nepřesnostem měření. Pro zpracování fotografických snímků byla využita obrazová analýza v prostředí Matlab vyvíjená v laboratoři KMI/LCAM FT TUL. Nastavené parametry zkoušky byly zvoleny experimentálně a vycházejí z normy DIN 67510-1 [18].

### **4.2.1 Podmínky a charakteristika měření**

#### **Podstata zkoušky**

Podstatou této zkoušky je vytvoření obrazového záznamu pomocí fotoaparátu okem viditelného jasu fotoluminiscence v průběhu času.

#### **Zkušební zařízení a pomůcky**

Pro účely tohoto měření byl použitý digitální fotoaparát Canon EOS 80D + objektiv Canon EF LENS 55 mm f/1.8 STM. Fotoaparát byl připojen k PC, kde byly pořízené snímky automaticky ukládány v SW Digital Photo Professional 4. K osvětlení vzorků bylo použito normované světlo D50 s chromatičností 5000 K.

#### **Zkušební vzorky**

Měření bylo provedeno na vzorcích bílé barvy M1, M4, M6 a M8. Pro přípravu vzorků byla použita stejná metodika jako u měření č. 1.

## **Podmínky měření**

Měření probíhalo při pokojové teplotě v místnosti uzpůsobené pro práci se světlocitlivými materiály se zatemněnými venkovními roletami bez použití osvětlení. Shodná geometrie měření pro všechny vzorky byla zajištěna stejným způsobem jako u měření č. 1.

### Nastavené parametry měření:

- Snímaná plocha textilie: kruhový otvor o průměru 35 mm
- Světlo: D50 s chromatičností 5000 K
- Doba osvitu: 15 min
- Zahájení fotografování: 2 min po skončení excitace
- Interval fotografování: 5 min  
(resp. v min. 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60)
- Celková doba měření: 60 min
- Počet provedených záznamů měření: 13
- Počet měření na jednom vzorku: 3

### Nastavení fotoaparátu Canon EOS 80D:

- Závěrka clony: f/10
- Délka expozice: 15“
- ISO: 16000
- Ohnisková vzdálenost: 50 mm
- Ostření: ručně
- Režim expozimetru: maticové měření
- Blesk: bez blesku
- Formát: RAW (.CR2)

## **4.2.2 Postup měření**

Postup měření probíhal obdobným způsobem jako u předchozího měření č.1. Spektroradiometr zde byl nahrazen digitálním fotoaparátem. Průběh vyhasínání byl snímán v definovaných intervalech. Snímky byly průběžně ukládány a následně zpracovány.

### Zpracování fotografií:

Pro zpracování naměřených snímků pořízených pomocí digitálního fotoaparátu byla využita obrazová analýza v prostředí Matlab vyvíjená v laboratoři LCAM FT TUL. Pomocí tohoto nástroje byla vypočtena průměrná jasová hodnota každého vzorku v následujících krocích:

- vložení snímku ve formátu RAW;
- převod CR2 na RGB;
- převod RGB na Y z CIE XYZ 1931;
- vyjádření jasu jako průměru z vybrané oblasti a z kalibrování.

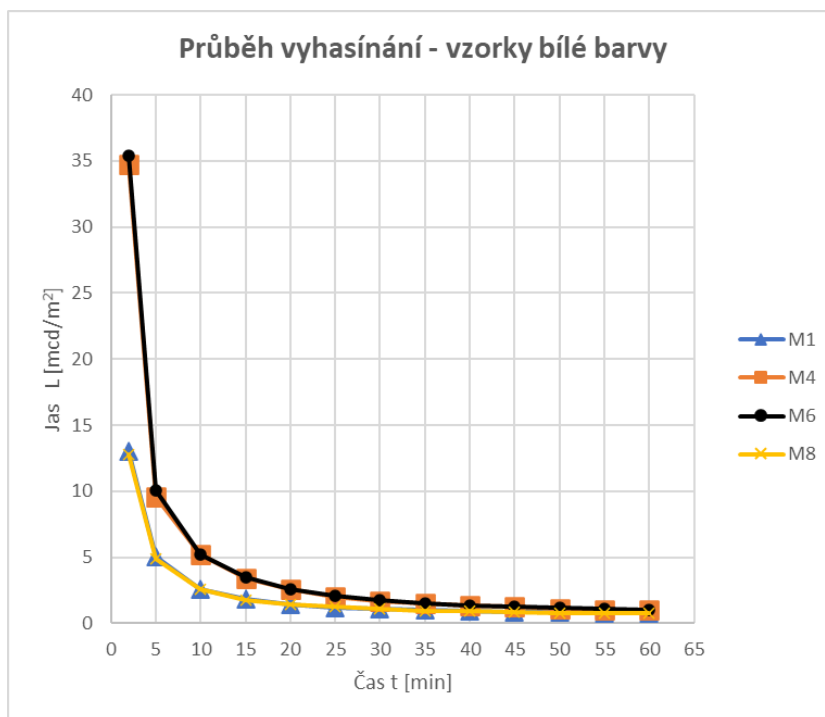
### 4.2.3 Výsledky měření a vyhodnocení

Měření bylo provedeno na každém vzorku 3krát. Získané hodnoty byly statisticky zpracovány v Microsoft Excel. Naměřená data a jejich statistické zpracování jsou k dispozici v samostatné příloze této práce (Příloha C). Průměrné hodnoty jasu  $\bar{L}$  [mcd/m<sup>2</sup>] jsou pak uvedeny viz Tabulka 7.

Tabulka 7 Průměrné hodnoty jasu  $\bar{L}$  [mcd/m<sup>2</sup>]

Čas t [min]	Jas $\bar{L}$ [mcd/m <sup>2</sup> ]			
	M1	M4	M6	M8
2	13,03	34,71	35,42	12,81
5	5,03	9,57	10,03	4,84
10	2,60	5,23	5,22	2,54
15	1,84	3,42	3,46	1,78
20	1,45	2,58	2,60	1,41
25	1,21	2,02	2,05	1,22
30	1,07	1,68	1,73	1,07
35	0,99	1,49	1,53	0,95
40	0,91	1,33	1,38	0,93
45	0,86	1,22	1,26	0,87
50	0,83	1,11	1,14	0,80
55	0,79	1,05	1,08	0,79
60	0,77	1,03	1,00	0,78

Z dat viz Tabulka 7 byl vytvořen graf (Obr. 35), kde jsou znázorněny průběhy vyhasínání luminiscence bílých vzorků M1, M4, M6 a M8 po 15. min nasvícení.

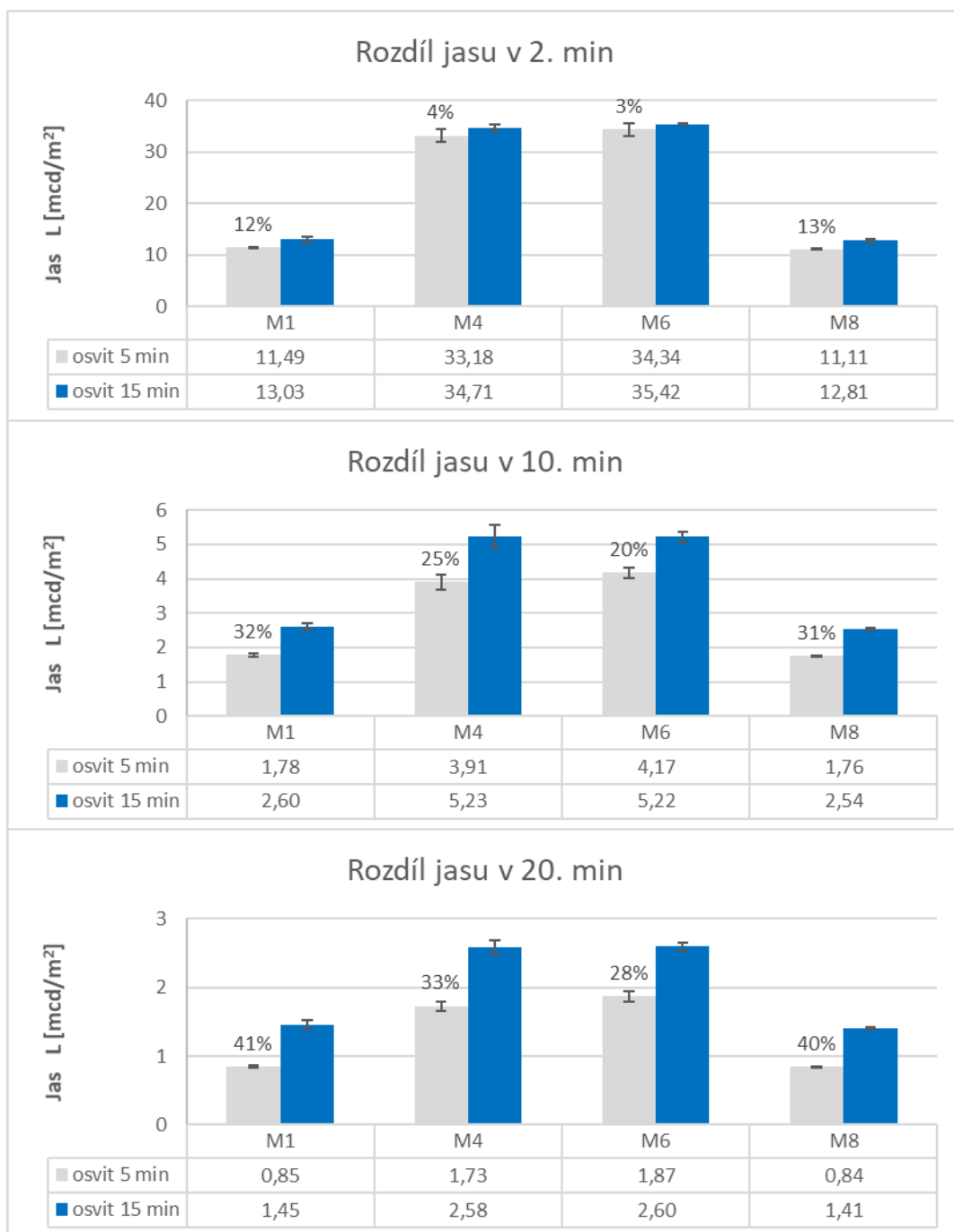


Obr. 35 Vzorky bílé barvy M1, M4, M6, M8 (osvit 15 min)

Z grafu na Obr. 35 je patrné, že křivka vzorku M4 má podobný průběh jako křivka vzorku M6. Ve 2. min vykazují oba vzorky cca 35 mcd/m<sup>2</sup>, v 30. min cca 1,7 mcd/m<sup>2</sup> a v 60. min cca 1 mcd/m<sup>2</sup>. Obdobně M1 vykazuje podobný průběh jako M8. Ve 2. min vykazují oba vzorky cca 13 mcd/m<sup>2</sup>, v 30. min cca 1 mcd/m<sup>2</sup> a v 60. min cca 0,8 mcd/m<sup>2</sup>. Rozdíl mezi M4, M6 a M1, M8 je ve 2. min cca 63 %, ve 30. min je rozdíl cca 37 % a v 60. min cca 23 %.

Bylo předpokládáno, že při 15 min osvitu budou vzorky vykazovat vyšší hodnoty jasu než při osvitu 5 min. U všech čtyř materiálů byl tento předpoklad potvrzen. Vzorky vykazovaly v počáteční fázi vyšší hodnoty jasu, avšak větší vliv delší doby osvitu byl patrný spíše v oblasti pozvolného vyhasínání. Zjištěné hodnoty se s ohledem na délku osvitu průměrně liší v 2.-5. min cca o 10 %, v 10. min již o cca 30 % a v 15.-20. min o cca 35 %.

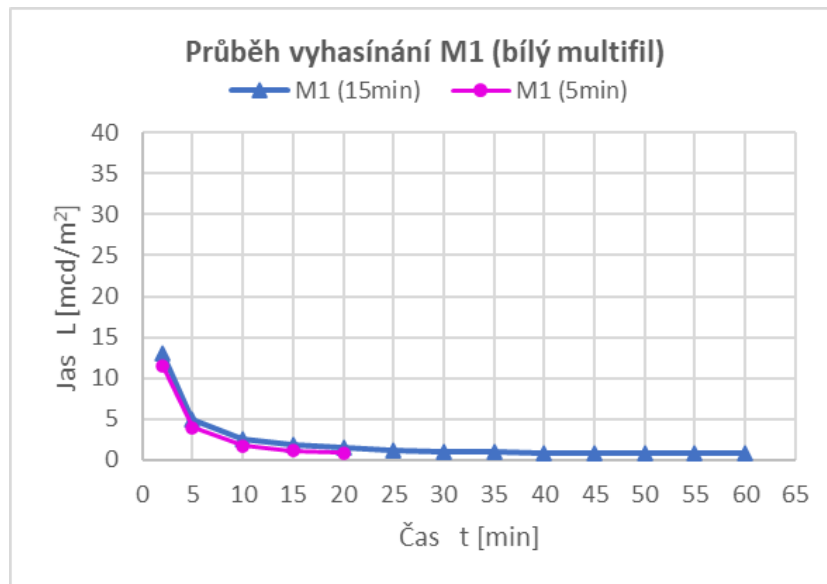
Obr. 36 znázorňuje porovnání jasů zjištěných ve 2., 10. a 20. min experimentu. Je zde uveden procentuální rozdíl jasů po osvit 5 min a 15 min.



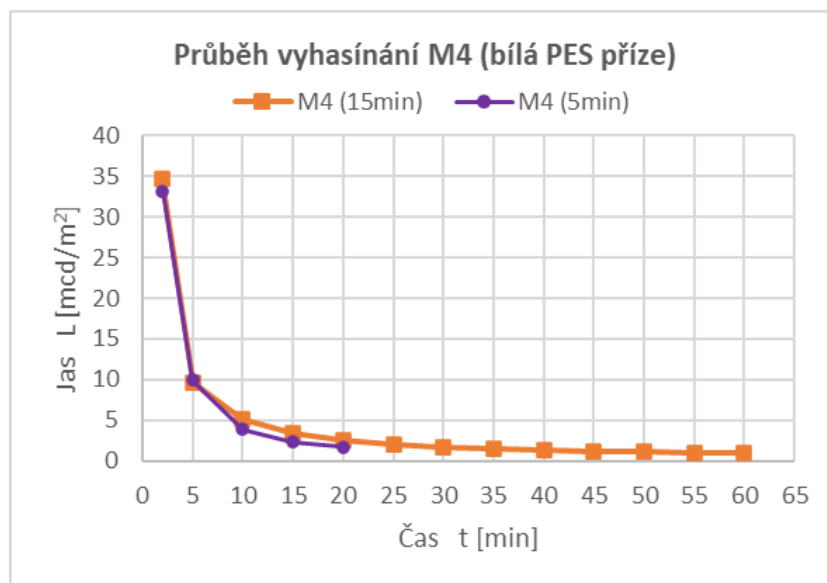
**Obr. 36 Porovnání jasů (osvit 5 a 15 min)**



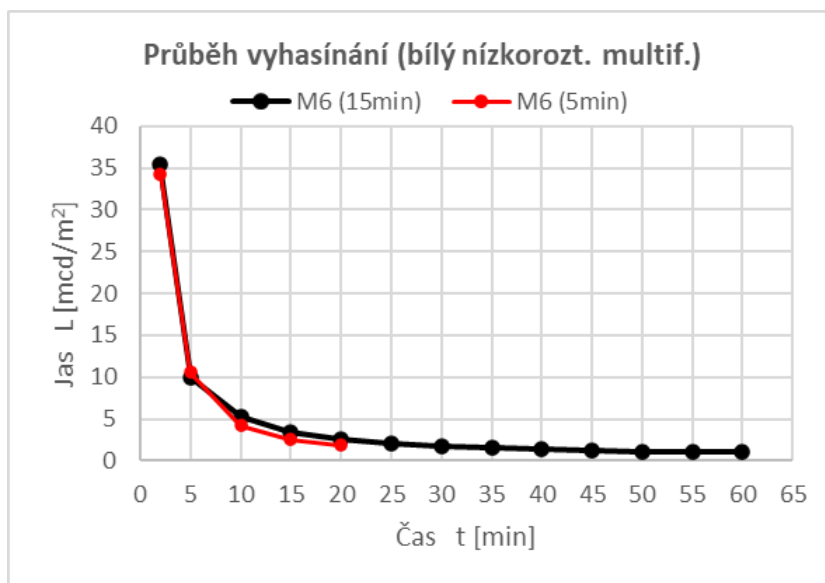
Na následujících grafech na Obr. 37 až Obr. 40 je dispoziční porovnání křivek průběhu vyhasínání jednotlivých vzorků při osvitě 5 min a 15 min. Je patrné, že obě křivky vyhasínání mají velmi podobný průběh.



