



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ**

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**OPTIMALIZACE SLOŽENÍ MATRICE  
CEMENTOTŘÍSKOVÝCH DESEK PŘI VYUŽITÍ  
ALTERNATIVNÍCH SUROVINOVÝCH ZDROJŮ**

OPTIMISATION OF CEMENT-BONDED PARTICLEBOARD MATRIX COMPOSITION  
BY USING ALTERNATIVE RAW MATERIAL SOURCES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Lukáš Roháček**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. JIŘÍ BYDŽOVSKÝ, CSc.**

**BRNO 2018**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Lukáš Roháček
Název	Optimalizace složení matrice cementotřískových desek při využití alternativních surovinových zdrojů
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Rowell, R., M. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, second edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, USA, 2012.

Evans, P., D. Wood-cement composites in the Asia-Pacific Region: proceedings of a workshop held at Rydges Hotel. Canberra, Australia, 2000.

Fares, G. Al-Zaid, R. Z., Fauzi, A., Alhozaimy, A. M., Al-Negheimish, A. I., Khan, M. I. Performance of optimized electric arc furnace dust-based cementitious matrix compared to conventional supplementary cementitious materials, Construction and Building Materials, Volume 112, 1 June 2016.

Parveen, S., Rana, S., Fanguero, R., Paiva, M. C., A novel approach of developing micro crystalline cellulose reinforced cementitious composites with enhanced microstructure and mechanical performance, Cement and Concrete Composites, Volume 78, April 2017.

Aprianti, E., Shafiqh, P., Bahri, S., Farahani, J. N. Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review, Construction and Building Materials, Volume 74, 15 January 2015.

Pereira, C. L., Savastano Jr., H., Payá, J., Santos, S.F., Borrachero, M.V., Monzó, J., Soriano, L. Use of highly reactive rice husk ash in the production of cement matrix reinforced with green coconut fiber, Industrial Crops and Products, Volume 49, August 2013.

Relevantní technické normy

[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Neustálá snaha o užitkování, co největšího množství surovin z alternativních zdrojů má za cíl zlepšit současný stav životního prostředí, jakož i snížit cenu finálního produktu. Diplomová práce se bude zabývat modifikací složení matrice cementotřískových desek s využitím aktuálně produkovaných alternativních surovin. V úvahu připadají nejruznější vedlejší produkty – teplárenská škvára, vysokoteplotní popílek, vysokopepnicí struska, příp. jiné suroviny jako mikromletý vápenec, atd. Zajímavou možností je i vedlejší produkt vznikající při formátování cementotřískových desek – odřezky a prach (obsahující cementovou matici a třísky).

Pro dosažení záměru práce bude nejprve realizován na průzkum teoretických poznatků, týkajících se modifikace složení cementové matrice a kompozitů s organickými plnivými. Toto bude nezbytné pro následující krok, ve kterém budou experimentálně ověřeny vybrané složky, jež se mohou aktivně podílet při hydratačních reakcích a tím přispět ke zlepšení stávajících parametrů cementotřískových desek. Alternativní surovinové zdroje budou vybrány na základě aktuální situace v ČR včetně uvážení výsledků prezentovaných v zahraničních odborných publikacích. Pozornost bude při testování orientována na testování modifikované matrice separátně (i v dlouhodobějším časovém horizontu) a po její případné optimalizaci bude následovat ověření v cementotřískových deskách. Při experimentálním ověřování bude sledován vývoj základních parametrů - pevnost a modul pružnosti v ohybu, pevnost kolmo na rovinu desky, objemová hmotnost, atd. V závěru budou dosažené poznatky analyzovány a vyhodnoceny.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá možností zužitkování surovin z alternativních zdrojů pro výrobu cementotřískových desek. V teoretické části jsou podrobně rozebrány možnosti modifikace složení cementotřískových desek s důrazem na jejich matici. Na základě zjištěných poznatků a jejich vyhodnocení byl pro modifikaci složení vybrán odpad z formátování cementotřískových desek, mikromletý vápenec, teplárenská škvára a vysokoteplotní popílek. Zmíněné suroviny byly v rámci experimentální části práce podrobně analyzovány a následně testovány jako substituenty matrice cementotřískových desek. Vlastnosti navržených hmot byly testovány i v dlouhodobějším časovém horizontu, a to včetně mikrostruktury.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Alternativní suroviny, kompozit, cementotřískové desky, substituční složky, škvára, odpad, vápenec, vysokoteplotní popílek, fyzikálně-mechanické a chemické vlastnosti, mikrostruktura

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with possibility of utilization raw materials from alternative sources for production of cement-bonded particleboards. In theoretical part the possibilities of modifying composition of cement-bonded slabs with emphasis on their matrix are discussed in detail. On basis of the findings and their evaluation, waste from the formatting of cement-bonded particleboards, micronized limestone, heat sink and high temperature fly ash were selected to the composition modification. The mentioned raw materials were analyzed and subsequently tested as substitutes for the matrix of cement-bonded particleboards in the experimental part. The properties of the proposed materials were tested even in the longer term, including the microstructure.

## **KEYWORDS**

Alternative raw materials, composite, cement-bonded particleboards, substitution components, heating-plant slag, waste, limestone, high-temperature fly ash, physical and mechanical and chemical properties, microstructure

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Lukáš Roháček *Optimalizace složení matrice cementotřískových desek při využití alternativních surovinových zdrojů*. Brno, 2017. 116 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2018

---

Bc. Lukáš Roháček  
autor práce

**Poděkování:**

V první řadě děkuji svému vedoucímu práce Doc. Ing. Jiřímu Bydžovskému, CSc. a jeho konzultantovi Ing. Tomášovi Melicharovi, Ph.D., za odbornou pomoc při vypracování práce. Dále děkuji všem pracovníkům ústavu technologie, stavebních hmot a dílců FAST VUT, a to zejména Vladimíru Klímovi a Ing. Jakubu Hodulovi za pomoc při zkoušení zkušebních těles. Velké díky patří i Bc. Monice Panenkové za pomoc v průběhu experimentální části. Touto formou bych rád poděkoval i mé rodině za podporu při studiu vysoké školy.

# OBSAH

1	Úvod.....	11
2	Cíl práce .....	12
3	Teoretická část.....	13
3.1	Cementotřískové desky .....	13
3.2	Výroba cementotřískových desek.....	14
3.3	Suroviny pro výrobu cementotřískových desek.....	16
3.3.1	Voda.....	17
3.3.2	Přísady .....	17
3.3.2.1	Vodní sklo .....	17
3.3.2.2	Síran hlinitý .....	18
3.3.3	Plnivo.....	18
3.3.3.1	Dřevo .....	19
3.3.3.2	Technické konopí .....	20
3.3.3.3	Len.....	21
3.3.3.4	Sláma.....	21
3.3.3.5	Sklolaminátový recyklát.....	22
3.3.3.6	Lehčené kamenivo - keramzit .....	22
3.3.3.7	Odpad z výroby kamenné vlny.....	23
3.3.4	Pojivo.....	24
3.3.4.1	Cement .....	24
3.4	Potenciálně vhodné modifikační složky matrice .....	25
3.4.1	Dělení příměsí.....	25
3.4.2	Mikromletý vápenec .....	26
3.4.3	Struska .....	27
3.4.4	Teplárenská škvára .....	29
3.4.5	Odpad z formátování cementotřískových desek.....	30
3.4.6	Křemičité úlety - Mikrosilika .....	30
3.4.7	Popílek – elektrárenský vysokoteplotní.....	32
3.4.8	Metakaolin.....	35
3.5	Možnosti modifikace složení nebo podmínek zrání desek .....	36
3.5.1	Působení CO <sub>2</sub> .....	36
3.5.2	Zrání a degradační procesy cementotřískových desek ošetřením tekutým CO <sub>2</sub> .....	37
3.5.3	Vliv obsahu CaSO <sub>4</sub> a cukrů na vlastnosti cementu .....	38
3.5.4	Úprava složení desek pomocí biologických organismů .....	39



3.6	Shrnutí poznatků teoretické části .....	40
4	Experimentální část .....	42
4.1	Schéma průběhu experimentální části .....	44
4.2	Analýza a úprava vlastností vstupních surovin.....	45
4.2.1	Stanovení měrného povrchu .....	45
4.2.2	Stanovení Měrné hmotnosti příměsí.....	45
4.2.3	Složení příměsí .....	46
4.2.3.1	Vápenec .....	46
4.2.3.2	Škvára.....	47
4.2.3.3	Popílek.....	48
4.2.4	Odpad z výroby CETRIS desek.....	49
4.2.4.1	Sítový rozbor .....	50
4.2.4.2	Spalné teplo .....	52
4.2.4.3	Ztráta žíháním .....	55
4.2.4.4	Rentgenová difrakční analýza .....	58
4.2.4.5	Diferenční termická analýza (DTA).....	60
4.3	Vliv příměsí na vlastnosti cementové malty .....	64
4.3.1	Návrh receptur .....	64
4.3.2	Průběh míchání a zrání .....	65
4.3.3	Prováděné zkoušky .....	66
4.3.3.1	Objemová hmotnost .....	66
4.3.3.2	Pevnost v tahu za ohybu.....	68
4.3.3.3	Pevnost v tlaku .....	71
4.3.3.4	Difrenční termická analýza .....	73
4.4	Vliv příměsí na vlastnosti cementotřískové desky.....	74
4.4.1	Návrh receptury .....	75
4.4.2	Příprava desek.....	76
4.4.3	Uložení a tepelné ošetřování desek .....	78
4.4.4	Objemová hmotnost.....	79
4.4.5	Pevnost v ohybu.....	82
4.4.6	Modul pružnosti v ohybu.....	85
4.4.7	Pevnost v tahu kolmo na rovinu desky (rozlupčivost) .....	88
4.4.8	Mrazuvzdornost desek.....	91
4.4.9	Analýza mikrostruktury desek - SEM .....	94
4.5	Ověření vybraných receptur na výrobní lince spol. CIDEM Hranice, a.s. ....	101

4.5.1	Receptury.....	102
4.5.2	Objemová hmotnost.....	102
4.5.3	Pevnost v ohybu a mrazuvzdornost.....	103
4.5.4	Modul pružnosti.....	105
5	Závěr.....	107
6	Seznam použitých zdrojů .....	110
7	Seznam Použitých zkratk .....	115

# 1 ÚVOD

Jedním ze záměrů každého průmyslu je co nejlepší efektivita výroby a produkce cementotřískových desek není výjimkou. Snaha vyrobit produkt požadovaných vlastností za optimální cenu je patrná v každém odvětví. Optimalizovat výrobek tak, aby měl potřebné vlastnosti a zároveň bylo možné ho vyrobit za cenu, s kterou je možné konkurovat na trhu, je dlouhodobý a poměrně náročný proces.

Využití alternativních surovin jako složek stávajících či při vývoji nových receptur hmot je jedním ze způsobů, jak lze optimalizovat výrobu stavebních materiálů. Často jsou jako alternativy primárních surovin využívány vhodně upravené odpady, druhotné suroviny, vedlejší energetické produkty atd. Hlavním důvodem využívání alternativních surovin je jejich cena, která bývá výrazně nižší než cena aktuálně používaných surovin. V některých případech je možné při kombinaci s alternativními surovinami dosáhnout lepších vlastností daného materiálu než pouze při využití primárních surovin. Z ekologického hlediska je recyklace odpadů a jejich následné využívání v upravené formě zásadní, protože stavební průmysl jich vytváří velké množství, a to až 40 % z celkové světové zátěže. Důležitý je fakt, že stavební průmysl využívá i vedlejší produkty z jiných průmyslových odvětví, jako je např. hutnictví. Pro využití dané alternativní suroviny je výhodné, když je produkována v dostatečném množství a s konstantními vlastnostmi, pro zachování vždy stejných vlastností finálního produktu. Tím, že se některé alternativní suroviny, které by jinak v případě jejich nezužitkování představovaly odpady (jež by bylo pravděpodobně nutné skládkovat) využijí se do výroby, se šetří životní prostředí a zároveň redukuje vznik skleníkových plynů. Výhody využití alternativních surovin, které by jinak představovaly odpad, spočívají mimo jiné také v úsporách nákladů daného producenta právě na skládkování tohoto nežádoucího rezidua.

Tímto nežádoucím reziduem je v případě cementotřískových desek odpad, který vzniká při jejich formátování a výrobě. V současné době dochází při opětovné výrobě desek k využití tohoto odpadu v minimálním množství, které se pohybuje v řádu několika procent a tím pádem je většinová část likvidována na skládkách. Větší přídavek tohoto odpadu do cementotřískových desek, negativně ovlivňuje jejich konečné vlastnosti. Je proto snaha o optimalizaci surovinové směsi i jinými alternativními surovinami, kterých je vzhledem ke složení desek velké množství. Tyto suroviny mohou pak částečně nahradit plnivo či pojivo, kterým jsou cementotřískové desky tvořeny.

## 2 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce byla modifikace složení matrice cementotřískových desek tak, aby byly využity aktuálně produkované suroviny z alternativních zdrojů. S ohledem na řešení práce jsou cíle koncipovány do dvou základních celků.

V rámci dílčího cíle první, teoreticky zaměřené části, byl důraz kladen na průzkum relevantních poznatků, které vytvoří ucelenou část, jež na teoretické úrovni analyzuje potenciálně vhodné alternativní suroviny, jimiž by mohlo být složení cementotřískových desek efektivně optimalizováno. S ohledem na výrobu samotných cementotřískových desek bylo třeba se zaměřit mimo jiné na shrnutí aktuálních poznatků souvisejících s technologickými postupy při výrobě cementotřískových desek, jakož i řešerši vybraných výstupů zahraničních výzkumů zabývajících se modifikací složení desek, příp. úpravou jejich výrobního postupu.

V experimentální části bylo cílem, dle poznatků o potenciálně vhodných alternativních surovinách získaných v teoretické části práce, navrhnout a ověřit receptury s co nejvyšším obsahem těchto netradičních složek a vyhodnotit jejich vliv na cementovou maltu a po optimalizaci receptur i na samotnou cementotřískovou desku. Z hlediska spolupůsobení ne běžně využívaných surovin bylo třeba se mimo jiné zabývat způsobem jejich předúpravy a také analyzováním podstatných parametrů. S ohledem na účinnou optimalizaci receptur bylo třeba se zaměřit na kombinaci různých metod a jejich vhodné kombinace. Záměrem bylo tedy jak posouzení vlivu modifikovaného složení desek na základní parametry – pevnost a modul pružnosti v ohybu, pevnost kolmo na rovinu desky a objemovou hmotnost desky (i v dlouhodobějším časovém horizontu), tak zkoumání souvislostí mikrostrukturních. Pozornost byla zaměřena také na uplatnění získaných poznatků v návaznosti na reálnou výrobu desek v provozních podmínkách, kdy záměrem bylo nejúspěšnější receptury ověřit přímo na výrobní lince a posoudit vlastnosti takto zhotovených desek.

## 3 TEORETICKÁ ČÁST

V této části práce jsou shrnuté základní informace o cementotřískových deskách, a to technologický postup při jejich výrobě, jednotlivé suroviny tvořící desku, alternativní suroviny, zejména ty, které se jeví jako potenciálně vhodné pro nahrazení části pojiva či plniva v desce, a některé zahraniční výzkumy týkající se výroby desek.

### 3.1 Cementotřískové desky

Cementotřískové desky patří mezi kompozitní materiály, které jsou tvořeny složkami s rozdílnými vlastnostmi. Změnou poměru jednotlivých fází dojde ke změně výsledných vlastností desek. Každá fáze ovlivňuje konečné vlastnosti kompozitu jednak svými vlastními vlastnostmi a dále zejména vzájemnou interakcí fází. Tato interakce jednotlivých fází přináší nové kvality, které není možné dosáhnout žádnou složkou samostatně a nazývá se synergický účinek. Tímto účinkem se potlačí negativní vlastnosti jednotlivých složek a zdůrazní se ty výhodné. Výsledné vlastnosti desek závisí samozřejmě i na technologii výroby.

Dle normy ČSN EN 633 je cementotřísková deska definována jako deska vyrobená lisováním z částic na bázi dřeva nebo jiných rostlinných částic pojených hydraulickým cementem a možnými přísadami. Norma rozděluje desky dle typu pojiva, a to na desky pojené běžným portlandským cementem a desky pojené cementy na bázi hořčíku (např. magnezit). Úpravou povrchu se desky dělí na surové, broušené, povrchově upravené (kapalinou, práškem, opláštěváním). Dělí se i na barevné, nebarevné a podle tvaru na desky na desku s rovným povrchem a pravoúhlými boky, desku s profilovaným povrchem a desku s profilovanými boky.

Tyto desky jsou určeny jak pro použití v interiéru, tak i exteriéru. Jelikož jsou třísky mineralizovány a matrice má anorganickou strukturu, tak jsou odolné proti požáru, mrazu, hmyzu i plísním. V dnešní době bývají desky často opatřeny sekundární povrchovou ochranou, která cílí na zlepšení některé ze zmíněných vlastností. Desky se používají pro podlahové systémy, půdní vestavby, střešní nadstavby, odvětrané fasády, akustické obklady, protipožární aplikace, podhledy, stěny a příčky. Uplatnění nachází v různých montovaných stavbách, jsou ideální pro technologie suché výstavby, stavby v náročných klimatických podmínkách a v dalších prostředích kde mohou uplatnit svoje jedinečné vlastnosti. [1][2][23]

Tab. č. 1: Základní požadavky na vlastnosti cementotřískových desek dle normy ČSN EN 634 – 2 [6]

Vlastnost	Metoda zkoušení	Jednotka	Požadavky (všechny tloušťky)
Hustota	EN 323	kg.m <sup>-3</sup>	≥ 1000
Pevnost v ohybu	EN 310	N.mm <sup>-2</sup>	≥ 9
Modul pružnosti v ohybu	EN 310	N.mm <sup>-2</sup>	Třída 1 ≥ 4500
			Třída 2 ≥ 4000
Rozlupčivost	EN 319	N.mm <sup>-2</sup>	≥ 0,5
Bobtnání po 24 h	EN 317	%	≤ 1,5
Rozlupčivost po cyklování	EN 319 a EN 321	N.mm <sup>-2</sup>	≥ 0,3
Bobtnání po cyklování	EN 317 a EN 321	%	≤ 1,5



Obr. č. 1: Stohované cementotřískové desky [44]

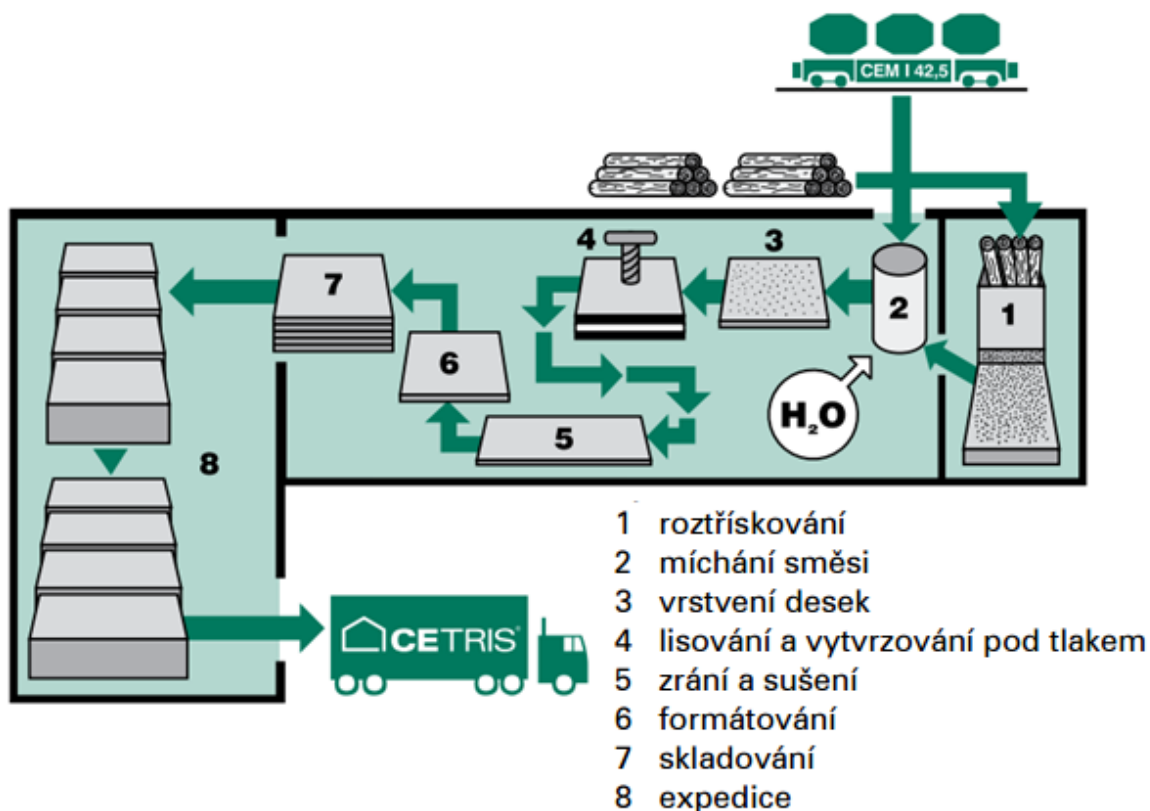
## 3.2 Výroba cementotřískových desek

Jediným tuzemským výrobcem cementotřískových desek je spol. CIDEM Hranice, a.s. Jelikož byla diplomová práce tvořena ve spolupráci s firmou CIDEM Hranice, a.s., tak je v této kapitole popsán jejich výrobní postup. Desky CETRIS jsou vyráběny na technologické lince od firmy BISON, která prošla v roce 2010 celkovou rekonstrukcí a výrobní kapacita vzrostla na 55 000 m<sup>3</sup>. Desky jsou vyráběny dle ČSN EN 633, 634-1 a 634-2.

Po tří až čtyř měsíčním skladování odkůrované smrkové a jedlové dřevní hmoty se hmota roztřískuje na jehlicovité třísky a dopraví do skladovacích sil o objemu cca 200 m<sup>3</sup>. V silech se dřevo přehřívá odpadním teplem z kotle na biomasu. V zimních měsících slouží

také k rozmrazení dřeva. V dřevní hmotě jsou obsažené látky (polysacharidy, lignin, třísloviny), které mohou výrazně zpomalovat tuhnutí a tvrdnutí cementu a snižovat jeho pevnost, a proto je nutné je mineralizovat. Mineralizací se rozumí navázání vápenatých nebo hořečnatých iontů do struktury dřevní hmoty. Pro mineralizaci se používají anorganické soli jako je např. roztok vodního skla, chlorid vápenatý či hořečnatý, síran hlinitý a další. Tyto látky částečně působí i jako urychlovače tuhnutí, snižují nasákavost a zvyšují odolnost desek proti ohni, škůdcům a plísním, dále nasatí buněčné stěny plniva a vykrystalizují v pórech a na povrchu.

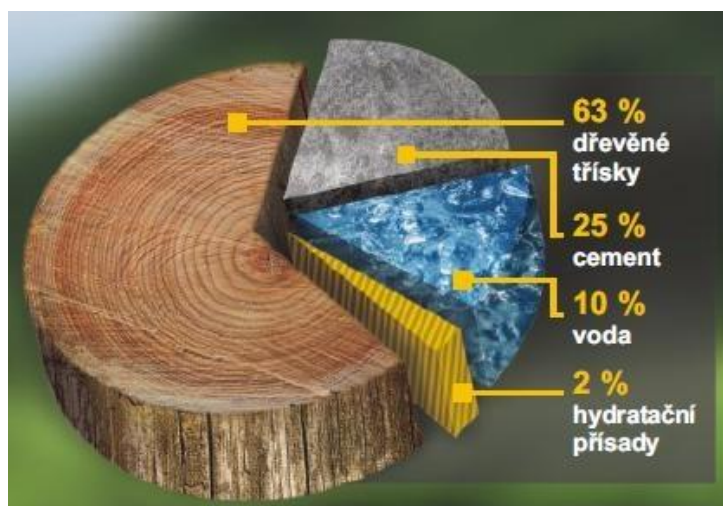
Třísky se následně dopravují do míchacího zařízení přes váhy, společně s portlandským cementem, mineralizačními látkami a vodou jejíž množství se koriguje dle vlhkosti dřeva. Na rovné a předem ošetřené ocelové plechy se rozprostře namíchaný materiál. Zařízení pracuje se čtyřmi oddělenými vrstvicími stroji umístěnými za sebou. V první a čtvrté komoře se pomocí větrného třídění vytváří krycí vrstva desek. Ve druhé a třetí komoře dochází k mechanickému nanášení středové provázané vrstvy. Plechy s rounem se stohují na sebe a lisují vysokým tlakem (2 až 3 MPa) na jmenovitou tloušťku což je zhruba 1/3 z tloušťky sypané. Výrobní tloušťka je 8 až 40 mm s intervalem po dvou milimetrech. Po slisování se kovové podložky se slisovaným materiálem přesunou do vytvrzovací komory a tam desky vytvrdnou na dostatečnou manipulační pevnost. Manipulační pevnost by měla být přibližně 60 % z konečných pevností. Následuje oddělení desek od ocelových podložek (odstohování) a převezení do klimatizačního skladu, kde desky dozrávají sedm dní. Desky se stohují na palety s plným dnem a překryjí se fólií, což zaručí totožné vyzrávání pro všechny desky. Poté jsou desky převezeny do sušárny na sušárenských vozech a pohybují se komorou po kolejkách. Mezi deskami je zhruba 15 cm mezery kvůli proudění vzduchu a vlhkost po sušení je zhruba 9 %. Desky se naformátují na základní rozměr (1250 x 3350 mm) a dále se upravují podle potřeb zákazníka. Desky se upravují např. řezáním na menší rozměry, broušením, frézováním nebo fázováním hran, vrtáním, penetrací, natíráním atd. V průběhu výroby se provádí několik vstupních, mezioperačních a výstupních kontrol. Skladování probíhá v suchých prostorech, aby se zabránilo navlhání desek. Posledním krokem je expedice, pro kterou se desky skládají na dřevěné podložky a balí do polyetylenové fólie. [1] [24] [25]



Obr. č. 2: Zjednodušené schéma výrobního postupu [53]

### 3.3 Suroviny pro výrobu cementotřískových desek

Cementotřískové desky jsou tvořeny převážně dřevem, cementem a vodou. Pro urychlení tuhnutí a mineralizaci dřeva se ještě přidávají hydratační přísady v malém množství. Z Obr. č. 2 je zřejmé, že desky jsou tvořené převážně ze dřevěných třísek, dále ze čtvrtiny cementem z 10 % vodou a pár procent přísad. Zastoupení složek je uvedeno objemově.



Obr. č. 3: Grafické znázornění složení cementotřískových desek (objemově) [45]



### 3.3.1 VODA

Voda se obecně využívá z vodovodního řádu. Voda je vhodná, pokud vyhoví ČSN EN 1008. V čerstvém cementovém kompozitu se podílí na hydratačních procesech a ovlivňuje jeho zpracovatelnost. Hydratace je chemická reakce startující po zamíchání vody s cementem. V jejím důsledku dochází po několika desítkách minut k tuhnutí a tvrdnutí cementového kompozitu. V cementotřískových deskách zastupuje přibližně 10 objemových procent z celkového objemu složek. [3]

### 3.3.2 PŘÍŠADY

Příšady jsou látky, které se přidávají do směsi za účelem zlepšení některých vlastností. Bývají převážně v tekuté formě a přidávají se v jednotkách procent. Je nutné dbát na kompatibilitu příšady s jednotlivými složkami ve směsi, a i v případě použití více příšad, na jejich vzájemnou kompatibilitu.

#### 3.3.2.1 VODNÍ SKLO

Jedná se o tuhou taveninu alkalických křemičitanů nebo o vodný roztok těchto tavenin např. křemičitanu sodného. Vyrábí se buď ze sklářského písku tavením ve sklářské vanové peci při teplotě 1400 – 1600 °C za přídavku alkalických tavidel, a nebo v autoklávu, ale tím lze vyrábět jen určité typy vodních skel sodných. Vodní skla charakterizujeme zejména křemičitým modulem  $M$ , který vyjadřuje molární poměr  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$  a bývá zpravidla v rozmezí 1,6 – 4,1.

Vodní sklo se ve stavebním průmyslu používá převážně pro urychlení tuhnutí cementových směsí a pro mineralizaci organických plniv, což zvyšuje požární ochranu. Jedná se o pojivo nehydraulické, takže by nemělo trvale přicházet do kontaktu s vodou, ale je však odolné vůči žáru, kyselinám a dosahuje vysokých pevností.

Do cementotřískových desek se přidává (v jednotkách procent) jako mineralizační příšada, která tvrdne reakcí se vzdušným  $\text{CO}_2$  nebo kyselinou křemičitou a tvoří gel kyseliny křemičité. Produkty reakce vodního skla obalí povrch organických materiálů a vyplní i jeho póry. Tím se sníží jeho hygroskopicitu alepší se tak celkové vlastnosti kompozitu. [1] [25] [26]

### 3.3.2.2 SÍRAN HLINITÝ

Jedná se o anorganickou sloučeninu, hlinitou sůl kyselin. Je k dostání buď v podobě hexadekahydrátu  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$  anebo oktadekahydrátu  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ .

Do cementotřískových desek se přidává pro urychlení nárůstu počátečních pevností hydratujícího cementu a pro mineralizaci třísek, popř. jiného organického plniva. Zvětšuje hydratační smrštění, mírně snižuje konečné pevnosti a působí i jako hydrofobizační prostředek. Reaguje v deskách i s vodním sklem, s kterým tvoří těžce rozpustné tepelně stabilní silikahydráty. [1] [25]

### 3.3.3 PLNIVO

Plniva jsou organické či anorganické látky, které v kompozitech plní současně víc funkcí. Hlavním údělem plniv je vyplňovat požadovaný stavební materiál a ovlivňovat některé jeho charakteristiky. V případě organických plniv je to nejčastěji funkce vylehčovací. Jsou velice pórovité a mají nízkou měrnou hmotnost. Dalším důvodem pro použití organických plniv je jejich snadná obnovitelnost.

Cementotřískové desky jsou vyplňovány organickými plnivými, a to zejména dřevem. Dřevo je materiál, který má nespočet jiných uplatnění, a proto je snaha o nahrazení dřeva jinou surovinou, která tato uplatnění nemá. Suroviny, kterými by mohlo být možné nahradit dřevěné třísky a již byly posouzeny ve fázi výzkumu [41][42][43], jsou např. rychle obnovitelné plodiny jako je technické konopí, len nebo odpad ze zemědělské výroby (obilná sláma, kokosová vlákna). Desky mohou být vyplňovány i anorganickými plnivými, a to např. jako částečná náhrada za dřevěné třísky nebo jako inertní příměs. Je snaha o využití odpadů, které vznikají v různých průmyslových odvětvích, např. sklolaminátový recyklát, textilní vlákna nebo odpad z výroby kamenné vlny. Dalším anorganickým plnivem, kterým by bylo možné vyplňovat cementotřískové desky, jsou různá lehčená kameniva.

Dřevěné třísky, které se používají jako plnivo do cementotřískových desek, obsahují celulózy, hemicelulózy a další vodou vyluhovatelné sloučeniny, např. terpeny, taniny, sacharidy a anorganické minerály. Je to velká nevýhoda těchto plniv, protože zmíněné látky negativně ovlivňují (zpomalují, až zastavují) hydratační procesy cementu, a to již v malých koncentracích. Hydratující zrna cementu se pokryjí filmem, který zabrání průniku vody k cementu, čímž dojde ke zpomalení tuhnutí a tvrdnutí cementového kompozitu. Hlavní problémová složka je celulóza, která je složená z 1000 až 3000 molekul glukózy. Cement při smíchání s vodou tvoří velice zásaditý roztok, což až desetkrát zvyšuje množství

vyluhovaných látek z organických plniv, a hlavně i rozpustnost právě hemicelulózy. Tomuto ději se snaží producenti cementotřískových desek zabránit, a to už při výběru samotných surovin, kdy je nutné vybrat ty, které obsahují nejméně vyluhovatelných látek. Smrk je nejčastěji využívanou dřevinou pro výrobu desek, protože je u nás hojně zastoupený a obsahuje i méně vyluhovatelných látek. Tyto látky můžeme redukovat tak, že se dřevěné třísky dají vystavit povětrnostním podmínkám, vyvařit ve vodě, máčet ve studené vodě, krátkodobě zahřát až na teplotu 300 °C nebo nechat v tenké vrstvě ve slunném prostředí. V praxi se dále používá technologie prohřívání dřevěných třísek mikrovlnným zářením, která zaručí kontinuální výrobu desek. Nevýhoda této technologie je v její vysoké ceně a v obtížné korekci výkonu, aby nedošlo k zapalování třísek, ale jenom k jejich prohřevu.

Nasákavost a hygroskopicitu je další negativní vlastností organických plniv. Pro omezení těchto vlastností se tyto plniva mineralizují. Je to proces, který také z velké části zamezuje vyluhování látek z plniva. Charakteristické vlastnosti organických výplní se samozřejmě projeví i na vyrobených prvcích, a to i přesto, že prošly mineralizací. Prvky mají vyšší objemové změny, které závisí na změnách vlhkosti. Pozitivní vlastností organických plniv je snížení křehkosti, vylepšení poměru pevnosti v tahu ku pevnosti v tlaku, zlepšení tepelně izolačních schopností, snížení dynamické tuhosti atd. [1][3]

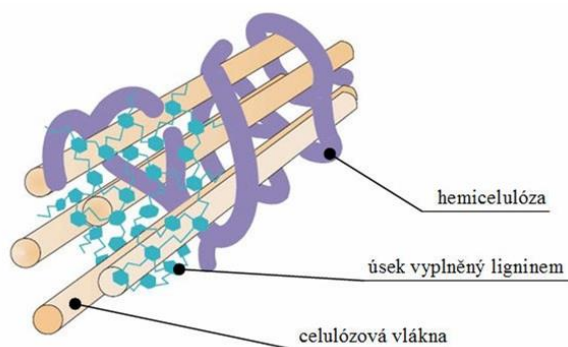
### 3.3.3.1 DŘEVO

Jedná se technický výraz pro sekundární xylém stonků a kořenů rostlin, který se tvoří více let a skládá se z celulózy, hemicelulózy a ligninu. Proto jsou tyto rostliny označovány jako dřeviny. Dřevo je vytvářeno dělivým pletivem (kambiem), které v našich podmínkách pracuje periodicky, a tím pádem lze v dřevu na jeho příčném řezu pozorovat letokruhy. Letokruhy jsou tvořeny rozdílným přírůstkem dřeva v průběhu ročních období. Mladší letokruhy slouží k aktivnímu vedení vody a jejich činnost časem nahradí letokruhy nové a ty starší se zabarví tmavšími látkami, které se v nich ukládají. Takto můžeme odlišit tmavé jádro a světlejší běl (dřeva jádrová), ale v případě, že je odlišit nelze, tak je nazýváme dřeva bělová.

Dřevo představuje pevný, pružný a zároveň lehký materiál s dobrými tepelně – izolačními vlastnostmi, tlumí vibrace, lehce se opracovává, spojuje, přenáší a je odolný vůči některým chemikáliím. K výrobě cementotřískových desek se používá nejčastěji smrk, a to proto, že obsahuje relativně málo látek ovlivňujících hydrataci cementu a zastupuje u nás 51,4 % lesů. Smrk se také snadno odkůruje, protože má přímý kmen a jedná se o mírně smolnaté a měkké dřevo. Částečně se používá i jedlové dřevo, které má podobné vlastnosti jako smrkové.

