

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ



## BETON A SVĚTLO

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vypracovala:**  
**Vedoucí práce:**

Věra Kabíčková  
doc. Ing. Petr Bílý, Ph.D.

**2020/2021**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kabičková Jméno: Věra Osobní číslo: 477130  
Zadávající katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Beton a světlo

Název bakalářské práce anglicky: Concrete and light

Pokyny pro vypracování:

- Přehled netradičních druhů betonu využívajících světlo
- Rešerše literatury - výzkum a vývoj, výrobní postupy, komerčně dostupné produkty, aplikace
- Charakteristika specifických druhů materiálů používaných v předmětných betonech (luminiscenční látky, optická vlákna)
- Zajištění materiálu pro laboratorní experimenty
- Výroba a zhodnocení pilotní série vzorků vybraného materiálu

Pakliže objektivní důvody nezávislé na vůli studentky znemožní realizaci posledního bodu zadání, bude tento nahrazen bodem:

- Návrh a zobrazení možných uplatnění v interiéru

Seznam doporučené literatury:

- LuminTech: <https://www.lumintech.com/>
- Gao, Y. et al: Study on properties and mechanisms of luminescent cement-based pavement materials with super-hydrophobic function. Construction and Building Materials 165 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.231>
- LitraCon: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zaklady-a-hruba-stavba/cement-a-beton/prusvitny-beton-litracon>
- Tahwia, A.M et al: Light transmittance performance of sustainable translucent self-compacting concrete. Journal of Building Engineering 38 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102178>
- Samostatně vyhledejte a zapracujte další vhodné zdroje

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Petr Bílý, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 17.2.2021 Termín odevzdání bakalářské práce: 16.5.2021  
*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

19.2.2021

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Petra Bílého, Ph.D. a s použitím uvedené literatury a podkladů.

V Praze dne

.....  
Věra Kabíčková

## Poděkování

Především bych zde chtěla poděkovat svému vedoucímu práce, doc. Ing. Petrovi Bílému, Ph.D., za všechny rady, podněty a velké množství času, který mi byl ochotný věnovat, za pomoc při výrobě a měření vzorků a celkově za jeho vstřícný přístup. Dále chci poděkovat Ing. Josefu Fládrovi, Ph.D. za asistenci při výrobě vzorků, Ing. Tomášovi Trtíkovi a Ing. Romanovi Chylíkovi za pomoc při měření vzorků a dále Ing. Bc. Jaroslavu Vychytilovi, Ph.D. za zapůjčení jasoměru a asistenci při měření.

V neposlední řadě bych chtěla poděkovat celé své rodině za podporu a poskytnuté zázemí během dosavadního studia a při psaní této práce a také přátelům za jejich oporu, ale zároveň rozptýlení.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá využitím světla v technologii betonu, zejména průsvitným a luminiscenčním betonem. První kapitola obsahuje úvod představující význam využití světla v souvislosti s takovým materiálem, jakým je beton. Druhá kapitola pak představuje základní pojmy ve světelné technice. Třetí kapitola uvádí materiály, jaké se v této souvislosti objevují, způsob jejich výroby a použití. Čtvrtá kapitola se věnuje praktické výrobě vzorků luminiscenčního betonu a popisuje způsob a průběh jejich měření. Je popsán průběh poklesu svítivosti vzorků v čase a vliv doby působení světelného zdroje na průběh svítivosti. Nakonec jsou vyhodnoceny získané výsledky a uvedena doporučení pro případný navazující výzkum.

## **Klíčová slova**

Beton, průsvitný beton, luminiscenční beton, světelná technika, jas

## **Abstract**

This thesis is focused on the use of light in concrete technology, especially light transmitting concrete and luminescent concrete. The first chapter contains an introduction explaining the importance of the use of light in relation to concrete. The second chapter describes the terminology used in light technology. The third chapter presents the materials which appear in this context, methods of their preparation and their use. The fourth chapter is focused on practical preparation of several specimens of luminescent concrete, describes the way of their preparation and their measurement. It also describes decrease of lightness over time and the effect of different light duration. Finally, evaluation of results and recommendations for possible follow-up research are given.

## **Key words**

Concrete, light transmitting concrete, luminescent concrete, lighting technology, luminance

# Obsah

1	Úvod.....	8
2	Úvod do světelné techniky.....	9
2.1.	Základní světelné parametry.....	9
2.1.1.	Světelný tok.....	9
2.1.2.	Prostorový úhel .....	10
2.1.3.	Svítivost .....	10
2.1.4.	Osvětlenost (intenzita osvětlení).....	11
2.1.5.	Jas.....	11
2.1.6.	Světlení.....	11
2.2.	Barevné vlastnosti světelných zdrojů.....	12
2.2.1.	Barevný tón.....	12
2.2.2.	Chromatické a achromatické barvy .....	12
2.2.3.	Teplota chromatičnosti.....	12
2.2.4.	Index podání barvy.....	12
2.3.	Měřicí přístroje.....	13
2.3.1.	Luxmetr .....	13
2.3.2.	Jasoměr.....	13
2.3.3.	Jasový analyzátor .....	13
2.3.4.	Spektrofotometr .....	13
3	Současné materiály .....	14
3.1.	Luminiscence.....	14
3.2.	Luminiscenční beton – kamenivo .....	15
3.2.1.	Materiál.....	15
3.2.2.	Výroba luminiscenčního betonu pomocí kameniva.....	16
3.2.3.	Příklady aplikace .....	16
3.3.	Luminiscenční beton – příměs .....	19
3.3.1.	Materiál.....	19
3.3.2.	Výroba luminiscenčního betonu pomocí příměsí .....	19
3.3.3.	Výstupy studií – mechanické vlastnosti.....	20
3.3.4.	Výstupy studií – světelné vlastnosti.....	22
3.3.5.	Příklady aplikace .....	26
3.4.	Luminiscenční cement.....	27
3.5.	Průsvitný beton – optická vlákna .....	28
3.5.1.	Materiál.....	28
3.5.2.	Výroba průsvitného betonu pomocí optických vláken .....	29

3.5.3.	Příklady aplikace .....	29
3.6.	Průsvitný beton-průsvitné prvky.....	32
3.6.1.	Materiál.....	32
3.6.2.	Výroba průsvitného betonu pomocí průsvitných prvků .....	32
3.6.3.	Příklady aplikace .....	33
4	Praktická část .....	36
4.1.	Postup měření a vyhodnocení.....	37
4.2.	Luminiscenční beton – kamenivo .....	38
4.2.1.	Materiály .....	39
4.2.2.	Postup výroby.....	40
4.3.	Luminiscenční beton – příměs .....	41
4.3.1.	Materiály .....	41
4.3.2.	Postup výroby.....	42
4.4.	Výstupy měření.....	44
4.4.1.	Porovnání kameniva a příměsi.....	44
4.4.2.	Kamenivo.....	49
4.4.3.	Příměs .....	51
4.5.	Měření jasoměrem.....	53
4.6.	Diskuze výsledků.....	57
5	Závěr .....	59
	Použitá literatura .....	60
	Seznam obrázků .....	63
	Seznam tabulek .....	66

# 1 Úvod

Člověk přijímá až 80 % informací zrakem, osvětlení prostorů proto hraje zásadní roli jak z hlediska bezpečnosti, tak z hlediska komfortu. Světelné zdroje však vyžadují trvalý zdroj energie, to ale nemusí být nezbytně nutné. Pokud se podíváme do přírody, nalezneme zde mnoho příkladů, kdy materiály či organismy spontánně září, například světlušky či medúzy. Pokud by tedy materiály byly schopné pracovat se světlem na podobném principu, mohlo by se omezit množství světelných zdrojů vyžadujících stálý přísun energie. Druhým problémem je, že konstrukční materiály, obzvláště ty, které plní také nosnou funkci, mají takové vlastnosti, které neumožňují vstup světla do budovy či mezi jednotlivými místnostmi uvnitř budovy.

Zároveň jedním z nejčastěji používaných materiálů je beton, používá se hojně jak v exteriéru, tak v interiéru. Složení betonu nabízí mnoho možností, jakými lze jeho vlastnosti modifikovat, je proto snaha o neustálý vývoj, od zpracovatelnosti (například samozhutnitelný beton), přes únosnost (např. vysokopevnostní beton) až po estetiku (např. pohledový beton).

S betonem je možné setkat se téměř všude, například v budovách je čím dál častěji snaha o použití pohledových betonů, které nabízí mnoho barev, ale i vzorů. Tyto možnosti plní pouze funkci estetickou, začínají se však objevovat i takové materiály, které jsou schopné využívat světlo či s ním pracovat. Využitím světla v technologii betonu by se tedy dosáhlo takového materiálu, který by plnil funkci konstrukční a zároveň světelnou, ale také funkci estetickou.

Osvětlení venkovních i vnitřních prostorů je nezbytnou součástí každodenního života. To je však finančně náročné, motivací práce tedy bylo prozkoumat alternativy, které by umožnily alespoň částečnou úsporu energie a zároveň by přinášely nové vizuální možnosti v technologii betonu.

Mezi hlavní cíle této práce patří:

- Základní přehled existujících možností, jakými je v technologii betonu zacházeno se světlem.
- Výběr některých materiálů a jejich následná výroba.
- Měření vzorků, na jejichž základě bude možné určit, zda dané materiály efektivně pracují se světlem.
- Určení dalších vhodných zaměření výzkumu a uvedení možných použití na základě dosažených výsledků měření.

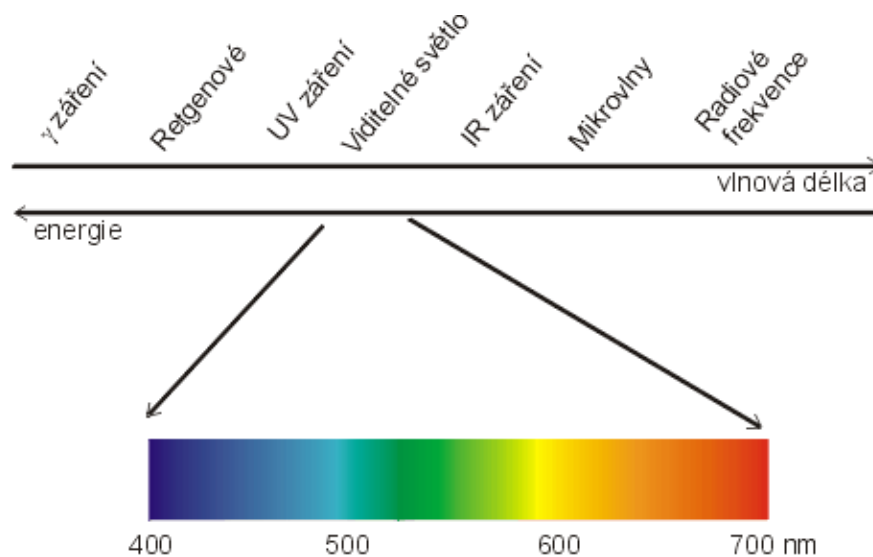


## 2 Úvod do světelné techniky

Jak již bylo řečeno, člověk přijímá kolem 80 % informací o okolí zrakem, proto je stanovení ideálního světelného mikroklimatu pro správnou funkci člověka zásadní. Světlo má na člověka dopad nejenom fyziologický (tepová frekvence, látkový metabolismus aj.), ale také psychologický (únava, soustředění, deprese atp.). Nevhodné osvětlení tak může vést k úrazům, poklesu nálady, soustředění a celkově k poklesu výkonu člověka.

### 2.1. Základní světelné parametry

Světlo neboli viditelné záření je část elektromagnetického záření, kterou vnímá lidské oko. Tato oblast odpovídá vlnovým délkám od 380 do 780 nm, kratší vlnové délky jsou ultrafialové záření, delší vlnové délky jsou pak infračervené záření.



Obr. 2.1: Elektromagnetické spektrum [1]

Protože zrakový orgán člověka není schopen vnímat celkové působení světla za určitý čas, je posuzován výkon čili zářivý tok zdrojů a jeho prostorového rozložení. Z tohoto důvodu ve světelné technice posuzujeme fotometrické veličiny. Tyto veličiny zohledňují proměnlivost lidského oka ve vztahu k záření různých vlnových délek.

#### 2.1.1. Světelný tok

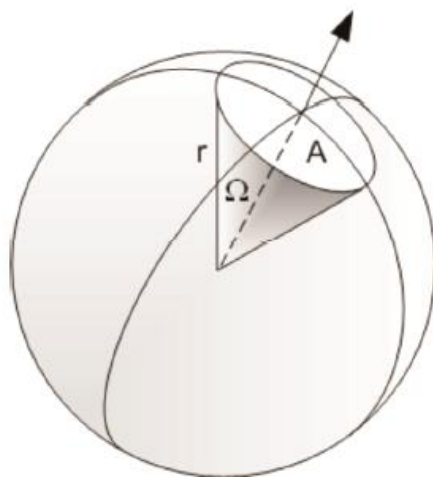
Světelný tok  $\Phi$  vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový vjem. Druhou možnou definicí je množství světelné energie, kterou vyzáří zdroj do svého okolí.

Jednotkou je lumen [lm].

Tato jednotka patří mezi základní jednotky zdrojů světla, většinou je známá a je uváděna na obalech světelných zdrojů. Světelný tok se u umělých zdrojů v čase snižuje. Například u kompaktních žárovek světelný tok poklesne na konci jejich životnosti až na 30 % původní hodnoty a jejich životnost výrazně ovlivňuje časté rozsvícení a zhasínání. Na rozdíl od kompaktních žárovek, světelný tok LED žárovek poklesne na konci životnosti pouze na 70 % původní hodnoty, ovšem jsou velmi citlivé na přehřívání (teploty nad 70 °C).

### 2.1.2. Prostorový úhel

Prostorový úhel  $\Omega$  je část prostoru, který je vymezen kuželovou plochou, jež na kouli o poloměru  $r$  vytvoří plochu  $A$ . Vrchol kužele je shodný se středem koule.



Obr. 2.2: Vymezení prostorového úhlu [2]

Jednotkou je steradián [sr].

Prostorový úhel se vypočte ze vztahu:

$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

kde  $\Omega$  je prostorový úhel [sr],

$A$  je plocha vyřatá kuželem [ $m^2$ ],

$r$  je poloměr koule [m].

### 2.1.3. Svítivost

Svítivost  $I$  popisuje rozdělení světelného záření do prostoru. Udává, kolik světelného toku vyzáří zdroj do prostorového úhlu.

Jednotkou je kandela [cd].

Svítivost se určí ze vztahu:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$

kde  $I$  je svítivost [cd],

$\Phi$  je světelný tok [lm],

$\Omega$  je prostorový úhel [sr].

Svítivost se stanovuje pouze pro bodový zdroj. Znamená to, že svítivá plocha zdroje má v porovnání se vzdáleností zdroje od kontrolního bodu  $r$  téměř zanedbatelné rozměry.

### 2.1.4. Osvětlenost (intenzita osvětlení)

Osvětlenost  $E$  je hodnota světelného toku dopadajícího na plochu.

Jednotkou je lux [lx].

Osvětlenost se stanoví ze vztahu:

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

kde  $E$  je osvětlenost [lx],

$\Phi$  je světelný tok [lm],

$A$  je plocha, na kterou dopadá světelný tok [m<sup>2</sup>].

### 2.1.5. Jas

Jas  $L$  je veličina, na kterou přímo reaguje lidské oko. Jas svazku paprsků může vycházet buď přímo ze zdroje, anebo může být odražen od plochy a je závislý na poloze pozorovatele a směru pohledu.

Jednotkou je kandela na metr čtvereční [cd/m<sup>2</sup>].

Jas svazku paprsků, které se rozbíhají ze zdroje pod úhlem  $\alpha$ , je možné zjednodušeně stanovit ze vztahu:

$$L = \frac{I}{S * \cos\alpha}$$

kde  $L$  je jas [cd/m<sup>2</sup>],

$I$  je svítivost [cd],

$S$  je plocha zdroje [m<sup>2</sup>].

Pro představu je zde uvedeno porovnání jasů LCD, organických LED (displeje) a anorganických LED (např. semaforey).

Tab. 2.1: Porovnání jasů několika světelných zdrojů [5]

Zařízení	Jas (cd/m <sup>2</sup> )
LCD	100 (běžná); 250–750 (max. hodnota)
organické LED	100–10 000
anorganické LED	1 000 000–10 000 000

### 2.1.6. Světlení

Světlení  $M$  definuje světelný tok  $\Phi$ , který je vyzařován z plochy  $A$ .

Jednotkou je lumen na metr čtvereční [lm/m<sup>2</sup>].

Světlení je možné stanovit ze vztahu:

$$M = \frac{\Phi}{S}$$

kde  $M$  je světlení [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ],

$\Phi$  je světelný tok [ $\text{lm}$ ],

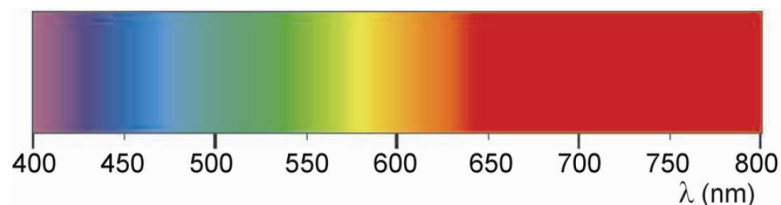
$S$  je plocha, ze které vychází světelný tok [ $\text{m}^2$ ].

## 2.2. Barevné vlastnosti světelných zdrojů

Vzhledem k tomu, že lidské oko vnímá různé barvy specificky a jejich vnímání závisí na okolních podmínkách, je zavedeno několik pojmů, které barvy objektivně popisují. Těmto pojmům se krátce pro úplnost budu věnovat v následujících několika řádcích.

### 2.2.1. Barevný tón

Každému barevnému tónu odpovídá jistá vlnová délka (např. 585 až 620 nm odpovídá oranžové).



Obr. 2.3: Rozložení barev ve spektrální oblasti viditelného záření [2]

### 2.2.2. Chromatické a achromatické barvy

Chromatické neboli pestré barvy jsou barvy, které mají určitý barevný tón, například modrá nebo červená barva. Achromatické neboli nepestré jsou pak barvy bílá, černá a odstíny šedi.

### 2.2.3. Teplota chromatičnosti

Teplota, na kterou musí být zahřáto absolutně černé těleso, aby vydávalo záření v dané barvě. Barvy se dělí na teplé a studené.



Obr. 2.4: Teplota chromatičnosti [2]

Teplota chromatičnosti je udávána v Kelvinech [K].

### 2.2.4. Index podání barvy

Index podání barev popisuje, jak se shoduje vnímání barev předmětu, který je ozářen daným zdrojem, oproti vnímání barev předmětu pod smluvně stanoveným zdrojem. Index nabývá hodnot od 0 do 100, kdy 100 je naprostá shoda.

## 2.3. Měřicí přístroje

Ve světelné technice je možné měřit několik veličin, pro kompletnost zde uvedu několik měřicích přístrojů, které se v praxi běžně používají. Měřit je možné například vnitřní osvětlenost, venkovní srovnávací osvětlenost, jas, jas noční oblohy, jas ploch odrážejících světlo či svítivost.

### 2.3.1. Luxmetr

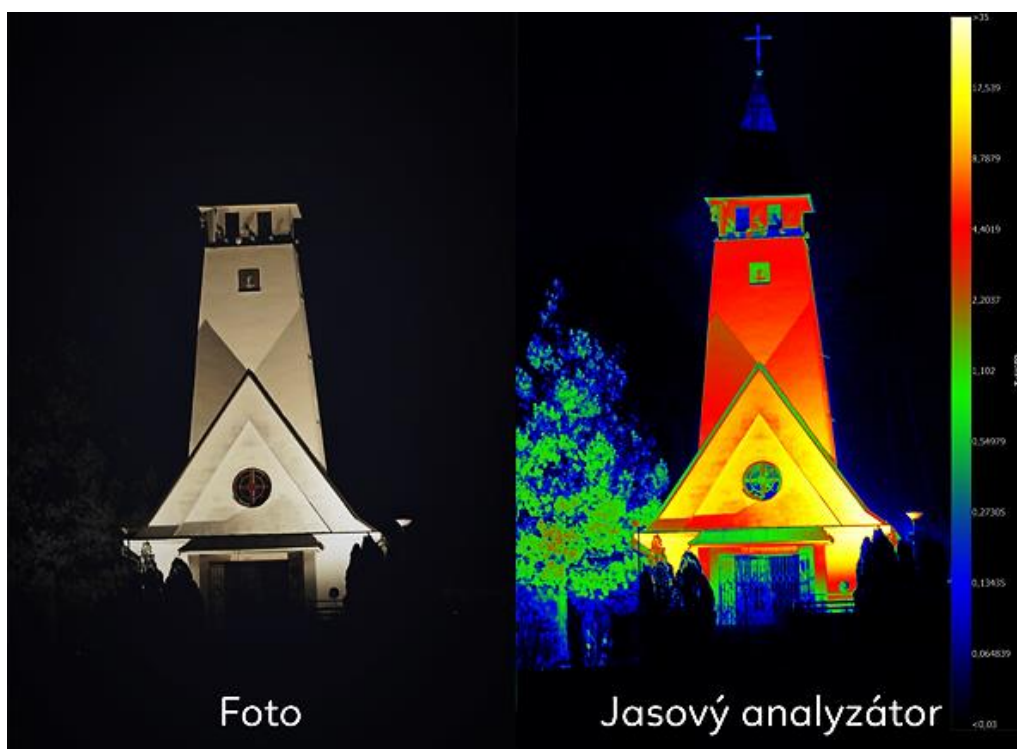
Luxmetr měří hladinu osvětlenosti, hodnoty udává v luxech [lx].

### 2.3.2. Jasoměr

Jasoměr pracuje na podobném principu jako luxmetr, měří ovšem jas a hodnoty udává v kandelách na metr čtvereční [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ].

### 2.3.3. Jasový analyzátor

Jasový analyzátor je v podstatě digitální fotoaparát, který umožňuje vytvoření jasové mapy.



Obr. 2.5: Výsledek měření jasovým analyzátozem [6]

### 2.3.4. Spektrofotometr

Spektrometr měří spektrum optického záření. Je možné měřit například jas, osvětlenost, náhradní teplotu chromatičnosti, index podání barev aj.

## 3 Současné materiály

V současné době se v souvislosti světla s betonem objevují dva pojmy. Jedním z nich je luminiscenční neboli svítící beton, druhým je pak průhledný beton (také průsvitný či světlopropustný beton).

První zmíněný, luminiscenční beton, je možné připravit buď pomocí svítícího kameniva, které se zapraví do povrchu betonu (betonový prvek pak nesvítí jako celek, ale svítí pouze bodově, vzhledově připomíná noční oblohu), anebo pomocí svítící příměsi, kterou se v určitém poměru nahradí cement nebo písek při přípravě betonové směsi (betonový prvek pak svítí jako celek). Třetí variantou je pak použití luminiscenčního cementu, který se ale nepoužívá k výrobě celého betonového prvku, ale pouze jako povrchová vrstva.

Druhý zmíněný, průhledný beton, se dnes nejčastěji vyrábí pomocí optických vláken, které vedou světlo z jedné strany prvku na druhou. Ovšem existují i jiné materiály, pomocí kterých je možné průhledný beton vyrobit, například různé polymery nebo sklo.

### 3.1. Luminiscence

Luminiscence je děj, kdy látka (obvykle kapalná či pevná) samovolně září. Taková látka se nazývá luminoфор. Luminiscence vzniká tak, že je atom luminoforu energií vybuzen do excitovaného stavu (což je stav, kdy má látka vyšší energii a je proto nestabilní) a poté se vrací zpět do základního, energeticky stabilního stavu. Při tomto dochází k vyzáření fotonů. Takto vzniklé světelné záření má většinou nějakou dobu doznívání.

Luminiscence se může dělit jednak podle doby dosvitu a jednak podle způsobu excitace. Druhy luminiscence podle doby dosvitu jsou:

- Fluorescence, kdy luminiscence zmizí ve chvíli přerušení excitace.
- Fosforescence, kdy luminiscence trvá i několik hodin.

