ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

STUDIJNÍ PROGRAM: STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ

STUDIJNÍ OBOR: INTEGRÁLNÍ BEZPEČNOST STAVEB

DIPLOMOVÁ PRÁCE

POŽÁRNÍ OCHRANA POŽÁRNÍM NÁSTŘIKEM NA BÁZI H-CEMENTU

FIRE PROTECTION BY FIRE SPRAYING BASED ON H-CEMENT

2019

ZPRACOVAL: JAKUB ŠEJNA
VEDOUCÍ PRÁCE: PROF. ING. FRANTIŠEK WALD, CSC.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Šejna Jméno: Jakub Osobní číslo: 438381

Zadávající katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Studijní program: Integrální bezpečnost staveb

Studijní obor: Stavební inženýrství

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Požární ochrana nástřikem na bázi H-Cementu

Název diplomové práce anglicky: Fire protection by spraying based on H-Cement

Pokyny pro vypracování:
Shrnutí problematiky
Příprava požárních experimentů
Provedení experimentů
Vyhodnocení experimentů
Shrnutí

Seznam doporučené literatury:
Wald, F.; Pokorný, M.; Horová, K.; Hejtmánek, P.; Najmanová, H.; Benýšek, M.; Kurejková, M.; Schwarz, I., Modelování dynamiky požáru v budovách, Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.
Wald, F.; Wang, Y.C.; Burgess, I.W.; Gillie, M. Performance-Based Fire Engineering of Structures, Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN 978-0-415-55733-7.
Wald, F.; Beneš, M.; Chladná, M.; Karpaš, J.; Holický, M.; Kuklík, P.; Kroupa, L.; Langer, J. et al.Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí Praha: CTU. Publishing House, 2005. ISBN 80-01-03157-8.

Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Ing. František Wald, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 23.9.2019 Termín odevzdání diplomové práce: 5.1.2020
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30. 9. 2019
Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Požární ochrana požárním nástřikem na bázi H-Cementu vypracoval samostatně s využitím citované literatury pod odborným vedením prof. Františka Walda a konzultanty Pavla Reitermana a Víta Šmilauera.

V Praze dne 3. 1. 2020

. . . . . .

podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat prof. Františku Waldovi za odborné vedení mé diplomové práce a nasměrování mého profesního zaměření v rámci požární bezpečnosti staveb k detailnímu simulování výzkumných otázek a za utvrzení, že bez stanovování vysokých požadavků na moji osobu nebo kladení cílů, kterým by se ostatní pokusili vyhnout, nelze posunout svůj osobnostní vývoj a vývoj požární ochrany v České republice. Nedílné poděkování patří i mým konzultantům, kteří vždy s ochotou diskutovali se mnou o dané problematice a snažili se mě nasměrovat správným směrem pro splnění stanovených cílů.

Děkuji i svým rodičům a zbytku rodiny za podporu při studiu, která mi pomohla si své cíle plnit.

. . . . . .

podpis

Shrnutí

Diplomová práce je zaměřena na požární ochranu nástřikem na bázi hybridního cementu. Součástí práce je popis materiálu, jeho vlastností za zvýšených teplot, návrh receptur pro běžné a lehčené malty pro ochranu ocelových prvků. Podle receptur jsou vyrobeny zkušební vzorky. Je stanovena pevnost dané směsi za ohybu a tlaku a odolnost za zvýšené teploty a tepelně technické vlastnosti. Pro stanovení pevností je využit trhací stroj MTS. Pro ověření požární odolnosti experiment v malorozměrové peci, který je navržen numerickým modelem CFD. Tepelná vodivost je stanovena analytickým modelem a metodou konečných prvků v programu ANSYS. Poznatky diplomové práce lze využít pro přípravu normové zkoušky zvýšení požární odolnosti navržené směsi jako požární ochrana v praxi.

Klíčová slova

H-Cement; hybrid cement; požární nástřik; metoda konečných prvků; CFD; FDS; zvýšené teploty; ochranná vrstva; pevnost H-Cementu; výpočet ochranné vrstvy; malorozměrová zkouška požární odolnosti

Abstract

The diploma thesis is focused on fire protection by spraying based on hybrid cement. Part of the work is a description of the material, its properties at elevated temperatures, the design of recipes for common and lightweight spray for the protection of steel elements. Test samples are made according to designed recipes. The bending and compression strength of the mixture and the resistance to elevated temperature and thermal properties are determined. For determination of strength is used testing machine MTS. For verification of fire resistance experiment in small furnace is designed by numerical model CFD. Thermal conductivity is determined by analytical model and validated finite element method in ANSYS software. The findings of the thesis can be used for the preparation of the standard test for improvement of fire resistance by the proposed mixture as a fire protection in practice.

Keywords

H-Cement; hybrid cement; fire spraying; Finite Element Method; CFD; FDS; elevated temperatures; protective layer; strength of H-Cement; calculating the protective layer; small-scale fire resistance test

Obsah

Shrnutí I
Abstract I
Seznam použitých symbolů a zkratek ... III
1 Úvod 1
2 Požární ochrana ocelových konstrukcí ... 3
2.1 Historie požární ochrany na území České republiky ... 3
2.2 Současnost ... 4
2.3 Normové postupy ... 5
2.4 Malorozměrové zkoušky požární odolnosti ocelového prvku chráněného H-Cementem ... 5
2.5 Představení a popis zkušební malorozměrové pece ... 6
2.5.1 Pec z pórobetonových konstrukčních dílů ... 6
2.5.1 Pec s ocelovým rámem ... 7
3 Cíle práce ... 9
4 Příprava požární ochrany ... 10
4.1 H-Cement ... 10
4.2 Vlastnosti ... 10
4.3 Zpracovatelnost ... 12
4.3.1 Malta s běžným plnivem – písek frakce 0–4 ... 12
4.3.2 Kompozitní směs H-Cementu s experlitem ... 17
4.4 Stanovení jednotlivých směsí pro experimenty ... 18
4.4.1 Malta s H-Cementem, nelehčená s PVA vlákny ... 19
4.4.2 Malta s H-Cementem, lehčená expandovaným perlitem ... 21
4.4.3 Malta s H-Cementem, lehčená expandovaným perlitem a s čedičovými vlákny ... 24
4.5 Představení vzorků ... 25
4.5.1 Tloušťka ochranné vrstvy z H-Cementu ... 28
4.6 Zrání a sušení vzorků ... 31
4.7 Zkoušky pevností navržených směsí ... 34
4.7.1 Pevnosti vyrobených vzorků ... 36
5 Experiment ... 38
5.1.1 Rozmístění zkoušených prvků v peci a jejich zavěšení ... 39
5.1.2 Návrh průběhu zkoušky ... 40
5.2 Realizace experimentu ... 42
5.2.1 Průběh experimentu ... 44
5.3 Teplota plynu v peci ... 47
6 Tepelná vodivost ... 51
7 Shrnutí 57
7.1 Vyhodnocení experimentu ... 57
7.2 Tabulkové hodnoty ... 57
8 Závěr diplomové práce ... 59
Literatura 61
Seznam příloh 63