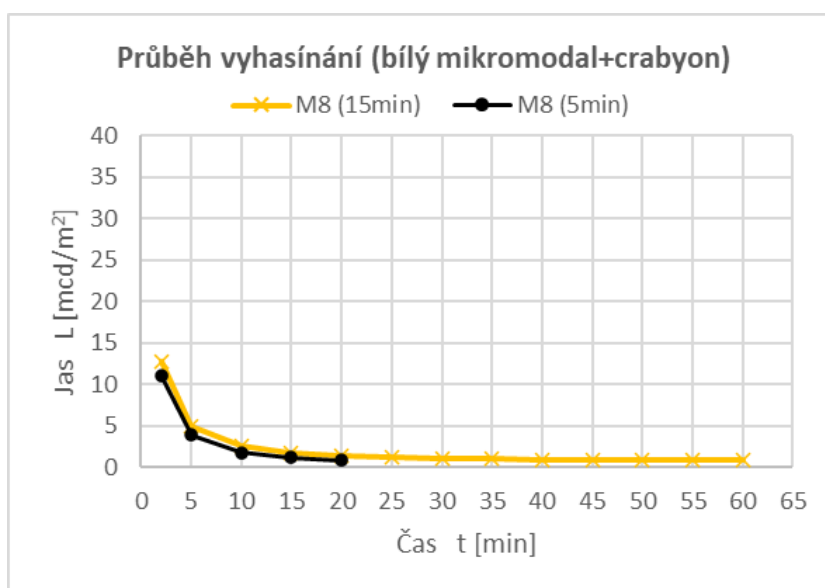
Obr. 37 Vzorek M1 (osvit 5 a 15 min)



Obr. 38 Vzorek M4 (osvit 5 a 15 min)



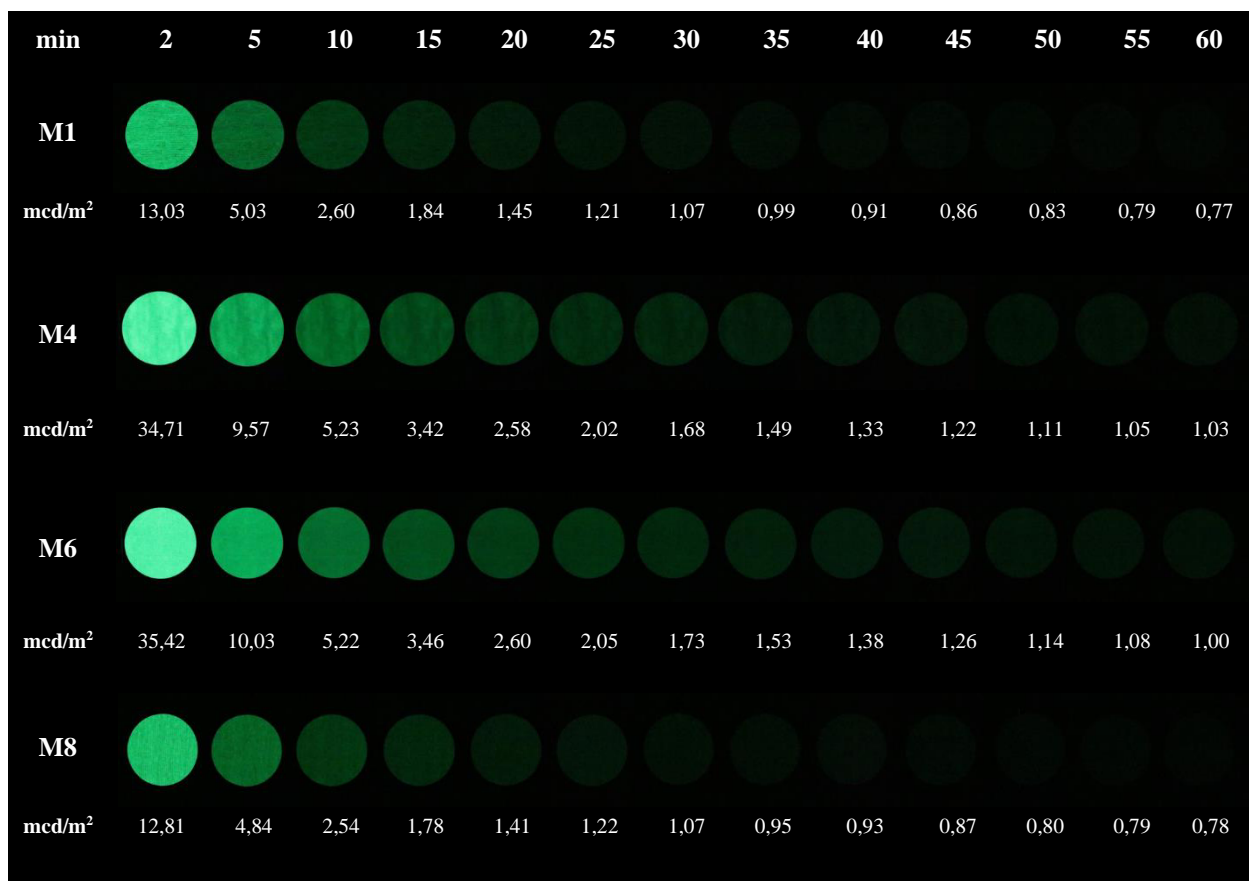
**Obr. 39 Vzorek M6 (osvit 5 a 15 min)**



**Obr. 40 Vzorek M8 (osvit 5 a 15 min)**

Bylo zjištěno, že při 15 min osvit u všech čtyř vzorků hodnoty jasu v 60. min stále dosahují nad hodnotu  $0,3 \text{ mcd/m}^2$ , o které hovoří norma [18] jako o limitu rozpoznání lidským okem. K posouzení, zda a jak jsou vzorky pro pozorovatele stále viditelné byl zpracován Obr. 41. To jak dle normy [18] vnímá hodnoty jasu lidské oko je pak uvedeno viz Tabulka 8.

Dle Obr. 41 lze subjektivně potvrdit, že viditelnost vzorků M4 a M6 je oproti vzorkům M1 a M8 lepší. Vzorky M4, M6 jsou jasně viditelné min. do 10. min. Mezi 15.-40. min lze jasně rozpoznat obrysy a následně je viditelnost nejasná. Vzorky M1 a M8 v 30. min vykazují hodnoty jasů cca 1 mcd/m<sup>2</sup>, které byly u vzorků M4 a M6 zjištěny až v 60. min. Je patrné, že vzorky M1 a M8 jsou od 35 min špatně rozeznatelné. Jejich hodnoty zde klesly pod 1 mcd/m<sup>2</sup>.



Obr. 41 Fotografický záznam dosvitu vzorků M1, M4, M6, M8 (osvit 15 min)

Tabulka 8 Vnímání hodnot jasů lidským okem dle normy DIN 67510 Standard [18]

Úroveň jasů pocíťovaná člověkem	Jas [mcd/m <sup>2</sup> ]
Vidí objekt jasně a dokáže číst písmena	200
Vidí objekt jasně	5
Rozpozná obrys objektu jasně	3
Dokáže rozpoznat obrys	2
Vidí objekt nejasně	1
Limit rozpoznání lidským okem	0,3

Jak již bylo řečeno, norma [18] uvádí, že hodnota jasu  $0,3 \text{ mcd/m}^2$  je limitní pro rozpoznání lidským okem. U jednotlivých vzorků byl výpočtem predikován čas, kdy by pravděpodobně této hodnoty jasu bylo dosaženo, tzn. cca jak dlouho by byla pletenina pro pozorovatele viditelná.

K výpočtu byla použita exponenciální rovnice (1) vyjádřená pro spojnicí trendu křivky rozpadu jasu.

$$L_t = A \exp^{-Bt} \quad (1)$$

Kde:

$L_t$  jas v příslušném čase [ $\text{mcd/m}^2$ ]

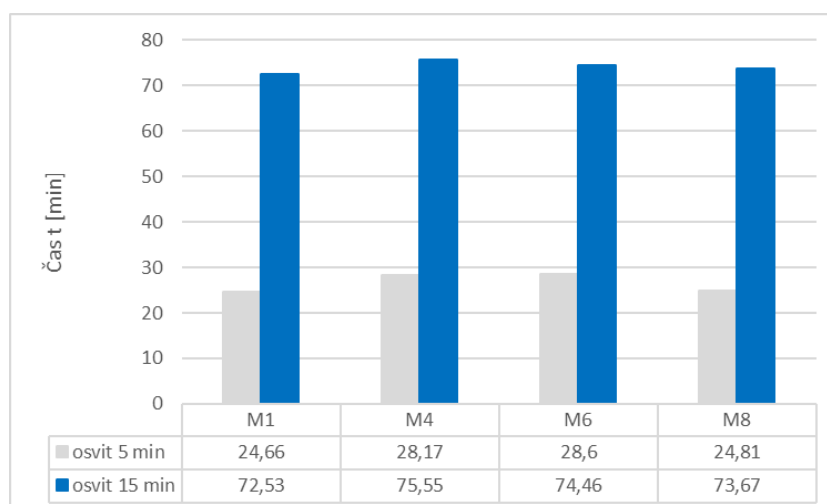
A, B koeficient

t čas [min]

Predikované časy dosažení hodnoty jasu  $0,3 \text{ mcd/m}^2$  při osvitě 5 a 15 min uvádí Tabulka 9. Bylo zjištěno, že při 5 min osvitě lze předpokládat viditelnost vzorků po dobu cca 25-28 min. Při 15 min osvitě se předpokládaná doba viditelnosti pohybuje mezi 72-75 min. Predikované doby viditelnosti uvádí Obr. 42. Z výsledků lze konstatovat, že 5 min osvitě může dobu viditelnosti prodloužit o cca 25 min.

**Tabulka 9** Predikovaný čas dosažení hodnoty jasu  $0,3 \text{ mcd/m}^2$

t [min]	M1	M4	M6	M8
při 5 min osvitě	24,66	28,17	28,60	24,81
při 15 min osvitě	72,53	75,55	74,46	73,67



**Obr. 42** Predikovaná doba viditelnosti vzorků (osvit 5 a 15 min)

### **4.3 Měření č. 3 – měření v domácích podmínkách pomocí fotoaparátu**

Cílem tohoto měření bylo zaznamenat intenzitu fotoluminiscenčního záření a průběh jeho vyhasínání pomocí digitálního fotoaparátu a výsledky měření následně porovnat s výsledky ze spectroradiometru (viz měření č. 1). Pro popis vztahu mezi zjištěnými veličinami byla provedena korelační analýza. Zkušební měření proběhlo ve spolupráci s Ing. Katarínou Zelovou, Ph.D. v temné komoře v laboratoři KOD FT TUL. Následně probíhalo měření v domácích podmínkách v improvizované temné komoře. K účelům experimentu byl navržen a zkonstruován box, který je blíže popsán dále v textu. Nastavené parametry měření byly zvoleny experimentálně a vycházejí z normy DIN 67510-1 [18].

#### **4.3.1 Podmínky a charakteristika měření**

##### **Podstata zkoušky**

Podstatou této zkoušky je vytvoření obrazového záznamu pomocí digitálního fotoaparátu okem viditelného jasů fotoluminiscence v průběhu času.

##### **Zkušební zařízení a pomůcky**

Pro účely tohoto experimentu byl použitý digitální fotoaparát Canon EOS 100D upevněný do stativu, UV lampa a box sloužící k minimalizaci vlivu dopadu cizího světla na povrch vzorku. Níže je uvedena podrobnější specifikace jednotlivých zařízení. Celá měřicí sestava je zachycena na Obr. 51.

##### Digitální fotoaparát:

- Název/typ: Canon EOS 100D
- Objektiv: EF-S 18–55 mm f/3.5-5.6 IS STM

##### Stativ:

- Max. výška: 90 cm

##### Širokopásmová UV lampa:

- Název/typ: NU-8 KL
- Vlnová délka: KW254 nm / LW366 nm
- Výkon: 2x8 W
- Napětí: 230 V
- Velikost filtru: 195x45 mm

### Měřicí box:

Během zkušebního měření v temné komoře byl zjištěn, nežádoucí vliv cizího světla na vzorek. Nežádoucí světlo vyzařoval displej fotoaparátu, světelná dioda na fotoaparátu, stopky na mobilním telefonu. K minimalizaci tohoto nežádoucího vlivu cizího světla byl navržen měřicí box.

Box se skládá z dřevěného podstavce s výsuvnou pracovní plochou pro uchycení vzorku (Obr. 43), z pláště vyrobeného z šedého extrudovaného polystyrenu (Obr. 44) a vrchní desky. Všechny vnitřní části boxu jsou polepeny černou velurovou tapetou, která neodráží dopadající světlo (Obr. 47). Výsuvná pracovní plocha je rozdělena na spodní pevnou část s kolejkou a vrchní výkyvnou část, pod kterou se umístí vzorek (Obr. 50). Jelikož pletenina má tendenci ke kroucení okrajů byl v dolní desce zabudován polystyren, do kterého lze pleteninu přichytit špendlíkem. V horní výkyvné desce je vytvořen kruhový otvor o průměru 40 mm pro snímání vzorku. Horní část boxu je krytá kovovou deskou (taktéž polepenou velurovou tapetou) s otvorem pro objektiv fotoaparátu a s technickým otvorem pro případnou vizuální kontrolu vzorku (Obr. 48). Po umístění a kalibraci fotoaparátu se na vrchní desku ještě nasadí izolační kryt (Obr. 49).



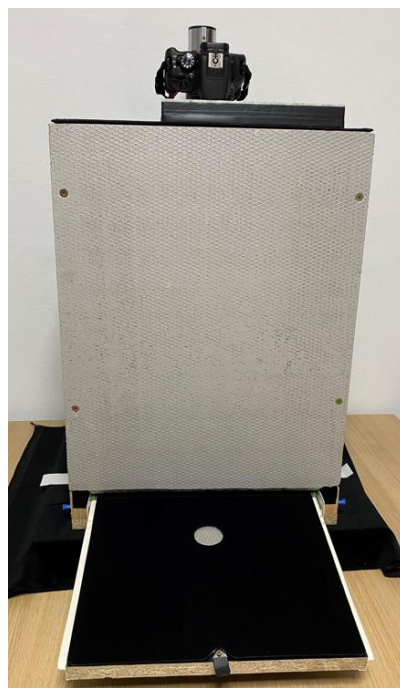
Obr. 43 Podstavec a stativ s fotoaparátem



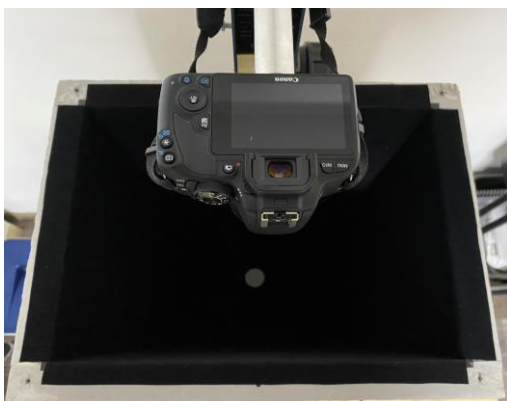
Obr. 44 Plášť boxu s vrchní deskou



Obr. 45 Box s nasazeným izolačním krytem



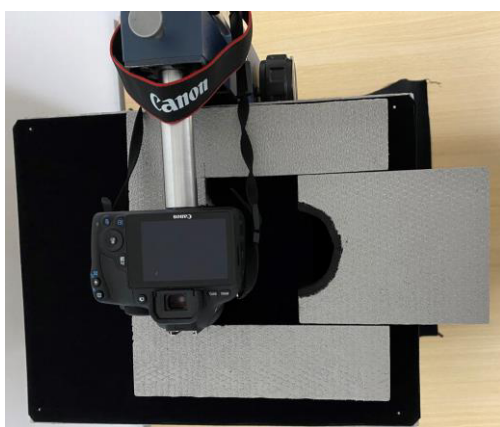
Obr. 46 Box s vysunutou pracovní plochou



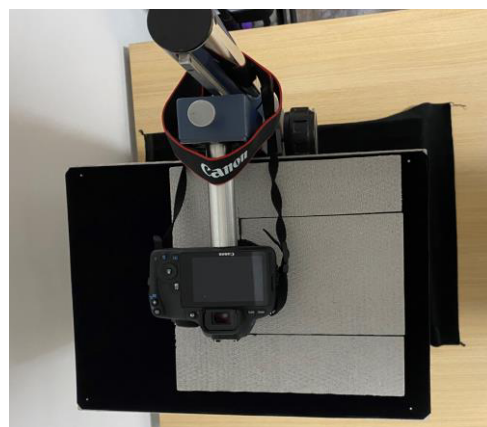
Obr. 47 Pohled do boxu



Obr. 48 Vrchní deska



(a)



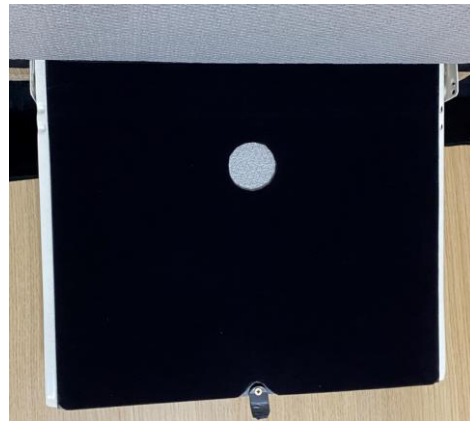
(b)

Obr. 49 Izolační kryt (a) otevřený, (b) uzavřený





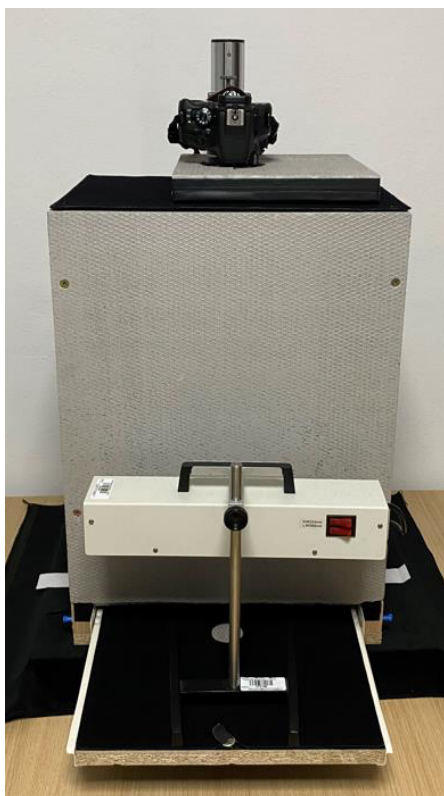
(a)



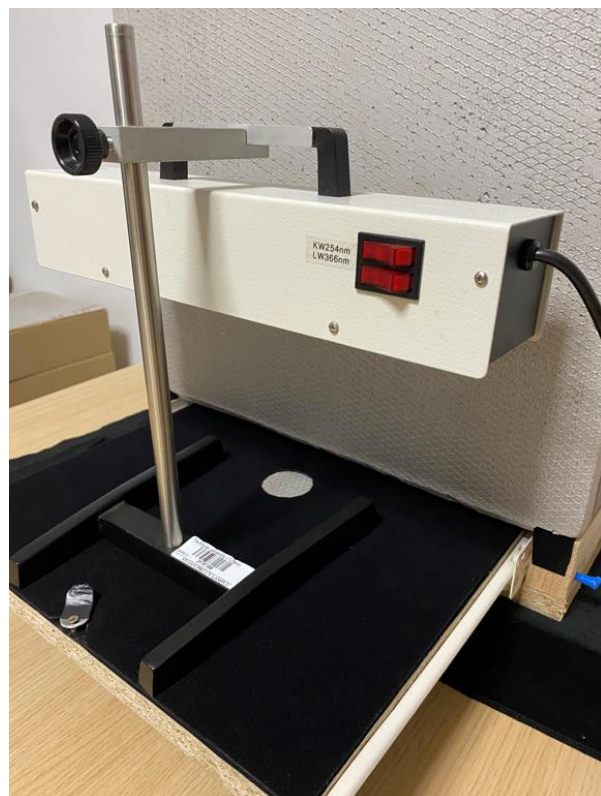
(b)

**Obr. 50 Výsuvná pracovní plocha (a) otevřená a (b) zavřená**

Na Obr. 50(a) je vidět, že při položení vzorku docházelo ke stáčení okrajů pleteniny. Tento problém byl vyřešen zabudováním polystyrenu do pracovní desky. Okraje pleteniny lze díky tomu přichytit k desce špendlíkem.



