



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

## ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

# MATERIÁLOVÝ TISK UVB JEDNORÁZOVÉHO DOZIMETRU

MATERIAL PRINTING OF UVB DISPOSABLE DOSIMETER

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Gabriela Fryčová

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.

BRNO 2024

## Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1912/2023 Akademický rok: 2023/24  
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie  
Studentka: **Gabriela Fryčová**  
Studijní program: Chemie a chemické technologie  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Michal Veselý, CSc.**

### Název bakalářské práce:

Materiálový tisk UVB jednorázového dozimetru

### Zadání bakalářské práce:

1. Vypracujte literární rešerši na téma způsoby měření dávky UVB záření přístrojovou technikou i jednorázovými dozimetry.
2. Připravte sítotiskem UVB dozimetr na PET podložce:
  - a) kalibrujte barevnou odezvu dozimetru na dvě dohodnuté hodnoty dávky záření UVB pomocí kalibračních činidel,
  - b) po kalibraci proveďte tisk dozimetrů,
  - c) ověřte platnost recipročního zákona.
3. Výsledky diskutujte.

### Termín odevzdání bakalářské práce: 20.5.2024:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

-----  
Gabriela Fryčová  
studentka

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.  
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.  
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2024

-----  
prof. Ing. Michal Veselý, CSc.  
děkan

## **ABSTRAKT**

Cílem bakalářské práce byla příprava fotocitlivých vrstev reagujících změnou barvy na dávku ozáření a jejich následná kalibrace na dávky ozáření UVB 500 a 1 000  $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$  pomocí kalibračních činidel a změny tloušťky vrstvy. Experimentální část se zaměřuje na přípravu a nanesení vrstev a studium jejich barevné odezvy na dávku ozáření. Byla ověřena platnost recipročního zákona. Důraz byl kladen také na jednoduchost přípravy a použití výsledných jednorázových UVB dozimetřů.

## **ABSTRACT**

The aim of the bachelor's thesis was the preparation of photosensitive layers responding by colour change to the exposure dose and their subsequent calibration to UVB irradiation doses of 500 and 1 000  $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$  using calibration agents and layer thickness change. The experimental part focuses on the preparation and application of the layers and the study of their colour response to the exposure dose. The validity of the reciprocity law was verified. The simplicity of preparation and use of the resulting disposable UVB dosimeters was emphasized.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Fotochemie, dozimetr, UVB záření, tenké vrstvy, materiálový tisk

## **KEYWORDS**

Photochemistry, dosimeter, UVB radiation, thin layers, material printing

FRYČOVÁ, Gabriela. *Materiálový tisk UVB jednorázového dozimetru*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/156673>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce Michal Veselý.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje byly správně a úplně citovány. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....

Podpis studenta

### *Poděkování*

*Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce, prof. Ing. Michalu Veselému, CSc. za cenné rady, odborné vedení a věnovaný čas. Mé poděkování patří také konzultantce Ing. Michaele Fanglové za pomoc v laboratoři, ochotu a vstřícnost. Velké poděkování patří také kolektivu laboratoře C378. Na závěr bych ráda poděkovala mé rodině a přátelům za podporu po celou dobu studia.*

# OBSAH

<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>2 TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1 Elektromagnetické záření</b> .....	<b>8</b>
<b>2.2 Ultrafialové záření</b> .....	<b>8</b>
2.2.1 Akční spektrum erytému .....	9
2.2.2 MED.....	11
2.2.3 SED.....	12
2.2.4 Vitamin D.....	12
2.2.5 Vliv UV záření na člověka .....	13
2.2.6 Účinky ultrafialového záření na kůži.....	14
2.2.7 Použití fototerapie UVB lampou pro léčbu lupénky.....	15
2.2.8 Fototypy .....	16
<b>2.3 Způsoby měření dávky UVB ozáření přístrojovou technikou</b> .....	<b>17</b>
2.3.1 Spektrální radiometry .....	18
2.3.2 Širokopásmové radiometry.....	19
2.3.3 Úzkopásmové radiometry.....	20
<b>2.4 Způsoby měření dávky UVB ozáření jednorázovými dozimetry</b> .....	<b>20</b>
2.4.1 Polysulfonový dozimetr.....	21
2.4.2 Dozimetr dle Zweiga a Hendersona.....	21
2.4.3 ColorClock Derma .....	21
2.4.4 SUNTEST .....	22
2.4.5 SmartSun.....	22
2.4.6 Využití neotetrazoliumchloridu .....	23
2.4.7 Dozimetr na bázi viologenu.....	24
2.4.8 Dozimetr s dichlorindofenolem a oxidem titaničitým.....	24
2.4.9 Nanovložky bismoklitu .....	25
<b>2.5 Materiálový tisk</b> .....	<b>25</b>
2.5.1 Sítotisk .....	25
2.5.2 Bakerovo natahovací pravítko .....	27

<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1 Použité laboratorní vybavení, chemikálie a software.....</b>	<b>28</b>
3.1.1 Použité laboratorní vybavení.....	28
3.1.2 Použité chemikálie .....	28
3.1.3 Použitý software.....	28
<b>3.2 Příprava fotocitlivých tenkých vrstev .....</b>	<b>29</b>
3.2.1 Příprava zásobních roztoků .....	29
3.2.2 Příprava kompozic.....	29
3.2.3 Nanášení vrstev .....	30
<b>3.3 Měření fotocitlivých tenkých vrstev .....</b>	<b>30</b>
3.3.1 Měření spektrální intenzity ozáření zdroje UVB Lumenica.....	30
3.3.2 Ozařování zdrojem UVB Lumenica a následné měření .....	31
3.3.3 Spektrofotometrické měření .....	32
3.3.4 Vyhodnocení dat.....	33
3.3.5 Měření tloušťky vrstev .....	33
<b>4 VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1 Ozařování vzorků .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2 Vliv přídavku hydroxidu sodného .....</b>	<b>37</b>
<b>4.3 Měření závislostí na tloušťce vrstvy .....</b>	<b>37</b>
<b>4.4 Vyhodnocení dávky ozáření pro jednotlivé metody nanášení.....</b>	<b>39</b>
<b>4.5 Reciproční test .....</b>	<b>41</b>
<b>5 ZÁVĚR .....</b>	<b>42</b>
<b>6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>43</b>
<b>7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>	<b>46</b>

# 1 ÚVOD

Fototerapie se již od svého vzniku velmi rychle rozvíjí. Toto odvětví zaznamenává významný technologický pokrok, zejména ve vývoji metod zahrnujících UVA a UVB záření. Toto záření je možné použít na celou řadu dermatóz, v čele s ekzémem, psoriázou nebo vitiligem.

Léčba UVB zářením je velmi úspěšná, ovšem není bez rizika. Příliš dlouhé expozice tomuto záření způsobují problémy podobné spálení při běžném opalování na slunci. Výslednou dávku ozáření je třeba určit pro každého pacienta na základě jeho fototypu a radiační dávka musí být upravena i podle individuální reakce pacienta.

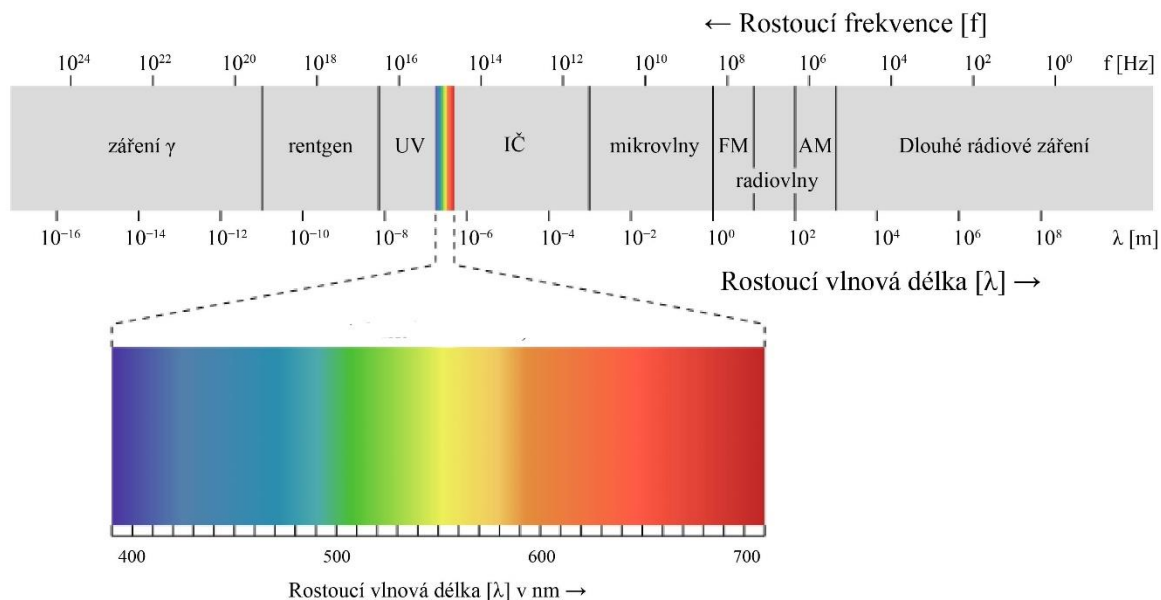
Ve chvíli, kdy se na kůži objeví erytém, je jisté, že dávka ozáření byla příliš vysoká. K tomuto by nikdy nemělo dojít. Měření dávek ozáření mezi nulovou hodnotou a vznikem erytému přímo v průběhu ozařování pomocí přístrojové techniky není vždy možné. Pro tyto účely je vhodný jednoduchý indikátor dávky ozáření. V případě použití jednorázového UVB dozimetru je hlavní výhodou snadné použití v jakýchkoliv podmínkách. Hlavními nároky na dozimetr jsou snadná a levná výroba a použití, jasná indikace dosažení dané dávky ozáření, aby tato indikace byla ireverzibilní a také aby nezáleželo na intenzitě zdroje, ale pouze na dávce ozáření.

Mezi časté fototypy v našem prostředí patří fototypy I a II. Tito lidé mají velmi světlou kůži a jsou citliví na spálení, i jejich doporučená léčebná dávka ozáření bude nízká. Obecně se pro ně doporučuje 500, respektive 1 000 mJ·cm<sup>-2</sup>. Právě na tyto dvě hodnoty byl kalibrován výsledný jednorázový dozimetr. V průběhu práce byly zkoumány různé vlivy, které výslednou dávku ozáření ovlivňují. Jednalo se zejména o alkalizaci vrstvy, změnu tloušťky a způsob nanášení. Při výrobě byly použity techniky materiálového tisku k dosažení tenkých vrstev.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření je nositelem energie, jež se šíří daným paprskem záření. Skládá se ze dvou na sebe kolmých složek elektrického a magnetického pole. Intenzitu těchto polí vyobrazuje sinusová elektromagnetická vlna. Vzdálenost nejbližších maxim se nazývá vlnová délka, pomocí které veškeré záření dělíme. Od těch nejdelších řádově kilometrových radiových vln až po to zcela nejkratší pozorované kosmické záření v řádech nanometrů. Lidské oko dokáže vnímat pouze zlomek tohoto záření, a to v rozmezí 380–780 nm.<sup>1</sup>



Obrázek 1 Elektromagnetické spektrum s vyznačeným viditelným zářením<sup>2</sup>

### 2.2 Ultrafialové záření

Sluneční záření je spojité spektrum elektromagnetického záření, které se dělí na několik hlavních oblastí, a to ultrafialové, viditelné a infračervené. Ultrafialové záření tvoří 3 % celkového záření, které dopadne na Zemi a z výše uvedených má nejvyšší karcinogenní účinky. Dělí se na UVC (200–280 nm), UVB (280–315 nm) a UVA (315–400 nm).<sup>3</sup>

Ultrafialové záření má také podrobnější dělení (tabulka 1), které vychází z iniciativ jednotlivých komunit, které se s ním setkávají a pracují. Bylo zavedeno normou ISO 21348:2007, která tyto poznatky shrnuje. Připouští však, že tato dělení se mohou v budoucnu měnit podle potřeby.<sup>4</sup> Tato norma byla revidována v roce 2021 a zůstává stále aktuální dodnes.<sup>5</sup>

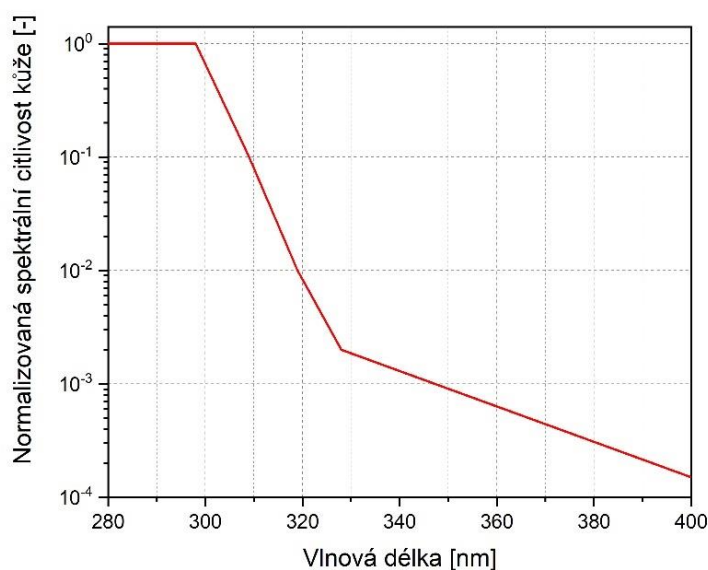


**Tabulka 1** Podrobné dělení ultrafialového záření dle ISO 21348<sup>cit. 4</sup>

Název záření	Značení	Vlnová délka [nm]
Ultrafialové A	UVA	400–315
Ultrafialové B	UVB	315–280
Ultrafialové C	UVC	280–100
Blízké ultrafialové	NUV	400–300
Střední ultrafialové	MUV	300–200
Daleké ultrafialové	FUV	200–122
Vodíkové Lyman–alfa	H Lyman– $\alpha$	122–121
Extrémní ultrafialové	EUV	121–10
Vakuové ultrafialové	VUV	200–10

### 2.2.1 Akční spektrum erytému

Citlivost kůže ke vzniku erytému vyjadřuje pro kůži kavkazského typu akční spektrum erytému, což je normalizovaná citlivost kůže k záření (obrázek 2) definovaná Mezinárodní komisí pro osvětlení CIE – *International Commission on Illumination* v roce 1998 (CIE S 007/E-1998, později nahrazeno ISO/CIE 17166:2019). Komplikace při měření záření dopadajícího na kůži spočívá v tom, že různé vlnové délky mají různé účinky. UVB složka (280–315 nm) tvoří 6 % dopadajícího záření, ovšem je zodpovědná z 83 % za tvorbu erytému. Záření dopadající na zemský povrch bylo rozděleno do čtyř kategorií, z nichž každá má jiný vliv na vznik erytému. Přechody mezi kategoriemi jsou v 298, 319 a 328 nm.<sup>6</sup>



**Obrázek 2** Akční spektrum erytému dle CIE<sup>6</sup>

Poškození a zčervenání kůže se odborně nazývá erytém, vyjadřuje se pomocí rovnice pro erytemálně efektivní intenzitu ozáření  $E_{\text{eff}}$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ] viz rovnice (1).<sup>6</sup>

$$E_{\text{eff}} = \int_{250 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_e^\lambda \cdot s_{\text{er}}^\lambda d\lambda, \quad (1)$$

kde  $E_e^\lambda$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ ] je sluneční spektrální ozáření zemského povrchu a  $s_{\text{er}}^\lambda$  je hodnota normované spektrální citlivosti kůže (akčního spektra erytému) při vlnové délce  $\lambda$  [nm].<sup>6</sup>