Průměrně dřevo obsahuje:

- 45 % celulózy
- 25 % hemicelulózy
- 25 % ligninu
- 5 % vedlejších složek (terpeny, tuky, vosky, pektiny, třísloviny (pouze u listnáčů), steroly, pryskyřice)



Obr. č. 4: Struktura dřeva [46]

[1] [8] [9]



Obr. č. 5: Dřevní štěpky pro výrobu cementotřískových desek [47]

### 3.3.3.2 TECHNICKÉ KONOPÍ

Technické konopí je pár desítek let stará odnož konopí setého. Pro průmysl se vyznačuje příznivými růstovými vlastnostmi, a to svým štíhlým nevětveným stonkem a rychlou obnovitelností. Má jednoletý vegetační cyklus a její vnitřní kůra rychle dřevnatí, což

vede k následné dobré soudržnosti s cementovým tmelem. Výroba tohoto plniva je méně ekonomicky náročná a nevzniká při ní žádný odpad, protože se zpracovává celá rostlina. Aby bylo možné přejít ze dřevěných třísek na tuto surovinu bylo by nutné rozšířit pěstování konopí. Technické konopí musí pro pěstování obsahovat minimum psychoaktivní látky THC (tetrahydrokanabinolů), tj. 0,3 %. [1] [10]



Obr. č. 6: Využití konopného pazdeří a vlákna [48]

### 3.3.3.3 LEN

Lněné pazdeří je odpad při výrobě lnu v tírnách a také by se dalo také využít jako plnivo do cementotřískových desek, a to díky své troj až čtyř násobně menší nasákavosti, větší objemové stálosti a lepší odolnosti proti povětrnostním vlivům. Lněné stonky jsou podobné stonkům konopným a jejich hrubost zajišťuje dobrou soudržnost s cementovým tmelem. Slouží stejně jako konopné pazdeří hlavně pro výrobu izolací. [11]

### 3.3.3.4 SLÁMA

Jako plnivo pro cementotřískové desky by se dala použít i obilná sláma, a to hlavně díky snadné dostupnosti, ale nejprve by se její povrch musel upravit. Hladká vlákna jsou pokrytá vrstvou vosku a oxidu křemičitého, který je nutné chemicky odstranit a tím zdrsnit její povrch pro získání lepší soudržnosti výsledného kompozitu. Hlavní použití slámy je pro výrobu izolačních materiálů. [1]

### 3.3.3.5 SKLOLAMINÁTOVÝ RECYKLÁT

Recyklovaná vlákna ze sklolaminátu zbavená polymerní matrice je možné přidávat do cementotřískových desek i v menších dávkách díky jejich dobrým mechanickým vlastnostem. Důležité je, aby byla vlákna alkalivzdorná, protože jinak by se v zásaditém prostředí poškodila. K dispozici jsou vlákna drcená, krátká a dlouhá, jejichž délka se pohybuje v řádech centimetrů. [1]



*Obr. č. 7: Sklolaminátová vlákna [1]*

### 3.3.3.6 LEHČENÉ KAMENIVO - KERAMZIT

Keramzit je cíleně vyráběný produkt vyráběný z expandovaných jílu a břidlic v rotačních pecích při teplotě 1100 - 1200 °C s obchodním označením Liapor. Podle současných výzkumů je Liapor možné použít do cementotřískových desek pro zlepšení třídy reakce na oheň – A1. To zaručí i zvýšenou odolnost u konstrukcí, které jsou opláštěné těmito deskami. Liapor je objemově stálejší než dřevěné třísky, a tím zajistí deskám minimální smrštění a roztažnost vlivem změny vlhkosti. [13]





*Obr. č. 8: Lehčené kamenivo – Liapor [49]*

### 3.3.3.7 ODPAD Z VÝROBY KAMENNÉ VLNY

Odpad, který vzniká při výrobě kamenné vlny je složen z chomáčů minerální vaty, které mají různé velikosti a tvary a dále z minerálního písku obsahujícím zrna čedičového skla o různých velikostech. Tento odpad je nutné nejdříve upravit, aby byly odstraněny nežádoucí složky od minerální vaty a pak je možné ho do cementotřískových desek použít jako částečnou náhradu za dřevěné třísky. [12]



*Obr. č. 9: Odpad z výroby kamenné vlny [12]*

Bylo popsáno několik hlavních zástupců plniv a další plniva, která se jeví jako potenciálně vhodná, při určité modifikaci jejich složení, by mohla být např. textilní vlákna, separát z pneumatik, odpad z výroby minerální vlny, pěnové sklo a prach s kousky pazdeří.

### 3.3.4 POJIVO

Jde o látky, které lze upravit do tekuté až kašovitě formy, a které následně přecházejí do tuhého stavu. Při tomto procesu obalují jednotlivá nesoudržná zrna, tzn. spojují je v kompaktní hmotu, která nejprve tuhne a následně tvrdne. Ve stavebnictví se převážně používají pojiva na anorganické fázi. Jedná se o pojiva mechanická, chemická, vzdušná, hydraulická, latentně hydraulická a pucolánová. [7]

#### 3.3.4.1 CEMENT

Cement je vyráběn pálením zpevněných či nezpevněných zemin (břidlic, hlín, jílu atd.) a vápence při teplotě zhruba 1450 °C, a to zejména v rotačních pecích. Patří mezi hydraulická pojiva, která se vyznačují schopností tuhnout a tvrdnout na vzduchu i pod vodou. Po zatvrdnutí si pod vodní hladinou zachovává svoji pevnost a objemovou stálost. Cement obsahuje slídkové minerály ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_4AF$ ,  $C_3A$ ), jejichž poměr určuje výsledné vlastnosti cementu. Dále obsahuje korekční suroviny, zpravidla síran vápenatý, který slouží jako regulátor tuhnutí. Do cementu se často přidávají různé příměsi, které ovlivňují jeho vlastnosti a cenu (směsné cementy). Cementy se dělí do základních pěti skupin dle ČSN EN 197-1. Dále se dělí podle množství příměsi, konkrétního druhu příměsi, vaznosti a rychlosti vývoje počátečních pevností (N-normal, R-rapid).

#### **Základní druhy cementu dle ČSN EN 197-1**

- CEM I - portlandský cement
- CEM II - portlandský cement směsný
- CEM III - vysokopeční cement
- CEM IV - pucolánový cement
- CEM V - směsný cement

K výrobě cementotřískových desek se využívají cementy s rychlým počátečním nárůstem pevností. To je důležité kvůli možnosti rychlého odformování a tím urychlení celého výrobního procesu. Optimální je pro desky cement CEM I 42,5 R, který začíná tuhnout přibližně po jedné hodině od zamíchání s vodou. To je doba, která vystačuje pro celý míchací a lisovací proces desek. Poté se desky lisují 6 až 8 hodin a za tuto dobu musí dosáhnout dostatečných manipulačních pevností pro odformování. [3] [39]



## 3.4 Potenciálně vhodné modifikační složky matrice

Jako potenciálně vhodné modifikační složky matrice slouží příměsi, které lze definovat jako jemný práškový materiál, který zpravidla nahrazuje určitou část cementu a přidává se do cementových kompozitů (zejména do betonu) za účelem zlepšení některých vlastností. V zatvrdlém betonu, nebo právě v cementotřískových deskách můžou příměsi pozitivně ovlivňovat například jejich pevnost v tlaku, pevnost v tahu, odolnost proti mrazu a chemicky agresivním látkám, vodonepropustnost a další. Zpravidla většina levně dostupných příměsí ale nezvyšuje pevnosti takovýchto kompozitů. V čerstvém kompozitu mohou ovlivňovat konzistenci, čerpatelnost, segregaci, odměšování atd. Hlavní důvod, proč mají společnosti, tvořící stavební materiály, snahu nahrazovat cement příměsemi je cena. Protože cena tuny cementu je zhruba 2500 Kč, jsou některé příměsi voleny jako jeho ekonomicky výhodnější náhrada. [3]

### 3.4.1 DĚLENÍ PŘÍMĚSÍ

Dle ČSN EN 206 dělíme příměsi na dva typy: inertní příměsi (typ I) a pucolány, nebo latentně hydraulické látky (typ II). Řadíme k nim barevné pigmenty, které se přidávají do betonů za účelem jejich probarvení a organické polymery, přidávané do polymercementových betonů. Příměsi se dávkuje v takovém množství, které neovlivňuje vlastnosti betonu nepříznivě nebo nezpůsobuje např. korozi výztuže nebo forem.

**Typ I - Inertní příměs** nevstupuje do hydratačních procesů a podílí se pouze na vyplnění kompozitní matrice. Stane se součástí cementového tmelu a obaluje zrna kameniva či jiná plniva. Inertní příměsi tedy ovlivňují konzistenci, vodonepropustnost, přídržnost betonu k podkladu, nebo v případě pigmentů, jeho barvu.

**Typ II - Pucolány a latentně hydraulické příměsi** se aktivně podílejí na hydratačních procesech v betonu. Hydraulická aktivita je schopnost látky tvrdnout ve vodním prostředí za normální teploty. Latentně hydraulická látka při smíchání s vodou není schopna reakce vedoucí ke tvrdnutí matrice nebo reaguje jen velmi pomalu. Když se taková látka dostane do kontaktu z tzv. budičem např. s  $\text{Ca(OH)}_2$ , začne tuhnout a nabývat pevností. Mletá vysokopecní struska je typický příklad latentně hydraulické látky, která se po smíchání s vodou a budičem hydraulicity chová jako hydraulické pojivo.

Pucolány můžeme definovat jako látky křemičité nebo hlinitokřemičité povahy. Mají malou nebo nulovou vazebnou schopnost, ale ve vodním prostředí za běžných teplot reagují

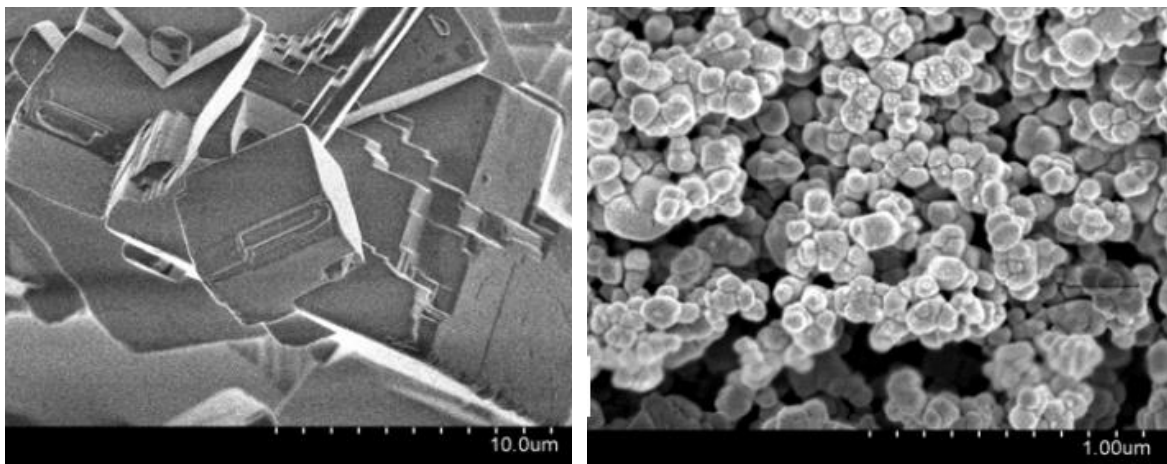
s hydroxidem vápenatým za vzniku sloučenin, jež tuhnou, tvrdnou a jsou pod vodou i na vzduchu stabilní. Amorfni oxid křemičitý, obsažený v pucolánech, při reakci s hydroxidem vápenatým vytváří hydratované křemičitany vápenaté, tzv. CSH gely. Takto vzniklé CSH, CAH a další podobné sloučeniny zvyšují odolnost vůči korozi, dobře odolávají vodě, kyselému prostředí do  $\text{pH} > 4$ , zlepšují mechanické vlastnosti a zvyšují trvanlivost cementových kompozitů. [3] [4] [5]

### 3.4.2 MIKROMLETÝ VÁPENEC

Jedná se o horninu typu chemického sedimentu. Tyto sedimenty se ukládají vysrážením ze slaných roztoků v mořích nebo na pevnině ve slaných jezerech v oblastech s aridním klimatem. Obsahuje 95 - 100 % kalcitu a může být znečištěný jíly, nerosty (grafit, limonit, hematit atd.) nebo organickými látkami. Jeho barva je v závislosti na příměsích bílá, hnědá až černá. Z pohledu chemické skladby se vápenec definuje jako minerální plnivo na bázi uhličitanu vápenatého s určitým obsahem  $\text{MgCO}_3$  a  $\text{SiO}_2$ . Vyrábí se mletím drceného vápence a výsledná jemnost výrazně ovlivňuje jeho konečné vlastnosti. Vápenec se může částečně chovat jako aktivní příměs, protože se přímo účastní hydratační reakce. V některých případech jsou však produkty těchto reakcí špatně identifikovatelné kvůli jejich semiamorfnímu charakteru, a to je právě důvod, proč je tak obtížné mikromletý vápenec jako příměs zatřídit.

Vhodnost jeho použití do směsného cementu je podmíněna křivkou zrnitosti, tvarem a nasákavostí. Nejvhodnější frakcí jsou zrna pod 0,125 mm s požadavkem, aby více než 70 % propadlo sítem o velikosti otvorů 0,063 mm. Čím menší velikost částic, tím větší je celkový měrný povrch, který je u této příměsi větší než u cementu, a to způsobí rychlejší nárůst počátečních pevností cementu z důvodu větší reaktivity příměsi. Reaktivita vápence ovlivňuje vytváření  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_3\text{S}$ , změny v C-S-H a formování tranzitní zóny mezi plnivem a cementovou pastou. V případě cementotřískových desek, které se v průběhu výroby proteplují, by tedy mohl mikromletý vápenec zvýšit počáteční pevnosti. Z dalších zdrojů, které se zabývaly vlivem mikromletého vápence na tvrdnutí betonu, vyplývá, že má tzv. urychlující a pojící efekt. Urychlující efekt: Zrna vápence tvoří zárodky, které zvětšují pravděpodobnost, že 28 dní po zamíchání betonu se částice rozpuštěné v CSH gelu srazí a poté rychleji spojí. Pojící efekt: Pokud má cement velké množství hlinitanové fáze, vzniknou hlinitokřemičitany, které mají pojivou schopnost. Vápenec zpravidla zlepšuje stupeň konzistence čerstvého betonu při stejné dávce vody, což se může projevit na vyšších pevnostech betonu. Mikromletý vápenec může v betonu, nebo v jiném cementovém

kompozitu negativně ovlivnit jeho trvanlivost, a to hlavně v agresivním prostředí. V důsledku nedostatečné sulfátové odolnosti může docházet k tvorbě thaumasitu, který je doprovázen rozkladem CSH gelů. Protože vápenec není tak reaktivní jako cement, snižuje vývin hydratačního tepla, nedochází tedy k takovému namáhání vlivem tepelné roztažnosti a snižuje se tím riziko vzniku trhlin. Obdobné změny můžeme očekávat i v případě cementotřískových desek s tím, že nejpodstatnější bude nejspíš vliv vápence na trvanlivost desek. [3] [15][16][19][20]



Obr. č. 10 a 11: Snímky z SEM mikroskopu, znázorňující mikrostrukturu (zvětšení 5000x) a nanostrukturu (zvětšení 50 000x)  $\text{CaCO}_3$  [51]

### 3.4.3 STRUSKA

Další příměs, kterou by bylo možné využít pro výrobu cementotřískových desek je latentně hydraulická struska, vznikající jako vedlejší produkt při tavení železné rudy ve vysoké peci a následným prudkým zchlazením. Je definována normou ČSN EN 15167-1 – Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Cena vysokopecní strusky je zhruba 500 - 700 Kč/t.

Struska vzniká při výrobě surového železa a jedná se o roztavenou hlušinu rudy v peci, hlavně vápence, koxu a hlinitokřemičitých zbytků po produkci železné rudy. Ve vysoké peci na sebe struska naváže všechny neželezné části rudy a v průběhu tzv. odpichu vytéká společně se surovým železem o teplotě 1450 °C. Materiály se od sebe oddělují jejich rozdílnou hustotou.

Aby bylo strusku možné využít ve stavebním průmyslu je nutné jí při výrobě ve stavu struskové taveniny rychle zchladit pod teplotu 800 °C, tím ztuhne ve fázi podobné

křemičitému sklu a vytvoří amorfní strukturu, která zajistí její latentně hydraulické vlastnosti. Největší hydraulickou aktivitu mají strusky vysokopecní, ale můžeme využít i strusky ocelářské, slévárenské či další druhy strusek, které mají potřebné vlastnosti.

Při výrobě jedné tuny surového železa vznikne cca 400 - 600 kg strusky. Pro výrobu jedné tuny strusky je třeba 1000 - 1500 MJ tepla, což je zhruba čtyřikrát méně, než kolik je nutné na výrobu jedné tuny CEM I. To výrazně snižuje energetické a finanční náklady a vede ke snížení produkce CO<sub>2</sub>, což je v dnešní době nezanedbatelné.

Struska obsahuje až čtyřicet minerálů, hlavně křemičitanů, hlinitokřemičitanů, železitanů a hlinitanů. Chemické složení strusky je dosti proměnné, protože se jedná o druhotný materiál a aby bylo možné pokaždé dosáhnout podobného výsledku, je dobré jí stále odebírat ze stejného zdroje.

Tab. č. 2: Hlavní zástupci složení vysokopecní strusky [15]

CaO	30 – 50 %	FeO + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2 – 3 %
SiO <sub>2</sub>	30 – 43 %	S (ve formě S <sup>2-</sup> )	0,5 – 3 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 – 18 %	MnO	0,2 – 2 %
MgO	1 – 15 %		

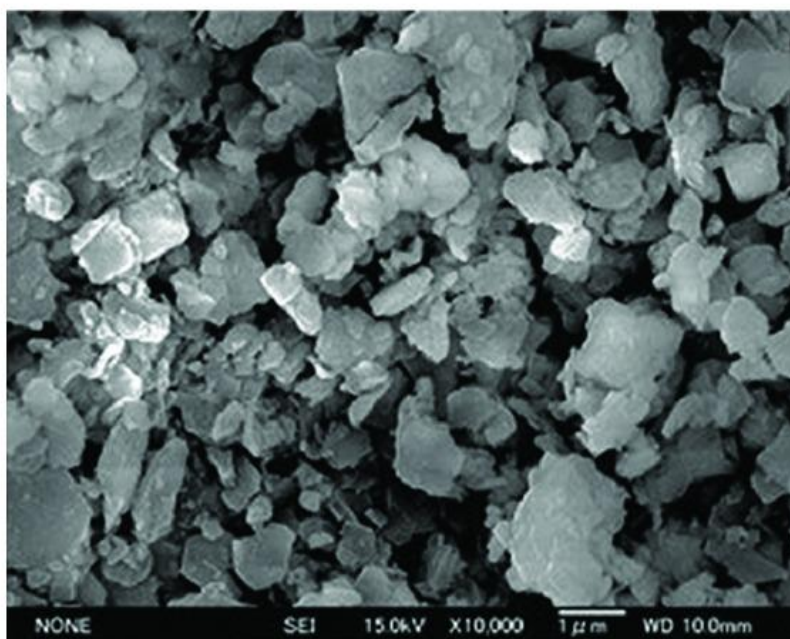
Hydraulická aktivita strusek se určuje vyjádřením zastoupení hlavních oxidů. Součet CaO + MgO + SiO<sub>2</sub> by měl tvořit minimálně dvě třetiny hmotnosti strusky a jeho hmotnostní podíl (CaO + MgO) / (SiO<sub>2</sub>) by měl být větší než 1. Zbytek je tvořen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> spolu s ostatními minimálně zastoupenými oxidy. Zda je struska vhodná do cementových kompozitů, je určováno hlavně modulem zásaditosti M<sub>z</sub> a modulem aktivity M<sub>a</sub>, které zároveň určují její reaktivitu. Modulem M<sub>z</sub> se následně určí využití strusky. V případě, že je M<sub>z</sub> menší než 1, struska není vhodná k přidání do cementu a v opačném případě vhodná je. Druhým modulem posuzování je modul aktivity, který když stoupá tak zpravidla stoupá i reaktivita strusky. Tyto moduly sice slouží hlavně pro posouzení vhodnosti strusky do betonu, ovšem v případě použití do cementotřískových desek je rovněž možné z nich vycházet, jelikož se taktéž jedná o kompozitní materiál s cementovou maticí.

$$\text{Modul zásaditosti: } M_z = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$$

$$\text{Modul aktivity: } M_a = \frac{Al_2O_3}{SiO_2}$$

Důležitým faktorem, který ovlivňuje reaktivitu strusky je její jemnost. Obecně tak platí u většiny reaktivních pojiv, že čím větší měrný povrch zrn, tím je reaktivita vyšší. Ta je ovlivněna i stářím strusky, při dlouhodobém skladování klesá. Směsné cementy obsahují obvykle 6 - 35 % strusky.

Struska pozitivně ovlivňuje mrazuvzdornost betonu, nepropustnost a tím celkovou trvanlivost betonu. Snižuje vývin hydratačního tepla, a proto se používá i pro masivnější stavby (přehrada). Negativní vlastností může být snížení počátečních pevností betonu. Měrný povrch vysokopecní strusky je nejčastěji 310 - 340 m<sup>2</sup>/kg. [3] [15] [21] [22]



*Obr. č. 12: Mikrostruktura vysokopecní strusky [52]*

### 3.4.4 TEPLÁRENSKÁ ŠKVÁRA

Teplárenská škvára neboli struska je slinutý porézní materiál skelného charakteru o hranatých zrnech obdobné velikosti. Vzniká při spalování hnědého uhlí nebo lignitu v tepelných elektrárnách a má tendenci k větší porozitě než je tomu při spalování uhlí černého. Používá se tam, kde je nedostatek přírodního kameniva nebo je přírodní kamenivo v dané lokalitě příliš nákladné anebo je v lokalitě mnoho odpadní strusky, která by se mohla využít. Pro tuto práci je škvára jako plnivo spíše nepoužitelná a aby mohla působit jako příměs do cementotřískových desek, je třeba ji pomlít na určitou jemnost (např. 350 – 500 m<sup>2</sup>/kg), aby mohla plnit i funkci pojiva.

Abychom si mohli představit kolik škváry se ve světě vyprodukuje můžeme se podívat např. do Anglie kde se každoročně 11 elektráren vyprodukovalo cca. 8 % z celkového

množství 27,6 mil/t tuhého odpadu. To je 0,642 mil/t strusky z které 79 % putovalo na skládku a zbytek do násypů pro hráze nebo jako kamenivo do asfaltových kompozitů. Struska může v určitém množství obsahovat škodlivé látky, jako rozpustné sírany, pyrit, které z ní lze určitým způsobem odstranit. [32]



Obr. č. 13: Teplárenská škvára o různé velikosti zrn [32]

### 3.4.5 ODPAD Z FORMÁTOVÁNÍ CEMENTOTŘÍSKOVÝCH DESEK

Obdobně jako při produkci ostatních stavebních materiálů nebo dílců, také při výrobě cementotřískových desek vzniká určité množství různého odpadu. Pochází zejména z úpravy desek na požadovaný formát, tedy řezání a broušení.

Vznikají tak dva typy odpadu:

- soudržné kusy nebo odřezky cementotřískových desek
- ze zařízení pro opracovávání desek

Při formátování cementotřískových desek na požadované rozměry odběratele vznikají odřezky o různých velikostech. Tento odpad se skladuje v areálu firmy a nemá žádné větší využití. V případě použití tohoto odpadu do cementotřískových desek je nutné ho upravit nadrcením a pomletím na vhodnou jemnost. Tento odpad je převážně anorganický a částečně organický. Slouží pak jako příměs, která nahrazuje přibližně 5 – 10 % hmotnosti vkládaného cementu do desek.

### 3.4.6 KŘEMIČITÉ ÚLETY - MIKROSILIKA

Tato příměs je šedá (šedočerná, šedobílá) velmi jemná složená zejména z reaktivního  $\text{SiO}_2$ , který se v příměsi dle kvality výrobku pohybuje v rozmezí 80 - 98 %. Tuna mikrosiliky stojí 7500 - 9000 Kč, což lze považovat za nevýhodu a hlavní důvod proč se používá spíše pro specifické aplikace a v omezeném množství. Mikrosilika vzniká jako vedlejší produkt při výrobě ferosilicia, křemíku a různých slitin. Kvalita příměsi je závislá stejně jako u popílku na



typu slitiny, která se v peci právě vyrábí.

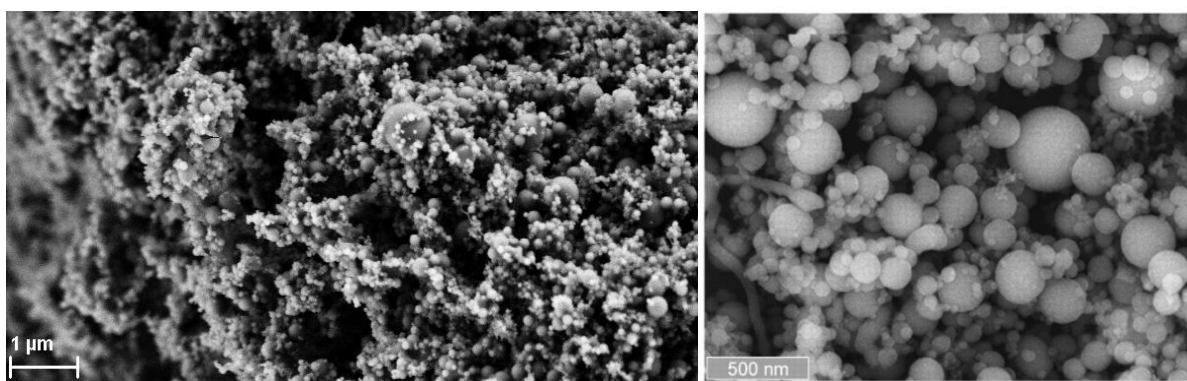
Zrna mikrosiliky mají sférický tvar o průměru 0,15 - 2  $\mu\text{m}$  a mají tendenci se shlukovat do aglomerátů o průměru zhruba 50  $\mu\text{m}$ . Mikrosilika má obrovský měrný povrch, pohybuje se okolo 20000  $\text{m}^2/\text{kg}$ , což znamená, že při deseti procentech obsahu příměsi v kompozitu, obalí jedno zrno cementu 50000 až 100000 částiček mikrosiliky. Nejčastěji se přidává do betonu jako příměs v dávce 2 – 10 % a nebo do stabilizujících přísad.

Kvůli svému vysokému měrnému povrchu zvětšují částice amorfního  $\text{SiO}_2$  stykovou plochu mezi zrny cementu a plniva, a tím zvyšují přilnavost cementu k plnivu. To zvýší kohezní síly v betonu, tudíž i zhutní jeho konzistenci, a proto se musí kombinovat s plastifikátory. To by v případě přidavku do cementotřískových desek nemusel být problém, protože ty se lisují ze zavhlé směsi.

Mikrosilika utěsňuje póry a tím zlepšuje voděodolnost a odolnost proti síranové korozi cementových kompozitů. Zlepšuje soudržnost směsi, a právě proto se používá hlavně pro stříkané betony. Snižuje odměšování vody z betonu a za určitých podmínek zlepšuje jeho čerpatelnost. Při použití mikrosiliky do směsi pro výrobu cementotřískových desek by pravděpodobně došlo ke zvýšení modulu pružnosti a pevnosti v tahu za ohybu. [3] [15] [27] [28]

Tab. č. 3: Příklad složení mikrosiliky [3]

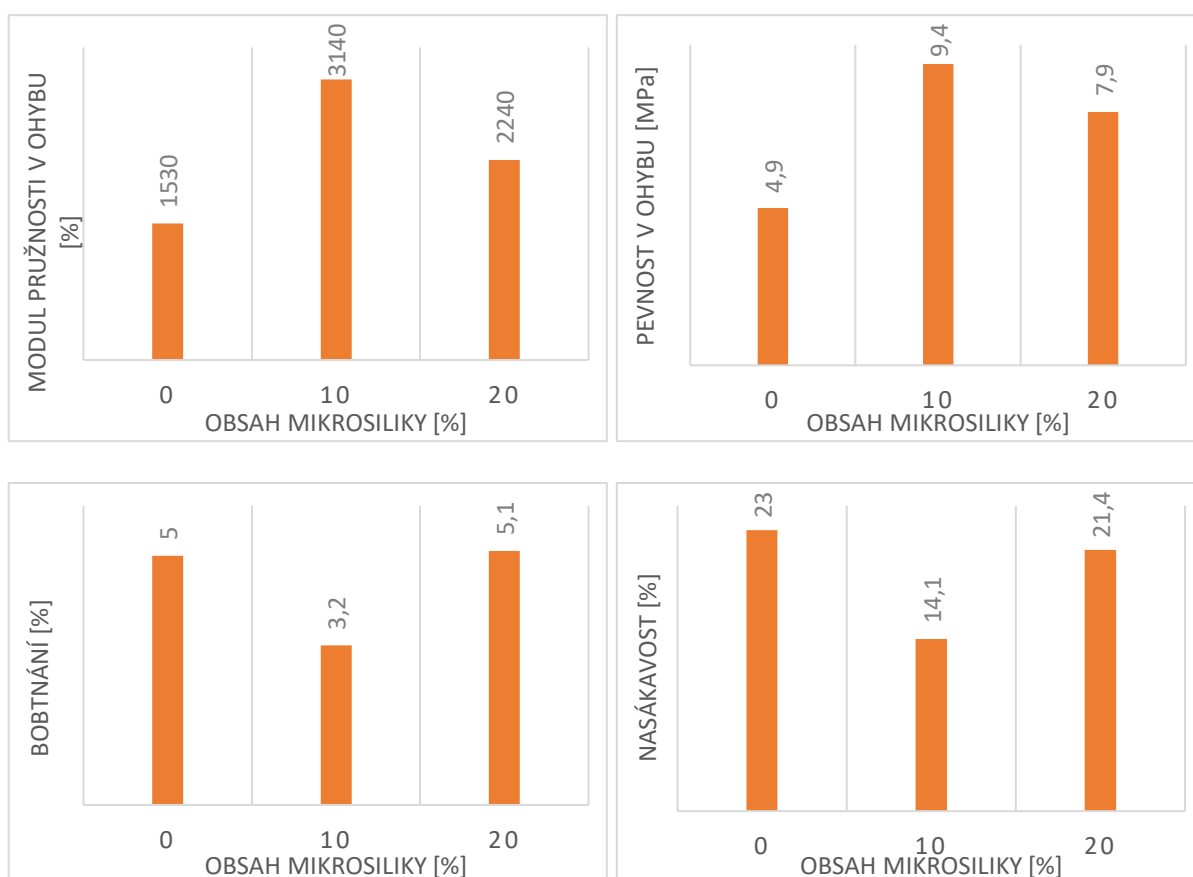
složka	[%]
$\text{SiO}_2$	80-98
CaO	~ 0,8
MgO	max. 1,5
$\text{Al}_2\text{O}_3$	max. 1
$\text{Na}_2\text{O}$	~ 0,5



Obr. č. 14 a 15: Mikrostruktura mikrosiliky ve, které jsou patrné dominantně převažující kulovité částice [54][15]

Vědci na brazilské univerzitě Menezzi a kol. [29] se zabývali analyzováním možnosti využití mikrosiliky jako podpůrné aktivní příměsi v cementotřískových deskách.

Výzkum byl zaměřen na potenciál přidání mikrosiliky do cementotřískových desek a považuje ji za jednu z nejuspěšnějších příměsí pro tyto desky. Do směsi přidávali 10 a 20 % mikrosiliky a ty pak porovnávali s referenční směsí. Směs referenční a směs s 20 % mikrosiliky měly obdobné vlastnosti. Za to receptura obsahující 10 % mikrosiliky měla minimální vliv na objemovou hmotnost, pevnost v ohybu stoupla o 91 %, modul pružnosti vzrostl o 106 % a některé další vlastnosti desek byly lepší v porovnání s referenčními deskami.



Obr. č. 16: Fyzikální a mechanické vlastnosti dřevocementových desek v závislosti na množství přidané mikrosiliky do směsi [29]

### 3.4.7 POPÍLEK – ELEKTRÁRENSKÝ VYSOKOTEPLTNÍ

Je charakterizován dle normy ČSN EN 450-1 jako jemný prášek tvořený převážně sklovitými částicemi kulovitěho tvaru, vznikající jako vedlejší produkt při spalování práškového antracitu, černého či hnědého uhlí

Na území České republiky vzniká popílek při spalování převážně hnědého uhlí a jen 20 % z uhlí černého. Popílek z černého uhlí má menší variabilitu ve vlastnostech a je jako



příměs do betonu zpravidla vhodnější než popílek z uhlí hnědého. Černouhelné popílky jsou nejčastěji tvořeny skelnými kuličkami o velikosti zrn cementu. Hnědouhelné popílky však mají nepravidelný tvar zrn.

Proces spalování uhlí probíhá tak, že se nejprve namele na prášek, který se vysuší odpadním teplem a spolu s předehřátým vzduchem je vháněn do spalovací komory kotle, ve které hoří při teplotě 1400 až 1600 °C. Poté se popílek zachycuje z kouřových plynů v elektrostatických nebo mechanických odlučovačích. Zbytky v tomto procesu nazýváme strusky a ty se hromadí na dně kotle. Popílky získané spalováním průmyslového nebo komunálního odpadu se jako příměs do betonu nesmí používat, protože nevyhovují normě ČSN EN 450-1.

Při pucolánové reakci popílku nejprve OH ionty rozbijí strukturu  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  a oddělí silikátové a aluminátové ionty ze strukturní sítě, které následně reagují s hydroxidem vápenatým a vodou. Tím se vytvoří amorfní kalciumsilikátaluminátová fáze, která zapříčiní tvrdnutí betonu. Množství nezreagovaných zrn popílku je závislé na obsahu volného  $\text{Ca(OH)}_2$  v cementové pastě. Nezreagovaná zrna pak slouží v matrici pouze jako plnivo a ovlivňují její hutnost.

Pucolánové vlastnosti propůjčují popílku převážně dva oxidy, a to  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ze kterých je popílek z velké části tvořen. Podíl aktivního  $\text{SiO}_2$  musí být nejméně 25 hmotnostních procent dle normy ČSN EN 197-1. Pucolánová vlastnost popílku nastává až po 28 a více dnech tvrdnutí cementového kompozitu, a tím se omezí vývoj počátečního hydratačního tepla, které vytváří hydratující cement. V případě cementotřískových desek není tento fakt příliš důležitý, ale v případě masivnějších konstrukcí to hraje podstatnou roli. Rozdíl teplot, ke kterému v masivních konstrukcích dochází, může při špatném návrhu a ošetřování vést k jejich praskání. Pucolánová reakce popílku spotřebovává  $\text{Ca(OH)}_2$  obsažené v matrici, a tím zvyšuje odolnost proti chemické korozi, na kterou pozitivně působí i vyšší obsah C-S-H gelů vzniklých při jeho hydrataci. Hydratační produkty vzniklé v podstatě již v zatvrdlém kompozitu jsou schopné částečně zaplnit jeho pórový systém. To v případě betonu vede ke zhutnění matrice a zvýšení odolnosti proti karbonataci, síranové korozi atd. V cementotřískových deskách se to neprojevuje tak výrazně jako v betonu, protože obsahují více větších pórů.

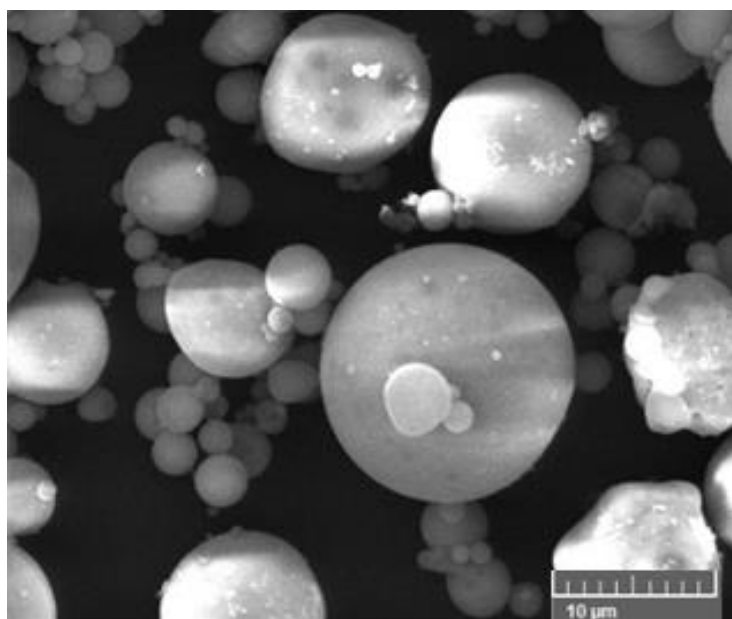
Jako většina příměsí i popílek s sebou přináší určitá rizika. Vysoký obsah oxidu vápenatého v popílku způsobuje objemové změny čerstvého i tuhého betonu. V případě cementotřískových desek nejsou tato rizika tak velká, protože jejich pružnější struktura změny zredukuje a už sama o sobě vyvolává mnohem větší objemové změny vlivem změn vlhkosti

prostředí, ve kterém se vyskytuje. V betonech může popílek dále např. provzdušňovat nebo způsobovat bleeding, ale to je v případě cementotřískových desek velmi nepravděpodobné, jelikož směs pro jejich výrobu obsahuje velmi nízké množství vody.