**Obr. 51 Kompletní měřicí soustava**



**Obr. 52 Instalovaná UV lampa**

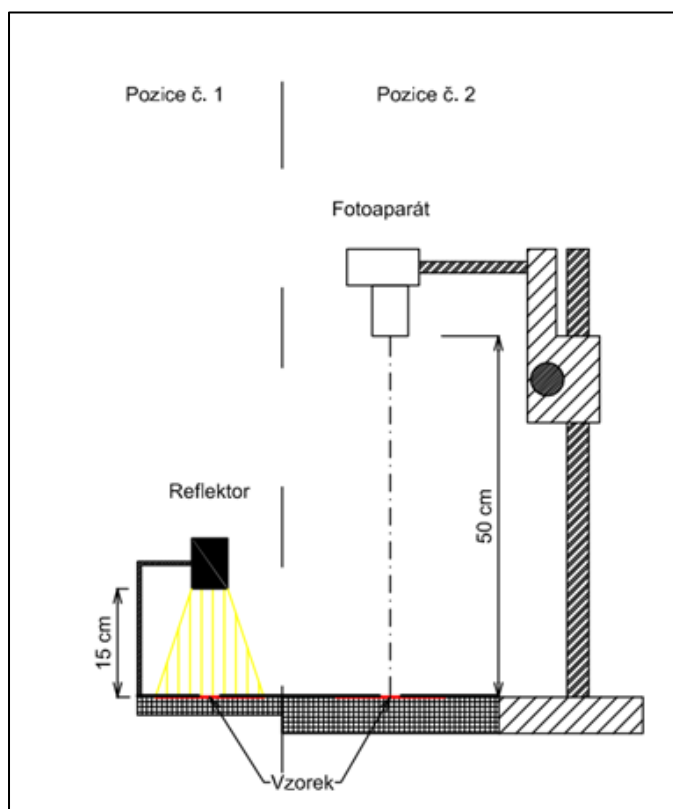


## Zkušební vzorky

Na základě výsledků měření č. 1 byly k tomuto experimentu použity vzorky bílé pleteniny M1, M4, M6 a M8. Před zahájením zkoušky byly vzorky klimatizovány ve tmě po dobu minimálně 24 hodin. Měření byla provedena po směru osy sloupků. Části vzorků, na kterých v daném okamžiku neprobíhalo měření byly zakryty černou neprůsvitnou deskou.

## Podmínky měření

Manipulace se vzorky a samotné měření probíhalo v domácích podmínkách při pokojové teplotě, v zatemněné místnosti bez oken a bez použití osvětlení. Pro minimalizaci dopadu cizího světla na povrch vzorku a objektivu fotoaparátu byl použit navržený měřicí box. Stejná geometrie měření pro všechny vzorky byla zajištěna uchycením vzorků v pracovním prostoru měřicího boxu. Fotoaparát byl upevněn ve stativu ve výšce 50 cm nad vzorkem. Schématické rozvržení experimentu je znázorněno na Obr. 53, kde pozice č.1 představuje fázi osvětlu na vysunutou pracovní plochu a pozice č.2 fázi fotografování s pracovní plochou zasunutou.



Obr. 53 Schéma osvitu a fotografování pomocí měřicího boxu

#### Nastavení fotoaparátu Canon EOS 100D:

- Závěrka clony: f/5.6
- Délka expozice: 8“
- ISO: 3200
- Ohnisková vzdálenost: 55 mm
- Ostření: ručně
- Režim expozimetru: maticové měření
- Blesk: bez blesku
- Formát: JPG a RAW (.CR2)

#### UV lampa byla umístěna nad vzorek ve stojanu:

- Vzdálenost od vzorku: 15 cm
- Vlnová délka: LW366 nm
- Intenzita záření: 950  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- Doba osvětlení: 5 min

#### Dále byly pro experiment nastaveny parametry:

- Plocha textilie snímaná fotoaparátem: kruhový otvor o průměru 40 mm
- Zahájení fotografování: do 30 s po skončení excitace
- Interval fotografování: v 1. min 30 s, 1-20 min po 60 s, 20-30 min po 5 min
- Celková doba fotografování: 30 min

### **4.3.2 Postup měření**

Vzorek pleteniny byl beznapětově rozložen a uchycen na pracovní plochu. Na definovanou dobu bylo zapnuto osvětlení. Po uplynutí doby excitace bylo osvětlení vypnuto a pracovní plocha byla zasunuta dovnitř boxu. Průběh vyhasínání byl snímán digitálním fotoaparátem v definovaných intervalech. Snímky byly průběžně ukládány do PC a následně zpracovány.

#### **Zpracování fotografií:**

Zpracování snímků pořízených pomocí digitálního fotoaparátu bylo provedeno dvěma způsoby prostřednictvím:

- a) Obrazová analýza v prostředí MATLAB

Princip byl již popsán viz odst. 4.2.2.

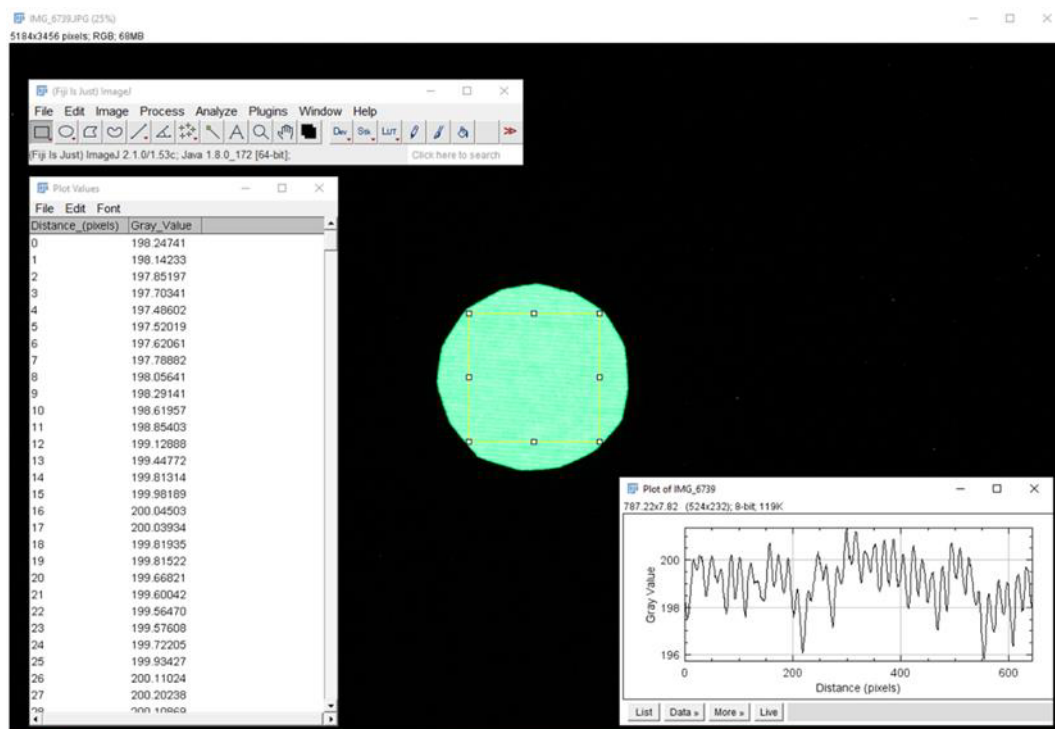
## b) Obrazová analýza v prostředí Fiji

Fiji je software pro zpracování obrazu a obrazovou analýzu od ImageJ2, který je volně k dispozici na <https://imagej.net/software/fiji/>. Pracuje na principu šedé škály v rozmezí hodnot od 0 do 255, kde 0 = černá a 255 = bílá. Ke každému vodorovnému pixelu zpracovávané fotografie přiřadí hodnotu intenzity šedé škály. Pro účely tohoto experimentu je předpokládáno, že vyšší hodnota intenzity na šedé šále, tzn. bělejší = vyšší hodnota intenzity jasu luminiscence.

Pomocí tohoto nástroje byla zjištěna průměrná hodnota intenzity Gray\_Value v následujících krocích:

- vložení snímku ve formátu .JPG;
- výběr oblasti (čtvercová, rozměr 644x644 px);
- vygenerování grafu a hodnot (k Distance\_(pixels) příslušná hodnota intenzity Gray\_Value);
- vyjádření průměru hodnot z vybrané oblasti.

Obr. 54 ukazuje pracovní prostředí Fiji, kde je načtená fotografie vzorku a proveden výřez. Výstupem ze softwaru jsou hodnoty a graf intenzit šedé vztažené k příslušnému pixelu. Jelikož, software neumožňoval při kruhovém výřezu vygenerování grafu a dat, byl zvolen výřez čtvercový.



Obr. 54 Pracovní prostředí Fiji

### 4.3.3 Výsledky měření a vyhodnocení

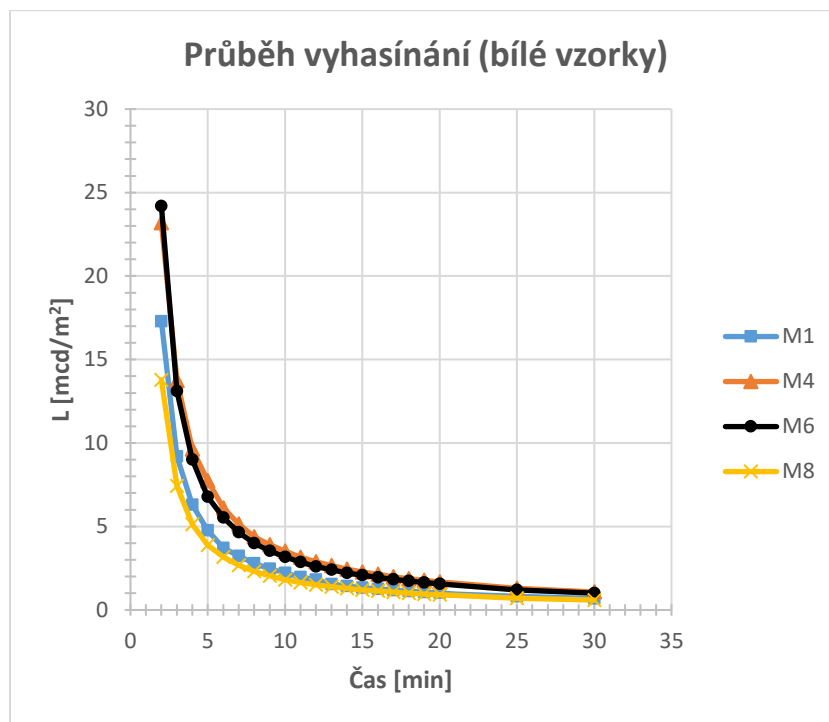
#### a) Obrazová analýza v prostředí MATLAB:

Hodnoty jasu [ $\text{mcd}/\text{m}^2$ ] zjištěné touto metodou (v 2.-30. min) jsou uvedeny viz Tabulka 10.

**Tabulka 10** Hodnoty jasu zjištěné pomocí metody Foto+Matlab

Čas t [min]	Jas $\bar{L}$ [ $\text{mcd}/\text{m}^2$ ]			
	M1	M4	M6	M8
2	17,29	23,20	24,19	13,78
3	9,20	13,73	13,10	7,44
4	6,31	9,64	9,01	5,13
5	4,77	7,74	6,78	3,89
6	3,72	6,10	5,53	3,17
7	3,24	5,14	4,64	2,68
8	2,80	4,39	4,00	2,31
9	2,46	3,91	3,53	2,04
10	2,21	3,51	3,17	1,82
11	1,97	3,16	2,86	1,65
12	1,81	2,88	2,61	1,51
13	1,54	2,66	2,40	1,39
14	1,43	2,44	2,22	1,29
15	1,34	2,28	2,08	1,20
16	1,26	2,14	1,95	1,13
17	1,18	1,99	1,84	1,07
18	1,12	1,88	1,73	1,01
19	1,06	1,78	1,64	0,95
20	1,02	1,67	1,55	0,91
25	0,82	1,30	1,19	0,70
30	0,69	1,08	1,01	0,59

Obr. 55 ukazuje změny jasu jednotlivých vzorků s dobou vyhasínání. Intenzita jasu se snižuje s dobou vyhasínání a křivka má velmi podobný tvar jako u předchozích měření č. 1 a č. 2. Je patrná počáteční fáze s rychlým poklesem během prvních 5 min a následná fáze pomalejšího a pozvolného útlumu. I u jednotlivých vzorků je pozorován podobný trend jako v předchozích měřeních. Tyto výsledky naznačují, že by navržená metoda mohla být pro měření a vyhodnocení luminiscenčních vlastností materiálů v praxi aplikovatelná. Za účelem potvrzení této úvahy, byla provedena korelační analýza (viz dále v textu).



Obr. 55 Vzorky bílé barvy M1, M4, M6, M8 (osvit 5 min), metoda Foto+Matlab

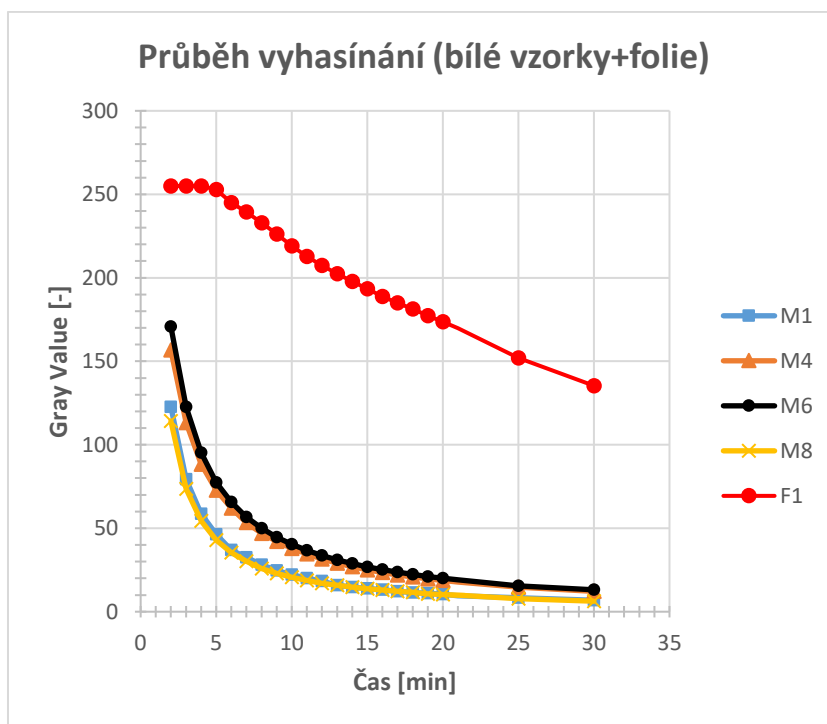
b) Obrazová analýza v prostředí Fiji:

Průměrné hodnoty intenzity šedé (Gray Value) zjištěné metodou Foto+Fiji (v 2.-30. min) jsou uvedeny viz Tabulka 11. Bylo předpokládáno, že čím nižší hodnotu intenzity jasu bude materiál vykazovat, tím bude mít nižší hodnotu intenzity šedé na stupnici 0 až 255 (0=černá a 255=bílá). Tento předpoklad byl potvrzen. Obr. 56 ukazuje změny hodnot intenzity šedé jednotlivých vzorků v průběhu vyhasínání luminiscence. Intenzita šedé se snižuje s dobou vyhasínání a křivka má velmi podobný tvar jako u předchozích měření. I zde je zde patrná počáteční fáze s rychlým poklesem a následná fáze pomalejšího a pozvolného vyhasínání. Také v tomto případě je u jednotlivých vzorků M1, M4, M6 a M8 pozorován podobný trend jako při předchozích měřeních. Což naznačuje, že i tento princip vyhodnocení může být v praxi aplikovatelný. Za účelem potvrzení této úvahy, byla provedena korelační analýza (viz dále v textu).

Do testování byl v tomto případě použit i referenční vzorek F1 (luminiscenční nažehlovací folie), u kterého byly v rámci měření č. 1 zjištěny výrazně vyšší hodnoty jasů než u testovaných pletenin. Výsledky vzorku F1 ukazují, že při použití této obrazové analýzy je třeba správně nastavit parametry měření s ohledem na limit stupnice šedé škály. U F1 byly totiž až do 4. min zjištěny konstantní hodnoty šedé 255, přestože bylo zjištěno, že hodnoty jasů se zejména v počáteční fázi velmi rychle snižovaly.

Tabulka 11 Hodnoty Gray Value zjištěné pomocí metody Foto+Fiji

Čas t [min]	Gray Value [-]				
	F1	M1	M4	M6	M8
2	255,00	122,74	156,74	170,76	114,26
3	255,00	79,33	113,23	122,63	73,49
4	255,00	58,69	88,36	95,23	54,35
5	252,78	46,36	72,78	77,40	42,91
6	244,89	36,92	62,07	65,62	35,48
7	239,34	32,48	53,41	56,73	30,20
8	232,91	28,13	46,86	50,05	25,92
9	226,12	24,77	42,12	44,56	23,02
10	219,07	22,23	37,92	40,32	20,65
11	212,71	20,12	34,61	36,79	18,68
12	207,36	18,36	31,66	33,64	17,10
13	202,38	15,80	29,17	31,05	15,89
14	197,87	14,74	26,91	28,84	14,74
15	193,36	13,90	25,06	26,84	13,84
16	188,75	13,12	23,43	25,18	12,91
17	185,02	12,24	22,04	23,67	12,22
18	181,32	11,49	20,83	22,30	11,58
19	177,39	11,09	19,67	21,08	10,76
20	173,67	10,56	18,70	20,04	10,38
25	152,06	8,35	14,76	15,44	7,77
30	135,35	6,88	12,17	13,12	6,29



Obr. 56 Vzorky M1, M4, M6, M8 + vzorek F1 (osvit 5 min), metoda Foto+Fiji

c) Porovnání použitých metod:

U použitých metod (SpectraScan, Foto+Matlab, Foto+Fiji) byla zkoumána vzájemná závislost mezi zjištěnými hodnotami. Byla provedena korelační analýza dat z měření v min: 2, 5, 10, 15, a 19. Stručnou rekapitulaci porovnávaných metod a příslušných hodnot uvádí Tabulka 12.