Druhy luminiscence podle způsobu excitace jsou například:

- Fotoluminiscence – excitace elektromagnetickým zářením, například zářivka (tvořena plynem, kde probíhá výboj a produkuje UV záření, které dopadá na vrstvu luminiscenční látky, až tato látka následně svítí).
- Elektroluminiscence – excitace elektrickým polem, například nouzové osvětlení.
- Bioluminiscence (součást chemiluminiscence) – excitace chemickou reakcí živých organismů, například světlušky či václavka obecná, která způsobuje světélkování ztrouchnivělého dřeva.

## 3.2. Luminiscenční beton – kamenivo

Luminiscenční kamenivo je kompozitní materiál, který je vyroben z recyklovaných materiálů a přírodních pigmentů. Kamenivo je schopno během krátké doby absorbovat světlo, které pak vydává do prostoru po několik hodin. K dispozici jsou buď svítící částice ve tvaru kameniva, které se používají nejčastěji. Jejich aplikace není nijak náročná, kamenivo se pouze ručně nasype na povrch čerstvého betonu. Druhou možností jsou pak částice v podobě geometrických tvarů, které se ale téměř nevyužívají a jsou uvedeny pouze pro úplnost. Ty nabízí možnost vyskládání částic do různých tvarů, což je ale náročnější. Co se barev týče, nejčastěji se objevují barvy zelená a modrá.



Obr. 3.1: Ukázky kameniva (vlevo) a částic (vpravo) [10]

### 3.2.1. Materiál

V současnosti je na trhu několik firem, které se věnují výrobě luminiscenčního kameniva (např. Chryso, Ambient Glow Technology či Tom Ralston Concrete). Vzhledem k tomu, že v praktické části práce se pracuje se vzorky kameniva od firmy Chryso, budou podrobněji rozebrány materiály této firmy. V příkladech aplikace pak budou uvedeny i příklady realizací ostatních firem.

Materiál je patentován firmou Chryso, vynálezcem je Jean-Jacques Hivert. V tomto dokumentu je uvedeno, že částice se skládají ze svítícího pigmentu, svítícího barviva a pevné matrice.

Svítící pigment může být organický nebo anorganický, přičemž anorganický je díky své lepší odolnosti vhodnější. Je ideálně složen buď ze sulfidu zinečnatého a stroncia nebo z hlinitanu vápenatého dotovaného prvky vzácných zemin, případně jejich kombinací. Ještě vhodnější složení je pak buď sulfid zinečnatý nebo hlinitan strontnatý dotovaný prvky vzácných zemin.

Svítící barvivo může být, stejně jako svítící pigment, organické nebo anorganické. Ideálně je složeno z oxidu titanu, železa, barya, chromu, kadmia, zinku, kobaltu, niklu nebo černého uhlíku<sup>1</sup>.

Pevná hmota je složena z PMMA (polymethylmethakrylát), PC (polykarbonát), PVC (polyvinylchlorid), PU (polyuretan), SAN (styrén-akrylonitril), z jejich derivátů, jako je například ABS (akrylonitril-butadien-styren), nebo ze skla.

<sup>1</sup> Černý uhlík je na rozdíl od sazí vyráběn záměrně a z většiny je tvořen aciniformním uhlíkem.

Podrobný popis možného složení materiálu je uveden v americkém patentu společnosti Chryso číslo US 2020/0308479 A1. Konkrétní složení komerčně dostupného luminiscenčního kameniva je ale chráněno a v žádných dokumentech, které jsou k dispozici, uvedeno není.

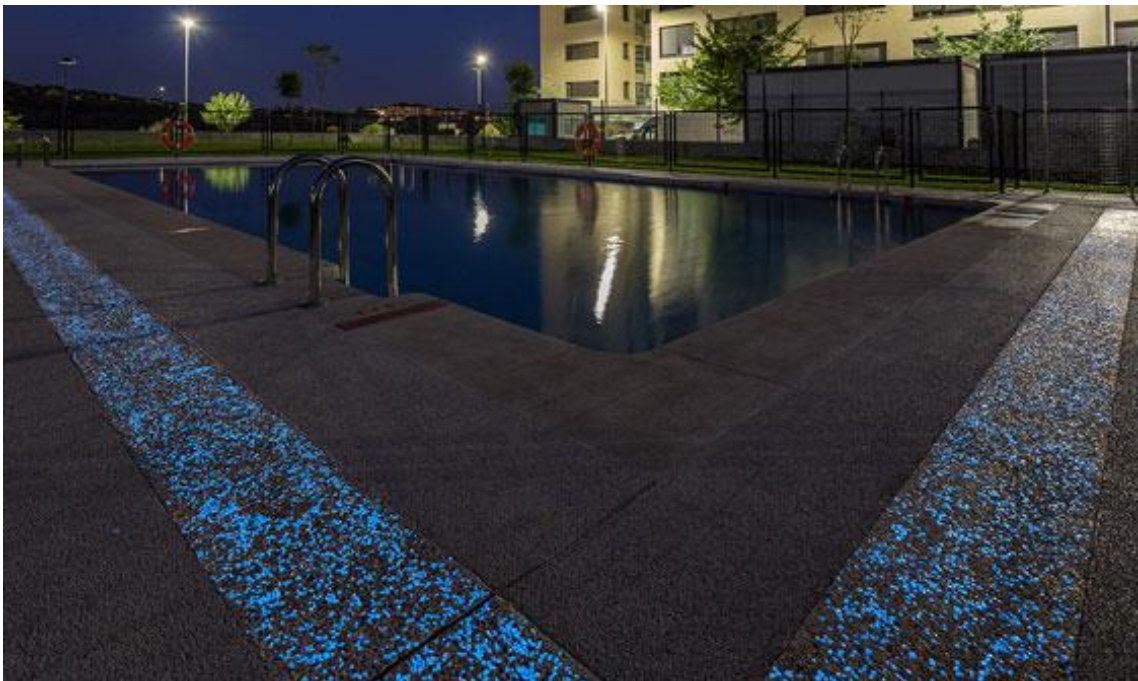
### 3.2.2. Výroba luminiscenčního betonu pomocí kameniva

Postup aplikace luminiscenčního kameniva do betonu je uveden v technickém listě.

Nejběžnější aplikací je, že po rozlití betonu se po povrchu rozmístí vybraná frakce zvoleného druhu kameniva, nejlépe v množství 200 g/m<sup>2</sup> až 450 g/m<sup>2</sup>. Rozmístění se obvykle provádí sypáním z ruky. Po aplikaci se kamenivo do čerstvého betonu zapraví hladítkem. Poté se na povrch aplikuje zpomalovač tuhnutí, který se po určité době (dle technického listu 3–18 hodin dle složení betonu a podle typu použitého retardéru), vymyje tlakovou vodou o tlaku 100–150 bar, spolu s povrchovou vodou cementového tmele tloušťky 2–3 mm. Povrchový retardér lze aplikovat pouze pokud na povrchu betonu není volná voda, ta by totiž zabránila jeho interakci s betonem a nedošlo by tak ke kýženému efektu zpomaleného tuhnutí.

### 3.2.3. Příklady aplikace

Vzhledem k tomu, že svítící schopnost kameniva se nedá nijak přerušit, jsou vhodné aplikace nejčastěji do exteriéru, případně v interiéru do míst, kde světlo nebude uživatele rušit, ale bude naopak vyznačovat místo, které je potřeba trvale zvýraznit. Jako použití se proto nabízí stezky, chodníky, cyklostezky, okolí bazénů a jezírek, ohraničení nebezpečných hran, případně v interiéru na chodbách nebo v únikových cestách apod.

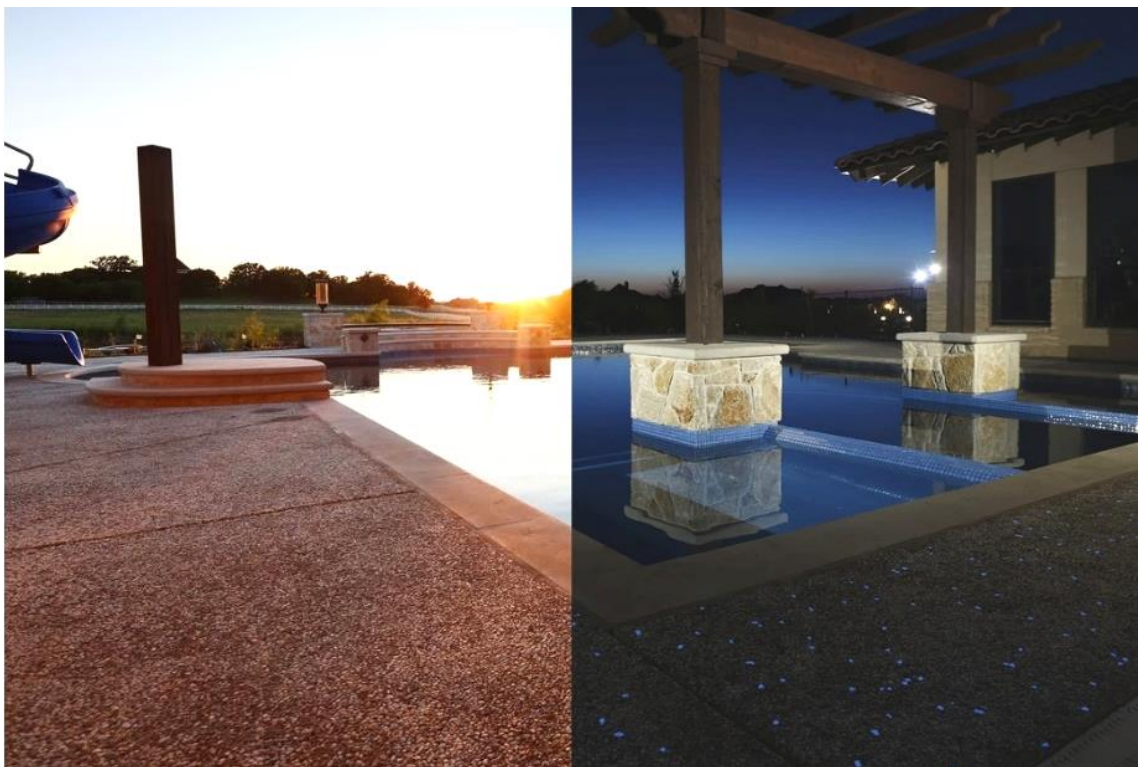


Obr. 3.2: Okolí bazénu, Španělsko [10]





Obr. 3.3: Označení schodišťových stupňů [14]



Obr. 3.4: Okolí bazénu, Pool & Pogota [13]



Obr. 3.5: Cesta v rezidenční zóně, Francie [10]



Obr. 3.6: Zvýraznění schodiště [14]

### 3.3. Luminiscenční beton – příměs

Druhou možností, jak vytvořit svítící beton, je pomocí luminiscenční příměsi (dále LP). Tato možnost je ovšem zatím spíše teoretická, praktických realizací příliš mnoho není. Následující podkapitola se proto věnuje studiím, které v souvislosti s luminiscenční příměsí proběhly. Jedná se hlavně o studii autorů Gao a kol. z roku 2018, která se věnovala výrobě cementové pasty [15] a o navazující studii z roku 2019 autorů B. He a kol., která se věnovala výrobě cementové malty [16].

#### 3.3.1. Materiál

Jedna studie se věnovala výrobě cementové pasty, druhá studie se pak věnovala výrobě cementové malty, použité materiály se však nijak výrazně nelišily. Vzorky se skládaly z portlandského bílého cementu CEM I 42,5, dále z luminiscenční příměsi, jejíž hlavní složkou je ve studii na pastách [15]  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ , ve studii na maltách [16] pak  $\text{MeO} \cdot x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{SiO}_2: \text{Eu}^{2+}, \text{RE}^{3+}$  (Me = Ca, Mg, Sr, Ba; x = 0,5–2,0; y = 0,01–0,5; RE: prvky vzácných zemin). Další složkou byla reflexní příměs (dále RP), což je bílý prášek, jehož hlavní složkou je  $\text{SiO}_2$  ve formě mikroskopických kuliček. Tato příměs však pro výrobu luminiscenčního betonu není nezbytná a v obou studiích bylo několik vzorků, ve kterých se nenacházela.

Obě studie se zároveň věnovaly přípravě hydrofobního povrchu, kdy byly vzorky potaženy hydrofobními materiály, a to za účelem dosažení samočistícího efektu venkovních povrchů omývaných deštěm.

#### 3.3.2. Výroba luminiscenčního betonu pomocí příměsí

Výroba svítícího betonu probíhá obdobně jako výroba běžného betonu, pouze je část materiálů v určitém poměru nahrazena LP, případně i RP. V případě studie na maltách [16] to byl hmotnostní poměr z obsahu původní dávky jemného kameniva (podrobné složení viz. Tab. 3.1), v případě studie na pastách [15] to byl hmotnostní poměr z obsahu cementu (podrobné složení viz. Tab. 3.2).

Tab. 3.1: Receptury vzorků cementových malt

CEM I 42,5 [g]	LP [g]	RP [g]	Písek [g]	Superplastifikátor [g]	Voda [g]	w/b
450	0 (0 %)	0 (0 %)	1012,5	0,45	198	0,44
450	337,5 (25 %)	0 (0 %)	1350	0,45	198	0,44
450		40,5 (3 %)	972	0,45	198	0,44
450		67,5 (5 %)	945	0,45	198	0,44
450		94,5 (7 %)	918	0,45	198	0,44
450	405 (30 %)	0 (0 %)	945	0,45	198	0,44
450		40,5 (3 %)	904,5	0,45	198	0,44
450		67,5 (5 %)	877,5	0,45	198	0,44
450		94,5 (7 %)	850,5	0,45	198	0,44
450	472,5 (35 %)	0 (0 %)	877,5	0,45	198	0,44
450		40,5 (3 %)	837	0,45	198	0,44
450		67,5 (5 %)	810	0,45	198	0,44
450		94,5 (7 %)	788	0,45	198	0,44

Tab. 3.2: Receptury vzorků cementových past

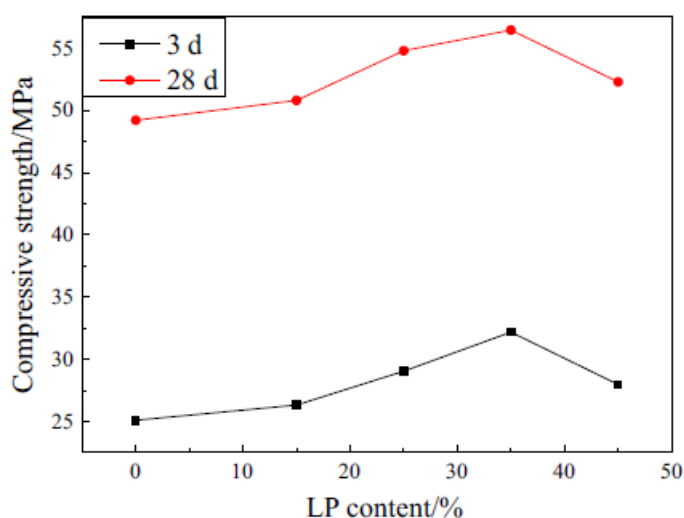
	CEM I 42,5 [g]	LP [g]	RP [g]	Superplast [g]	Voda [g]	w/b
Mechanické vlastnosti	1500	0 (0 %)	0 (0 %)	1,2	525	0,35
	1300	195 (15 %)	0 (0 %)	1,7	455	0,35
	1200	300 (25 %)	0 (0 %)	2,1	420	0,35
	1100	385 (35 %)	0 (0 %)	2,4	385	0,35
	1100	495 (45 %)	0 (0 %)	2,7	385	0,35
	1200	180 (15 %)	120 (10 %)	3,1	420	0,35
	1100	165 (15 %)	220 (20 %)	2,3	385	0,35
	1100	275 (25 %)	110 (10 %)	2,4	385	0,35
	1000	250 (25 %)	200 (20 %)	2,7	350	0,35
	1000	350 (35 %)	100 (10 %)	2,7	350	0,35
	1000	350 (35 %)	200 (20 %)	3,0	350	0,35
Luminiscenční vlastnosti	300	45 (15 %)	0 (0 %)	-	105	0,35
	270	67,5 (25 %)	0 (0 %)	-	94,5	0,35
	258	90,3 (35 %)	0 (0 %)	-	90,3	0,35
	240	108 (45 %)	0 (0 %)	-	84	0,35
	258	64,5 (25 %)	25,8 (10 %)	-	90,3	0,35
	240	60 (25 %)	48 (20 %)	-	84	0,35

### 3.3.3. Výstupy studií – mechanické vlastnosti

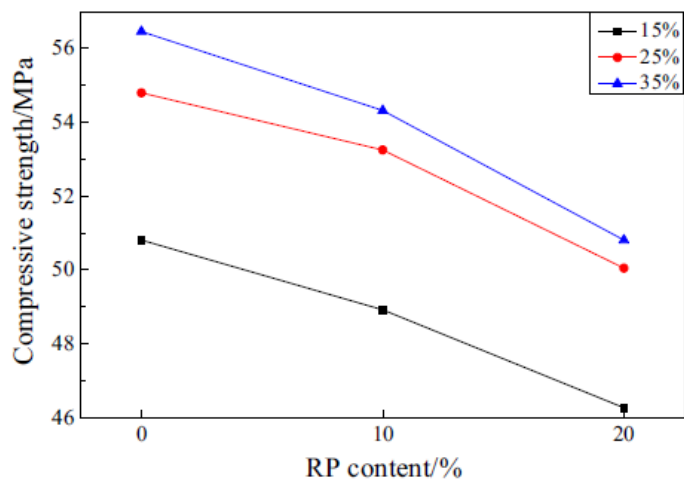
Mechanické vlastnosti byly zkoušeny na vzorcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, zkoušena byla pevnost v tlaku a v ohybu po 3 a 28 dnech v případě studie na pastách [15] a po 7 a 28 dnech v případě studie na maltách [16]. Studie na maltách [16] ukázala, že hydrofobní povrch na mechanické vlastnosti nemá téměř žádný vliv.

Dalším zkoumaným parametrem v obou studiích byl vliv LP a RP. Ze studií vyplývá, že LP do určitého množství zlepšuje mechanické vlastnosti, při vyšším obsahu už ale efekt klesá. Pokud je součástí vzorku vedle LP také RP, pevnost v ohybu i v tlaku se se zvyšujícím se množstvím RP snižuje (výjimkou byl vzorek malty s obsahem 30 % LP a 7 % RP). Toto bylo patrné jak na vzorcích past, tak na vzorcích malt.

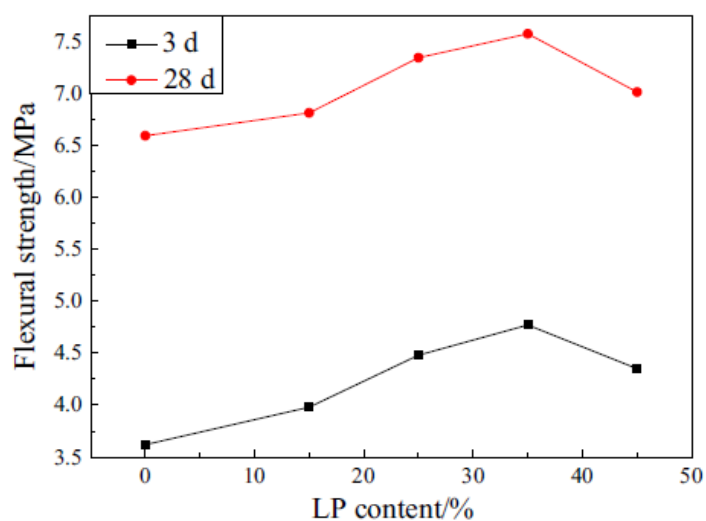
Výstupy studie na pastách [15]:



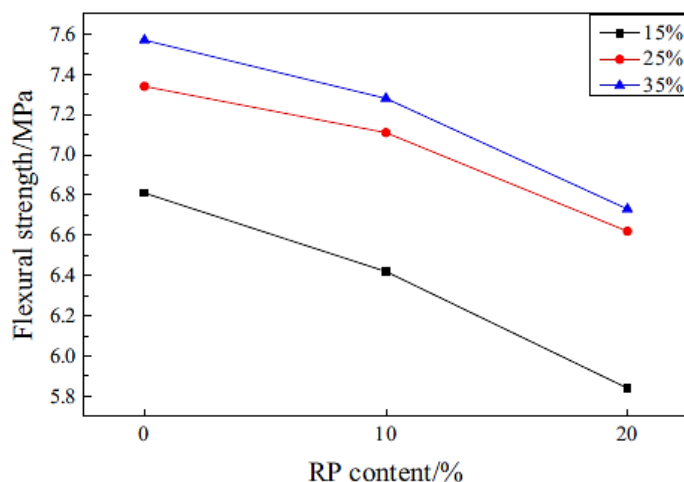
Obr. 3.7: Vliv obsahu LP na pevnost v tlaku při obsahu 0 % RP [15]



Obr. 3.8: Vliv obsahu RP a LP na pevnost v tlaku po 28 dnech [15]



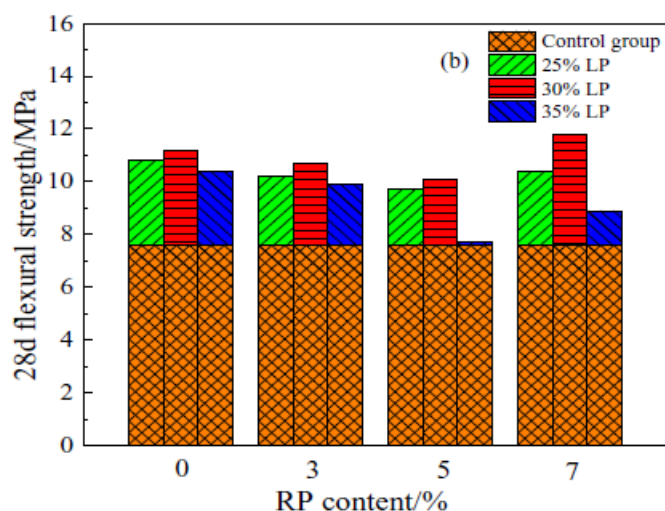
Obr. 3.9: Vliv obsahu LP na pevnost v ohybu při obsahu 0 % RP [15]



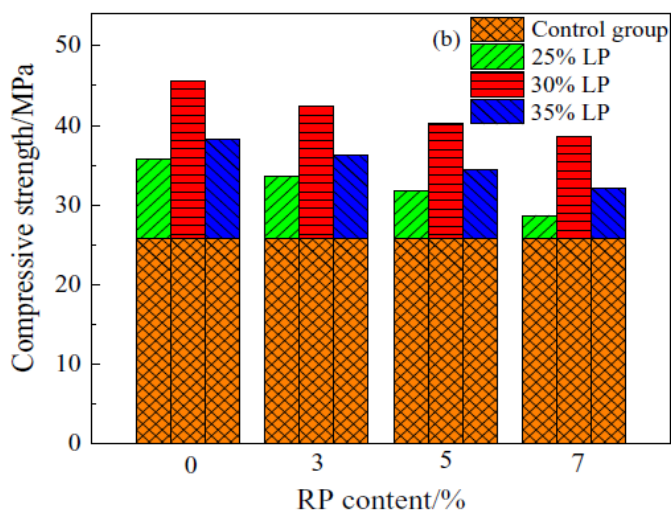
Obr. 3.10: Vliv obsahu RP a LP na pevnost v ohybu po 28 dnech [15]

Nejvyšší pevnosti v tlaku dosahovaly vzorky o obsahu 0 % RP a 35 % LP, kdy pevnost v tlaku po 28 dnech byla přibližně 56,8 MPa. Nejvyšší pevnost v ohybu měly vzorky s obsahem 35 % LP a 0 % RP, jejichž pevnost v ohybu po 28 dnech byla přibližně 7,58 MPa.