Tab. č. 4: Obecné chemické složení popílku [16]

Sloučenina	Obsah [%]
<b>SiO<sub>2</sub></b>	40 - 60
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	23 - 24
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2 - 16
<b>CaO</b>	0,6 - 8,5

Měrný povrch popílku je přibližně 200 - 600 m<sup>2</sup>/kg. Cementy mají přibližně 250 - 400 m<sup>2</sup>/kg, z toho vyplývá, že aplikace popílku v cementových kompozitech zpravidla nebude zvyšovat náročnost požadavků na množství vody dané směsí. Pro dosažení lepších tvarových vlastností a hutnější struktury se popílky mohou rozemlít, ale pak jsou výrazně dražší. Důležité je brát v potaz, že vlastnosti popílků se mohou značně odlišovat při odběru z odlišných spaloven uhlí, to pak může mít vliv na kolísání pevností betonu. Proto je dobré používat popílek stále ze stejného zdroje pro dosažení předpokládaných vlastností. [3][4][14][15][16]



Obr. č. 17: Obráz popílku zvětšený 3000x [50]

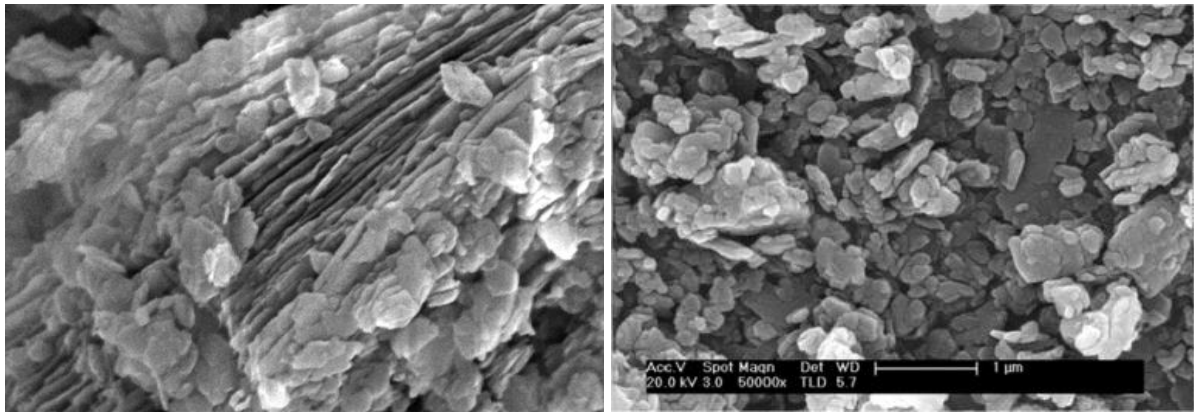
### 3.4.8 METAKAOLIN

Základní složkou pro výrobu metakaolinu je nezpevněná bělavá hornina reziduálního původu obsahující více než 80 % minerálů kaolinitové skupiny. Jako kaolin se v praxi označují i horniny s podílem kaolinu 10 - 15 % a to z důvodu vysoké potřeby této suroviny do betonu, ale i jako surovinu pro výrobu porcelánu, pigmentů, speciálních plnidel, žáruvzdorných výrobků atd. Kaolin vzniká dvěma způsoby. Zvětráváním hornin bohatých na živec (hlavně draselný) a to při vlhkém, teplém klimatu v kyselém prostředí nebo hydrotermálním rozkladem podobných hornin.

Metakaolin se řadí mezi pucolánové jemnozrné příměsi o velikosti zrn desetkrát menších vůči zrnům cementu. Je vyráběn ve formě bílého prášku výpalem kaolinů, kaolinitických jíílů atd., a to v teplotním rozsahu 600 - 900 °C. Nejedná se o vedlejší produkt výroby, jako tomu je například u popílků, ale o produkt hlavní. Je tvořen oxidy  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a stopově  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  či  $\text{K}_2\text{O}$ . Cena metakaolinu se pohybuje v rozmezí 6500 - 7000 Kč/t.

V cementových kompozitech reaguje s  $\text{Ca(OH)}_2$  za vzniku hydratovaných kalcium aluminátů a silikátů, které pozitivně ovlivňují mechanické a chemické vlastnosti kompozitu. Jedná se zejména o zvýšení pevnosti, zlepšení reologických vlastností atd. Měrný povrch této příměsi je přibližně 2000 - 20000  $\text{m}^2/\text{kg}$  (čím větší, tím vyšší reaktivita). 10% podíl metakaolinu v betonu vede ke zvýšení pevnosti v tahu za ohybu zhruba o polovinu, z toho můžeme usuzovat, že by k nárůstům pevností mělo dojít i u cementotřískové desky. Metakaolin zamezuje tvorbu výkvětů, jelikož při své reakci v kompozitu spotřebovává  $\text{Ca(OH)}_2$ , který je právě důsledkem jejich tvorby při styku s  $\text{CO}_2$ .

Teoreticky lze tedy konstatovat, že např. 5 - 10% nahrazení pojiva metakaolinem v cementotřískových deskách by mohlo zvýšit pevnosti v ohybu až o desítky procent, zlepšit odolnost proti atmosférickým vlivům a omezit tvorbu výkvětů. Nevýhodou je zvýšení výrobní ceny desky, a proto lze doporučit použití této příměsi pouze do desek, které budou vystaveny náročnějším podmínkám a není možné jinak dosáhnout potřebných vlastností. [15] [34]



Obr. č. 18 a 19: Struktura standardního kaolinového minerálu (zvětšení 25000x; vlevo) a struktura metakaolinu (zvětšení 50 000x; vpravo) [56]

## 3.5 Možnosti modifikace složení nebo podmínek zrání desek

### 3.5.1 PŮSOBENÍ CO<sub>2</sub>

Nanjing Forestry University, 2014

Vstřikování CO<sub>2</sub> je slibná metoda pro urychlení tvrdnutí cementotřískových desek. Používá se plynné nebo kapalně CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub> je v matrici neutralizováno kalcium silikáty a mění se na vysoce nerozpustný kalcium karbonát. Tato reakce probíhá velice rychle v první dvou minutách a následně se průběh rapidně zpomalí, kvůli obtížnějšímu transportu CO<sub>2</sub> do matrice. Rychlá karbonatace může urychlit formování hydratačních produktů a rastrovací elektronová mikroskopie potvrdila, že reakce kalcium silikátu s CO<sub>2</sub> vedla k velkému urychlení tvrdnutí kompozitu.

Qi a kolektiv (2006) zjistili, že výrazné urychlení tvrdnutí cemento-dřevních kompozitů, které obsahovaly i rozptýlenou výztuž, nastalo po 1 - 3 minutách vstřikování CO<sub>2</sub>. To by umožnilo vyjmutí desky z lisu po pár minutách, a ne až po několika hodinách., což je běžné v případě normálního zrání.

Sorouhian a kolektiv (2003) pozorovali, že nižší koncentrace CO<sub>2</sub> (25%) vedla k výsledkům, které byly porovnatelné s těmi, které byly dosaženy při 100% koncentraci CO<sub>2</sub>. Usoudili, že vysoká rychlost reakce a velký vývoj tepla při působení 100% CO<sub>2</sub> působí tímto negativně. Herman a kolektiv (2000) Technologie ošetřování tekutým CO<sub>2</sub> vede k rychlejšímu dosažení požadovaných vlastností než při ošetřování plynným CO<sub>2</sub>, ale ošetřování tekutým CO<sub>2</sub> po delší dobu vedlo k degradaci cementotřískových desek.

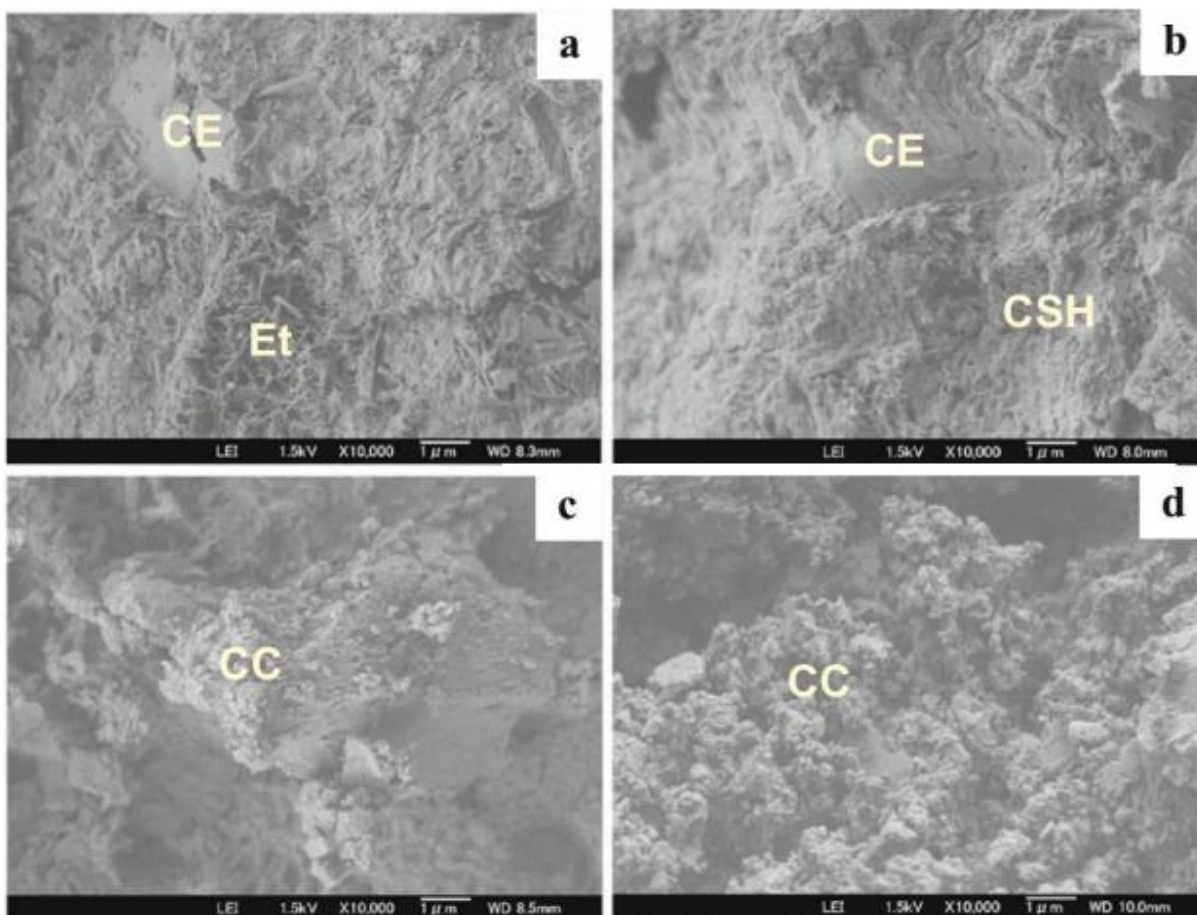
Maail (2011) a Soroushian (2013) vyvinuli proces ošetřování cementotřískových desek pomocí CO<sub>2</sub>. Z velké části proces zahrnuje vytváření střídavého vakua a stlačení CO<sub>2</sub> na povrch desek o tloušťce 10 mm. Zjistili, že takto ošetřená deska má lepší pevnost v tahu, větší tuhost, trvanlivost a odolnost proti atmosférickým vlivům, protože přítomnost kalcium karbonátu snížilo kapilární porozitu a vylepšilo rozhraní mezi vlákny a samotnou cementovou maticí. [30]

### 3.5.2 ZRÁNÍ A DEGRADAČNÍ PROCESY CEMENTOTŘÍSKOVÝCH DESEK OŠETŘENÉ TEKUTÝM CO<sub>2</sub>

Kyoto University, Japonsko, 2011

Výzkum se zabývá působením tekutého CO<sub>2</sub> na cementotřískové desky. Převážně se zabývá vlivem doby působení CO<sub>2</sub>. Na desky vyzrálé 28 dní bylo působeno tekutým CO<sub>2</sub> po dobu od desíti minut, až po deset dní. Výzkum zjistil, že hodnota rozlupčivosti je velice ovlivněna ošetřením CO<sub>2</sub>. Referenční vzorek měl hodnotu rozlupčivosti 0,6 MPa a po ošetření CO<sub>2</sub> stoupla na 1,19 MPa (10 minut) a 1,22 MPa (30 minut). To znamená, že krátkodobé ošetřování zvyšuje soudržnost matrice. Hodnoty rozlupčivosti se při působení CO<sub>2</sub> od 60 minut po 10 dní postupně snižovali na 0,68 MPa. Pevnost v tahu ohybem a modul pružnosti po 30minutovém působení CO<sub>2</sub> byly 17,1 MPa a 5,38 GPa a klesly po deseti dnech na 10,7 MPa a 3,3 GPa. Roztažnost a absorpce vody byly po krátkém působení CO<sub>2</sub> nejmenší, ale po delším působení rostly až na hodnoty srovnatelné s referenční směsí. To bylo nejspíš způsobeno rostoucí porozitou při delším působení CO<sub>2</sub>, což zapříčinil přírůstek uhličitanu vápenatého již v zatvrdlých deskách. Z těchto výsledků můžeme usuzovat, že působení CO<sub>2</sub> výrazně ovlivňuje vlastnosti desek s tím, že při krátkém působení urychluje nárůst pevností, zvyšuje jejich pevnostní charakteristiky, snižuje nasákavost a roztažnost. Po delší době působení CO<sub>2</sub> naopak výrazně zhoršuje vlastnosti desek.

Na snímcích z rastrovacího elektronového mikroskopu je patrné, že po deseti minutách se ve struktuře desek vyvinuly malé krystalky uhličitanu vápenatého, které jí zhutnily. Po delší době (10 dní) se krystalky zvětšovaly a bylo jich více. Tím došlo k zvětšení pórovitosti matrice. Termická gravimetrie prokázala o 10 % větší ztrátu v oblasti rozkladu uhličitanu vápenatého u desek vystavených desetidennímu působení oproti deskám vystaveným CO<sub>2</sub> pouze 30 minut. [31]



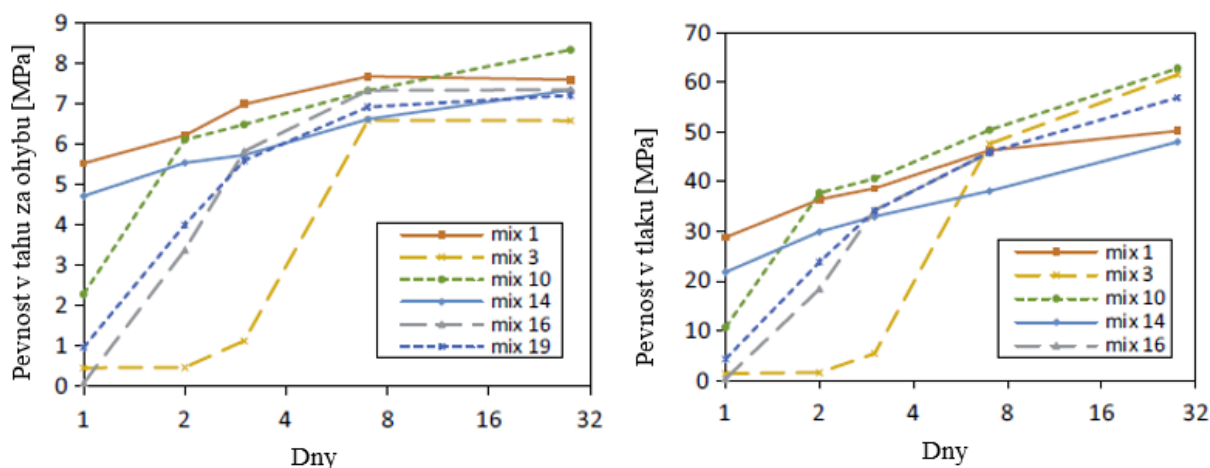
Obr. č. 20: Snímky SEM z cementotřískových desek. a - kontrolní deska bez tepelného a  $\text{CO}_2$  ošetření, b - referenční deska ošetřena tepelně jako při konvenční výrobě, c - je vzorek 30 minut ošetřovaný  $\text{CO}_2$ , d - je vzorek ošetřovaný  $\text{CO}_2$  po dobu 10 dní. CE = cementové zrno, Et = ettringit, CSH = CSH gel, CC = uhličitán vápenatý [31]

### 3.5.3 Vliv obsahu $\text{CaSO}_4$ a cukrů na vlastnosti cementu

Eindhoven University, Netherlands, 2017

Článek se zabývá problematikou hydratace cementu obsahujícím cukry, které mají vliv na hydratační procesy, mikrostrukturu a mechanické vlastnosti cementu. Hledá vztahy mezi aluminátovými fázemi, železitými fázemi, obsahem  $\text{CaSO}_4$  a cukry. Cukry, které se dostávají z dřevěných třísek do cementové matrice jsou právě důvodem, který tyto problematiky spojuje.

Ve výzkumu byl porovnáván vliv cukrů na cementy CEM I 52,5 R (šedý) a CEM I 52,5 R (bílý). Obsah  $\text{CaSO}_4$  byl zvolen 0, 0,25, 4, 5, 6, 7 % a glukózy 0, 0,2 a 0,3 % z obsahu cementu.



Obr. č. 21: Hodnoty jednotlivých receptur v tahu za ohybu a v tlaku [40]

Poznámka: *W* = bílý cement, *G* = šedý cement, mix 1 – *G* s 5 %  $\text{CaSO}_4$ , mix 3 – *G* s 0,2 glukózy a 5 %  $\text{CaSO}_4$ , mix 10 – *G* s 0,2 glukózy a 7 %  $\text{CaSO}_4$ , mix 14 – *W* s 5 %  $\text{CaSO}_4$ , mix 16 – *W* s 0,2 glukózy a 5 %  $\text{CaSO}_4$ , mix 19 – *W* s 0,2 glukózy a 4 %  $\text{CaSO}_4$ ,

Bylo zjištěno, že glukóza silně zpomaluje hydrataci obou zmíněných typů cementu, ačkoliv na pevnosti bílého cementu má mnohem nižší účinky než na cement šedý.

$\text{CaSO}_4$  významně působí na hydrataci cementu, který obsahuje glukózu. Při mírné redukci  $\text{CaSO}_4$  v šedém cementu na 4 % již výrazně zpomaluje hydratační procesy. Zvýšení obsahu  $\text{CaSO}_4$  na 7 % vede ke zvýšení pevností v tlaku a většímu uvolňování hydratačního tepla. Při snížení obsahu  $\text{CaSO}_4$  na 4 % v portlandském bílém cementu dojde ke zvýšení pevností v tlaku a většímu uvolňování hydratačního tepla. Větší přídavek glukózy zpomaluje hydrataci u obou cementů, ale to lze ovlivňovat právě přídavkem  $\text{CaSO}_4$ .

Malty a dřevocementové kompozity, ve kterých je obsažen bílý cement s redukováným obsahem  $\text{CaSO}_4$  (4%) nebo šedý cement se zvýšeným obsahem  $\text{CaSO}_4$  (7%), vykázaly nižší retardaci tuhnutí a vyšší pevnosti v tlaku. [40]

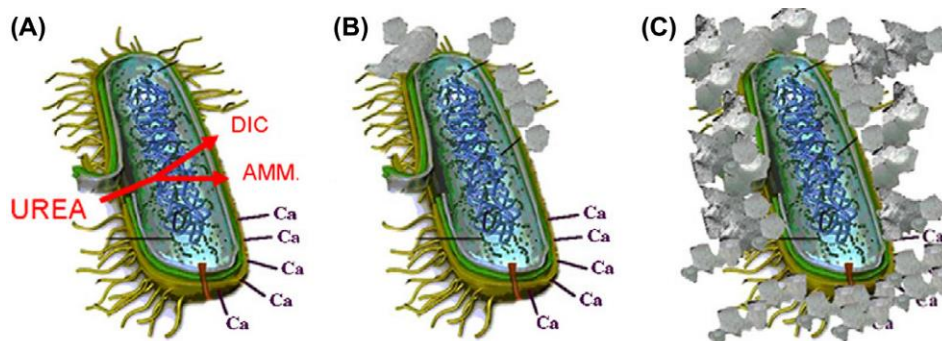
### 3.5.4 ÚPRAVA SLOŽENÍ DESEK POMOCÍ BIOLOGICKÝCH ORGANISMŮ

Pro další úpravu matrice cementotřískových desek by mohly posloužit specifické bakterie, které rozkladem močoviny vytváří  $\text{CaCO}_3$ , čímž jsou schopny zacelit některé trhliny a ztuhit strukturu desky.

Močovina je rozkládána ureolytickými bakteriemi, což je jednou z nejčastějších možností pro vysrážení  $\text{CaCO}_3$ . Enzym Ureáza štěpí močovinu na amoniak a oxid uhličitý, který je v tomto procesem separovaný na anorganický uhlík a oxid uhličitý. Amoniak zvýší pH



prostředí, což způsobí koncentraci nerozpustného uhličitanu vápenatého v prostředí, které je „bohaté“ na vápník.



Obr. č. 22: Jednoduchá ukázka dějů odehrávajících se při ureolyticky vyvolaném srážení kalcitu. (UREA = močovina, DIC = rozpuštěný anorganický uhlík, AMM = amonný iont) [35]

Autoři ve svém vyhodnocení, že využití některých druhů takovýchto bakterií lze využít při výrobě cementotřískových desek ke zlepšení jejich parametrů a to zejména – snížení absorpce vody, zvýšení pevnosti, resp. její zachování v delším časovém horizontu. Tyto parametry by se měly zlepšit vzhledem k tomu, že bakterie jsou schopny zacelit trhliny o šířce až 0,46 mm. Dále zdůrazňují, že je třeba realizovat širší výzkum (právě na cementotřískových deskách) na toto téma a tvrdí, že se jedná o potenciálně velmi zajímavou možnost inovace. [35]

### 3.6 Shrnutí poznatků teoretické části

Na základě učiněných zjištění, tj. zapojení jednotlivých alternativních surovin při hydratačních reakcích, dále jejich produkci, uplatnění při výrobě nových hmot, dostupnosti, množství produkce atd. vč. konzultace se zástupci spol. CIDEM Hranice, a.s. lze konstatovat, že jako potenciálně vhodné se jeví následující alternativní suroviny jako parciální substituenty stávající matrice cementotřískových desek:

- jemně mletý vápenec (upravený na vhodný měrný povrch)
- teplárenská škvára (upravený na vhodný měrný povrch)
- odřezky (vedlejší produkt) z formátování cementotřískových desek (zde bude třeba věnovat zvýšenou pozornost vlastnostem, tj. podrobné analýze fyzikálně-mechanických, chemických či termických charakteristik, možnost zdrobnění – drcení a mletí vč. třídění frakcí atd.)
- vysokoteplotní popílek (bez další úpravy vlastností)



S ohledem na potenciální míru zapojení dané alternativní složky při tvorby struktury matrice cementotřískových desek lze uvažovat substituci cementu v řádu do 20 %. Ze zjištěných informací je nepravděpodobné, že by vyšší nahrazení cementu příměsí dosáhlo normou požadovaných hodnot.

Podstatné jsou však i následující faktory, ke kterým je třeba přihlédnout při tvorbě nových receptur cementotřískových desek:

- ve vysokoteplotním popílku by se mohly nacházet sloučeniny (např. sírany), které by teoreticky mohly zapříčinit korozi ocelových forem, které jsou při produkci desek používány
- ve výrobě desek byla již v provozním měřítku úspěšně ověřena možnost využití vysokopeční strusky pro modifikaci pojiva v menším množství
- v zimních měsících je při výrobě desek nutné počítat s teplotními výkyvy, které se týkají i výrobních podmínek, což souvisí mimo jiné s hydratací matrice desek (dostatečný vývin hydratačního tepla aj.) a proto je nutné pro toto období počítat s pozměněnou recepturou ve prospěch vyššího množství cementu na úkor dávky alternativní suroviny.

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Z hlediska řešení diplomové práce lze experimentální část rozdělit do několika etap, které se zabývají dílčími úkony ve vzájemném sledu tak, aby došlo, pokud možno, k co nejvíce efektivnímu dosažení záměrů uvedených v zadání práce a to konkrétně:

- analýza vybraných alternativních složek pro modifikaci matrice cementotřískových desek vč. různých způsobů úpravy jejich vlastností;
- návrh receptur hmot modifikovaného složení;
- ověření alternativních surovin při modifikaci cementové matrice v maltách obsahujících pouze anorganické kamenivo;
- případná optimalizace složení matrice a návrh receptur cementotřískových desek;
- podrobné analyzování a studium širokého spektra podstatných vlastností a charakteristik počínaje základními parametry až po mikrostrukturu;
- poloprovozní ověření na výrobní lince;
- souhrnné zhodnocení a doporučení pro případný navazující výzkum;

Na základě poznatků z teoretické části a informací od společnosti CETRIS byly v první etapě jednotlivé vybrané příměsi podrobeny zkouškám, dle kterých se zjistí jejich měrný povrch a měrná hmotnost. Podrobněji je zkoumán odpad vznikající při formátování cementotřískových desek, na kterém se zjišťuje jeho zrnitost po zdrobňovacím procesu a třídění jednotlivých frakcí, ztráta hmotnosti žíháním, spalné teplo, DTA a XRD. XRD bylo provedeno na termicky upraveném odpadu, které mělo posloužit ke zjištění, zda vzniklý popílek nezískal po úpravě určité pojivové vlastnosti.

V navazující druhé etapě byly navrženy výchozí receptury hmot s modifikovanou cementovou maticí.

Třetí etapa se zabývá zkoumáním vlivu příměsí na cementovou maltu. Na zkušebních tělesech zhotovených z malty modifikovaného složení matrice je zjištěna jejich pevnost v tlaku a v tahu za ohybu, jejich objemová hmotnost (ve stáří 8 hod, 9, 14, 28 a 90 dní) a vybrané z nich jsou zhodnoceny DTA a XRD analýzami.

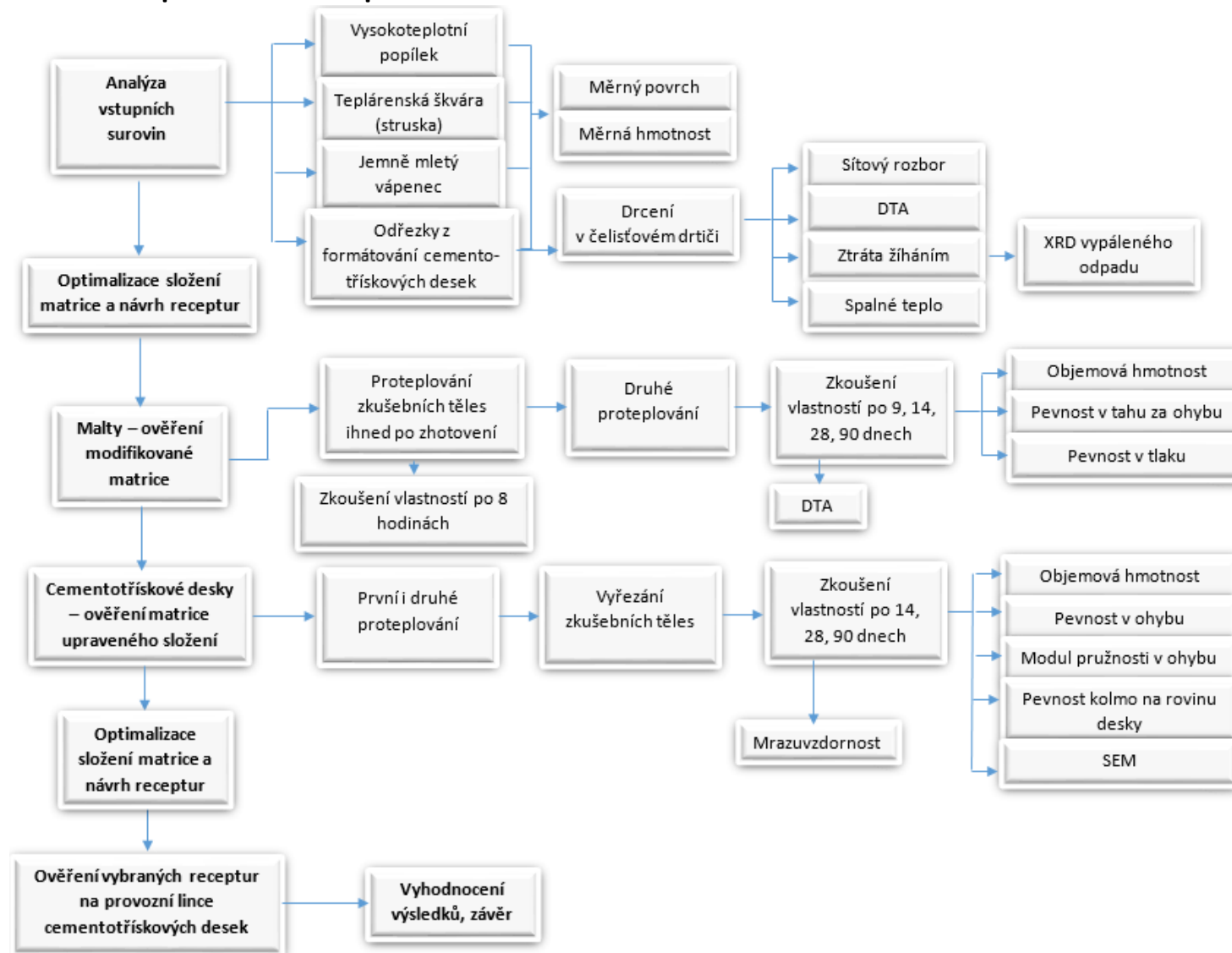
Čtvrtá etapa obsahuje vyhodnocení výsledků úspěšnosti modifikace matrice cementových malt a v návaznosti na učiněná zjištění bylo optimalizováno složení matrice a sestaveny receptury cementotřískových desek.

V páté etapě byly desky testovány ve stáří 14, 28 a 90 dní. Byl zjišťován modul pružnosti, pevnost v tahu za ohybu, pevnost kolmo na rovinu desky, mrazuvzdornost a některé vzorky byly blíže prozkoumány rastrovacím elektronovým mikroskopem.

V šesté etapě byly testovány vzorky dodané z výrobní linky CETRIS. Zkoušena byla pevnost a modul pružnosti v tahu za ohybu, pevnost kolmo na rovinu desky a mrazuvzdornost po různém počtu zmrazovacích cyklů.

V každé části jsou jednotlivé výsledky vyhodnoceny a v poslední části je závěr, který celkově zhodnocuje práci.

## 4.1 Schéma průběhu experimentální části



## 4.2 Analýza a úprava vlastností vstupních surovin

### 4.2.1 STANOVENÍ MĚRNÉHO POVRCHU

Měrný povrch byl stanoven permeabilní metodou podle Blaina pro všechny příměsi použité pro výrobu zkušebních těles. Jednalo se o škváru, mikromletý vápenec, odpad z cementotřískových desek a vysokoteplotní popílek.

Princip metody: Jemnost mletí jemnozrnného materiálu se vyjadřuje jako měrný povrch, vypočtený z času, který je potřebný pro průtok určitého množství vzduchu zhutněným lůžkem materiálu dané velikosti a porozity. Jedná se o metodiku srovnávací, tudíž je pro kalibraci přístroje nutný referenční materiál se známým měrným povrchem. Výslednou hodnotu tvoří aritmetický průměr ze tří měření.

Tab. č. 5: Měrný povrch příměsí použitých pro výrobu zkušebních těles

Příměs	Měrný povrch [m <sup>2</sup> /kg]
Cement	372
Vápenec	567
Škvára	473
Popílek	414
Odřezky	359

Poznámka: Měrný povrch odřezků byl měřen na frakci < 0,063 mm

### 4.2.2 STANOVENÍ MĚRNÉ HMOTNOSTI PŘÍMĚSÍ

Zkouška byla provedena v souladu s normou ČSN EN 1097-7. Měrná hmotnost vysušených vzorků je definována jako poměr hmotnosti vysušeného vzorku materiálu k objemu, který zaplňuje ve vodě. K určení měrné hmotnosti zrn materiálu se využívá pyknometrická metoda. Pro účely diplomové práce byl použit heliový pyknometr pro všechny příměsi i cement.

## ACCUPYC II



Obr. č. 23: Použitý heliový pyknometr - AccuPyc II 1340 [57]

Tab. č. 6: Měrná hmotnost cementu a příměsí použitých pro výrobu zkušebních těles

Příměs	Měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
Cement	3140
Škvára	2700
Vápenec	2600
Odřezky	2580
Popílek	2170

Měrná hmotnost cementu byla stanovena na 3140 kg/m<sup>3</sup>. Pro škváru byla měrná hmotnost stanovena na 2700 kg/m<sup>3</sup>. Vápenec a odřezky z formátování cementotřískových desek se vyznačují měrnou hmotností přibližně 2600 kg/m<sup>3</sup>. Nejnižší hodnotu má ze všech použitých příměsí popílek, a to 2170 kg/m<sup>3</sup>. Tyto hodnoty byly použity pro výpočet jednotlivých receptur v následujících kapitolách.

### 4.2.3 SLOŽENÍ PŘÍMĚSÍ

V této části jsou popsány jednotlivá složení příměsí použitých v této práci a některé jejich další charakteristiky. Vedlejší produkt z výroby cementotřískových desek je popsán podrobněji v samostatné následující kapitole.

#### 4.2.3.1 VÁPENEC

Mikromletý vápenec od společnosti KOTOUČ ŠTRAMBERK spol. s.r.o. Obsahuje 96,51 % CaCO<sub>3</sub> a 91,51 % částic je menších než 0,063 mm. Čím menší velikost částic, tím větší je celkový měrný povrch, který je u této příměsí (567 m<sup>2</sup>/kg) větší než u cementu (371) a

to zapříčiní rychlejší nárůst počátečních pevností cementu. Reaktivita vápence ovlivňuje vytváření C<sub>3</sub>A, C<sub>3</sub>S, změny v C-S-H a formování tranzitní zóny mezi plnivem a cementovou pastou.

Tab. č. 7 a 8: Chemické složení vápence a jeho zrnitost

<b>Chemické složení</b>	<b>Průměr měření [%]</b>	<b>Průměr otvorů síta [mm]</b>	<b>Zrnitost – propad sítem [%]</b>
SiO <sub>2</sub>	1,30	0,045	80,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12	0,063	91,51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26	0,090	97,24
SO <sub>3</sub>	0,08	0,125	99,54
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,11	0,200	99,91
MnO	0,01		
Alkálie	0,06		
CaCO <sub>3</sub>	96,51		
MgCO <sub>3</sub>	1,07		
vlhkost	0,15		

#### 4.2.3.2 ŠKVÁRA

Byla vybrána škvára vyrobená v Oslavanech, která obsahuje vysoké zastoupení skelné fáze 85 %. Tento vysoký podíl skelné fáze a SiO<sub>2</sub> (51 %) by měl zaručit pozitivní dopad na pevnosti a další vlastnosti vytvořených receptur.

Tab. č. 9 a 10: Chemické a mineralogické složení škváry.

Chemické složení	[%]	Mineralogické složení	[%]
SiO <sub>2</sub>	51	Skelná fáze	85
TiO <sub>2</sub>	0,78	Spinel, magnesioferrite	0,63
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,44	Křemen, SiO <sub>2</sub>	4,75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,86	Hematit, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,34	Mullit, 3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2SiO <sub>2</sub>	7,4
Mno	0,096		
MgO	1,7		
CaO	4,37		
Na <sub>2</sub> O	1,77		
K <sub>2</sub> O	3,32		
SO <sub>3</sub> celk.	1,11		
FeO	8,59		
Cl <sup>-</sup>	> 0,001		
ztr. žíháním	3,74		
ztr. sušením	0,53		

#### 4.2.3.3 POPÍLEK

Popílek byl vyprodukován vysokoteplotním spalováním v uhelné elektrárně ve Chvaleticích. Vzhledem k tomu, že obsahuje 63,2 % amorfni fáze bude pravděpodobně ve značné míře tvořit hydratační produkty, které následně pomohou ke zpevnění zkušebních těles.

Tab. č. 11: Chemické složení popílku

Chemické složení [%]								
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
<b>50,16</b>	27,54	13,08	0,07	2,51	1,46	1,35	0,35	0,19



Tab. č. 12: Mineralogické složení popílku

Mineralogické složení		[%]
<b>Křemen</b>	SiO <sub>2</sub>	8,6
<b>Mullit</b>	Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub>	23,0
<b>Maghemit</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,3
<b>Amorf. fáze</b>	-	63,2

Tab. č. 13: Ztráta sušením a žháním a sypná hmotnost popílku

Ztráta sušením	Ztráta žháním	Sypná hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]	
		volně sypaná	setřesená
[%]	[%]		
0,01	1,04	810	920

#### 4.2.4 ODPAD Z VÝROBY CETRIS DESEK

Dále byl ve větším rozsahu analyzován odpad z výroby cementotřískových desek z výroby CETRIS v Hranicích. Odpad se skládal z různých tvarů odřezků o velikosti přibližně 2 - 20 cm.

Vzhledem k zamýšlenému účelu využití odřezků jako alternativní suroviny pro opětovnou výrobu cementotřískových desek a příp. jiných hmot bylo třeba podrobně analyzovat vlastnosti a možnosti úpravy složení těchto odřezků. V první řadě bylo nutné se zabývat vhodným zdrobňovacím procesem a jeho účinností, což bylo ověřeno pomocí síťového rozboru. Dále byl získaný granulát separován na jednotlivé frakce, u nichž bylo třeba vhodným způsobem stanovit zastoupení, resp. vzájemného poměru matrice a dřevní hmoty. Důvodem bylo určení vhodné složky odřezků pro danou aplikaci, tj. začlenění do stávajících receptur cementotřískových desek. Pro tento účel se jako nejvhodnější jevila kombinace stanovení spalného tepla, DTA a ztráty žháním. U vhodně upravených odřezků bylo třeba analyzovat mineralogické složení pomocí XRD, aby bylo možné identifikovat slínkové a jiné podstatné fáze, které by mohly vypovídat o alespoň částečném zapojení upraveného popelu při hydratačních reakcích.