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

c	Měrné teplo	J/(kg·K)
c_p	Měrné teplo požárně ochranného materiálu	J/(kg·K)
c_a	Měrné teplo oceli	J/(kg·K)
d_p	Tloušťka požárně ochranného materiálu	m
$\frac{A_p}{V}$	Součinitel průřezu pro chráněné prvky	m^{-1}

Řecké symboly

λ	Tepelné vodivost	W/(m·K)
λ_p	Tepelná vodivost požárně ochranného materiálu	W/(m·K)
ρ	Objemová hmotnost	kg/m^3
ρ_p	Objemová hmotnost požárně ochranného materiálu	kg/m^3
ρ_a	Objemová hmotnost oceli	kg/m^3
$\rho_{s,i}$	hustota při zkoumané teplotě daného dílce	kg/m^3
ρ_{s0}	hustota při teplotě 20 °C daného dílce	kg/m^3

Zkratky

CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator
VŠCHT	Vysoká škola chemicko-technologická v Praze
TÚPO	Technický ústav požární ochrany Hasičského záchranného sboru České republiky
HRR	Rychlost uvolňování tepla
CO	Oxid uhelnatý
CO_2	Oxid uhličitý

Např.	Například
Tzn.	To znamená

1 Úvod

Požární bezpečnost stavby je jeden z předmětů zkoumání a posuzování z oblasti stavebnictví, ať už jde o stavbu jako celek nebo o jednotlivé prvky, které mohou zásadně ovlivnit funkčnost stavby při požáru. Nejproblematičtějším úkolem při navrhování celé stavby bývá komplexní přístup k posouzení požární odolnosti vytipovaných konstrukcí, rozdělení stavby na požární úseky, které mají zajistit nerozšíření možného požáru na větší část stavby, navržení a umožnění postupu správné evakuace osob, zvířat nebo i majetku a v neposlední řadě i posouzení zásobování požární vodou, přístupové komunikace a zásahové cesty pro jednotky PO. Vývoj nových materiálů a látek i zvýšení spotřeby elektrické energie pro vybavení jednotlivých místností klade zvýšené požadavky na přístup k navrhování požární ochrany daného objektu.

Dnes již lze posoudit např. plasty použité k výrobě spotřebičů, které jsou nyní vyráběny odlišně, a i v jiné technologii. Většina základních poznatků, které výrazněji ovlivnily vývoj požární ochrany, vývoj poznatků a jejich převedení do normativní nebo i legislativní části, většinou vychází z významných velkých požárů, k nimž došlo buď z důvodů nedbalosti, úmyslně nebo dle jiného možného scénáře vzniku požáru. Z historie velkých katastrof jsou modelové události od velkého požáru Londýna v září 1666 po požár Světového obchodního centra v New Yorku způsobený teroristickým útokem 11. září 2001 [1].

Namáhání stavebních konstrukcí v posledních desetiletích zvyšuje nárůst množství hořlavých předmětů v místnosti, a i jejich vyšší hořlavost nebo množství hořlavých látek uvolněných do okolního prostředí. Rychlost nárůstu teplot v požárním úseku ovlivňuje rozložení teplot po posuzovaných konstrukcích a jednotlivé rozdělení po průřezu konstrukcí.

Nejvíce jsou těmito změnami ohroženy ocelové konstrukce, které dobře vedou teplo. U ocelových prvků dochází vlivem vzrůstajících teplot k velmi rychlé redukci meze kluzu. Posouzení ocelového prvku závisí na stanovené kritické teploty a navržené ochrany vztažené k ní vztažené. Z toho lze odvodit základní premisu: k požární odolnosti stavby výrazně přispívá ochrana jakékoli ocelového prvku stanovená na základě spočtené kritické teploty.

Mezi základní možnosti, jak ochránit ocelový prvek před účinky požáru, je např. obklad deskovými materiály (na bázi sádrokartonu, cementovlákna atd.), požární nátěry, požární nástřiky popřípadě skrápění vodou, a tedy ochlazování. Problém požárních nástřiků nebo nátěrů spočívá v pracnosti provedení tohoto řešení a vzhledem k omezené trvanlivosti i v nákladech na jejich znovuobnovování. Proto se současný výzkum zaměřuje na možnosti využití nových materiálů na podobné bázi, které by mohly významně usnadnit nebo zlepšit provádění požární ochrany na ocelových prvcích [2].

Jako jedna z možností jsou hydratované hybridní cementy (H-Cementy), které mají oproti ostatním cementovým materiálům specifické vlastnosti. Ty spočívají ve výborné přilnavosti k očištěnému ocelovému povrchu, díky čemuž oproti nátěrům či nástřikům nevyžadují pro provedení jiné stavební přípravy podkladu.

Je potřeba zkoumat a ověřovat nové možnosti provádění požární ochrany ocelových stavebních prvků, a tím i umožňovat další možná řešení požární ochrany staveb nejen v České republice.

2 Požární ochrana ocelových konstrukcí

2.1 Historie požární ochrany na území České republiky

V dubnu 2019 uběhlo 42 let od zavedení prvních základních norem v oblasti požární bezpečnosti. Od tohoto data je možné tvrdit, že nastala revoluce v možnostech posuzování staveb z hlediska požární ochrany. Mezi původními základními normami se postupně objevily normy pro nevýrobní objekty [3] nebo pro objekty výrobní [4]. Byly stanoveny základní postupy pro posuzování staveb podle požárního zatížení, které lze aplikovat na samostatný požární úsek. Díky těmto změnám je dnes možné provádět detailnější výpočty a přistupovat k stanovení požární odolnosti ocelových prvků z hlediska limitní teploty a délky působení požáru na změnu vlastností ocelových prvků. Návrh průřezů, který vyhoví dané situaci, se již nezakládá na bazálních odhadech nebo na překonaných poznatcích.