**Tabulka 12 Data pro korelační analýzu**

Popis	Vzorek M1			Vzorek M4			Vzorek M6			Vzorek M8		
	Spectrascan	Foto+Matlab	Foto+Fiji	Spectrascan	Foto+Matlab	Foto+Fiji	Spectrascan	Foto+Matlab	Foto+Fiji	Spectrascan	Foto+Matlab	Foto+Fiji
Čas [min]	Jas [mcd/m <sup>2</sup> ]	Jas [mcd/m <sup>2</sup> ]	Gray_V [-]	Jas [mcd/m <sup>2</sup> ]	Jas [mcd/m <sup>2</sup> ]	Gray_V [-]	Jas [mcd/m <sup>2</sup> ]	Jas [mcd/m <sup>2</sup> ]	Gray_V [-]	Jas [mcd/m <sup>2</sup> ]	Jas [mcd/m <sup>2</sup> ]	Gray_V [-]
2	11,49	17,29	122,74	33,18	23,20	156,74	34,34	24,19	170,76	11,11	13,78	114,26
5	3,94	4,77	46,36	9,91	7,74	72,78	10,59	6,78	77,40	3,85	3,89	42,91
10	1,78	2,21	22,23	3,91	3,51	37,92	4,17	3,17	40,32	1,76	1,82	20,65
15	1,12	1,34	13,90	2,33	2,28	25,06	2,51	2,08	26,84	1,11	1,20	13,84
19	0,85	1,06	11,09	1,73	1,78	19,67	1,87	1,64	21,08	0,84	0,95	10,76

Pro popis vztahu byl použit Pearsonův korelační koeficient  $r$ . Výsledky jsou shrnuty viz Tabulka 13.

**Tabulka 13 Výsledky korelační analýzy**

Čas [min]	SpectraScan/Foto+Matlab	SpectraScan/Foto+Fiji	Foto+Matlab/Foto+Fiji
	$r$	$r$	$r$
2	0,9592	0,9773	0,9783
5	0,9372	0,9971	0,9389
10	0,9469	0,9984	0,9527
15	0,9644	0,9996	0,9621
19	0,9668	0,9998	0,9674

Zjištěné korelační koeficienty jsou ve všech případech velmi blízko hodnotě +1, což ukazuje na velmi silnou kladnou závislost. Vzájemné závislosti byly vyjádřeny také graficky. Vytvořené grafy jsou uvedeny v Příloze B a znázorňují závislost mezi zjištěnými daty v definovaných časech. Z nich je patrné, že proměnné sdílí cca 87-99 % rozptylu.

Na základě výsledků provedené analýzy, lze konstatovat že, mezi zjištěnými hodnotami jasů **SpectraScan/Foto+Matlab** existuje silná kladná lineární závislost. Důvodem rozdílnosti hodnot jasů, které jsou patrné z Tabulka 12, by mohlo být použití dvou typů osvětlení pro excitaci. Podle výsledků experimentu lze metodu testování pomocí digitálního aparátu a princip hodnocení pomocí obrazové analýzy v prostředí Matlab využít k hodnocení fotoluminiscenčních vlastností textilií. Výhodou vyhodnocení v prostředí Matlab oproti Fiji je, že získaná výsledná data jsou jasy v  $\text{cd/m}^2$ .

Dle výsledků provedené analýzy **SpectraScan/Foto+Fiji** lze potvrdit že, mezi daty je silná kladná lineární závislost. S rostoucí hodnotou intenzity jasů luminiscence byla změřena i vyšší hodnota Gray Value. Mezi daty těchto dvou metod byla zjištěna nejsilnější závislost. Lze říci, že navržená metoda Foto+Fiji dokáže s 99% přesností predikovat hodnoty intenzity luminiscence bez použití SpectraScanu. Podle výsledků experimentu lze k hodnocení fotoluminiscenčních vlastností textilií metodu testování pomocí digitálního fotoaparátu a princip hodnocení pomocí šedé škály ve Fiji využít.

Během experimentu se ukázalo problematické porovnávání pletenin (M1, M4, M6 a M8) s fotoluminiscenční folií (F1), která měla oproti pleteninám výrazně vyšší počáteční jas (20-185krát). Pro experiment byl fotoaparát nastaven tak, aby optimálně zaznamenal průběh vyhasínání luminiscence u pletenin. Při tomto nastavení se v 1.-4. min snímky F1 jeví jako bílé (Obr. 57), a proto pravděpodobně byly vyhodnoceny jako konstantní hodnoty 255, přestože SpectraScanem byly naměřeny jasy 1238,00-375,63  $\text{mcd/m}^2$ . Toto je třeba při nastavení podmínek experimentu brát v potaz.

I v případě porovnání **Foto+Matlab/Foto+Fiji** výsledky provedené korelační analýzy potvrzují že, mezi daty existuje silná kladná lineární závislost.

U všech použitých metod byly zjištěny výhody či limity. Jejich stručný výčet shrnuje Tabulka 14. Oproti SpectraScanu je výhodou testování pomocí digitálního fotoaparátu nesporně to, že je zde současně získán i obrazový záznam životnosti luminiscence. Fotografie, zejména ve formátu .CR2 nabízí širokou škálu informací k dalšímu hodnocení.



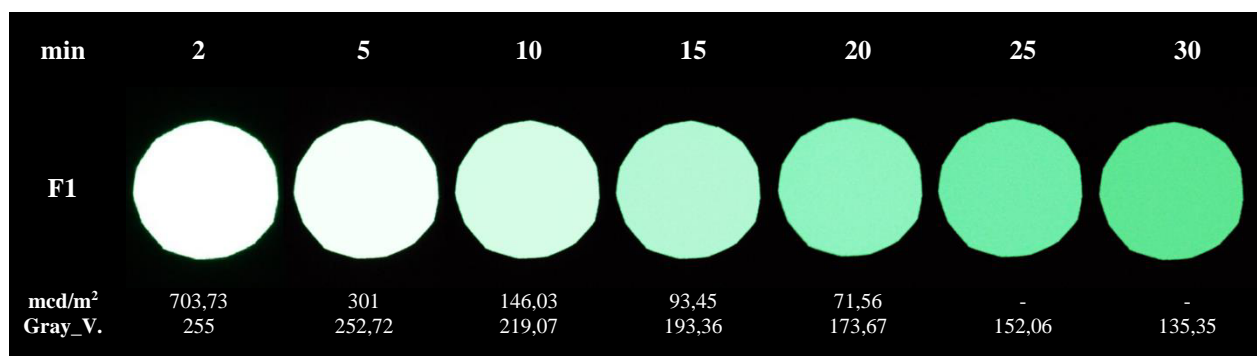
**Tabulka 14 Závěrečná zjištění o možnostech testování fotoluminiscence**

Metoda	Výhody	Nevýhody
Spektroradiometr	Výsledné hodnoty Jas [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ] Schopnost měřit nízké jasy (objektiv MS-75 až $0,0171 \text{ mcd}/\text{m}^2$ ) Lze provádět i jiná měření založená na spektrech	Pořizovací náklady U nízkých jasů dlouhý expoziční čas (čas záznamu nemusí odpovídat reálu) Není obrazový záznam
Fotoaparát+Matlab	Pořizovací náklady fotoaparátu Výsledné hodnoty Jas [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ] Více informací (data + obrazový záznam) Data v .CR2 vhodná k dalšímu zpracování	Vliv nastavení fotoaparátu (vysoké ISO vyšší šумы na fotografii) Dostupnost SW
Fotoaparát+Fiji	Pořizovací náklady fotoaparátu SW je ke stažení zdarma Více informací (data + obrazový záznam) Data v .CR2 vhodná k dalšímu zpracování	Výsledné hodnoty Gray_Value [-] Limitováno rozsahem šedé škály 0-255 (velké rozdíly jasu mezi materiály se špatně srovnávají)

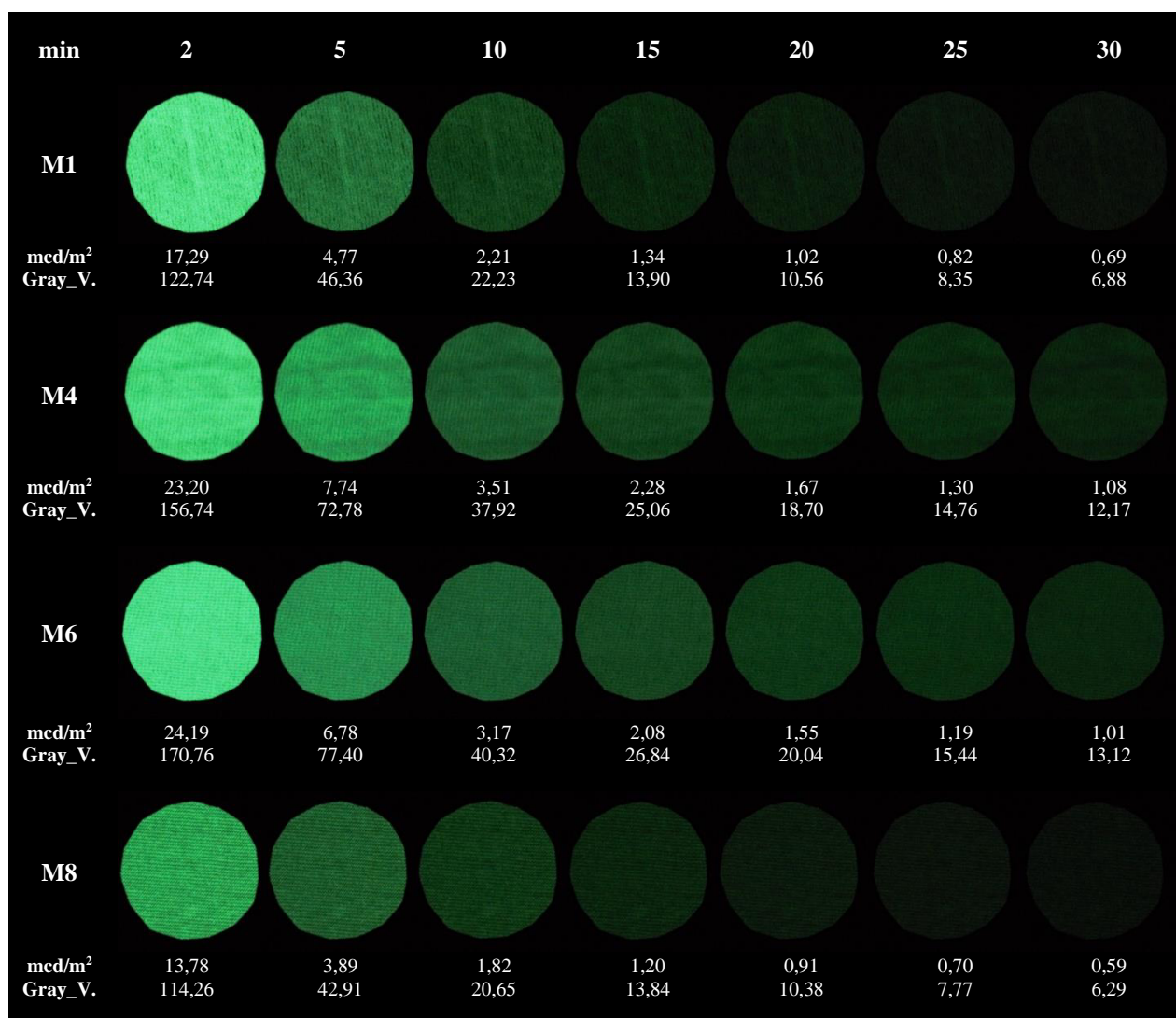
d) Vnímání hodnot jasu lidským okem:

Dále bylo pomocí získaného fotografického materiálu hodnoceno vnímání hodnoty jasu vs. hodnoty Gray Value zjištěné pomocí Fiji. Ukázkou zpracování hodnot a fotografií ve vybraných časech uvádí Obr. 57. a Obr. 58.

Na základě zjištění v rámci experimentu byla doplněna Tabulka 15 (vnímání jasu lidským okem) o hodnoty Gray Value k příslušné hodnotě jasu. S ohledem na uskutečněný počet měření v rámci tohoto experimentu se jedná o hodnoty přibližné. Pro zpřesnění je třeba provést větší počet měření.



**Obr. 57 Fotografický záznam dosvitu vzorku F1 (osvit 5 min)**



Obr. 58 Fotografický záznam dosvitu vzorků M1, M4, M6, M8 (osvit 5 min)

Tabulka 15 Vnímání hodnot jasu lidským okem

Úroveň jasu pocíťovaná člověkem	Jas [mcd/m <sup>2</sup> ]	Gray Value [-]
Vidí objekt jasně a dokáže číst písmena	200	235
Vidí objekt jasně	5	45
Rozpozná obrys objektu jasně	3	30
Dokáže rozpoznat obrys	2	25
Vidí objekt nejasně	1	12
Limit rozpoznání lidským okem	0,3	3

## 4.4 Fotografické testování viditelnosti luminiscenčního vzoru

Za účelem stanovení optimálního množství a poměru fotoluminiscenčního materiálu pro oděv s ohledem na jeho viditelnost a spotřebu luminiscenčního materiálu byl navržen experiment s využitím fotoaparátu. Tato informace je cenná pro minimalizaci nákladů za fotoluminiscenční materiál při dosažení max. účinnosti. Pro tyto účely byly z fotoluminiscenční nažehlovací folie vytvořeny různé varianty pruhovaného vzoru s různým poměrem obsahu fotoluminiscenčního a běžného materiálu.

### 4.4.1 Podmínky a charakteristika měření

#### Podstata zkoušky

Podstatou této zkoušky bylo vytvoření obrazového záznamu okem viditelného jasů fotoluminiscence pomocí fotoaparátu na definovanou vzdálenost.

#### Zkušební zařízení a pomůcky

Pro účely tohoto měření byl použitý digitální fotoaparát Canon EOS 100D + objektiv Canon EF LENS 55-200 mm f/4.5-5.6 II USM. Fotoaparát byl upevněný do stativu. K nasvícení vzorků byla použita UV lampa. Vzorky byly upevněny na černé textilii, která sloužila zároveň jako clona stěn v blízkosti foceného vzorku.

#### Digitální fotoaparát:

- Název/typ: Canon EOS 100D
- Objektiv: Canon EF LENS 55-200 mm f/4.5-5.6 II USM

#### Stativ:

- Nastavená výška: 70 cm

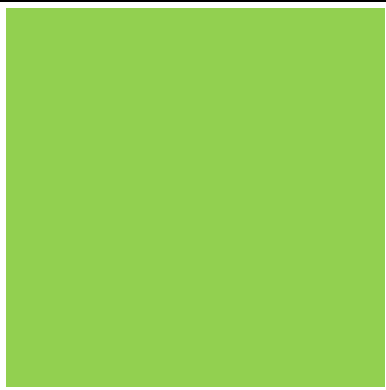

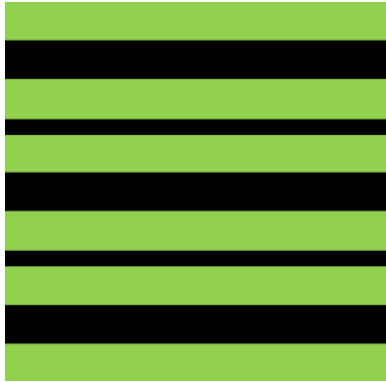
#### Širokopásmová UV lampa:

- Název/typ: NU-8 KL
- Vlnová délka: KW254 nm / LW366 nm
- Výkon: 2x8 W
- Napětí: 230 V
- Velikost filtru: 195x45 mm

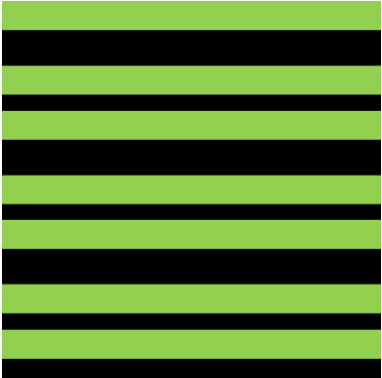
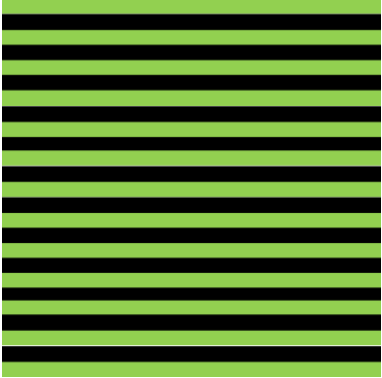
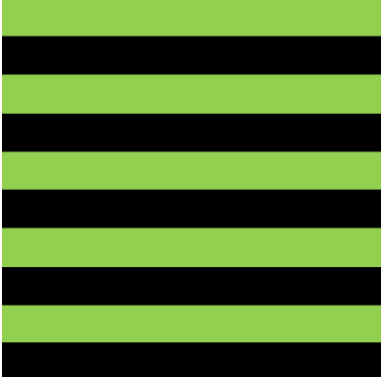
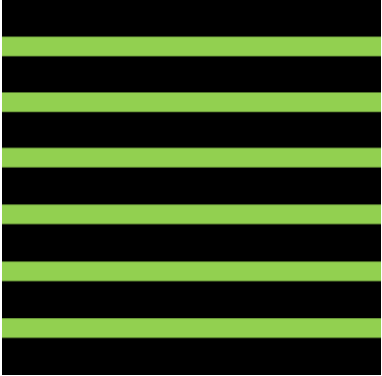
## Zkušební vzorky

Měření bylo provedeno na vzorcích vytvořených z nažehlovací fotoluminiscenční folie, která je blíže specifikována viz odst. 3.1. Z proužků této folie byly sestaveny různé varianty pruhovaného vzoru. Ty byly nažehleny na černou bavlněnou tkaninu tak, aby tvořily vzorek o rozměru 20x20 cm. Před zahájením zkoušky byly všechny vzorky klimatizovány ve tmě po dobu minimálně 24 hodin. Bližší popis a design vzorků je uveden viz Tabulka 16 a 17.