### **UV index**

Slouží jako snadný ukazatel pro běžnou populaci o momentální škodlivosti UV záření. Čím vyšší je jeho hodnota, tím větší je riziko poškození kůže při delší expozici (tabulka 2). Intenzita slunečního záření je závislá na mnoha faktorech, například na zeměpisné šířce, nadmořské výšce, denní a roční době, počasí a oblačnosti. V průběhu dne se hodnoty mění. Nejvyšší je v poledních hodinách.<sup>6</sup> Vypočítá se vydělením erytemálně efektivní intenzity ozáření  $E_{\text{eff}}$  v  $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$  číslem 25. Vydělením se docílí rovnoměrného rozdělení do 11 stupňů. Hodnoty mohou být i vyšší než 11 a lze jich dosáhnout už v jižním Středomoří. Pro běžné použití však stačí 11 stupňů. Pro přímý výpočet intenzity UV záření se využívá konstanta  $k_{\text{er}} = 40$  [ $\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ ] v rovnici (2).<sup>7,8</sup> Jednotky se vykrátí a výsledkem je bezrozměrný UV index.

$$\text{UVI} = k_{\text{er}} \cdot E_{\text{eff}} = k_{\text{er}} \cdot \int_{250 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_e^\lambda \cdot s_{\text{er}}^\lambda d\lambda \quad (2)$$

**Tabulka 2** Hodnoty UV indexu<sup>6</sup>

Hodnota UV indexu	Úroveň expozice
0–2	nízká
3–5	střední
6–7	vysoká
8–10	velmi vysoká
11+	extrémní

### **Způsoby ochrany proti UV záření**

Nejběžnějším způsobem ochrany kůže jsou tzv. krémy na opalování, které kombinací fyzikálních a chemických procesů zabrání spálení. Účinnost podobných přípravků se vyjadřuje pomocí SPF faktoru (Sun Protection Factor) viz rovnice (3), kde  $T_\lambda$  je transmitance záření ochrannou vrstvou SPF.<sup>6</sup>

$$\text{SPF} = \frac{\int_{290 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_e^\lambda \cdot s_{\text{er}}^\lambda d\lambda}{\int_{290 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_e^\lambda \cdot s_{\text{er}}^\lambda \cdot T_\lambda d\lambda} \quad (3)$$

Ze vzorce je zřejmé, že SPF faktor se nevztahuje na dobu ozáření kůže, ale na množství působícího záření. Jako ochrana proti UV záření může sloužit i oblečení. Na ochranu očí se používají sluneční brýle s UV filtrem.<sup>6</sup>

### 2.2.2 MED

Minimální erytemální dávka (MED) je minimální dávka UV záření, která způsobí zarudnutí kůže (erytém). MED se využívá hlavně ve fototerapii, ve které musí být stanovena pro každého pacienta. Závisí na fototypu, pigmentaci kůže a na místě na těle, kde se měření provádí.

#### *Stanovení MED*

Nejrozšířenějším způsobem stanovení je experimentální metoda. Používá se k ní například výrobek firmy Daavlin (obrázek 3). Na kůži na předloktí pacienta se působí UVB zářením a v předem daných časových úsecích (na základě fototypu) se odkrývají další pole. Po 24–48 hodinách se vyhodnotí zarudnutí. MED odpovídá poli, které zčervenalo. Léčebná dávka by vždy měla být nižší než stanovená MED, aby k zarudnutí nedocházelo.<sup>9</sup>

K přesnému stanovení úrovně zarudnutí lze použít spektrofotometr. Všechna exponovaná místa a kontrolní neexponované se změří v barevném prostoru  $L^*a^*b^*$  a pomocí složky  $a^*$  (úroveň červenosti) se porovnají. Erytém je v místě, kde rozdíl hodnoty  $a^*$  je větší než 2,5 oproti běžné barvě kůže pacienta. Některé studie k porovnání použily také  $L^*$  složku (lightness, měrná světlost).<sup>10</sup>



**Obrázek 3** Náplast od firmy Daavlin s poli, která se postupně odkrývají, aby měla různou dávku ozáření<sup>9</sup>

Dalším způsobem na podobném principu je použití přístroje MED-Tester MINI UVB (obrázek 4), který sám zvládne různé plochy ozářit různou dávkou ozáření. Výhodou je, že výsledky lze dle výrobce odečíst 16–24 hodin po vyšetření.<sup>11</sup>



**Obrázek 4** Přístroj MED-Tester MINI UVB pro zjištění MED<sup>11</sup>

### 2.2.3 SED

Pojem standardní erytemální dávka (SED) byl představen Mezinárodní komisí pro osvětlení (CIE – *International Commission on Illumination*) v roce 1987 jako snaha o standardizaci MED. Dávka 1 SED odpovídá  $100 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$  erytemálně efektivního záření v rozmezí vlnových délek 280–400 nm (vypočítáme ji dosazením těchto vlnových délek do mezí integrálu v rovnici (1)).<sup>12</sup> Oproti MED se jedná o standardizovanou veličinu nezávisící na typu kůže, ale pouze na energii slunečního záření a spektrální citlivosti kůže, tedy akčního spektra erytému.

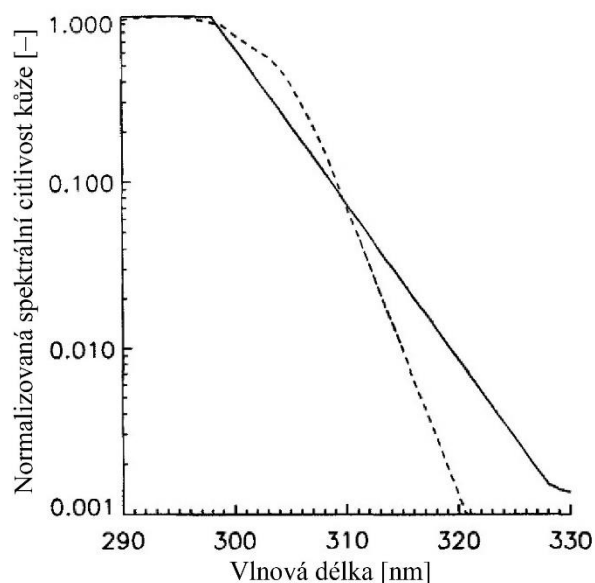
Pro výpočet erytemálně účinné dávky ozáření za určitý čas se používá vzorec (4). Dávka je daná součinem erytemálně efektivního ozáření  $E_{\text{eff}} [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$  a času  $t$  [s], označuje se  $H_{\text{eff}} [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}]$ .

$$H_{\text{eff}} = E_{\text{eff}} \cdot t \quad (4)$$

### 2.2.4 Vitamin D

Vitamin D je rozpustný v tucích. Většina vitamínu v organismu vzniká po pobytu na slunci. Nedostatek vitamínu D ovlivňuje metabolismus vápníku a zvyšuje pravděpodobnost rakoviny tlustého střeva, prostaty a prsou.<sup>13</sup>

V souvislosti se SED byla charakterizována SDD, tzv. standardní dávka vitamínu D. Jedná se o míru nahromaděné UV energie vážené produkčním tempem provitamínu D. Pro výpočet SDD bylo použito akční spektrum vitamínu D (obrázek 5) a tato dávka je ekvivalentem 1 000 IU (international unit = mezinárodní jednotka; pro vitamin D platí  $1\,000 \text{ IU} = 0,025 \text{ mg}$ ). Jedná se o dávku, která již zajistí veškeré benefity spojené s tímto vitamínem. Tato dávka se také nazývá MDD (minimální dávka energie pro udržení dostatečné hladiny vitamínu D) a je obdobou MED.<sup>13,14</sup>



**Obrázek 5** Akční spektrum erytému dle CIE (plná čára) a akční spektrum vitamínu D (přerušovaná čára)<sup>13</sup>

Pro jednotlivé fototypy lze také vyjádřit, jak dlouhé expozici na slunci musí být vystaveny, aby dosáhly SDD. Příklad těchto expozic je v tabulce 3, kde se předpokládají tyto podmínky: poledne, Boston (USA), 21. března, 42,2° s.š., ozon = 350 DU. Brno má souřadnice 49,2° s.š., takže hodnoty by byly velmi podobné.<sup>13</sup>

**Tabulka 3** Závislost SDD na MED. Čas minimální expozice je pro Boston (42,2° s.š.) 21. března v poledne.<sup>13</sup>

Fototyp	1 MED [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	1 SDD [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	Minimální expozice [min]
I	200	37,2	16
II	250	46,5	20
III	300	55,8	25
IV	450	83,6	37
V	600	111,4	49
VI	1 000	185,1	83

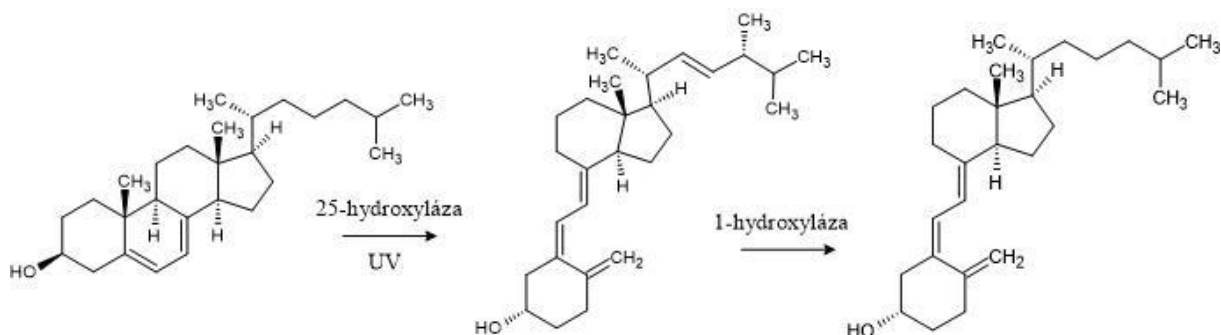
### 2.2.5 Vliv UV záření na člověka

Dlouhodobá expozice pokožky přímému slunečnímu záření může mít za následek předčasné stárnutí kůže, zvýšenou tvorbu vrásek a riziko vzniku kožních nádorů. Toto záření představuje nebezpečí i pro oči, kde hrozí šedý zákal nebo poškození rohovky.<sup>15</sup>

### **Fotosyntéza vitamínu D3**

Působením UV záření na 7-dehydrocholesterol vzniká vitamin D3 (cholecalciferol, kalciol, neaktivní forma vitamínu D3). Aby se z něj stala aktivní forma vitamínu D3 (kalcitriol), musí být v játrech enzymaticky aktivován 24-hydroxylázou na 25-hydroxycholecalciferol (kalcifediol). Ten pak jde do ledvin, kde se 1-hydroxylázou konvertuje na 1,25-dihydrocholecalciferol (kalcitriol). Celá reakce je vyobrazena na obrázku 6.<sup>16,17</sup>

Kalcitriol je steroidní hormon, který zajišťuje tvorbu tzv. vápník vázajícího proteinu (calcium binding protein), díky kterému se vápník přenáší ze střev do krve.



**Obrázek 6** Fotosyntéza vitamínu D3. Cholecalciferol se v játrech mění na kalcifediol a následně v ledvinách na kalcitriol<sup>16</sup>

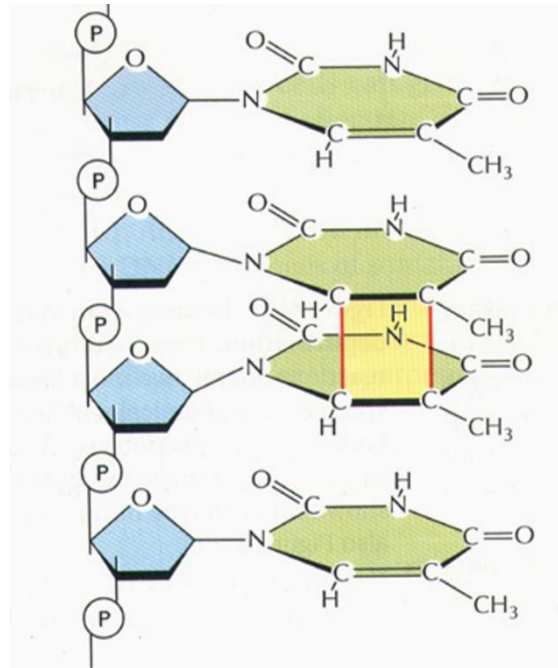
### **2.2.6 Účinky ultrafialového záření na kůži**

Zatímco UVA záření proniká až do dermis, UVB pronikne pouze do povrchové epidermis. Nejvíce zasaženými částmi jsou nukleové kyseliny (DNA, RNA) a proteiny (tryptofan, tyrosin). Ovlivněny jsou také další biologicky aktivní látky (NADH, flaviny, porfyriny). Nejzávažnější je zasažení DNA, která se neregeneruje a změny jsou nevratné. Právě proto je konkrétně UVB označováno za nejkarcinogennější záření.<sup>18</sup>

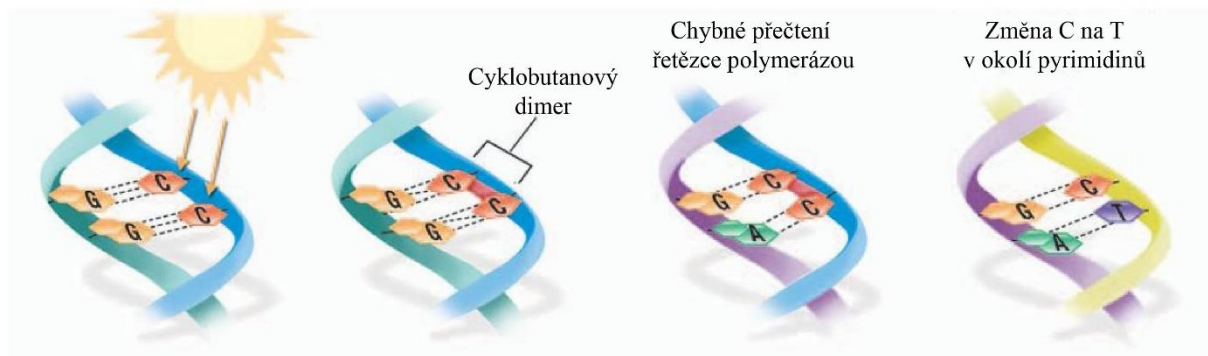
### **Princip poškození DNA UVB zářením**

DNA všech žijících organismů je neustále poškozována množstvím vlivů. Mezi vnější faktory patří fyzikální faktory jako ultrafialové nebo ionizující záření a chemické vlivy (např. složky cigaretového kouře). Vnitřní faktory jsou pak standardní procesy uvnitř buňky.

UV záření způsobuje vznik cyklobutanových pyrimidinových dimerů (hlavně typu TT a TC, méně pak typu CT a CC), čímž se narušuje sekundární struktura DNA a replikace. Tento proces je znázorněn na obrázku 7, kde se naruší černě znázorněné vazby mezi uhlíky a vznikají červeně znázorněné 5-5 a 6-6 C vazby. Cytosin v DNA sekvenci může poté být při replikaci chybně přečten polymerázou jako uracil a je k němu tedy chybně přiřazen adenin (místo guaninu, který je správnou komplementární bází k cytosinu). Cytosin pak zmutuje na thymin, aby se chyba napravila. Původní sekvence je tedy CC a mutací se z ní stala CT. Pokud by zmutovaly obě báze, vznikl by dimer TT. Vše je přehledně ilustrováno na obrázku 8.<sup>17</sup>



**Obrázek 7** Vznik cyklobutanových pyrimidinových dimérů, kde v důsledku absorpce UV záření vznikají 5, 6 C vazby<sup>19</sup>



**Obrázek 8** Znázornění mutace CT v DNA působením UV záření<sup>17</sup>

### 2.2.7 Použití fototerapie UVB lampou pro léčbu lupénky

Kůže pacientů trpících lupénkou se obnovuje až sedmkrát častěji než u většinové populace. Jedná se o autoimunitní onemocnění, jehož hlavní příčinou jsou genetické predispozice. Toto onemocnění zasahuje hlavně epidermis, kam také proniká UVB záření a brání nadměrnému množení keratinocytů, jež způsobují příliš rychlou obnovu kůže.<sup>3</sup> Prvním krokem při této léčbě je stanovení fototypu pacienta a odpovídající MED. Léčba pak probíhá s intenzitou 0,7 MED 3–5krát týdně. Na fototerapii se využívá světlo o vlnové délce 311 nm.