Obeznámenost s počátky procesu poznání základních principů rozvoje ohně, požáru a přístupu k požárním zásahům umožňuje vnímat i proměny v přístupu jednotek požární ochrany. Hlavní zásadou hasičů byla především záchrana životů a majetku. Kořeny definice požární ochrany, jak byla vnímána v počátcích, lze nalézt například v *Ottově slovníku naučném*: „Hasičství záleží ve spořádaném spolupůsobení při ohni hrozícím neb již vzniklém, aby zachráněny byly životy a majetek požárem v nebezpečí se ocitnuvší; činnost tuto pěstují sbory hasičské.“ [5] Pod pojmem Hasičství v nynější době můžeme chápat jako požární ochranu, ať už v oblasti prevence nebo represe.

Vznik požární ochrany na území Čech, Moravy a Slezska lze datovat k roku 1751, kdy Marie Terezie vydává patent „Řád k hašení ohně“, kterým se určují prvotní principy požární ochrany. Nařízeny byly základní kroky k prevenci požárů: vybudování zvonic v obcích, úprava komínů a černé kuchyně v nehořlavém provedení a v každé chalupě měl být zřízen zděný komín. V roce 1785 císař Josef II. vydává Řád proti ohni pro města a městyse, kde jsou už upraveny postupy, jak zamezit šíření ohně na okolní stavby, omezení stavebních konstrukcí ze dřeva nebo dokonce zákazy kouření na místech, kde se skladují snadno zápalné látky. Následovaly právní předpisy jako Zákon č. 45/1876 či Vládní nařízení č. 30/1942, které se primárně zabývaly zakládáním hasičských jednotek na území měst, jejich organizací a správou [6].

Zákon o požární ochraně byl vydán v roce 1958 (Zákon 18/1958), který byl v roce 1985 nahrazen dodnes platným Zákonem 133/1985 [7], který definitivně stanovil povinnosti a pravidla na úseku požární ochrany. Definování pravomocí a povinností jednotlivých složek, které se zabývaly požární ohranou, usnadnilo práci v této oblasti a její další vývoj. V továrnách byla zřízena pracovní pozice Technik požární ochrany, jenž měl v popisu práce péči o požární bezpečnost v daném závodě. To pomohlo snížit počet vzniklých požárů, zvýšit povědomí zaměstnanců ohledně požární ochrany a tím i celkovou bezpečnost okolí továren. Zavádění normativních postupů do praxe napomohlo dalšímu zvýšení požární bezpečnosti staveb. Následný vývoj norem byl podložen detailnějším pochopením výhřevností jednotlivých látek nebo možnou

aplikací detailnějších výpočtů pomocí počítačů. Především vývoj ovlivnil určování odstupových vzdáleností nebo způsob výpočtu teplot v daném požárním úseku metodami lokálního požáru, zónových modelů, případně využitím například CDF modelů.

V roce 1975 vznikla koncepce normalizace v oblasti požární bezpečnosti staveb. Tento krok významně umožnil zavádění nových poznatků z prováděných experimentů a vývoje nových materiálů. Především byly stanoveny postupy pro jednotné zkoušení nových prvků, které mohly být použity ve stavebnictví. Rozdělení norem mezi čtyři základní kategorie, a to normy projektové, zkušební, hodnotové a přidružené. To pomohlo projektantům využívat vyspělejších možností při požární únosnosti nosných prvků, neboť normativy zajišťovaly spolehlivé výpočty s ověřenými vstupními daty. Výzkum požární problematiky začal v 60. letech minulého století, šlo například o výzkum prvků a nosných konstrukcí při vyšších teplotách (1966-1970), požární bezpečnost ocelových a kombinovaných konstrukčních soustav (1971-1975) nebo komplexní řešení požární bezpečnosti staveb včetně výzkumu chování nových materiálů a konstrukcí při vyšších teplotách (1971-1973) [8].

2.2 Současnost

V současném stavu jsou v platnosti normy evropské, tedy Eurokódy pro jednotlivé materiály a prvky z nich (Eurokód 199x-1-1 pro navrhování prvků za běžné teploty a Eurokód 199x-1x-2 pro navrhování prvků při působení požáru) a České technické normy, kdy se jedná především o současný požární kodex požárních norem řady ČSN 73 08xx. Základním předpisem, který komplexně řeší požární ochranu v České republice a činí právně závaznými normy zabývající se požární problematikou, je Zákon 133/1985 Sb. [7] společně s Vyhláškou 23/2008 Sb. ve znění pozdějších předpisů [9]. Těmito předpisy je specifikován základní požadavek pro navrhování staveb, zejména požadavek na zachování nosnosti a stability za požáru po určitou dobu. Postupy, kterými lze těmto požadavkům vyhovět, jsou určeny v Eurokódech a Českých technických normách. Uznatelnost jednotlivých postupů podle jednotlivých Eurokódů je uznatelná napříč Evropou při předpokladu, že jsou dodržovány národní přílohy jednotlivých norem [10].

Základními postupy pro navrhování jednotlivých prvků pro únosnost za požáru jsou tabulkové hodnoty, kdy na požární odolnost prvku je vybrán jeho rozměr nebo při detailnějším výpočtu například redukce materiálových vlastností materiálu, výpočet skrze stále únosný průřez pomocí metody redukovaného průřezu, nebo u betonu používané metody izotermy 500 nebo zónové metody.

Při těchto výpočtech se primárně uvažuje působení normové teplotní křivky [11], jejíž průběh předpovídá působení požárů po flashoveru v místnosti, ale nikterak nezohledňuje místnost nebo hořlavost látek, které jsou v místnosti umístěné. Tento předpoklad může docílit především přehodnocení jednotlivých konstrukčních prvků.

2.3 Normové postupy

Normovými postupy se rozumí posouzení jednotlivých prvků pomocí jednotlivých mezních stavů, tzn. pokud prvek je celistvý, nebo dokáže stále přenášet zatížení. Výpočty jednotlivých metod pro jednotlivé materiály jsou stanoveny detailněji v jednotlivých Eurokódech EN 199x-1-2 pro případy posuzování prvku za účinků požáru.