*Obr. č. 24: Odřezky z formátování cementotřískových desek dodané přímo z výrobní linky spol. CIDEM Hranice, a.s.*

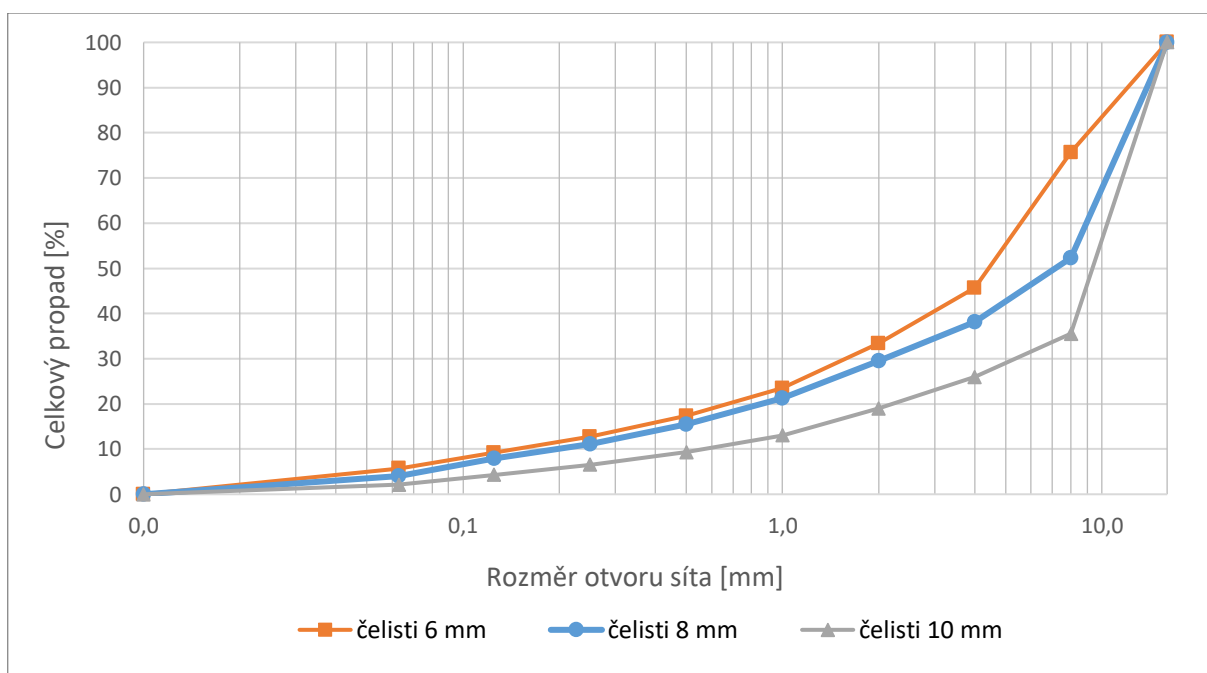
#### 4.2.4.1 SÍTOVÝ ROZBOR

Sítový rozbor byl prováděn dle normy ČSN EN 933-1. Zkouška je tvořena roztříděním a oddělením zkoušeného materiálu pomocí sady sít do několika frakcí se sestupnou a definovanou velikostí otvorů. Hmotnost frakce, která zůstala na jednotlivých sítích, se porovnává s původní hmotností použitého materiálu. Součet propadu jednotlivými sítí v procentech se zaznamená a vyjádří se graficky.

Odřezky byly nadrceny v čelistovém drtiči při různých vzdálenostech čelistí, a to 6, 8 a 10 mm. Následně byl na rozdrčených vzorcích proveden sítový rozbor a byly vytvořeny křivky zrnitosti, které měly sloužit převážně ke zjištění distribuce, resp. zastoupení jednotlivých frakcí v daném vzorku odřezků při odlišných vzdálenostech drticích čelistí.



Obr. č. 25: Čelistový drtič od firmy Retsch



Graf č. 1: Křivky zrnitosti nadrceného odpadu při různých vzdálenostech čelistí drtiče

Z grafu je patrné, že s menší vzdáleností čelistí roste obsah jemnějších frakcí obsažených v nadrceném odpadu. Propad sítem 0,063 byl při čelistech vzdálených 10 mm kolem 2 %, kdežto v případě 8 mm se již jednalo o 4 % a při rozevření čelistí 6 mm pak propadlo sítem 0,063 mm cca 5,7 %. Rozdíl mezi křivkami se vzdálenostmi čelistí 6 a 8 mm je v oblasti 0 - 1 mm nepatrný a proto byla pro finální úpravu granulometrického složení odřezků zvolena vzdálenost 8 mm. Odřezky drcené při 8 mm byly také použity pro zjištění všech dalších charakteristik odpadu.

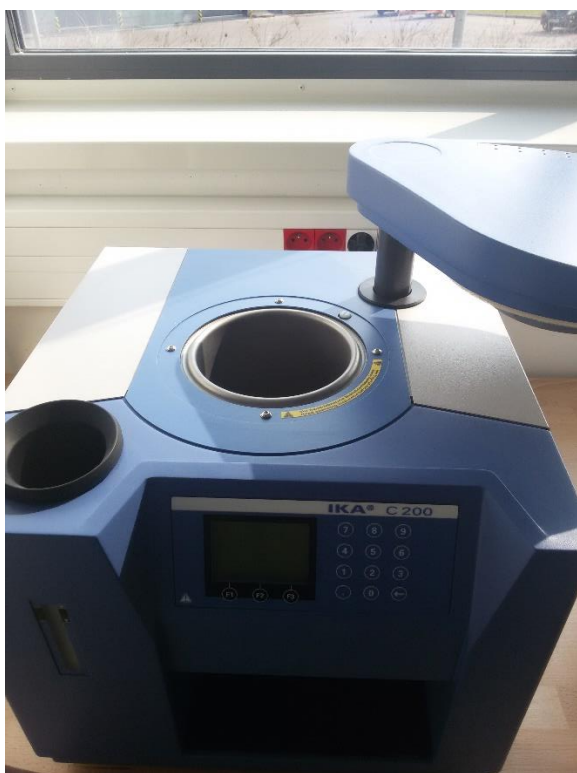
#### 4.2.4.2 SPALNÉ TEPLLO

Spalné teplo bylo stanoveno dle normy ČSN EN ISO 1716. Jedná se o množství tepla, které se uvolní úplným spálením zkoušeného vzorku v kalorimetrické tlakové nádobě v prostředí stlačeného kyslíku při teplotě 25 °C, vztažené na jednotku jeho hmotnosti. Tepelný obsah stanovený za těchto podmínek se vypočítá na základě pozorování nárůstu teploty, přičemž se bere v úvahu úbytek tepla a skupenské teplo vypařování vody. [33]

Pro zjištění obsahu dřevních třísek v nadrceném odpadu bylo nutné zjistit, jak velké spalné teplo různé frakce uvolní. Jednotlivé frakce odpadu byly namlety v diskovém mlýně (RS 200 od firmy Retsch), a to po dobu 150 sekund při 1500 ot/min tak, aby byl získán granulát, ze kterého by bylo možné vyrobit zkušební tělesa – tablety pomocí mechanického lisování. Použitý byl odpad nadrcený při vzdálenostech čelistí 8 mm. Z jednotlivých namletých frakcí odpadu byly vytvořeny tabletky, které byly následně zkoušeny v poloautomatickém kalorimetru IKA C 200.



Obr. č. 26: Diskový mlýn RS 200 od firmy Retsch [58]



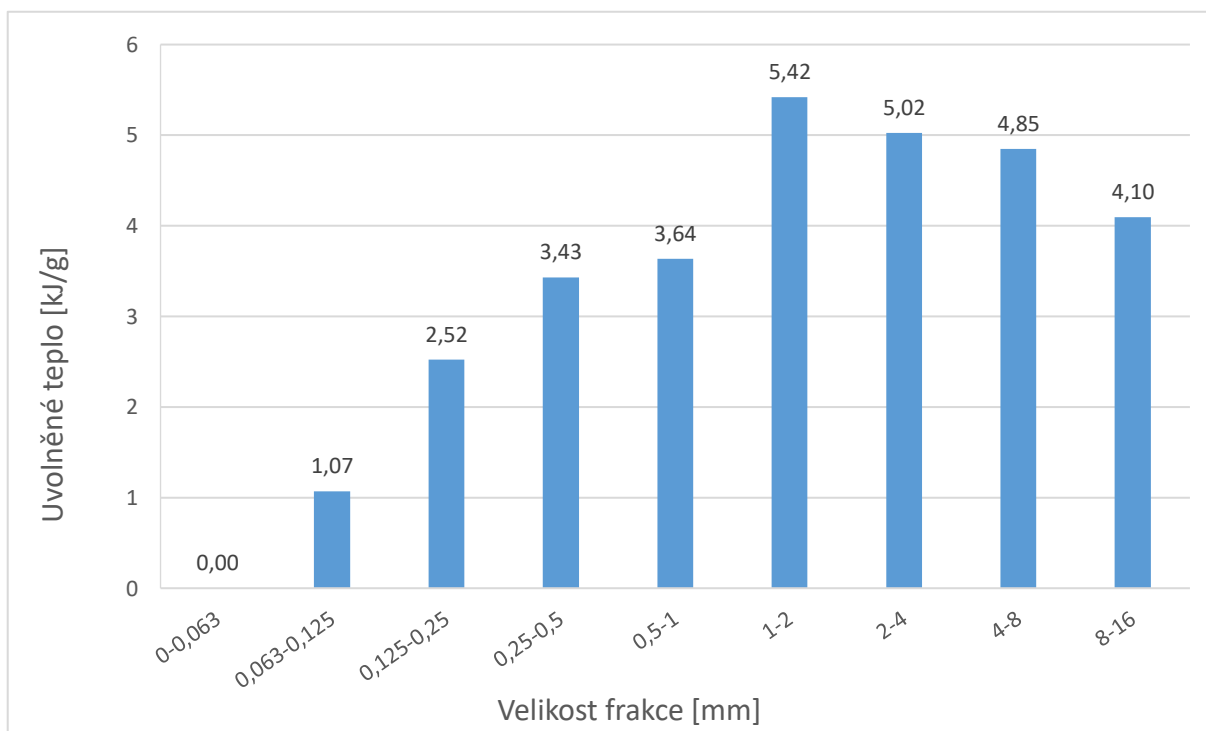
Obr. č. 27 a 28: Poloautomatický kalorimetr IKA C 200 (vlevo) a jeho vybavení (vpravo) (zleva - zápalné nitě, reakční nádoba, kelímek pro umístění tablety, víko nádoby)



Obr. č. 29: Tableta po a před odzkoušením spalného tepla

Tab. č. 14: Hodnoty spalného tepla jednotlivých frakcí namletého CETRIS odpadu

frakce [mm]	Spalné teplo [kJ/g]
<0,063	Neurčeno - 0
0,063	1,07
0,125	2,52
0,25	3,43
0,5	3,64
1	5,42
2	5,02
4	4,85
8	4,10



Graf č. 2: Spalné teplo jednotlivých frakcí namletého CETRIS odpadu

Z grafu lze vyčíst, že největší spalné teplo 5,42 kJ/g vytvoří frakce 1 - 2 mm, vyzářené teplo se mírně snižuje směrem k větším frakcím. tzn. že obsahují mírně nižší množství dřevních třísek. S klesající velikostí frakce pod 1 mm klesá i teplo, které při spálení vzniká, což je způsobeno větším obsahem cementové složky. Frakce 0 – 0,063 mm již nešla zažehnout, a tím pádem nebylo možné zjistit její spalné teplo, což vypovídá o skutečnosti, že takto upravené odřezky již neobsahují prakticky žádnou dřevní hmotu, a proto byla právě tato frakce použita při návrhu včetně ověření modifikovaných receptur malt a následně cementotřískových desek.

#### 4.2.4.3 ZTRÁTA ŽÍHÁNÍM

Jedná se o termickou analýzu, která vyjadřuje procentuální úbytek hmotnosti vzorku, který je zahříván v peci na potřebnou teplotu. Z této ztráty lze vyčíst zastoupení teplem rozložitelných látek, které jsou zastoupeny především organickým materiálem, ale zároveň i úbytkem hmotnosti, který vzniká při rozkladu dalších složek. Na rozdíl od DTA není při této analýze nutné vzorky zdrobňovat, jelikož se vkládají do větších kelímků a není zjišťována kvantifikace fázového složení vzorku.

Pro provedení zkoušky se nejprve vzorek vkládá do předem zváženého keramického kelímku, který je odolný vůči vysokým teplotám. Kelímek se vzorkem se zváží a vloží do pece, ve které je nastavený určitý dostatečně dlouhý pálící režim pro zajištění rozkladu celého vzorku. Pro tuto práci byly vzorky vystavené teplotě 1000 °C s nárůstem teploty 10 °C·min<sup>-1</sup>. Teplotě 1200 °C byly vystaveny pouze vzorky drcené při vzdálenosti čelistí drtiče 8 mm, aby bylo možné porovnat, zda se skutečně při teplotě 1000 °C rozloží všechny složky a zda vznikne rozdíl v mineralogickém složení takto termicky upravených odřezků. Po vychladnutí se kelímky zváží a dle vzorce se vypočte procentuální úbytek hmotnosti vzorků.





$$Z\check{z} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100$$

ZŽ - ztráta žiháním [%]

$m_1$  - hmotnost vzorku před žiháním [g]

$m_2$  - hmotnost vyžihaného vzorku [g]



*Obr. č. 30 a 31: Pec od firmy CLASIC a připravený vzorek frakce 8 - 16 mm pro termický rozklad*

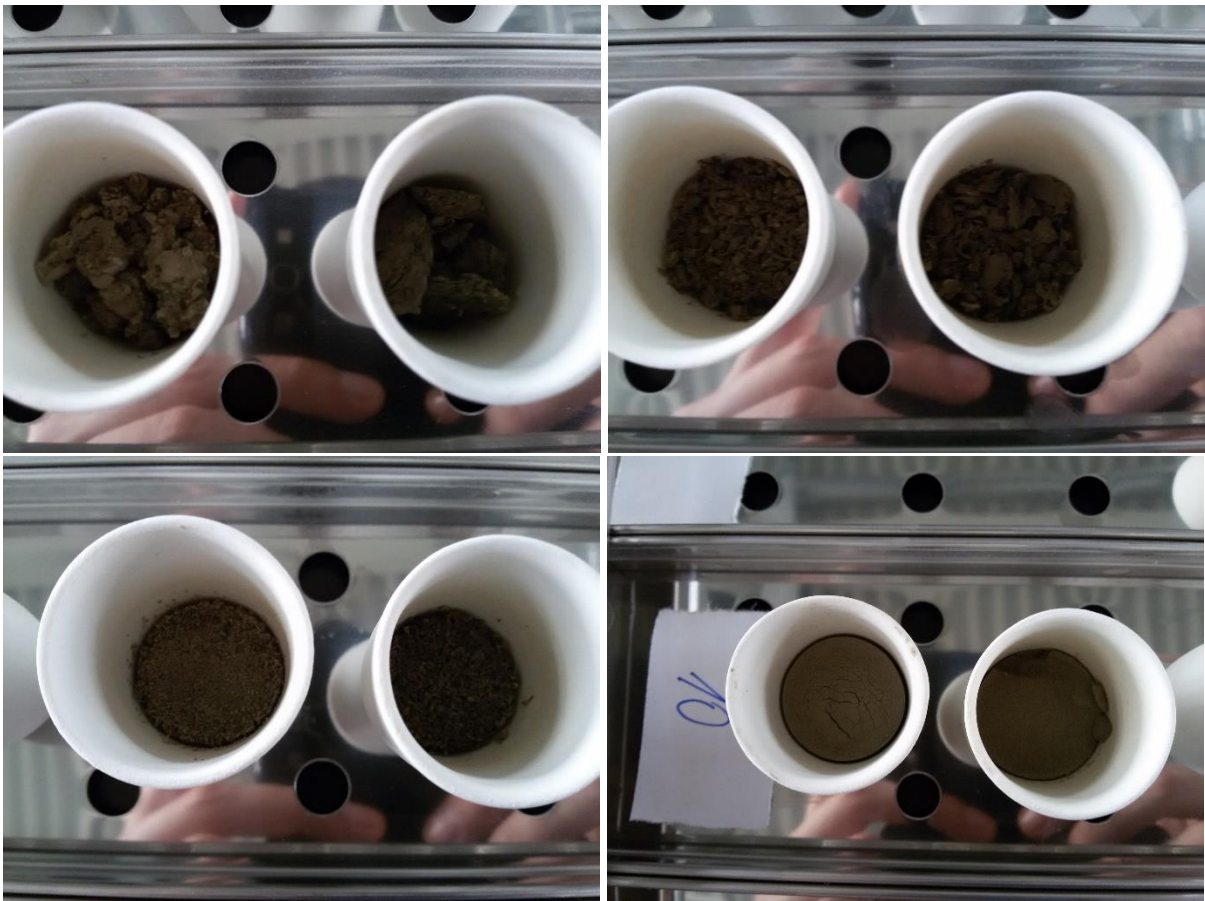


*Obr. č. 32: Nadrcené vzorky rozříděné do jednotlivých frakcí před výpalem*



*Obr. č. 33: Vzorky v peci při teplotě 1000 °C*

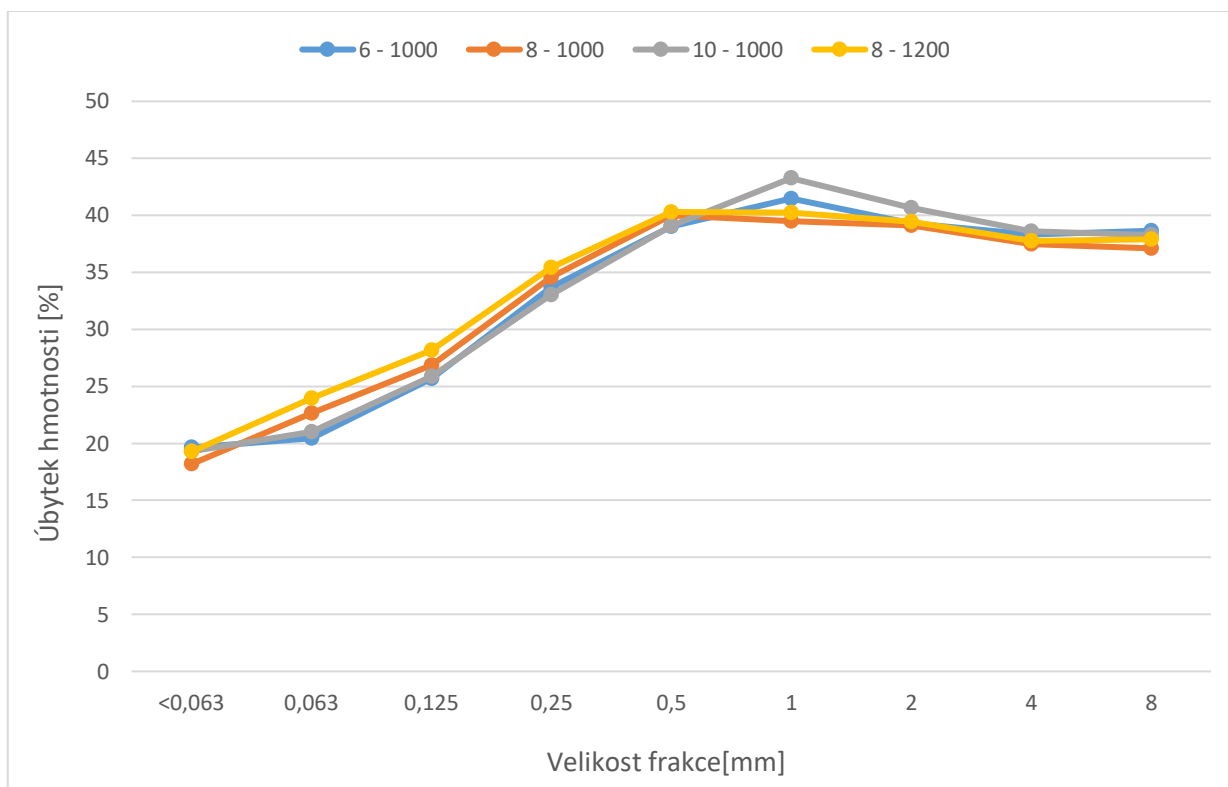




Obr. č. 34 až 37: Nadrcené vzorky roztržiděné do frakcí a vypálené na 1000 °C seřazené od nejhrubší frakce (levý horní obrázek) po frakci nejnižší (pravý dolní obrázek).

Tab. č. 15: Souhrn úbytků hmotnosti jednotlivých frakcí po vypálení

frakce [mm]	% úbytek hmotnosti při různých vzdálenostech drtících čelistí [mm] a různé vypalovací teplotě [°C]			
	6 - 1000	8 - 1000	10 - 1000	8 - 1200
<0,063	19,6	18,2	19,3	19,3
0,063	20,5	22,6	21,0	24,0
0,125	25,7	26,9	25,9	28,2
0,25	33,7	34,6	33,1	35,4
0,5	39,0	40,0	39,1	40,3
1	41,5	39,5	43,3	40,2
2	39,3	39,1	40,7	39,4
4	38,3	37,5	38,6	37,8
8	38,6	37,1	38,3	37,9



*Graf č. 3: Úbytek hmotnosti nadrcených cementotřískových desek při různých vzdálenostech čelistí drtiče (6, 8, 10 mm), pálených při teplotě 1000 °C a vzorku drceném při vzdálenostech čelistí drtiče 8 mm a páleného při teplotě 1200 °C*

Ze všech křivek v grafu je jasně pozorovatelné, že nejnižší zastoupení dřevních třísek je ve frakci pod 0,063 mm a s rostoucí frakcí rostou i hmotnostní úbytky. Největší a téměř totožný obsah dřevních třísek je obsažen ve vzorcích s frakcí nad 0,5 mm, které zaznamenaly hmotnostní úbytek přibližně 39 %.

Dále jsou vidět nepatrné rozdíly v úbytcích hmotností desek drcených při různých vzdálenostech čelistí drtiče. Vzorek pálený při vyšší teplotě (žlutá křivka) má přibližně o 2 % větší úbytek hmotnosti ve frakcích 0,063 – 0,25 mm, dále jsou úbytky téměř totožné s úbytky vzorku páleného při teplotě 1000 °C a drceného při totožných vzdálenostech čelistí drtiče (oranžová křivka). Z grafu nelze vyčíst zcela jasná závislost mezi rozdílně drcenými vzorky a úbytky hmotností. Je však patrné, že nejmenší hmotnostní úbytek byl v případě zrn menších, než 63 μm zaznamenán v případě drcení při výchozí vzdálenosti čelistí 8 mm, což svědčí o skutečnosti, že se v tomto vzorku nachází nejméně dřevní hmoty.

#### 4.2.4.4 RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA

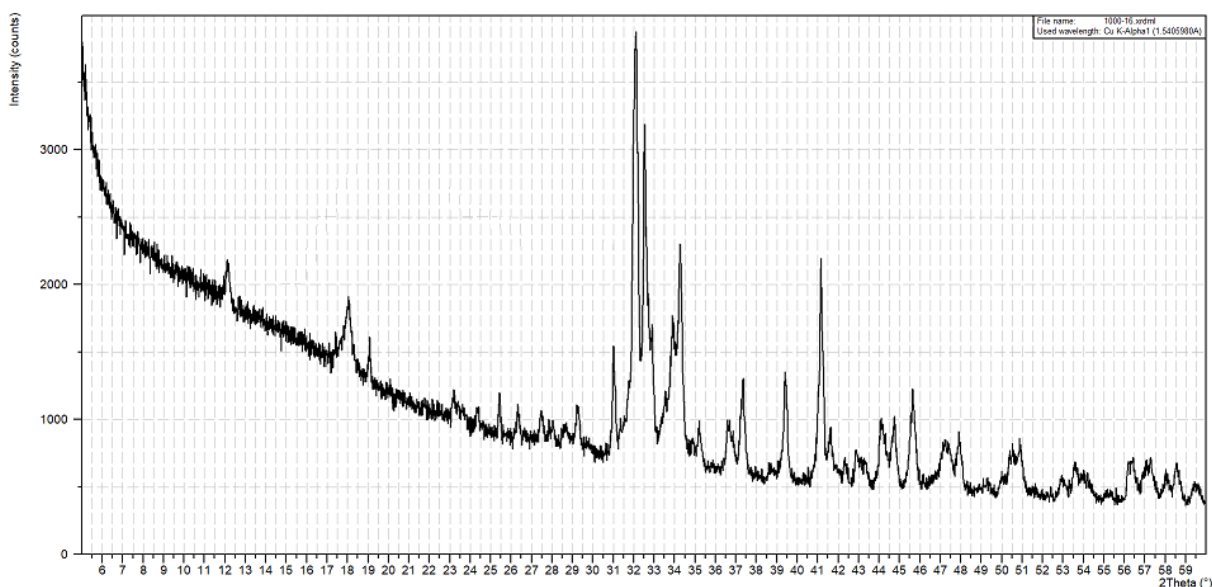
Jedná se o metodu k určování struktury krystalických látek. Je založena na skutečnosti, že rozměry krystalové mřížky jsou srovnatelné s vlnovou délkou rentgenového záření. Na

krystalové mřížce tak může docházet k difrakci záření. Jelikož je vzor krystalu periodický, je difrakční vzor záření po průchodu krystalem v poměrně dobrém vztahu se strukturou krystalu.

Na jednotlivých vypálených frakcích odpadu byly provedeny XRD analýzy. Jednalo se o vzorky, které byly drceny v čelistovém drtiči o vzdálenosti čelistí 8 mm a páleny při teplotě 1000 a 1200 °C.

Důvodem této analýzy bylo zjistit, zda odpad po vypálení bude obsahovat složky, které mají určité pojivové vlastnosti. V případě, že by odpad po vypálení získal částečné pojivové schopnosti, by bylo možné s ním dále nakládat jako s příměsí, která by mohla nahrazovat část cementu nejen v cementotřískových deskách.

Analýze byly podrobeny všechny jednotlivé frakce termicky upravené při 1000 a 1200 °C. Ukázalo se, že výstupy od všech frakcí byly téměř totožné. Dle výstupů z XRD jsou v termicky upravených odřezcích obsaženy převážně kalciumsilikáty ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) a stopově trikalcium alumináty. Kalciumsilikáty a trikalcium alumináty jsou produkty, které se nachází v portlandském cementu a z toho je možné usuzovat, že cement, který zhydratoval v deskách při jejich výrobě, byl tímto výpalem částečně znovu rozložen na slínkové minerály. Dále lze předpokládat, že takto upravené odřezky by mohly mít určité pojivové vlastnosti.



Graf č. 4: Difraktogram reprezentativního vzorku odřezků frakce 8-16 mm vypáleného na 1000 °C a drceného při vzdálenostech čelistí drtiče 8 mm

#### 4.2.4.5 DIFERENČNÍ TERMICKÁ ANALÝZA (DTA)

Výsledky z DTA dodávají konkrétnější přehled o chování v zahřívaném vzorku než ztráta žíháním. Úbytky hmotnosti jsou monitorovány a zaznamenávány v průběhu celé zkoušky. DTA bylo provedeno na vzorcích odřezků z cementotřískových desek dodaných přímo z výroby.

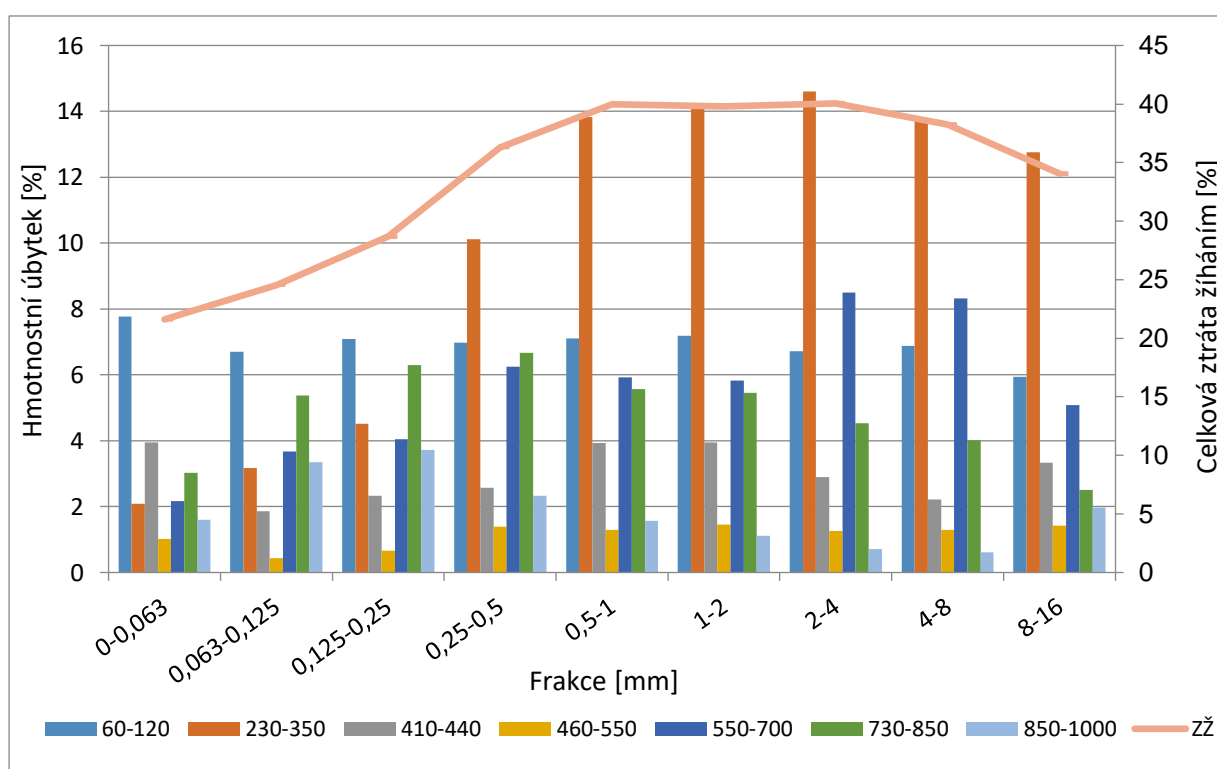
Diferenční termická analýza byla provedena dle metodického postupu VUT FAST, č. 30-33/1. DTA je dynamická, tepelně analytická metoda. Je založena na měření rozdílů teplot v závislosti na teplotě mezi zkoušeným a standardizovaným vzorkem, současně vyhřívanými konstantní rychlostí v peci. Na výsledné křivce je patrné tepelné zabarvení reakce, které se projeví maximy a minimy v exotermní a endotermní oblasti. Další část výsledku tvoří termogravimetrie (TG), která sleduje kvantitativní změnu hmotnosti vzorku jako funkci lineárně se měnící teploty. Poslední křivka na záznamu je derivační křivka (DTG) která vyjadřuje závislost rychlosti změny hmotnosti vzorku na teplotě.

V případě mletého odpadu z cementotřískových desek se reakce materiálu, při tepelném zatěžování, dělí na několik oblastí. První reakce, která je patrná v teplotním úseku 60 - 120 °C, je způsobena odpařováním vody. Druhá je způsobena vyhoříváním organických plniv, která probíhala nejsilněji mezi 230 a 350 °C. Mezi 350 - 410 °C je mírná endotermní prodleva a následuje další exotermní reakce způsobená vyhoříváním dřeva při 410 - 440 °C. Dřevo mineralizované vodním sklem a cementová matrice ale může teoreticky pomalu vyhořívát ještě při vyšších teplotách. Tento rozklad organického materiálu je však už obtížně rozlišitelný od rozkladu hydratačních produktů cementu. V teplotním rozmezí 230 – 440 °C by také mohlo docházet k rozkladu CSH struktur ze zbytků cementové matrice. Rozklad portlanditu ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) je patrný v rozmezí 460 - 550 °C. Mezi 550 °C a 700 °C dochází k dalšímu značnému rozkladu CSH fází cementové matrice. Na tuto reakci navazuje poslední výrazná reakce, které je v oblasti 730 - 1000 °C a je způsobena rozkladem uhličitánů.

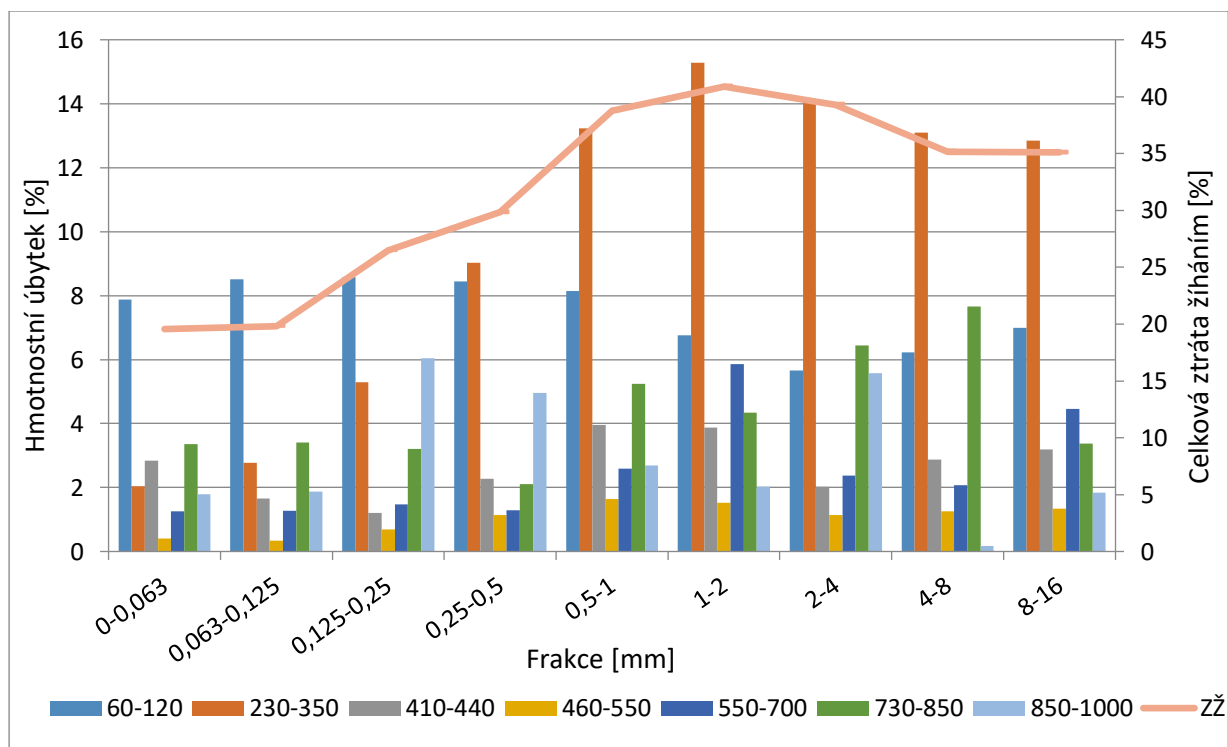
Tab. č. 16: Znázornění reakcí, které se dějí ve vzorku při nárůstu teploty pomocí DTA

60-120	230-350	410-440	460-550	550-700	730-850	850-1000
výpar vody	exotermický rozklad dřeva	exotermický rozklad dřeva	rozklad $\text{Ca}(\text{OH})_2$	rozklad CSH gelů	rozklad uhličitánů, převážně $\text{CaCO}_3$	zbytkový rozklad uhličitánů
	rozklad CSH gelů	rozklad CSH gelů	zbytkový rozklad dřeva	zbytkový rozklad dřeva		

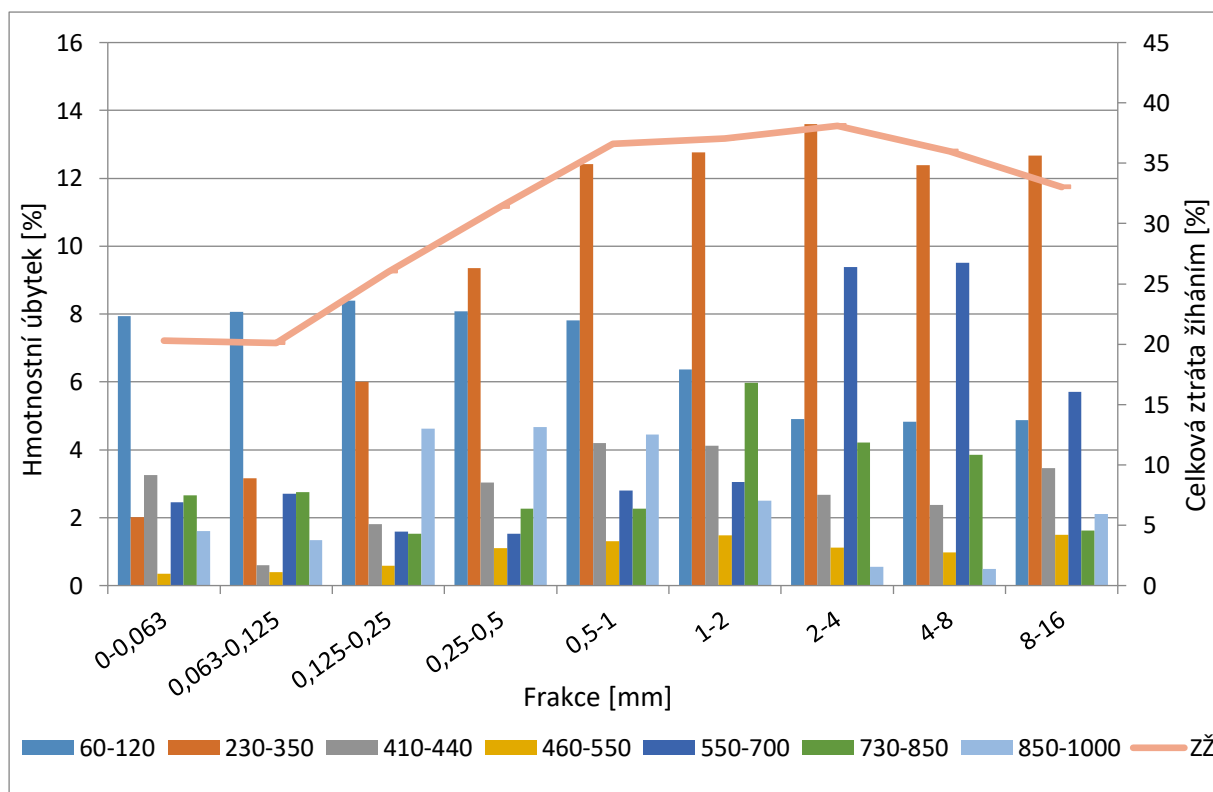
Poznámka: K celkovému rozkladu dřevních třísek by mělo dojít při teplotách 400 – 500 °C, ale vzhledem k jejich mineralizaci vodním sklem, síranem hlinitým a cementem je možné, že dochází k jejich rozkladu i při teplotách vyšších.