Výstupy studie na maltách [16]:



Obr. 3.11: Vliv obsahu LP a RP na pevnost v ohybu po 28 dnech [16]



Obr. 3.12: Vliv obsahu LP a RP na pevnost v tlaku po 28 dnech [16]

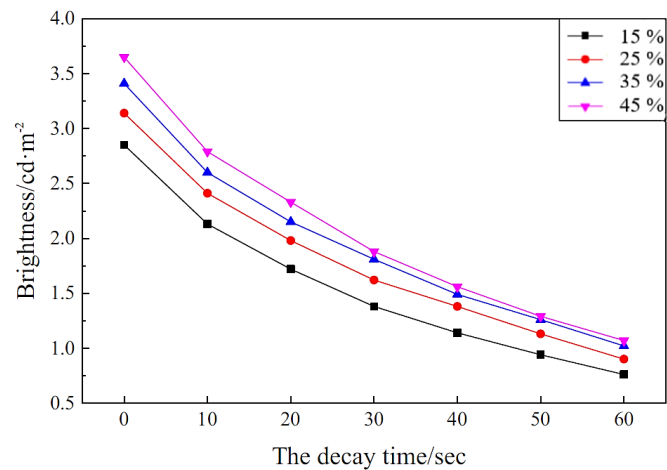
Nejvyšší pevnost v ohybu měly vzorky s obsahem 30 % LP a 7 % RP, jejichž pevnost po 28 dnech byla 11,8 MPa. Nejvyšší pevnost v tlaku byla 45,6 MPa, tuto hodnotu nabývaly vzorky s obsahem 30 % LP a 0 % RP.

### 3.3.4. Výstupy studií – světelné vlastnosti

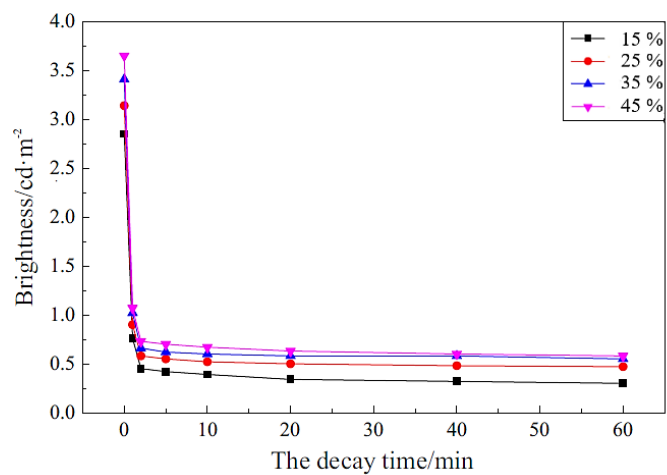
Světelné vlastnosti byly zkoušeny na vzorcích o rozměrech 50 x 50 x 20 mm. Podobně jako v případě mechanických vlastností, nemá hydrofobní povrch výraznější vliv ani na vlastnosti světelné.

Z grafů vyplývá, že obsah LP má vliv na jas, RP má také vliv, ovšem ve srovnání s LP je menší (porovnání viz Tab. 3.3 a 3.4 níže). Dále můžeme vidět, že jas během prvních 30 minut výrazně klesne (přibližně na 5–15 % počáteční hodnoty), poté už ale klesá pouze minimálně. Po 8 hodinách se jas pohyboval mezi 0,02–0,2 cd/m<sup>2</sup> (což přibližně odpovídá pouze 1 % počáteční hodnoty), po 12 hodinách klesl natolik, že většina vzorků již nebyla měřitelná.

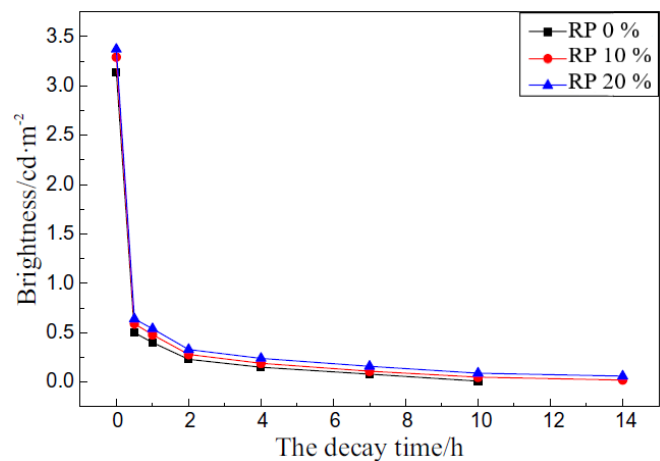
Výstupy studie na pastách [15]:



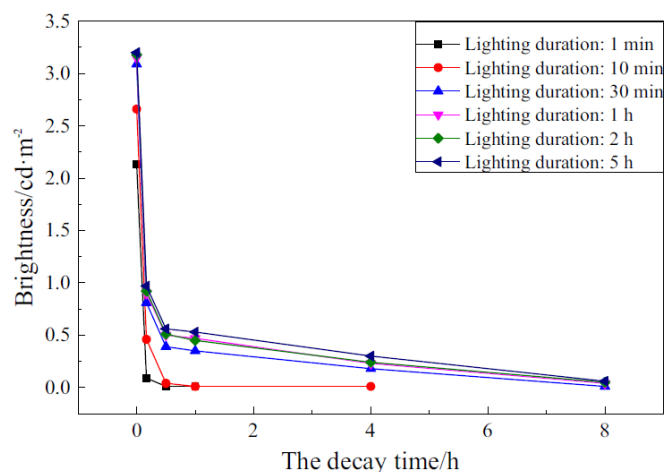
Obr. 3.13: Vliv obsahu LP na jas v průběhu 60 vteřin po ukončení působení světelného zdroje, obsah RP 0 % [15]



Obr. 3.14: Vliv obsahu LP na jas v průběhu 60 minut po ukončení působení světelného zdroje, obsah RP 0 % [15]



Obr. 3.15: Vliv obsahu RP na jas v průběhu 14 hodin po ukončení působení světelného zdroje, obsah LP 25 % [15]



Obr. 3.16: Vliv doby působení světelného zdroje na dobu dosvitu [15]

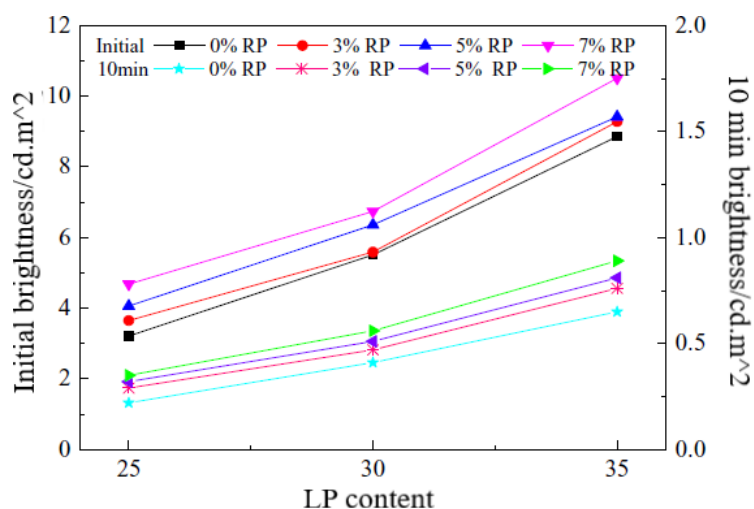
Jak je patrné z grafu výše, doba dosvitu je ovlivněna dobou, po kterou byly vzorky vystaveny zdroji světla, v tomto případě slunečnímu záření. Vzorky, na které působil zdroj světla po dobu 1 minuty, byly po hodině již neměřitelné, zatímco vzorky, na které působil zdroj světla 30 minut a déle, byly měřitelné i po 8 hodinách. Zároveň má doba působení světelného zdroje vliv i na hodnotu jasu (po 1 minutě byl počáteční jas 2,15 cd/m<sup>2</sup>, zatímco po 30 minutách byl počáteční jas 3,1 cd/m<sup>2</sup>). Hodnoty byly měřeny na vzorku s obsahem 25 % LP a 0 % RP.

Tab. 3.3: Porovnání vlivu LP a RP na počáteční jas

LP [%]	RP [%]	Jas [cd/m <sup>2</sup> ]
45	0	3,65
35	0	3,4
25	0	3,15
25	10	3,3
25	20	3,35

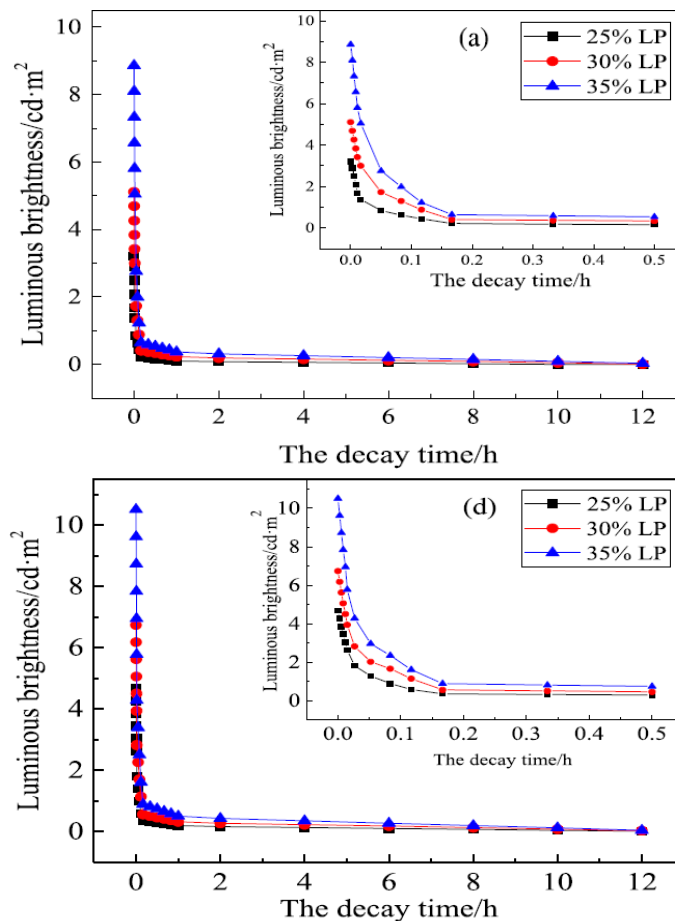
Z grafů vyplývá, že nejvyššího počátečního jasu, 3,65 cd/m<sup>2</sup>, dosahovaly vzorky pasty s LP o obsahu 45 % a RP 0 % z hmotnosti cementu.

Výstupy studie na maltách [16]:



Obr. 3.17: Vliv obsahu LP a RP na počáteční jas a jas po 10 minutách [16]





Obr. 3.18: Vliv obsahu LP a RP na jas v průběhu 12 hodin, obsah RP a) 0 %, d) 7 % [16]

V tomto případě byl zdrojem světla illuminant D65 s intenzitou osvětlení 1000 lx, což je zdroj, který simuluje přirozené denní světlo. Tento zdroj působil po dobu 10 minut.

Tab. 3.4: Porovnání vlivu LP a RP na počáteční jas

LP [%]	RP [%]	Jas [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
35	0	8,7
30	0	5,5
25	0	3,2
25	5	4,0
25	7	4,7

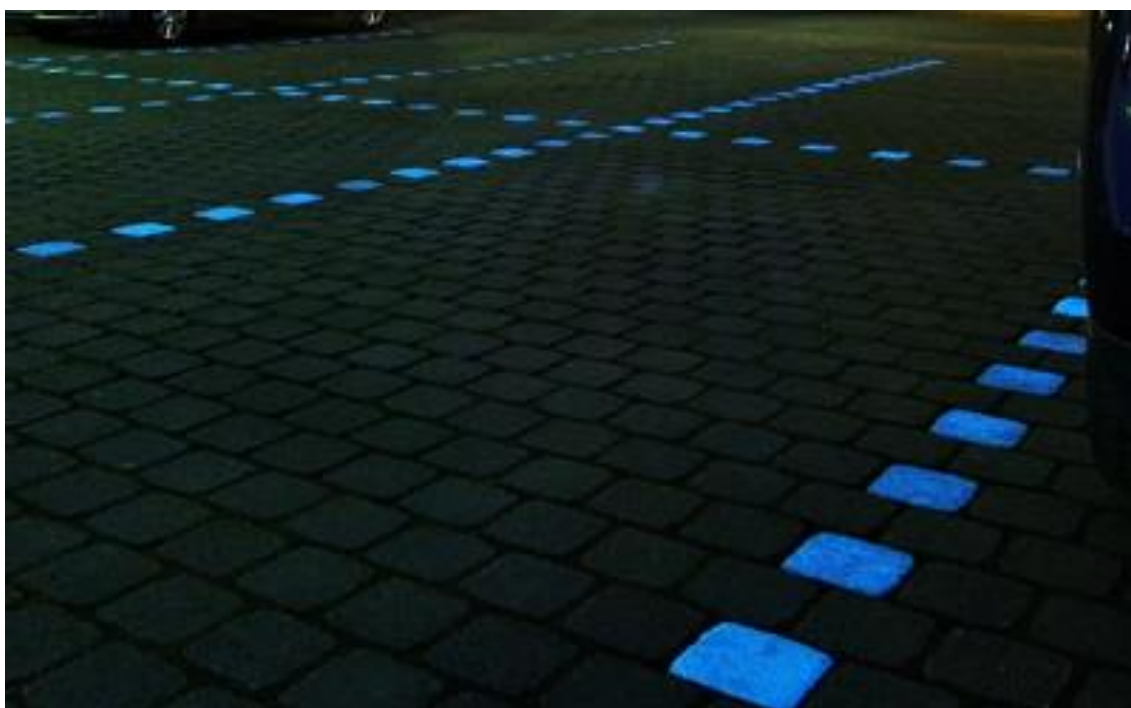
Nejvyšších hodnot jasu, konkrétně počáteční jas  $10,51 \text{ cd}/\text{m}^2$  a jas po 10 minutách  $0,89 \text{ cd}/\text{m}^2$ , dosahovaly vzorky malty s LP o obsahu 35 % a RP 7 % z hmotnosti jemného kameniva.

### 3.3.5. Příklady aplikace

Luminiscenční příměs zatím nenachází příliš velké využití v oblasti technologie betonu, pravděpodobně vzhledem k její ceně (ceny budou uvedeny v praktické části práce) a způsobu výroby. Jako použití se nabízí spíše prefabrikované výrobky, uvedené obrázky jsou příklady realizací, kde by bylo možné svítící prvky nahradit betonem s luminiscenční příměsí. Možnými aplikacemi by pak byly například únikové cesty, zámková dlažba apod.



Obr. 3.19: Vyznačení cest [18]



Obr. 3.20: Zvýraznění parkoviště [19]

### 3.4. Luminiscenční cement

Poslední uváděnou variantou, jak pracovat s luminiscencí, je luminiscenční cement. Jeho autorem je José Carlos Rubio Ávalos, kterému byl patentován. Tento cement obsahuje luminiscenční příměsi, ale zároveň je modifikována jeho mikrostruktura tak, že pomocí určitých přísad je při hydrataci cementu eliminován vznik krystalů, které by bránily prostupu světla dále do struktury cementové pasty. Touto modifikací se ovšem jednak změní vlastnosti cementové pasty, zároveň se ale zvýší náročnost výroby, což se projeví na ceně materiálu, kdy 1 m<sup>2</sup> pasty o tloušťce 3 mm stojí přibližně 60–70 dolarů. Z tohoto vyplývá, že použití materiálu je v podstatě pouze v podobě slabé povrchové vrstvy.

Momentálně se pracuje pouze s barvami mořská modrá a jasně zelená, ovšem ve výzkumu je také bílá, červená či fialová. Tento materiál ovšem zatím reálné aplikace nemá, momentálně se pracuje na jeho dalším vývoji, možná využití jsou pak fasády budov, označení únikových cest apod.



Obr. 3.21: Možné využití luminiscenčního cementu na fasádě budov [20]

### 3.5. Průsvitný beton – optická vlákna

Další možností, jak pracovat se světlem v technologii betonu, je vytvoření takového materiálu, který umožňuje částečný průchod světla. Asi nejnámějším pojmem je v tomto směru LiTraCon, jehož vynálezce je Áron Losonczy. Ten v roce 2001 představil materiál Litracon Classic, což je materiál, kde přenos světla zajišťují optická vlákna a který mu byl v roce 2002 patentován ve Švédsku pod číslem patentu SE522171C2 [24]. Kromě toho, další výraznou společností, která používá ve svých výrobcích optická vlákna, je společnost Lucem.

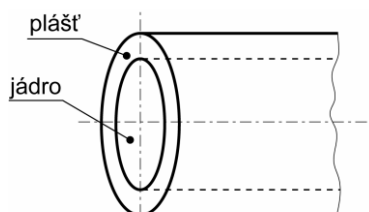
#### 3.5.1. Materiál

Optická vlákna fungují na principu odrazu světla, kdy paprsek, který dopadá na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu, mění svou rychlost a směr. Část světla se pak odrazí zpět a část vstoupí do jiného prostředí.

Index lomu  $n$  je bezrozměrná veličina a je definován jako poměr rychlosti světla ve vakuu  $c$  ku rychlosti světla v konkrétním prostředí  $v$ .

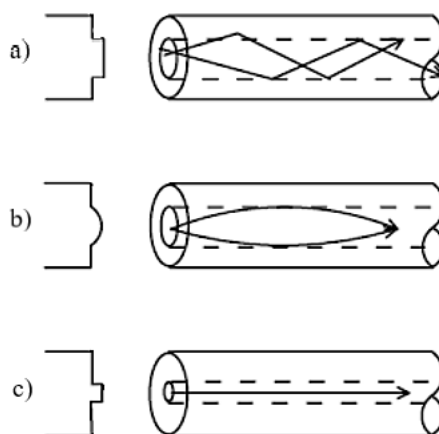
$$n = \frac{c}{v}$$

Optické vlákno se skládá z jádra a pláště, dále pak z primární ochrany, která zajišťuje pružnost, a ze sekundární ochrany, která zvyšuje odolnost vlákna. Materiálem je sklo, případně plast, průměr vláken je v řádech jednotek až desítek  $\mu\text{m}$ .



Obr. 3.22: Schéma optického vlákna [25]

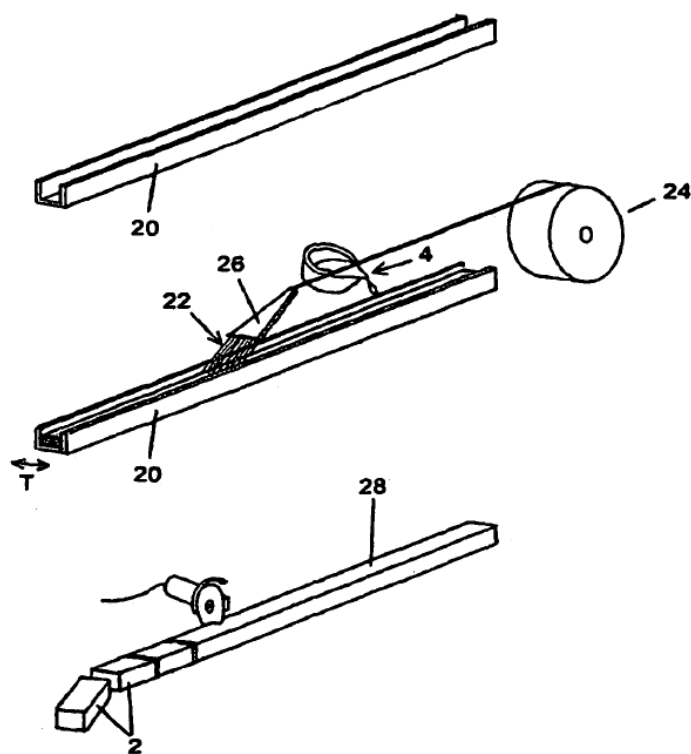
Dělit optická vlákna je možné podle dvou parametrů. Prvním je, zda se index lomu na rozhraní jádra a pláště mění skokově (obr. a) a c)) nebo spojitě (obr. b)). Druhým parametrem je pak to, zda je vlákno jednovidové (obr. c)) (pokud je poloměr jádra malý, šíří se jím pouze jeden paprsek neboli vid) či mnohavidové (obr. a) a b)). Z toho získáváme tři typy optických vláken:



Obr. 3.23: Typy optických vláken [25]

### 3.5.2. Výroba průsvitného betonu pomocí optických vláken

Výroba průsvitného betonu pomocí optických vláken je možná buď ručně (Lucem) anebo strojově (Litracon). Postup druhého zmíněného je popsán ve výše uvedeném patentu a sestává se ze tří kroků, které se opakují. V prvním kroku se do formy (20) nalije slabá vrstva jemnozrnné betonové směsi (4) (podle patentu nemusí být směsí nutně beton, je možné použít například sádku, kovy apod.). V druhém kroku se pomocí trysky (26) aplikuje vrstva optických vláken (22), která jsou odvíjena z cívky (24). Tato vrstva se sestává alespoň z 20 vláken. Nakonec se ve třetím kroku vlákna zavibrují tak, aby se ponořila do požadované hloubky betonu. Tyto tři kroky (případně pouze druhý a třetí krok) se několikrát zopakují, dokud není forma naplněna. Po zatvrdnutí se vytvoří homogenní prvek (28), který se poté rozřeže na stavební bloky (2). Pro zajištění průsvitnosti betonu je nutné, aby optická vlákna průběžně probíhala v prvku z jednoho jeho povrchu na druhý. V prvcích jsou pak cca 4 % vláken z celkového objemu a tyto prvky dosahují pevnosti v tlaku 32–49 MPa.

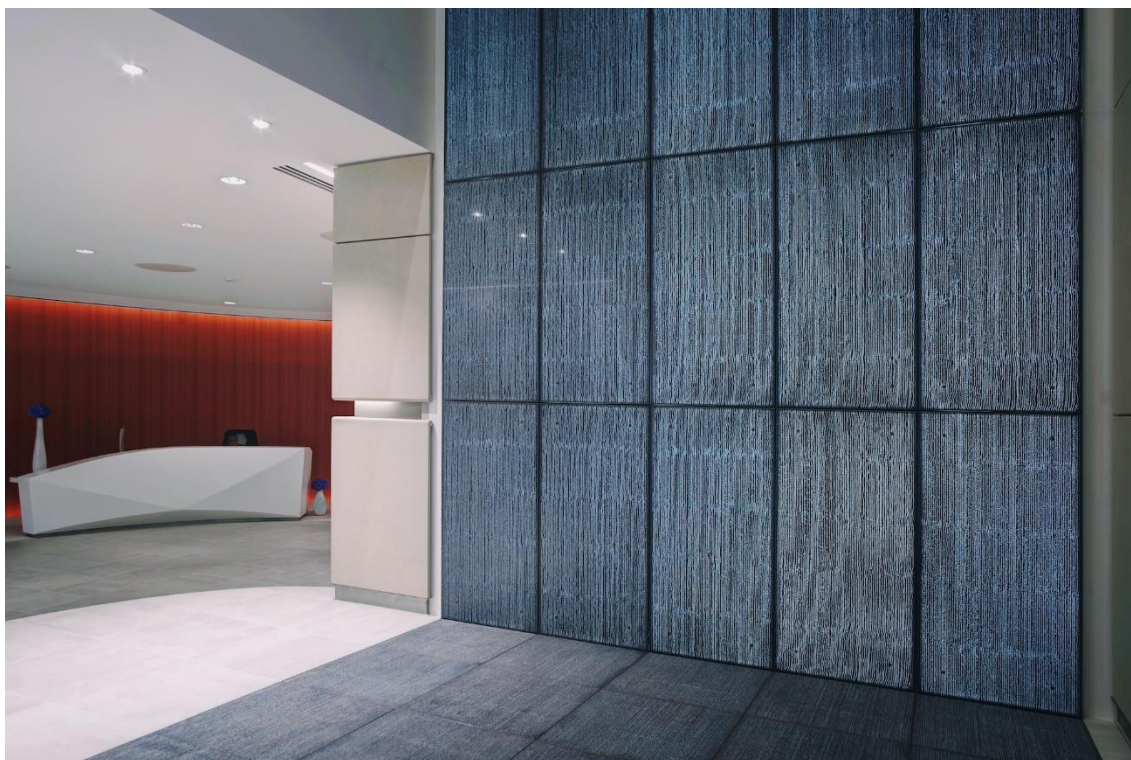


Obr. 3.24: Výroba průsvitného betonu [24]

### 3.5.3. Příklady aplikace

Litracon Classic se vyrábí jako prefabrikované bloky o maximálních rozměrech 1200 x 400 mm, dostupné tloušťky jsou 25–500 mm. Na výběr je ze tří barev – bílá, šedá a černá. Je možné je použít jak na nosné, tak na nenosné konstrukce – jako osvětlené fasády, vnitřní stěny či jako architektonické prvky (například osvětlené recepční nebo barové desky). Dále se pak vyrábí také lampy anebo šperky.