Pro ocelové prvky dle ČSN EN 1993-1-2 [12] lze odolnost uvažovat pomocí tří metod mechanické analýzy. Každá metoda má své předpoklady, které lze využívat nejlépe pro jednotlivé případy posuzování. Jednotlivé metody posuzují buď požadovaný čas (Rovnice 1), po který ocelový prvek má odolávat účinkům požáru, posouzení únosnosti (Rovnice 2), kdy dochází k změně materiálových charakteristik vlivem požáru nebo z hlediska teploty (Rovnice 3), kdy je zkoumáno, jestli bylo dosaženo kritické teploty ocelového prvku.

Rovnice 1: Požární odolnost ocelového prvku z hlediska času

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,req}$$

Rovnice 2: Požární odolnost ocelového prvku z hlediska únosnosti

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$$

Rovnice 3: Požární odolnost ocelového prvku z hlediska teploty

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d}$$

Při prokázání dle těchto rovnic se uvažuje, že posuzovaný prvek bude odolávat účinkům požáru dle definovaných požadavků. Požární odolnost daného prvku se doloží prokazatelným výpočtem.

2.4 Malorozměrové zkoušky požární odolnosti ocelového prvku chráněného H-Cementem

Existují dvě základní metody, jak modelovat dynamiku požáru, a to fyzikální nebo matematická. V případě fyzikálních modelů je vytvořeno umělé prostředí, které odpovídá v co největší míře tomu experimentálnímu, ve kterém se napodobuje reálné chování požáru (modelované prostředí je buď v měřítku 1:1, nebo je zmenšeno). Matematický model se oproti fyzikálnímu dá rozdělit na tři podkapitoly podle využitého matematického přístupu, a to deterministického, pravděpodobnostního nebo modely zjednodušené. Pro výpočty se nejčastěji používají matematické modely deterministické, kde známe dva základní. Jde především o modely typu pole, nebo o zónové modely, kdy sice zónový model není tak přesný jako model typu pole, ale má podstatně kratší výpočetní čas [12–14].

Pro snazší a rychlejší představu ohledně interakce s různými dalšími částmi návrhu nebo k možné rychle vizualizaci zkoušeného prvku lze přistoupit k modelování ve zmenšeném měřítku. K tomu dochází v oblastech civilního nebo leteckého inženýrství, kde zmenšení meřítka není tak obtížné, jak je tomu právě u modelování rozvoje a průběhu požáru. Při modelování požáru ve

zmenšeném měřítku ovšem můžeme snáze pochopit specifické chování speciálních jevů při požáru.

Při přistoupení k modelování ve zmenšeném měřítku je určující základní představa o výsledcích, kterých je potřeba dosáhnout. Skutečné měřítko při modelování se dá považovat za nejstarší formu modelování, ale zmenšené měřítko je doménou posledních let, kdy je na úkor mírného znepřesnění výsledků dosaženo nižšího výpočetního času a kratšího času potřebného pro přípravu modelu. Výhodou je ale především možnost výpočet opakovat vícekrát. Ing. Jiří Chládek z Fakulty stavební ČVUT [14], který se zabýval možnostmi stanovení postupu provedení malorozměrové zkoušky s poznatky Maroše Krajčíře a Jany Müllerové [15], prezentoval základní vlivy a následky pro modelování ve skutečném měřítku a v meřítku zmenšeném viz Tabulka 1.

Tabulka 1: Porovnání skutečného modelu se zmenšeným [14, 15]

Kritérium	*Skutečné měřítko modelu*	*Zmenšené měřítko modelu*
Přesnost	*Vysoká*	*Vysoká*
Relativní náklady (€)	*Desetitisíce*	*Stovky*
Profesní náročnost	*Velmi vysoká*	*Velmi vysoká*
Čas přípravy	*Měsíce*	*Týdny*
Počet opakování	*Velmi omezený*	*Omezený*

2.5 Představení a popis zkušební malorozměrové pece

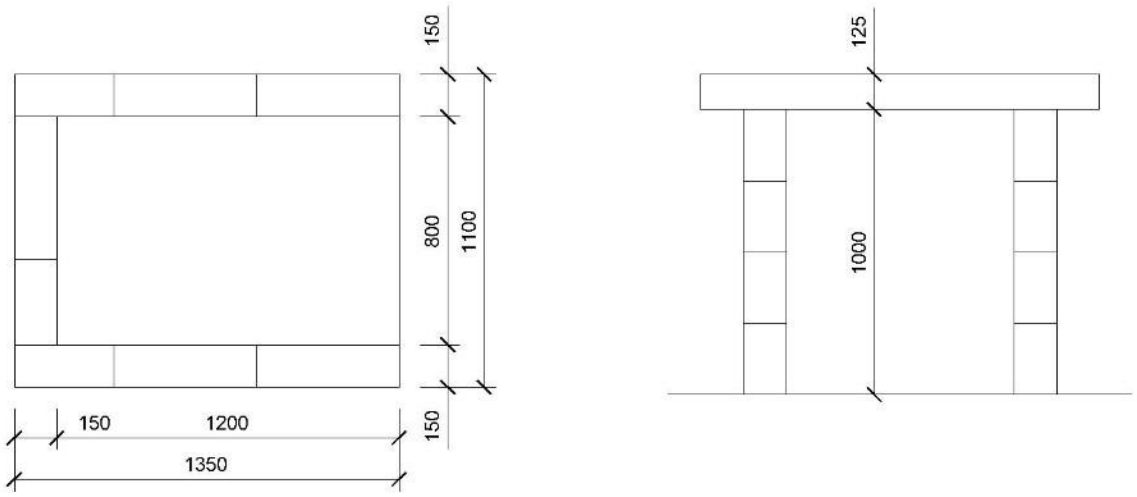
2.5.1 Pec z pórobetonových konstrukčních dílů

Pec, která se v minulosti používala pro experimenty pro potřebu základních experimentů, byla vyvinuta v rámci diplomové práce na ČVUT v Praze Václavem Flídrem [16]. Pec v dnešní době byla nahrazena novou pecí s ocelovou nosnou konstrukcí a Fermacell desek.

V peci bylo možné zkoušet vzorky o rozměrech 0,8 × 1,0 m což odpovídá ploše 10 % exponované plochy při velkorozměrových zkouškách. Pro vodorovné prvky je maximální rozměr pro zkoušené prvky stanoven na 1,2 × 0,8 m. Pec je postavena z pórobetonových tvárnic PORFIX P2-500 a stropní konstrukce z pórobetonových překladů Ytong P4-600. Rozměry malorozměrové pece jsou určeny v tabulce 18 a schématický znázorněny na obrázku 1.