Graf č. 5: Znázornění úbytků hmotností vzorků v jednotlivých teplotních rozmezech v kombinaci s celkovým úbytkem hmotnosti jednotlivých frakcí CETRIS odpadu. Pro odřezky drcené při vzdálenostech čelistí drtiče 6 mm.



Graf č. 6: Znáznornění úbytků hmotností vzorků v jednotlivých teplotních rozmezech v kombinaci s celkovým úbytkem hmotnosti jednotlivých frakcí CETRIS odpadu. Pro odřezky drcené při vzdálenostech čelistí drtiče 8 mm.



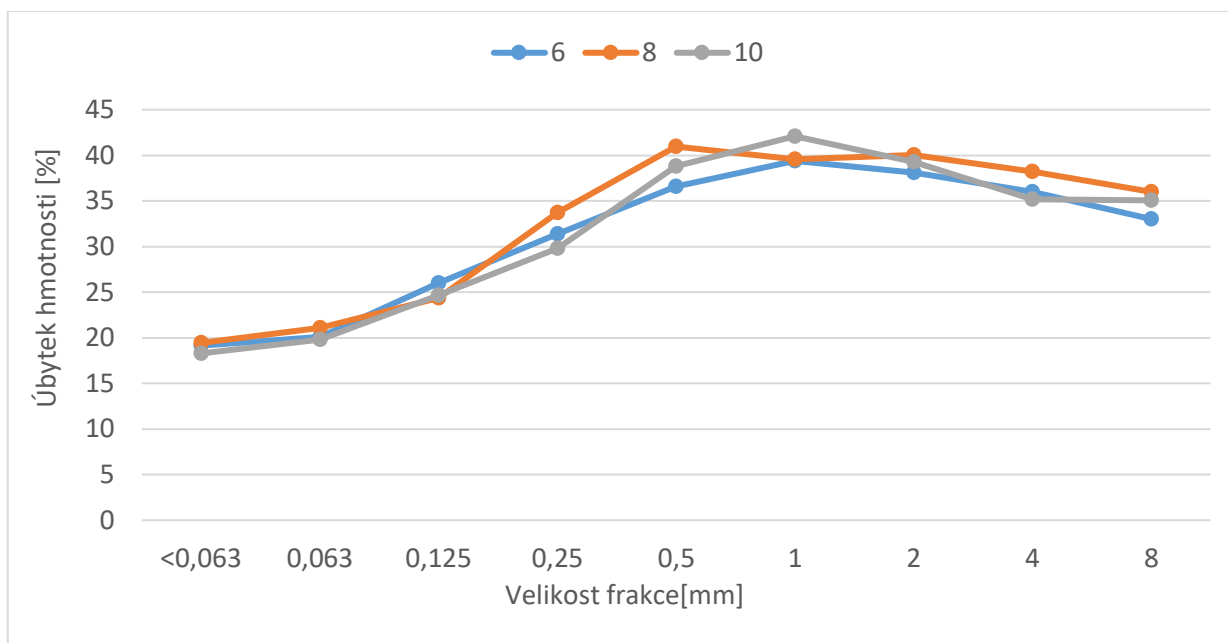
Graf č. 7: Znáznornění úbytků hmotností vzorků v jednotlivých teplotních rozmezech v kombinaci s celkovým úbytkem hmotnosti jednotlivých frakcí CETRIS odpadu. Pro odřezky drcené při vzdálenostech čelistí drtiče 10 mm.

Z grafů jsou viditelné jednotlivé úbytky hmotností vzorků v jednotlivých teplotních rozmezích. Do grafů byla přiložena křivka znázorňující celkové hmotnostní úbytky jednotlivých frakcí. Tato kombinace ukazuje, jak s rostoucím obsahem dřevních třísek ve frakcích nad 0,5 mm tato křivka roste.

Hmotnost všech vzorků se po odpaření vody snížila přibližně o 6 až 8 % bez zjevné závislosti na typu vzorku. Úbytky způsobené vyhoříváním dřeva v intervalu 230 - 350 °C se postupně zvyšovaly (od 2 %) až ke frakci 1-2 mm, kde byl zaznamenán největší hmotnostní úbytek (cca. 14,5 %), který směrem k vyšším frakcím mírně klesal (cca. 12,5 %). Podobně, ačkoliv s mírnými výkyvy, tomu bylo i v intervalu 410 - 440 °C. Z rozkladu portlanditu (460 - 550 °C) u nejmenší frakce 0 - 0,063 mm, která v podstatě obsahuje pouze cementovou matici, byl určen přibližný obsah portlanditu ve vzorcích cca 4 %. Rozkladem uhličitanů došlo ke snížení hmotnosti vzorku o 4 - 10 %, a to bez zjevnějších souvislostí s velikostí zkoušené frakce odpadu.

*Tab. č. 17: Hodnoty vyjadřující DTA - úbytek hmotnosti odpadu při různých vzdálenostech čelistí drtiče. Rozdělené do jednotlivých frakcí.*

Velikost frakce [mm]	DTA - Úbytek hmotnosti odpadu [%] při různých vzdálenostech čelistí drtiče [mm]		
	6	8	10
<0,063	19,1	19,4	18,3
0,063	20,1	21,1	19,8
0,125	26,0	24,4	24,6
0,25	31,4	33,7	29,8
0,5	36,6	41,0	38,8
1	39,4	39,6	42,1
2	38,1	40,1	39,3
4	36,0	38,2	35,2
8	33,0	36,0	35,1



Graf č. 8: Pomocí DTA naměřený úbytek hmotnosti nadrcených cementotřískových desek při různých vzdálenostech čelistí drtiče (6, 8, 10 mm)

Pomocí DTA byly celkové hmotnostní úbytky téměř totožné jako při zkoušce ztráty žíháním, která je popsána v předchozí kapitole. I zde můžeme konstatovat, že nejnižší zastoupení dřevních třísek je ve frakci pod 0,063 mm a s rostoucí frakcí rostou i hmotnostní úbytky. Největší a obsah dřevních třísek je obsažen ve vzorcích s frakcí nad 0,5 mm, které zaznamenaly hmotnostní úbytek přibližně 38 %.

## 4.3 Vliv příměsí na vlastnosti cementové malty

Vliv náhrady části cementové složky příměsí byl pozorován nejprve na cementové maltě, aby bylo možné vytvořit více receptur, a to z důvodu menší pracnosti výroby zkušebních těles.

### 4.3.1 NÁVRH RECEPTUR

Nejprve byly navrženy receptury pro zhotovení zkušebních těles rozměrů 40 x 40 x 160 mm. Tyto trámečky se vytvářejí snadněji, než cementotřískové desky a je možné na nich dobře vyhodnotit chování jednotlivých příměsí v cementové matici. Tím je možné dosáhnout rozsáhlejšího průzkumu, která příměs či v jak velkém množství je případně použitelná do cementotřískových desek a následně pak věnovat pozornost již pouze optimalizovaným recepturám. Nahrazování cementu příměsemi bylo počítáno objemově. To znamená, že náhrada příměsí za cement měla odlišnou hmotnost, a to kvůli odlišné měrné hmotnosti použitých příměsí.



Tab. č. 18 a 19: Receptury a jejich označení použité pro zhotovení zkušebních těles 40 x 40 x 160 mm

	REF	VAP10	VAP15	VAP20	SKV10	SKV15	SKV20
<b>cement</b>	512	460	435	409	460	435	409
<b>kamenivo 0-4</b>	1535						
<b>voda</b>	256						
<b>příměs</b>	-	43	64	86	45	67	89

	POP10	POP15	POP20	DOD10	DOD15	DOD20
<b>cement</b>	460	435	409	460	435	409
<b>kamenivo 0-4</b>	1535					
<b>voda</b>	256					
<b>příměs</b>	36	54	72	43	64	85

REF = referenční receptura, čísla 10, 15 a 20 = množství příměsí, která nahrazuje částečný obsah cementu. Údaje jsou udávány v kg/m<sup>3</sup>.

VAP = vápenec

SKV = škvára

POP = popílek

DOD = Drcené odřezky z CETRIS desek, který propadl sítím o velikosti ok 0,063 mm.

### 4.3.2 PRŮBĚH MÍCHÁNÍ A ZRÁNÍ

Malta pro zkušební tělesa byla míchána pro objem cca 3 litry ručním míchadlem. Složky byly nejprve smíchány suché a následně promíchány s vodou po dobu zhruba 60 sekund. Malta byla hutněna v ocelových formách na vibračním stoleu přibližně 20 sekund. Po zhotovení byly formy ihned přesunuty do proteplovací komory, a to na 8 hod při teplotě 45 °C, aby byl simulován stejný proces, jako je tomu u cementotřískových desek. Po proteplení byla zkušební tělesa ponechána v laboratorních podmínkách po dobu 7 dní a následně byla opět přesunuta do proteplovací komory, ale tentokrát po dobu 12 hod na teplotu 75 °C. Sada zkušebních těles pro každé stáří se sestávala vždy ze 3 kusů normových hranolů, a to pro zkoušení po 8 hod, 9, 14, 28 a 90 dnech. Tělesa byla mimo čas proteplování ponechána v laboratorních podmínkách, tj. při teplotě přibližně 22 °C a relativní vlhkosti přibližně 45 %.

### 4.3.3 PROVÁDĚNÉ ZKOUŠKY

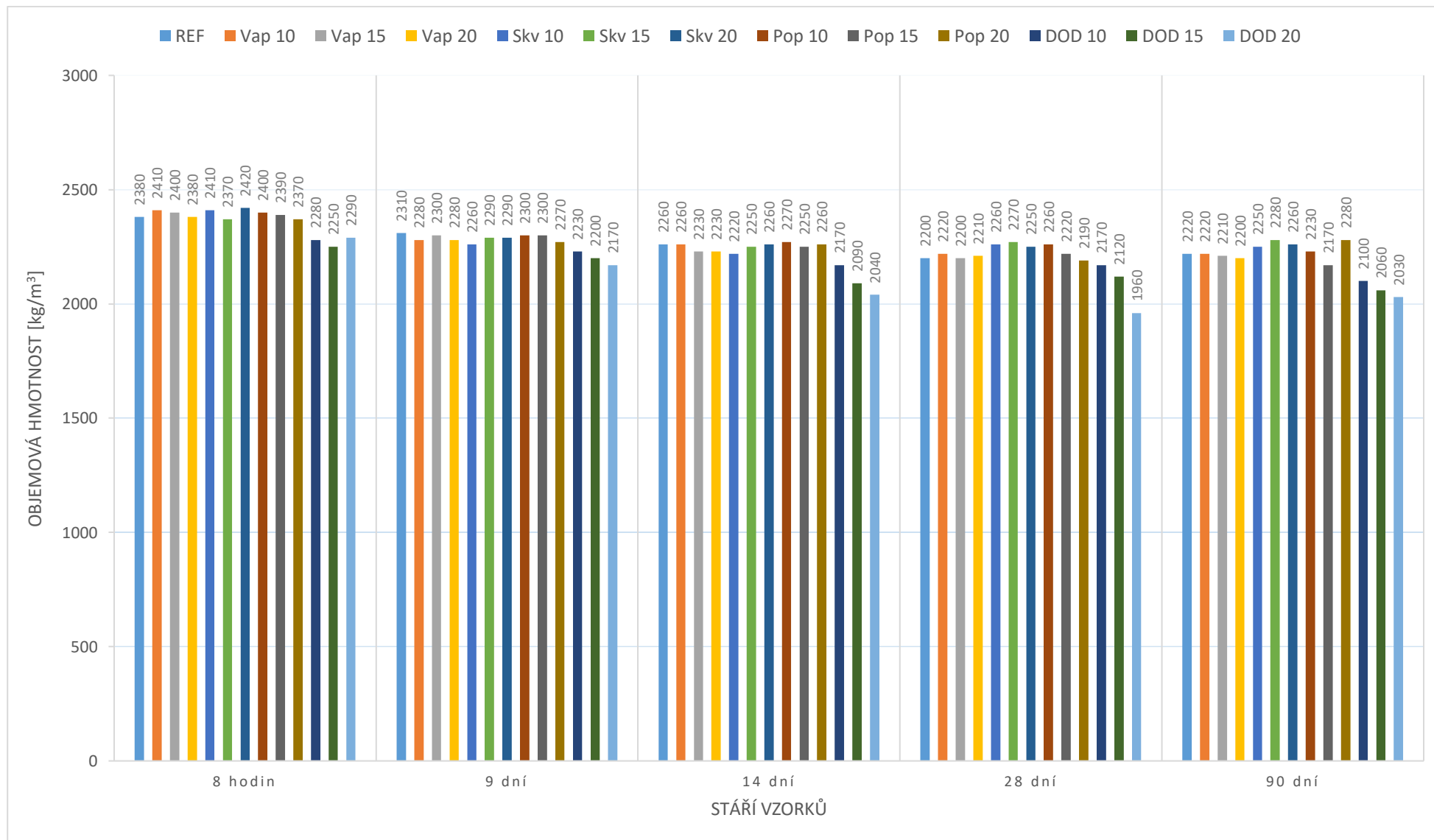
Na všech tělesech byla určována jejich objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu, pevnost v tlaku a v tahu za ohybu po 8 hod, 9, 14, 28 a 90 dnech. Vzorky byly také podrobeny DTA ve stáří 28 dní.

#### 4.3.3.1 OBJEMOVÁ HMOTNOST

Postup stanovení objemové hmotnosti byl metodicky proveden dle ČSN EN 196-1. Podstatou této zkoušky je zjištění poměru hmotnosti zkušebního tělesa ku jeho objemu.

Tab. č. 20: Změna objemové hmotnosti jednotlivých vzorků po různé době zrání

Receptura	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]				
	8 [h]	9 [d]	14 [d]	28 [d]	90 [d]
<b>REF</b>	2380	2310	2260	2200	2220
<b>VAP 10</b>	2410	2280	2260	2220	2220
<b>VAP 15</b>	2400	2300	2230	2200	2210
<b>VAP 20</b>	2380	2280	2230	2210	2200
<b>SKV 10</b>	2410	2260	2220	2260	2250
<b>SKV 15</b>	2370	2290	2250	2270	2280
<b>SKV 20</b>	2420	2290	2260	2250	2260
<b>POP 10</b>	2400	2300	2270	2260	2230
<b>POP 15</b>	2390	2300	2250	2220	2170
<b>POP 20</b>	2370	2270	2260	2190	2280
<b>DOD 10</b>	2280	2230	2170	2170	2100
<b>DOD 15</b>	2250	2200	2090	2120	2060
<b>DOD 20</b>	2290	2170	2040	1960	2030



Graf č. 9: Vliv příměsí na objemovou hmotnost ztvrdlé malty, po různé době zrání

Rozdíl v objemových hmotnostech malt s různou příměsí se u všech receptur kromě DOD 10-20 pohyboval přibližně kolem hodnoty 40 kg/m<sup>3</sup>. Z grafu je patrné, jak se s dobou zrání postupně snižuje objemová hmotnost vzorků výparem vody. Lze konstatovat, že nahrazení cementu příměsí v těchto dávkách ovlivní objemovou hmotnost téměř zanedbatelně. Zajímavý je fakt, že v případě nahrazení cementu upravenými odřezky z CETRIS desek se ve většině případech objemová hmotnost snižuje s přibývajícím náhradou až o zhruba 200 kg/m<sup>3</sup>. Ke snižování by teoreticky nemělo docházet, jelikož odpad z CETRIS desek je v podstatě zreagovaný cement s minimálním podílem dřevních třísek a má obdobnou měrnou hmotnost jako škvára nebo vápenec. Toto snižování objemové hmotnosti korespondovalo se snižováním pevností zkušebních těles.

#### 4.3.3.2 PEVNOST V TAHU ZA OHYBU

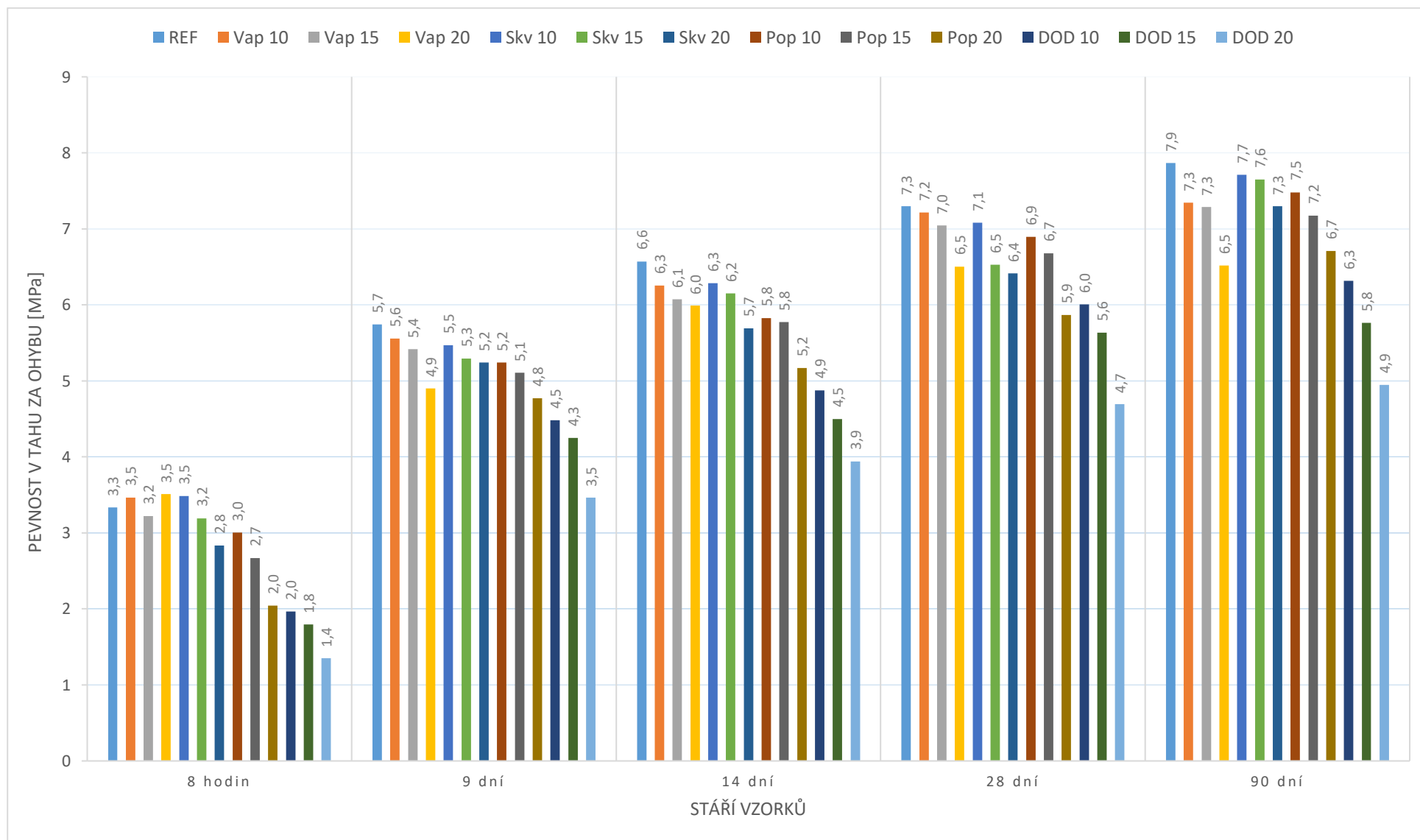
Zkouška byla prováděna dle normy pro cementové malty ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti. Pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu byly použity tři trámečky, a to pro doby zrání 8 hodin, 9, 14, 28 a 90 dní.



Obr. č. 38: Porušené těleso umístěné v lisu, po zkoušení pevnosti v tahu za ohybu

Tab. č. 21: Změna pevnosti malt v tahu za ohybu, po různé době zrání.

	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]				
	8 [h]	9 [d]	14 [d]	28 [d]	90 [d]
<b>REF</b>	3,3	5,7	6,6	7,3	7,9
<b>VAP 10</b>	3,5	5,6	6,3	7,2	7,3
<b>VAP 15</b>	3,2	5,4	6,1	7,0	7,3
<b>VAP 20</b>	3,5	4,9	6,0	6,5	6,5
<b>SKV 10</b>	3,5	5,5	6,3	7,1	7,7
<b>SKV 15</b>	3,2	5,3	6,2	6,5	7,6
<b>SKV 20</b>	2,8	5,2	5,7	6,4	7,3
<b>POP 10</b>	3,0	5,2	5,8	6,9	7,5
<b>POP 15</b>	2,7	5,1	5,8	6,7	7,2
<b>POP 20</b>	2,0	4,8	5,2	5,9	6,7
<b>DOD 10</b>	2,0	4,5	4,9	6,0	6,3
<b>DOD 15</b>	1,8	4,3	4,5	5,6	5,8
<b>DOD 20</b>	1,4	3,5	3,9	4,7	4,9



Graf č. 10: Vliv příměsí na pevnost malt v tahu za ohybu, po různé době zrání

Obecně lze z grafu vyčíst, že žádná s příměsí nezvyšuje pevnosti více než cement a s její přibývajícím dávkou pevnosti postupně klesají.

Na maltách obsahujících jemně mletý vápenec (VAP), zkoušených po 8 hodinách, byly pozorovatelné mírně vyšší pevnosti oproti referenčním vzorkům. V dalších dobách zrání byly pevnosti nižší o 2 - 20 %. Obdobný průběh vykazovaly malty s obsahem škváry (SKV), ale po 90 dnech zrání se svými pevnostmi téměř ztotožnily se zkušebními tělesy referenčními. Po 8 hodinách bylo dosaženo zhruba 45% pevností z pevností po 28 dnech. U cementotřískových desek by měly být tyto manipulační 8 hodinové pevnosti přibližně 60%.

Malty s obsahem popílku (POP) poukazují na skutečnost, že s rostoucím obsahem příměsí se snižují pevnosti v každém stáří vzorků. Popílek je příměs, která reaguje mnohem pomaleji než cement, a to je vidět v grafu, jak se s přibývajícím dobou zrání popílku snižuje rozdíl v pevnosti oproti referenčním vzorkům.

Odřezky z CETRIS desek (DOD) snižují pevnosti o 20 - 50 % oproti referenčním vzorkům. S velkou pravděpodobností za to může minimální reaktivita této alternativní suroviny, jelikož je to v podstatě rozemletý zhydratovaný cement s případným stopovým množstvím dřevních třísek. Přídavek odpadu do malty měl nejvýraznější negativní vliv na pevnosti, ze všech příměsí.

### 4.3.3.3 PEVNOST V TLAKU

Zkouška byla prováděna dle normy pro cementové malty ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti. Pro stanovení pevnosti v tlaku byly použity tři zkušební tělesa, a to pro doby zrání 8 hodin, 9, 14, 28 a 90 dní.

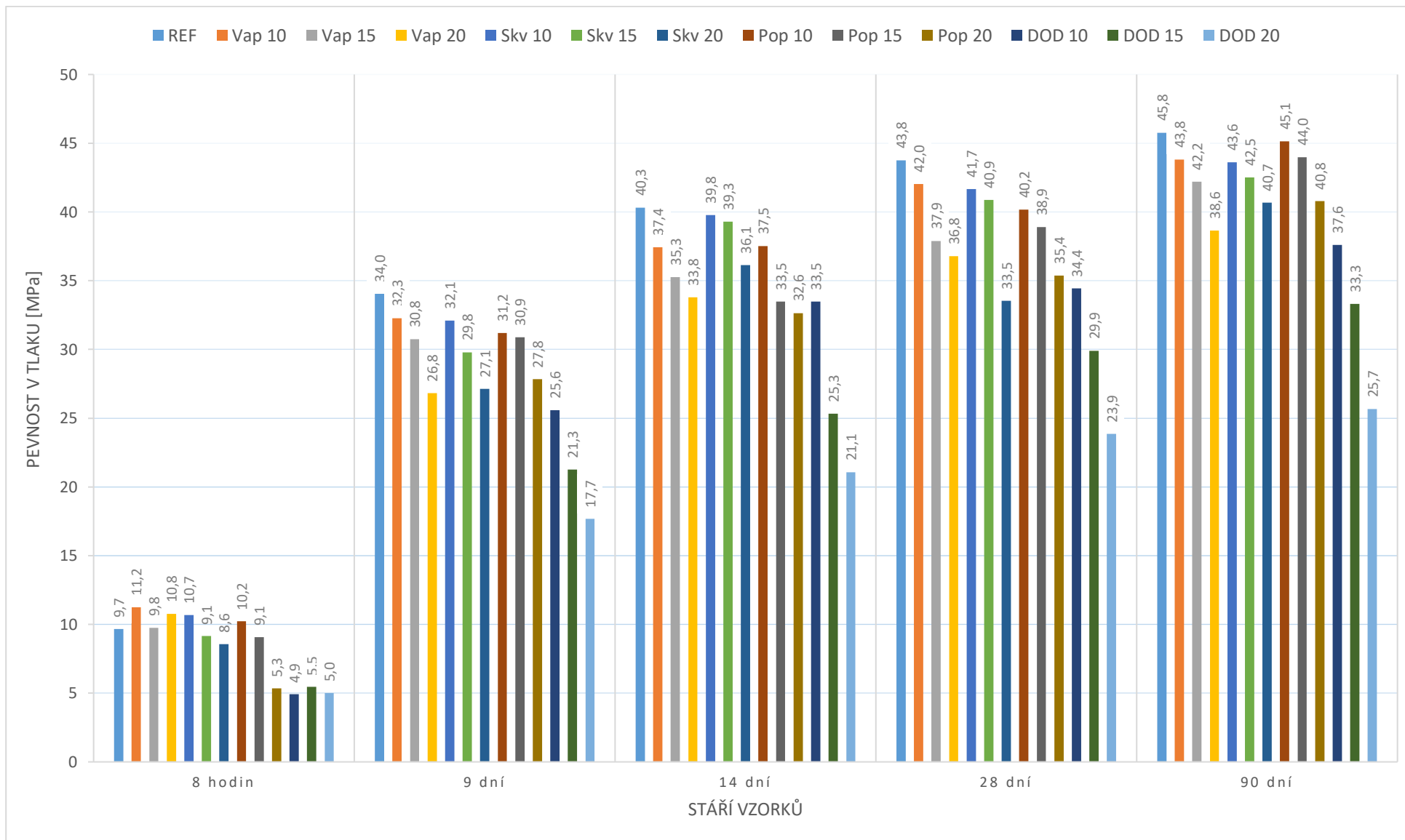


Obr. č. 39: Těleso umístěné v lisu pro zkoušení pevnosti v tlaku

Níže v tabulce (viz tab. č. 22) jsou uvedeny průměrné stanovené hodnoty pevnosti v tlaku malt s matricí modifikovanou alternativními surovinami.

Tab. č. 22: Průměrné pevnosti testovaných malt v tlaku v závislosti na době zrání

	Pevnost v tlaku [MPa]				
	8 [h]	9 [d]	14 [d]	28 [d]	90 [d]
<b>REF</b>	9,7	34,0	40,3	43,8	45,8
<b>VAP 10</b>	11,2	32,3	37,4	42,0	43,8
<b>VAP 15</b>	9,8	30,8	35,3	37,9	42,2
<b>VAP 20</b>	10,8	26,8	33,8	36,8	38,6
<b>SKV 10</b>	10,7	32,1	39,8	41,7	43,6
<b>SKV 15</b>	9,1	29,8	39,3	40,9	42,5
<b>SKV 20</b>	8,6	27,1	36,1	33,5	40,7
<b>POP 10</b>	10,2	31,2	37,5	40,2	45,1
<b>POP 15</b>	9,1	30,9	33,5	38,9	44,0
<b>POP 20</b>	5,3	27,8	32,6	35,4	40,8
<b>DOD 10</b>	4,9	25,6	33,5	34,4	37,6
<b>DOD 15</b>	5,5	21,3	25,3	29,9	33,3
<b>DOD 20</b>	5,0	17,7	21,1	23,9	25,7



Graf č. 11: Vliv příměsí na pevnosti malt v tlaku, po různé době zrání



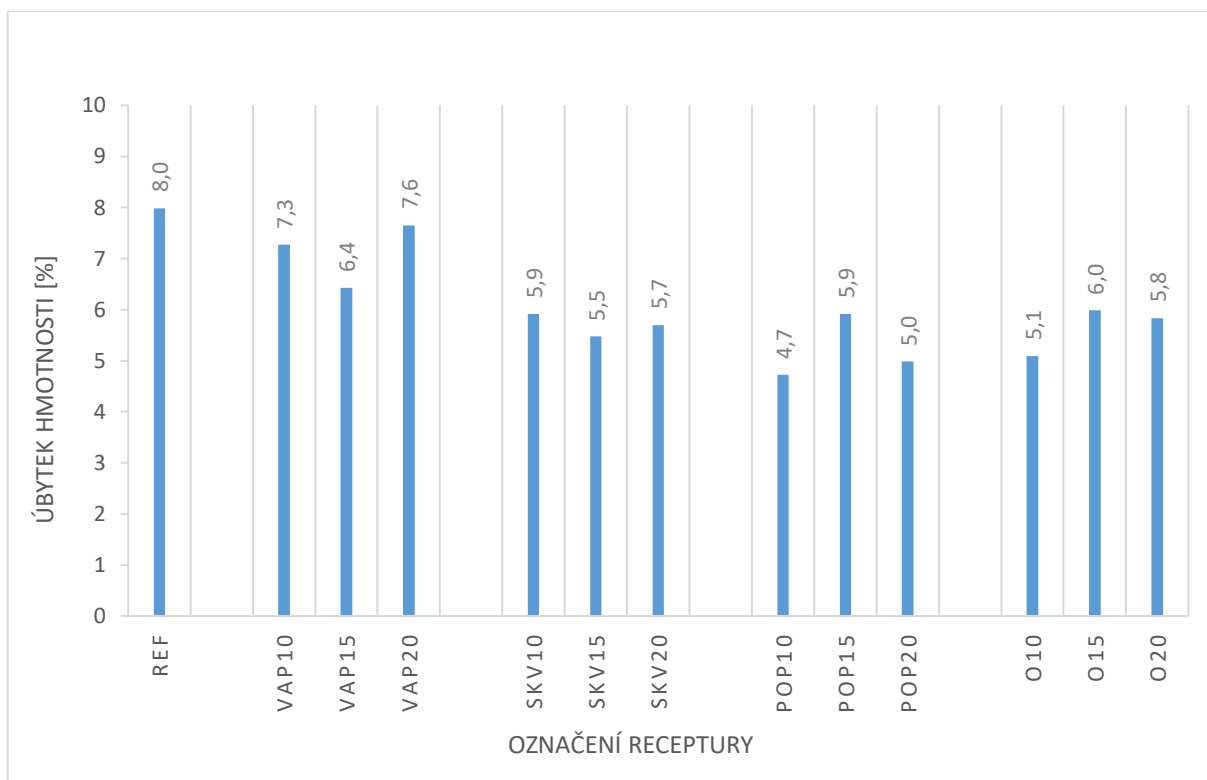
Průběhy pevností v tlaku jsou obdobné jako tomu je u pevností v tahu za ohybu. I zde se potvrzuje mírně vyšší pevnost vzorků s vápencem (VAP) po 8 hodinách oproti vzorkům referenčním a následné snížení při dalších dobách zrání. Je zde také patrné, že po 90 dnech zrání vzorků s popílkem dochází k těsnému přiblížení k pevnostem referenčních vzorků.

Z výsledků pevností v tahu za ohybu a v tlaku lze vybrat tři varianty a to VAP10, SKV15 a POP15. Tyto varianty vykazují nejlepší poměr mezi obsahem příměsí a dosaženými pevnostmi. Všechny varianty s 20% obsahem příměsí mají značný vliv na pevnosti malt a je pravděpodobné, že to bude stejné i u cementotřískových desek, což bude zohledněno při optimalizaci stávající receptury cementotřískové desky s využitím výše uvedených alternativních surovin.

#### 4.3.3.4 DIFERENČNÍ TERMICKÁ ANALÝZA

DTA byla provedena pro všechny receptury a to po 28 dnech zrání. V první fázi probíhá vždy odpařování vody při teplotách přibližně 60 - 150 °C, a tím vzniká výrazný endotermický pík. Další mnohem menší endotermický efekt při teplotě 300 - 400 °C je způsoben dehydroxylací CSH fází cementu. Rozklad portlanditu ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) je patrný při teplotě cca 500 °C. Poslední reakci můžeme uvést v teplotním rozmezí 700 - 900 °C, která je způsobena rozkladem  $\text{CaCO}_3$ .

Rozdíly v mineralogickém složení jednotlivých receptur byly lépe viditelné až při 15 a 20% nahrazení cementu příměsí. Nejlépe viditelná změna nastala u receptury VAP 20, a to v oblasti rozkladu  $\text{CaCO}_3$ , kde došlo k viditelnému zvětšení této reakce. Je to dáno tím, že byl do malty přidáván právě vápenec. U receptur s přidavkem odřezků z cementotřískových desek nedošlo k žádným změnám, a to ani v oblasti, ve které vyhořívá dřevo. To dokazuje, že frakce pod 0,063 mm neobsahuje dřevní třísky nebo pouze stopově. U všech receptur s rostoucím přidavkem příměsí docházelo k postupnému poklesu obsahu portlanditu vzhledem k receptuře referenční. Obsah portlanditu v referenční receptuře byl přibližně 1,5 % a s rostoucí dávkou příměsí jeho obsah klesal až k 1 %.



Graf č. 12: Vliv obsahu příměsí na změnu hmotnostního úbytku po DTA

Celkové hmotnostní úbytky po DTA se pohybovaly v rozmezí od 5 do 8 %. Úbytek hmotnosti referenčního vzorku byl nejvyšší a to 8 %. Je to dáno nejspíše tím, že hydratační produkty cementu jsou náchylnější k dehydroxylaci vlivem teploty než použité příměsi a popř. jejich hydratační produkty. Toto tvrzení potvrzuje fakt, že úbytky v oblasti 250 - 1000 °C jsou u referenční receptury ve všech zmiňovaných teplotních oblastech větší než u receptur obsahující příměs. Výjimka nastala v případě receptur s vápencem (VAP), kde bylo množství  $\text{CaCO}_3$  až více jak dvojnásobné (4,35 %) oproti receptuře referenční (2,16 %). V ostatních recepturách obsah vápence klesal s přibývajícím obsahem příměsí až k 1,8 %.

#### 4.4 Vliv příměsí na vlastnosti cementotřískové desky

Cementotřískové desky byly tvořeny ručně v laboratorních podmínkách a lisovány mezi dva ocelové pláty. Forma se skládala ze základní ocelové desky s pěti otvory, v nichž byly matkami připevněné šrouby a dalších ocelových plátů, které se na sebe postupně vrstvil a připevňovaly matkami. V jedné formě bylo možné současně vyrobit 3 cementotřískové desky formátu cca 380 × 380 mm.

#### 4.4.1 NÁVRH RECEPTUR

Desky byly vyráběny podle receptury společnosti Cidem Hranice, a.s., divize CETRIS. Objemové zastoupení složek je zmíněno v teoretické části v kapitole 4.2. Přesně bude uvedeno množství cementu a příměsí, která ho částečně bude nahrazovat. Pro výrobu desek byl použit cement CEM I 42,5 R, smrkové třísky (piliny), síran hlinitý, vodní sklo, voda a popř. příměs.

Na základě výsledků a zjištění z testování cementových malt modifikovaného složení byly pro cementotřískové desky navrženy receptury, kdy byl snížen maximální obsah substituční složky na z 20 % na 15 %, neboť při 20% náhradě docházelo ke značnému ovlivnění vlastností. Naopak byly pro testování zařazeny receptury i s nižším obsahem alternativních surovin a to 5%, čímž bude případně možné vhodně regulovat složení směsi v návaznosti na operativní požadavky při výrobě (rozdílné požadavky v průběhu střídajících se teplotních podmínek během produkce desek).