Naproti tomu Lucem vyrábí panely, které se používají jako předstěny, kdy se nejčastěji na stěnu osadí LED světla a kotvy, na které se následně osadí panely. K dostání jsou rozměry 1200 x 600 mm či 1600 x 600 mm a tloušťky 20 mm a 30 mm. V nabídce jsou ale i dlažební kameny či svítidla, která zároveň slouží jako nábytek.



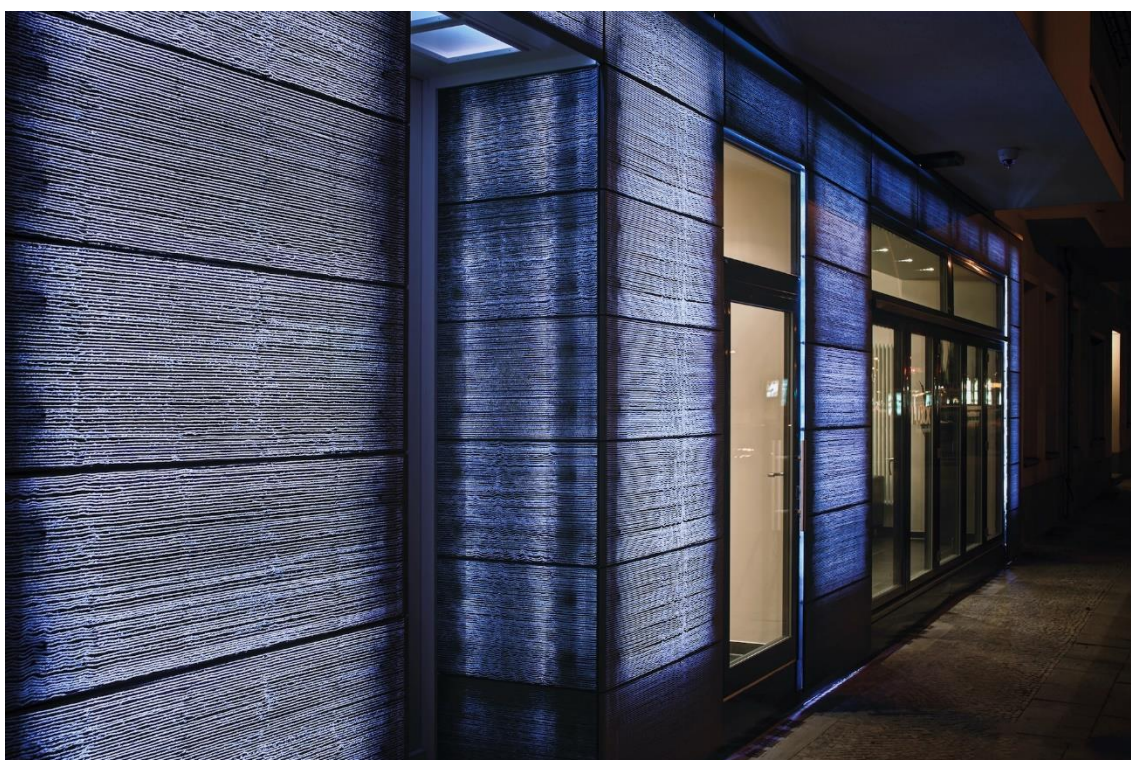
Obr. 3.25: Vstupní hala, Londýn, Anglie (Lucem) [23]



Obr. 3.26: Recepční deska společnosti Holcim, Budapešť, Maďarsko (Litracon) [22]



Obr. 3.27: Betonová lampa Litracube [22]



Obr. 3.28: Obytný dům, Berlín, Německo (Lucem) [23]

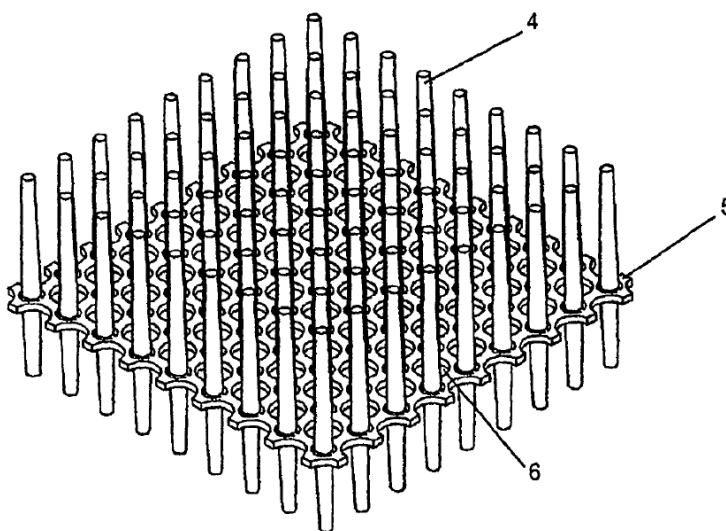
## 3.6. Průsvitný beton-průsvitné prvky

Existují ale i další varianty, jak vyrobit průsvitný beton. Jednou ze společností, která se touto problematikou zabývá, je česká společnost Beton Brož s. r. o., která vytvořila materiál s názvem LiCrete (patentová přihláška číslo EP2692960A1 z roku 2012). Tento materiál je tvořen betonem, který je nositelem pevnosti, a mřížkou z plexiskla, která umožňuje přenos světla a zároveň je objemově stálá a je možné ji proto bez problému použít v kombinaci s betonem.

Druhým materiálem, jehož vynálezce je již dříve zmíněný Áron Losonczi, je Litracon pXL z roku 2007 (číslo maďarského patentu HU226967B1), kde jsou místo optických vláken speciální plastové prvky. Dále se v textu budu věnovat podrobnějšímu popisu tohoto materiálu.

### 3.6.1. Materiál

V patentu je uvedeno, že průsvitné prvky (4) mohou být anorganické, v takovém případě jsou prvky skleněné, či organické, pak jsou prvky tvořeny plasty, například PMMA (polymethylmethakrylát), PC (polykarbonát) nebo COC (cyklický olefinový kopolymer). Tyto průsvitné prvky jsou drženy držákem (5) s otvory (6), který může být ze stejného materiálu, pak bývají držák i průsvitné prvky vyráběny jako jeden díl, anebo je vyroben z vylepšených tepelně izolačních materiálů.

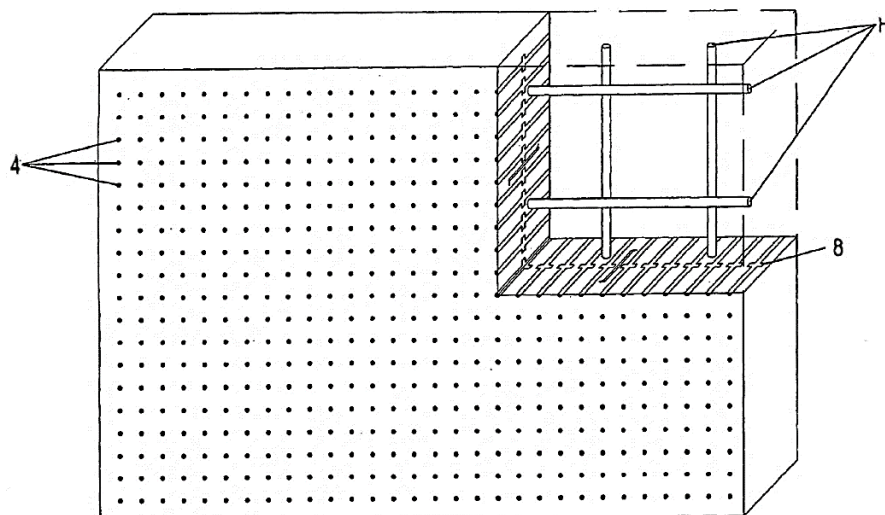


Obr. 3.29: Průsvitná vložka [30]

### 3.6.2. Výroba průsvitného betonu pomocí průsvitných prvků

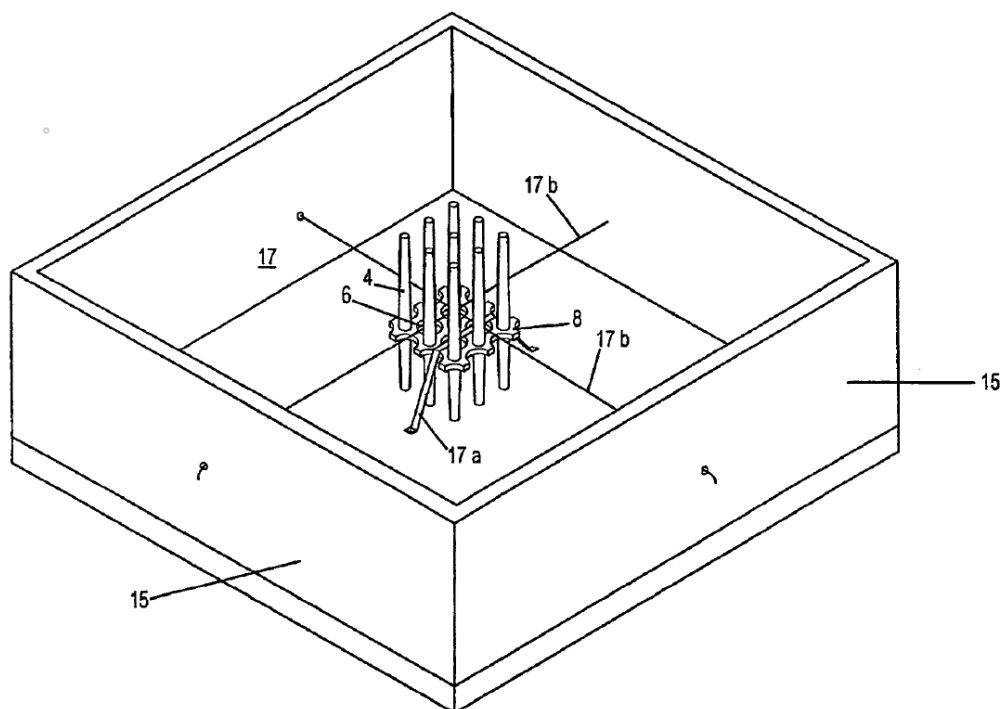
Průsvitné prvky (4) mohou být v držáku uspořádány do různých tvarů, jako jsou například geometrické tvary, ale mohou tvořit i různé nápisy. Ke zlepšení mechanických vlastností je možné k průsvitné vložce (8) přidat i výztuž (H). Výztuž může být v kontaktu s držákem, pouze poloha průsvitných prvků v držáku musí být přizpůsobena poloze výztuže.





Obr. 3.30: Pohled do vyztuženého prvku [30]

Připravená průsvitná vložka (8) se pak vloží do formy (17), kde je možné ji zafixovat několika způsoby. Buď je možné ji upnout pomocí pásků (17 a) nebo pomocí drátů (17 b), které jsou napnuté mezi stěnami formy (15), případně je možné ke stabilizaci využít výztuž. Následně se do formy nalije betonová směs a nechá se zatvrdnout.



Obr. 3.31: Forma s možným upevněním průsvitné vložky [30]

### 3.6.3. Příklady aplikace

Litracon pXL jsou prvky v podobě panelů, maximální rozměry jsou 1200 x 600 mm v případě tloušťky 40 mm a 3600 x 1200 mm v případě tloušťky 60 mm.

LiCrete naproti tomu vyrábí bloky o základních rozměrech 300 x 150 x 75 mm a 150 x 150 x 75 mm. Opět je možné je použít jako osvětlené fasády, vnitřní stěny apod.



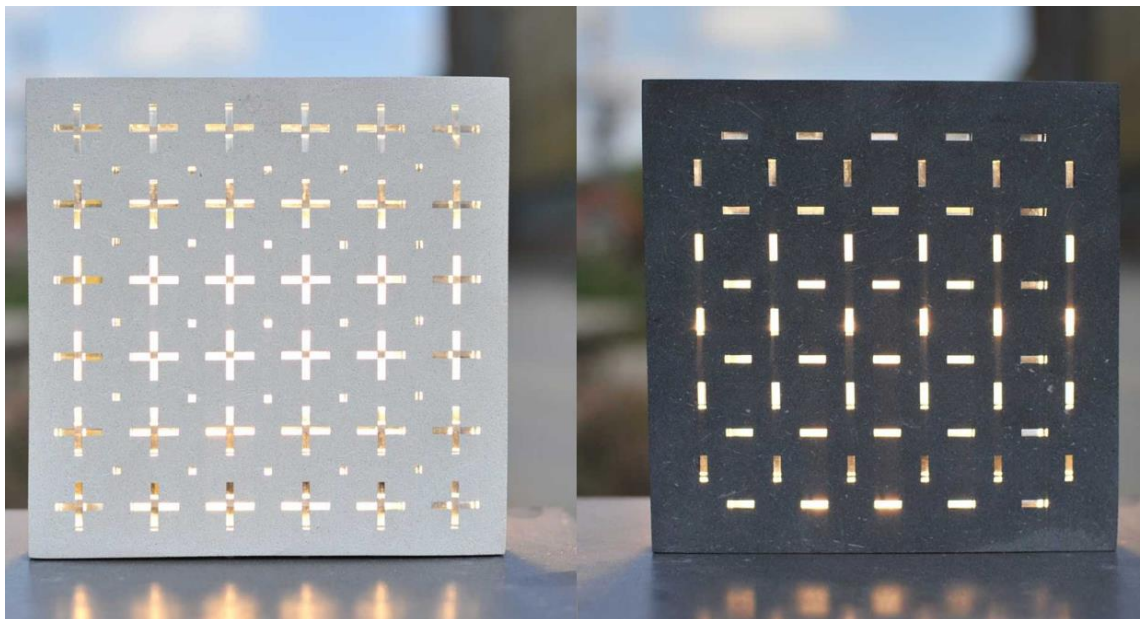
Obr. 3.32: Zahradní Pavilon, Curych, Švýcarsko, Litracon pXL [22]



Obr. 3.33: Deska stolu, Klub ON, Praha, Česká republika, Litracon pXL [22]



Obr. 3.34: Stěna vyrobená pomocí tvárnic LiCrete [31]



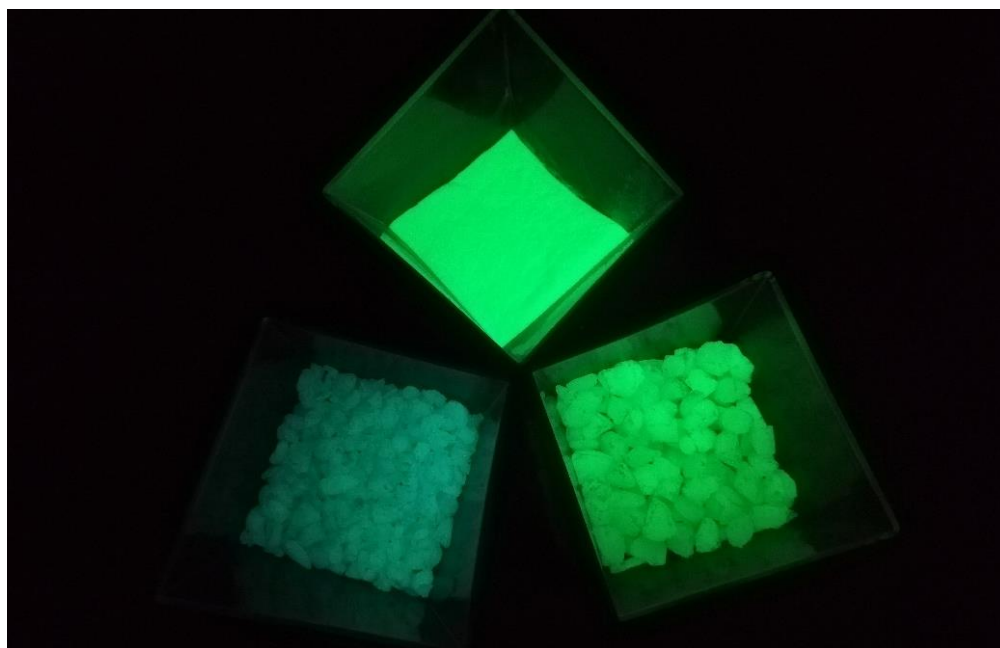
Obr. 3.35: Tvárnice LiCrete [31]

## 4 Praktická část

Po zvážení náročnosti výroby a dostupnosti materiálů byl pro praktickou část práce zvolen luminiscenční beton. Aby bylo možné porovnat více variant na základě jejich dostupnosti a dosahovaného světelného efektu, byl luminiscenční beton vyroben jak pomocí svítícího kameniva (frakce 2/4 a 4/8), tak pomocí svítící a reflexní příměsi (RP pro výrobu nebyla nutná a v několika vzorcích se nenachází). Dále bylo provedeno měření, které bylo zvoleno tak, aby bylo možné jednotlivé vzorky vzájemně porovnávat, ale zároveň aby bylo možné alespoň částečně porovnat výsledky s výše uvedenými studii. V práci se proto několikrát vycházelo z těchto studií (například při vytváření receptur či určení délky expozice světelného zdroje).



Obr. 4.1: Svítící kamenivo a příměs za světla



Obr. 4.2: Svítící kamenivo a příměs za tmy

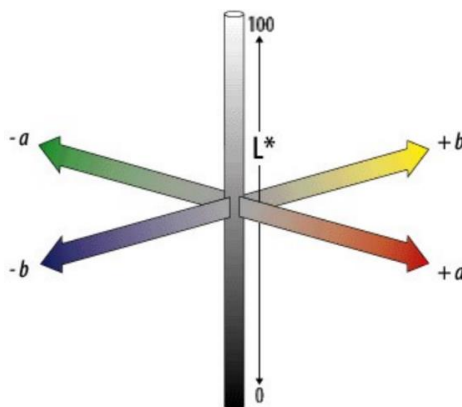
## 4.1. Postup měření a vyhodnocení

Vzhledem k tomu, že ze studií na maltách [16] a na pastách [15] vyplývá, že jas se pohybuje v poměrně nízkých hodnotách a při měření nebyl k dispozici žádný přístroj<sup>2</sup>, který by byl natolik citlivý, aby zaznamenal takto nízké hodnoty, bylo zvoleno měření pomocí digitálního fotoaparátu Nikon D5300 (vzdálenost fotoaparátu od vzorků a jeho podrobné parametry budou uvedeny u konkrétních měření). Dále byly některé vzorky nasvíceny LED světlem o teplotě 4500 K a světelném toku 2500 lm (vzdálenost světla od vzorků a čas nasvícení bude opět uveden u konkrétních měření).



Obr. 4.3: Průběh nasvícení vzorku během první etapy focení

K vyhodnocení byl pak použit program Adobe Photoshop, ve kterém bylo využito barevného prostoru Lab, konkrétně souřadnice L (aby nedocházelo k záměně této souřadnice se světelným parametrem jas, který se rovněž značí L, bude dále tato souřadnice nazývána  $L_{lab}$ ). Tento systém, celým názvem CIE  $L^*a^*b$ , byl zaveden mezinárodní komisí pro osvětlování (CIE) a vychází z protikladů barev.



Obr. 4.4: Souřadnice systému CIE  $L^*a^*b$  [32]

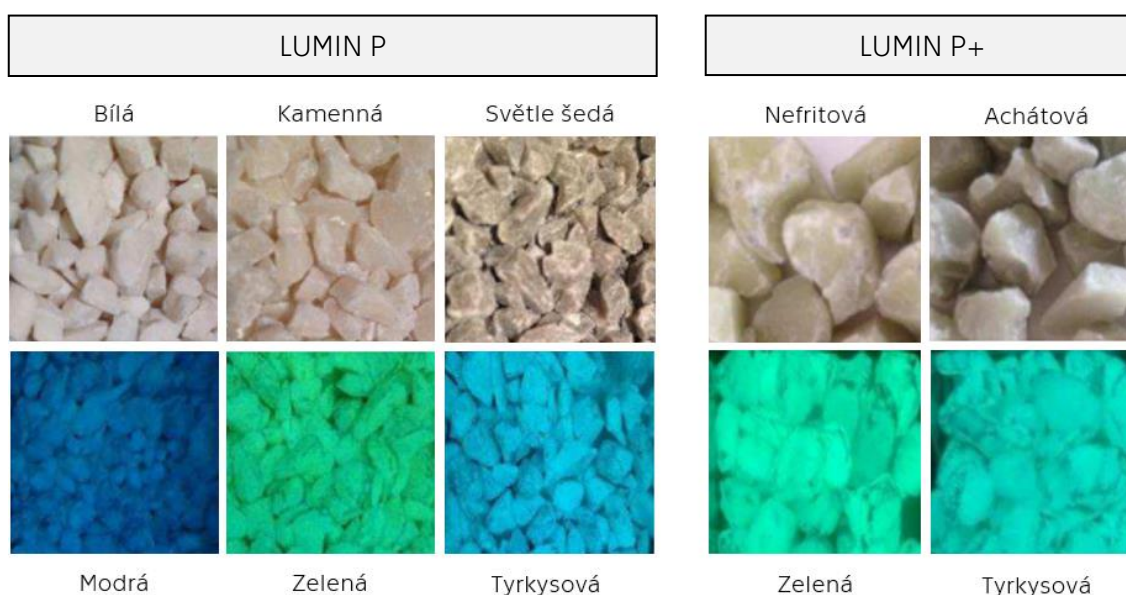
<sup>2</sup> V závěru práce se naskytla možnost využít jasoměr, čemuž se věnuje podkapitola 4.5.

Systém zavádí 3 souřadnice – světlost  $L_{\text{Lab}}$  (lightness), která určuje, jak je daný objekt světlý (tato hodnota je úměrná jasu), dále pak souřadnici  $a$ , která odpovídá dvojici barev červená a zelená, a souřadnici  $b$ , která odpovídá dvojici barev modrá a žlutá. Souřadnice  $a$  a  $b$  nabývají kladných i záporných hodnot, kde  $-a$  odpovídá zelené,  $+a$  odpovídá červené,  $-b$  odpovídá modré a  $+b$  odpovídá žluté barvě. Souřadnice  $L$  pak nabývá hodnot od 0 do 100, kdy 0 je černá a 100 je bílá.

Světlost fotografie je závislá na parametrech fotoaparátu (konkrétně na clonovém čísle a době expozice), hodnota  $L_{\text{Lab}}$  je proto pouze relativní. Je možné ji převést na jas, ovšem tento převod vyžaduje experimentální měření (například pomocí jasoměru) a již změřený převod je k dohledání pouze pro omezené množství kombinací parametrů fotoaparátu (například v diplomové práci Vytvoření aplikace pro analýzu jasů HDR fotografií [32]). Přesto je možné tuto hodnotu použít pro vzájemné porovnání různých vzorků a jejich úrovně světlosti, pokud budou foceny za stejných podmínek a při stejném nastavení parametrů.

## 4.2. Luminiscenční beton – kamenivo

Pro výrobu vzorků bylo zvoleno kamenivo od firmy Chryso. Ta nabízí několik barevných variant v několika frakcích – Lumin P je k dispozici ve frakcích 0/2, 2/4, 4/8, v případě barvy bílé a kamenná je k dispozici vedle těchto také frakce 6/10. Lumin P+ je kamenivo o vyšší svítivosti a je k dispozici ve frakcích 4/8 či 6/10. Cena tohoto kameniva se pohybuje v rozmezí 1400–1600 Kč/kg. Při doporučeném dávkování 200–450 g/m<sup>2</sup> se pak cena pohybuje od 280 Kč/m<sup>2</sup> do 720 Kč/m<sup>2</sup>.