Tabulka 2: Rozměry zkušební malorozměrové pece původní [16]

Rozměr	*Vnější [m]*	*Vnitřní [m]*
Délka	*1,35*	*1,2*
Šířka	*1,1*	*0,8*
Výška	*1,125*	*1,0*



(A) *(B)*

Obrázek 1: Schéma malorozměrové pece původní; (A) Půdorys malorozměrové pece; (B) Řez malorozměrové pece [14]

Pec byla vybavena přívody vzduchu a odvody spalin umístěnými u podlahy a pod stropem, otvory jsou o velikosti 300 × 100 mm. Pec je vyhřívána pomocí plynového podélného hořáku o délce 1200 mm, šířce 100 mm a výšce 150 mm. Pro zabránění akumulaci tepla v zadní a přední části byl hořák na koncích zakryt nehořlavou izolací v délce 200 mm. Plynový hořák byl poháněn propan-butanem. Pro zaznamenávání průběhu teplot byla v peci instalována čtveřice termočlánků vždy ve 2/3 výšky pece. Termočlánky jsou umístěny symetricky nad plynovým hořákem a dostatečně daleko, aby nemohly být ovlivněny teplotou od okolních konstrukcí. Referenční zkoušky byly provedeny v rámci diplomové práce Václava Flídra, kdy byla pec zkoušena pomocí nominální teplotní křivky—— ISO 834 a byl porovnáván průběh normové teplotní křivky, průběh experimentu a výsledky z FDS modelu malorozměrové pece. Vše s uspokojujícím výsledkem [16].

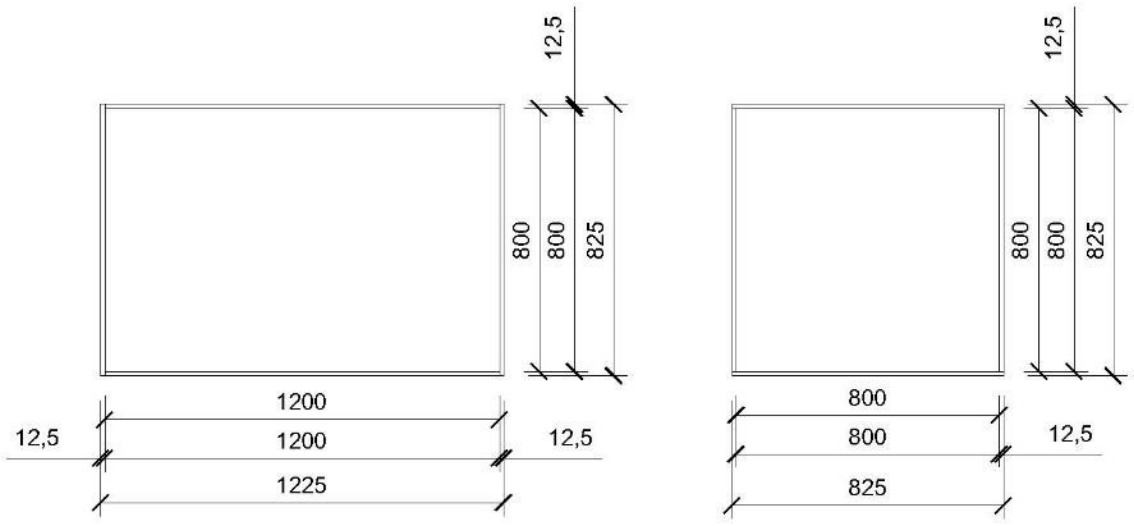
2.5.1 Pec s ocelovým rámem

Základní požadavky pro návrh zkušební pece, ze kterých J. Chládek [14] vycházel, jsou definovány v normě ČSN EN 1363-1. Pec je navržena tak, aby výsledky, které jsou získány právě touto malorozměrovou zkouškou, co nejpřesněji odpovídaly zkoušce, která by byla prováděna v akreditované zkušebně. Průběh vývoje teplot v malorozměrové peci musí odpovídat nominální teplotní křivce ISO 834 [11]. Při zkoušení bylo naměřeno na čtyřech horních termočláncích, které měří teplotu v peci v poloze zkoušených prvků, bylo dosaženo výrazné shody teplot vztažených k nominální teplotní křivce.

Nově navržená malorozměrová zkušební pec je o rozměrech délky 1,2 m, šířky 0,8 m a hloubky 0,8 m. Rozměry vycházejí z prostorového uspořádání požární laboratoře v UCEEB ČVUT v Praze. Hloubka pece byla výsledkem pozorování vývoje teploty v peci, kdy bylo docíleno jednotnějšího prostředí v peci při zvolení hloubky 0,8 m.

Tabulka 3: Rozměry zkušební malorozměrové pece nové [16]

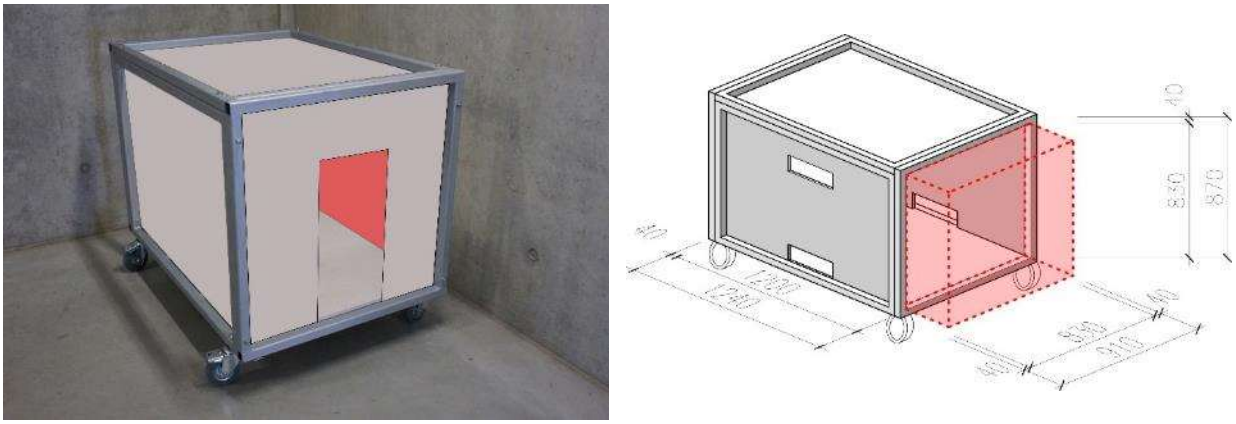
Rozměr	*Vnější [m]*	*Vnitřní [m]*
Délka	*1,225*	*1,2*
Šířka	*0,825*	*0,8*
Výška	*0,825*	*0,8*