Tabulka 16 Specifikace vzorků V1, V2, V3

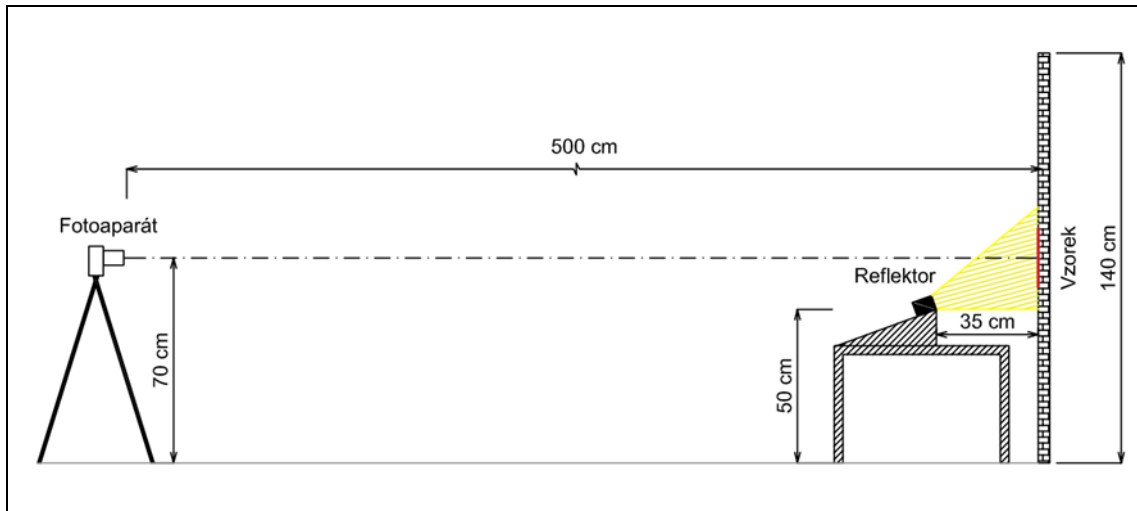
Označení vzoru	Popis / rozměr vzoru z = zelená = luminiscenční č = černá	Obrázek vzoru
V1	Souvislá plocha 20x20 cm $S_z = 400 \text{ cm}^2$	
V2	Výška proužek z = 2 cm Výška proužek č = 1 cm $S_z = 280 \text{ cm}^2$	
V3	Výška proužek z = 2 cm Výška proužek č <sub>1</sub> = 2 cm Výška proužek č <sub>2</sub> = 1 cm $S_z = 240 \text{ cm}^2$	

Tabulka 17 Specifikace vzorků V4, V5, V6, V7

Označení vzoru	Popis / rozměr vzoru z = zelená = luminiscenční č = černá	Obrázek vzoru
V4	<p>Výška proužek z = 1,5 cm                      Výška proužek č<sub>1</sub> = 1,8 cm                      Výška proužek č<sub>2</sub> = 0,8 cm</p> <p><math>S_z = 210 \text{ cm}^2</math></p>	
V5	<p>Výška proužek z = 0,8 cm                      Výška proužek č = 0,8 cm</p> <p><math>S_z = 208 \text{ cm}^2</math></p>	
V6	<p>Výška proužek z = 2 cm                      Výška proužek č = 2 cm</p> <p><math>S_z = 200 \text{ cm}^2</math></p>	
V7	<p>Výška proužek z = 1 cm                      Výška proužek č = 2 cm</p> <p><math>S_z = 120 \text{ cm}^2</math></p>	

## Podmínky měření

Experiment byl realizován v zatemněné místnosti bez oken a bez použití osvětlení. Teplota v místnosti 13 °C. Stejná geometrie měření pro všechny vzorky byla zajištěna uchycením vzorků pomocí špendlíků na pracovní ploše vyznačené na pomocné černé textilií, která sloužila zároveň jako clona bílých stěn. Schématické rozvržení experimentu je znázorněno na Obr. 59.



Obr. 59 Schéma rozvržení experimentu

Na fotoaparátu bylo použito následující nastavení:

- Závěrka clony: f/5.6
- Délka expozice: 2“
- ISO: 800
- Ohnisková vzdálenost: 70 mm
- Ostření: ručně
- Režim expozimetru: maticové měření
- Blesk: bez blesku
- Formát: JPG

Toto nastavení bylo zvoleno na základě několika zkušebních měření. Fotografie pořízené s tímto nastavením nejlépe odpovídaly tomu, jak byl vzorek vnímán lidským okem.

#### UV lampa byla umístěna před vzorek:

- Vzdálenost od vzorku: 35 cm
- Vlnová délka: LW366 nm
- Intenzita záření: 950  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- Doba osvětlení: 5 minut

#### Dále byly pro experiment nastaveny parametry:

- Plocha textilie snímaná fotoaparátem: čtverec 20x20 cm
- Vzdálenost vzorku od objektivu: 500 cm
- Zahájení fotografování: bezprostředně po skončení excitace
- Interval fotografování: 5 min  
(resp. v min. 0; 0,5; 1; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60)

### **4.4.2 Postup měření**





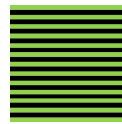




































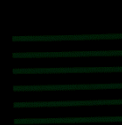










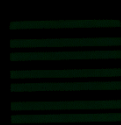
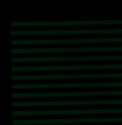



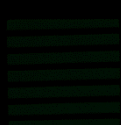

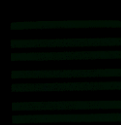



Vzorky na sebe byly navrstveny a jednotlivě uchyceny na vymezené místo na černé textilní cloně. Každý vzorek byl samostatně překryt světlo nepropouštějící folií. Tak byla zajištěna rychlá manipulace se vzorky ve tmě bez nežádoucího osvětlení. Ihned po uplynutí definované doby excitace a zhasnutí světla bylo zahájeno fotografování. Průběh vyhasínání byl snímán digitálním fotoaparátem v daných intervalech. Po skončení fotografování byl naměřený vzorek z textilní clony odejmut a z následného vzorku byla odstraněna krycí folie. Tento postup byl aplikován postupně na všechny připravené vzorky. Snímky byly následně uloženy a zpracovány v PC.

### **4.4.3 Výsledky měření a vyhodnocení**

Tabulka 18 ukazuje fotograficky zachycené změny viditelnosti jednotlivých vzorů v průběhu vyhasínání luminiscence. Při vyhodnocování bylo zjištěno, že vnímání fotografií může být ovlivněno použitým monitorem PC. Následující popis odpovídá vnímání lidského oka v reálu. V 1. minutě bylo pozorováno, že všechny vzory byly velmi jasně a ostře viditelné. Do 10. minuty bylo poměrně dobře možné rozeznat obrysy u všech sedmi vzorů. Ve 20. minutě byly obrysy všech vzorů ještě dobře rozpoznatelné. Od 35. minuty byly v reálu vzory viditelné spíše hůře. V tomto okamžiku byl patrný vliv velikosti vzoru. Vzorky V5 a V7, které mají výšku luminiscenčního proužku 0,8-1 cm byly viditelné nejhůře. Ve zbývajícím čase byl zaznamenán pokles viditelnosti u všech vzorků spíše pomalý. V posledních minutách experimentu byly vzory V2, V3, a V6

s výškou luminiscenčního pruhu 2 cm ještě viditelné, avšak jednotlivé obrysy byly viditelné spíše obtížně. V 60. minutě byl překvapivě nejasně viditelný i vzorek V1 (souvislá plocha).

**Tabulka 18** Průběh vyhasínání a vnímání vzorů zrakem

		Vzorky						
(vzor)								
Čas t [min]	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	
1								
5								
10								
20								
35								
40								
45								
60								



V reálu bylo lidským okem lépe než z fotografií patrné, že vzory, kde se střídají luminiscenční/černé pruhy výšky 2/2 a 1,5/1,8 cm jsou nejlépe rozeznatelné. S ohledem na viditelnost a obsah plochy luminiscenčního materiálu dosáhl nejlepšího subjektivního hodnocení vzorek V6. Tento vzorek na ploše 400 cm<sup>2</sup> obsahuje 200 cm<sup>2</sup> luminiscenčního materiálu. Jako druhý nejlépe vnímaný vzor byl V3, který při stejné ploše vzorku obsahuje 240 cm<sup>2</sup> luminiscenčního materiálu. Vzorky, u kterých se střídaly proužky 0,8-1/0,8-1 cm byly vnímané hůře. Vzorek V5 s obsahem 208 cm<sup>2</sup> luminiscenčního materiálu byl na konci experimentu okem velmi obtížně rozpoznatelný.

## 5 Diskuze výsledků

Pro zjištění intenzity vyzařování luminiscence a jejího vyhasínání u nově vyvinutých pletenin vyrobených z fotoluminiscenčních přízí, byl navržen experiment v laboratorních podmínkách s využitím spectroradiometru SpectraScan PR740. Následně bylo zjišťováno, jak doba osvitů (5 a 15 min) ovlivnila intenzitu luminiscence a dobu jejího vyhasínání.

Jako možná alternativa k relativně drahému přístroji SpectraScan byla nově navržena metoda testování fotoluminiscenčních vlastností textilií pomocí digitálního fotoaparátu (měření pomocí fotoaparátu + 2 metodiky vyhodnocení fotografií).

Dále byl proveden experiment pomocí digitálního fotoaparátu pro zhodnocení viditelnosti s ohledem na použité množství fotoluminiscenčního materiálu. Pro tyto účely byly navrženy různé varianty pruhovaných vzorů se záměrem zjistit optimální kombinaci a poměr velikosti plochy luminiscenčního vs. neluminiscenčního materiálu.

### Měření č. 1 – měření fotoluminiscence pomocí spectroradiometru

Cílem tohoto měření bylo zhodnotit intenzitu fotoluminiscenčního záření a průběh jeho vyhasínání u vzorků pletenin (M1-M10). Pro porovnání byla do testu zahrnuta také fotoluminiscenční nažehlovací fólie (F1). Byl hodnocen vliv parametrů pleteniny na fotoluminiscenční vlastnosti.

Výsledky ukázaly, že po 5minutovém osvitě dosahují pleteniny v 1. min od ukončení excitace cca 20–185krát nižší intenzity jasu než F1. Nejvyšší intenzita byla zjištěna u vzorků M6 a M4 (oba bílé barvy). Nejhorší výsledek byl zjištěn u vzorku M2 (žlutá barva). Byl pozorován průběh vyhasínání s počáteční fází s rychlým poklesem a následnou fází pomalejšího a pozvolného útlumu. Dále bylo podrobněji sledováno, zda u vzorků stejné barvy ovlivňuje intenzitu jasu luminiscence jemnost a barva použité příze.

Bylo zjištěno, že pleteniny vyrobené z příze o hrubší jemnosti vykazují lepší luminiscenční vlastnosti. Rozdíl v počáteční hodnotě intenzity jasu u pleteniny o jemnosti 300 dtex a 150 dtex je cca 40-50 %. Zjištěný rozdíl mezi fotoluminiscenční nažehlovací folií (F1) a pleteninami (M1-M10) by mohl být způsoben koncentrací fotoluminiscenčního pigmentu ve folii a celistvostí jejího povrchu oproti struktuře pleteniny. Na fakt, že z hlediska viditelnosti je folie účinnější než krycí steh, poukázala ve své práci Mejsnarová [26], která navrhla a testovala oděvy s aplikací této

fotoluminiscenční folie a výšivky s krycím stehem z fotoluminiscenční příze. Úvahu, že vrstva a celistvost povrchu luminiscenčního materiálu má vliv na intenzitu a dosvit podporuje také zjištění Li a kol. [21], kteří zkoumali parametry vzoru fotoluminiscenční výšivky. Jejich výsledky poukazují na to, že typ stehu, rozteč stehů a superpozice stehů mají vliv na intenzitu i životnost luminiscence, a že velikost rozteče stehů je nepřímo úměrná intenzitě. Z hlediska co nejlepší viditelnosti chodce v silničním provozu lze tedy k výrobě oděvu doporučit spíše pleteninu vyrobenou z fotoluminiscenční příze o hrubší jemnosti.

Vliv barvy nebyl jednoznačně potvrzen. Bílé vzorky oproti zeleným měly lepší počáteční jas u jemností 300 dtex (+18 %) a 210 dtex (+36 %). Naopak zelené vzorky oproti bílým vykazovaly vyšší počáteční jasy u jemností 150 dtex (+7 %) a 167 dtex (+5 %).

## **Měření č. 2 – zjišťování vlivu delší doby osvitů na intenzitu a vyhasínání luminiscence**

V rámci tohoto měření byl u vybraných vzorků zaznamenáván průběh vyhasínání za účelem zjistit vliv delší doby osvitů na intenzitu jasu a schopnost vyhasínání luminiscence. Doba osvitů byla prodloužena na 15 min a doba měření na 60 min. Na základě výsledků z měření č. 1 byly k tomuto experimentu zvoleny pouze vzorky bílé barvy (M1, M4, M6 a M8).

Obdobně jako u měření č. 1 bylo zjištěno, že vzorky vykazují podobný průběh vyhasínání, tj. počáteční fáze (cca do 5 min) s rychlým poklesem a následně velmi pozvolné vyhasínání. Bylo předpokládáno, že při osvitů 15 min budou vzorky vykazovat vyšší hodnoty jasu než při osvitů 5 min, což bylo potvrzeno. Větší vliv delší doby osvitů byl patrný spíše v oblasti pozvolného vyhasínání (Obr. 36). Zjištěné hodnoty se s ohledem na délku osvitů průměrně liší v 2.-5. min cca o 10 %, v 10. min o cca 30 % a v 15.-20. min o cca 35 %. V 60. min u všech vzorků hodnoty intenzity jasu stále dosahovaly nad hodnotu  $0,3 \text{ mcd/m}^2$ , o které hovoří norma [18] jako o limitu rozpoznání lidským okem. Výpočtem bylo predikováno, že vzorky by pro pozorovatele byly pravděpodobně viditelné po dobu 25-28 min (při osvitů 5 min) a 72-75 min (při osvitů 15 min), kdy by jejich jas patrně dosáhl hodnoty  $0,3 \text{ mcd/m}^2$ . Dle výsledků je možno konstatovat, že 5 min osvitů navíc může dobu viditelnosti prodloužit o cca 25 min.

Velmi podobný trend křivky vyhasínání popisuje ve své studii i Chen a kol. [25], kteří testovali životnost luminiscence příze z fotoluminiscenčního vlákna  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  o různých hmotnostních koncentracích  $\text{SiO}_2\text{RECC}$ . Uvádí zde, že testovaná příze po 15. min osvitu vyzařuje luminiscenci cca 3-5 hod v závislosti na koncentraci luminiscenční složky. Není zde ale blíže specifikováno, v jakém stavu ani v jaké vrstvě byla příze měřena. Jak bylo výše řečeno vrstva luminiscenčního materiálu má vliv na intenzitu a dobu vyhasínání luminiscence. Pokud byla příze na špulce navinutá v několika vrstvách, mohlo by to rozdílnost výsledků predikované doby vyzařování luminiscence vysvětlovat. Skutečnost, že svítivost luminiscenčních vláken v čase klesá s oblastí rychlého vyhasínání a s oblastí pomalého vyhasínání, uvádí ve své práci také Yan a kol. [22]. Při návrhu oděvu zvyšující bezpečnost chodce za tmy pomocí aplikace fotoluminiscenční pleteniny, je třeba uvedená zjištění zohlednit s ohledem na dobu osvitu a dobu pohybu v silničním provozu.

### **Měření č. 3 – měření v domácích podmínkách pomocí fotoaparátu**

Cílem tohoto měření bylo navrhnout fotografickou metodu hodnocení fotoluminiscenčních vlastností textilií. Pomocí digitálního fotoaparátu byla zaznamenána intenzita luminiscence a průběh jejího vyhasínání. Následně bylo analyzováno, zda jsou výsledky z fotografické metody srovnatelné s výsledky ze SpectraScanu (viz měření č. 1). K účelům experimentu v domácích podmínkách byl zkonstruován měřicí box sloužící k eliminaci vlivu nežádoucího osvětlení vzorků. Zpracování fotografických snímků bylo provedeno dvěma způsoby prostřednictvím:

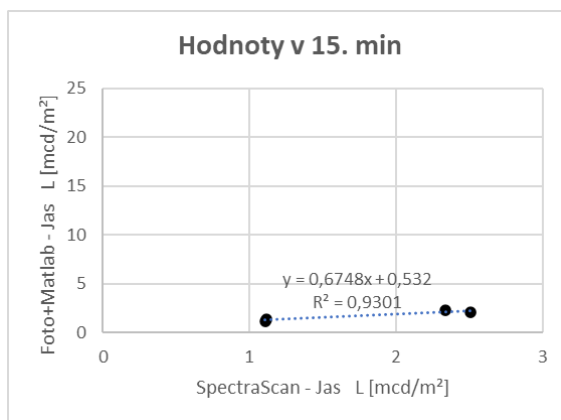
a) obrazové analýzy v prostředí Matlab;

b) obrazové analýzy v prostředí Fiji, kterou ve své práci využila Mejsnarová [26] k vyhodnocení fotografií krycího stehu a výšivky z fotoluminiscenční příze.

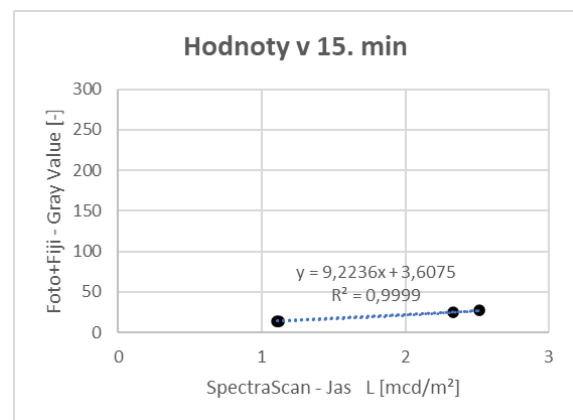
U všech použitých měřících metod byly zjištěny jistá omezení a limity. Měření pomocí SpectraScanu se zdá být vhodnější spíše pro měření vysokých jasů. U nízkých jasů se prodlužoval expoziční čas, než přístroj hodnotu jasu zaznamenal a tím docházelo k nepřesnostem měření. Čas pořízení záznamu hodnoty jasu neodpovídal reálnému času. U fotografické metody je stěžejní správné nastavení parametrů fotoaparátu. Je nutné zvolit nastavení tak, aby fotografie reálně zachytila obraz, jak ho vnímá lidské oko a zároveň aby byla použitelná pro obrazovou analýzu. Při nízkých jasech hrozí nežádoucí vliv šumu. Ukázalo se, že je vhodnější nastavit spíše ISO 3200 nežli ISO 16000. Výhodou

testování pomocí digitálního aparátu je nesporně to, že je zde i obrazový záznam průběhu vyhasínání luminiscence. Fotografie ve formátu .CR2 nabízí širokou škálu informací k dalšímu hodnocení. Hlavní zjištěné výhody a limity všech tří použitých metod shrnuje Tabulka 14 viz výše.