Fototerapii UVB zářením je dále možné léčit akné, atopický ekzém, dermatitidu, polymorfni světelnou erupci (PLE - Polymorphous Light Eruption; sluneční alergie), sklerodermie a mastocytózy.<sup>17</sup>

## 2.2.8 Fototypy

Důsledkem evoluce a rozdílných životních podmínek se barva kůže lidí na celém světě liší. Příčinou je rozdílné vystavení působení ultrafialovému záření a tím pádem jiný obsah melaninu v kůži.

Fototyp každého člověka lze spolehlivě určit na základě Fitzpatrickovy škály, která rozděluje populaci mezi kategorie I–VI (tabulka 4). Rozřazení probíhá jednoduchým dotazníkem zahrnujícím barvu očí, barvu vlasů, barvu pleti, množství pih, zda se pokožka spálí, jak se opálí a jak citlivá je na slunce. Přiřazení fototypů je pak na základě získaného počtu bodů.<sup>20</sup>

### ***Fototyp I***

Nejsvětlejší typ pleti je charakterizován velmi bledou až průsvitnou pletí, světlými vlasy (blond nebo zrzavé) a modrými očima. Tito lidé musí používat opalovací krémy s vysokým SPF faktorem, jelikož jejich pokožka se nedokáže opálit, pouze velmi snadno spálit. Ke vzniku erytému jim stačí méně než 2 hodnoty SED.<sup>6,20</sup>

### ***Fototyp II***

Druhý nejsvětlejší typ pleti je také tím nejrozšířenějším v České republice. Jeho zástupci se vyznačují světlou pletí, světlými vlasy i očima, které jsou často modré, zelené nebo hnědé. Jsou citliví na spálení, ale dokáží se mírně opálit. Ke vzniku erytému dochází při 2–3 hodnotách SED.<sup>6,20</sup>

### ***Fototyp III***

Světlá pleť doplněná jakoukoliv barvou vlasů (nejčastěji hnědou) je světově nejrozšířenější. Je citlivá na slunce, ale velmi rovnoměrně se opaluje. Ke vzniku erytému dochází při 3–5 hodnotách SED.<sup>6,20</sup>

### ***Fototyp IV***

Typicky středomořská olivová pleť s mírně hnědým odstínem. Díky vyššímu obsahu melaninu se téměř nikdy nespálí. Velmi dobře se také opaluje. Ke vzniku erytému dochází při 5–7 hodnotách SED.<sup>6,20</sup>

### ***Fototyp V***







Tmavě hnědá pleť a oči typické pro obyvatele Středního východu nebo Latinské Ameriky. Nespálí se, snadno se opaluje. Ke vzniku erytému dochází při 7–10 hodnotách SED.<sup>6,20</sup>

### ***Fototyp VI***

Typicky černošská tmavě hnědá až černá pokožka s kudrnatými tmavými vlasy. Nespálí se, snadno se opaluje. Ke vzniku erytému dochází při více než 10 hodnotách SED.<sup>6,20</sup>



**Tabulka 4** Dělení fototypů dle Fitzpatricka<sup>21</sup>

Fototyp	Ilustrace	Pravděpodobnost spálení na slunci	Opálení	Barva neopálené kůže	UVA MED [J·m <sup>-2</sup> ]	UVB MED [J·m <sup>-2</sup> ]
I		Vysoká	Nikdy	Slonovinová	200–350	150–300
II		Vysoká	Mírné	Světlá	300–450	250–400
III		Běžná	Průměrné rovnoměrné	Světlá	400–550	300–500
IV		Minimální	Rovnoměrné a snadné	Olivová, mírně opálená	500–800	400–600
V		Výjimečně	Silné	Středně hnědá, opálená	700–1 000	600–900
VI		Nikdy	Silné	Tmavě hnědá, černá	1 000	900–1 500

### 2.3 Způsoby měření dávky UVB ozáření přístrojovou technikou

Existuje několik způsobů, jak měřit UVB záření dopadené na Zemi. U měřicí techniky jsou kladeny velké nároky na přesnost a spolehlivost. Té se docílí pravidelnou kalibrací. Získaná data se posléze využívají například na sledování trendu globálního UV záření. K tomuto účelu ovšem nejsou vhodné širokopásmové radiometry, jelikož nejsou dostatečně přesné a tyto trendy se mění pouze o jednotky procent za dekádu. Dále se data využívají na zjištění geografických rozdílů v globálním UV záření a získávání informací o UV indexu.<sup>22</sup>

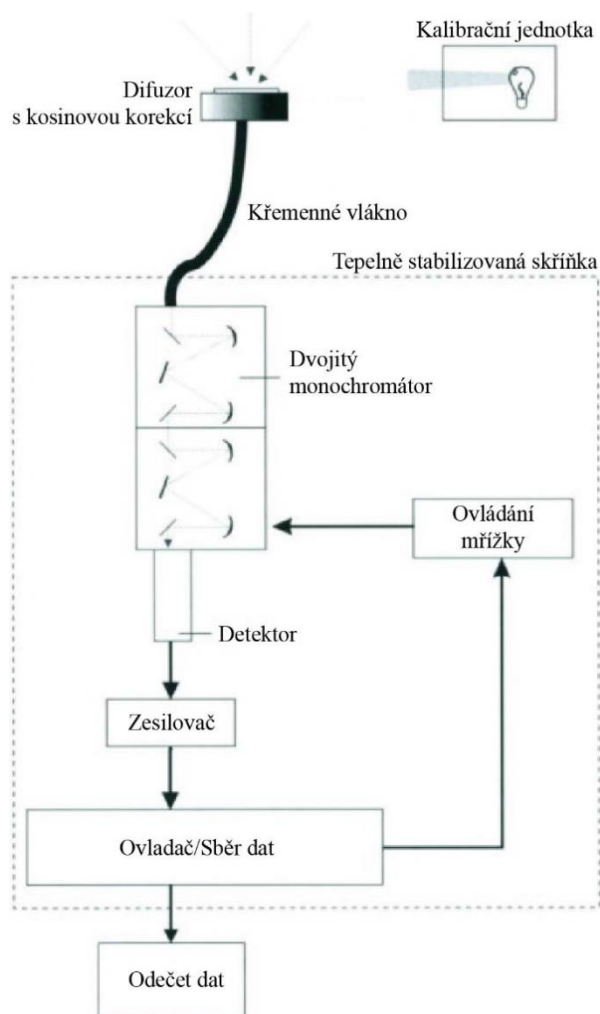
Měření probíhá buď na pozemních stanicích nebo na družicích. Pozemní stanice využívají tři typy přístrojů, a to spektrální, širokopásmové a úzkopásmové radiometry.<sup>23</sup>

### 2.3.1 Spektrální radiometry

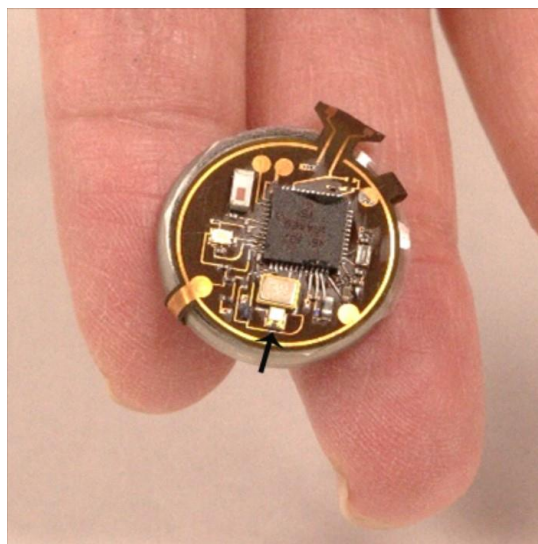
Spektrální radiometry (anglicky spectroradiometers) využívají dvojitý monochromátor schopný rozlišení 1 nm vlnové délky. Výsledky jsou náchylné na výkyvy teploty. Jeho diagram je vyobrazen na obrázku 9. Vezme-li se to však v potaz, je možné tyto výkyvy eliminovat a data očistit. Stejně tak kosinova chyba, která je způsobena vychýlením měřených paprsků od osy měření. Vhodným softwarem a následnou prací s výsledky lze spektrálním radiometrem měřit s přesností  $\pm 0,02$  nm.<sup>23</sup> Pracují v rozmezí vlnových délek 290–400 nm doporučeném Mezinárodní zdravotnickou organizací.

Existuje také nositelný spektrální radiometr, jenž byl představen vědci z University of Washington. Reagovali jím na expozici pracovníků konopných farem jak slunečnímu záření, tak dodatečnému ultrafialovému světlu z lamp, které se na těchto farmách používají k podpoření růstu. Spektrofotometr byl připevněn na opasku pracovníka a optický vstup se nacházel na ochranných brýlích.<sup>24</sup>

K monitorování pouze UVB slunečního záření lze použít UVB dozimetr s fotodiodou ve formě náramku (obrázek 10). Přístroj se dokázal připojit přes Bluetooth k telefonu a posílat zprávy uživateli, že už strávil na slunci příliš dlouhou dobu a hrozí spálení.<sup>25</sup>



Obrázek 9 Schéma spektrálního radiometru s dvojitým monochromátorem<sup>26</sup>



**Obrázek 10** Bezdrátový UVB dozimetr s vyznačenou fotodiódou<sup>25</sup>

### 2.3.2 Širokopásmové radiometry

Většina širokopásmových radiometrů (anglicky broadband filter radiometers) je nastavená tak, aby měřila erytemové akční spektrum definované CIE. Měří erytemálně efektivní ozáření, ze kterého poté lze dopočítat UV index. Kalibraci lze provést porovnáním se spektrálním radiometrem umístěným dlouhodobě na stejném místě.

Oproti spektrálním radiometrům jsou cenově mnohem dostupnější, vyžadují však mnohem častější kalibraci. Jsou také mnohem menší, odolnější a lze je rovnou použít.<sup>27</sup> V Brně je používán například k měření v areálu Masarykovy univerzity na Kotlářské ulici viz obrázek 11:



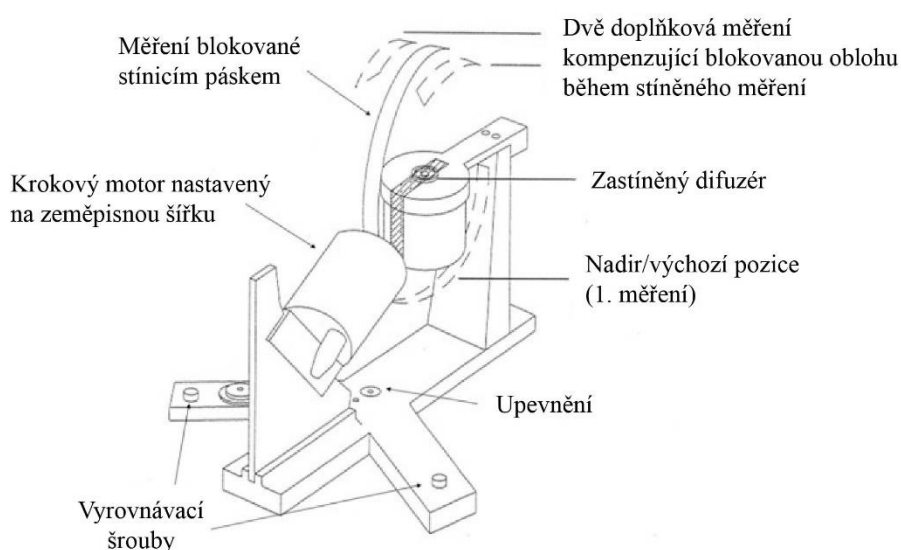
**Obrázek 11** Širokopásmový radiometr UV-Biometr 501 používaný na stanici Brno-Kotlářská pro měření erytemového ultrafialového záření<sup>22</sup>

### 2.3.3 Úzkopásmové radiometry

Výhodou úzkopásmových radiometrů (anglicky narrowband multifilter radiometers) je nízká pořizovací cena. Dokáží také proměřit celé spektrum za méně než vteřinu. Využívá se toho hlavně při měření vlivu aktuálních podmínek (oblačnost, vlhkost) na množství UV záření dopadajícího na zemský povrch. Nevýhodou je nutnost časté kalibrace.<sup>23</sup>

Úzkopásmový radiometr na obrázku 12 funguje následujícím způsobem: v těle přístroje o teplotě 42 °C je 7 fotodiódových filtrů s optickými filtry, jejichž centrální vlnové délky jsou 300, 305, 311, 317, 325, 332 a 368 nm. Přičemž fotodiody pro 300 a 305 nm jsou z karbidu křemíku a zbylé jsou křemíkové. Vše je doplněno teflonovým difuzérem.<sup>28</sup>

Měření probíhá ve čtyřech krocích. V prvním proběhne měření bez stínícího proužku, ten se na druhé měření přesune do první pozice na doplňkové měření. Na další měření přímo zastíní slunce a na poslední se posune do pozice na druhé doplňkové měření. Pozice jsou znázorněny na obrázku 12. Tento přístroj je nejnáročnější na software pro následnou úpravu a analýzu dat, včetně jejich korekce.<sup>29</sup>



**Obrázek 12** Schéma vícekanálového úzkopásmového radiometru se stínícím proužkem, konkrétně model MFRSR (Multi-Filter Rotating Shadowband Radiometer) značky Yankee<sup>29</sup>

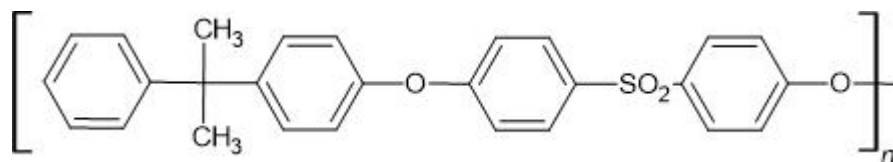
## 2.4 Způsoby měření dávky UVB ozáření jednorázovými dozimetry

Zatímco přístrojová technika spoléhá na fyzikální principy, na jednorázové využití se hodí spíše ty založené na chemickém principu. Výhodou jsou nízké náklady a snadné použití. Jsou také využívány pro jiné účely. Přístroji získáváme například meteorologická data a údaje o tloušťce ozonové vrstvy. Jednorázové UV dozimetry najdou uplatnění například při opalování.