(A) *(B)*

Obrázek 2: Schéma malorozměrové pece nové; (A) Půdorys malorozměrové pece; (B) Řez malorozměrové pece [14]

Pec je zahřívána pomocí plynového hořáku o délce 300 mm, šířce 100 mm a výšce 100 mm. Hořák je umístěný uprostřed pece. Jako palivo slouží propan. V peci jsou umístěny rovnoměrně termočlánky, které zaznamenávají průběh teplot v peci při zkoušce. V horních termočláncích, které jsou umístěny cca 300 mm pod stropem zkušební pece, jsou dosahovány teploty odpovídající normové teplotní křivce.



(A) *(B)*

Obrázek 3: (A) Pohled na pec pro malorozměrové zkoušky požární odolnosti; (B) Schéma pece promítnutá v axonometrii se zaokrouhlenými kótami

3 Cíle práce

Cílem této diplomové práce je představení hybridního cementu H-Cementu jako nového materiálu a ověření jeho využitelnosti ve formě ochranné vrstvy ocelových profilů.

Dílčím cílem práce je provedení zpracovatelnosti a míchatelnosti běžné malty z H-Cementu a písku frakce 0-4. Na základě poznatků zpracovatelnosti běžné malty stanovit receptury pro betony s H-Cementem jako pojivem pro využití jako požární ochranné vrstvy ocelového prvku a recepturu pro referenční vzorek z hlinitanového cementu.

Praktická část sestává z vytvoření zkušebních vzorků pro pevnostní zkoušky a pro zkoušky požární odolnosti v malorozměrové peci a z ověření požární odolnosti navržené ochranné vrstvy z H-Cementu. Pro návrh tloušťky ochranné vrstvy se použije přírůstková metoda podle evropských národních norem.

Před experimentem v malorozměrové peci připravit návrh zkoušky pomocí simulace proudění plynů v malorozměrové peci a umístit zkušební vzorky do pece tak, aby neovlivňovali proudění v peci. Z dat získaných z experimentu určit průběhy tepelné vodivosti vybraných směsí z H-Cementu a následně je validovat výpočetním modelem.

Vyhodnocení experimentu požární odolnosti směsí z H-Cementu je aplikace hodnot požární odolnosti do tabulky, závislé na návrhové teplotě ochranné vrstvy.

Shrnutí postupu pro splnění cílů práce:

1) představení H-Cementu jako materiálu využitelného pro požární ochranu
2) příprava vzorků pro zkoušky pevnosti
3) příprava vzorků pro malorozměrovou zkoušku ve studentské peci ČVUT na UCEEB
4) provedení experimentů ve studentské peci ČVUT na UCEEB
5) vytvoření výpočetního modelu pro ocelový prvek chráněný vrstvou z H-Cementu
6) stanovení tepelné vodivosti betonů z H-Cementu a jejích validace
7) aplikace poznatků z malorozměrové zkoušky požární odolnosti a vytvoření tabulkových hodnot

4 Příprava požární ochrany

4.1 H-Cement

Výrobcem H-Cementu je Považská cementáreň a. s. Ladce (Slovensko), pod vedením P. Martauze (Považská cementáreň). H-Cement je druhem hybridního cementu (více viz 4.2). Základní vlastnosti a souhrn informací okolo H-Cementu shrnuli pánové P. Martauz a J. Strigáč (oba Považská cementáreň) ve spolupráci s I. Janotkou a M. Bačuvčíkem (oba Building testing and research institute, Bratislava, Slovensko) v odborném článku Fundamental properties of industrial hybrid cement [17].

Pohled na výrobu portlandského cementu z hlediska ekologie, především emise CO2 vypuštěné při výrobě do ovzduší, nelze zanedbat. Získání čisté látky portlandského cementu s sebou nese vysoké energetické a technologické nároky. Objem výroby portlandského cementu se na celosvětové úrovni neustále zvyšuje, a je předpověď rostoucího objemu CO_2 uvolněného při výrobě portlandského cementu do ovzduší se dle předpovědí pohybuje okolo 7-8 %. S tím je spojena nutnost výzkumu alternativních možností využití cementů se sníženou čistotou, při jejichž výrobě se využívá mineralizátorů [18].

4.2 Vlastnosti

Mezi významné užitné vlastnosti nového hybridního cementu patří pucolánová reakce popílku, latentní hydraulická reakce hutní strusky spolu s alkalickou aktivací anorganického geopolymeru. Geopolymer je na bázi vysrážené odpadní vody čerpané při výrobě bauxitu. Obsah portlandského cementového slínku v H-Cementu je maximálně 20 % hmotnosti celé směsi. Pomocí nízkého hmotnostního procentuálního zastoupení portlandského cementu je docíleno nízké konečné ceny H-Cementu.

Výroba H-Cementu nepotřebuje dodatečné tepelné zpracování ani autoklávování pro jeho aktivaci. Díky tomu se objem emisí CO_2 snižuje až o 80 %, což je v rovině udržitelnosti ekosystému významný aspekt. Není také třeba jakkoli upravovat pravidla pro zpracovatelnost směsí, v nichž oproti klasickému portlandskému cementu tvoří hlavní pojivo H-Cement. Dle výzkumu P. Martauze je H-Cement plně použitelný pro betony až do pevností C30/37 pevnostní třídy. Oproti klasickým betonům lze navíc operovat s příznivou vlastností sníženého smršťování betonu po vystavení suchému prostředí.

Kolektiv P. Martauze ve studii uvádí hmotnostní podíl jednotlivých oxidů v jednotlivých hlavních složkách H_Cementu [17]. Při detailnějším pohledu na složení H-Cementu se dá vyjádřit minimální zastoupení SiO_2, CaO, SO_3 a Na_2O dle tabulky 1.