Výsledky metody Foto+Matlab i metody Foto+Fiji ukazují, že intenzita jasu se snižuje s dobou doznívání a křivka vyhasínání má velmi podobný tvar jako u měření pomocí SpectraScanu. Ze získaných dat byla provedena korelační analýza, která předpoklad možnosti aplikace fotografické metody potvrdila. Nejlepší výsledek byl zjištěn u metody Foto+Fiji (testování pomocí digitálního fotoaparátu a princip hodnocení pomocí šedé škály ve Fiji). Dosažené výsledky ukazují, že navržená metoda Foto+Fiji dokáže s 99% přesností predikovat hodnoty intenzity luminiscence bez využití spektrometru. Obr. 60 a Obr. 61 zobrazují závislost dat v 15 min měření.



**Obr. 60** Ověření závislosti mezi daty SpectraScan/Foto+Matlab



**Obr. 61** Ověření závislosti mezi daty SpectraScan/Foto+Fiji

V rámci dalšího vylepšení metodiky vyhodnocení pomocí obrazové analýzy ve Fiji by bylo vhodné dopracovat převod hodnot Gray\_Value na hodnoty jasu.

### **Fotografické testování viditelnosti luminiscenčního vzoru**

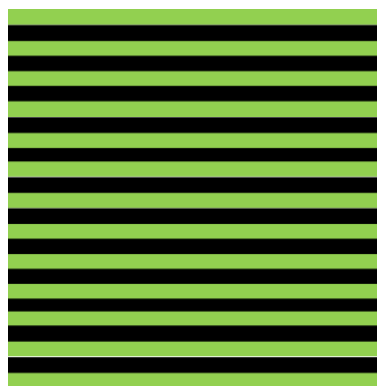
Za účelem určení optimálního množství a poměru fotoluminiscenčního materiálu pro oděv s ohledem na viditelnost a spotřebu, byl navržen experiment s využitím fotoaparátu. Cílem tohoto měření bylo vytvořit z fotoluminiscenční nažehlovací folie (totožný materiál jako vzorek F1) varianty pruhovaného vzoru s různým poměrem obsahu fotoluminiscenčního a běžného materiálu, a zjistit který vzor je optimální z hlediska jeho viditelnosti a spotřeby fotoluminiscenčního materiálu. Experiment byl prováděn

v zatemněném prostoru. Kde byl na vzdálenost 5 m fotograficky zaznamenáván průběh vyhasínání luminiscence.

Přestože byl fotoaparát na základě několika zkušebních měření nastaven, aby co nejméně zachytil obraz tak jak byl pozorován v reálu, bylo následně při vyhodnocování zjištěno, že vnímání obrazu z fotografií může být ovlivněno použitým monitorem PC. V reálu bylo lidským okem lépe než z fotografií patrné, že vzory se střídáním luminiscenčních/černých pruhů výšky 2/2 a 1,5/1,8 cm, jsou lépe rozeznatelné než 0,8-1 cm. S ohledem na viditelnost a obsah plochy luminiscenčního materiálu dosáhl nejlepšího subjektivního hodnocení vzorek V6 (Obr. 62). Tento vzorek na ploše 20x20 cm obsahuje 200 cm<sup>2</sup> luminiscenčního materiálu. Nejhůře byl hodnocen vzorek V5 (Obr. 63) s obsahem 208 cm<sup>2</sup> luminiscenčního materiálu.



Obr. 62 Vzorek V6 (pruh 2/2 cm)



Obr. 63 Vzorek V5 (pruh 0,8/0,8 cm)

Ačkoliv bylo zjištěno, že pleteniny vykazují nižší hodnoty intenzity jasu než fotoluminiscenční folie, Mejsnarová [26] poukazuje na diskomfort při oblékání oděvu s nažehlenými pruhy právě z této fotoluminiscenční folie. Problém byl zejména pokud byla folie nažhelená v partiích, kde je žádoucí, aby oděv pružil. Výhodou použití pleteniny ke zhotovení oděvu jakožto prvku zvyšující viditelnost chodce v silničním provozu by mohla být právě její pružnost a schopnost přizpůsobit se postavě. Z tohoto důvodu se využití fotoluminiscenční pleteniny k aplikaci pro oděv jeví jako vhodné řešení. Pokud by oděv pokrýval dostatečnou souvislou plochu postavy, mohl by být chodec pro řidiče mnohem lépe viditelný.

## Závěr

Pro hodnocení luminiscenčních vlastností textilií byly v rámci této práce měřeny pleteniny nově vyvinuté na Katedře oděvnictví Technické univerzity v Liberci vyrobené z fotoluminiscenčních přízí obsahující fotoluminiscenční pigment na bázi kovů alkalických zemin hlinitanu stroncia. Jejich aplikace má význam, protože mají potenciál stát se prostředkem k zajištění výrazně vyšší viditelnosti chodce v silničním provozu za tmy. Oděv z těchto pletenin by mohl být prvkem zvyšující bezpečnost a zároveň splnit nároky zákazníka jak na estetiku, tak i na oděvní komfort.

V této práci byl zjišťován vliv parametrů pleteniny z fotoluminiscenční příze na intenzitu vyzařování luminiscence, schopnost jejího vyhasínání a účinek doby osvitu. Byly zjištěny následující výsledky. Křivky vyhasínání fotoluminiscence ukazují, že intenzita jasu klesá s dobou doznívání s oblastí rychlého a pomalého vyhasínání. Největší pokles jasu je cca do 5. min a následně je vyhasínání velmi pozvolné. Jemnost příze, má vliv na intenzitu vyzařování luminiscence pletenin. Pleteniny z příze o jemnosti 300 dtex vykazují o 40-50 % vyšší počáteční jas než z příze o jemnosti 150 dtex. Vliv barvy nebyl jednoznačně prokázán. Delší doba osvitu zvýší intenzitu jasu a prodlouží dobu vyhasínání. Větší vliv delšího nasvícení byl zjištěn spíše v oblasti pozvolného vyhasínání. Lze konstatovat, že 5 min osvitů navíc, může dobu viditelnosti prodloužit o cca 25 min. Z hlediska co nejlepší viditelnosti za tmy lze tedy k výrobě oděvu doporučit pleteninu vyrobenou z fotoluminiscenční příze spíše hrubší jemnosti. Bylo by zajímavé zhodnotit, jak luminiscenční vlastnosti ovlivní typ použité vazby, případně roztažnost pleteniny.

Dále byla navržena metoda měření fotoluminiscenčních vlastností textilií pomocí digitálního fotoaparátu. K vyhodnocení fotografického záznamu luminiscence byly využity dva typy obrazové analýzy. Výsledky porovnávání přístrojové a fotografické metody ukázaly, že k hodnocení intenzity luminiscenčního záření a průběhu vyhasínání lze digitální fotoaparát využít. Navržená fotografická metoda je alternativou cenově poměrně nákladné speciální měřicí techniky. Dosažené výsledky ukazují, že navržená metoda Foto+Fiji (testování pomocí digitálního fotoaparátu a princip hodnocení pomocí obrazové analýzy ve Fiji) dokáže s 99% přesností predikovat hodnoty intenzity luminiscence bez využití spektrometru. Kromě vyšší dostupnosti, je hlavní výhodou této metody, že nad rámec získaných hodnot je současně k dispozici i obrazový záznam průběhu vyhasínání. V rámci dalšího vylepšení metodiky vyhodnocení pomocí obrazové analýzy ve Fiji by bylo vhodné dopracovat převod hodnot Gray\_Value na hodnoty jasu.

Ze subjektivního hodnocení viditelnosti pruhovaného vzoru s ohledem na obsah fotoluminiscenčního materiálu vyplývá, že vzory se střídáním luminiscenčních/černých pruhů 2/2 cm, jsou lépe rozeznatelné než vzory s pruhy 0,8/0,8 cm. Nejlépe byl hodnocen vzorek s pravidelným střídáním luminiscenčních/černých pruhů výšky 2/2 cm, který na ploše 20x20 cm obsahuje 200 cm<sup>2</sup> luminiscenčního materiálu. Výsledky tohoto experimentu je možné využít při návrhu oděvu a stanovení optimálních výrobních nákladů z hlediska spotřeby fotoluminiscenčního materiálu a účinnosti luminiscence. Funkčnost navrženého oděvu by bylo vhodné ověřit v reálných podmínkách.



## Použitá literatura

- [1] Zákon č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů.
- [2] Bezpečné cesty. *Autoškola: Autoškola v noci*. [Online] © 2014–2021. [Citace: 2. 9. 2021] Dostupné z: <https://www.bezpecnecesty.cz/cz/autoskola/teoreticke-znalosti/autoskola-v-noci>.
- [3] Servind. *Novinky a zajímavosti. Tipy pro řidiče v zimním období*. [Online] © 2021. [Citace: 2. 9. 2021] Dostupné z: <https://www.servind.cz/tipy-pro-ridice-na-zimni-obdobi>.
- [4] Altima. *Proč reflexní prvky*. [Online] © 2021. [Citace: 2. 9. 2021] Dostupné z: <https://www.altima.cz/clanek/8-proc-reflexni-prvky.html>.
- [5] KŘEMENÁKOVÁ, Dana, MILITKÝ, Jiří a spol. Hybrid Illumination Systems for Safety Applications. [autor knihy] Rajes MISHRA a Jiří MILITKÝ. Recent trends in fibrous material science. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019.
- [6] SCILIF s.r.o., 2016. Aktivní bezpečnostní oděvní doplněk nebo prostředek liniového osvětlu. Česká republika: Užitečný vzor CZ 29659 U1. 25.7.
- [7] Bezpečné cesty. *Články: Aktivní cyklo bunda z liberecké univerzity*. [Online] © 2014–2021. [Citace: 2. 9. 2021] Dostupné z: <https://www.bezpecnecesty.cz/cz/clanky/19-aktivni-cyklo-bunda-z-liberecke-univerzity>.
- [8] Radiožurnál. *Reflexní prvky budou pro chodce za zhoršené viditelnosti povinné*. [Online] © 1997-2021. [Citace: 2. 9. 2021] Dostupné z: <https://radiozurnal.rozhlas.cz/reflexni-prvky-budou-pro-chodce-za-zhorsene-viditelnosti-povinne-6257949>.
- [9] Northrock. Vesta Glowtex Executive. [Online] © 2021. [Citace: 2. 9. 2021] Dostupné z: <https://northrock.com.sg/Glowtex-Executive-Vest.html>.
- [10] ČSN EN ISO 20471:2013. *Oděvy s vysokou viditelností - Zkušební metody a požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [11] ČSN EN 1150 (83 2821). *Ochranné oděvy - Výstražné oděvy s vysokou viditelností pro neprofesionální použití - Metody zkoušení a požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [12] Reflective apparel. ANSI/ISEA 107-2015 Made Easy A Quick Reference to High-Visibility Safety Apparel. [Online] 3M, © 2016. [Citace: 11. 9. 2021] Dostupné z: <https://www.reflectiveapparel.com/ansi-isea-107-2015.aspx>.
- [13] PARK, Soonja. An evaluation of the suitability of fluorescent fabrics and retroreflective materials for road traffic warning clothing in compliance with international standards. *Fashion and Textiles*. 6(34), 1-15, 2019, doi.org/10.1186/s40691-019-0190-4.
- [14] KHATTAB, Tawfik et al. Development of Illuminant Glow-in-the-Dark Cotton Fabric Coated by Luminescent Composite with Antimicrobial Activity and Ultraviolet Protection. *Journal of Fluorescence*. 29 (6), 703-710, 2019, ISSN: 1053-0509.

- [15] DVOŘÁK, Lubomír a KUPKA, Zdeněk. *Fyzikální podstata a využití luminiscence*. Praha: SPN - pedagogické nakladatelství, 1980. ISBN 14-359-80.
- [16] PELANT, Ivan a VALENTA, Jan . *Luminiscence doma, v přírodě a v laboratoři*. Praha: Academia, 2014. ISBN 978-80-200-2394-0.
- [17] FIŠAR, Zdeněk. Principy fluorescenční spektroskopie. *Fluorescenční spektroskopie v neurovědách*. [Online] červenec 2009. [Citace: 6. srpen 2021] Dostupné z: <http://www1.fl1.cuni.cz/~zfishar/fluorescence/Default.htm>.
- [18] DIN 67510-1. Langnachleuchtende Pigmente und Produkte: Teil 1: Messung und Kennzeichnung beim Hersteller. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2020.
- [19] CIBIČEK, Norbert, VACEK, Jan a kol. *Principy a využití vybraných analytických metod v laboratorní medicíně*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. SBN 978-80-244-3951-8.
- [20] Spektroskopie: Měření doby života. Web OptiXs. [Online] OptiXs, © 2021. [Citace: 02. září 2021] Dostupné z: <https://www.optixs.cz/aplikace-53/spektroskopie-145/mereni-doby-zivota-95>.
- [21] LI, Jing, Zhi CHEN a Mingqiao GE. Computer-aided design of luminous fiber embroidered fabric and characterization of afterglow performance. *Textile Research Journal*. 86(11) 1162–1170, 2016, ISSN 0040-5175.
- [22] YAN, Yanhong, Bingfei GU, Lei DU a Yanan ZHU. Study on the equivalent luminance of luminous fibers in mesopic vision. *The Journal of The Textile Institute*. 110(2), 311-316, 2018, ISSN 0040-5000.
- [23] GUO, Xuefeng, Keqin ZHANG, Hongwei ZHANG a Mingqiao GE. Working Conditions on the Afterglow Characteristics of Rare-earth Luminous Fibers. *Fibers and Polymers*. 19(3), 531-537, 2018, ISSN 1229-9197.
- [24] PANG, Zengyuan, Yanan ZHU a Mingqiao GE. Study on the structural and luminous properties of two kinds self-luminous fi. *The Journal of The Textile Institute*. 111(3), 345-351, 2020, ISSN: 0040-5000.
- [25] CHEN, Zhi, Qing CHENG, Huizhen KE et al. Preparation and luminescent properties of multicolored SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu<sup>2+</sup>, Dy<sup>3+</sup>/SiO<sub>2</sub>-coated red-emitting coumarin color converter/polyamide 6 luminous fiber with warm-toned luminescence. *Textile Research Journal*. 90(15–16) 1783–1791, 2020, DOI: 10.1177/0040517519900934.
- [26] MEJSNAROVÁ, Kateřina. *Schopnost vyhasínání luminiscence fotoluminiscenčních šicích nití*. Liberec, 2021. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta textilní. Katedra oděvnictví.
- [27] SALAČOVÁ, Denisa. *Vliv barvy podkladu na luminiscenční efekt navrženého vzoru*. Liberec, 2013. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta textilní. Vedoucí práce Martina Viková.
- [28] ISA Texlight. [Online] AMANN GROUP, © 2021. [Citace: 10. 4. 2021] <https://www.amann.com/cz/vyroby/product/isa-texlight/>.