Vývoj dozimetrů, které by uživatelé mohli nosit přímo na těle, započal v sedmdesátých letech, kdy nebyla dostupná data o tom, jaké skutečné dávky slunečního záření dostávají běžní lidé. Souviselo to s obavou, že započaly procesy narušující ozonovou vrstvu (např. používání freonů) a na zemský povrch dopadalo více ultrafialového záření.<sup>30</sup>

### 2.4.1 Polysulfonový dozimetr

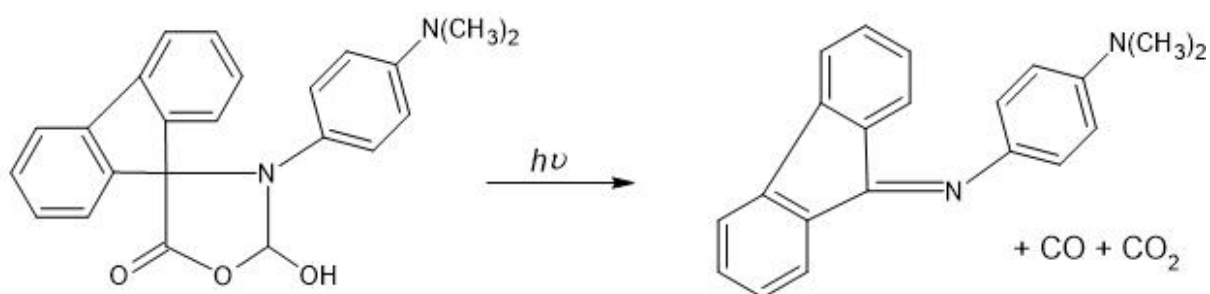
Jeden z úplně prvních dozimetrů byl na bázi 40  $\mu\text{m}$  tlustého polysulfonového filmu (molekula polysulfonu je znázorněna na obrázku 13). Maximální absorbanci měl při 330 nm. Výslednou absorbanci je třeba odečíst ihned po expozici, jelikož již 24 hodin po expozici byla naměřená absorbance o 8 % vyšší. Tento dozimetr nemá viditelný barevný přechod a k detekci změny absorbance je třeba použít spektrofotometr. Měří v rozmezí 254–335 nm.<sup>31</sup>



Obrázek 13 Molekula polysulfonu

### 2.4.2 Dozimetr dle Zweiga a Hendersona

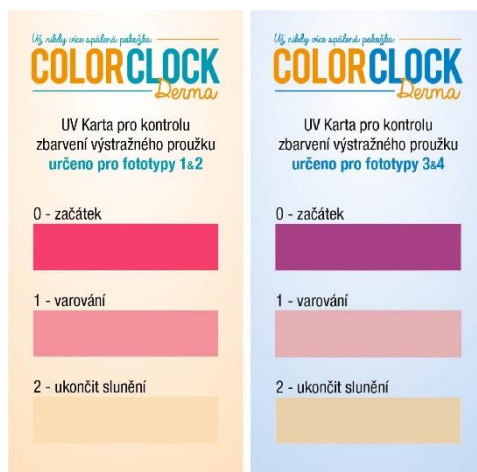
Přechod ve viditelném barevném spektru nabídl v roce 1976 dozimetr navržený A. Zweigem a W.A. Andersonem, Jr. Za přechod je zodpovědná přeměna 3'-[p-(dimethyl-amino)-fenyl] spiro-[fluoren-9,4-oxazolidin]-2',5'-dionu na p-dimethylamino-N-fluoren-9-ylidin anilin. Celá reakce (obrázek 14) je založena na odštěpení anhydridu ve formě CO a CO<sub>2</sub> a vzniku iminu. Barevný přechod je z bezbarvé na červenou.<sup>32</sup>



Obrázek 14 Odštěpení anhydridu a vznik iminu. Dozimetr se zbarví do červena.<sup>32</sup>

### 2.4.3 ColorClock Derma

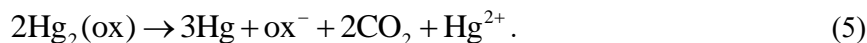
Tyto barevné hodiny (obrázek 15) byly navrženy, aby indikovaly bezpečnou dobu pobytu na slunci pro běžného uživatele. Jedná se o širokopásmový dozimetr, neindikuje pouze UVB záření. V balení obsahují i návod pro jeho použití spolu s krémem s ochranným faktorem. Fungují na principu fotokatalytického odbourávání barviva a jsou kalibrovány na dva expoziční stupně. První je pro potřeby fototypů I a II a druhý pro fototypy III a IV. Dozimetr pro světlejší fototypy přechází z růžové na béžovou, zatímco tmavší fototypy pozorují přeměnu z fialové na béžovou.<sup>33</sup>



**Obrázek 15** ColorClock Derma s dvěma kalibracemi pro různé fototypy<sup>33</sup>

#### 2.4.4 SUNTEST

V roce 1995 byl představen jednorázový dozimetr na bázi suspenze oxalátu stříbra a rtuť. Suspenze je rozpuštěná v želatině a připomíná tak klasické fotografické filmy. Ty připomíná i počáteční barvou, která je bílá. Ozářením se mění přechodem přes žlutou a světle hnědou až do finální tmavě hnědé barvy. Změna barvy probíhá dle reakcí (5) a (6). Akční spektrum bylo měřeno v rozmezí 254–330 nm.<sup>34</sup>



#### 2.4.5 SmartSun

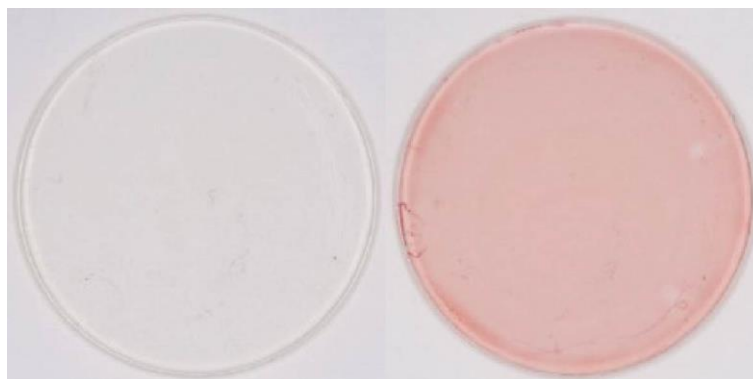
Komerčně prodáváný jednorázový UVB dozimetr sází hlavně na snadné nošení. Prodává se buď náramek (obrázek 16) nebo nálepka. Princip mají stejný, oranžová barva upozorňuje uživatele, že je nutné znovu aplikovat opalovací krém, při růžovém zbarvení je pak dosaženo maximální doporučené denní dávky ozáření a je třeba nevystavovat se dalšímu záření. Primárně je určen pro fototypy I a II, které jsou na spálení nejcitlivější a podobný výrobek tedy potřebují nejvíce. Zajímavostí je, že oproti ColorClock tento dozimetr vyzývá své uživatele, aby opalovací krém aplikovali i na samotný náramek, aby získali relevantní data bez přepočtu. ColorClock má v příbalové informaci návod na potřebný přepočet v případě použití spolu s opalovacím krémem.<sup>35</sup>



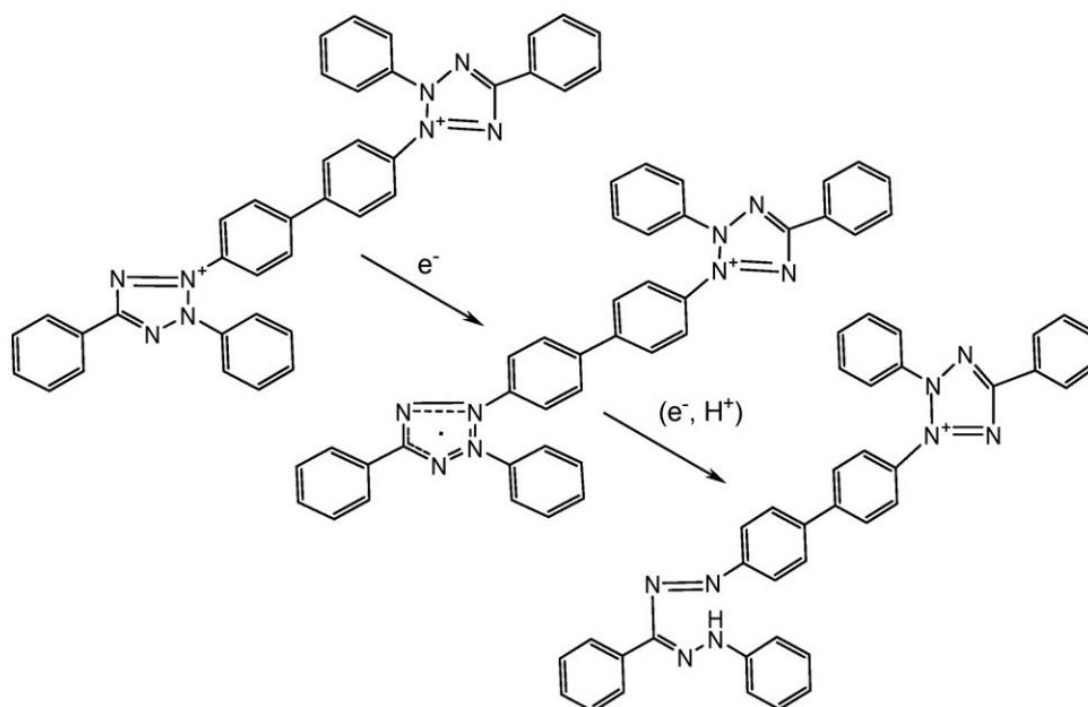
**Obrázek 16** Náramek SmartSun s ukázkou přechodu z počáteční žluté do varovné oranžové až po finální růžovou<sup>36</sup>

## 2.4.6 Využití neotetrazoliumchloridu

Změna barvy z bezbarvé na červenou (obrázek 17) probíhá díky parciální redukci neotetrazoliumchloridu na stabilní monoformazan, který přijímá další elektrony. Následně vzniká přechodný stav tetrazolinylového radikálového a tetrazolového centra (obrázek 18).<sup>37</sup>



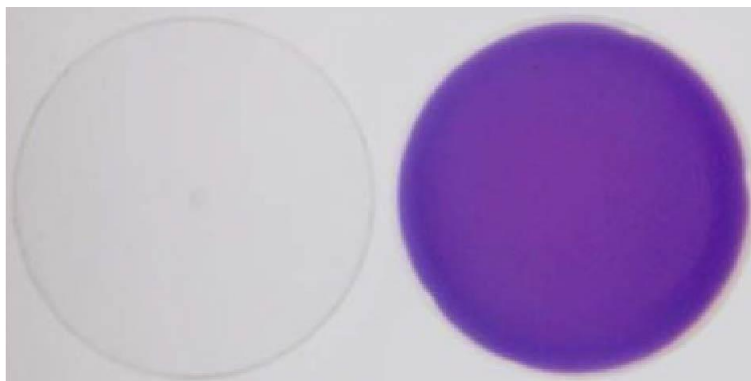
Obrázek 17 Barevná změna neotetrazoliumchloridu<sup>37</sup>



Obrázek 18 Chemická reakce neotetrazoliumchloridu doprovázená změnou barvy<sup>37</sup>

### 2.4.7 Dozimetr na bázi viologenu

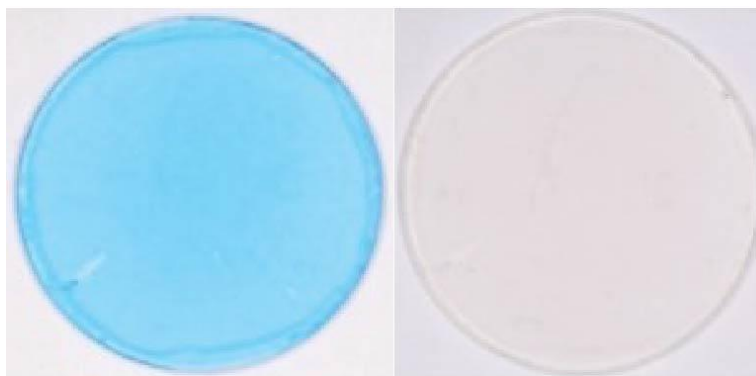
Jeden z nejvýraznějších barevných přechodů má benzyl viologen ( $BV^{2+}$ ) uložený v polyvinylalkoholu (PVA) (obrázek 19). Barevná změna je zapříčiněna vznikem kationtového radikálu  $BV^{2+\bullet}$ . Je známo, že z methylviologenu ( $MV^{2+}$ ) se kationt vytvoří fotochemickou redukcí. Předpokládá se, že benzyl viologen funguje na podobném principu viz reakce (7) a (8). Nevýhodou je prokázána toxicita viologenu.<sup>38</sup>



Obrázek 19 Viologenový dozimetr po ozáření změni barvu na fialovou<sup>38</sup>

### 2.4.8 Dozimetr s dichlorindofenolem a oxidem titaničitým

Tento zpočátku modrý dozimetr je určen výhradně pro fototyp II. Funguje díky souhře několika látek. První je redoxní barvivo (v tomto případě 2,6-dichloroindofenol), druhou je polovodič (oxid titaničitý nebo cíničitý) a obě jsou doplněny elektronovým donorem (glycerol). Všechny tyto látky jsou dispergované v polymerní vrstvě (hydroxyethylcelulóza). Po ozáření se odbarví (obrázek 20). Ozářením vznikají v oxidu titaničitém elektronové díry, které jsou zaplněny elektrony z glycerolu, z něhož se stává glyceraldehyd (a dále pak kyselina glycerová). Volné elektrony redukují dichlorindofenol na jeho leukoformu, která je stabilní díky okolní polymerní vrstvě.<sup>39</sup>



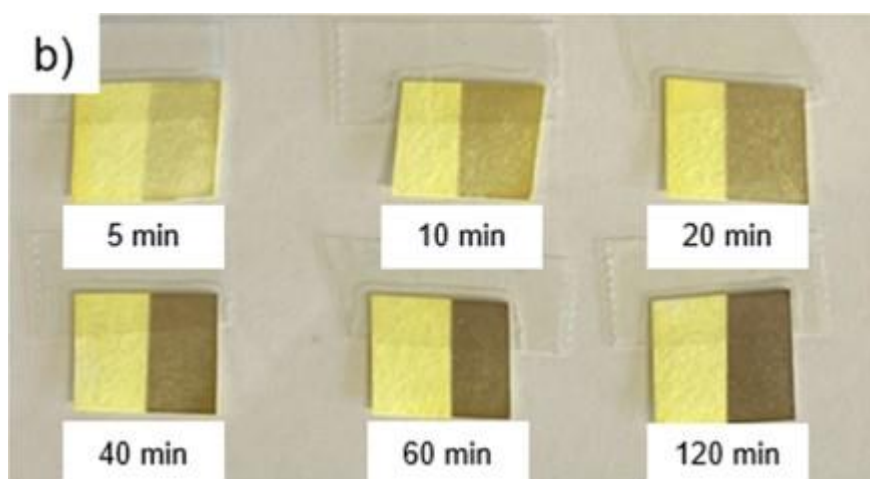
Obrázek 20 Odbarvení dozimetru s 2,6-dichloroindofenolem<sup>39</sup>



## 2.4.9 Nanovločky bismoklitu

Jeden z nejnovějších UV dozimetrů je na bázi nanovloček bismoklitu ( $\text{BiOCl}$ ). Samotný  $\text{BiOCl}$  má při působení UV záření barevný přechod z bílé na černou způsobený dírami v krystalové mřížce. Tento přechod není kvantifikovatelný, a proto se přidávají různá barviva. Experimenty byly provedeny s 6-karboxyfluoresceinem, 5-karboxyfluoresceinem, rhodaminem-B a berlínskou modří. Nejlepšího kontrastu bylo dosaženo s 6-karboxyfluoresceinem.  $\text{BiOCl}$  je polovodič se zakázaným pásem 3,46 eV, který vhodně absorbuje UV záření.<sup>40</sup>

Dozimetr se připravuje smícháním chloridu bismutitého ( $\text{BiCl}_3$ ), 6-karboxyfluoresceinu a ethanolu v ultrazvukové lázni. Po rozpuštění jsou přidány kousky filtračního papíru, do kterých se roztok vpije. Nakonec se nechá odpařit ethanol. Výsledky ozáření jsou na obrázku 21.<sup>40</sup>



**Obrázek 21** Filtrační papírky s roztokem 50% 1mM 6-karboxyfluoresceinu s 100mM  $\text{BiCl}_3$  v ethanolu po vystavení záření 302 nm (levá část byla chráněna před působením UV záření)<sup>40</sup>

## 2.5 Materiálový tisk

Tradiční tiskové techniky, běžně používané v polygrafickém průmyslu, lze využít i pro nanášení funkčních kapalin. Substráty mohou být i flexibilní nebo jinak specifické. Lze připravovat rovnoměrné, ale i strukturované vrstvy. Současně je nejčastěji využíván k výrobě elektroniky a elektronických součástek (např. displeje a elektrody). Tiskové techniky lze rozdělit na ty bez tiskové formy (např. ink jet) a s tiskovou formou (např. flexotisk, hlubotisk, tamponový tisk, ofset a sítotisk).<sup>41</sup>