Tabulka 4: Minimální zastoupení oxidů v H-Cementu

Složka	*Zastopuní [%]*
SiO_2	*40,0*
CaO	*20,0*
SO_3	*3,0*
Na_2O	*2,0*

Základní vstupní látky s vlastnostmi, majícími negativní vliv na trvanlivost stavby nebo negativní dopad na životní prostředí, zde byly odstraněny pomocí výše specifikovaných postupů. Např. vysoce alkalický koncentrát odpadní vody byl získán odpařením a elektrolýzou standardní odpadní vody vyskytující se v úložišti vody po výrobě bauxitu. Koncentrát byl neutralizován kyselinou sírovou pomocí srážení na pevný Na_2SO_4. Hodnoty pH po neutralizaci byly potvrzeny XFR analýzou s hodnotou 7 neutrální (původně 13).

V tabulce 2 jsou pro porovnání uvedeny základní hodnoty pro H-cement a CEM I 42,5 R. H-Cement při srovnání s klasickým portlandským cementem v 28denní pevnosti vykazuje vyšší křehkost s nižším hydratačním teplem. Proto lze H-Cement použít ve stejných případech jako cementy s nízkým hydratačním teplem, ale s využitím jeho vlastností pro použití ve formě ready-mixed betonů jako u portlandského cementu.

Tabulka 5: Charakteristické vlastnosti H-Cementu a CEM I 42,5 R [17]

Parametr	*Jednotka*	*H-Cement*	*CEM I 42,5 R*
Standartní konzistence	*%*	*32 ± 2,0*	*29,1 ± 1,8*
2denní pevnost v tlaku	*MPa*	*17,5 ± 3,0 (w/c=0,4)*	*33,7 ± 2,0 (w/c=0,5)*
28denní pevnost v tlaku	*MPa*	*36,5 ± 4,0 (w/c=0,4)*	*59,2 ± 1,6 (w/c=0,5)*
90denní pevnost v tlaku	*MPa*	*41,5 ± 3,0 (w/c=0,4)*	*63,1 ± 1,9 (w/c=0,5)*
2denní pevnost v ohybu	*MPa*	*3,5 ± 0,5 (w/c=0,4)*	*6,4 ± 0,4 (w/c=0,5)*
28denní pevnost v ohybu	*MPa*	*4,4 ± 0,4 (w/c=0,4)*	*8,9 ± 0,4 (w/c=0,5)*
90denní pevnost v ohybu	*MPa*	*9,0 ± 0,3 (w/c=0,4)*	*9,3 ± 0,3 (w/c=0,5)*
Hydratační teplo	*j/g*	*185*	*359*

Porovnáním vlastností H-Cementu s portlandským cementem lze H-Cement klasifikovat jako pevné změkčovadlo dané směsi, a to z důvodu vysokého podílu popílku v směsi H-Cementu. Namíchaná malta s w/c = 0,4 vykazuje oproti klasické maltě portlandského cementu 42,5 R s w/c = 0,5 vlastnosti jako pevnostní třída 32,5 R dle EN 197-1. Prvotní zkoušky, provedené P. Martauzem a kol., vyjmenovávají předosti H-Cementu jako pojiva pro „ready-mixed“ betony [17]. Tato diplomová práce pracuje se směsí, která bude míchána v malých objemech. Jednotlivé směsi budou zkoušeny na pevnost v ohybu a tlaku na zkušebních trámcích.

4.3 Zpracovatelnost

4.3.1 Malta s běžným plnivem – písek frakce 0–4

Stanovení receptury pro maltu využitelnou pro použití jako požární omítky na ocelových prvcích. Hlavní vlastností H-Cementu je vysoká adheze k očištěné oceli, tedy bez potřeby ocel nijak ošetřovat pomocí podkladních nátěrů. Myšlenka použitelnosti malty z H-Cementu spočívá v provádění požárních nástřiků s vysokými požadavky na adhezi. Především zpracovatelnost malty pro strojní aplikaci je důležitá.

H-Cement jako nový materiál byl podroben zkouškám z míchatelnosti podle vymyšlené receptury. V konečné receptuře je uvažováno s využitím experlitu namísto klasického kameniva, tzn. snížení tepelné vodivosti ochranné vrstvy ocelového prvku. Zkušenosti s mícháním H-Cementu s experlitem však nebyly dosud podstatněji zkoumány. Daxner (2019) zkoušel kombinaci plniva experlitu a vermikulitu v poměru 1:1. Pro tuto diplomovou práci a projekt bylo uvažováno pouze o směsi se experlitem.

Z poznatků získaných z prvních zkoušek zpracovatelnosti od Dr. Daxner (2019) vyplynul vhodný poměr H-Cementu a experlitu 1:4 (H-Cement:experlitu). Potřebný poměr vody pro zpracovatelnost směsi pro strojně prováděný nástřik nebyl v prvních výzkumech stanoven.

Pro stanovení vhodného objemu vody pro směs byla použita receptura od M. Jogla (Experimentální centrum ČVUT). Byla upravena receptura s hlinitanovým cementem pro omítku. Původní receptura byla stanovena dle tabulky 3 pro vylití devíti zkušebních trámečků 160 × 40 × 40 mm.

Tabulka 6: Receptura pro H-Cement upravená dle M. Jogla (Recept. 1)

Složka	*Navážka [g]*	*Poznámka*
H-Cement	*2250*	
Písek frakce 0-4	*2450*	
Plastifikátor Sika 1035	*40,5*	*1,8 %*
Voda	*500*	*w/c = 0,23*

Obrázek 4: Jednotlivé navážené složky pro neupravenou recepturu 1;

Zleva bílé kádinky: plastifikátor SIKA 1035, voda

Zleva černé kýble: písek frakce 0-4, H-Cement

Tabulka 7: Receptura pro H-Cement upravená od M. Jogl (Recept. 1)

Složka	*Navážka [g]*	*Poznámka*
H-Cement	*2250*	
Písek frakce 0-4	*2450*	
Plastifikátor Sika 1035	*40,5*	*1,8 %*
Voda	*600*	*w/c = 0,26*

Při zpracovatelnosti původní odhadované receptury (Recept. 1) byla při míchání ve stroji zjevná nutnost dodání další vody potřebné pro zpracovatelnost směsi. Plastifikátor, který byl stanoven na 1,8%, pro uspokojivý stav směsi nevyhovoval. Proto bylo při míchání přidáno dalších 100 g vody (zvýšení vodního součinitele na 0,26). Po této úpravě receptury však byla směs hutná, málo zhutnitelná a pro aplikaci strojně nanášené omítky nevhodná.