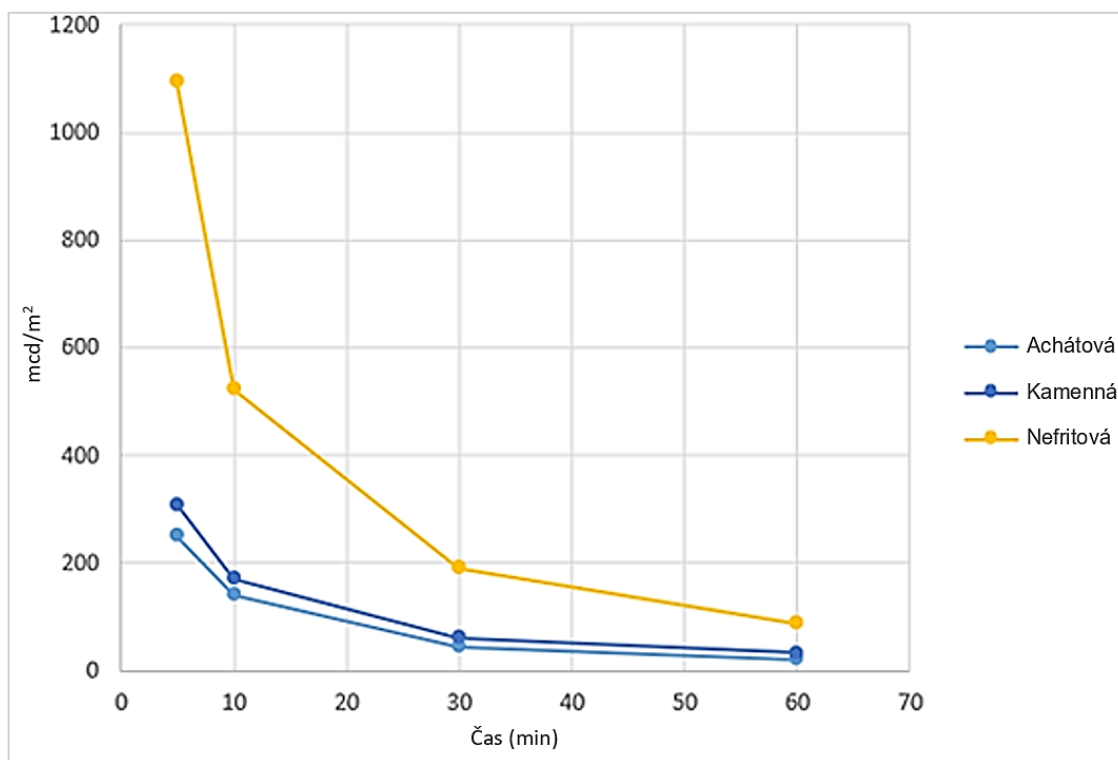


Obr. 4.5: Dostupné druhy luminiscenčního kameniva [8]

Na těchto kamenivech proběhlo u výrobce měření jasu podle NF X 08-050-1, kde světelným zdrojem bylo světlo typu D65 s intenzitou osvětlení 1000 lx, kterému byly vzorky vystaveny po dobu 5 minut. Níže můžeme vidět hodnoty jasů některých druhů kameniva. Nejlepších hodnot lze dosahuje kamenivo Chryso Lumin P+ nefritová, dále je u měření uvedeno, že u všech vzorků byl po 10 hodinách naměřen jas přibližně 0,3 mcd/m<sup>2</sup>.

Tab. 4.1: Hodnoty jasů [mcd/m<sup>2</sup>] některých druhů kameniva [34]

Jas [mcd/m <sup>2</sup> ]	Čas [min]							
	1	5	10	30	60	90	120	150
Lumin P+ nefritová	9900	1093	522	191	88	54	36	25
Lumin P kamenná	1749	251	141	44	21	13	9	6
Lumin P+ achátová	1400	309	171	61	33	19	5	5



Obr. 4.6: Průběh jasů některých druhů kameniva v čase [34]

### 4.2.1. Materiály

Vzorky se skládaly z portlandského šedého cementu CEM I 42,5 R (Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrý), kameniva frakce 0/4 (běžný stavební písek – bez udání původu) a 4/8 (lom Zbraslav), záměsové vody, luminiscenčního kameniva Chryso Lumin P světle šedá frakce 2/4 a Chryso Lumin P+ nefritová frakce 4/8. Dále byl kvůli zpracovatelnosti přidán superplastifikátor Stachement 787 (FM) (STACHEMA CZ s.r.o.).

Tab. 4.2: Receptura výroby betonu pomocí luminiscenčního kameniva

		K1, K2, K3
CEM I 42,5 R	[kg/m <sup>3</sup> ]	420
Voda	[kg/m <sup>3</sup> ]	180
w/c	[-]	0,44
Kamenivo 4/8	[kg/m <sup>3</sup> ]	650
Kamenivo 0/4	[kg/m <sup>3</sup> ]	900
Superplast.	[kg/m <sup>3</sup> ]	4,2

#### 4.2.2. Postup výroby

Vyráběny byly tři vzorky podle výše uvedené receptury. V míchačce byly nejprve míchány suché složky betonu, později byla přidána voda společně se superplastifikátorem. Připravenou betonovou směsí byly naplněny formy o rozměrech 160 x 140 x 40 mm a poté byly vzorky na vibračním stole hutněny. Po zhutnění se na povrch ručně aplikovalo luminiscenční kamenivo. Vzorek K1 obsahoval pouze kamenivo Lumin P+ frakce 4/8 v množství 350 g/m<sup>2</sup>, vzorek K2 obsahoval pouze kamenivo Lumin P frakce 2/4 v množství 250 g/m<sup>2</sup> a vzorek K3 obsahoval jak kamenivo Lumin P+ frakce 4/8 v množství 350 g/m<sup>2</sup>, tak kamenivo Lumin P frakce 2/4 v množství 300 g/m<sup>2</sup>. Kamenivo pak bylo lehce zapraveno do povrchu pomocí zednické lžice. Odbednění proběhlo po 2 dnech, vzorky byly následně umístěny do vody po dobu jednoho týdne.



Obr. 4.7: Výroba vzorků K1, K2



### 4.3. Luminiscenční beton – příměs

Pro výrobu vzorků s obsahem luminiscenční, případně také reflexní příměsi, byl použit žlutozelený fotoluminiscenční pigment na bázi hlinitanu o průměrné svítivosti PLE-P-Z-4D od firmy Photoluminescent Europe s velikostí částic 25–35  $\mu\text{m}$ , jehož chemické složení je  $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ . Jeho cena byla 3211,93 Kč/kg, při obsahu LP 25 % obsahu cementu byla cena LP na výrobu jednoho vzorku pasty 289 Kč, na výrobu jednoho vzorku malty pak 109 Kč. Reflexní příměs, která byla objednána od společnosti Glowtech, je tvořena mikroskopickými skleněnými kuličkami o velikosti 40  $\mu\text{m}$ . Pořizovací cena této příměsi byla v přepočtu 3715,57 Kč/0,5 kg, cena výroby jednoho vzorku s obsahem RP 10 % obsahu cementu byla tedy 97 Kč.



Obr. 4.8: Luminiscenční a reflexní příměs

#### 4.3.1. Materiály

Vzorky se skládaly z portlandského šedého cementu CEM I 42,5 R (Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrý) či bílého cementu CEM I 52,5 R (od firmy HET), kameniva frakce 0/4 (běžný stavební písek – bez udání původu) nebo křemenného kameniva frakce 1,6/4 (Provodínské písky a.s.), záměsově vody, LP, případně RP. Obsah obou příměsí byl počítán z obsahu cementu v daném vzorku. V několika vzorcích byl kvůli zpracovatelnosti přidán superplastifikátor Stachement 787 (FM).

Tab. 4.3: Receptura výroby cementové pasty a malty pomocí LP, případně RP

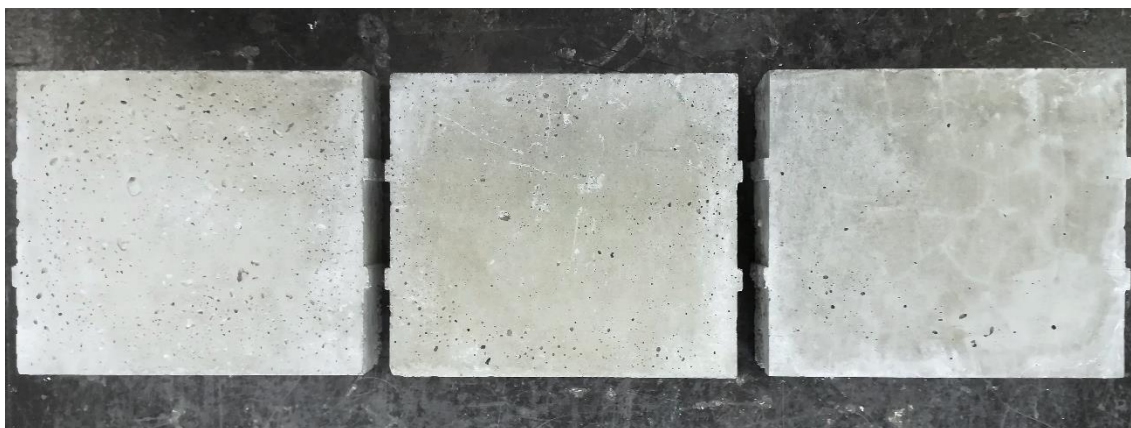
		P1	P2	P3	B1	B2	B3
CEM I 42,5 R šedý	[kg/m <sup>3</sup> ]	1200	450	450	-	-	-
CEM I 52,5 R bílý	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	1200	450	450
Voda	[kg/m <sup>3</sup> ]	420	225	225	487	225	225
w/c	[-]	0,35	0,5	0,5	0,41	0,5	0,5
Kamenivo 0/4	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	1350	1300	-	-	-
Kamenivo 1,6/4 křemenné	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	1350	1300
LP (% obsahu cementu)	[kg/m <sup>3</sup> ]	300 [25 %]	113 [25 %]	113 [25 %]	300 [25 %]	113 [25 %]	113 [25 %]
RP (% obsahu cementu)	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	45 [0 %]	-	-	45 [0 %]
Superplast.	[kg/m <sup>3</sup> ]	2	-	-	2	-	-

#### 4.3.2. Postup výroby

Vzhledem k tomu, že luminiscenční plocha je k měření zapotřebí pouze jedna, byly vzorky v rámci úspory materiálu vyráběny tak, že byly formy naplněny cementovou pastou či maltou podle výše uvedené receptury v tloušťce přibližně 1 cm a zbytek formy byl doplněn betonem, který byl vyroben podle receptury uvedené v Tab. 4.2.



Obr. 4.9: Výroba vzorků s šedým a bílým cementem



Obr. 4.10: Vzorky za světla, zleva P1, P2 a P3

Míchání cementové pasty proběhlo v míchačce podle normy ČSN EN 196-3:2017. V míchačce se nejprve podobu 90 sekund míchá voda, cement, LP a případně také RP. Poté se míchání zastaví na 30 sekund a pasta se stěrkou setře z okrajů nádoby. Následně se míchačka spustí na dalších 90 sekund.

Míchání cementové malty proběhlo v míchačce podle normy ČSN EN 196-1:2016. V míchačce se nejprve po dobu 30 sekund míchá voda, cement, LP a případně RP. Po uplynutí této doby se během 30 sekund za stálého míchání přidá písek. Míchačka se pak přepne na vysokou rychlost a míchání pokračuje dalších 30 sekund. Poté se míchání zastaví na 90 sekund a malta se stěrkou setře z okrajů nádoby. Následně se v míchání vysokou rychlostí pokračuje dalších 60 sekund.

Při určování vodního součinitele se nejprve vycházelo z běžného poměru  $w/c$ . Pro pasty byl převzat součinitel ze studie na pastách [15], pro malty součinitel z normy ČSN EN 196-1:2016. Takto vyrobená směs byla ovšem v případě pasty s bílým cementem příliš suchá. Na základě tohoto byla do vodního součinitele vedle cementu započítána také LP, taková směs však byla naopak příliš tekutá. Z tohoto tedy vyplývá, že LP má na vodní součinitel vliv s určitým koeficientem, který se nachází v intervalu od 0 do 1. V daném případě bylo experimentálně stanoveno, že pro dosažení vhodné konzistence je tento koeficient přibližně  $2/3$ . Potřebné množství vody pak bylo:

$$w = 1200 * 0,35 + 300 * 0,35 * 0,67 = 490 \text{ kg/m}^3$$

Výsledná použitá dávka  $487 \text{ kg/m}^3$  je přizpůsobena konkrétnímu vyráběnému množství směsi (zaokrouhlení dávky vody na celé gramy).

Připravenou směsí byly naplněny formy o rozměrech  $160 \times 140 \times 40 \text{ mm}$  v tloušťce cca  $1 \text{ cm}$ , zbývající objem formy byl doplněn betonem vyrobeným podle receptury uvedené v Tab. 4.2. Stejně jako v případě vzorků s luminiscenčním kamenivem proběhlo odbednění po 2 dnech, vzorky byly následně umístěny do vody po dobu jednoho týdne.

## 4.4. Výstupy měření

Měření vzorků proběhlo ve dvou etapách. V první byly všechny vzorky nasvíceny výše popsaným LED světlem po dobu 30 sekund, které bylo od vzorků vzdáleno 5 cm, a následně byly foceny po dobu 30 minut v intervalu 30 sekund. Poté proběhlo vyhodnocení vzorků a na základě toho byly vzorky s šedým cementem z měření v druhé etapě vyřazeny. Vzorky s luminiscenčním kamenivem byly v druhé fázi ponechány na denním světle po dobu 5 hodin, protože jejich běžné použití je nejčastěji v exteriéru, zatímco vzorky s luminiscenční příměsí byly nasvíceny LED světlem po dobu 30 minut, které bylo od vzorků ve vzdálenosti 1 m, aby bylo simulováno umělé osvětlení v interiéru (například při použití v únikových cestách).

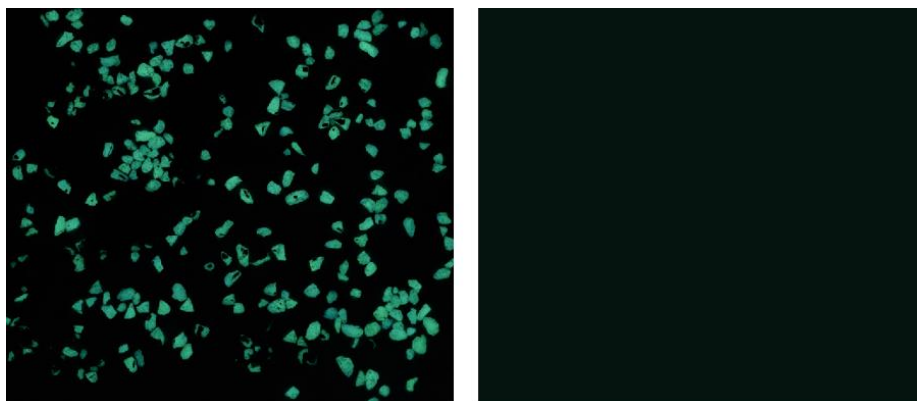
### 4.4.1. Porovnání kameniva a příměsí

Toto porovnání proběhlo v rámci 1. etapy měření. Všech 9 vzorků bylo poté, co byly umístěny na denním světle, postupně nasvíceno LED světlem po dobu 30 sekund ze vzdálenosti 5 cm, aby byly světelné podmínky jednotné a výsledky nebyly ovlivněny například proměnlivostí počasí a bylo umožněno jejich vzájemné porovnání. Fotoaparát byl od vzorků ve vzdálenosti 1 m a měl následující parametry: clonové číslo  $f/3,5$ , expoziční čas 1 s, ISO 100.

U vzorků s luminiscenčním kamenivem proběhlo vyhodnocení dvojím způsobem. Vyhodnocena byla průměrná hodnota světlosti, která zahrnovala jednak kamenivo a jednak plochu samotného betonu (křivky K1, K2 a K3). Výrazný vliv v tomto případě měla plošná hustota luminiscenčního kameniva v daném vzorku. Aby bylo možné porovnat pouze svítivost různých druhů kameniva, byly ze vzorků K1 a K2 stanoveny maximální hodnoty  $L_{Lab}$  (křivky K1 \_\_kamenivo a K2\_\_kamenivo).

Vzorky s LP byly vyhodnocovány pomocí průměrné hodnoty světlosti, protože rozložení příměsí po ploše vzorku je relativně rovnoměrné.

Fotografie jsou oproti skutečnosti z důvodu zvoleného nastavení fotoaparátu tmavší, některé vzorky byly po delší době stále poměrně dobře viditelné, fotoaparát je však již nezaznamenal. Toto nastavení však bylo zvoleno tak, aby byly viditelné všechny vzorky, a to hlavně během prvních několika minut, kdy je pokles světlosti nejvýraznější. U LP by například mohl být expoziční čas delší, ale fotografie s luminiscenčním kamenivem by pak byly ihned po nasvícení přexponované.



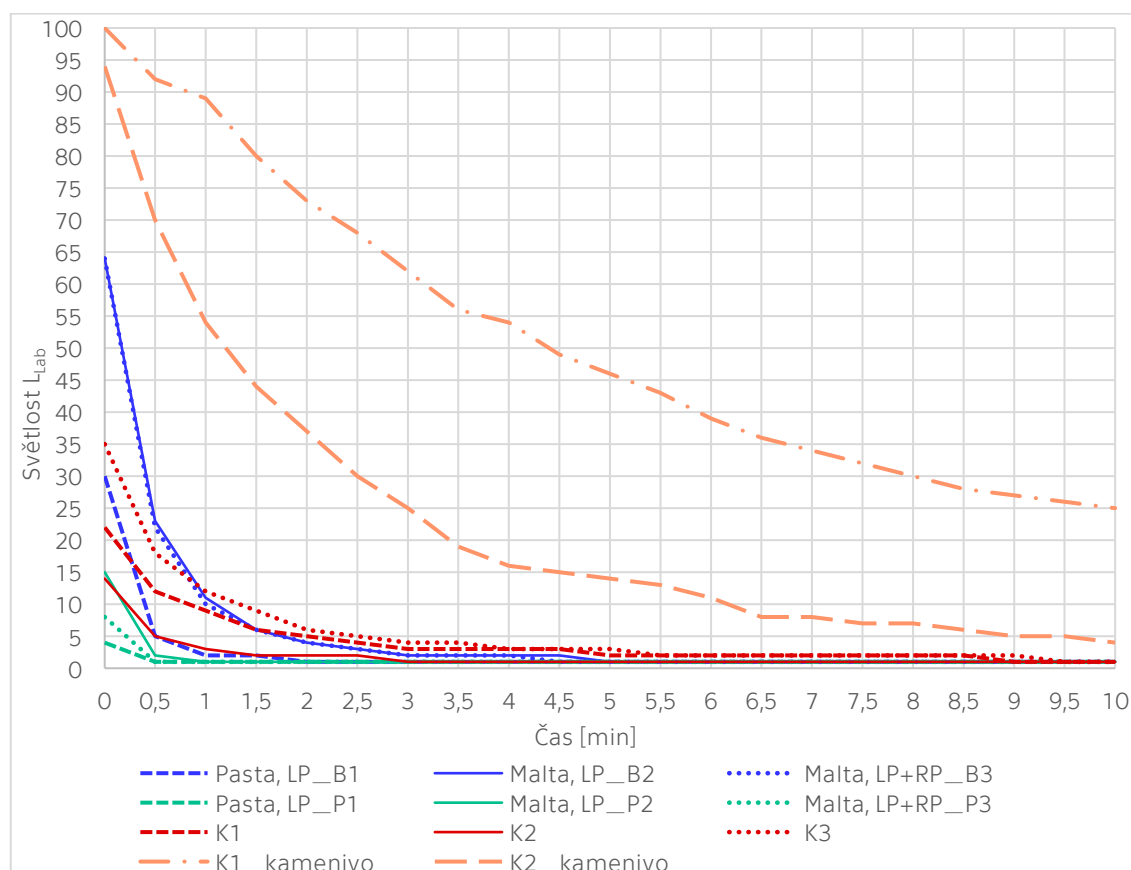
$L_{Lab}=70$

$L_{Lab}=5$

Obr. 4.11: Porovnání maximální a průměrné hodnoty světlosti  $L_{Lab}$

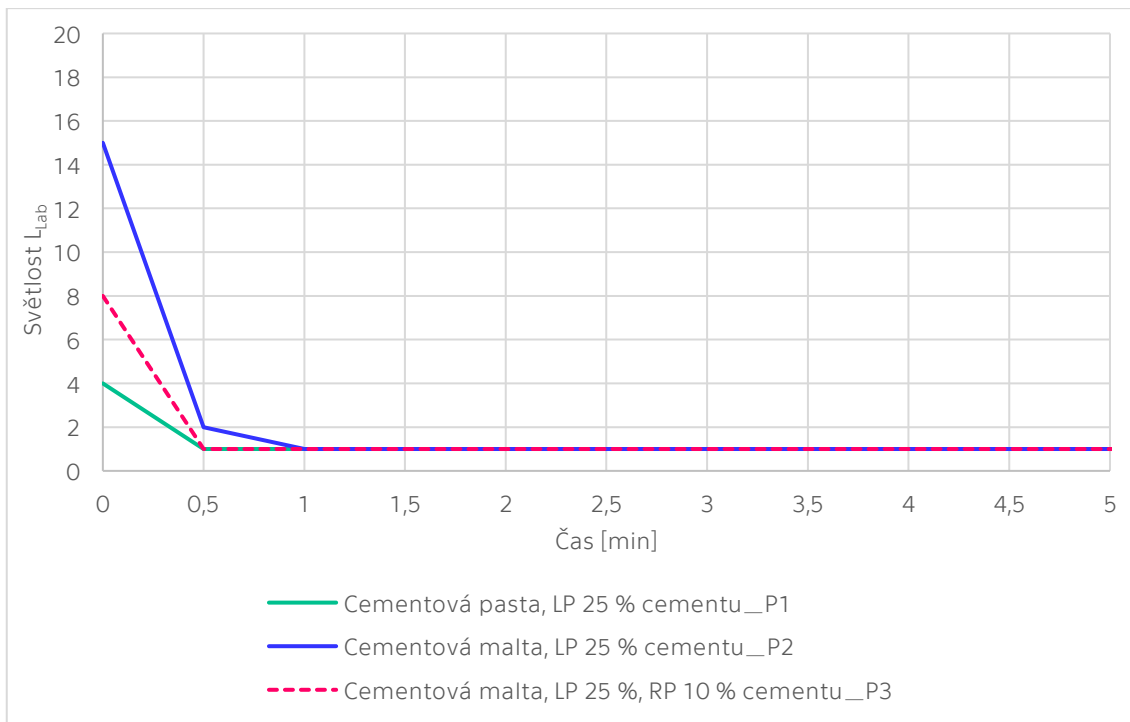
Tab. 4.4: Hodnoty světlostí  $L_{Lab}$  všech vzorků

	Čas [min]												
	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B1	30	5	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B2	64	23	11	6	4	2	2	1	1	1	1	1	1
B3	64	22	10	6	4	2	2	1	1	1	1	1	1
P1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P2	15	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P3	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K1	22	12	9	6	5	3	3	2	2	2	2	1	1
K2	14	5	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
K3	35	18	12	9	6	4	3	3	2	2	2	2	1
K1_kam.	100	92	89	80	73	62	54	46	39	34	30	27	25
K2_kam.	94	70	54	44	37	25	16	14	11	8	7	5	4

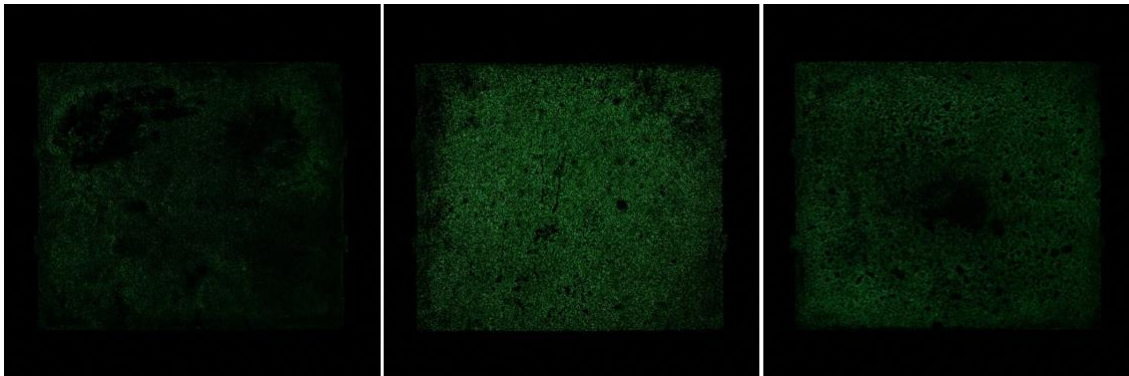


Obr. 4.12: Porovnání poklesu světlosti všech vzorků během 10 minut po nasvícení LED světlem po dobu 30 sekund

Z grafu je patrné, že jas strmě klesá během prvních několika minut po přerušení světelného zdroje, poté už je pokles poměrně pozvolný. Průměrné hodnoty světlosti dosahují u vzorků s LP s použitím bílého cementu nejvyšších počátečních hodnot, ovšem pokles je pak strmější a dlouhodobě dosahuje vyšších hodnot kamenivo. Pokud pak uvažujeme hodnoty pouze kameniva, dosahují tyto jednoznačně nejvyšších hodnot jak počátečních, tak dlouhodobých.