### 2.5.1 Sítotisk

Jedná se o průtiskovou techniku s tiskovou formou, na které je oblast, v níž se má barva protlačit a vytvořit tak obraz na potiskovaném materiálu. Využití má v mnoha oblastech, jako příklad lze uvést potisk triček, obalových materiálů nebo plakátů.<sup>42</sup>

Tisková forma je tvořena třemi částmi. První částí je samotný síťový rám, obvykle z hliníkových profilů, který dokáže vydržet tlak, kterému je vystaven. Vyrábějí se i ocelové rámy, které se méně deformují, ale zato je u nich větší riziko koroze.<sup>42</sup>

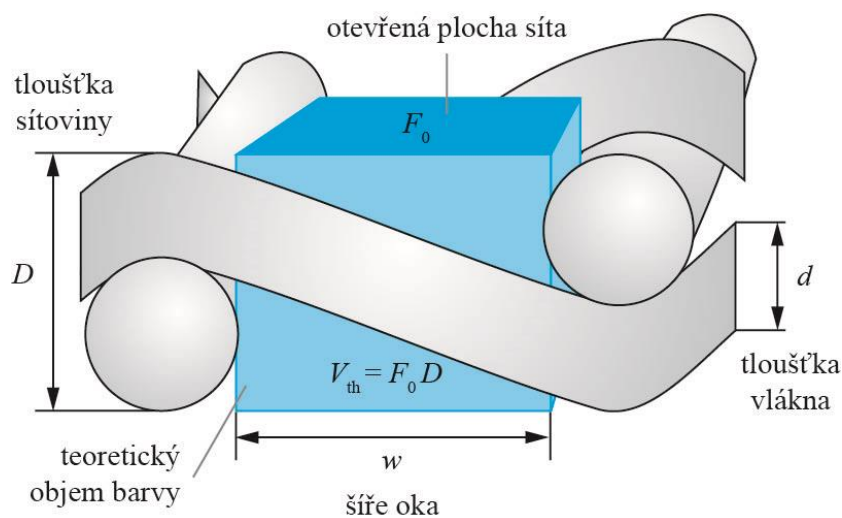
Dále pak síťovinou, která se na rámy upíná pomocí speciálního zařízení a poté se k nim přilepí. Samotná síťovina je tvořena tkanou sítí syntetických vláken (PET, PA). Setkáváme se s plátňovou a keprovou vazbou. Parametry síťoviny se souhrnně označují geometrie síťoviny (obrázek 22). Patří sem tyto veličiny:<sup>42</sup>

- tloušťka vláken  $d$  [ $\mu\text{m}$ ]
- šíře oka  $w$  [ $\mu\text{m}$ ] – vzdálenost mezi dvěma sousedními vlákny
- tloušťka síťoviny  $D$  [ $\mu\text{m}$ ]
- hustota síťoviny – počet vláken na jednotku délky
- otevřená plocha síta  $F_0$  [%] – podíl otevřené plochy síťoviny k její celkové ploše – viz rovnice (9)

$$F_0 = 100 \cdot \left( \frac{w}{d + w} \right)^2 \quad (9)$$

Z těchto parametrů lze vypočítat teoretický objem přenesené barvy  $V_{\text{th}}$  [ $\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ ] dle rovnice (10). Teoretický objem barvy v  $\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2}$  odpovídá tloušťce mokré vrstvy v  $\mu\text{m}$ .<sup>42</sup>

$$V_{\text{th}} = F_0 \cdot D \quad (10)$$



**Obrázek 22** Parametry charakterizující parametry síťoviny<sup>42</sup>

Sítotiskové stroje se dále dělí dle úrovně automatizace. Jsou k dispozici od těch zcela ručních, až po plně automatizované. Liší se také tím, jestli nanášejí materiál na plochu nebo na válec. Používají se pro malou výrobu i velké série tisků. Je třeba je doplnit vhodným sušicím zařízením. V laboratorních podmínkách lze využít sušárnu.<sup>42</sup>

### 2.5.2 Bakerovo natahovací pravítko

Jedním z běžných laboratorních způsobů aplikace tenké vrstvy je Bakerovým pravítkem. Pomocí tohoto ocelového aplikátoru lze nanést čtyři různé tloušťky mokré vrstvy. Při aplikaci se pravítko umístí na hladký podklad, na který se bude tisknout, stranou s požadovanou tloušťkou. Do prostoru mezi boční hranoly se nanese kompozice a posunem pravítka se nanese (viz obrázek 23). Nanášení lze zpřesnit použitím automatického aplikátoru filmu TQC. Ten pravítko posune o nastavenou délku a eliminuje tak lidskou chybu. Výhodou Bakerova pravítka je snadné a rychlé použití s přesnými výsledky.<sup>43</sup>



Obrázek 23 Bakerovo natahovací pravítko s ilustrací aplikace<sup>43,44</sup>

## 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 3.1 Použité laboratorní vybavení, chemikálie a software

#### 3.1.1 Použité laboratorní vybavení

- Běžné laboratorní sklo
- Analytické digitální váhy Sartorius Entris 224I – 1S
- Ultrazvuk – Ultrasonic compact cleaner PS 02000A, Power Sonic
- PET fólie Optimont® 501 Bleher – průhledná, 125 µm
- PET fólie Tenolan – bílá, 50 µm
- Parafilm
- Bakerovo natahovací pravítko
- Automatický aplikátor filmu TQC
- Sítotiskový poloautomat RokuPrint 05
- Tisková síta se síťovinami 77-48Y, 90-48Y, 100-40Y, 120-34Y, 140-31Y, 165-27Y, 180-27Y
- Sušárna Memmert UF110
- Spektrofotometr Eye–One Pro, X–Rite
- Vlákenný spektrometr RedTide USB 650UV, OceanOptics
- Kontaktní profilometr DektakXT, Bruker
- UVB Lumenica KN4006, Kernel
- PC

#### 3.1.2 Použité chemikálie

- Barvivo Methyloranž (MO), LACHEMA Československo
- Barvivo Toluidinová modř (TM), SIGMA–ALDRICH
- Roztok polymeru F
- Kalibrační činidlo I (KČ\_I)
- Kalibrační činidlo F (KČ\_F)
- Ethanol absolutní p.a., PENTA
- Dowanol PM

#### 3.1.3 Použitý software

- Microsoft Word
- Microsoft Excel
- Key Wizard, Gretag Macbeth
- Adobe Photoshop CS2, verze 9.0
- Adobe Illustrator CC 2019
- Origin 2019b
- OceanView 2.0.5

## 3.2 Příprava fotocitlivých tenkých vrstev

### 3.2.1 Příprava zásobních roztoků

Roztok barviva Toluidinové modři (TM)

- 1 % hm. v ethanolu

Roztok kalibračního činidla I (KČ\_I)

- 40 % hm. v absolutním ethanolu

Roztok kalibračního činidla F (KČ\_F)

- 30 % hm. v dioxanolu

### 3.2.2 Příprava kompozic

Základní složení kompozice vychází z práce Ing. Fanglové.<sup>7</sup> Vychází se z ní v rámci celé práce, případně jsou k ní přidávány další složky.

Tabulka 5 Navážky výchozí kompozice<sup>7</sup>

Roztok polymeru F [g]	Roztok KČ_I [g]	MO [g]	Roztok TM [g]	Roztok KČ_F [g]
10,1592	1,2298	0,0053	0,4973	0,1084

Ke vzniku homogenní kompozice bylo dodržováno pořadí přidávání jednotlivých složek. Po každém přidavku byla kompozice na 5 minut vložena do ultrazvuku. V prvním kroku byla navážena MO a roztok TM (ethanol z TM pomohl rozpustit MO). V dalším kroku bylo přidáno KČ\_I a KČ\_F a opět vloženo do ultrazvuku. Jako poslední byl přidán roztok polymeru F, který má největší hustotu a při dřívějším přidání komplikoval rozmíchání. Finální kompozice byla opět vložena na 5 minut do ultrazvuku. Při každém vložení do ultrazvuku byla kompozice zároveň promíchávána skleněnou tyčinkou nebo kovovou špachtlí. Pokud se kompozice i po pěti minutách v ultrazvuku jevila nehomogenní, bylo přidáno dalších pět minut, dokud byly okem viditelné nedokonalosti. Kompozice byly připravovány do uzavíratelných plastových kelímků, uzavřeny parafilmem a skladovány mimo dosah slunečního záření.

V jednom z pokusů, ve snaze o perfektní homogenitu, byly přidány skleněné kuličky a kompozice byla umístěna na automatickou míchačku. Tento postup nevedl k větší homogenitě, než jaké je možné dosáhnout pouze pomocí ultrazvuku.

#### ***Příprava kompozic s hydroxidem sodným***

K základní kompozici byl v rámci jednoho z experimentů přidán hydroxid sodný pro zvýšení dávky ozáření potřebné k barevné změně. Byl připraven zásobní roztok MO, roztok TM, KČ\_I a KČ\_F (MO byla s TM 3×5 minut ultrazvukována, po přidání kalibračních činidel byla celá směs 5 minut ultrazvukována). V pěti plastových kádinkách (obrázek 24) byly připraveny vzorky tak, aby hmotnost kompozice (zásobní roztok + roztok polymeru F) byla 12 g. Do každé kompozice bylo přidáno různé

množství hydroxidu (0,002–0,01 g s krokem 0,002 g). Při přípravě byl prvně navážen NaOH, ten byl rozpuštěn v přidavku zásobního roztoku pomocí ultrazvuku a nakonec byl přidán roztok polymeru F.



**Obrázek 24** Kompozice s přidavky hydroxidu sodného

### 3.2.3 Nanášení vrstev

Připravené kompozice byly nanášeny pomocí dvou technik popsanych v kapitole 2.5. Jedná se o Bakerovo pravítko a sítotisk.

U Bakerova pravítka byly využívány především tloušťky mokré vrstvy 30 a 60  $\mu\text{m}$ , méně pak 90 a 120  $\mu\text{m}$ . Pro přesnou aplikaci byl využíván Automatický aplikátor filmu TQC. Vrstvy byly nanášeny na PET fólii tloušťky 125  $\mu\text{m}$ . Po nanesení byly vrstvy 30 minut sušeny v sušárně při teplotě 70  $^{\circ}\text{C}$ .

Pro tisk sítotiskem bylo nejčastěji využíváno síto 140–31Y s teoretickým objemem barvy 12,5  $\text{cm}^3\cdot\text{m}^{-2}$ , což odpovídá výšce mokré vrstvy v  $\mu\text{m}$ , tj. 12,5  $\mu\text{m}$ . Při nanášení přetisků byla na desce maskovací páskou vyznačeno místo, kam folii pokládat, aby přetisky přesně lícovaly. Vrstvy bylo nutné mezi jednotlivými přetisky usušit fénem. Stejně byl usušen i finální přetisk. Vrstvy byly většinou nanášeny na PET fólii tloušťky 50  $\mu\text{m}$ , méně pak na folii tloušťky 125  $\mu\text{m}$ .

## 3.3 Měření fotocitlivých tenkých vrstev

### 3.3.1 Měření spektrální intenzity ozáření zdroje UVB Lumenica

Vláknovým spektrometrem RedTide USB 650UV s kosinovým korektorem byla změřena spektrální intenzita ozáření ve vzdálenosti 5 cm. Ve zdroji UVB Lumenica jsou dvě výbojky Philips PL–S 9W/01 narrow–band. Spektrometr byl nakalibrován na absolutní hodnoty spektrální intenzity ozáření. Měření bylo prováděno uprostřed světelného zdroje, kolmo ve vzdálenosti 5 cm. Výsledná hodnota intenzity ozáření byla získána integrací naměřeného emisního spektra v rozmezí 300–320 nm. Intenzita záření se řídí zákonem převrácených čtverců, ze kterého vyplývá, že pokles intenzity záření roste s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje záření. Matematicky ho vyjadřují rovnice (11). Z té vyplývá, že ve dvojnásobné vzdálenosti je čtvrtinová intenzita.

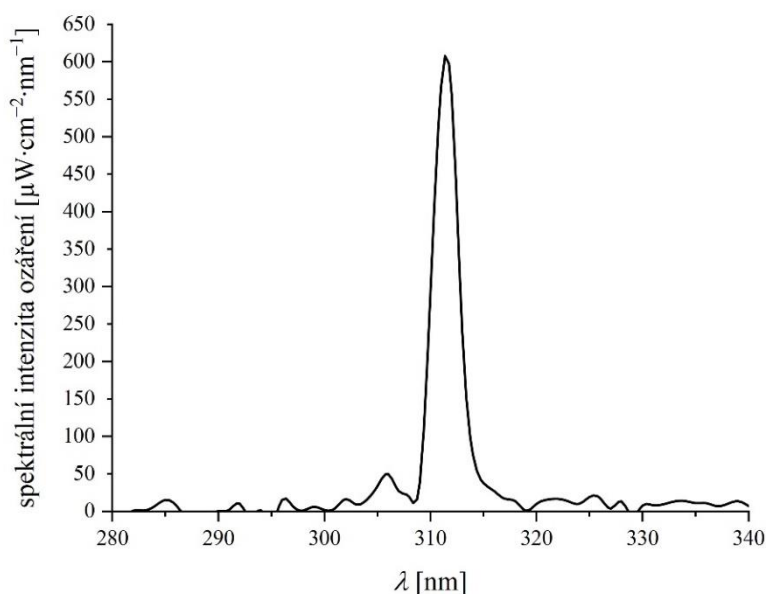
$$E = \frac{I}{d^2}$$

$$E_1 d_1^2 = E_2 d_2^2 \quad (11)$$

$$E_1 = E_2 \cdot \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$$

Hodnota spektrálních intenzit ozáření v daném intervalu je vyjádřena pomocí rovnice (12). Odpovídá ploše pod křivkou v rozmezí 300–320 nm. Ve vzdálenosti 5 cm se intenzita ozáření rovná 2,05 mW·cm<sup>-2</sup>. Naměřené spektrum je na obrázku 25.

$$E = \sum_{i=300}^{320} E_{\lambda_{300}} + E_{\lambda_{301}} + \dots + E_{\lambda_{320}} \quad (12)$$



**Obrázek 25** Spektrum zdroje UVB Lumenica ve vzdálenosti 5 cm

### 3.3.2 Ozařování zdrojem UVB Lumenica a následné měření

Ozařování probíhalo pomocí aparatury na obrázku 26. Vzdálenost byla upravována pomocí zvedáčku. Nejčastěji bylo prováděno měření ve vzdálenosti 5 cm od samotné zářivky. Pro měření byly vždy použity proužky nanosené kompozice o minimální velikosti cca 1,5×3 cm. Na tomto vzorku bylo vyznačeno místo, kde budou prováděna měření pomocí spektrofotometru. Současně je možné ozařovat pouze tři vzorky, jelikož u okrajů lampy je menší intenzita ozáření. Po 30 minutách ozařování je nutné lampu na 15 minut vypnout, aby se nepoškodila zářivka. Před ozařováním vzorků se lampa nechává 10 minut nahřát. Aby byla intenzita konstantní, tak se lampa v průběhu měření nevypíná, ale pouze zakrývá, když uběhne požadovaná doba ozáření (nejčastěji 1 min, 30 s nebo 15 s). Vzorky jsou spektrofotometrem změřeny před ozáření (údaj pro 0 min), poté např. minutu ozařovány a opět změřeny. Měření jsou opakována, dokud nedojde ke změně barvy a poté ještě cca čtyřikrát za tímto bodem, aby bylo možné data dobře vyhodnotit.