Tab. č. 23: Receptury (složení matrice) použité pro výrobu cementotřískových desek

Označení receptury	Příměs [g]	Cement [g]
<b>REF</b>	0	2500
<b>VAP 5</b>	105	2375
<b>VAP 10</b>	210	2250
<b>VAP 15</b>	315	2125
<b>SKV 5</b>	109	2375
<b>SKV 10</b>	218	2250
<b>SKV 15</b>	327	2125
<b>POP 5</b>	88	2375
<b>POP 10</b>	175	2250
<b>POP 15</b>	263	2125
<b>DOD 5</b>	104	2375
<b>DOD 10</b>	208	2250
<b>DOD 15</b>	312	2125

## 4.4.2 PŘÍPRAVA DESEK

Nejprve byla provedena homogenizace a částečné vysušení dřevěných třísek. Promíchaná hmota na jednu desku vážila 10 kg. Samotné míchání probíhalo následovně:

1. navážení vstupních surovin – síran hlinitý byl pro lepší rozpuštění rozmícháván v horké vodě
2. míchání pilin
3. přidavek a míchání síranu hlinitého s vodou
4. přimíchání vodního skla smíchaného s vodou
5. přimíchání pojivových složek

Celkové mísení směsi, tj. bod 1. – 5., trvalo cca 5 minut.

Desky byly vytvářeny na ocelových plátech o velikosti 450 x 450 mm. V případě této práce byla snaha napodobit vrstvení cementotřískové hmoty podobně, jako to dělá společnost CETRIS. Deska byla tvořena ve třech vrstvách a to tak, že byla směs vrstvena přes síta o různých velikostech. Spodní a horní vrstva byla prosévána přes jemnější síto o velikosti ok 2 mm, aby bylo dosaženo jemnější povrchové vrstvy (s vyšším obsahem cementové matrice), a tím pádem lepšího vzhledu a lepších mechanických vlastností. Mechanické vlastnosti by se měly zlepšit s ohledem na dosažení hutnější struktury nejvíce namáhané části desky, což je právě její povrch. Tato vrstva měla přibližně 1 - 2 mm. Jádrová část byla vytvořena prosetím hmoty skrz síto o velikosti otvorů 6 mm. Cementotřísková hmota ve střední části byla rovnoměrně urovnána a na ní byla nanášena tenká vrchní vrstva. Důvodem prosévání směsi bylo také dosažení jejího rovnoměrnějšího rozložení v ploše a tím, co nejvíce homogenní struktury desky, neboť vzhledem ke složení směsi a velmi nízkému obsahu vlhkosti má směs pro výrobu cementotřískových desek tendenci při běžném vrstvení vytvářet shluky částic jednotlivých složek (hrudky). Ve výrobním závodě cementotřískových desek jsou pro vrstvení používány speciální zařízení, které kombinují různé metody rozdužování směsi.



*Obr. č. 40: Navrstvená směs pro výrobu cementotřískové desky – povrchové partie obsahující jemnější částice*



*Obr. č. 41: Detail pohledové vrstvy desky*

Celková výška hmoty byla průměrně 34 mm. Ruční vrstvení sebou nese velkou nepřesnost oproti vrstvení strojnímu. Tento fakt považuji za hlavní proměnou, která může výrazně ovlivnit výsledné vlastnosti desek. Po navrstvení hmoty na kovový plát byla stlačena vrchní ocelovou deskou pomocí matic a klíče. Matice oddělující jednotlivé ocelové pláty byly vysoké 14 mm, tudíž desky byly stlačeny přibližně na výšku 14 mm. Výroba probíhala ve dvou formách, každá z nich pojmula 3 desky.





*Obr. č. 42 a 43: Znárodnění stlačených desek ve formě*

#### 4.4.3 ULOŽENÍ A TEPELNÉ OŠETŘOVÁNÍ DESEK

Ošetřování desek se dělí do dvou částí, před a po jejich odformování. Po zalisování čerstvé cementotřískové směsi se plné formy umístily do proteplovací komory, kde zrály po dobu 6 hodin při teplotě 45 °C. To se dělá zejména pro urychlení tvrdnutí desek, a tudíž je možné je dříve odformovat a opět využít formy. Poté byly desky vyndány z forem a umístěny do laboratorních podmínek, a to po dobu 6 dní. Po 6 dnech zrání byly desky uloženy do proteplovací komory a po dobu 11 hodin byly sušeny při teplotě 75 °C. Následně byly naformátovány na pile a přemístěny do sušárny, jelikož při řezání byly desky navlhčeny. Při vyšší vlhkosti mají desky nižší mechanické vlastnosti. Vzorky byly následně měřeny a váženy až po vysušení (2 dny před testováním při teplotě cca 60 °C). Vzorky pro zkoušení dlouhodobých pevností byly ponechány při zrání volně v laboratorních podmínkách.



*Obr. č. 44: Plné formy umístěné v proteplovací komoře.*



*Obr. č. 45 a 46: Nenaformátované desky s různým obsahem škváry – lze pozorovat tmavnutí desky s rostoucím obsahem příměsi (vlevo), povrch spodní strany desky (vpravo)*

Povrch desek byl znatelně hladší (méně pórovitý), než u desek tvořených v předchozích letech výzkumu [1][25], které nebyly vrstvené přes více sít, ale pouze přes jedno. Spodní strana desek vypadala většinou lépe než horní. Je to dáno nejspíše uvolňováním pojiva při lisování a jeho usazováním na spodním plátu vlivem gravitace. Dále to může být způsobeno tím, že se směs vrství na rovný ocelový plát a tím se povrch při stlačení zarovná lépe než vrchní strana, která před stlačováním není zcela rovná.

#### 4.4.4 OBJEMOVÁ HMOTNOST

Všechny zkoušky na deskách byly prováděny ve stáří 14, 28 a 90 dní. Zkušební tělesa pro 8 hodinové zkoušky nebylo možné realizovat z technologických důvodů, a to z nutnosti formátování a sušení desek. Testy po 7 dnech byly zavrhnuty i s přihlédnutím ke skutečnosti, že v případě reálné výroby v tomto stáří neprobíhá žádný důležitý úkon, kdežto ve stáří 14 dní již mohou být desky v případě potřeby expedovány k zákazníkovi. S ohledem na stanovení normových vlastností bylo nutné testy provádět po 28 dnech zrání. Vzhledem k modifikaci receptury cementotřískové desky alternativními surovinami, jejichž zapojení do utváření struktury matrice se může projevit v delším časovém úseku, se jevílo jako poměrně podstatné ověření vlastností po 90 dnech zrání.

Přesný postup stanovení objemové hmotnosti popisuje norma ČSN EN 323. Objemová hmotnost byla měřena na zkušebních tělesech připravených pro zkoušku pevnosti a modulu pružnosti v ohybu. Zkušební tělesa měřila přibližně 350 × 50 × 15 mm a byla vysušena

v sušárně při teplotě 45 °C do ustálení hmotnosti. Přesné rozměry zkušebních těles byly měřeny digitálním posuvným měřidlem a hmotnost byla stanovena na laboratorních vahách. Pro každou recepturu byly zhotoveny tři zkušební tělesa a výsledná hodnota byla jejich průměrem.

Objemová hmotnost byla stanovena podle vzorce:

$$\rho = \frac{m}{b_1 \cdot b_2 \cdot t} \cdot 10^6 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

$\rho$  - objemová hmotnost [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

m - hmotnost [g]

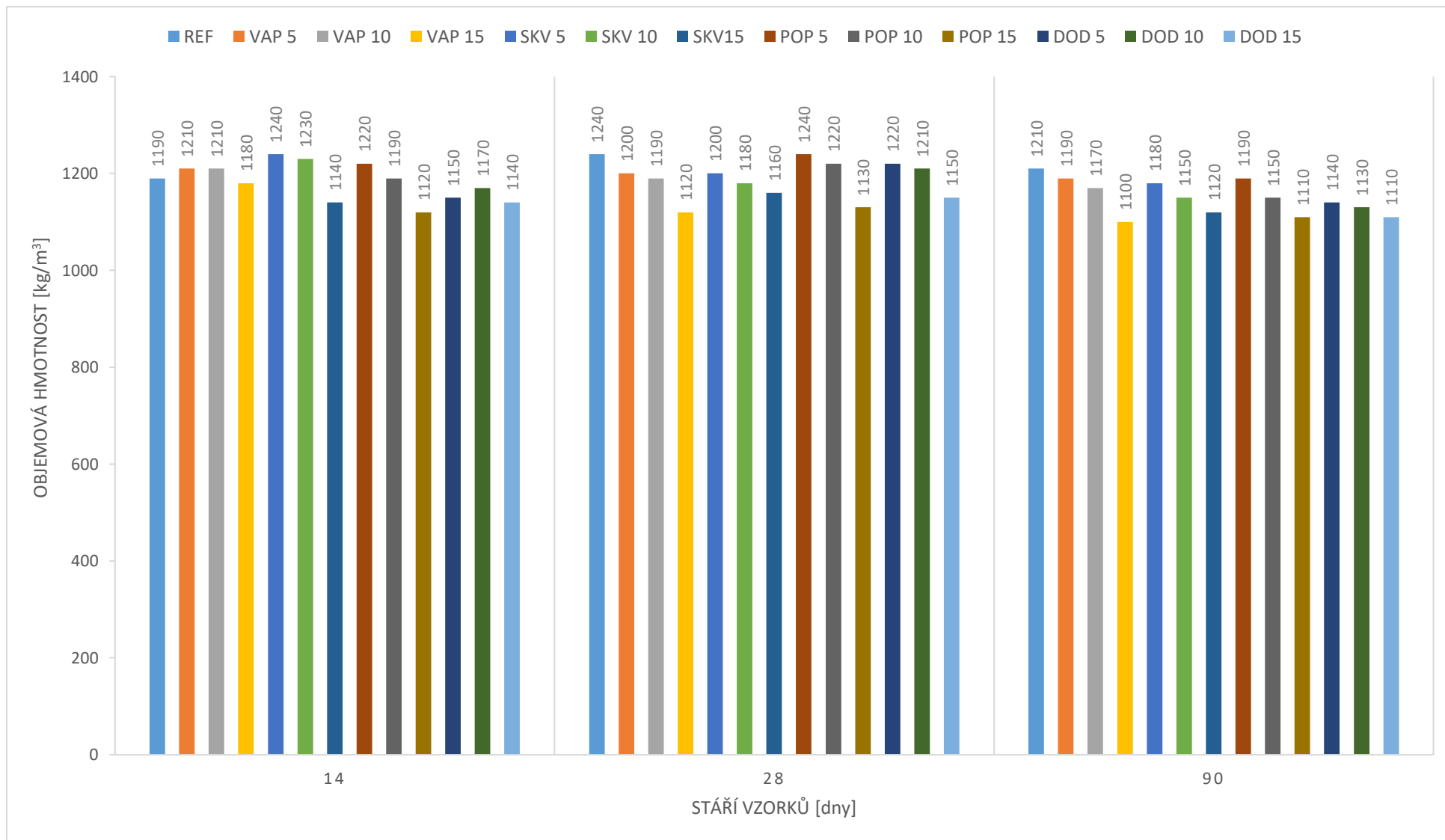
$b_{1,2}$  - šířka a délka [mm]

t - tloušťka [mm]

Tab. č. 24: Změna objemové hmotnosti jednotlivých receptur v závislosti na různé době zrání

Receptura	Objemová hmotnost [ $\text{kg/m}^3$ ]		
	14 [d]	28 [d]	90 [d]
<b>REF</b>	1190	1240	1210
<b>VAP 5</b>	1210	1200	1190
<b>VAP 10</b>	1210	1190	1170
<b>VAP 15</b>	1180	1120	1100
<b>SKV 5</b>	1240	1200	1180
<b>SKV 10</b>	1230	1180	1150
<b>SKV15</b>	1140	1160	1120
<b>POP 5</b>	1220	1240	1190
<b>POP 10</b>	1190	1220	1150
<b>POP 15</b>	1120	1130	1110
<b>DOD 5</b>	1150	1220	1140
<b>DOD 10</b>	1170	1210	1130
<b>DOD 15</b>	1140	1150	1110





Graf č. 13: Vliv příměsí na objemovou hmotnost desek, v závislosti na době zrání

Objemová hmotnost desek se po 28 dnech pohybovala v rozmezí 1120 - 1240 kg/m<sup>3</sup>, tím pádem vyhovují požadavku normy EN 323, která vyžaduje  $\geq 1000$  kg/m<sup>3</sup>. Běžné cementotřískové desky CETRIS dosahují objemové hmotnosti min. 1350 kg/m<sup>3</sup> a tím pádem vyšší přibližně o 215 kg/m<sup>3</sup>. Z grafu je patrný mírný postupný pokles objemové hmotnosti se zvětšující se náhradou cementu příměsí. Pokles je způsobený nižší objemovou hmotností příměsí oproti cementu. V případě nahrazení 15 % cementu některou z použitých příměsí, dojde ke snížení objemové hmotnosti přibližně o 100 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.4.5 PEVNOST V OHYBU

Postup zkoušení je podrobně popsán v normě ČSN EN 310. Zkušební těleso je namáháno třibodovým ohybem, přičemž vzdálenost dvou spodních podpor je dvacetinásobek tloušťky desky. Desky v této práci byly tlusté přibližně 15 mm, a proto byla vzdálenost podpor vždy stejná, tzn. 300 mm. Spodní podpory jsou válce o průměru  $15 \pm 0,5$  mm a zatěžovací hlava, která zatěžuje těleso shora, má průměr  $30 \pm 0,5$  mm.

Před zkoušením je nutné změřit tloušťku vzorku v průřezu úhlopříček a šířku v polovině délky. Zkušební tělesa se položí na plochu na podpěry a v případě prohnutí zkušební tělesa se zkouší tak, aby prohnutí směřovalo dolů a znemožnilo se působení klenbového efektu.

Pevnost v ohybu byla stanovena podle vzorce:

$$f_m = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l_1}{2 \cdot b \cdot t^2} \quad [MPa]$$

$f_m$  - pevnost v ohybu [MPa]

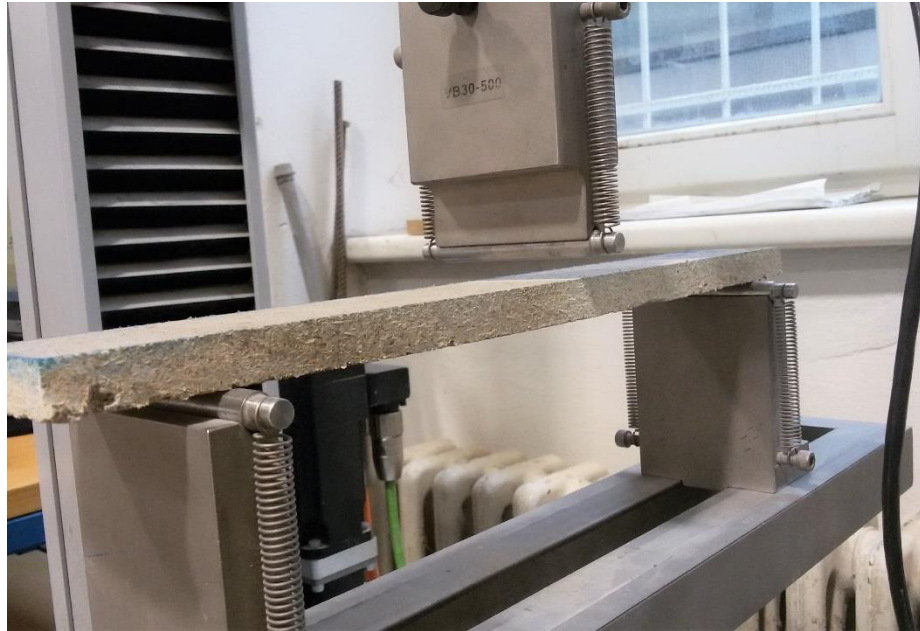
$F_{max}$  - maximální zatěžovací síla zaznamenaná při porušení zkušební tělesa [N]

$l_1$  - vzdálenost mezi středy podpěr [mm]

$b$  - šířka zkušební tělesa [mm]

$t$  - tloušťka zkušební tělesa [mm]

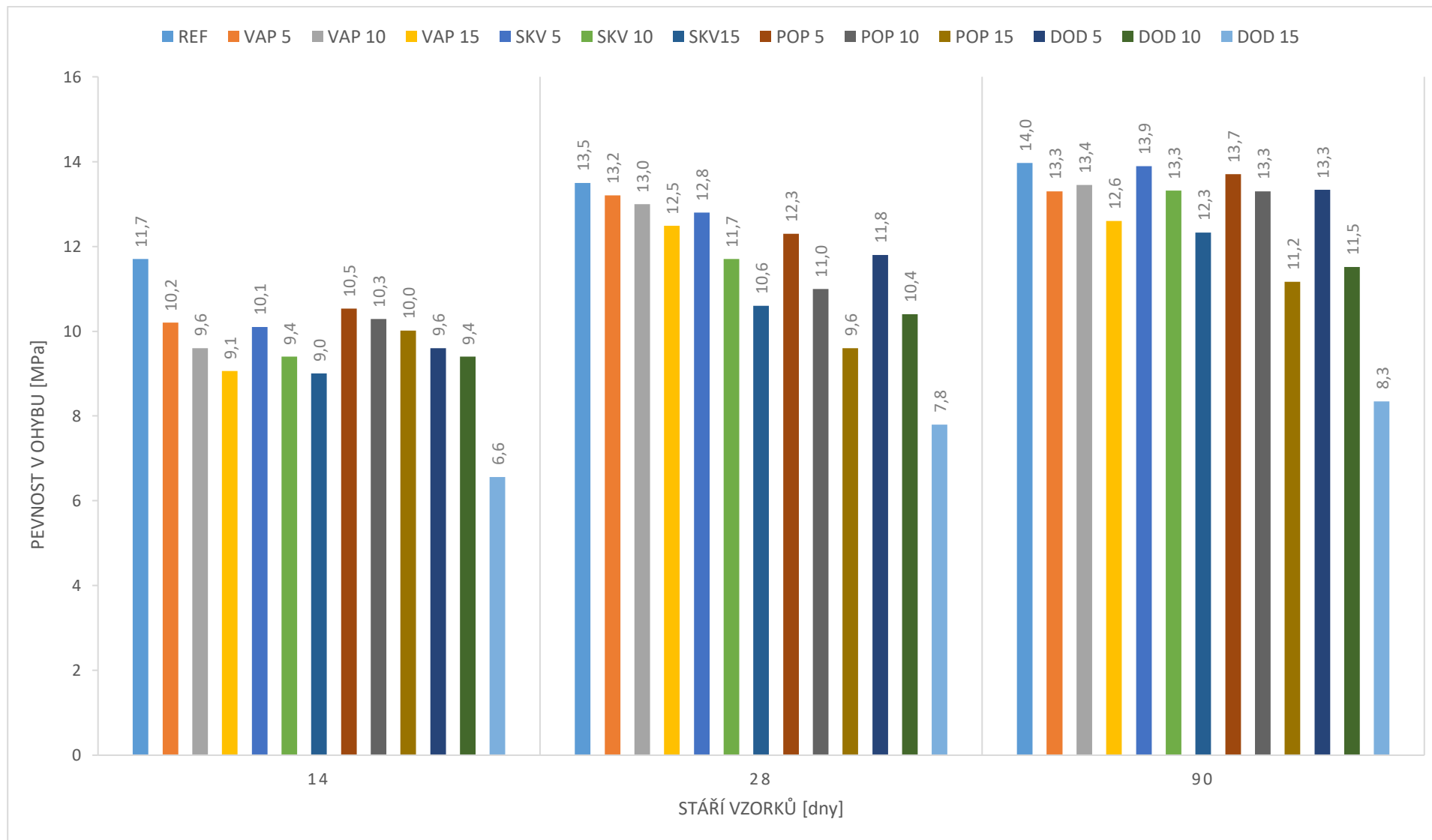
Zkušební tělesa byla zkoušena zařízením od firmy Testometric - model M350-20CT, který je schopný působit silou až 20 kN. Je ovládán počítačovým softwarem WinTest Analysis, který ukládá výsledky do digitální podoby, a to včetně zatěžovací křivky, deformací při zatížení a silou nutnou k porušení vzorku.



Obr. č. 47: Umístění zkušebního tělesa do lisu při testování pevnosti v ohybu

Tab. č. 25: Změna pevnosti v ohybu jednotlivých receptur v závislosti na době zrání

	Pevnost v ohybu [MPa]		
	14 [d]	28 [d]	90 [d]
<b>REF</b>	11,7	13,5	14,0
<b>VAP 5</b>	10,2	13,2	13,3
<b>VAP 10</b>	9,6	13,0	13,4
<b>VAP 15</b>	9,1	12,5	12,6
<b>SKV 5</b>	10,1	12,8	13,9
<b>SKV 10</b>	9,4	11,7	13,3
<b>SKV15</b>	9,0	10,6	12,3
<b>POP 5</b>	10,5	12,3	13,7
<b>POP 10</b>	10,3	11,0	13,3
<b>POP 15</b>	10,0	9,6	11,2
<b>DOD 5</b>	9,6	11,8	13,3
<b>DOD 10</b>	9,4	10,4	11,5
<b>DOD 15</b>	6,6	7,8	8,3



Graf č. 14: Vliv příměsí na pevnost v ohybu desek, po různé době zrání

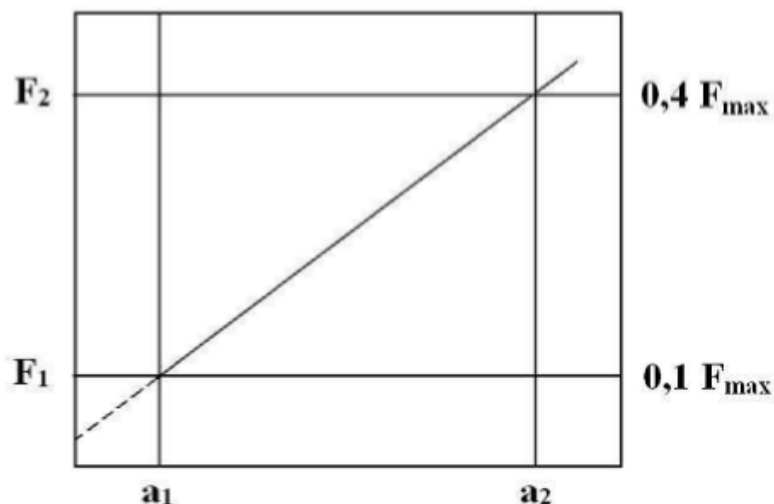
Z grafu je viditelná změna v pevnostech při různém obsahu příměsí ve vzorcích. Opět s vyšší náhradou cementu příměsí roste negativní vliv na pevnosti desek. Referenční desky dosahovaly po 14 dnech 11,7 MPa, oproti tomu receptury VAP5, SKV5 a POP5 vykazovaly přibližně o 13 % nižší pevnosti. U receptur s 15% přídavkem příměsí, mimo DOD15, došlo k dalšímu snížení pevností přibližně o 10 %. U receptury DOD15 byl zaznamenán největší pokles, přibližně 45 %. Obdobný pokles pevností této receptury byl zaznamenán i při zkoušení pevností na samostatné cementové maltě.

Všechny receptury obsahující vápenec a receptura SKV5 se po 28 dnech zrání téměř ztotožnily s pevnostmi referenčních vzorků. U receptur POP5 a POP10 došlo k tomuto přiblížení, až po 90 dnech, a to díky pozdějším hydratačním reakcím popílku. Po 90 dnech byl obecně menší rozdíl v pevnostech referenčních vzorků oproti vzorkům s příměsí než v ostatních dobách zrání. To je způsobeno rychlejší hydratací cementu než příměsí.

Pro použití cementotřískové desky je dle EN 310 vyžadována minimální pevnost 9 MPa po 28 dnech. Tuto podmínku splnily všechny receptury kromě DOD15. Minimální průměrná pevnost cementotřískových desek CETRIS je 11,5 MPa. Tuto hodnotu nepřesáhly zkušební tělesa receptury SKV15, POP15, DOD10 a DOD15.

#### 4.4.6 MODUL PRUŽNOSTI V OHYBU

Modul pružnosti se stanovuje z hodnot získaných při měření pevnosti v ohybu. V průběhu měření pevnosti jsou hodnoty síly a způsobený průhyb desky pravidelně zaznamenáván. Z těchto hodnot se odečtou deformace  $a_1 + a_2$ , které způsobila síla  $F_1$  a  $F_2$ .  $F_1$  vyjadřuje 10 % z  $F_{max}$  a  $F_2$  vyjadřuje 40 % z  $F_{max}$ . Postup této zkoušky byl metodicky proveden dle ČSN EN 310. [36]



Obr. č. 48: Zatěžovací křivka v oblasti pružné deformace [36]

Vzorky jsou v této oblasti zatěžování deformovány pružně, a tudíž je možné z těchto hodnot určit modul pružnosti v ohybu dle uvedeného vzorce: [36]

$$E_m = \frac{l_i^3 \cdot (F_2 - F_1)}{4 \cdot b \cdot t^3 \cdot (a_2 - a_1)} \quad [MPa]$$

$E_m$  - modul pružnosti v ohybu [MPa]

$l_i$  - vzdálenost mezi středy podpěr [mm]

$F_2, F_1$  - zatížení v určité přímkové části zatěžovací křivky [N]

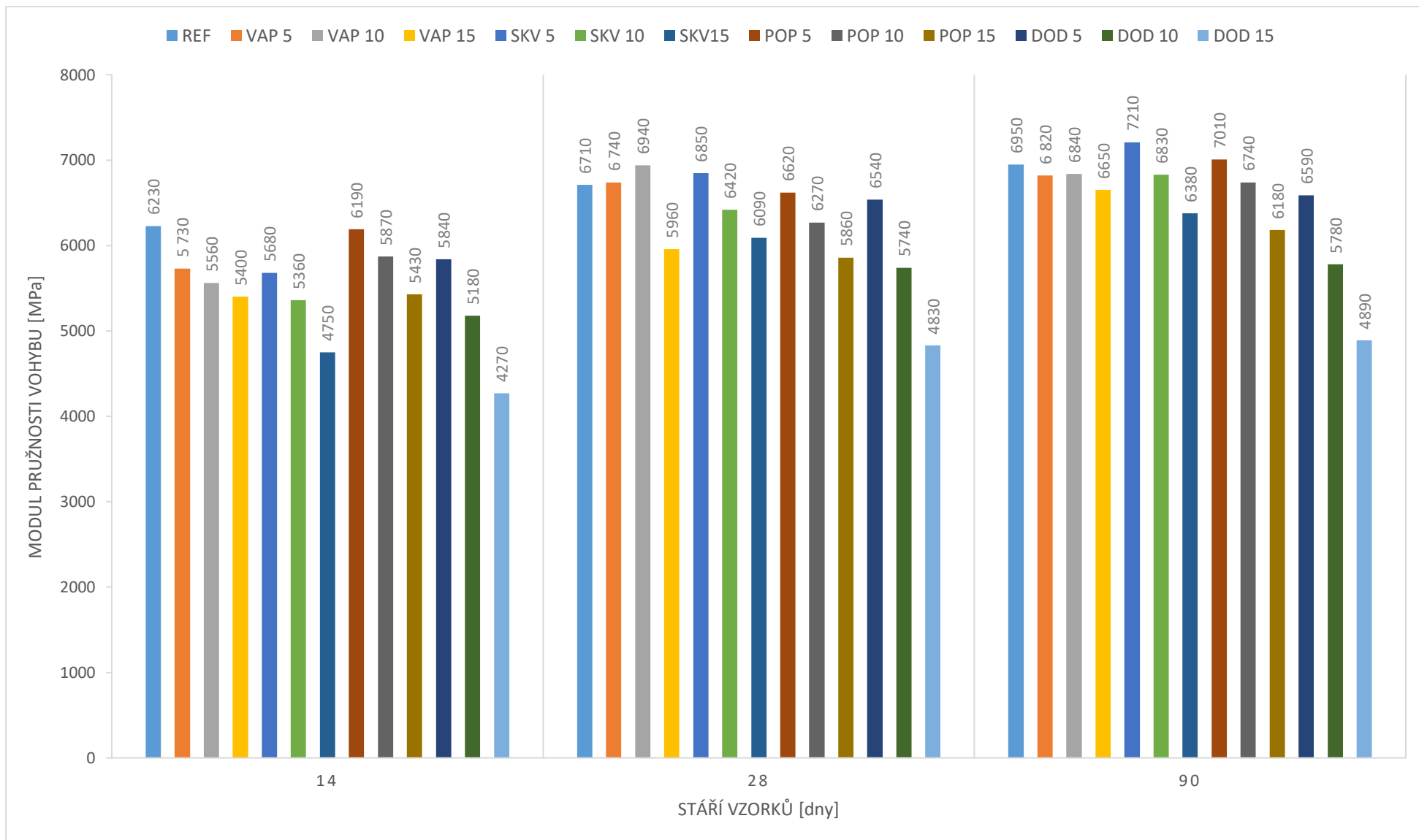
$b$  - šířka zkušební tělesa [mm]

$t$  - tloušťka zkušební tělesa [mm]

$a_2, a_1$  - přírůstek průhybu ve středu délky zkušební tělesa odpovídající silám  $F_2$  a  $F_1$

Tab. č. 26: Změna modulu pružnosti v ohybu jednotlivých receptur v závislosti na době zrání

	Modul pružnosti v ohybu [MPa]		
	14 [d]	28 [d]	90 [d]
<b>REF</b>	6230	6710	6950
<b>VAP 5</b>	5730	6740	6820
<b>VAP 10</b>	5560	6940	6840
<b>VAP 15</b>	5400	5960	6650
<b>SKV 5</b>	5680	6850	7210
<b>SKV 10</b>	5360	6420	6830
<b>SKV15</b>	4750	6090	6380
<b>POP 5</b>	6190	6620	7010
<b>POP 10</b>	5870	6270	6740
<b>POP 15</b>	5430	5860	6180
<b>DOD 5</b>	5840	6540	6590
<b>DOD 10</b>	5180	5740	5780
<b>DOD 15</b>	4270	4830	4890



Graf č. 15: Vliv příměsí na modul pružnosti v ohybu desek, po různé době zrání

Grafy opět ukazují, že s rostoucí náhradou cementu příměsí dochází z pravidla k postupnému poklesu hodnot. Nejlépe je tento trend pozorovatelný na vzorcích po 14 dnech zrání.

Po 14 dnech zrání těles, dosáhl nejlepších výsledků referenční vzorek s hodnotou 6230 MPa. Hodnoty ostatních desek byly poměrně totožné při porovnávání receptur se stejnou náhradou cementu příměsí (4500 – 6000 MPa). Po 28 dnech vzrostly všechny hodnoty přibližně o 10 – 25 % a byly zaznamenány menší odchylky průměrných hodnot referenčních vzorků vůči vzorkům ostatním. Po 90 dnech bylo odchylky ještě menší, kdy se hodnoty pohybovaly v rozmezí 6000 – 7000 MPa. Stejně jako v předchozích zkouškách receptura DOD15 dosáhla nejnižších hodnot, a to zhruba o 27 % ve všech stářích oproti hodnotám referenčním. Všechny receptury splňují hodnotu modulu pružnosti  $\geq 4500$  MPa, která je požadována normou EN 310. Průmyslově vyráběné cementotřískové desky CETRIS dosahují modulů pružnosti min. 6800 MPa a této hodnotě konkurují pouze receptury REF, VAP5, VAP10 a SKV5.

#### 4.4.7 PEVNOST V TAHU KOLMO NA ROVINU DESKY (ROZLUPČIVOST)

Pevnosti v tahu kolmo na rovinu desky je definována normou ČSN EN 319. Zkoušku je možné po výměně zkušebních přípravků provádět na totožném zařízení, jako tomu bylo u zkoušení pevnosti v ohybu. Minimálně den před zkoušením byly na čtvercová zkušební tělesa o straně přibližně 50 mm nalepeny ocelové terčíky o průměru 50 mm, a to pomocí dvousložkového epoxidového lepidla Sikadur 31 CF. Připravené vzorky byly postupně vkládány do čelistí lisu, který je namáhal tahem rychlostí  $3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Pro výpočet pevnosti v tahu kolmo na rovinu desky se uvažuje plocha celého zkušebního tělesa. Pevnost se určí dle vzorce: [37]

$$f_{t\perp} = \frac{F_{max}}{a \cdot b} \quad [MPa]$$

$f_{t\perp}$  - pevnost v tahu kolmo na desku [MPa]

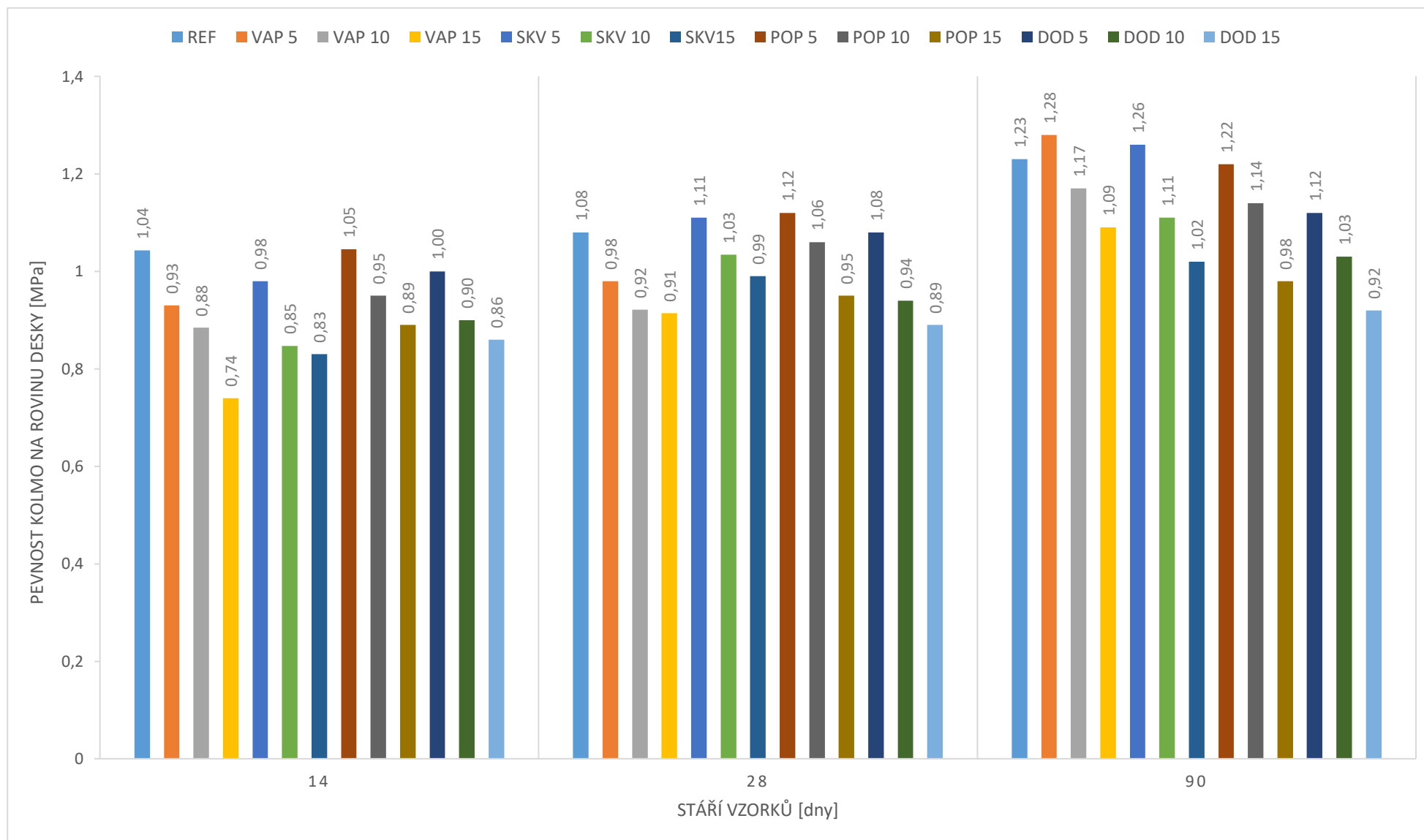
$F_{max}$  - zatížení působící na těleso v okamžiku porušení [N]

a, b - délka a šířka zkušebního tělesa [mm]



Tab. č. 27: Změna pevnosti kolmo na rovinu desky jednotlivých receptur v závislosti na různé době zrání

Receptura	Pevnost kolmo na rovinu desky [MPa]		
	14 [d]	28 [d]	90 [d]
<b>REF</b>	1,04	1,08	1,23
<b>VAP 5</b>	0,93	0,98	1,28
<b>VAP 10</b>	0,88	0,92	1,17
<b>VAP 15</b>	0,74	0,91	1,09
<b>SKV 5</b>	0,98	1,11	1,26
<b>SKV 10</b>	0,85	1,03	1,11
<b>SKV15</b>	0,83	0,99	1,02
<b>POP 5</b>	1,05	1,12	1,22
<b>POP 10</b>	0,95	1,06	1,14
<b>POP 15</b>	0,89	0,95	0,98
<b>DOD 5</b>	1,00	1,08	1,12
<b>DOD 10</b>	0,90	0,94	1,03
<b>DOD 15</b>	0,86	0,89	0,92



Graf č. 16: Vliv příměsí na pevnost kolmo na rovinu desky v závislosti na různé době zrání

I v tomto grafu je viditelný obdobný klesající trend jako v grafech předchozích. Referenční, POP5 a DOD5 zkušební tělesa po 14 dnech zrání dosahovaly pevnosti cca 1 MPa. Zhruba o 10 - 15 % nižších pevností dosáhly zkušební tělesa ostatních receptur, kromě receptury VAP15, u které došlo k poklesu pevností o 25 %.