Obr. 4.13: Pokles světlosti u vzorků s příměsí, šedý cement, nasvícení LED světlem po dobu 30 sekund

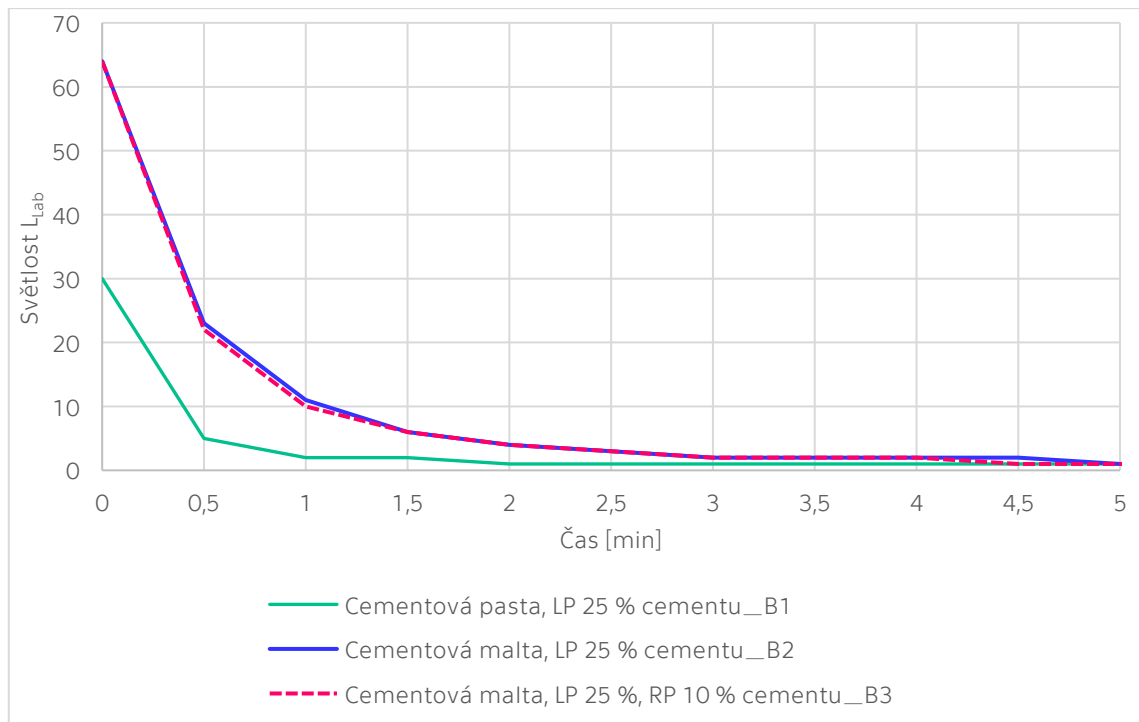


Obr. 4.14: Vzorky v čase  $t=0$  s po nasvícení, zleva P1, P2 a P3

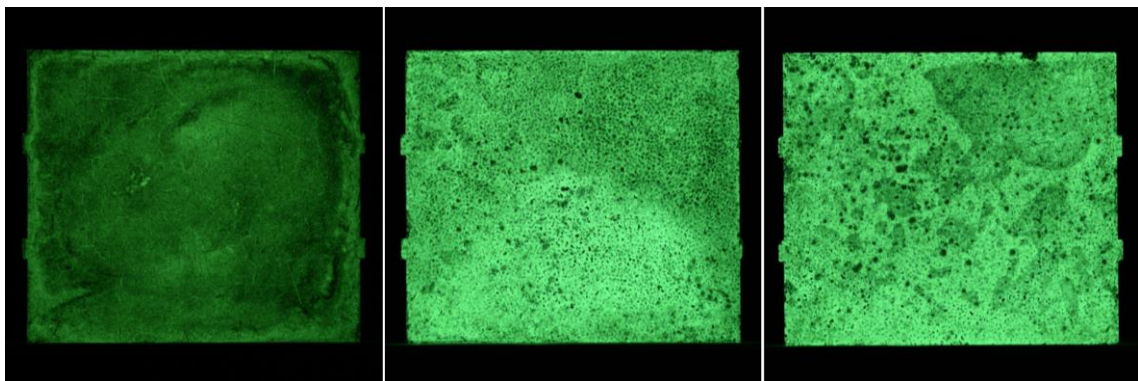
V případě vzorků s šedým cementem v grafech vidíme, že dochází k poklesu světlosti již v první minutě po nasvícení. Tomuto odpovídá také subjektivní pozorování během focení, kdy právě tyto vzorky již po pár minutách nebyly téměř vidět. Tento pokles byl ve srovnání se všemi ostatními vzorky natolik výrazný, že byly z dalšího měření vyřazeny ( $L_{lab}$  poklesne na hodnotu 1 již po 1. minutě).

Pokud porovnáváme pastu a maltu, pak můžeme vidět, že pasta dosahuje téměř 4x menších hodnot světlosti než malta, a to i přesto, že obsah LP se určoval pouze z obsahu cementu v daném vzorku a v pastě je tedy LP více (podle Tab. 4.4 téměř 3x).

Z výše uvedených studií vyplývalo, že obsah RP zvyšuje hodnoty jasu vzorků, z našeho měření však vyplývá, že obsah RP naopak jas snižuje (světlost vzorku poklesla téměř na polovinu, pokud se ve vzorku vedle LP nacházela také RP). Nejvyšších hodnot světlosti tak dosahuje malta s 25 % LP z obsahu cementu, vzorek P2.



Obr. 4.15: Pokles světlosti u vzorků s příměsí, bílý cement, nasvícení LED světlem po dobu 30 sekund

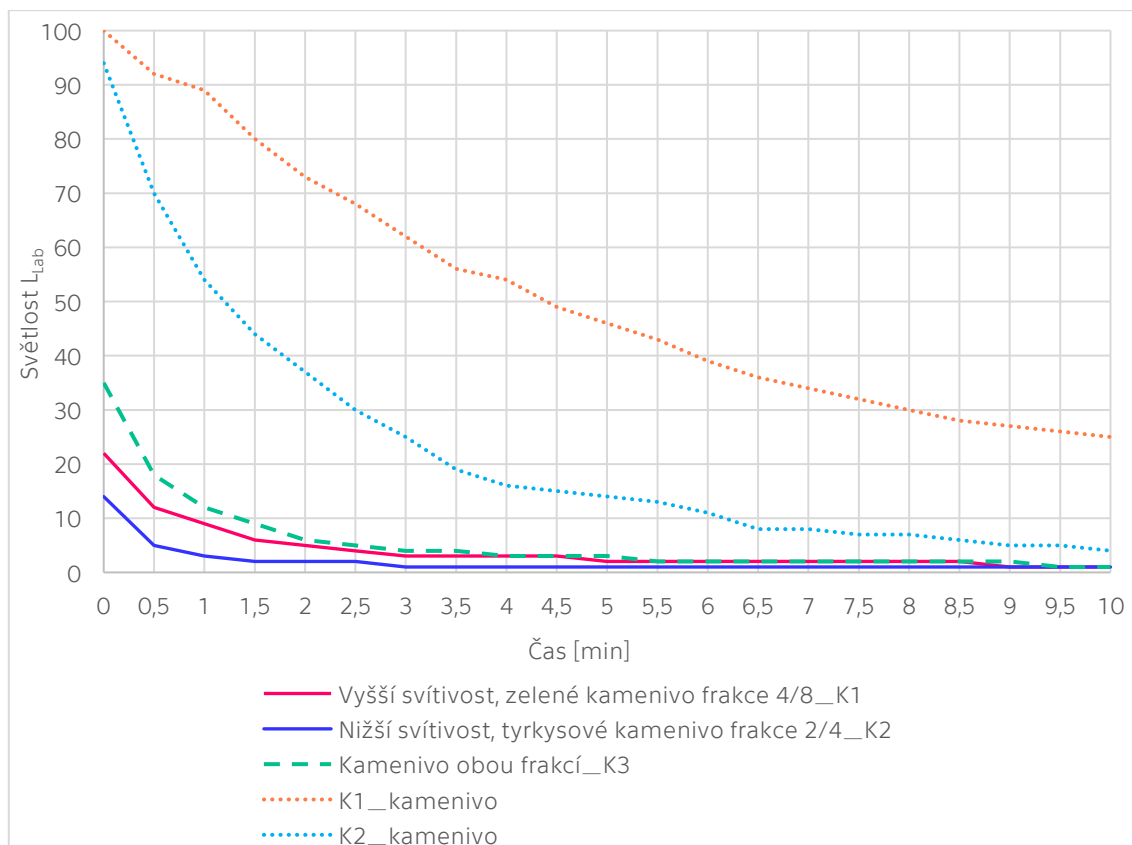


Obr. 4.16: Vzorky v čase  $t=0$  s po nasvícení, zleva B1, B2 a B3

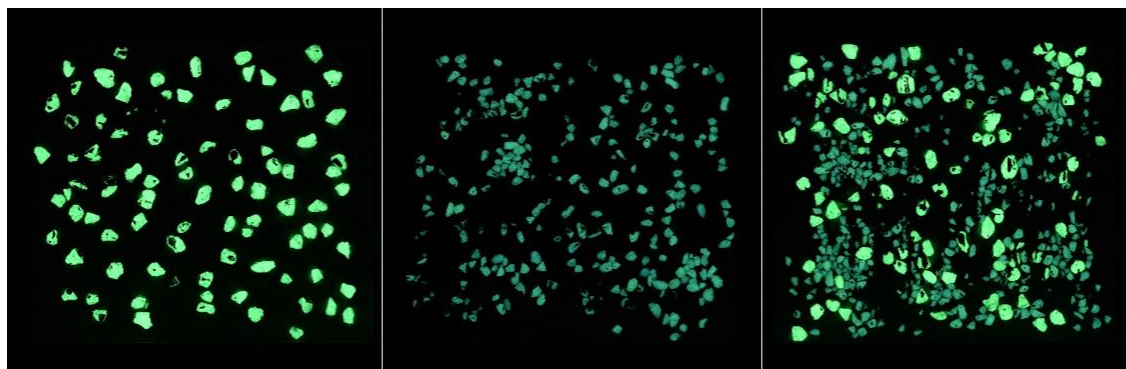
Jak z grafů, tak i z fotografií je patrné, že vzorky s bílým cementem mají několikanásobně vyšší počáteční hodnoty světlosti ( $L_{\text{Lab}}$  bílé malty obsahující LP i RP je 8x vyšší než  $L_{\text{Lab}}$  šedé malty). Také pokles světlosti není tak strmý jako u vzorků s šedým cementem (nejvýraznější pokles je během prvních 3 minut), například  $L_{\text{Lab}}$  bílé malty s obsahem LP i RP poklesne na hodnotu 1 v 5. minutě, zatímco šedá malta s obsahem LP i RP na hodnotu 1 poklesne již po 30 vteřinách.

Podobně jako v případě vzorků s šedým cementem, i zde můžeme vidět, že malta dosahuje vyšších hodnot světlosti než pasta, konkrétně jsou tyto hodnoty 2x vyšší. Obsah RP hodnoty světlosti také sníží, ovšem tento rozdíl už je téměř minimální.

Nejvyšších hodnot světlosti pak opět dosahuje malta s 25 % LP z obsahu cementu, vzorek B2.



Obr. 4.17: Pokles světlosti u vzorků s luminiscenčním kamenivem, nasvícení LED světlem po dobu 30 sekund



Obr. 4.18: Vzorky v čase  $t=30$  s po nasvícení, zleva K1, K2 a K3

Nejlepších dlouhodobých výsledků ovšem dosahuje kamenivo. Z grafů vidíme, že pokles světlosti je pozvolnější, k největšímu poklesu dochází během prvních 5 minut. Pokud uvažujeme hodnoty pouze kameniva, nabývá kamenivo o vyšší svítivosti po 10 minutách obdobných hodnot jako bílá malta s LP po již 30 sekundách.

Pokud uvažujeme průměrné hodnoty svítivosti celého vzorku, dosahuje nejvyšších hodnot vzorek K3, kde se nachází oba druhy kameniva a plošná hustota kameniva je největší (Lumin P+ frakce 4/8 v množství  $350 \text{ g/m}^2$  a Lumin P frakce 2/4 v množství  $300 \text{ g/m}^2$ ).

Pokud uvažujeme hodnoty pouze kameniva, vyšších hodnot dosahuje kamenivo LUMIN P+.

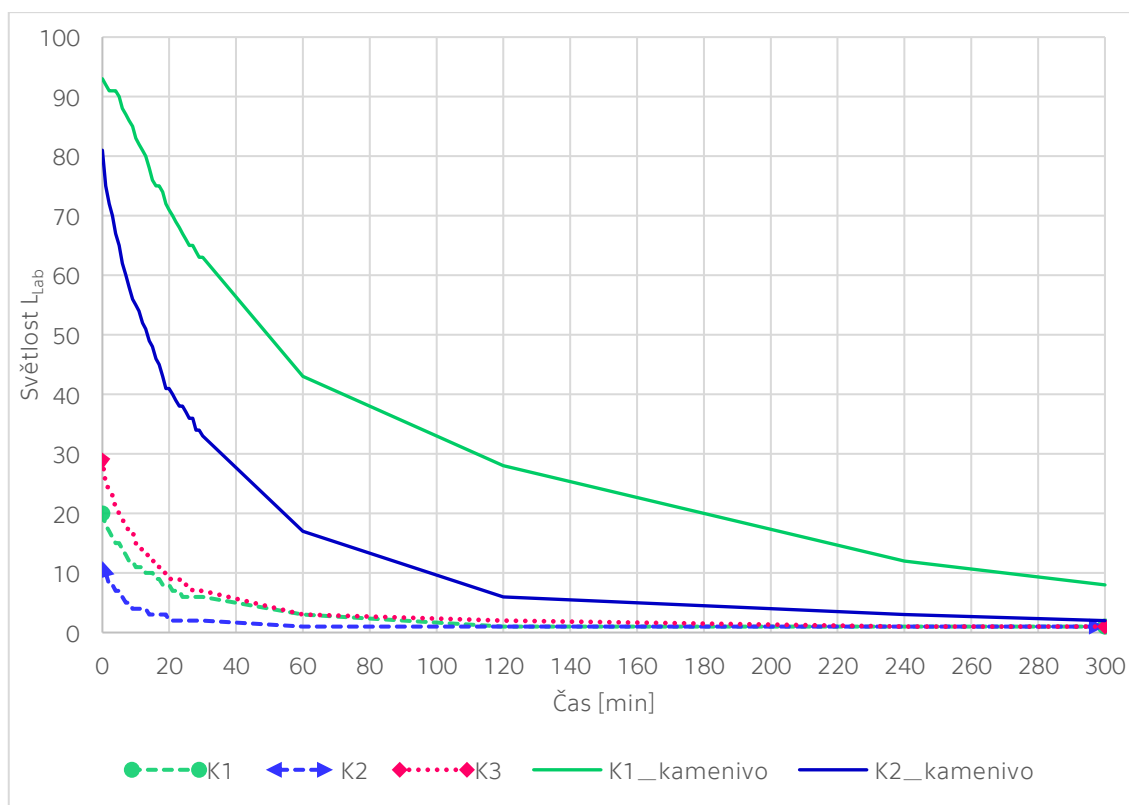


#### 4.4.2. Kamenivo

V druhé fázi focení byly vzorky K1, K2 a K3 ponechány na denním světle po dobu 5 hodin. Fotoaparát byl od vzorků ve vzdálenosti 2 m a měl následující parametry: clonové číslo  $f/3,5$ , expoziční čas 15 s, ISO 100. Z pozorování bylo zjištěno, že vzorky, které byly z krátké vzdálenosti vystaveny na 30 vteřin LED světlu s velkým světelným tokem, měly počáteční jas podstatně vyšší, ale pokles byl pak strmější. Proto byl expoziční čas během prvního focení pouze 1 s, zatímco v případě nasvícení vzorků pouze denním světlem bylo možné zvolit expoziční čas delší. Focení probíhalo průběžně prvních 30 minut po 1 minutě, poté byly vzorky vyfoceny v čase 1 h, 2 h, 4 h a 5 h.

Tab. 4.5: Hodnoty světlostí  $L_{\text{lab}}$  vzorků s luminiscenčním kamenivem

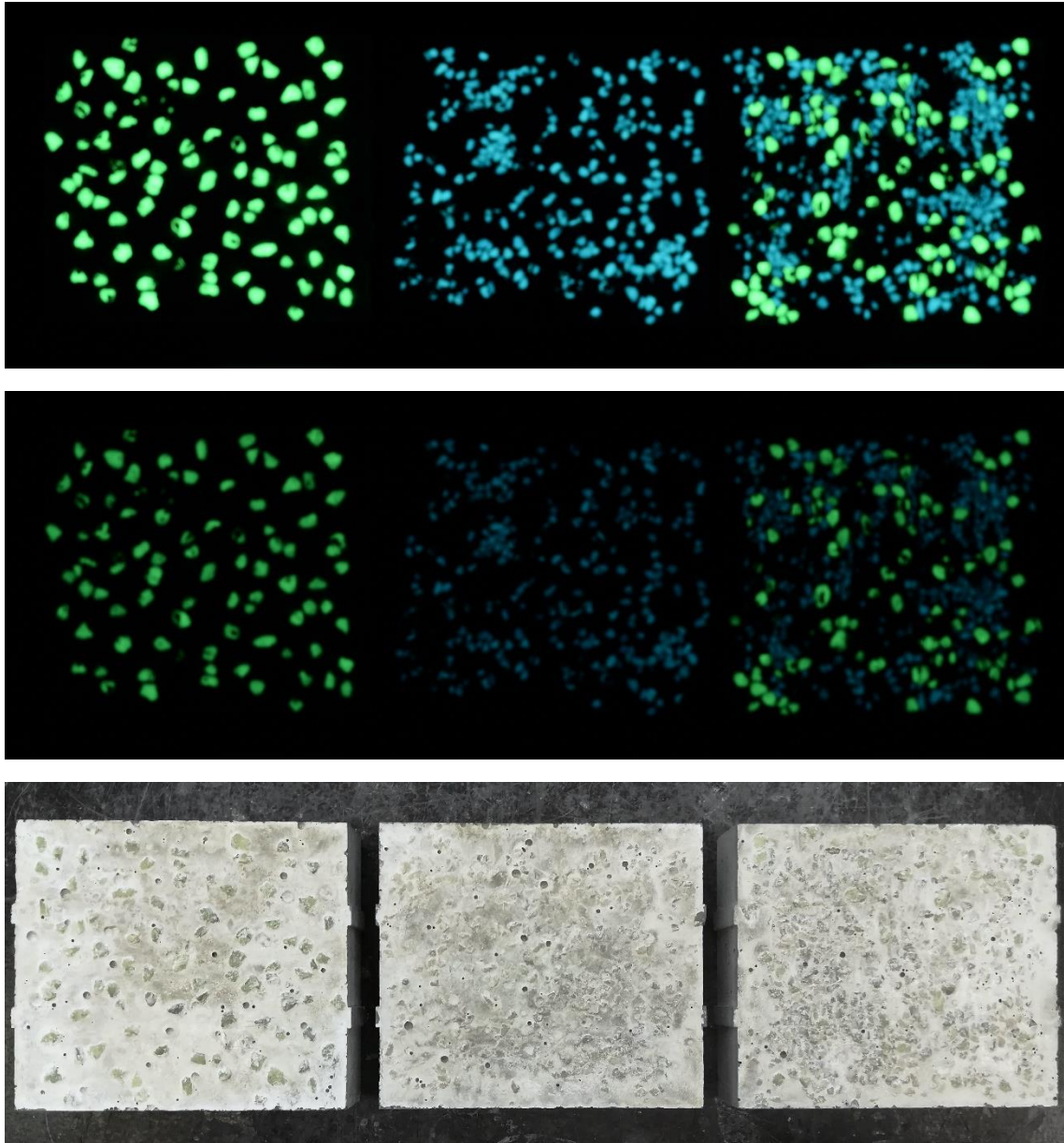
	Čas [min]												
	0	1	2	3	4	5	10	15	30	60	120	240	300
K1	20	18	17	16	15	15	11	10	6	3	1	1	1
K2	12	10	8	8	7	7	4	3	2	1	1	1	1
K3	29	25	24	23	21	20	15	13	7	3	2	1	1
K1__kam.	93	92	91	91	91	90	83	76	63	43	28	12	8
K2__kam.	81	75	72	70	67	65	55	48	33	17	6	3	2



Obr. 4.19: Pokles světlosti u vzorků s luminiscenčním kamenivem, nasvícení denním světlem po dobu 5 hod.

Průběh křivek odpovídá průběhu křivek kameniva v prvním foci (Obr. 4.17), hodnoty jsou pouze rozloženy v delším časovém intervalu, k nejvýraznějšímu poklesu tedy dochází během prvních 60 minut a můžeme vidět, že kamenivo o vyšší svítivosti bylo stále viditelné i po 5 hodinách po nasvícení.

Nejvyšších dosahuje hodnot opět vzorek K3, kde se nachází oba druhy kameniva.



Obr. 4.20: Vzorky v čase  $t=0$  a  $t=30$  min po nasvícení a za světla, zleva K1, K2 a K3

Během nastavení fotoaparátu došlo k mírnému posunutí vzorků a fotografie kameniva jsou proto rozostřené, ovšem vzhledem k tomu, že takto vyfocené byly všechny vzorky a hodnota světlosti slouží pro jejich vzájemné porovnání, nemá toto na výsledek vliv.

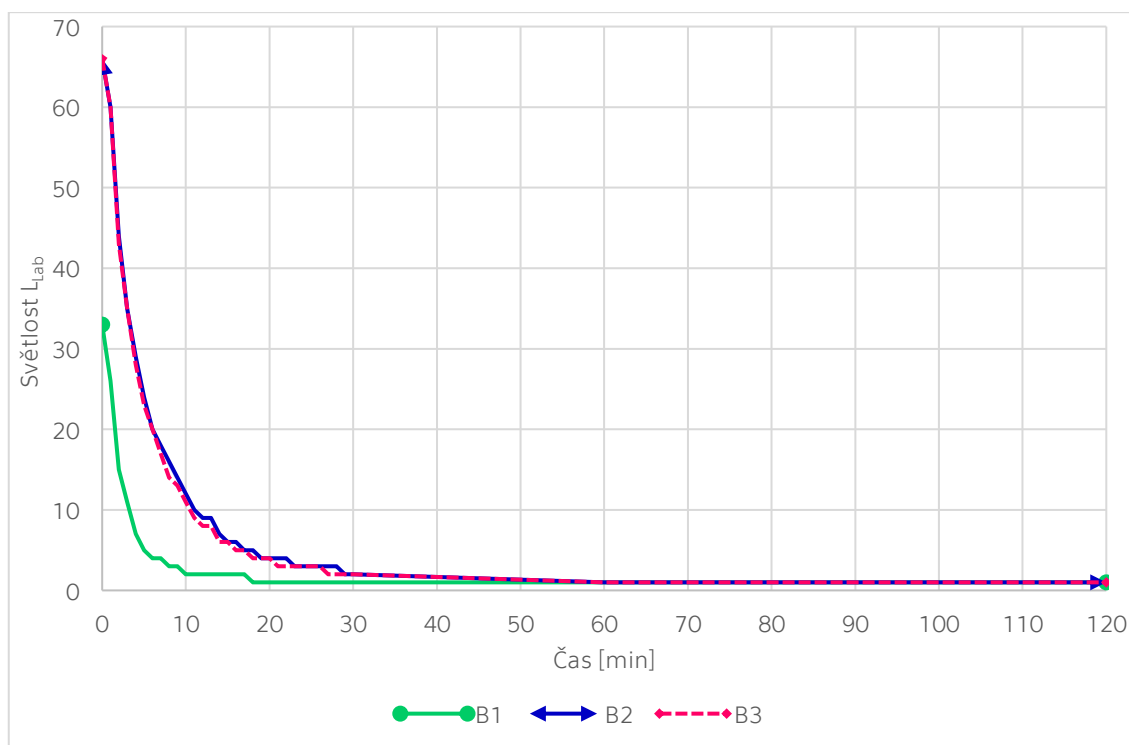
Na fotografiích můžeme vidět porovnání svítivosti kameniva po umístění do místnosti a po půl hodině měření. Vzhledem k tomu, že byl expoziční čas 15 s, je kamenivo, obzvláště LUMIN P+ o vyšší svítivosti, na fotografiích výraznější než při subjektivním pozorování vzorků během focení.