**Obrázek 26** Aparatura k ozařování vzorků pomocí UVB Lumenica

### 3.3.3 Spektrofotometrické měření

Spektrofotometr Eye-One Pro (obrázek 27) byl nastaven pro 2° pozorovatele s osvětlením D50. Spektrum intenzity ozáření bylo měřeno s krokem 10 nm ve vlnových délkách 380–730 nm. Před každým měřením byl spektrofotometr kalibrován na bílou podložku, na které probíhalo měření. Kromě odrazového spektra byly spektrofotometrem měřeny také souřadnice  $L^*a^*b^*$  v barvovém prostoru.

Naměřená data byla zaznamenávána do programu Microsoft Excel, kde byla také nadále vyhodnocována. Spektrální optická hustota je záporně vzatá hodnota dekadického logaritmu naměřené reflektance. Hodnoty spektrální optické hustoty byly vždy vyneseny do výstupních grafů v závislosti na vlnové délce.



**Obrázek 27** Spektrofotometr Eye-One Pro



### 3.3.4 Vyhodnocení dat

#### *Studentův t-test*

Pro vyjádření s jakou přesností lze danou metodou připravit dozimetr kalibrovaný na určitou dávku ozáření byl zvolen Studentův t-test. Udává, jakou hodnotu dávky ozáření bude dozimetr s 95% pravděpodobností mít a získá se jím výsledná hranice spolehlivosti.

#### *Citlivost*

Pro některá vyhodnocení se také používala citlivost  $S$  [ $\text{cm}^2 \cdot \text{J}^{-1}$ ], což je obrácená hodnota dávky erytemálně účinné dávky ozáření  $H_{\text{eff}}$  [ $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ ] dle rovnice (13).

$$S = \frac{1}{H_{\text{eff}}} \quad (13)$$

### 3.3.5 Měření tloušťky vrstev

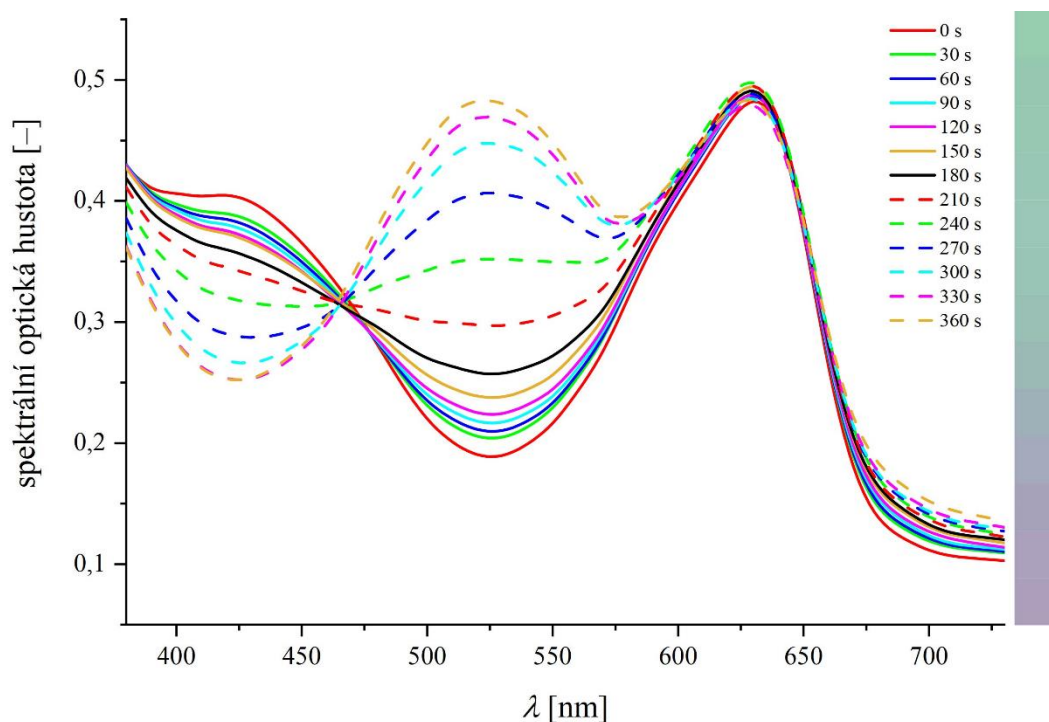
K přesnému měření tloušťky vrstvy byl použit profilometr DektakXT s programem Vision 64. Pro každou vrstvu byly připraveny dva vzorky, které byly změřeny třikrát a výsledkem byl průměr těchto šesti měření. Příprava vzorků spočívala v opatrném odškrábání části substrátu bez poškrábání podložní PET folie. Folie byla přilepena na podložní sklíčko. Jehla se při měření pohybovala z vyškrábaného místa (referenční hodnota) směrem na neporušenou vrstvu. Rozsah měření byl 2 mm po dobu 15 sekund, přítlak jehly byl 3 mg, radius 12,5  $\mu\text{m}$ , režim měření Hills & Valleys, výškový rozsah byl volen 65,5 nebo 6,5  $\mu\text{m}$  podle tloušťky měřených vrstev.

## 4 VÝSLEDKY A DISKUZE

### 4.1 Ozařování vzorků

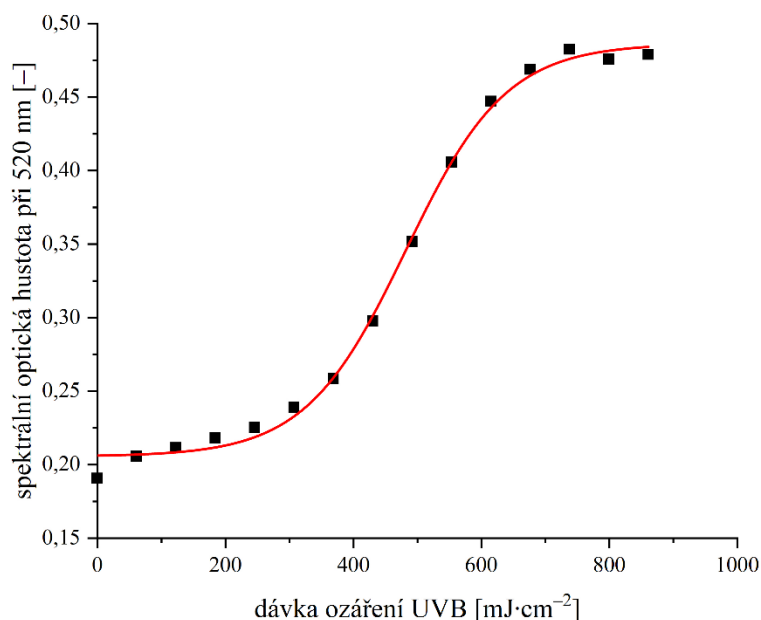
Na příkladu vzorku naneseného Bakerovým pravítkem 60 je níže ukázáno, jak byla data zpracována a vyhodnocena. Na obrázku 28 je odrazové spektrum, které bylo naměřeno spektrofotometrem Eye-One Pro. Ozařování a měření probíhalo v půlminutových intervalech ve vzdálenosti 5 cm od lampy, a tedy s intenzitou ozáření  $2,05 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

Také lze z tohoto grafu odrazového spektra poznat, že barevná změna byla ze zelené do fialové barvy. V průběhu ozařování klesala spektrální optická hustota v modré oblasti kolem 420 nm a stoupala v zelené oblasti kolem 520 nm. Absorpce záření v červené oblasti kolem 630 nm se neměnila.

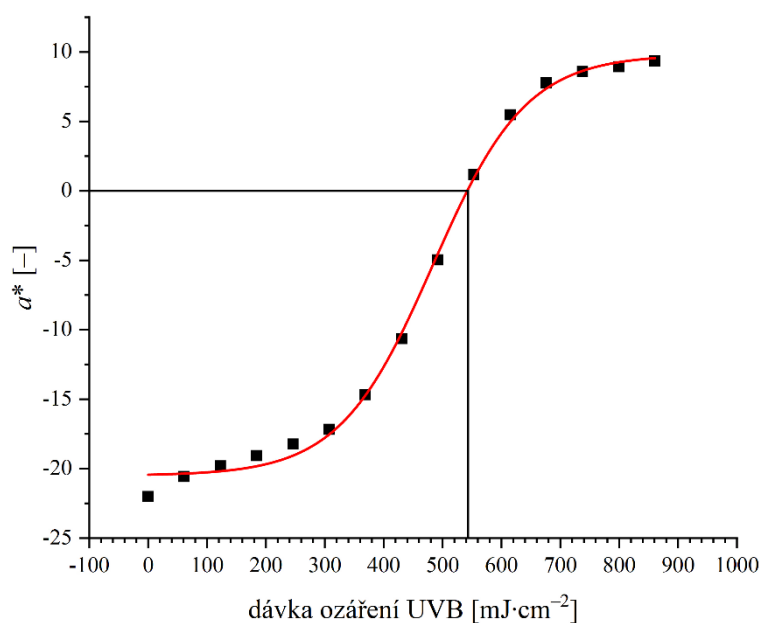


**Obrázek 28** Odrazové spektrum vzorku naneseného Bakerovým pravítkem 60

Oblast kolem 520 nm se také nejvíc hodí k vyhodnocení výsledků, jelikož v ní probíhala největší změna. Spektrální optická hustota při vlnové délce 520 nm byla dána do závislosti na dávce ozáření na obrázku 29. Dávka ozáření z inflexního bodu je zde  $490 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$  a dávka ozáření pro  $a^* = 0$  je  $542 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Dávka ozáření z inflexního bodu vyjadřuje dávku v prvním okamžiku barvého přechodu a určuje se pomocí inflexního bodu Boltzmannovy funkce v programu Origin (obrázek 29). Dávka ozáření pro  $a^* = 0$  se také určuje pomocí Boltzmannovy funkce, ale po proložení křivkou je vyjádřena dávka ozáření pro  $a^* = 0$  (graficky znázorněno na obrázku 30).

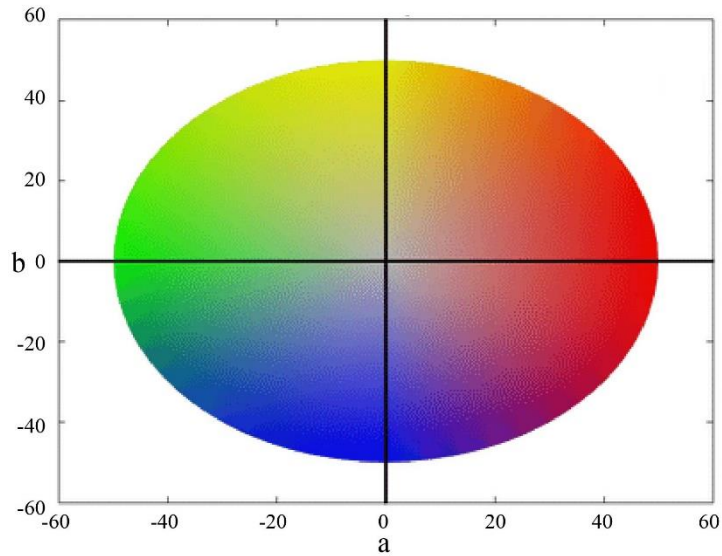


**Obrázek 29** Závislost spektrální optické hustoty při 520 nm na dávce ozáření UVB pro vzorek nanesený Bakerovým pravítkem 60



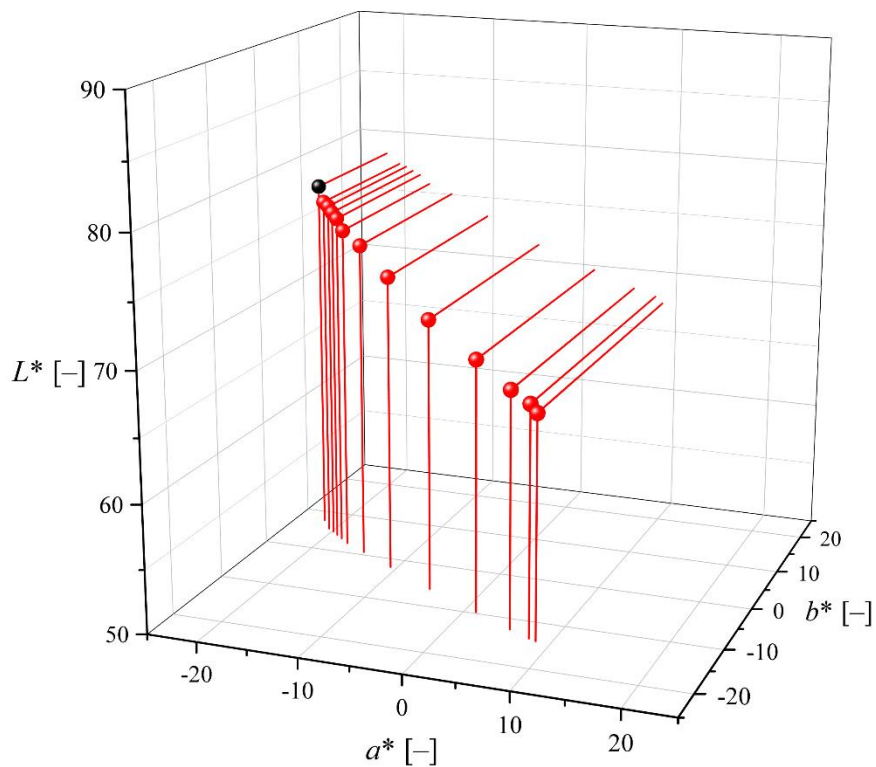
**Obrázek 30** Závislost parametru  $a^*$  na dávce ozáření pro vzorek nanesený Bakerovým pravítkem 60. Výsledná dávka ozáření je určena bodem, kde pomocná přímka  $a^* = 0$  protíná proložení Boltzmannovou křivkou. V tomto případě  $542 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$

Všechna měření probíhala v barvovém prostoru  $L^*a^*b^*$ .  $L^*$  vyjadřuje měrnou světlost a bývá znázorňováno na ose z v rozmezí 0–100. Na ose x bývá znázorněno  $a^*$ , které v záporných hodnotách odpovídá zelené a v kladné červené barvě. A souřadnice  $b^*$  bývá znázorněna na ose y a přechází z modré barvy v záporných oblastech do žluté barvy v kladných oblastech. Viz obrázek 31.



**Obrázek 31** Znáznornění změny barev v barvovém prostoru  $L^*a^*b^*$  při měrné světlosti  $L^* = 50^{\text{cit. 45}}$

Souřadnice  $L^*a^*b^*$  pro vrstvu nanesenou Bakerovým pravítkem 60 jsou na obrázku 32. Od počátečního černého bodu se měrná světlost  $L^*$  postupně snižuje. Souřadnice  $a^*$  přechází ze zelené do červené oblasti a souřadnice  $b^*$  přechází ze žluté do modré oblasti. Výsledkem je tedy počáteční zelená barva a výsledná fialová (vzniklá smísením modré a červené).



**Obrázek 32** Znáznornění barevné změny v barvovém prostoru  $L^*a^*b^*$  pro vzorek nanesený Bakerovým pravítkem 60. Počáteční bod je vyznačen černě

Důležitým údajem pro přípravu jednorázového UVB dozimetru je dávka ozáření, která způsobí barevnou změnu. UVB dozimetry byly připravovány opakovaně, kompozice byly namíchány vždy nové, a proto je důležitým parametrem interval spolehlivosti dávky ozáření, která způsobí barevnou změnu na nově připravovaných kompozicích dozimetru. Byla proto použita data dávky ozáření v inflexním bodě křivky (obrázek 29) pro několik připravených dozimetrů z různých opakovaně připravených kompozic. Ze sedmi vzorků byla vypočítána průměrná dávka ozáření v inflexním bodě křivky a interval spolehlivosti na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . K výpočtu byla použita funkce Excelu confidence.t.