Po 28 dnech zrání vzorků byla průměrná pevnost referenčních vzorků 1,08 MPa a ostatní vzorky se pohybovaly v rozmezí 0,9 – 1,1 MPa. V tomto případě všechny receptury s 5% přídavkem příměsí (kromě VAP5) dosáhly téměř totožných pevností. Zkušební tělesa POP10 také dosahovala obdobných pevností vzhledem k tělesům referenčním. VAP10, VAP15 a POP15 snížili pevnosti přibližně o 15 %.

Po 90 dnech zrání vzorků je vidět, že přidání 5 % vápence, škváry nebo popílku mírně zvýší či nesníží pevnosti desek a přidání 5 % odřezků sníží pevnosti o cca 9 %. 10% náhrada cementu zmíněnými příměsemi sníží pevnosti po 90 dnech o necelých 10 %. Nejvíce je pevnost snižována zvyšujícím se přídavkem odřezků z výroby cementotřískových desek. Průběhy rozlupčivosti v podstatě korespondují s grafy předchozími. Požadavek 0,5 MPa, který požaduje norma EN 319 splňují s rezervou všechny receptury. Všechny receptury přesahují i minimální hodnoty pevností (0,63 MPa) běžných cementotřískových desek CETRIS.

#### 4.4.8 MRAZUVZDORNOST DESEK

Mrazuvzdornost desek byla stanovena podle normy ČSN EN 1328. Odolnost desky proti mrazu je vyjádřena jako poměr pevnosti v ohybu kontrolního vzorku a vzorku podrobeného zmrazovacím cyklům. K této zkoušce jsou nutné 2 skupiny zkušebních vzorků vyřezané z jedné zkoušené cementotřískové desky. U první skupiny vzorků se stanoví pevnost v ohybu podle ČSN EN 310 a druhá skupina zkušebních těles se uloží na 48 hodin do vody o teplotě  $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ . Po nasáknutí vodou se tato tělesa podrobí řadě zmrazovacích cyklů. Cyklus probíhá tak, že během dvou hodin teplota ve zmrazovací komoře klesne na  $-18 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  a je udržována po dobu 2 hodin. Následně se komora zalije vodou o teplotě  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Voda je zahřívána, aby si tuto teplotu udržela 2 hodiny. Cyklus trvá celkem 6 hodin. Zkoušené vzorky prošly 100 zmrazovacími cykly. V případě, že je úbytek pevností menší než 30 % ( $R_L > 0,7$ ), tak jsou desky mrazuvzdorné a vhodné pro venkovní použití. [38]

$$R_L = \frac{f_2}{f_1} [-]$$

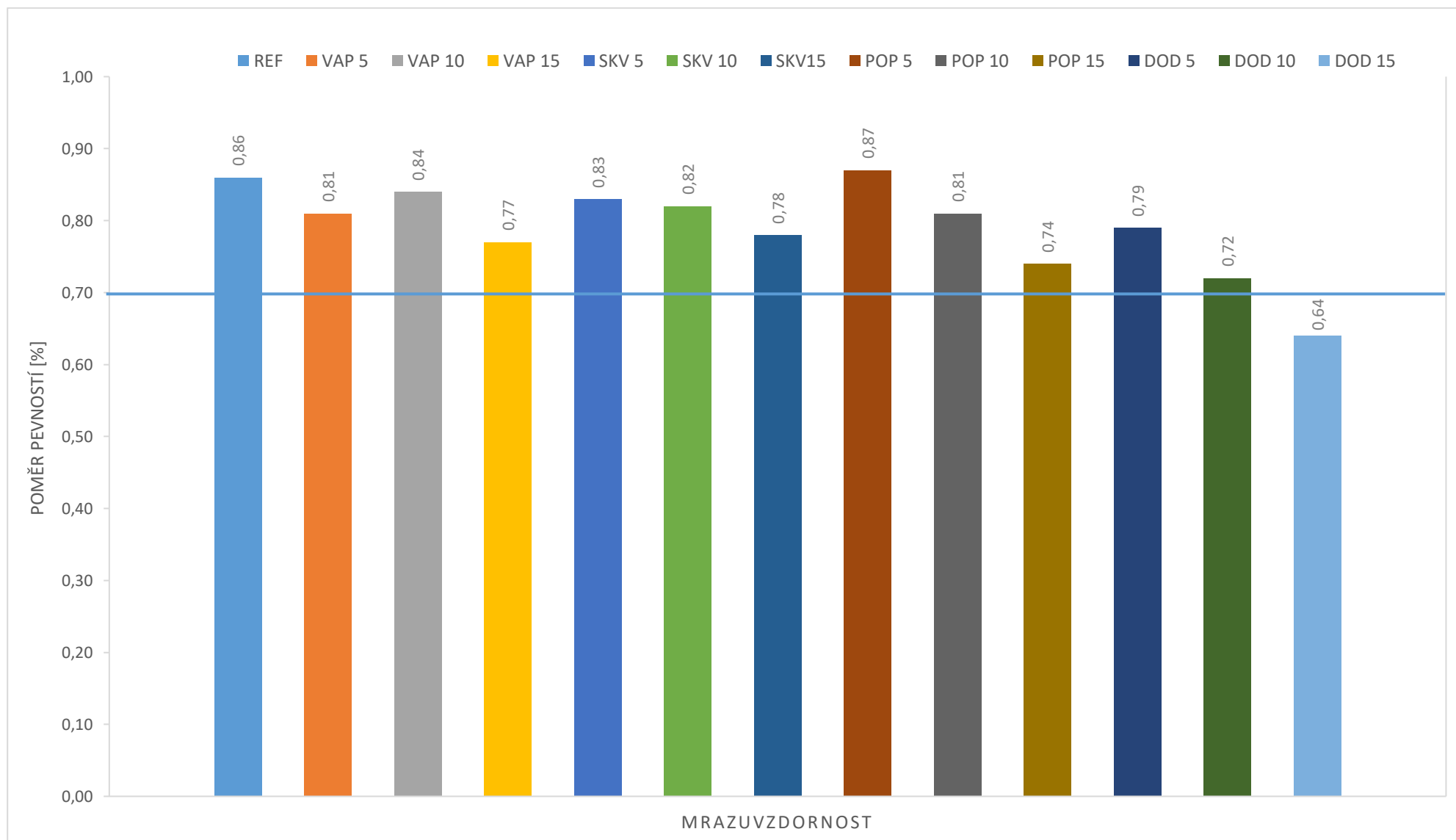
$R_L$  – hodnota zohledňující venkovní použití desek

$f_1$  – pevnost v ohybu zkušebních těles zjištěná před cyklickým namáháním [MPa]

$f_2$  – pevnost v ohybu zkušebních těles zjištěná po cyklickém namáhání [MPa]

Tab. č. 28: Mrazuvzdornost desek po 100 zmrazovacích cyklech

Receptura	Mrazuvzdornost $R_L$ [%]
<b>REF</b>	0,86
<b>VAP 5</b>	0,81
<b>VAP 10</b>	0,84
<b>VAP 15</b>	0,77
<b>SKV 5</b>	0,83
<b>SKV 10</b>	0,82
<b>SKV15</b>	0,78
<b>POP 5</b>	0,87
<b>POP 10</b>	0,81
<b>POP 15</b>	0,74
<b>DOD 5</b>	0,79
<b>DOD 10</b>	0,72
<b>DOD 15</b>	0,64



Graf č. 17: Vliv příměsí na mrazuvzdornost desek po 100 zmrazovacích cyklech

Bylo opět zřetelné, že se zvyšujícím, se množství příměsí ve vzorku dochází k poklesu konečných vlastností. Desky se jevíly na pohled téměř totožně jako vzorky nezmrazované a nebylo vidět žádné narušení struktury.

Po 100 zmrazovacích cyklech dosáhly všechny vzorky více jak 70 % pevnosti oproti vzorkům referenčním, a tudíž je možné je použít do venkovního prostředí. Jediná nevyhovující byla receptura DOD15, která dosáhla pouze 64% pevností. Receptura DOD10, se 72% pevnostmi, je již použitelná do venkovního prostředí.

#### 4.4.9 ANALÝZA MIKROSTRUKTURY DESEK - SEM

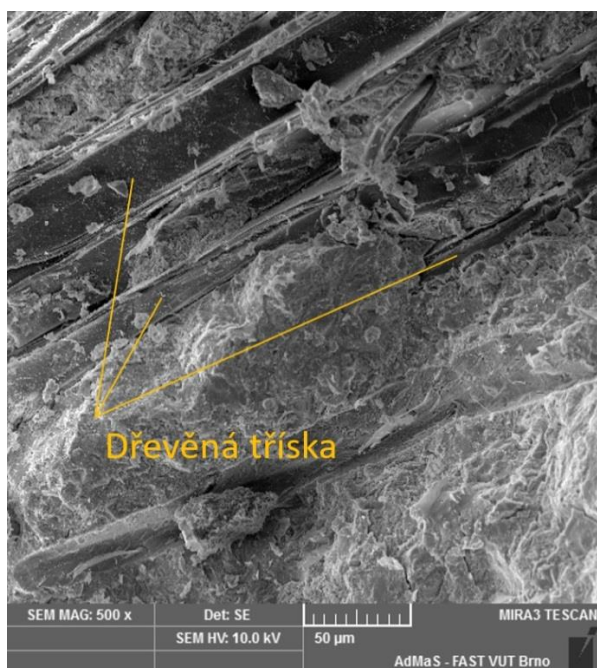
Pro širší pochopení vlivu alternativních surovin na strukturu cementotřískových desek byla blíže prozkoumána jejich mikrostruktura. Důraz byl kladen na vyhledání odlišných hydratačních produktů, které mohou některé z použitých příměsí tvořit. Dále byla pozorována pórovitost a kontaktní zóna dřevěných třísek s cementovou matricí. Pro tento výzkum byl využit rastrovací elektronový mikroskop (SEM) MIRA3 od společnosti TESCAN.



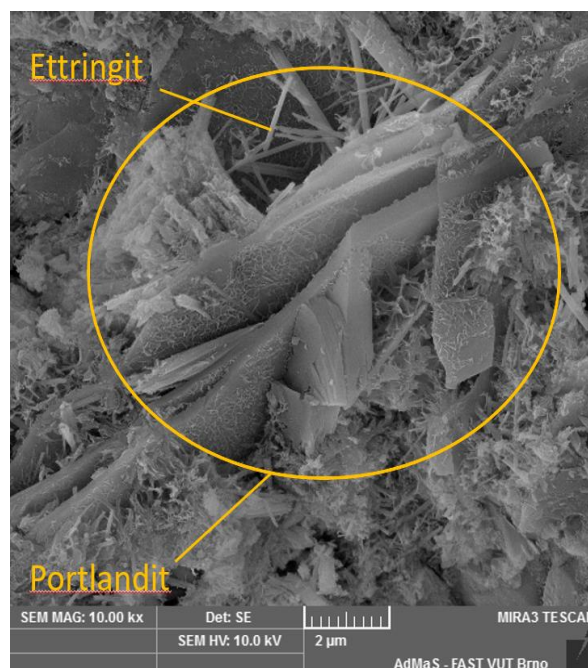
*Obr. č. 49 a 50: Rastrovací elektronový mikroskop MIRA3 [55] a vakuovací (pozlacovací) komora Q150R*

Z vyrobených desek byly odebrány vzorky o velikosti přibližně 5·5 mm a uloženy na nosič. Nosič byl vložen do vakuovací a zároveň pozlacovací komory, ve které byly vzorky vakuem vysušeny a následně pozlaceny, aby bylo možné pozorovat jejich mikrostrukturu. Přípravené vzorky v nosiči byly vloženy do komory mikroskopu a postupně v různých částech prozkoumány a mikrostruktura zdokumentována pořízením snímků.

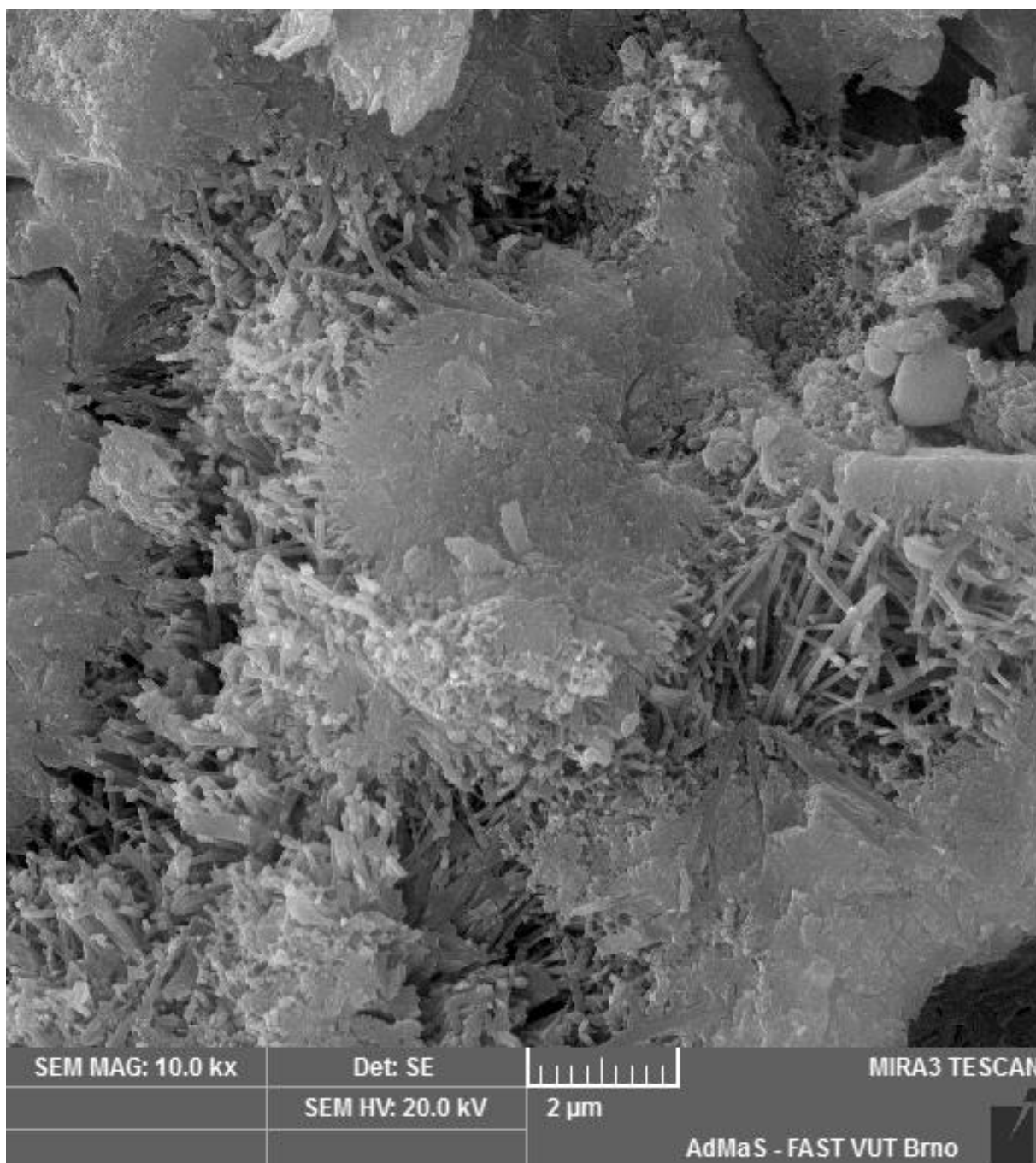
Zkoumány byly vzorky z desek ve stáří 28 a 90 dní. Jednalo se o receptury s nejvyššími obsahy jednotlivých příměsí. Zejména byla snaha nalézt ve vzorcích právě konkrétní příměs, zaznamenat kontaktní zónu třísek s cementovou matricí a zdokumentovat i hydratační produkty cementu.



*Obr. č. 51: REF28 - dřevěná tříška v kontaktu s cementovou matricí. (zvětšeno 500x)*



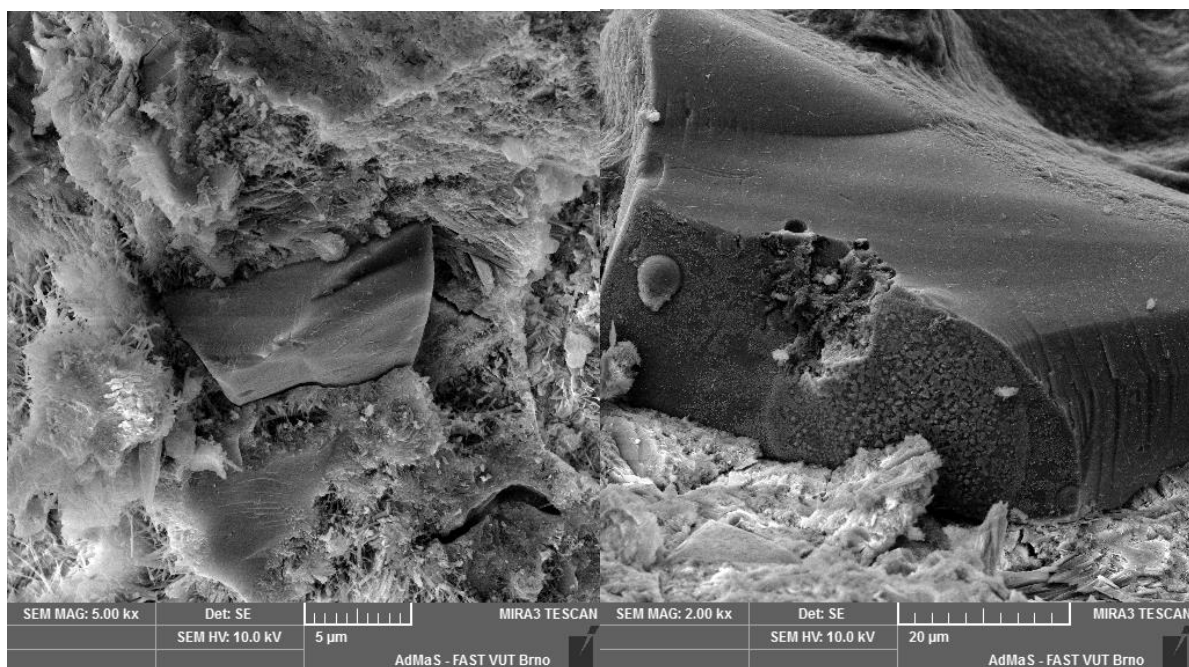
*Obr. č. 52: REF28 – destičková struktura portlanditu, tyčinková struktura ettringitu a další hydratační produkty. (zvětšeno 10000x)*



*Obr. č. 53: REF90 – detail struktury hydratačních produktů cementu. (zvětšeno 10000x)*

Při prozkoumávání vzorku po 90 dnech (viz Obr. č. 53) bylo jasně zřetelné rozsáhlejší prorůstání hydratačními produkty. V tomto případě jsou ze snímku dobře viditelné gelové struktury a postupné prorůstání pórové struktury ettringitem a dalšími hydratačními produkty.

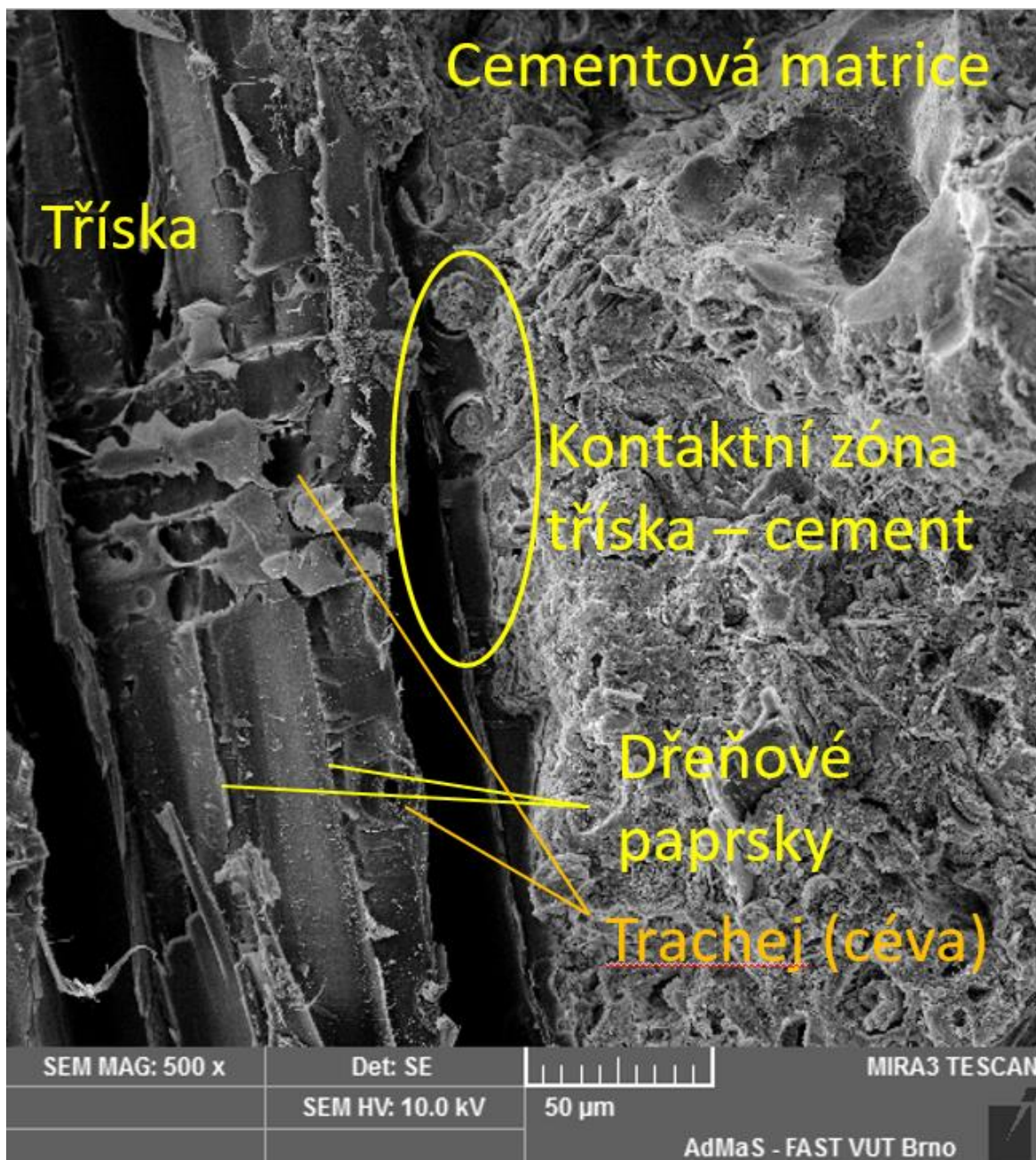




Obr. č. 54 a 55: SKV15,28 - Zrno škváry ve středu snímku (zvětšeno 5000x) a SKV15,28 - Zrno škváry (zvětšeno 2000x)

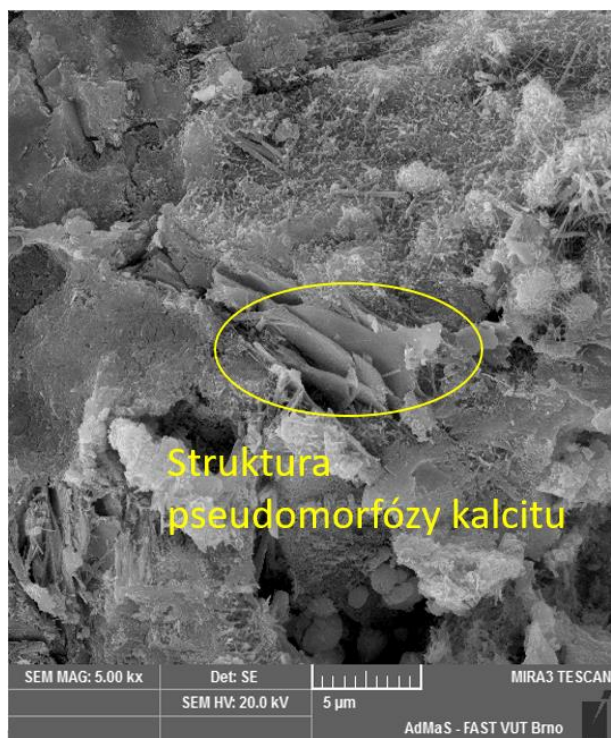
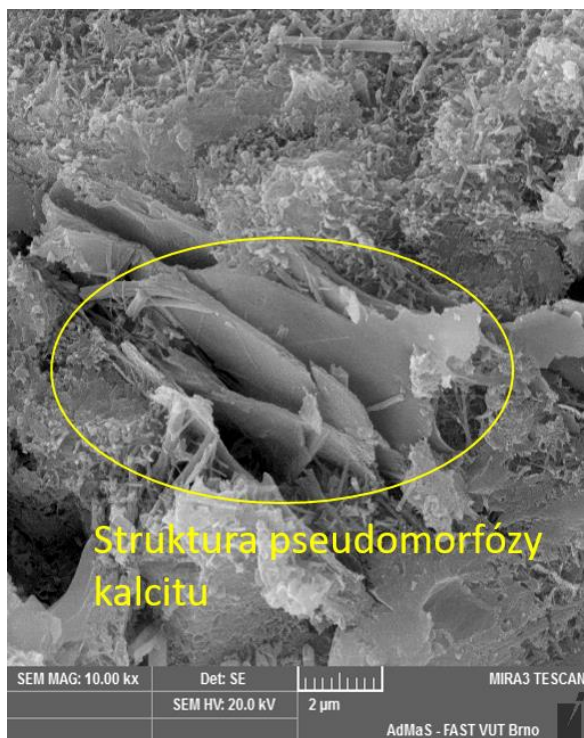


Obr. č. 56: SKV15,90 – Otevřená pórovitá struktura zrna škváry (zvětšeno 2000x)

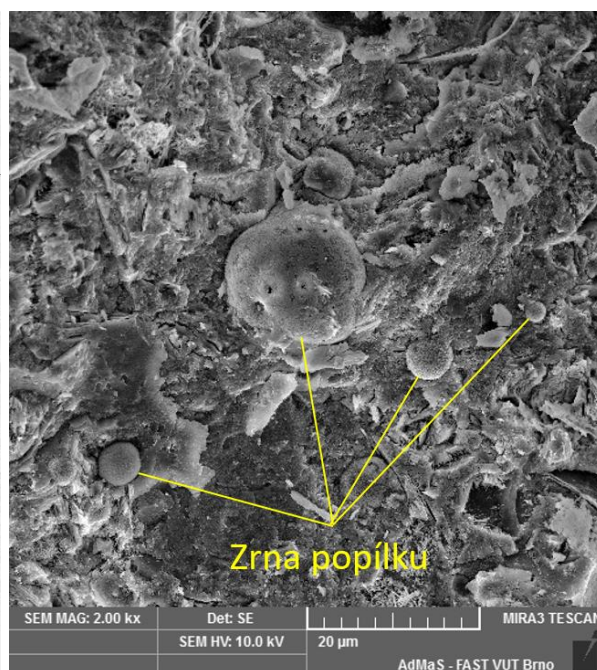
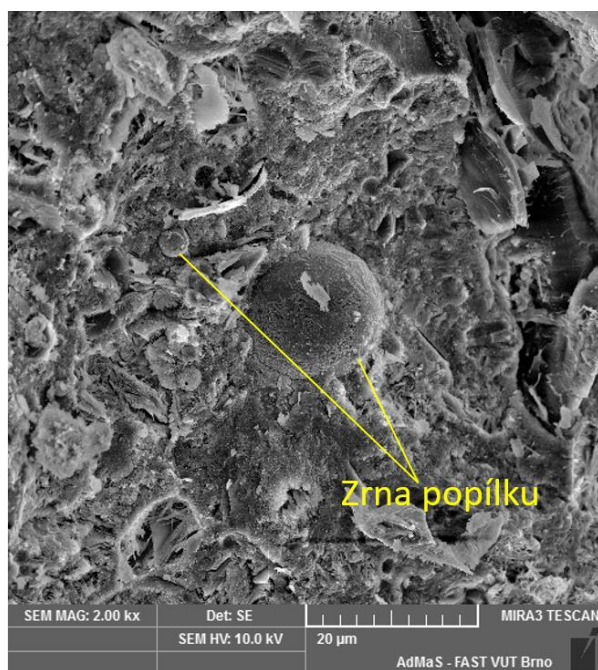


Obr. č. 57: VAP 15,28 - Znárodnění dřevných paprsků, trachejí dřeva a kontaktní zóny třísky s pojivovou matricí (zvětšeno 500x)

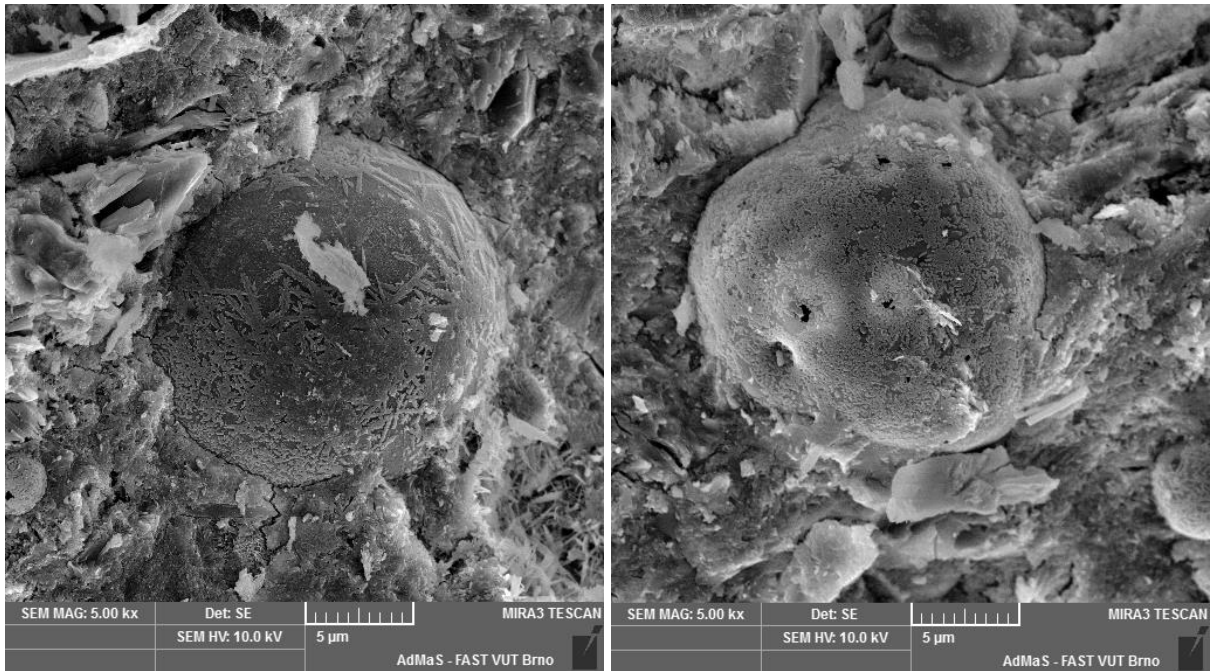




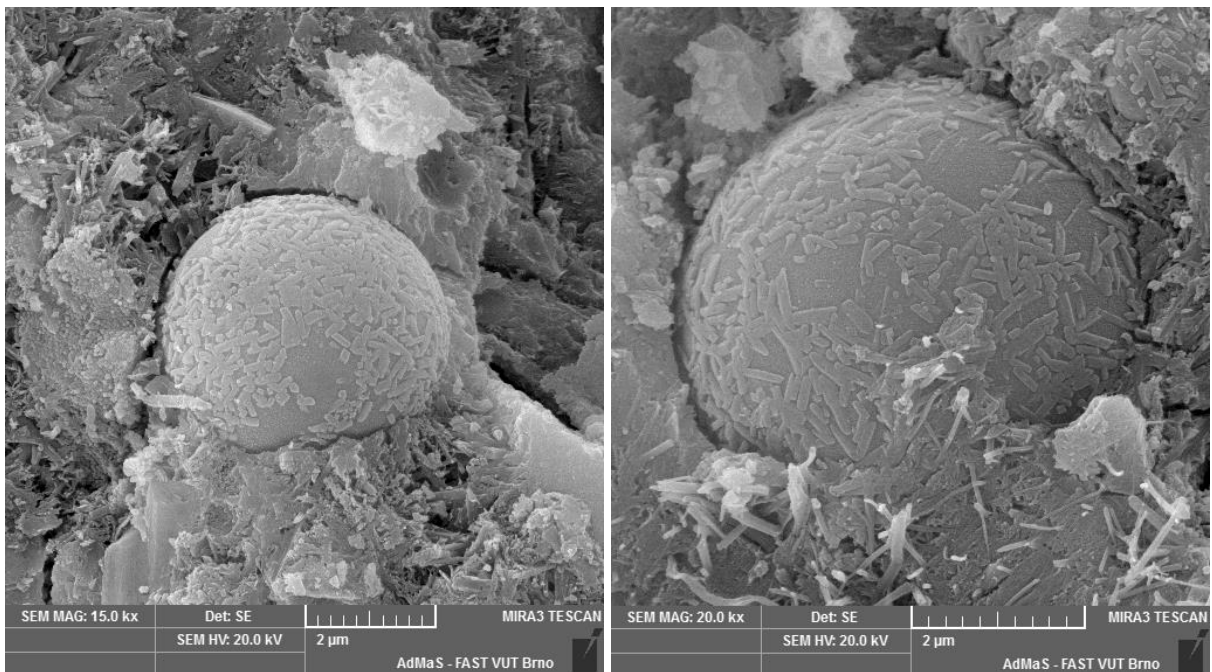
Obr. č. 58 a 59: VAP15,90 – Struktura pseudomorfózy kalcitu (zvětšeno 10000 a 5000x)



Obr. č. 60 a 61: POP 15,28 – Zrna popílku v matrici (zvětšeno 2000x)



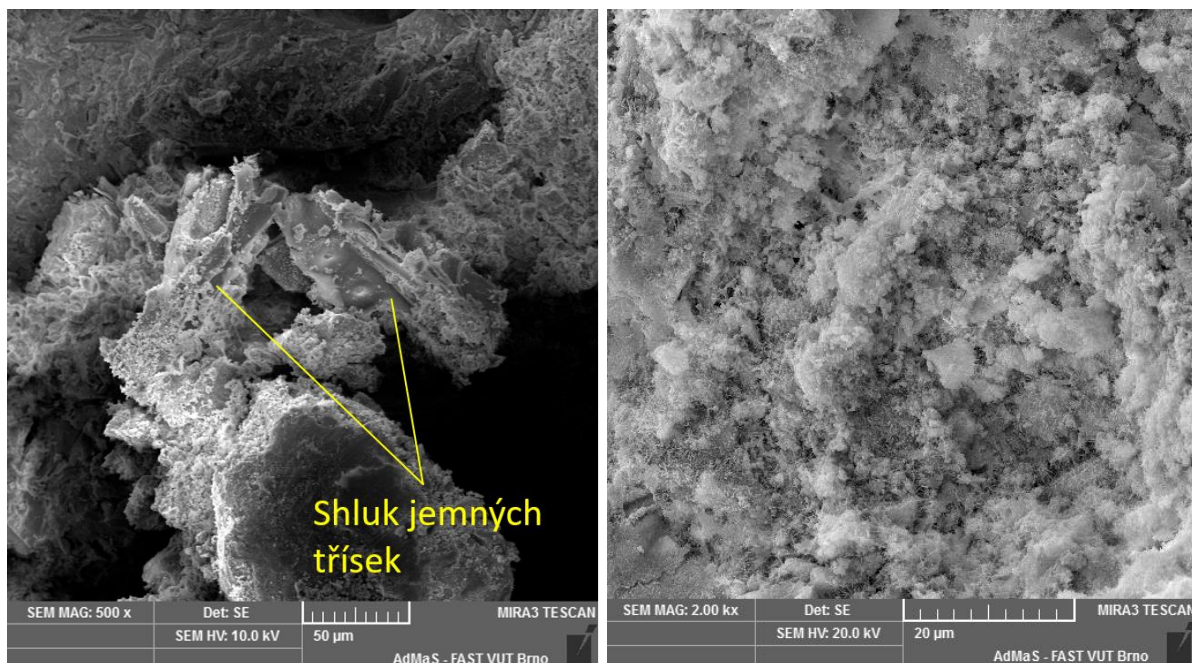
*Obr. č. 62 a 63: POP 15,28 – Více přiblížená zrna popílku z předchozích dvou snímků (zvětšeno 5000x)*



*Obr. č. 64 a 65: POP 15,90 – Zrna popílku (zvětšeno 15000 a 20000x)*

Zrna popílku byla po 90 dnech o trochu lépe propojená s okolní cementovou maticí než zrna popílku po 28 dnech zrání a na jejich povrchu je pozorovatelný rozvoj kalciumhydrosilikátových gelů.