- [29] Lanex. *Luminiscenční MULTITEX*. [Online] [Citace: 12. 9. 2021] Dostupní z: <https://www.lanex.cz/cs/luminiscencni-multitex/p-242/>.
- [30] CoatsKnit Lucence. CoatsKnit Lucence is a Polyester Drawn Textured Yarn (DTY), with a Glow-In-The-Dark luminescent effect. [Online] © 2021. [Citace: 12. 9. 2021] Dostupné z: <https://coats.com/en/Products/Yarns/CoatsKnit/CoatsKnit-Lucence#brand-family>.
- [31] IYER, Sweta. Luminescent textiles using biobased products - A bioinspired approach. Borås: Etcetera, 2020. ISBN 978-91-88838-85-8.
- [32] The Speciality group. Photo-Luminescent Materials: Energlo Information Sheet. [Online] © 1978 - 2021. [Citace: 12. 9. 2021] Dostupné z: <https://www.specialty.com.au/fabrics/industrial-materials/item/38-photo-luminescent-materials>.
- [33] Chinareflective. Products. [Online] [Citace: 12. 9. 2021] Dostupné z: <https://www.chinareflective.com/product/main.html>.
- [34] Lucedentro. NEWS: Photoluminescent fabrics by LUCEDENTRO – EUROBIKE 2013-12-03. [Online] 2021. [Citace: 12. 9. 2021] Dostupné z: <https://www.lucedentro.com/en/news-en/lucedentro-in-alienskin-eurobike-2013-2/>.
- [35] Mphotoluminescent. Products: Photoluminescent reflexive fabric: Photoluminescent fabric. [Online] © 2010-2019. [Citace: 12. 9. 2021] Dostupné z: <https://www.mphotoluminescent.com/photoluminescent-fabric-day.html>.
- [36] Mphotoluminescent. Products: Photoluminescent reflexive fabric: Photoluminescent Reflective Lattice. [Online] © 2010-2019. [Citace: 12. 9. 2021] Dostupné z: <https://www.mphotoluminescent.com/photoluminescent-reflective-lattice.html>.
- [37] Alibaba. Reflective Material: glow in the dark high visibility 2020 new product clear glow in the dark piping for bags with high quality. [Online] © 1999-2021. [Citace: 12. 9. 2021] Dostupné z: [https://www.alibaba.com/product-detail/glow-in-the-dark-high-visibility\\_62492475044.html?spm=a2756.order-detail-ta-ta-b.0.0.4d922fc261dBVw](https://www.alibaba.com/product-detail/glow-in-the-dark-high-visibility_62492475044.html?spm=a2756.order-detail-ta-ta-b.0.0.4d922fc261dBVw).
- [38] Mphotoluminescent. Products: Photoluminescent self-adhesive film: Thermal Transfer Film. [Online] © 2010-2019. [Citace: 12. 9. 2021] Dostupné z: <https://www.mphotoluminescent.com/thermal-transfer-film.html>.
- [39] Promex. *GLOWTEX výstražné oděvy: G465* - Bunda 3 v 1 Glowtex. [Online] © 2021. [Citace: 12. 9. 2021] Dostupné z: <https://www.promex.cz/ochranne-pracovni-pomucky/g465-bunda-3-v-1-glowtex-p31943/254180/254248/>.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Výhled řidiče z automobilu na vozovku ve dne, v noci a za mlhy [2; 3] .....	11
Obr. 2 Viditelnost chodce v noci v závislosti na barevnosti oděvu [4] .....	12
Obr. 3 Reflexní cyklistická bunda s bodovými zdroji osvětlení [5; 7] .....	13
Obr. 4 Ukázka použití fluorescenční textilie – reflexní vesta [4] .....	14
Obr. 5 Ukázka oděvu s reflexním prvkem [8] .....	14
Obr. 6 Pracovní vesta s retroreflexní a fotoluminiscenční páskou [9] .....	15
Obr. 7 Princip hybridního luminiscenčního prvku [5] .....	16
Obr. 8 Ilustrace luminiscenční reakce .....	19
Obr. 9 Forma Jablonského diagramu – schéma zářivých a nezářivých přechodů mezi elektronově vibračními stavy [17] .....	20
Obr. 10 Schéma obecného uspořádání fotoluminiscenční aparatury .....	23
Obr. 11 Vyšivací nit Isa Texlight [28] .....	32
Obr. 12 Fotoluminiscenční vlákno MULTITEX [29] .....	32
Obr. 13 Ukázka využití CoatsKnit <sup>TM</sup> Lucence na výrobu svrchní části sportovní obuvi [30] .....	33
Obr. 14 Fotoluminiscenční textilie Energlo [32] .....	33
Obr. 15 Textilie kombinující reflexní a fotoluminiscenční vlastnosti [33] .....	34
Obr. 16 Ukázka využití fotoluminiscenční textilie na cyklistickou bundu [34] .....	34
Obr. 17 Fotoluminiscenční reflexní páska za denního světla, při luminiscenci a retroreflexi [35] .....	35
Obr. 18 Ukázka použití fotoluminiscenční reflexní pásky na oděvu [35] .....	35
Obr. 19 Fotoluminiscenční reflexní mřížková páska [36] .....	36
Obr. 20 Fotoluminiscenční paspulka [37] .....	36
Obr. 21 Fotoluminiscenční nažehlovací folie [38] .....	37
Obr. 22 Ukázka pracovního oděvu s fosforescenční páskou Glowtex <sup>TM</sup> [9; 39] .....	37
Obr. 23 fotoluminiscenční folie (a) před a (b) 2 min po nasvícení .....	40
Obr. 24 Sestava zařízení pro měření luminiscence .....	46
Obr. 25 Uchycení vzorku .....	46
Obr. 26 Průběh vyhasínání luminiscence (pleteniny + referenční páska) .....	49
Obr. 27 Průběh vyhasínání luminiscence (pleteniny + referenční páska) – log měřítko .....	49
Obr. 28 Průběh vyhasínání luminiscence (jen pleteniny) .....	50
Obr. 29 Vzorky bílé barvy .....	51
Obr. 30 Vzorky zelené barvy .....	52
Obr. 31 Vzorky multifil 150 dtex .....	52
Obr. 32 Vzorky staplová příze 210 dtex .....	53
Obr. 33 Vzorky nízkoroztažný multifil 300 dtex .....	53
Obr. 34 Vzorky micromodal + VS crabyon 167 dtex .....	54
Obr. 35 Vzorky bílé barvy M1, M4, M6, M8 (osvit 15 min) .....	58
Obr. 36 Porovnání jasů (osvit 5 a 15 min) .....	59
Obr. 37 Vzorek M1 (osvit 5 a 15 min) .....	60
Obr. 38 Vzorek M4 (osvit 5 a 15 min) .....	60
Obr. 39 Vzorek M6 (osvit 5 a 15 min) .....	61
Obr. 40 Vzorek M8 (osvit 5 a 15 min) .....	61
Obr. 41 Fotografický záznam dosvitu vzorků M1, M4, M6, M8 (osvit 15 min) .....	62
Obr. 42 Predikovaná doba viditelnosti vzorků (osvit 5 a 15 min) .....	63

Obr. 43 Podstavec a stativ s fotoaparátem .....	65
Obr. 44 Plášť boxu s vrchní deskou .....	65
Obr. 45 Box s nasazeným izolačním krytem .....	66
Obr. 46 Box s vysunutou pracovní plochou .....	66
Obr. 47 Pohled do boxu .....	66
Obr. 48 Vrchní deska .....	66
Obr. 49 Izolační kryt (a) otevřený, (b) uzavřený .....	66
Obr. 50 Výsuvná pracovní plocha (a) otevřená a (b) zavřená .....	67
Obr. 51 Kompletní měřicí soustava .....	67
Obr. 52 Instalovaná UV lampa .....	67
Obr. 53 Schéma osvitů a fotografování pomocí měřicího boxu .....	68
Obr. 54 Pracovní prostředí Fiji .....	70
Obr. 55 Vzorky bílé barvy M1, M4, M6, M8 (osvit 5 min), metoda Foto+Matlab.....	72
Obr. 56 Vzorky M1, M4, M6, M8 + vzorek F1 (osvit 5 min), metoda Foto+Fiji .....	73
Obr. 57 Fotografický záznam dosvitu vzorku F1 (osvit 5 min).....	76
Obr. 58 Fotografický záznam dosvitu vzorků M1, M4, M6, M8 (osvit 5 min).....	77
Obr. 59 Schéma rozvržení experimentu .....	81
Obr. 60 Ověření závislosti mezi daty SpectraScan/Foto+Matlab.....	88
Obr. 61 Ověření závislosti mezi daty SpectraScan/Foto+Fiji.....	88
Obr. 62 Vzorek V6 (pruh 2/2 cm).....	89
Obr. 63 Vzorek V5 (pruh 0,8/0,8 cm).....	89

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Vlastnosti nažehlovací fotoluminiscenční folie (vzorek F1) .....	40
Tabulka 2 Charakteristika testovaných pletenin (vzorek M1, M2, M3).....	41
Tabulka 3 Charakteristika testovaných pletenin (vzorek M4, M5) .....	42
Tabulka 4 Charakteristika testovaných pletenin (vzorek M6, M7) .....	43
Tabulka 5 Charakteristika testovaných pletenin (vzorek M8, M9, M10).....	44
Tabulka 6 Průměrné hodnoty jasu $L$ [ $\text{mcd}/\text{m}^2$ ] .....	48
Tabulka 7 Průměrné hodnoty jasu $L$ [ $\text{mcd}/\text{m}^2$ ] .....	57
Tabulka 8 Vnímání hodnot jasu lidským okem dle normy DIN 67510 Standard [18]...	62
Tabulka 9 Predikovaný čas dosažení hodnoty jasu $0,3 \text{ mcd}/\text{m}^2$ .....	63
Tabulka 10 Hodnoty jasu zjištěné pomocí metody Foto+Matlab.....	71
Tabulka 11 Hodnoty Gray Value zjištěné pomocí metody Foto+Fiji .....	73
Tabulka 12 Data pro korelační analýzu .....	74
Tabulka 13 Výsledky korelační analýzy .....	74
Tabulka 14 Závěrečná zjištění o možnostech testování fotoluminiscence .....	76
Tabulka 15 Vnímání hodnot jasu lidským okem .....	77
Tabulka 16 Specifikace vzorků V1, V2, V3 .....	79
Tabulka 17 Specifikace vzorků V4, V5, V6, V7 .....	80
Tabulka 18 Průběh vyhasínání a vnímání vzorů zrakem .....	83

## Seznam vzorců

(1) Exponenciální rovnice pro predikci doby vyhasnutí jasu. .... 63

## Seznam příloh

### Příloha A: Vzorky testovaných materiálů

- Pleteniny z fotoluminiscenční příze (M1-M10)
- Fotoluminiscenční nažehlovací folie (F1)

### Příloha B: Bodové grafy - závislost mezi zjištěnými daty

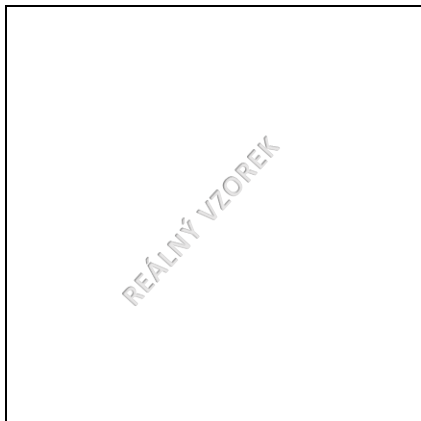
- SpectraScan/Foto+Matlab
- SpectraScan/Foto+Fiji
- Foto+Matlab/Foto+Fiji

### Příloha C: 2x CD nosič

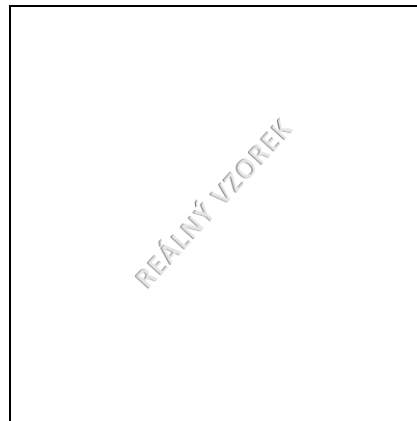
- Data měření č. 1 – Jas (SpectraScan, osvit 5 min)
- Data měření č. 2 – Jas (Foto+vyhodnocení v Matlab, osvit 15 min)
- Data měření č. 3 – Jas (Foto+vyhodnocení v Matlab, osvit 5 min)
- Data měření č. 3 – Gray\_Value (Foto+vyhodnocení Fiji, osvit 5 min)
- Fotografie měření č. 2 – záznam vyhasínání luminiscence (osvit 15 min)
- Fotografie měření č. 3 – záznam vyhasínání luminiscence (osvit 5 min)
- Fotografie měření č. 4 – záznam vyhasínání luminiscence (pruhovaný vzor)

## Příloha A: Vzorčky testovaných materiálů

Pleteniny z fotoluminiscenční příze (M1-M10)



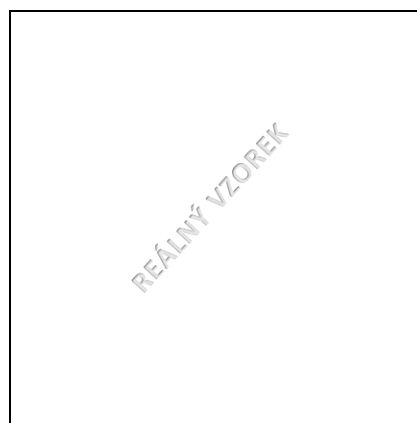
**M1**



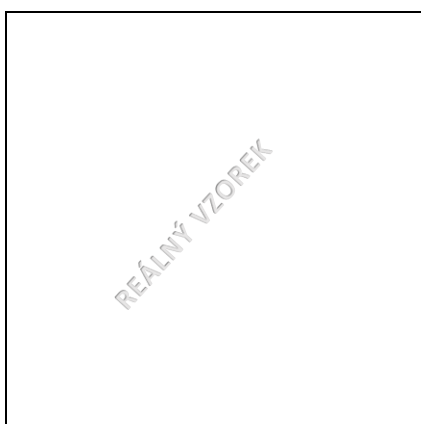
**M2**



**M3**



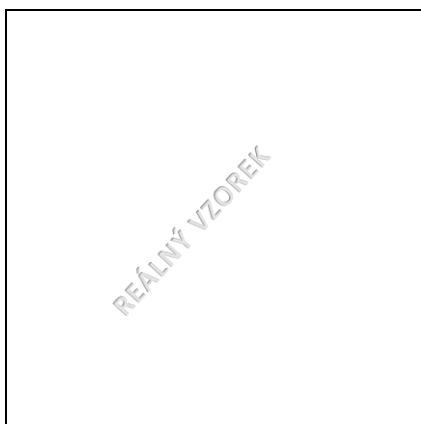
**M4**



**M5**



**M6**



**M7**



**M8**

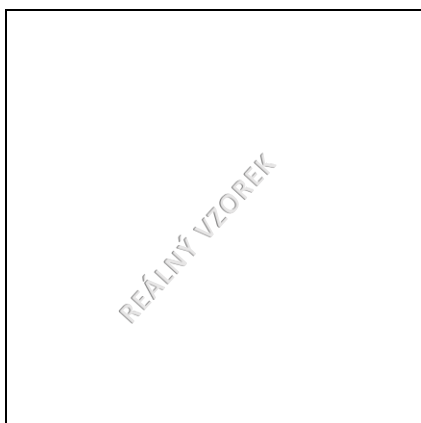


**M9**



**M10**

Fotoluminiscenční nažehl.folie (F1)

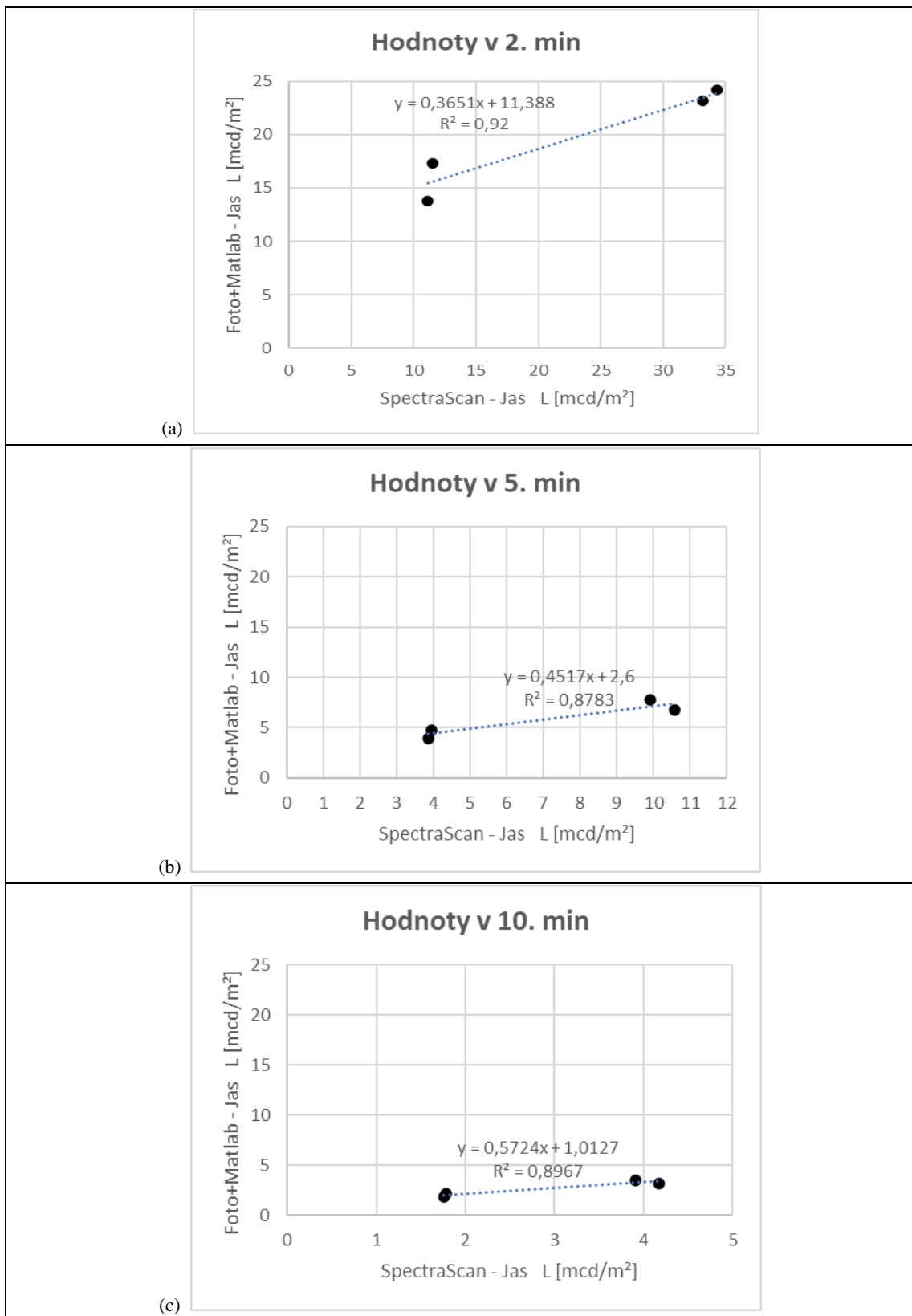


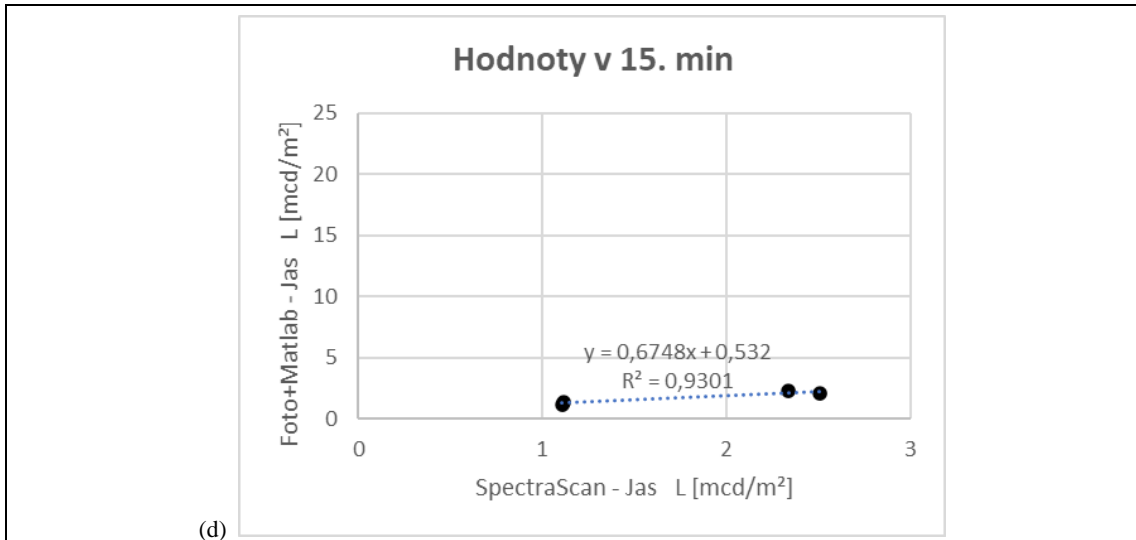
**F1**



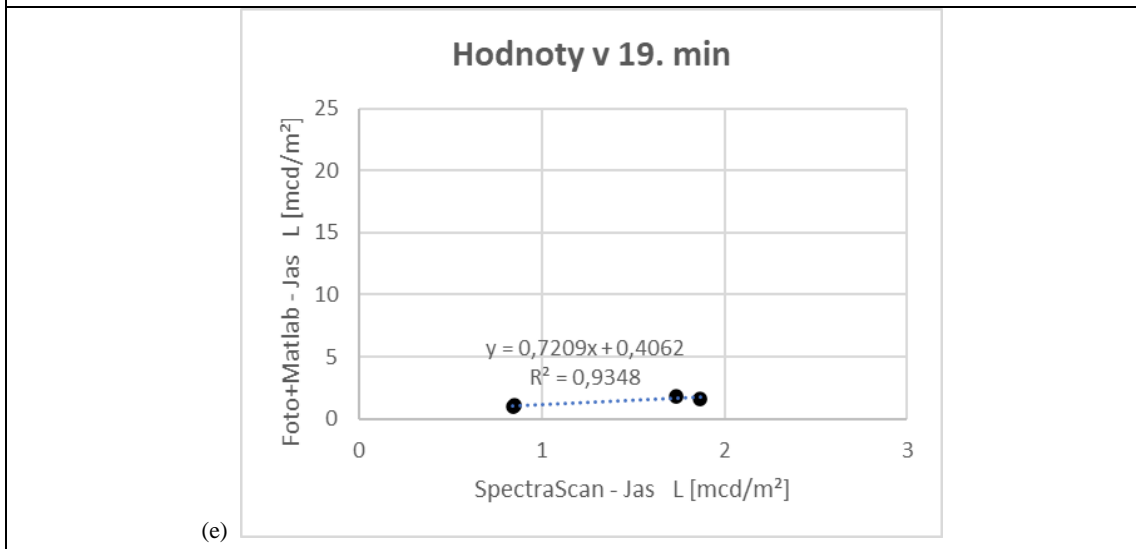
## Příloha B: Bodové grafy - závislost mezi zjištěnými daty