Průměrná hodnota dávky ozáření z  $a^* = 0$  barevného přechodu UVB dozimetru naneseného Bakerovým pravítkem 60 je  $598 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$  a s 95% pravděpodobností není větší než  $676 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$  a není menší než  $520 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

## 4.2 Vliv přídavku hydroxidu sodného

Výsledná dávka ozáření se dá ovlivnit nejen tloušťkou vrstvy, ale také přídavky různých látek. Jednou z nich je například hydroxid sodný, který dávku ozáření potřebnou ke změně barvy zvyšuje. Postup přípravy vzorků je v kapitole 3.2.2. Předpoklad zvýšení potřebné dávky byl potvrzen, ale výsledky byly nekonzistentní. Při přípravě vzorků bylo stěžejní hydroxid nejemno nadrtit a zcela rozmíchat, což nebylo snadné. Jiné vlastnosti kompozice, než změny potřebné dávky ozáření, alkalizace hydroxidem nezpůsobila. V další práci bylo od používání hydroxidu upuštěno a dávka ozáření byla upravována pouze změnou tloušťky vrstvy.

Tabulka 6 Vliv různého přídavku hydroxidu sodného na dávku ozáření

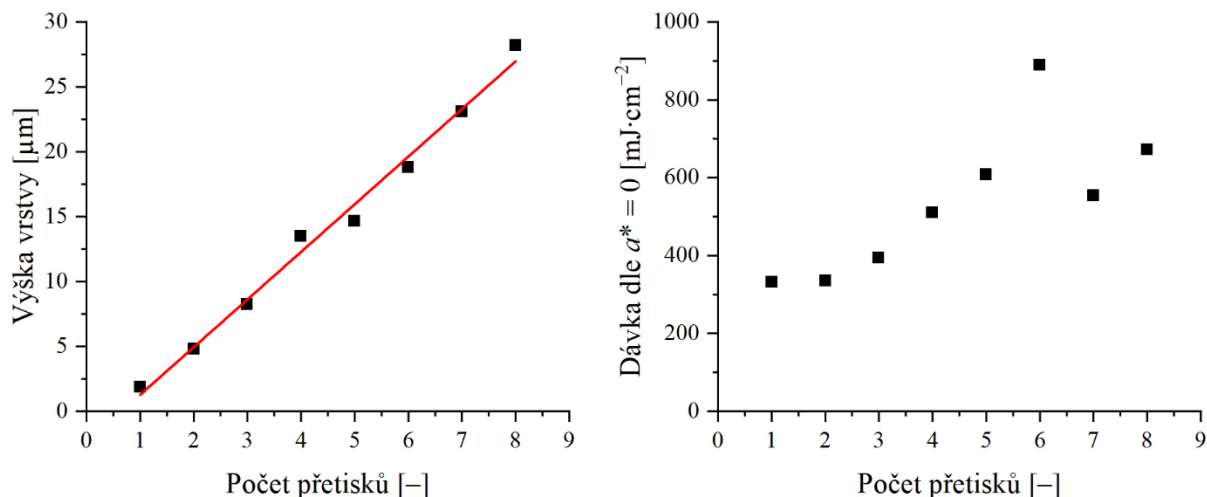
Vzorek	Množství přidaného NaOH [g]	Dávka ozáření z inflexního bodu [ $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]	Dávka ozáření podle $a^* = 0$ [ $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]
A	0,002	606	640
B	0,004	759	699
C	0,006	824	966
D	0,008	693	632
E	0,01	2 078	2 397

## 4.3 Měření závislosti na tloušťce vrstvy

K zjištění, jaký přesně vliv má tloušťka vrstvy na potřebnou dávku ozáření, byl proveden experiment, kdy byla připravena zásobní kompozice, ze které se tisklo na sítotisku sítem 140-31Y. Z této kompozice byly připraveny vzorky s jedním až osmi tisky na jednom místě a ty poté proměřeny. Výška vrstvy se zvyšovala lineárně (viz levý graf na obrázku 33). Dávka ozáření dle  $a^* = 0$  se také postupně zvyšovala. V rámci prvních šesti vrstev se dávka ozáření zvyšovala rovnoměrně, poté se začala odchylovat od trendu. Vzhledem k odpovídající výšce vrstvy nebude chyba v nanášení, ale je možné, že při vyšších

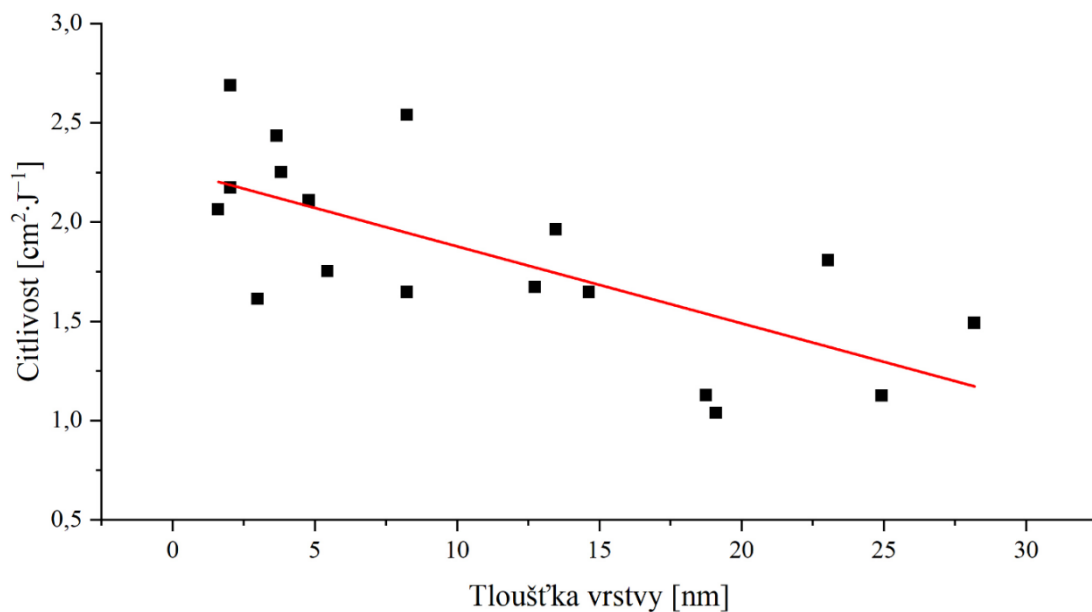
tloušťkách se již dané přetisky ovlivňují. Data ze síta 140-31Y se sedmi a osmi přetisky je tedy třeba brát s rezervou i v ostatních grafech.

Při používání sítotisku lze poměrně přesně odhadnout výšku suché vrstvy. Pro každé síto je totiž dán teoretický objem protlačené barvy [ $\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ ], který odpovídá výšce mokré vrstvy v  $\mu\text{m}$ . Bylo změřeno, že sušina tvoří 30,22 % kompozice. Výška suché vrstvy tedy bude zhruba třetinová oproti mokré vrstvě. Díky znalosti obsahu sušiny je možné poměrně přesně vybrat vhodné síto.



**Obrázek 33** Závislost výšky vrstvy a dávky ozáření dle  $a^* = 0$  na počtu přetisků u kompozic ze stejné série

Předchozí grafy jsou vhodné pro vyjádření vztahů v rámci jedné série měření se stejnou látkou. K vytvoření globálního vztahu byl vytvořen graf na obrázku 34. Kde byla z průměrných hodnot pro jednotlivé tloušťky vypočítána citlivost. S rostoucí tloušťkou vrstvy citlivost klesá.



**Obrázek 34** Závislost citlivosti na tloušťce vrstvy. Citlivost byla vypočítána z průměrné dávky ozáření dle  $a^* = 0$  pro danou nanášecí techniku. Obdobně i tloušťka vrstvy je průměrem pro danou nanášecí techniku.

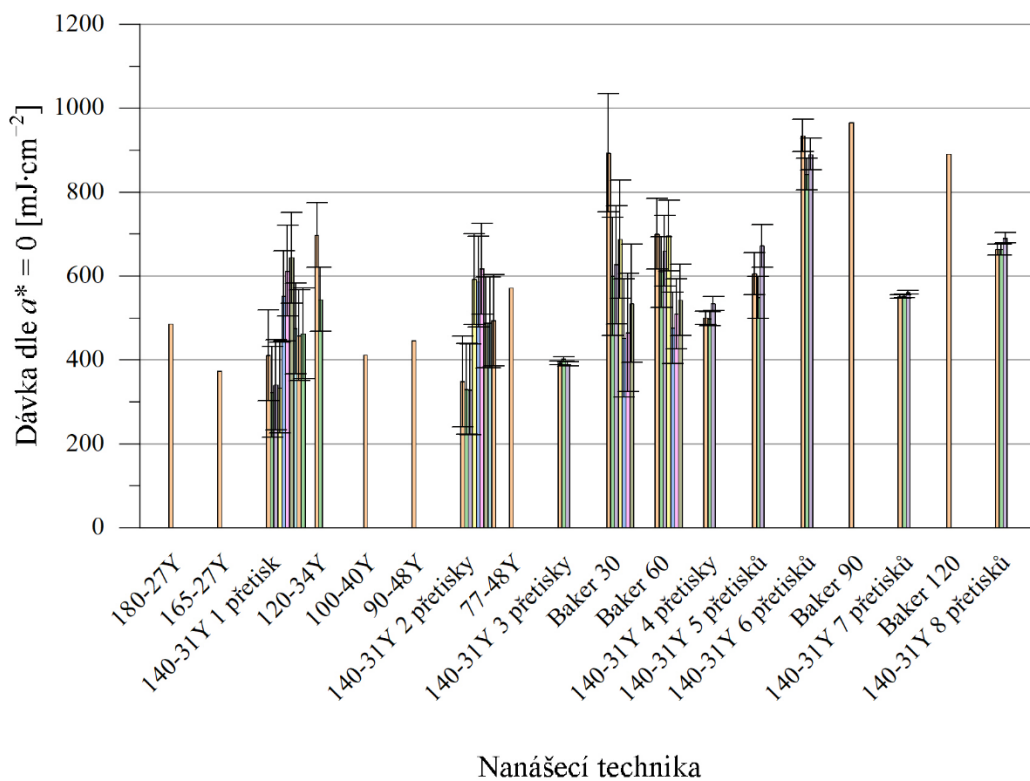
#### 4.4 Vyhodnocení dávky ozáření pro jednotlivé metody nanášení

Všechna data byla dána do vzájemné souvislosti a vyhodnocena pomocí Studentova t-testu. Veškeré výsledky jsou shrnuty v tabulce 7. Graficky jsou znázorněny na obrázku 35, kde jsou u dat chybové úsečky ze směrodatné odchylky. V grafu na obrázku 36 je vynesena průměrná hodnota dávky ozáření z  $a^* = 0$  s citlivostí z t-testu. Pro síto 120-34Y byly vyhodnoceny pouze dva vzorky, které měly velký rozdíl, a proto je chybová úsečka tak velká.

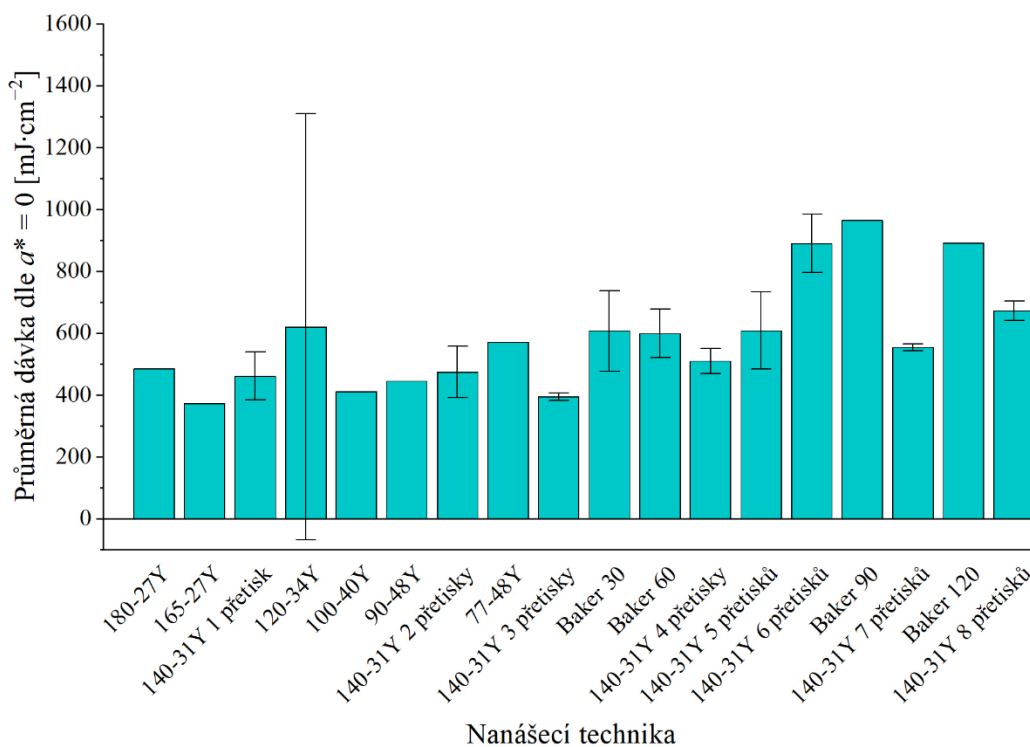
Pro některé způsoby nanášení nemohla být vyjádřena odchylka ani citlivost. Jedná se o případy, kdy byl k dispozici jen jeden vzorek nanesený danou technikou.

**Tabulka 7** Výsledné průměrné dávky ozáření pro každou metodu nanášení s citlivostí vycházející z t-testu

Způsob nanášení	Počet vzorků	Průměrná tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]	Průměrná dávka ozáření z inflexu [ $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]	Citlivost [ $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]	Průměrná dávka ozáření dle $a^* = 0$ [ $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]	Citlivost [ $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]
180-27Y	1	1,62	331	–	485	–
165-27Y	1	2,04	328	–	372	–
140-31Y 1 přetisk	10	2,04	420	98	460	77
120-34Y	2	3,00	494	695	620	689
100-40Y	1	3,67	351	–	411	–
90-48Y	1	3,83	373	–	445	–
140-31Y 2 přetisky	9	4,79	452	106	474	83
77-48Y	1	5,45	427	–	571	–
140-31Y 3 přetisky	3	8,24	374	13	394	12
Baker 30	7	8,25	512	105	608	130
Baker 60	7	12,74	536	78	598	78
140-31Y 4 přetisky	3	13,47	487	54	510	41
140-31Y 5 přetisků	3	14,64	581	158	608	125
140-31Y 6 přetisků	3	18,76	869	123	889	94
Baker 90	1	19,10	806	–	965	–
140-31Y 7 přetisků	3	23,05	523	12	554	11
Baker 120	1	24,93	781	–	890	–
140-31Y 8 přetisků	3	28,19	633	48	672	32



**Obrázek 35** Grafické zobrazení všech naměřených hodnot pro každou nanášecí techniku se směrodatnými odchylkami



**Obrázek 36** Grafické znázornění průměrné dávky ozáření dle  $\alpha^* = 0$  pro každou nanášecí techniku s vyznačenou odchylkou odpovídající citlivosti



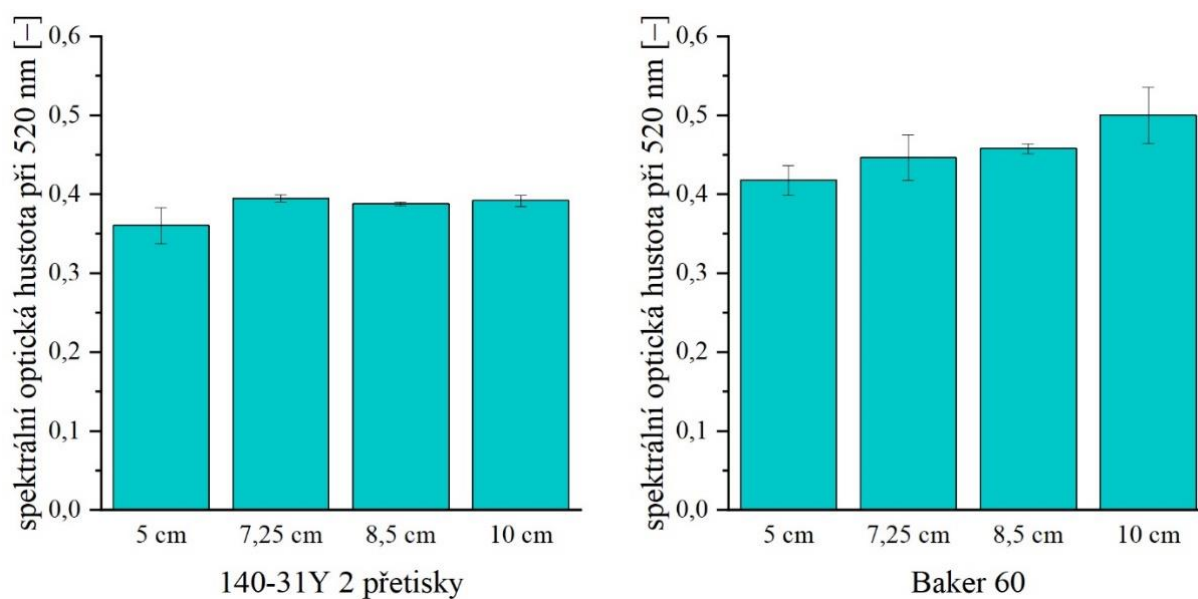
## 4.5 Reciproční test

Jednou ze základních vlastností jednorázového dozimetru je platnost recipročního zákona (Bunsen-Roscoe). To znamená, že barevná změna indikující požadovanou dávku záření nesmí být závislá na intenzitě záření, nýbrž výhradně na dávce záření. Proto byly vybrané vzorky nanesené sítem 140-31Y exponované čtyřmi různými intenzitami záření z různé vzdálenosti od zdroje tak, aby součin intenzity záření a času expozice, který poskytuje dávku ozáření, byl konstantní. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 8 a na obrázku 37.