### 4.4.3. Příměs

Vzorky s luminiscenční příměsí B1, B2 a B3 byly během druhého focení nasvíceny LED světlem po dobu 30 minut, které bylo od vzorků ve vzdálenosti 1 m. Fotoaparát byl ve vzdálenosti 2 m a měl následující parametry: clonové číslo  $f/3,5$ , expoziční čas 15 s, ISO 100. Focení probíhalo průběžně prvních 30 minut po 1 minutě, vzorky byly poté vyfoceny také po 1 h a 2 h.

Tab. 4.6: Hodnoty světlostí  $L_{Lab}$  vzorků s luminiscenční příměsí, bílý cement

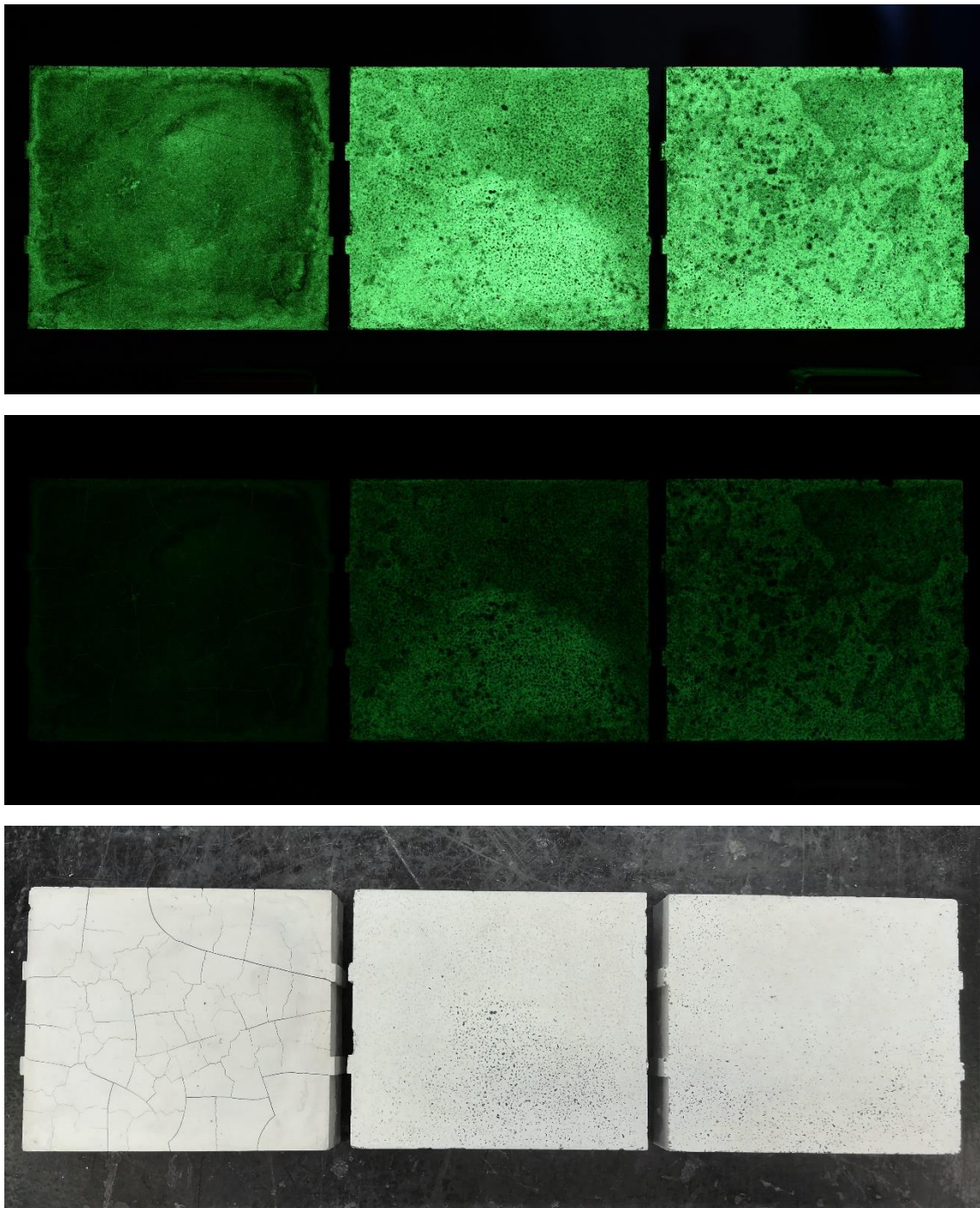
	Čas [min]												
	0	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	60	120
B1	33	26	15	11	7	5	2	2	1	1	1	1	1
B2	66	60	44	35	29	24	12	6	4	3	2	1	1
B3	66	60	43	35	28	23	11	6	4	3	2	1	1



Obr. 4.21: Pokles světlosti u vzorků s příměsí, bílý cement, nasvícení LED světlem po dobu 30 minut

Podobně jako u kameniva, můžeme i zde vidět, že průběh křivek odpovídá průběhu křivek vzorků s bílým cementem z prvního focení (Obr. 4.15), pokles světlosti ovšem není tak strmý, k největšímu poklesu dochází během prvních 30 minut. Hodnoty  $L_{Lab}$  mají již po 60 minutách hodnotu 1, ovšem na fotografiích jsou vzorky stále viditelné. Z vizuálního hodnocení tak například světlost vzorku B2 po 1 h odpovídala světlosti vzorku B1 po 30 minutách a světlost vzorku B3 odpovídala přibližně  $\frac{1}{2}$  světlosti vzorku B1 po 30 minutách. Hodnoty  $L_{Lab}$  se tedy po 1 hodině rovnají 1, ovšem vzorek pasty B1 již na fotografii viditelný nebyl, zatímco oba vzorky malty ano, přičemž více viditelný byl vzorek B2.

Nejvyšších hodnot světlosti tedy opět dosahuje malta s 25 % LP z obsahu cementu, vzorek B2, a to jak počátečních, tak dlouhodobých.



Obr. 4.22: Vzorky v čase  $t=0$  a  $t=10$  min po nasvícení a za světla, zleva B1, B2 a B3

Na fotografiích vidíme vzorky vyfocené ihned po odebrání světelného zdroje a po 10 minutách. Již po 10 minutách nebyl vzorek pasty téměř viditelný, zatímco oba vzorky malty ano. Toto odpovídá i skutečnému pozorování, kdy i po 2 hodinách byly vzorky malty stále slabě viditelné. V tomto případě jas vzorků na fotografiích přibližně odpovídá skutečnému jasů vzorků.

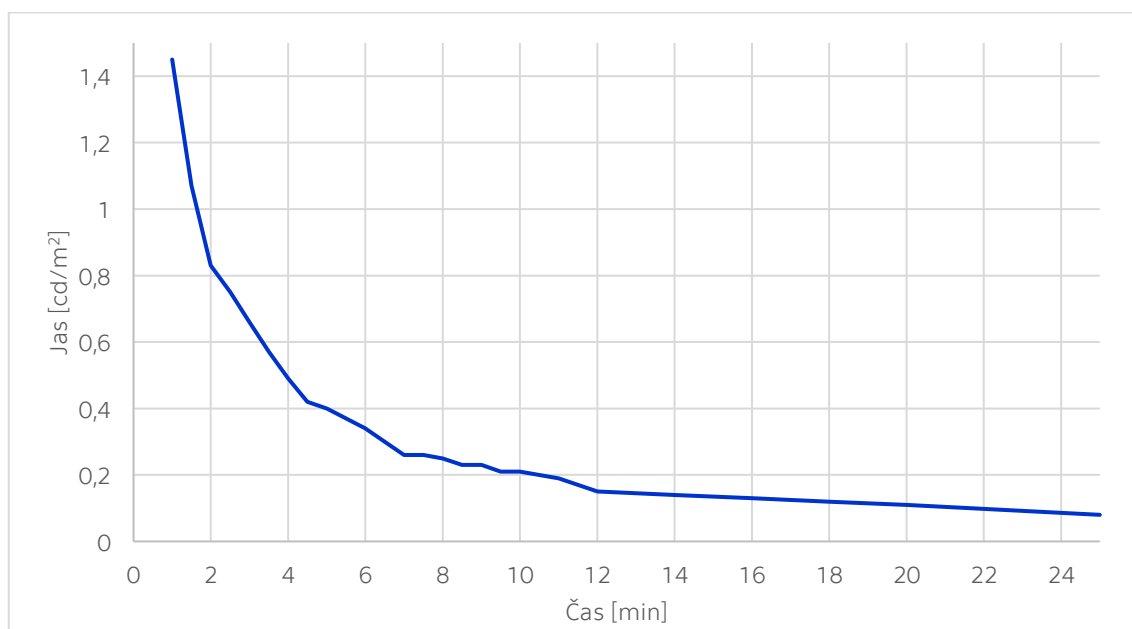
## 4.5. Měření jasoměrem

V závěru práce se naskytla možnost využít jasoměru, což umožnilo získat alespoň některé hodnoty jasu, z časových důvodů však toto měření nemohlo být provedeno v plném rozsahu a byly zkoumány pouze vybrané vzorky. K měření byl použit jasoměr Konica Minolta Luminance Meter LS-110. Úhel pohledu je  $9^\circ$  a úhel měření  $1/3^\circ$ . Rozsah přístroje je  $0,001 \text{ cd/m}^2$ . Zaostřovací vzdálenost je od 1014 mm do nekonečna. Relativní spektrální odezva je 8 % CIE spektrální světelné účinnosti  $V(\lambda)$ . Použitý jasoměr je ve vlastnictví Katedry konstrukcí pozemních staveb Fakulty stavební ČVUT v Praze. Zodpovědnou osobou za přístroj je Ing. Bc. Jaroslav Vychytil, Ph.D., který se měření účastnil.

Měřeny byly dva vzorky, které vykázaly nejzajímavější výsledky v předchozích zkouškách, a to vzorek bílé malty s LP B2 a vzorek K1, kde se nachází pouze kamenivo Lumin P+ (tento vzorek byl zvolen také proto, aby se eliminoval vliv různých druhů použitého kameniva). Vzorek s kamenivem byl nasvícen denním světlem po dobu 5 hodin, vzorek s maltou byl nasvícen výše popsaným LED světlem ve vzdálenosti 1 m po dobu 45 minut.

Tab. 4.7: Hodnoty jasu během prvních 25 minut, vzorek K1

	Čas [min]											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	25
K1	1,45	0,83	0,66	0,49	0,40	0,34	0,26	0,25	0,23	0,21	0,14	0,08



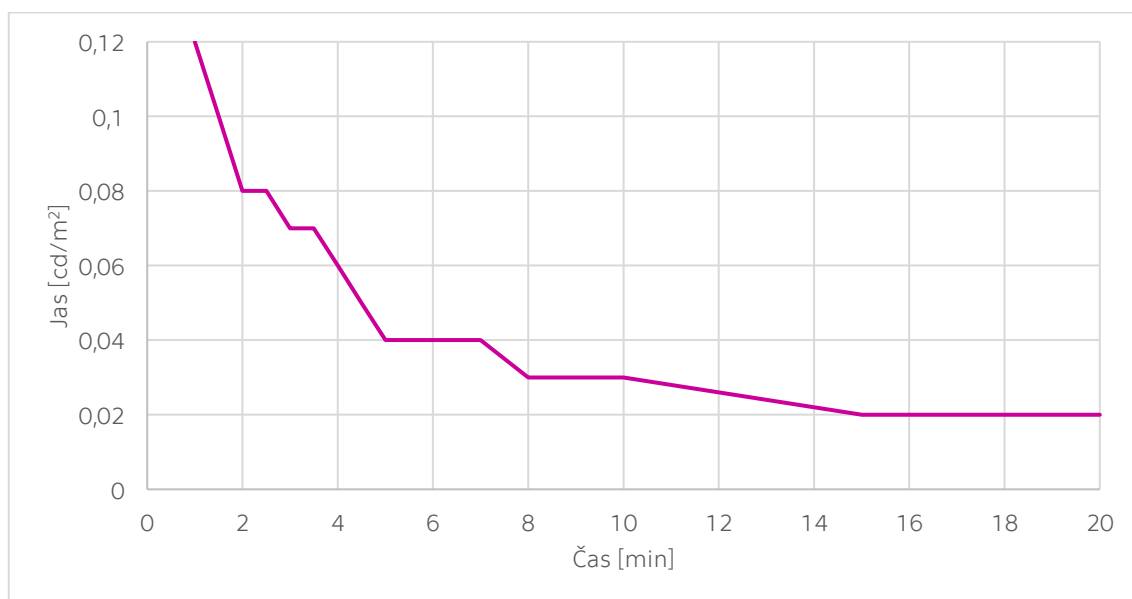
Obr. 4.23: Pokles jasu během prvních 25 minut, vzorek K1

Vzorek byl měřen přibližně za stejných podmínek jako při druhém měření (kap. 4.4.2.). Pokud se podíváme na grafy světlosti a jasu vzorku K1, vidíme, že graf jasu svým průběhem přibližně odpovídá grafu světlosti a světlost je tedy veličina úměrná jasu. Hodnota jasu změřená v první minutě je  $1,45 \text{ cd/m}^2$ , zatímco uváděná hodnota jasu v první minutě u tohoto druhu kameniva je  $9,9 \text{ cd/m}^2$ . Tento rozdíl

může být dán jednak tím, že se v našem případě měřilo kamenivo již zapravené do povrchu betonu a povrch kameniva byl tedy mírně znečištěný, a jednak tím, že přístroj neměří pouze bod, ale i určitou malou oblast kolem a výsledná hodnota tedy může být nižší.

Tab. 4.8: Hodnoty jasů během prvních 20 minut, vzorek B2

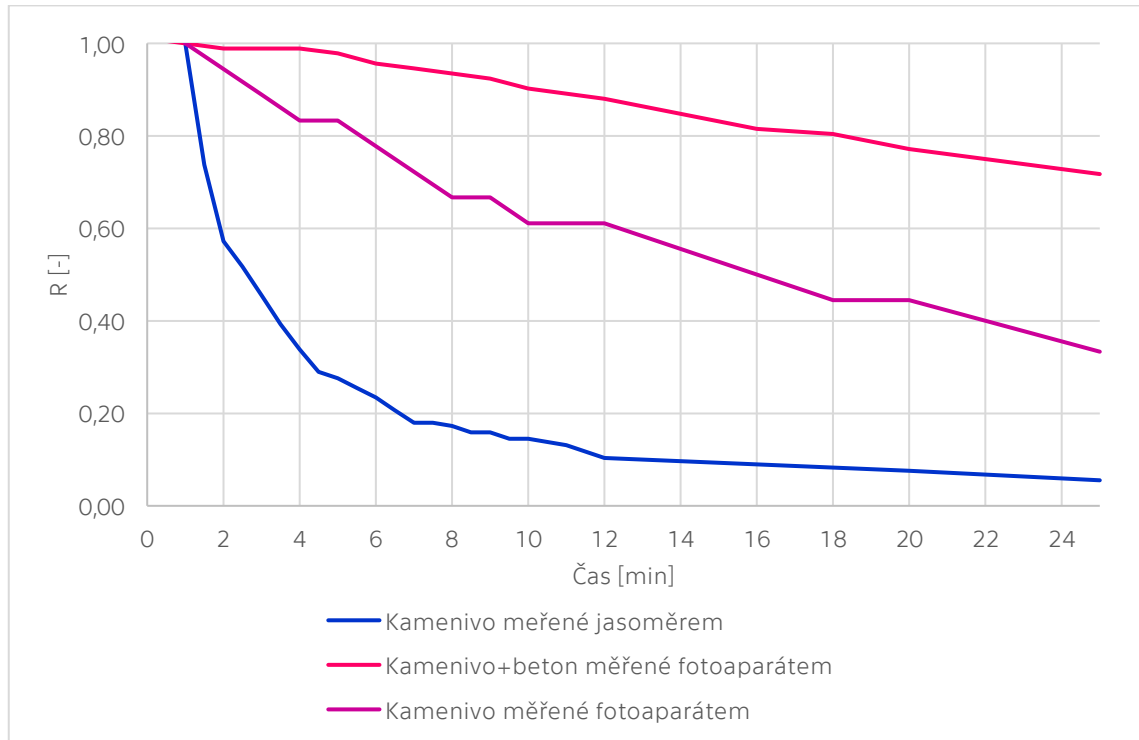
	Čas [min]											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
B2	0,12	0,08	0,07	0,06	0,04	0,06	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02



Obr. 4.24: Pokles jasů během prvních 20 minut, vzorek B2

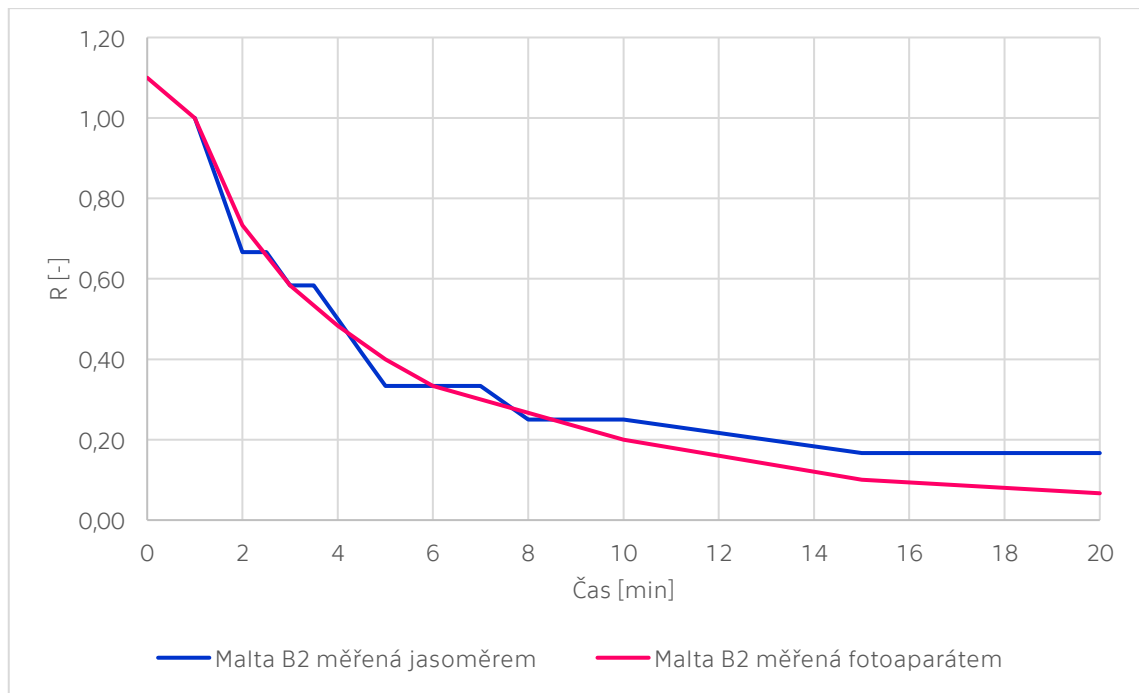
Ve studii na maltách [16], kde bylo světelným zdrojem světlo typu D65 s intenzitou osvětlení 1000 lx, které působilo po dobu 10 minut, byla u vzorku, který obsahoval 0 % RP a 75 % LP z obsahu cementu (25 % LP z obsahu původní dávky jemného kameniva), naměřena po 1 minutě hodnota 2,6 cd/m<sup>2</sup>. Tento vzorek se vlastnostmi nejvíce blížil vzorku B2. Přestože jsou vlastnosti i okrajové podmínky poměrně odlišné, je možné alespoň rámcové porovnání hodnot. Vzorek B2 po 1 minutě dosahoval hodnoty 0,12 cd/m<sup>2</sup>. Obdobně jako v případě kameniva, i zde přístroj měřil určitou malou oblast kolem bodu, do měření tedy mohla být zahrnuta i oblast s nižším jasnem.

Výše bylo uvedeno, že svítivost je závislá na jas. Proto bylo provedeno přímé srovnání. Hodnoty jasů a svítivosti byly převedeny na relativní hodnoty  $R$ . Vzhledem k tomu, že při měření jasoměrem byl počátek měření až v čase  $t=1$  min, je hodnota  $R$  rovna 1 v tomto čase, a ostatní hodnoty se spočítají jako poměr jasů (příp. svítivosti) v daném čase ku jasů (příp. svítivosti) v čase  $t=1$ .



Obr. 4.25: Hodnoty jasů a svítivosti měřené na kamenivu převedené na relativní hodnoty

Z grafu kameniva vyplývá, že závislost jasů na svítivosti není lineární a bylo by potřeba převod stanovit experimentálně pro konkrétní fotoaparát a jeho nastavení. Přesto je ale možné vidět, že křivky jsou si tvarem podobné a pokud by byl vykreslen delší časový interval, docházelo by u všech k exponenciálnímu poklesu. Rozdíl v křivkách by z velké části mohl být dán faktem, že je u kameniva složitější stanovit, jaká část vzorku se má měřit. V případě měření fotoaparátem byly brány jednak průměrné hodnoty světlosti, které zahrnovaly kamenivo a zároveň plochu samotného betonu, a jednak maximální hodnoty  $L_{lab}$ . Ovšem v případě měření jasoměrem přístroj uvažuje malou plochu kolem bodu, která může zahrnovat jak kamenivo, tak částečně i okolní plochu betonu.



Obr. 4.26: Hodnoty jasu a svítivosti měřené na bílé maltě B2 převedené na relativní hodnoty

Naopak na grafu malty s příměsí se zdá, že se křivky relativně shodují. Hodnoty jasu malty se však pohybují ve velmi odlišných hodnotách, zatímco hodnota jasu kameniva v čase  $t=1$  je  $1,45 \text{ cd/m}^2$ , hodnota jasu malty v čase  $t=1$  je  $0,12 \text{ cd/m}^2$ , čímž může být částečně dána odlišnost oproti grafu se vzorkem kameniva. Vzdálenost křivek na svislé ose je totiž závislá na tom, jaká je absolutní hodnota jasu v čase, kdy volíme  $R=1$ .

Z tohoto měření vyplývá, že, obzvláště v případě vzorků kameniva, velmi záleží na použitém přístroji a zvolené ploše, ze které je jas hodnocen. Měření by proto bylo vhodné zopakovat v závislosti na výše uvedených poznátcích, jako je například volba oblasti měření či vliv hustoty kameniva na výsledný jas.



## 4.6. Diskuze výsledků

Z měření vyplývá, že při stejných světelných podmínkách svítí malta podstatně lépe než pasta. Pokud se podíváme na vzorek malty B2, můžeme vidět, že část vzorku svítí poměrně výrazněji, když se pak podíváme na vzorek za světla, je zde patrná oblast, kde zrna kameniva nejsou zakrytá vrstvou cementového tmele, a právě tato oblast je pak jasnější. Jako možná příčina se tedy se jeví fakt, že písek vytvoří pórovitější materiál, než je pasta, čímž umožní světlu prostoupit dále do struktury materiálu. Toto vysvětlení se nabízí jako pravděpodobné i vzhledem k principu luminiscenčního cementu Rubia Ávala, kdy jsou z cementu odstraňovány právě krystaly vznikající jako produkty hydratace, které brání vstupu světla do materiálu. Další možnou příčinou pak může být to, že některá zrna písku mohou být, na rozdíl od zrn cementu, průsvitná a světlo tak jimi může alespoň částečně procházet.