### SpectraScan/Foto+Matlab





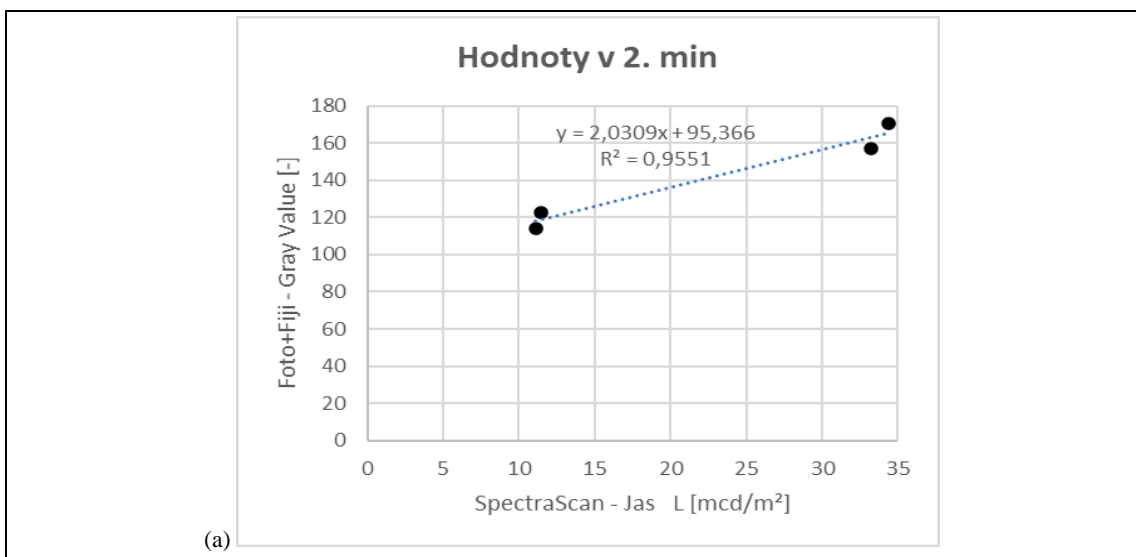
(d)



(e)

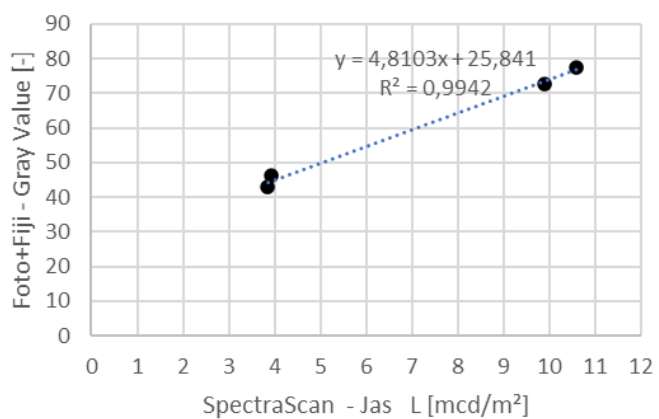
**Ověření závislosti mezi daty SpectraScan/Foto+Matlab  
(a) 2. min; (b) 5. min; (c) 10. min; (d) 15. min; (e) 19. min**

### SpectraScan/Foto+Fiji



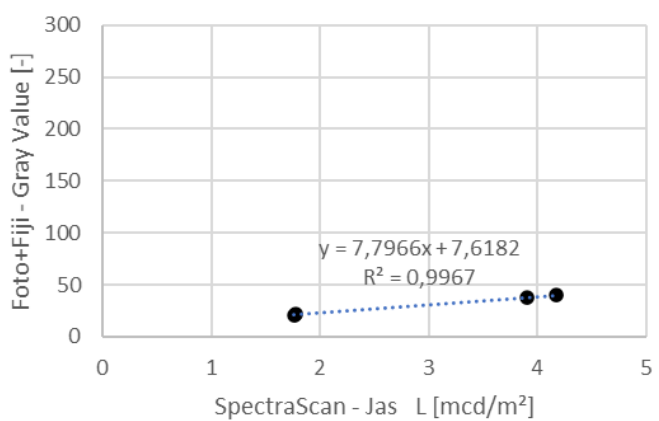
(a)

### Hodnoty v 5. min



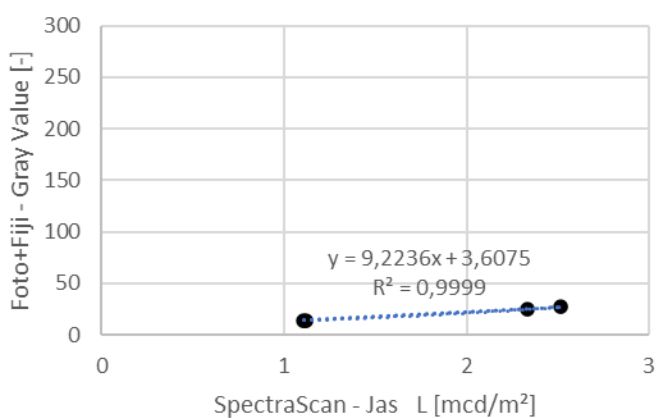
(b)

### Hodnoty v 10. min

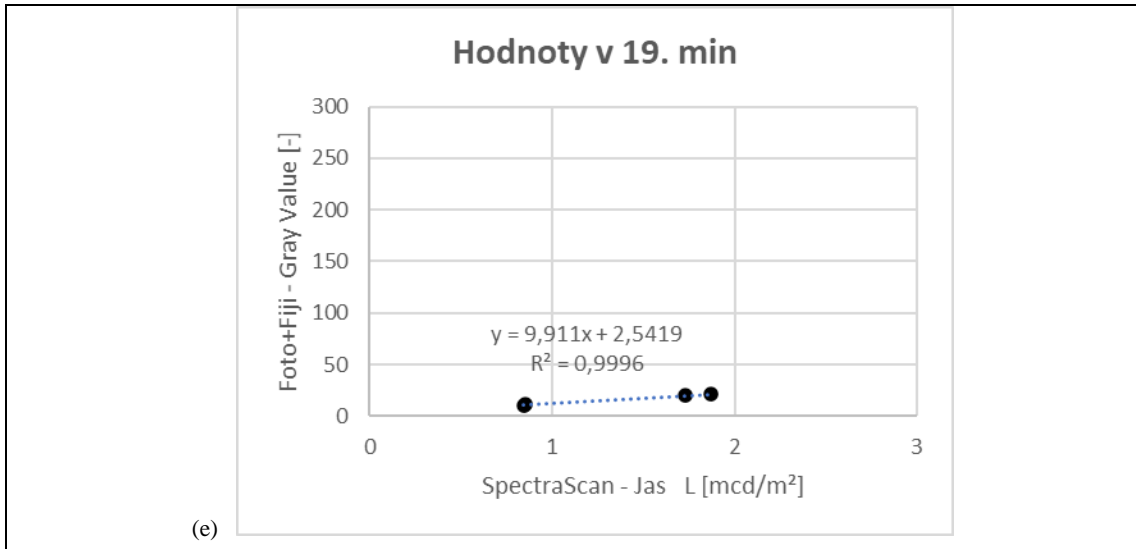


(c)

### Hodnoty v 15. min

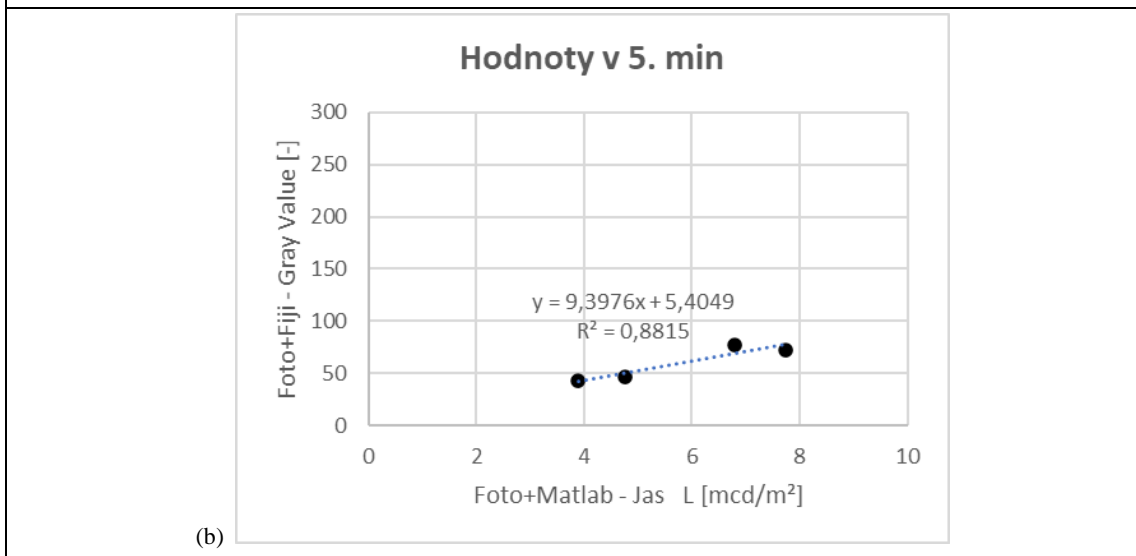
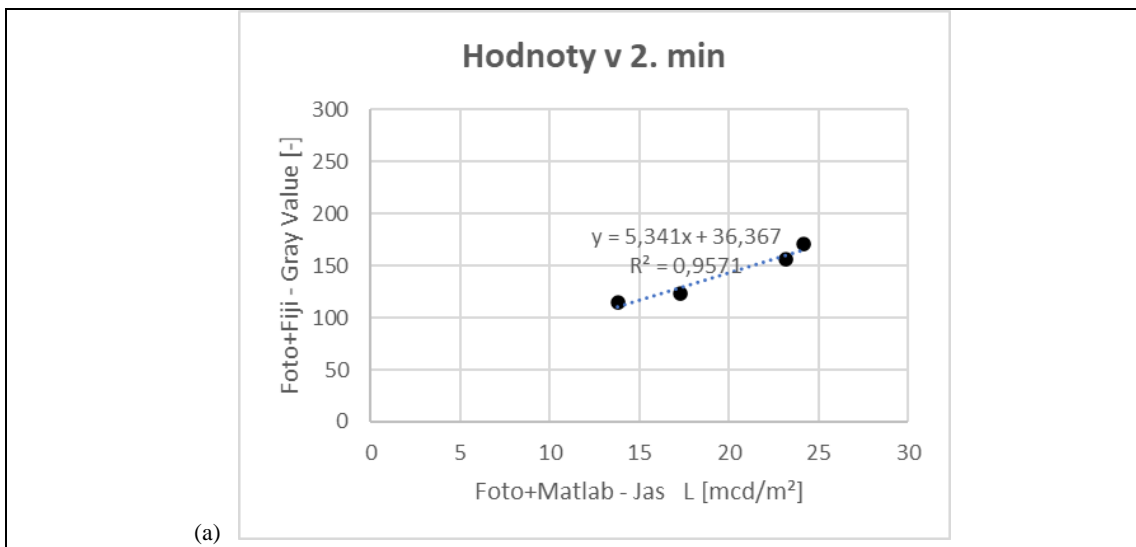


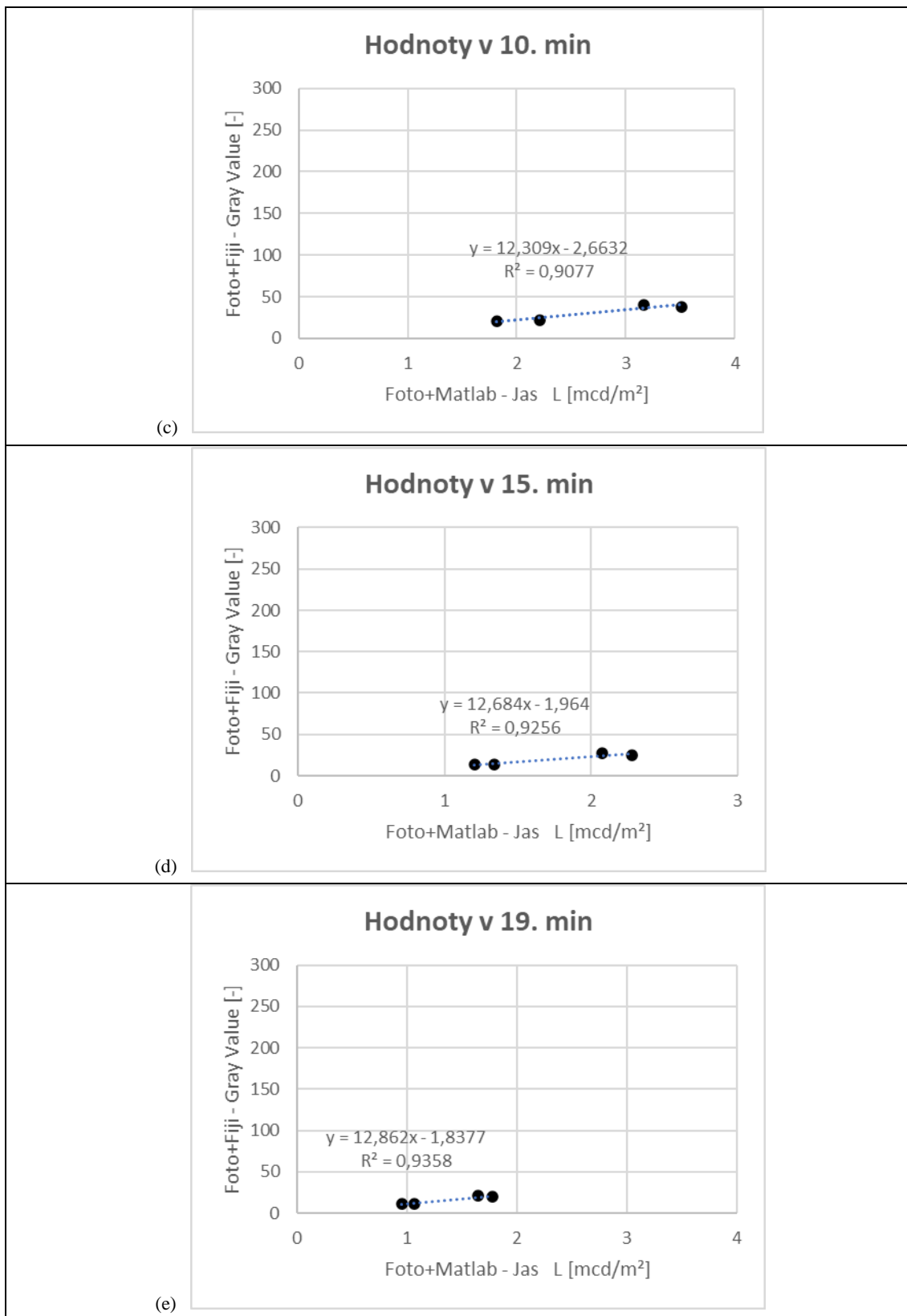
(d)



**Ověření závislosti mezi daty SpectraScan/Foto+Fiji**  
(a) 2. min; (b) 5. min; (c) 10. min; (d) 15. min; (e) 19. min

**Foto+Matlab/Foto+Fiji**





**Ověření závislosti mezi daty Foto+Matlab/Foto+Fiji**  
**(a) 2. min; (b) 5. min; (c) 10. min; (d) 15. min; (e) 19. min**

## **Příloha C: 2x CD nosič**

- Data měření č. 1 – Jas (SpectraScan, osvit 5 min)
- Data měření č. 2 – Jas (Foto+vyhodnocení v Matlab, osvit 15 min)
- Data měření č. 3 – Jas (Foto+vyhodnocení v Matlab, osvit 5 min)
- Data měření č. 3 – Gray\_Value (Foto+vyhodnocení ve Fiji, osvit 5 min)
- Fotografie měření č. 2 – záznam vyhasínání luminiscence (osvit 15 min)
- Fotografie měření č. 3 – záznam vyhasínání luminiscence (osvit 5 min)
- Fotografie měření č. 4 – záznam vyhasínání luminiscence (pruhovaný vzor)