Naměřené spektrální optické hustoty se od průměrné hodnoty neliší o více než 10 %, proto je možné považovat změnu zbarvení jednorázového dozimetru za nezávislou na intenzitě záření a reciproční test byl úspěšný.

Tabulka 8 Výsledky recipročního testu

Vzdálenost [cm]	Intenzita ozáření [ $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]	140-31Y 2 přetisky		Baker 60	
		Spektrální optická hustota při 520 nm [-]	Směrodatná odchylka [-]	Spektrální optická hustota při 520 nm [-]	Směrodatná odchylka [-]
5	2,05	0,36	0,02	0,42	0,02
7,25	0,98	0,395	0,005	0,45	0,03
8,5	0,71	0,388	0,003	0,458	0,006
10	0,51	0,392	0,007	0,50	0,04



Obrázek 37 Grafické znázornění výsledků recipročního testu

## 5 ZÁVĚR

Cílem práce bylo připravit jednorázové UVB dozimetry kalibrované na dávku ozáření 500 a 1 000  $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Po vyhodnocení všech výsledků těmito hodnotám odpovídají dozimetry připravené dvěma a šesti přetisky sítem 140-31Y. Dva přetisky sítem 140-31Y mají přechod v dávce ozáření  $474 \pm 83 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Šest přetisků sítem 140-31Y má přechod v dávce ozáření  $889 \pm 94 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Chyba opakování je u všech připravených dozimetrů cca 100  $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Pro dávku ozáření 1 000  $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$  by bylo možné použít také Bakerovo pravítko 90, kterým je dosaženo velmi podobné tloušťky a dávky nebo jiného síta s větším teoretickým objemem barvy, aby výsledná vrstva byla stejně tlustá, ale nebylo potřeba tolik přetisků.

Jedna ze zkoumaných metod pro ovlivnění potřebné dávky ozáření byla alkalizace vrstvy. S přidavky NaOH potřebná dávka ozáření stoupala. Výsledky byly ale nekonzistentní. Bylo zjištěno, že už malý přírůstek alkálie má velký vliv. Přírůstek NaOH odpovídající přibližně 0,08 % hmotnosti připravované kompozice potřebnou dávku ozáření téměř zčtyřnásobil.

Nejdůležitější zkoumaným vlivem na dávku ozáření byla tloušťka vrstvy. Bylo potvrzeno, že se zvyšující se tloušťkou vrstvy klesá citlivost. Při experimentu s různým počtem přetisků vytvořených stejným sítem a se stejným složením vrstvy bylo zjištěno, že do šesti přetisků potřebná dávka ozáření přibližně lineárně stoupá. Sedm a osm přetisků se pak již danému trendu vymyká a lze předpokládat, že zde již dochází k interakci mezi jednotlivými přetisky, která ovlivňuje potřebnou dávku ozáření.

Pro danou kompozici byl také proveden reciproční test. Je důležité, aby výsledná dávka ozáření závisela pouze na intenzitě záření. Výsledné hodnoty se lišily maximálně o 10 % od průměru, a lze proto prohlásit, že reciproční test byl úspěšný.

Výsledná dávka ozáření byla u všech vrstev vypočítána pomocí kritéria  $a^* = 0$ . Naměřené hodnoty barvové souřadnice  $a^*$  byly dány do závislosti na dávce ozáření a proloženy Boltzmannovou funkcí. V místě, kde tato funkce odpovídá  $a^* = 0$  leží výsledná dávka ozáření. Metoda vyhodnocení byla zvolena tak, aby korespondovala vizuálnímu vjemu. Bylo vyzkoušeno více způsobů, ale právě tato metoda poskytla data, která byla nejbližší realitě.

Důležitou vlastností výsledného dozimetru musela být také dobrá tisknutelnost a výroba. Jako porovnávací metoda sloužilo Bakerovo pravítko, které je vhodné do laboratorního prostředí. Jako provozní technika byl zvolen sítotisk, kde lze z teoretického objemu barvy a sušiny velmi dobře odhadnout tloušťku suché vrstvy.

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Šmok J, Tausk P, Pecák J. *Barevná fotografie*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury; 1975.
2. Chemistry L. Electromagnetic Radiation. [online]. Dostupné z: <https://chem.libretexts.org/@go/page/1779>, [cit. 2024-03-09].
3. Hamblin MR, Huang Y-Y. *Handbook of photomedicine*. Boca Raton: CRC Press; 2014.
4. ISO. Space environment (natural and artificial) — Process for determining solar irradiances. *ISO 21348*. Ženeva, Švýcarsko: International Organization for Standardization; 2007.
5. Standardization IO. ISO 21348:2007. [online]. 2021; Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/39911.html>, [cit. 2024-01-26].
6. Jančovičová V. *Fotochémiá : princípy a aplikácie*. 2. doplnené a aktualizované vydanie ed. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave; 2023.
7. Fanglová M. *Tištěné chemické sensory UV záření* [Bakalářská práce], Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická; 2021.
8. Allaart M, Van Weele M, Fortuin P, Kelder H. An empirical model to predict the UV-index based on solar zenith angles and total ozone. *Meteorological Applications*. 2004;59–65.
9. Heckman CJ, Chandler R, Kloss JD, et al. Minimal Erythema Dose (MED) Testing. *Journal of Visualized Experiments*. 2013(75).
10. Kwon IH, Kwon HH, Na SJ, Youn JI. Could colorimetric method replace the individual minimal erythemal dose (MED) measurements in determining the initial dose of narrow-band UVB treatment for psoriasis patients with skin phototype III-V? *J Eur Acad Dermatol Venereol*. 2013;27(4):494–498.
11. Group M. MED-Tester MINI UVB 311 nm MEDlight KN4003BL. [online]. 2024 <https://www.shop.medicton.com/med-tester-mini-uvb-311-nm-medlight-kn4003bl.html>, [cit. 2024-01-25].
12. CIE. Standard Erythema Dose, a Review. *CIE 125-1997*. Vienna, Austria: Central Bureau; 1997.
13. Webb AR, Engelsens O. Calculated Ultraviolet Exposure Levels for a Healthy Vitamin D Status. *Photochemistry and Photobiology*. 2006;82(6):1697–1703.
14. CIE. Rationalizing nomenclature for UV doses and effects on humans. *CIE 209:2014*. Vienna, Austria: Central Bureau; 2014.
15. Krajsová I. *Je opalování nebezpečné?* 2., rozšířené vydání ed. Praha: Maxdorf; 1995.
16. Šíma P, Turek B. Příběh vitamínu D. *Živa*. 2015:159–161.
17. Goldsmith LA, Katz SI, Gilchrest BA, Paller AS, Leffell DJ, Wolff K. *Fitzpatrick's Dermatology in General Medicine, 8e*. New York, NY: The McGraw-Hill Companies; 2012.
18. Trautinger F. Mechanisms of photodamage of the skin and its functional consequences for skin ageing. *Clin Exp Dermatol*. 2001;26(7):573–577.

19. Medicine NGS. Review of the Basics of DNA replication and DNA repair. [online]. 2024; Dostupné z: <https://education.med.nyu.edu/mbm/DNAreplicationBasics/>, [cit. 2024–01–26].
20. Studio M. Seznamte se s tóny pleti. [online]. Dostupné z: [https://www.mahastudio.cz/blog/data-text-mce-internal-text\\_1-seznamte-20se-20s-20t-f3ny-20pleti](https://www.mahastudio.cz/blog/data-text-mce-internal-text_1-seznamte-20se-20s-20t-f3ny-20pleti), [cit. 2024–01–26].
21. Astner S, Rox Anderson R. Skin Phototypes 2003. *Journal of Investigative Dermatology*. 2004;122(2):xxx-xxxi.
22. Novotná J. *Měření a analýza erytemového UV slunečního záření v Brně* [Bakalářská práce], Masarykova univerzita Brno. Přírodovědecká fakulta; 2015.
23. Kerr J, Seckmeyer G, Bais A, et al. *Surface ultraviolet radiation: Past and future*. 2003.
24. Chmielinski MJ, Cohen MA, Yost MG, Simpson CD. Wearable Spectroradiometer for Dosimetry. *Sensors*. 2022;22(22):8829.
25. Robinson JK, Patel S, Heo SY, et al. Real-Time UV Measurement With a Sun Protection System for Warning Young Adults About Sunburn: Prospective Cohort Study. *JMIR mHealth and uHealth*. 2021;9(5):25 895.
26. Seidlitz HK, Thiel S, Krins A, Mayer H. Solar radiation at the Earth's surface. In: Paolo UG, ed. *Sun Protection in Man*. Vol 3: Elsevier; 2001:705–738.
27. Xu G, Huang X. Characterization and calibration of broadband ultraviolet radiometers. *Metrologia*. 2000;37(3):235–242.
28. Bigelow DS, Slusser JR, Beaubien AF, Gibson JH. The USDA Ultraviolet Radiation Monitoring Program. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1998;79(4):601–616.
29. Hodges G, Michalsky J. *Multifilter Rotating Shadowband Radiometer (MFRSR) Handbook*. Office of Scientific and Technical Information;2011.
30. Diffey B. The Early Days of Personal Solar Ultraviolet Dosimetry. *Atmosphere*. 2020;11(2):125.
31. Geiss O, Groebner J, Rembges D. *Manual for Polysulphone Dosimeters Characterisation, Handling and Application as Personal UV Exposure Devices*. Italy: European Communities;2003.
32. Zweig A, Henderson WA. A Photochemical Mid-ultraviolet Dosimeter For Practical Use As A Sunburn Dosimeter. *Photochemistry and Photobiology*. 1976;24(6):543–549.
33. Klusoň P, Dzik P, Veselý M, et al. Barevné hodiny-chemický expoziční dozimetr. *Chemické listy*. 2017;111(10):644–653.
34. Horkay I, Wikonkál N, Patkó J, et al. SUNTEST: a chemical UVB radiation dosimeter. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 1995;31(1):79–82.
35. Smartsunband. SmartSun. [online]. 2023; Dostupné z: <https://smartsunband.com/>, [cit. 2024–01–29].
36. AB IT. SmartSun Bands. [online]. 2023; Dostupné z: <https://intellego-technologies.com/smartsun-bands/>, [cit. 2024–01–29].

37. Mills A, Grosshans P, McFarlane M. UV dosimeters based on neotetrazolium chloride. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2009;201(2):136–141.
38. Mills A, Mcfarlane M, Schneider S. A viologen-based UV indicator and dosimeter. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2006;386(2):299–305.
39. Mills A, Grosshans P. UV dosimeter based on dichloroindophenol and tin(IV) oxide. *Analyst*. 2009;134(5):845–850.
40. Troche K, Ramaiyan K, Boyle TJ, Garzon FH. Bismuth Oxychloride Nanoflakes Enabled High Sensitivity Colorimetric UV Dosimetry. *ACS Appl Nano Mater*. 2023;6(7):6259–6269.
41. Kabelková M. *Materiálový tisk světelných dozimetrů* [Diplomová práce], Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická; 2019.
42. Kaplanová M. *Moderní polygrafie*. Praha: Svaz polygrafických podnikatelů; 2010.
43. PHYSICS I. TQC Sheen Baker Film Applicators. [online]. 2024; Dostupné z: <https://industrialphysics.com/product/baker-film-applicators/>, [cit. 2024–03–04].
44. GAMIN. Natahovací pravítko Baker - Elcometer 3520. [online]. 2024; Dostupné z: <https://www.elcometer.cz/elcometer-3520/>, [cit. 2024–03–04].
45. Bagdasar O, Birlutiu A, Chen M, Popa I-L. Qualitative case study methodology: Automatic design and correction of ceramic colors. 21st International Conference on System Theory, Control and Computing; 2017.

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

UVA	ultrafialové záření A
UVB	ultrafialové záření B
UVC	ultrafialové záření C
NUV	blízké ultrafialové záření
MUV	střední ultrafialové záření
FUV	daleké ultrafialové záření
H Lyman- $\alpha$	vodíkové Lyman-alfa záření
EUV	extrémní ultrafialové záření
VUV	vakuové ultrafialové záření
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování (Commission internationale de l'éclairage)
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci (International Organization for Standardization)
$E_{\text{eff}}$	erytemálně efektivní intenzita ozáření [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
$E_e^\lambda$	sluneční spektrální ozáření [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ ]
$s_{\text{er}}^\lambda$	akční spektrum erytému
$\lambda$	vlnová délka [nm]
UV	ultrafialové záření
UVI	ultrafialový index
$k_{\text{er}}$	konstanta o hodnotě $40 \text{ m}^2\cdot\text{W}^{-1}$
SPF	ochranný faktor (Sun Protection Factor)
$T_\lambda$	transmitance záření ochrannou vrstvou SPF
MED	minimální erytemální dávka
$L^*$	měrná světlost
$a^*$	souřadnice v červeno-zelené oblasti
$b^*$	souřadnice ve žluto-modré oblasti
SED	standardní erytemální dávka
$t$	čas [s]
$H_{\text{eff}}$	erytemálně účinná dávka ozáření [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$ ]

SDD	standardní dávka vitamínu D
IU	mezinárodní jednotka (international unit)
MDD	minimální dávka vitamínu D
DU	Dobsonova jednotka
s. š.	severní šířka
DNA	deoxyribonukleová kyselina
RNA	ribonukleová kyselina
NADH	redukováná forma nikotinamidadeninukleotidu
C	cytosin
T	thymín
PLE	sluneční alergie (Polymorphous Light Eruption)
$d$	tloušťka vláken [ $\mu\text{m}$ ]
$w$	šíře oka síta [ $\mu\text{m}$ ]
$D$	tloušťka síťoviny [ $\mu\text{m}$ ]
$F_0$	otevřená plocha síta [%]
$V_{\text{th}}$	teoretický objem přenesené barvy $V_{\text{th}}$ [ $\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ ]
TM	toluidinová modř
MO	methylořez