Pokud porovnáваме výsledky ze studií na maltách [16] a na pastách [15] s výsledky našimi, objevuje se zde jedna výrazná odlišnost, kterou je vliv RP na výsledný jas. Zatímco ve studiích obsah RP jas zvyšoval, v tomto měření obsah RP jas pokaždé snižoval. V případě bílého cementu nebyl tento pokles nijak výrazný, ovšem v případě šedého cementu snížil obsah RP počáteční jas téměř na polovinu. Tento rozdíl lze vysvětlit jedině odlišným typem použité RP, je možné, že námi zvolený prášek nebyl pro daný účel vhodný.

V případě bílého cementu nebyl pokles jasu nijak výrazný, ovšem v případě šedého cementu snížil obsah RP počáteční jas téměř na polovinu. Možným vysvětlením by pak bylo, že v určitých místech byla LP nahrazena RP a na povrchu vzorku je tak méně LP, která může přijímat světlo.

Co se ostatních porovnání se studiemi týče, můžeme vidět, že naše měření a pozorování se s nimi relativně shodují. Pokud nasvítíme vzorek zdrojem pouze po krátkou dobu, je pokles jasu výrazně rychlejší a vzorky jsou po krátké době téměř neměřitelné. Pokud ovšem vzorky nasvítíme po delší dobu, pak je pokles pozvolnější a doba dosvitu podstatně delší. Ve studiích byly vzorky pasty nasvíceny denním světlem, pokud tomuto zdroji byly vystaveny po dobu 1 minuty, nejvýraznější pokles byl během prvních 10 minut a po hodině byly vzorky neměřitelné. Pokud pak byly tomuto zdroji vystaveny po dobu 30 minut, pak byl nejvýraznější pokles během prvních 30 minut a vzorky přestaly být měřitelné po 4 hodinách. V našem měření byly vzorky vystaveny LED světlu, pokud byly tomuto světlu vystaveny po dobu 30 vteřin, byl nejvýraznější pokles během prvních 3 minut a po 10 minutách byly vzorky téměř neměřitelné. Pokud tomuto světlu byly vystaveny po dobu 30 minut, pak byl nejvýraznější pokles během prvních 30 minut, po 2 hodinách již vzorek pasty nebyl na fotografii viditelný, vzorky malty stále lehce patrné byly.

Z ekonomického hlediska vychází cena svítícího kameniva 280–720 Kč/m<sup>2</sup>, zatímco cena prvku pouze s LP za předpokladu, že LP obsahuje pouze povrchová vrstva o tloušťce 1 cm, vychází na 4900 Kč/m<sup>2</sup>. Lze uvažovat o redukci tloušťky na 5 mm, v takovém případě by cena byla 2450 Kč/m<sup>2</sup>.

Vyšší světlosti, jak počáteční, tak dlouhodobé, dosahovalo kamenivo (pokud uvažujeme maximální hodnoty  $L_{\text{lab}}$  pouze kameniva). Doba dosvitu byla v případě

kameniva a jeho nasvícení denním světlem 5 hodin, zatímco doba dosvitu LP při nasvícení LED světlem po dobu 30 minut byla pouze 2 hodiny.

Výroba není výrazně náročnější v žádné z variant. Kamenivo se aplikuje po rozlití betonu, pouze je potřeba na větší plochy použití zpomalovače tuhnutí a jeho následné vymytí tlakovou vodou. Prvky s LP je naproti tomu vhodné vyrábět jako prefabrikáty. Vzhledem k jeho ceně by bylo velmi nepraktické aplikovat LP do celého objemu prvku, proto se tedy uvažuje pouze slabá povrchová vrstva, která obsahuje LP, zbytek prvku může být doplněn prostým betonem.

Po zvážení ekonomického hlediska, dosahované světlosti a doby dosvitu se jeví výhodněji kamenivo, ovšem i LP, obzvláště ve vzorcích malty s bílým cementem, dosahuje poměrně slibných výsledků a její další výzkum je tedy vhodný. K tomuto také přispívá fakt, že v interiéru se dá předpokládat spíše využití LP než kameniva.

V rámci navazujícího výzkumu by bylo vhodné zaměřit se například na vliv pórovitosti a na vliv obsahu LP na světelné, ale také mechanické vlastnosti. Pro použití v exteriéru by také bylo zajímavé sledovat vliv na trvanlivost materiálu (například odolnost vůči zmrazovacím cyklům). V případě použití kameniva by pak bylo vhodné stanovit jeho mechanickou odolnost vůči obrusu. V obou případech by dále bylo zajímavé zabývat se poklesem jasu v dlouhodobém horizontu s ohledem na přirozené znečištění povrchu. U vzorků s kamenivem by dále bylo vhodné zaměřit se oblast, z jaké by bylo nejvhodnější vyhodnocovat jas.

V neposlední řadě je na základě měření také možné zvážit vhodné aplikace materiálů. Luminiscenční kamenivo má běžné použití v exteriéru, například na stezkách, okolí bazénů, jako vyznačení nebezpečných hran, na cyklostezkách apod. Z měření vyplývá, že denní světlo je jako zdroj pro tento materiál plně dostačující a kamenivo je stále dobře viditelné i po několika hodinách od přerušení světelného zdroje. Luminiscenční příměs zatím praktické využití příliš nenachází, neslibnějších výsledků dosahovala cementová malta s bílým cementem, ale k dosažení optimálních výsledků je potřeba ještě další výzkum. Jako možná použití se pak nabízí například povrchová vrstva zámkové dlažby či na fasádě budov, dále by ale bylo možné použití také v interiéru, neboť dosahovaný jas nebyl natolik výrazný, aby působil pro uživatele rušivě, ale zároveň ještě umožnil orientaci v prostoru. Pak by tedy bylo možné použití například v únikových cestách, k vyznačení nebezpečných hran (př. schodiště) či v podzemních parkovištích.

## 5 Závěr

V rámci práce byla provedena rešerše, kde byly popsány materiály, které se momentálně nejčastěji objevují v souvislosti betonu se světlem. Mezi tyto materiály patří průsvitný beton, který se nejčastěji vyrábí za pomoci optických vláken, různých polymerů či skla. Dalším materiálem je luminiscenční kamenivo, které se aplikuje na povrch betonu, luminiscenční příměs, která je tvořena fotoluminiscenčním práškem a v práci byla aplikována do cementové pasty a malty, a luminiscenční cement, což je materiál, který obsahuje luminiscenční příměsi, ale zároveň je modifikována jeho mikrostruktura.

Dále byl u většiny materiálů zjištěn postup výroby, na jehož základě pak byly vybrány materiály nejvhodnější pro praktickou část práce. Těmito materiály byl luminiscenční beton vyrobený pomocí luminiscenčního kameniva a cementová pasta a malta s luminiscenční příměsí.

Měření pak proběhlo na celkem 9 vzorcích, z nichž 3 byly vzorky betonu s kamenivem, 3 byly vzorky pasty či malty s šedým cementem a luminiscenční příměsí (případně také s reflexní příměsí) a 3 byly vzorky pasty či malty s bílým cementem a luminiscenční příměsí (případně také s reflexní příměsí). Měření a vyhodnocení nejprve proběhlo pomocí fotoaparátu a následného zjišťování hodnoty světlosti v programu Adobe Photoshop. Tato hodnota je sice úměrná jas, ale je závislá na několika parametrech fotoaparátu a její převod na jas vyžaduje experimentální měření pomocí například jasoměru. I přesto je však možné vzorky na základě této hodnoty vzájemně porovnávat. V závěru práce se však naskytla možnost využít také jasoměru, toto měření sice nebylo možné z časových důvodů provádět v plném rozsahu, ovšem umožnilo získat alespoň některé hodnoty jasů.

Z měření bylo zjištěno, že vzorky s luminiscenční příměsí svítí podstatně lépe v případě, že je použit bílý cement (počáteční světlost byla až osminásobná), zároveň v obou případech svítila podstatně lépe malta nežli pasta (u vzorků s bílým cementem přibližně 2x). Obsah reflexní příměsi vedle luminiscenční příměsí světelné vlastnosti mírně zhoršil (v případě šedého cementu bylo toto zhoršení větší). Dále bylo zjištěno, že kamenivo svítí výrazněji a po delší dobu než luminiscenční příměs (v případě, že světelným zdrojem bylo LED světlo, které svítilo po dobu 30 vteřin, bylo kamenivo viditelné stále i po čtvrt hodině měření, zatímco příměs byla ve vzorcích s bílým cementem patrná minimálně již po 5 minutách). Kamenivo, jehož zdrojem bylo denní světlo, bylo stále slabě viditelné i po 5 hodinách, vzorky s luminiscenční příměsí a bílým cementem byly již po 2 hodinách viditelné pouze minimálně.

Můžeme tedy vidět, že existuje několik variant, jakými lze efektivně pracovat se světlem za pomoci tak hojně využívaného materiálu, jakým je beton. Objevuje se tedy čím dál více materiálů, které mohou plnit několik funkcí a mohou změnit pohled na beton jako převážně konstrukční materiál.

## Použitá literatura

- [1] DZIK, P. Co to je a jak se chová infračervené záření. In: *PALADIX foto-on-line*. [Online]. [Citace: 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.paladix.cz/clanky/co-to-je-a-jak-se-chova-infracervene-zareni.html>
- [2] SOKANSKÝ, K., NOVÁK, T., BÁLSKÝ, M., BLÁHA, Z., CARBOL, Z., DIVIŠ, D., SOCHA, B., ŠNOBL, J., ŠUMPICH, J., ZÁVADA, P. *Světelná technika*. [Online]. Praha 2011. [Citace: 11.05.2021]. ISBN 978-80-01-04941-9. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/CVUT-6-Svetelna.pdf>
- [3] HABEL, J. *Základy světelné techniky*. [Online]. Praha 2012. [Citace: 11.05.2021]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18762728-Zaklady-svetelne-techniky.html>
- [4] Co je světelný tok a intenzita osvětlení? In: *Svět svítidel*. [Online]. [Citace: 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.svet-svitidel.cz/clanky-svetelny-tok-a-intenzita-osvetleni/>
- [5] SCHUBERT, E. F. *Light-Emitting Diodes*. [Online]. [Citace: 12.05.2021]. Dostupné z: <https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/Sample-Chapter.pdf>
- [6] Jasový analyzátor. In: *Teslux*. [Online]. [Citace: 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.teslux.cz/mereni-osvetleni>
- [7] KONEČNÝ, M. *Co je to luminiscence?*. [Online]. [Citace: 11.05.2021]. Dostupné z: [https://vnuf.cz/sbornik/prispevky/pdf/13-14-Konecny\\_M.pdf](https://vnuf.cz/sbornik/prispevky/pdf/13-14-Konecny_M.pdf)
- [8] CHRYSO. *Chryso LuminTech®*. 2019. Firemní materiál
- [9] CHRYSO. *Chryso@Deco Lav P03*. 2019. Firemní materiál
- [10] LuminTech®. [Online]. [Citace: 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.lumintech.com/>
- [11] CHRYSO. Luminescent insert for a construction element, associated element and manufacturing method. United States. US 20200308479 A1. 1.10.2020
- [12] WATSON, A. Y., VALBERG, P. A. Carbon black and soot: two different substances. In: *PubMed*. [Online]. [Citace: 11.05.2021]. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11331994/>
- [13] TOMÉ, P. Glow-in-the-dark Stones in Concrete. In: *Concrete Decor*. [Online]. [Citace: 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.concretedecor.net/decorativeconcretearticles/vol-17-no-6-august-september-2017/how-to-apply-glow-in-the-dark-stone-in-concrete/>
- [14] Safety/Functionality. In: *Lumi Lumi Luminescent Concrete*. [Online]. [Citace: 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.lumilumiballs.com/gallery/safetyfunctionality>
- [15] GAO, Y., HE, B., XIAO, M., FANG, Z., DAI, K. Study on properties and mechanisms of luminescent cement-based pavement materials with super-hydrophobic function (2018). *Construction and Building Materials*, 165, 548-559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.231>

- [16] HE, B., GAO, Y., QU, L., DUAN, K., ZHOU, W., PEI, G. Characteristics analysis of self-luminescent cement-based composite materials with self-cleaning effect (2019). *Journal of Cleaner Production*, 225, 1169-1183. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.291>
- [17] What is D65 and what is it used for?. In: *Waveform Lighting*. [Online]. [Citace: 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.waveformlighting.com/color-matching/what-is-d65-and-what-is-it-used-for>
- [18] Before/After Photos. In: *SEK SUREBOND*. [Online]. [Citace: 11.05.2021]. Dostupné z: <https://sek.us.com/before-and-after-photos/>
- [19] Mit der Kraft von Kristallen: Leuchtsteine setzen Akzente. In: *baulinks*. [Online]. [Citace: 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.baulinks.de/webplugin/2008/0719.php4>
- [20] MORLIN-YRON, S. Glow-in-the-dark cement could light-up cities. In: *CNN style*. [Online]. [Citace: 11.05.2021]. Dostupné z: <https://edition.cnn.com/style/article/glow-in-the-dark-cement/index.html>
- [21] CARRENO, B. Glow-Hard: Luminous cement could light roads, structures. In: *Newsela*. [Online]. [Citace: 11.05.2021]. Dostupné z: <https://resources.finalsite.net/images/v1587923833/brockton/r2tba3nxmjoy4cn2puws/ChemistryApril27-May1.pdf>
- [22] LitraCon. [Online]. [Citace: 12.05.2021]. Dostupné z: <http://www.litracon.hu/en>
- [23] Lucem. [Online]. [Citace: 12.05.2021]. Dostupné z: <https://lucem.com/>
- [24] LOSONCZI, A. Building block comprising light transmitting fibres and a method for producing the same. New European patent specification. EP 1532325 B2. 17.5.2002
- [25] PUNČOCHÁŘ, J. 2. kapitola: Přenosová cesta optická. [Online]. [Citace: 12.05.2021]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/AEO/sylaby/AEO\\_02.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/AEO/sylaby/AEO_02.pdf)
- [26] BUBNÍK, L., KLAJBL, J., MAZUCH, P. *Optoelektronika*. [Online]. Brno 2015. [Citace: 11.05.2021]. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/04.html>
- [27] NOVOSAD, P., HELA, R. Průsvitný beton – LiTraCon. In: ABS Portal. [Online]. [Citace: 12.05.2021]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zaklady-a-hruba-stavba/cement-a-beton/prusvitny-beton-litracon>
- [28] FAJFRNOVÁ, Z. LiCrete® – kombinace nadčasovosti a efektivity. In: *Stavebnictvi3000.cz*. [Online]. [Citace: 12.05.2021]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/licrete-kombinace-nadcasovosti-a-efektivita>
- [29] PETERS, J. Bauelement mit lichtdurchlässigen Eigenschaften. European patent application. EP2692960A1. 1.8.2012

- [30] LOSONCZI, A. Translucent building block and a method for manufacturing the same. New European patent specification. EP 2179105 B2. 10.7.2008
- [31] LiCrete®. [Online]. [Citace: 12.05.2021]. Dostupné z: <https://licrete.com/>
- [32] NEPIL, L. *Vytvoření aplikace pro analýzu jasů HDR fotografií*. [Online]. Praha 2018. [Citace: 12.05.2021]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/77055/F3-DP-2018-Nepil-Lubomir-Vytvoreni%20aplikace%20pro%20analyzu%20jasu%20HDR%20fotografii.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [33] RADEJOVÁ, L. *TL Lumintech, TL Finisol SR 200*. [e-mailová komunikace]. 8.3.2021, 14:32 [Citace: 12.05.2021].
- [34] MATEO, S. LuminTech®, coloured photoluminescent particles for decorative concrete. In: *CHRYSO*. [Online]. [Citace: 12.05.2021]. Dostupné z: <https://www.chryso.com/labnews/chrysolumintech-coloured-photoluminescent-particles-for-decorative-concrete/>
- [35] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [36] ČSN EN 196-3. *Metody zkoušení cementu – Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

## Seznam obrázků

Obr. 2.1: Elektromagnetické spektrum [1] .....	9
Obr. 2.2: Vymezení prostorového úhlu [2].....	10
Obr. 2.3: Rozložení barev ve spektrální oblasti viditelného záření [2] .....	12
Obr. 2.4: Teplota chromatičnosti [2] .....	12
Obr. 2.5: Výsledek měření jasovým analyzátozem [6] .....	13
Obr. 3.1: Ukázky kameniva (vlevo) a částic (vpravo) [10].....	15
Obr. 3.2: Okolí bazénu, Španělsko [10] .....	16
Obr. 3.3: Označení schodišťových stupňů [14] .....	17
Obr. 3.4: Okolí bazénu, Pool & Pogota [13].....	17
Obr. 3.5: Cesta v rezidenční zóně, Francie [10] .....	18
Obr. 3.6: Zvýraznění schodiště [14].....	18
Obr. 3.7: Vliv obsahu LP na pevnost v tlaku při obsahu 0 % RP [15] .....	20
Obr. 3.8: Vliv obsahu RP a LP na pevnost v tlaku po 28 dnech [15].....	21
Obr. 3.9: Vliv obsahu LP na pevnost v ohybu při obsahu 0 % RP [15].....	21
Obr. 3.10: Vliv obsahu RP a LP na pevnost v ohybu po 28 dnech [15] .....	21
Obr. 3.11: Vliv obsahu LP a RP na pevnost v ohybu po 28 dnech [16] .....	22
Obr. 3.12: Vliv obsahu LP a RP na pevnost v tlaku po 28 dnech [16] .....	22
Obr. 3.13: Vliv obsahu LP na jas v průběhu 60 vteřin po ukončení působení světelného zdroje, obsah RP 0 % [15].....	23
Obr. 3.14: Vliv obsahu LP na jas v průběhu 60 minut po ukončení působení světelného zdroje, obsah RP 0 % [15].....	23
Obr. 3.15: Vliv obsahu RP na jas v průběhu 14 hodin po ukončení působení světelného zdroje, obsah LP 25 % [15] .....	23
Obr. 3.16: Vliv doby působení světelného zdroje na dobu dosvitu [15].....	24
Obr. 3.17: Vliv obsahu LP a RP na počáteční jas a jas po 10 minutách [16] .....	24
Obr. 3.18: Vliv obsahu LP a RP na jas v průběhu 12 hodin, obsah RP a) 0 %, d) 7 % [16].....	25
Obr. 3.19: Vyznačení cest [18].....	26

Obr. 3.20: Zvýraznění parkoviště [19].....	26
Obr. 3.21: Možné využití luminiscenčního cementu na fasádě budov [20].....	27
Obr. 3.22: Schéma optického vlákna [25].....	28
Obr. 3.23: Typy optických vláken [25].....	28
Obr. 3.24: Výroba průsvitného betonu [24].....	29
Obr. 3.25: Vstupní hala, Londýn, Anglie (Lucem) [23] .....	30
Obr. 3.26: Recepční deska společnosti Holcim, Budapešť, Maďarsko (Litracon) [22]	30
Obr. 3.27: Betonová lampa Litracube [22].....	31
Obr. 3.28: Obytný dům, Berlín, Německo (Lucem) [23].....	31
Obr. 3.29: Průsvitná vložka [30] .....	32
Obr. 3.30: Pohled do vyztuženého prvku [30].....	33
Obr. 3.31: Forma s možným upevněním průsvitné vložky [30].....	33
Obr. 3.32: Zahradní Pavilon, Curych, Švýcarsko, Litracon pXL [22].....	34
Obr. 3.33: Deska stolu, Klub ON, Praha, Česká republika, Litracon pXL [22] .....	34
Obr. 3.34: Stěna vyrobená pomocí tvárnic LiCrete [31] .....	35
Obr. 3.35: Tvárnice LiCrete [31].....	35
Obr. 4.1: Svítící kamenivo a příměs za světla.....	36
Obr. 4.2: Svítící kamenivo a příměs za tmy.....	36
Obr. 4.3: Průběh nasvícení vzorku během první etapy focení.....	37
Obr. 4.4: Souřadnice systému CIE L*a*b [32].....	37
Obr. 4.5: Dostupné druhy luminiscenčního kameniva [8].....	38
Obr. 4.6: Průběh jasů některých druhů kameniva v čase [34].....	39
Obr. 4.7: Výroba vzorků K1, K2 .....	40
Obr. 4.8: Luminiscenční a reflexní příměs .....	41
Obr. 4.9: Výroba vzorků s šedým a bílým cementem .....	42
Obr. 4.10: Vzorky za světla, zleva P1, P2 a P3 .....	43
Obr. 4.11: Porovnání maximální a průměrné hodnoty světlosti $L_{Lab}$ .....	44



Obr. 4.12: Porovnání poklesu světlosti všech vzorků během 10 minut po nasvícení LED světlem po dobu 30 sekund .....	45
Obr. 4.13: Pokles světlosti u vzorků s příměsí, šedý cement, nasvícení LED světlem po dobu 30 sekund .....	46
Obr. 4.14: Vzorky v čase $t=0$ s po nasvícení, zleva P1, P2 a P3.....	46
Obr. 4.15: Pokles světlosti u vzorků s příměsí, bílý cement, nasvícení LED světlem po dobu 30 sekund.....	47
Obr. 4.16: Vzorky v čase $t=0$ s po nasvícení, zleva B1, B2 a B3 .....	47
Obr. 4.17: Pokles světlosti u vzorků s luminiscenčním kamenivem, nasvícení LED světlem po dobu 30 sekund.....	48
Obr. 4.18: Vzorky v čase $t=30$ s po nasvícení, zleva K1, K2 a K3 .....	48
Obr. 4.19: Pokles světlosti u vzorků s luminiscenčním kamenivem, nasvícení denním světlem po dobu 5 hod.....	49
Obr. 4.20: Vzorky v čase $t=0$ a $t=30$ min po nasvícení a za světla, zleva K1, K2 a K3	50
Obr. 4.21: Pokles světlosti u vzorků s příměsí, bílý cement, nasvícení LED světlem po dobu 30 minut.....	51
Obr. 4.22: Vzorky v čase $t=0$ a $t=10$ min po nasvícení a za světla, zleva B1, B2 a B3	52
Obr. 4.23: Pokles jasů během prvních 25 minut, vzorek K1 .....	53
Obr. 4.24: Pokles jasů během prvních 20 minut, vzorek B2 .....	54
Obr. 4.25: Hodnoty jasů a svítivosti měřené na kamenivu převedené na relativní hodnoty .....	55
Obr. 4.26: Hodnoty jasů a svítivosti měřené na bílé maltě B2 převedené na relativní hodnoty .....	56

## Seznam tabulek

Tab. 2.1: Porovnání jasu několika světelných zdrojů [5] .....	11
Tab. 3.1: Receptury vzorků cementových malt .....	19
Tab. 3.2: Receptury vzorků cementových past .....	20
Tab. 3.3: Porovnání vlivu LP a RP na počáteční jas .....	24
Tab. 3.4: Porovnání vlivu LP a RP na počáteční jas .....	25
Tab. 4.1: Hodnoty jasů [ $\text{mcd}/\text{m}^2$ ] některých druhů kameniva .....	39
Tab. 4.2: Receptura výroby betonu pomocí luminiscenčního kameniva .....	39
Tab. 4.3: Receptura výroby cementové pasty a malty pomocí LP, případně RP .....	42
Tab. 4.4: Hodnoty světlostí $L_{\text{Lab}}$ všech vzorků .....	45
Tab. 4.5: Hodnoty světlostí $L_{\text{Lab}}$ vzorků s luminiscenčním kamenivem .....	49
Tab. 4.6: Hodnoty světlostí $L_{\text{Lab}}$ vzorků s luminiscenční příměsí, bílý cement .....	51
Tab. 4.7: Hodnoty jasu během prvních 25 minut, vzorek K1 .....	53
Tab. 4.8: Hodnoty jasu během prvních 20 minut, vzorek B2 .....	54