Obr. č. 66 a 67: DOD15,28 - Shluk velice jemných třísek (zvětšeno 500x) a DOD15,90 –  
Typická struktura cementové matrice

Na obrázku č. 65. je znázorněná typická struktura cementové matrice vzorku DOD15 po 90 dnech zrání. Ve vzorcích s přidavkem odpadu z cementotřískových desek nebylo možné pomocí mikroskopu tuto příměs odlišit od okolní cementové matrice.

## 4.5 Ověření vybraných receptur na výrobní lince spol. CIDEM Hranice, a.s.

Na základě výše uvedených výsledků a poznatků byly ve spolupráci s tuzemským výrobcem cementotřískových desek navrženy optimalizované receptury, které se jeví jako potenciálně vhodné pro průmyslovou výrobu. Potřeba ověření receptur na provozní lince spol. CIDEM Hranice, a.s. plyne z odlišností postupu laboratorní a strojní výroby (zejména způsob vrstvení a lisování směsi), kdy lze poukázat na mírné nedostatky právě laboratorní přípravy cementotřískových desek. S ohledem na uvedené skutečnosti bylo tedy možné předpokládat ještě mírné zlepšení vlastností navržených receptur.

Cementotřískové desky byly tedy zhotoveny na lince v Hranicích, naformátovány a dovezeny na fakultu stavební VUT v Brně, kde proběhlo jejich zkoušení. Byla zkoušena jejich objemová hmotnost, pevnost v ohybu, modul pružnosti a mrazuvzdornost. Vzhledem k doporučení zástupce spol. CIDEM byly všechny zmíněné parametry ověřeny po 25, 50, 75 a 100 zmrazovacích cyklech, aby byl přesněji analyzován účinek mrazu na vlastnosti desek.

## 4.5.1 RECEPTURY

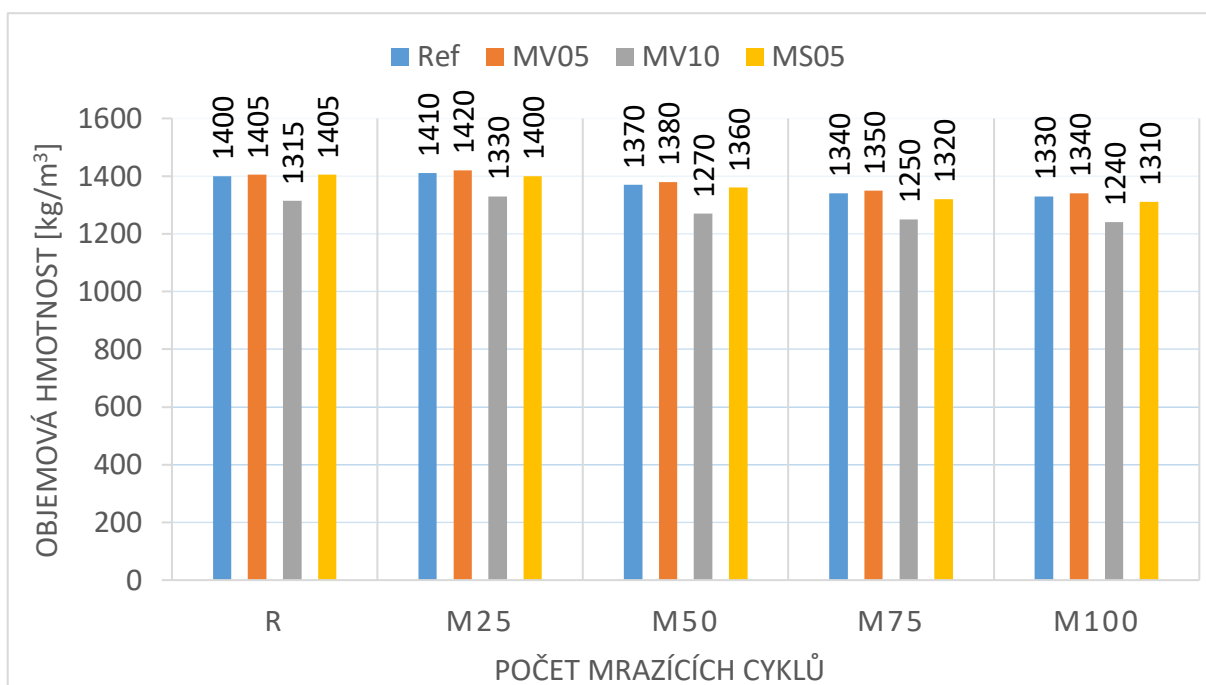
Na základě předchozích laboratorních zkoušek byly na průmyslové lince zhotoveny receptury obsahující vápenec a škváru. Vápenec byl použit v množství 5 a 10 % z hmotnosti cementu. Škvára byla použita v 5 % hmotnosti cementu.

Označení: MV - vápenec, MS - škvára, 05 – 5% náhrada cementu příměsí, 10 - 10% náhrada cementu příměsí, REF – referenční vzorek.

## 4.5.2 OBJEMOVÁ HMOTNOST

Tab. č. 29: Hodnoty objemové hmotnosti po určitém počtu zmrazovacích cyklů

Označení	Objemová hmotnost po různém počtu zmrazovacích cyklů [kg/m <sup>3</sup> ]				
	0	25	50	75	100
REF	1400	1410	1370	1340	1330
MV05	1405	1420	1380	1350	1340
MV10	1315	1330	1270	1250	1240
MS05	1405	1400	1360	1320	1310



Graf. č. 18: Změna objemové hmotnosti vlivem zmrazování

Objemová hmotnost všech receptur před začátkem zmrazování byla přibližně 1400 kg/m<sup>3</sup>. Hodnoty jsou přibližně o 200 kg/m<sup>3</sup> vyšší než u vzorků, které byly vyrobeny z totožných receptur v laboratorních podmínkách VUT. Je to dáno vyššími lisovacími tlaky a tím pádem i větší hutností cementotřískové matrice. Jediná receptura, která se odlišovala,

obsahovala 10 % vápence, což zapříčinilo mírné snížení objemové hmotnosti na cca 1315 kg/m<sup>3</sup>. V průběhu zmrazování došlo k nepatrnému poklesu objemových pevností. Lze konstatovat, že vliv mrazu na objemovou hmotnost desky je zanedbatelný.

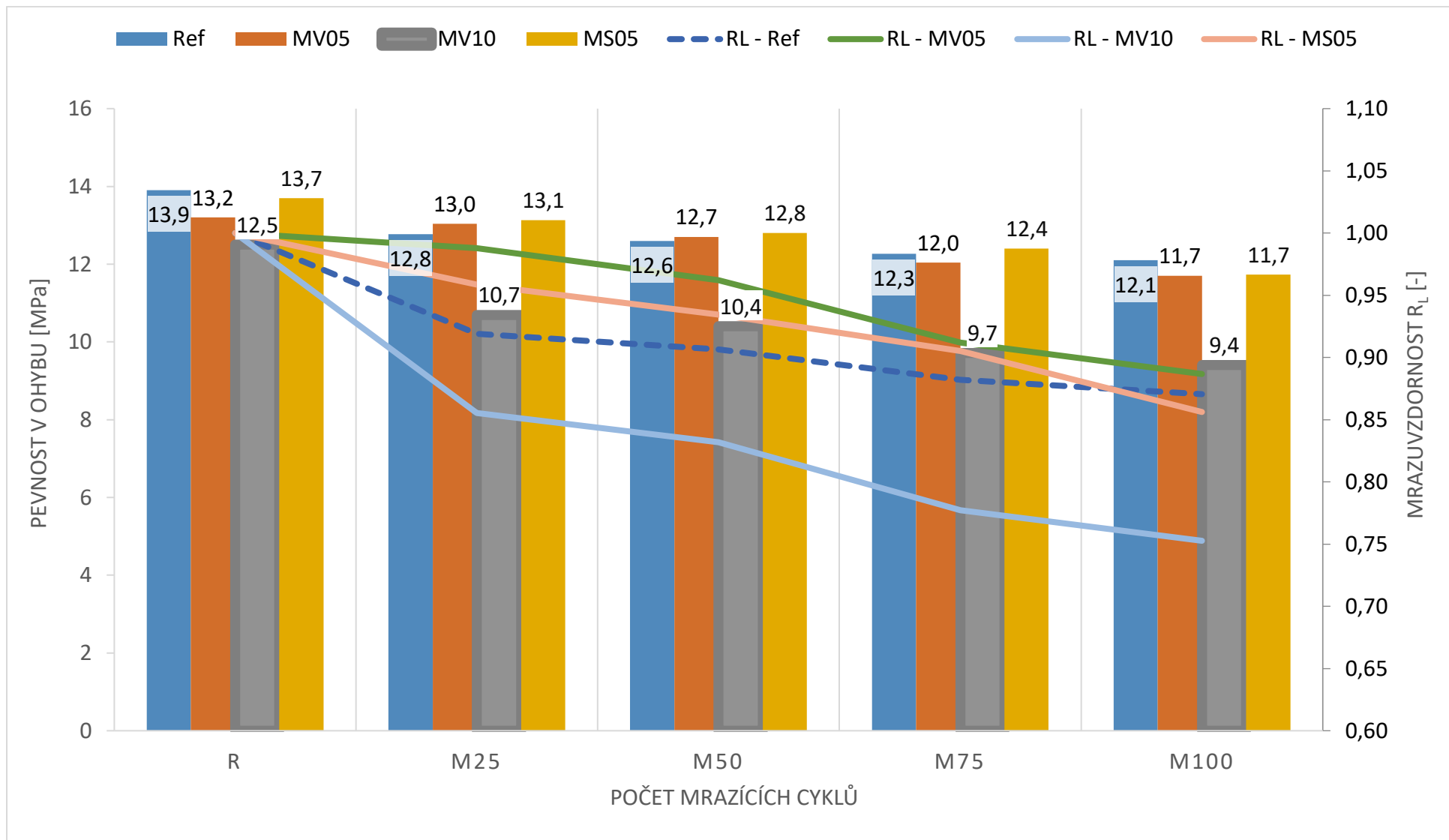
### 4.5.3 PEVNOST V OHYBU A MRAZUVZDORNOST

Tab. č. 30: Hodnoty mrazuvzdornosti  $R_L$  po určitém počtu zmrazovacích cyklů.

Označení	Mrazuvzdornost $R_L$ [-]			
	25	50	75	100
<b>REF</b>	0,92	0,91	0,88	0,87
<b>MV05</b>	0,99	0,96	0,91	0,89
<b>MV10</b>	0,86	0,83	0,78	0,75
<b>MS05</b>	0,96	0,93	0,91	0,86

Tab. č. 31: Hodnoty pevnosti v ohybu po určitém počtu zmrazovacích cyklů.

Označení	Pevnost v ohybu [MPa]				
	0	25	50	75	100
<b>REF</b>	13,9	12,8	12,6	12,3	12,1
<b>MV05</b>	13,2	13,0	12,7	12,0	11,7
<b>MV10</b>	12,5	10,7	10,4	9,7	9,4
<b>MS05</b>	13,7	13,1	12,8	12,4	11,7



Graf. č. 19: Změna pevnosti v ohybu po určitém počtu zmrazovacích cyklů a znázornění  $R_L$

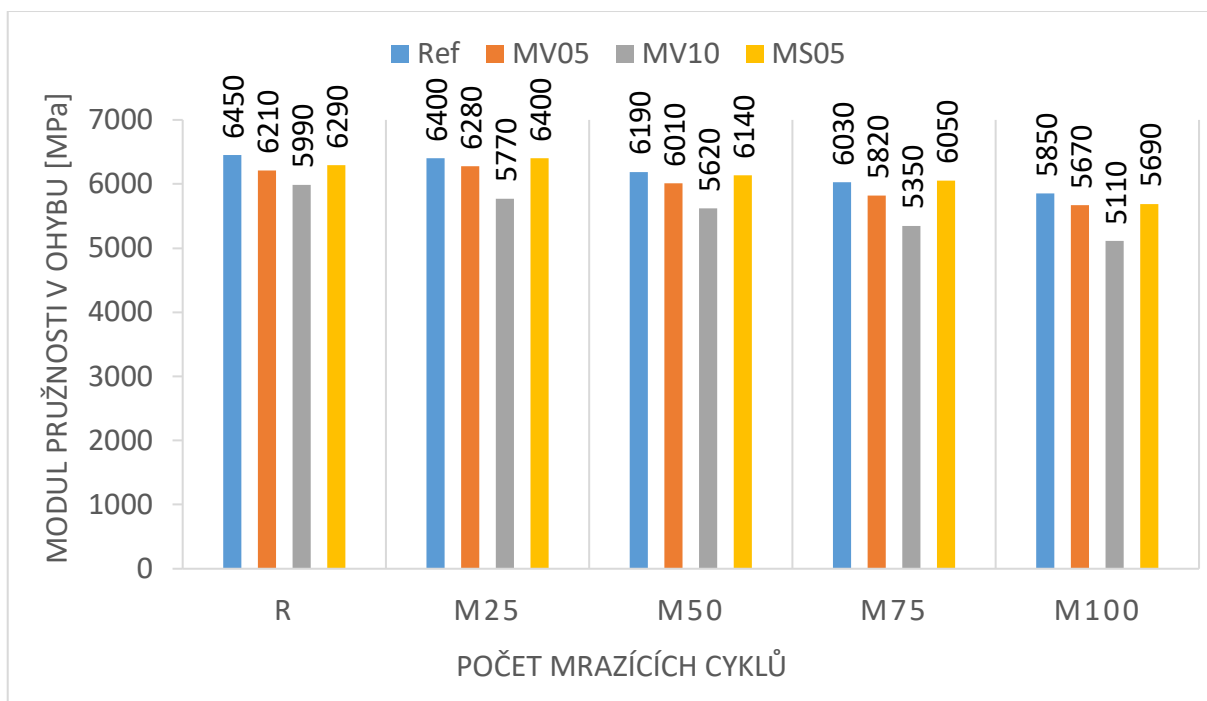


Po 28 dnech se pevnost v ohybu referenčních vzorků pohybovala okolo hodnoty 13,9 MPa. Totožné receptury vyrobené v laboratorních podmínkách VUT dosahovaly podobných hodnot  $\pm 0,5$  MPa nezmrazovaných vzorků. Téměř totožné hodnoty dosáhly zkušební tělesa s obsahem škváry. 10% obsah vápence v desce zapříčinil mírné snížení hodnoty, a to přibližně o 11 %. Po 25 zmrazovacích cyklech došlo ke snížení pevností referenčních vzorků cca o 10 % a po proběhnutí dalších 75 cyklů již došlo ke snížení pouze o jednotky procent. U vzorků s 5% obsahem vápence nebo škváry došlo pouze k minimální poklesu pevností, přibližně 8 %. Vzorky obsahující 10 % vápence byly nejvíce ovlivněny zmrazováním a jejich pevnosti po 100 cyklech klesly na 75 % z pevností původních. Po 100 zmrazovacích cyklech byly hodnoty  $R_L$  průmyslově vyrobených desek téměř shodné s hodnotami desek vyrobených v laboratořích VUT. Vymykala se pouze receptura s 10% obsahem vápence, která v laboratorních podmínkách dosáhla o 9 % vyšší hodnoty  $R_L$  než její protějšek vyrobený na průmyslové lince. Všechny pevnosti dosahují pevnosti min. 9 MPa po 100 zmrazovacích cyklech. Všechny vzorky mají hodnotu  $R_L$  vyšší než 0,7 a tím pádem jsou dle normy ČSN EN 1328 použitelné do venkovního prostředí.

#### 4.5.4 MODUL PRUŽNOSTI

Tab. č. 32: Hodnoty modulu pružnosti po určitém počtu mrazicích cyklů

Označení	Modul pružnosti [MPa]				
	0	25	50	75	100
REF	6450	6400	6190	6030	5850
MV05	6210	6280	6010	5820	5670
MV10	5990	5770	5620	5350	5110
MS05	6290	6400	6140	6050	5690



Graf. č. 20: Změna modulu pružnosti vlivem zmrazování

Modul pružnosti referenční receptury před zmrazováním dosahoval hodnot cca 6450 MPa. Trend modulů pružností je stejný jako u desek vyrobených v laboratořích VUT. Referenční hodnota modulů pružnosti průmyslově vyrobených referenčních vzorků je vyšší o 220 MPa (3,5 %) než laboratorně u zhotovených. Receptury obsahující vápenec, které byly vyrobené na průmyslové lince dosáhly přibližně o 450 MPa (8 %) vyšších modulů pružnosti než vzorky zhotovené v laboratoři.

Receptury obsahující 5 % vápence nebo škváry snížily modul pružnosti pouze o cca 200 MPa. 10% přídavek vápence do desky snížil hodnotu zhruba o 450 MPa. V průběhu zmrazování došlo k mírným poklesům hodnot u všech vzorků. Po 100 cyklech se snížil modul pružnosti receptury REF, MV05 a MS05 přibližně o 10 %. K 15% snížení došlo u receptury s 10% obsahem vápence.

## 5 ZÁVĚR

V teoretické části byly nejprve shrnuty základní informace o cementotřískových deskách. Byla vysvětlena jejich výroba a popsány materiály, ze kterých se skládá. Dále byly specifikovány složky, které se jeví jako potenciálně vhodné k modifikaci složení desek a byly popsány některé zahraniční výzkumy, které různými způsoby modifikují výrobu desek a upravují jejich konečné vlastnosti. V závěru teoretické části následovalo vybrání vhodných příměsí, kterými byly mikromletý vápenec, teplárenská škvára, odřezky z cementotřískových desek a vysokoteplotní popílek. Vlivy těchto příměsí byly následně zkoumány v praktické části.

V praktické části byly nejdříve všechny vybrané příměsi podrobeny zkouškám, které určily jejich měrný povrch a měrnou hmotnost, aby bylo později možné vytvořit receptury. Dále byly blíže prozkoumány odřezky, které vznikají při formátování desek, aby bylo možné zefektivnit jejich výrobu. Pro určení poměru matrice a dřevní hmoty v odřezcích bylo určeno jejich spalné teplo, ztráta žiháním a pomocí DTA byly zjištěny hmotnostní úbytky v jednotlivých teplotních rozmezích. Pomocí XRD bylo určeno, že odřezky vypálené při teplotě 1000 nebo 1200 °C obsahují některé složky schopné hydratace, což by se mohlo příznivě projevit na výsledných vlastnostech cementotřískových desek či jiných kompozitů z takto upravených odřezků vyrobených.

Testování vlivu částečné náhrady cementu příměsí probíhalo nejprve na tělesech z cementové malty. Byly vytvořeny receptury s 10, 15 a 20% náhradou cementu příměsí. Jednalo se o vápenec, škváru, popílek a odřezky z výroby desek. Byla zkoušena objemová hmotnost, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a dále vzorky prošly diferenční termickou analýzou (DTA). Kromě DTA byly všechny zkoušky testovány ve stářích vzorků 8 h, 9, 14, 28 a 90 dní. Bylo zjištěno, že až 20% náhrada cementu příměsí (zejména odřezků) výrazněji zhoršuje vlastnosti zhotovených malt. Odpad z desek zhoršil pevnosti těles až o 45 %. Ze zkoušek na cementové maltě se nejlépe jevíly receptury s 10% a 15% obsahem vápence, škváry, popílku a s 10% obsahem odřezků z desek.

Na základě dosažených výsledků byla modifikována stávající receptura cementotřískových desek spol. CIDEM Hranice, a.s. alternativními surovinami v množství do 15 % a zkušební tělesa byla vytvořena dle jejich technologického postupu. Na deskách byla zkoušena jejich objemová hmotnost, pevnost v ohybu, modul pružnosti v ohybu, pevnost kolmo na rovinu desky a mrazuvzdornost. Zkoušky proběhly po 14, 28 a 90 dnech zrání.

Všechny receptury, kromě DOD15, dosáhly pevností v ohybu po 28 dnech nad požadovanou hranici normy EN 310 - 9 MPa. Vyhověly i požadavkům na modul pružnosti (4500 MPa), mrazuvzdornost ( $R_L > 0,7$ ) a pevnost kolmo na rovinu desky (0,5 MPa). Pevnosti kolmo na rovinu desky byly i více, jak dvojnásobně vyšší než požaduje norma. V případě receptur SKV15, POP15 a DOD 10 byly pevnosti v ohybu o 1-2 MPa nižší než u minimálních hodnot běžně vyráběných CETRIS desek (11,5 MPa) a to se projevilo i na mrazuvzdornosti, kde se hodnoty  $R_L$  pohybovaly těsně nad minimální požadovanou hodnotou.

Pro prozkoumání zapojení alternativních surovin do matrice cementotřískových desek byl využit elektronový rastrovací mikroskop. Byly určeny některé hydratační produkty jako je portlandit, ettringit a CSH gely. Zaznamenána byla postupná hydratace popílkových zrn, které se postupným zráním vzorku obalovaly hydratačními produkty. Dále byla zaznamenána postupná hydratace škváry a různé pseudomorfozy kalcitu ve struktuře desek s přísadkou vápence. Příměs vytvořenou z odřezků cementotřískových desek nebylo možné rozeznat od okolní matrice.

V návaznosti na dosažené výsledky a se zohledněním informací od zástupce společnosti CIDEM Hranice, a.s. byly nejlépe hodnocené receptury zhotoveny na průmyslové lince CIDEM Hranice, a.s., naformátovány a vyzkoušeny v laboratořích VUT. Jednalo se o receptury s 5 a 10% obsahem vápence a 5% obsahem škváry. Byla měřena pevnost v ohybu, objemová hmotnost a modul pružnosti v ohybu po různém počtu zmrazovacích cyklů, pro lepší znázornění vlivu zmrazování na vlastnosti desky. Všechny receptury dosáhly normových hodnot a jeví se jako vhodná ekonomičtější varianta pro výrobu cementotřískových desek. V porovnání s deskami vyrobenými laboratorně byla jejich objemová hmotnost přibližně o 200 kg/m<sup>3</sup> vyšší. Hodnoty pevnosti a modulu pružnosti v tahu za ohybu a mrazuvzdornosti kolísaly zpravidla o  $\pm 5\%$ .

V rámci případného navazujícího výzkumu se jeví jako zajímavá možnost úprava granulometrického složení odřezků z výroby cementotřískových deskách na větší měrný povrch a tím docílit jejich větší reaktivity, což by souviselo s možností zvýšení jejich množství v deskách. Nenahrazovat cement alternativní surovinou v poměru 1:1, ale zvýšit poměr na 1:1,3 (cement k alternativní surovině). V případě, že by se část obsahu odřezků nahradila vápencem nebo škvárou došlo by také pravděpodobně ke zlepšení vlastností desek. Výroba cementotřískových desek je v zimním období zpomalována pomalejším náběhem manipulačních pevností a všechny použité příměsi pravděpodobně vydávají méně hydratačního tepla než cement, tzn., že by bylo vhodné zjistit tyto hodnoty a dle toho upravit receptury, které by případně v zimním období byly použity. Dále by bylo možné vlastnosti

desek vylepšit pomocí ošetřováním CO<sub>2</sub>, které je zmíněno v kapitole 3.5.1 a 3.5.2, zejména pak desky obsahující jemně mletý vápenec, kde by se výrazně mohl urychlit náběh počátečních pevností. Bylo by dobré vyzkoušet, zda je možné v určitém množství průmyslově termicky upravovat odřezky z cementotřískových desek a vzniklý popílek následně využívat jako alternativní surovinu pro výrobu desek.

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KONEČNÝ, D. Vývoj cementotřískových desek s matricí modifikovaného složení. Brno, 2014. 119 s., 1 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
- [2] ČSN EN 633: Cementotřískové desky – Defínice a klasifikace. ČNI, 1995
- [3] ROHÁČEK, L. Možnosti využití příměsí pro vodonepropustné betony. Brno, 2016. 71 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
- [4] BAREK, J. Pucolánová aktivita oxidu křemičitého. Brno, 2014. 78 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
- [5] Hela, R. Technologie betonu. Modul M01, BJ04. Technologie betonu I. Brno 2005.
- [6] ČSN EN 634-2: Cementotřískové desky – Specifikace - Část 2: Požadavky pro třískové desky spojené portlandským cementem pro použití v suchém, vlhkém a venkovním prostředí. ČNI 2007.
- [7] Anorganická pojiva. Geologie.vsb [online]. [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: [http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka\\_pojiva.html](http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html)
- [8] Dřevo je dřevo. Příroda [online]. [cit. 2017-06-12]. Dostupné z: <http://www.priroda.cz/clanky.php?detail=572>
- [9] Chemické složení dřeva. Dřevo centrum [online]. [cit. 2017-06-12]. Dostupné z: <http://drevo.celyden.cz/slozeni-vlastnosti-dreva/chemicke-slozeni-dreva>
- [10] Co je technické konopí. In: Konopa [online]. [cit. 2017-06-12]. Dostupné z: <http://www.konopa.cz/cs/o-nas/co-je-technicke-konopi.html>
- [11] CHYBÍK, J. Přírodní stavební materiály. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, 2009, 268 s. ISBN 978-80-247-2532-1

- [12] VACULA, M., KLVAČ M., MILDNER, R. Využití odpadu z výroby kamenné vlny pro modifikaci vlastností cementových desek s organickým plnivem [online]. [cit. 2017-06-12]. Dostupné z: [http://www.cetris.cz/pagedata/research-development/6\\_wta\\_2011\\_p\\_sp\\_vek.pdf?1435737364](http://www.cetris.cz/pagedata/research-development/6_wta_2011_p_sp_vek.pdf?1435737364)
- [13] VACULA, M., KLVAČ, M., MILDNER, R., BYDŽOVSKÝ, J. Možnosti využití lehčeného kameniva při výrobě cementotřískové desky [online]. [cit. 2017-06-12]. Dostupné z: [http://www.cetris.cz/pagedata/research-development/5\\_cidem\\_hranice\\_wta\\_2012.pdf?1435737362](http://www.cetris.cz/pagedata/research-development/5_cidem_hranice_wta_2012.pdf?1435737362)
- [14] KAJSLÍK, J. Plastifikátory nahrazující vápno ve vápenocementových omítkách. Brno, 2016. 42 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.
- [15] BERČÍK, M. Možnosti využití různých druhů příměsí v technologii stříkaných betonů. Brno, 2014. 65 s., 73 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
- [16] HELA, R. Příměsí do betonu. TKS Beton. Str. 5. Praha 2015. Vydání 2. [online]. [cit. 2017-10-03]. Dostupné z: [http://www.betontks.cz/sites/default/files/BETON\\_2-15.pdf](http://www.betontks.cz/sites/default/files/BETON_2-15.pdf)
- [17] CIENCILOVÁ, Z. Možnosti zvyšování trvanlivosti betonů pro vodonepropustná tunelová ostění. Brno, 2015. 63 s., 72 s. příl., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie a stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
- [18] PROKOPEC, Z. Mechanické aktivace příměsí do betonů a ověření dopadů na fyzikálně mechanické vlastnosti čerstvých a zatvrdlých betonů. Brno, 2012. 76 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [19] Stavchemshop. Technologie vodonepropustného betonu. [online]. [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://www.stavchemshop.cz/files/cz-con-bro-vodonepropustnestavby8.pdf>
- [20] MIKHAILOVA, O. Studium možností efektivního využívání a aktivace aktivních příměsí do betonu. Brno, 2014. 89 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

- [21] FRÝBORTOVÁ, I. Možnosti alkalické aktivace ocelářské strusky. Brno, 2010. 51 s., Bakalářská práce na Fakultě chemické Vysokého učení technického v Brně, Ústav chemie materiálů. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.
- [22] Svceement. Využití vysokopecní strusky a přírodního anhydritu k přípravě struskosíranového pojiva. [online]. [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://www.svcement.cz/includes/dokumenty/pdf/sd2008-prednaska-dgstruskosiranove-pojivo.pdf>
- [23] Vše pro váš dům. Historie, výroba a vlastnosti cementotřískové desky CETRIS. [online] [cit. 2017-06-19]. Dostupné z: <http://www.vseprovasdum.cz/historie-vyroba-a-vlastnosti-cementotriskove-desky-cetris.html>
- [24] Cetris. Výrobní program. [online]. [cit. 2017-06-19]. Dostupné z: [http://www.cetris.cz/pagedata\\_cz/download/511\\_ppp\\_kap-02.pdf](http://www.cetris.cz/pagedata_cz/download/511_ppp_kap-02.pdf)
- [25] MELO, M. Analýza možnosti využití odpadů vznikajících při výrobě cementotřískových desek. Brno, 2013. 112 s., 3 s. příl., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
- [26] Vodní sklo. Základní informace o vodním sklu. [online]. [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <http://www.vodnisklo.cz/cz/clanky/zakladni-informace-o-vodnim-skle>
- [27] MELICHAR, T., PROCHÁZKA, D. Studium vlivu jemnozrnných příměsí z alternativních zdrojů na fyzikálně-mechanické parametry HSC. TKS Beton. Str. 66. Praha 2011. Vydání 6. [online]. [cit.2017-06-12]. Dostupné z: [http://www.betontks.cz/sites/default/files/2011-6-66\\_0.pdf](http://www.betontks.cz/sites/default/files/2011-6-66_0.pdf)
- [28] Technický list: Kema – mikrosilika. Kema stavební materiály [online]. [cit. 2017-10-25].
- [29] MENEZZI, C., CASTRO, V., SOUZA, M. Production and properties of a medium density wood-cement boards produced with oriented strands and silica fume. *Ciencia y tecnología*, Volume 9, Issue 2, Maderas, 2007 Strany 105-115, online ISSN: 0718 – 221X.
- [30] NA, Bin, Zhiqiang WANG, Haiqin WANG a Xiaoning LU NANJING. *Wood-cement compatibility revie* [online]. China, 2014 [cit. 2017-06-22]. Forestry University College of Materials Science and Engineering.



- [31] MAAIL, R., UMEMURA, K., AIZAWA, H., KAWAI, S. Curing and degradation processes of cement-bonded particleboard by supercritical CO<sub>2</sub> treatment. *Journal of Wood Science*, August 2011, Volume 57, Issue 4, Strany 302-307, online ISSN: 1611-4663
- [32] VAŠEK, T. Testování možností využívání druhotných surovin jako náhrady přírodních kameniv. Brno, 2014. 115 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [33] ČSN EN ISO 1716 – Zkoušení reakce výrobků na beton – Stanovení spalného tepla (kalorické hodnoty). ČNI. 2011
- [34] Kaolin. *Geologická encyklopedie*. [online]. [cit. 2017-11-07]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?kaolin>
- [35] MELICHAR, T., BYDŽOVSKÝ, J., VACULA, M. Specifické bakterie jako možné modifikační složky matrice cementotřískových desek. In *Construction materials*. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, 2013. s. 182-188. ISBN: 978-80-552-1031-5.
- [36] ČSN EN 310. Desky ze dřeva: Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu. ČNI. 1995
- [37] ČSN EN 319. Stanovení pevnosti v tahu kolmo na rovinu desky. ČNI. 1994
- [38] ČSN EN 1328. Cementotřískové desky – Stanovení odolnosti proti mrazu. ČNI. 1998
- [39] ČSN EN 197-1. Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. ČNI. 2001
- [40] DOUDART DE LA GRÉE, G.C.H., YU, Q.L., BROUWERS, H.J.H. Assessing the effect of CaSO<sub>4</sub> content on the hydration kinetics, microstructure and mechanical properties of cements containing sugars, In *Construction and Building Materials*, Volume 143, 2017, Pages 48-60, ISSN 0950-0618.
- [41] KEPRDOVÁ, Š., BYDŽOVSKÝ, J. Technické konopí, alternativní plnivo cementotřískových desek. In *Podlahy a povrchové úpravy ve stavebnictví 2011*. Praha: Betonconsult, s.r.o., 2011. s. 143-148. ISBN: 978-80-260-0166-9.
- [42] CHYBÍK, J. *Přírodní stavební materiály*. Vydání 1. Praha. Grada Publishing. 2009. 268 s. ISBN 978-80-247-2532-1.

- [43] TOŠKOVÁ, M. a kol. Situační a výhledová zpráva len a konopí. Praha. Ministerstvo zemědělství. 2010. 49 s. ISBN 978-80-7084-900-7, ISSN 1211-7692, MK ČR E 11003.
- [44] Stavebniny Šťastný. [online]. [cit. 2017-10-08]. Dostupné z: <https://www.stavebninystastny.cz/drevo/desky-cetris/deska-cetris-8-2600x1250mm-kolmanebrousen-3-25.html>
- [45] Kaplan, s.r.o. [online]. [cit. 2017-10-08]. Dostupné z: <http://www.drevo-kaplan.cz/cetris-basic-f.3350x1250mm>
- [46] Mendelova univerzita. Význam půdních mikroorganismů pro produkční a mimoprodukční funkce půdy. [online]. [cit. 2017-10-09]. Dostupné z: [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/print.php?page=4009&typ=html](http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=4009&typ=html)
- [47] Dřevovýroba Křenek. [online]. [cit. 2017-10-09]. Dostupné z: [http://www.drevovyrobakrenek.cz/?page\\_id=86](http://www.drevovyrobakrenek.cz/?page_id=86)
- [48] Blog EKOOKO. [online]. [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: <http://ekooko.cz/2015/07/15/konopne-pazderi/>
- [49] Hydroponics. [online]. [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: <https://hydroponics.com/shop/liapor-expanded-clay/>
- [50] Průmyslová ekologie. [online]. [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: <http://www.prumyslvaekologie.cz/Dokument/102300/pusobi-snizovani-emisnich-limitu-na-kvalitu-popilku-a-jejich-vyuziti.aspx>
- [51] SATO, T.; BEAUDOIN, J.J. Effect of nano-CaCO<sub>3</sub> on hydration of cement containing supplementary cementitious materials. [online]. [cit. 2017-11-02]. Dostupné z: <http://nparc.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/accepted/?id=d4fa7e74-6f40-41b2-8178-8e196376ede4>
- [52] KHAN, SADAQAT & FADHIL NURUDDIN, MUHAMMAD & AYUB, TEHMINA & SHAFIQ, NASIR. (2014). Effects of Different Mineral Admixtures on the Properties of Fresh Concrete. TheScientificWorldJournal. 2014. 986567. 10.1155/2014/986567.
- [53] Cetris. [online]. [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: [http://www.cetris.cz/pagedata\\_cz/download/511\\_ppp\\_kap-02.pdf](http://www.cetris.cz/pagedata_cz/download/511_ppp_kap-02.pdf)

- [54] FLÁDR, J. Vysokohodnotný beton 1. [online]. [cit. 2017-10-15]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/43045430-Vysokohodnotny-beton-1-josef-fladr-kancelar-b788-konzultace-streda-12-00-13-00.html>
- [55] Tescan. [online]. [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: <https://www.tescan.com/en-us/technology/sem/mira3>
- [56] GUANG, J., ZHIDAN, R., WEI, S. Effects of metakaolin on mechanical properties, pore structure and hydration heat of mortars at 0.17 w/b ratio, In Construction and Building Materials, Volume 93, 2015, Pages 564-572, ISSN 0950-0618.
- [57] Micromeritics. [online]. [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: <http://micromeritics.com/Product-Showcase/AccuPyc-II-1340.aspx>
- [58] Retsch. [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <https://www.retsch.com/products/milling/disc-mills/rs-200/function-features/>

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

EN – Evropská norma

ČSN – Československá norma (Česká technická norma, Česká soustava norem)

ISO – Mezinárodní organizace pro standardizaci

CEM I – Portlandský cement

CEM II – Portlandský cement směsný

CEM III – Vysokopecní cement

CEM IV – Pucolánový cement

CEM V – Směsný cement

42,5 (52,5) R – Minimální pevnost v tlaku 42,5 (52,5) MPa po 28 dnech, R – rychlý počáteční nárůst pevností (Rapid)

THC – Tetrahydrokanabinoly

CSH – Kalciumhydrosilikát

CAH – Kalciumhydroaluminát

UREA – Močovina

DIC – Rozpuštěný anorganický uhlovodík

AMM – Amonný iont

DTA – Diferenční termická analýza

XRD – Rentgenová difrakční analýza

SEM – Rastrovací elektronový mikroskop

REF – Referenční receptura

VAP (5, 10, 15, 20) – Receptura s 5 až 20% obsahem vápence jako náhrady za cement

SKV (5, 10, 15, 20) – Receptura s 5 až 20% obsahem škváry jako náhrady za cement

POP (5, 10, 15, 20) – Receptura s 5 až 20% obsahem popílku jako náhrady za cement

DOD (5, 10, 15, 20) – Receptura s 5 až 20% obsahem odřezků jako náhrady za cement

VUT FAST– Vysoké učení technické, Fakulta stavební

TG – Termogravimetrie

DTG – Derivační křivka