(A) *(B)*

Obrázek 5: (A) Namíchaná směs Receptury 1; (B) směs 1 naplněná do trámečků 160 × 40 × 40 mm

Byly vyzkoušeny dvě směsi, u nichž byl zvýšen vodní součinitel na 0,3 až 0,4. Tyto změny byly provedeny pro zjištění „spotřeby“ vody potřebné pro hydrataci H-Cementu. Druhá záměs s navýšeným vodním součinitelem na 0,4 byla provedena pro předpoklad nasákavosti experlitu. Obě směsi se ukázaly jako zpracovatelné. Směs s vodním součinitelem 0,4 byla dostatečně tekutá, aby byla použitelná pro strojní nástřik.

Tabulka 8: Receptura pro H-Cement upravení w/c = 0,30 (Recept. 2)

Složka	*Navážka [g]*	*Poznámka*
H-Cement	*2250*	
Písek frakce 0-4	*2450*	
Plastifikátor Sika 1035	*40,5*	*1,8 %*
Voda	*680*	*w/c = 0,30*

(A) *(B)*

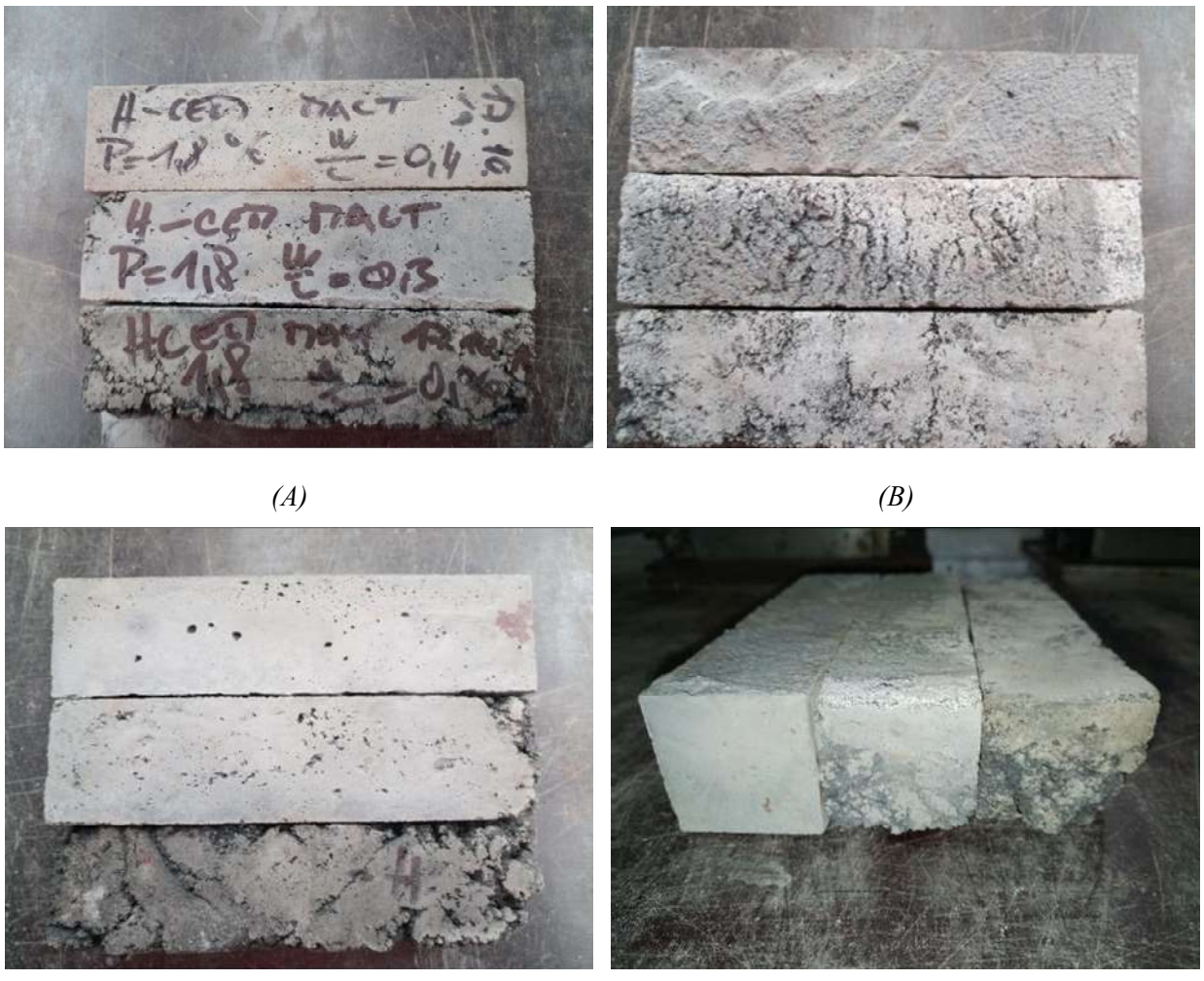
Obrázek 6: (A) Namíchaná směs Receptury 2; (B) směs 2 naplněná do trámečků 160 × 40 × 40 mm

Tabulka 9: Receptura pro H-Cement upravení w/c = 0,40 (Recept. 3)

Složka	*Navážka [g]*	*Poznámka*
H-Cement	*2250*	
Písek frakce 0-4	*2450*	
Plastifikátor Sika 1035	*40,5*	*1,8 %*
Voda	*900*	*w/c = 0,40*

Obrázek 7: Upravená záměs na w/c = 0,4 (Recept. 3)

Základní zkoušky míchatelnosti a zpracovatelnosti byly provedeny pro zjištění potřeby vody do dané receptury a k upravení receptury při použití experlitu. Vzhledem k předpokladu nasákavosti kameniva je po těchto zkouškách uvažováno o nutnosti použití vodního součinitele w/c = 0,35 – 0,4. Z obrázku 8 je rozpoznatelný vliv vodního součinitele na zhutnitelnost směsi. Po naplnění forem 160 × 40 × 40 mm byla forma zhutněna pouhým poklepem formy. U vzorků s nízkým poměrem w/c byla v oblasti přichycení k ocelovému prvku výrazná nekompaktnost hmoty, kdy prvek zjevně přestával splňovat tepelně izolační vlastnosti. U vzorku se zvýšeným w/c byl pozorovatelný stav, kdy byla celá vrstva kompaktní bez výrazných vzduchových bublin.



(A) *(B)*

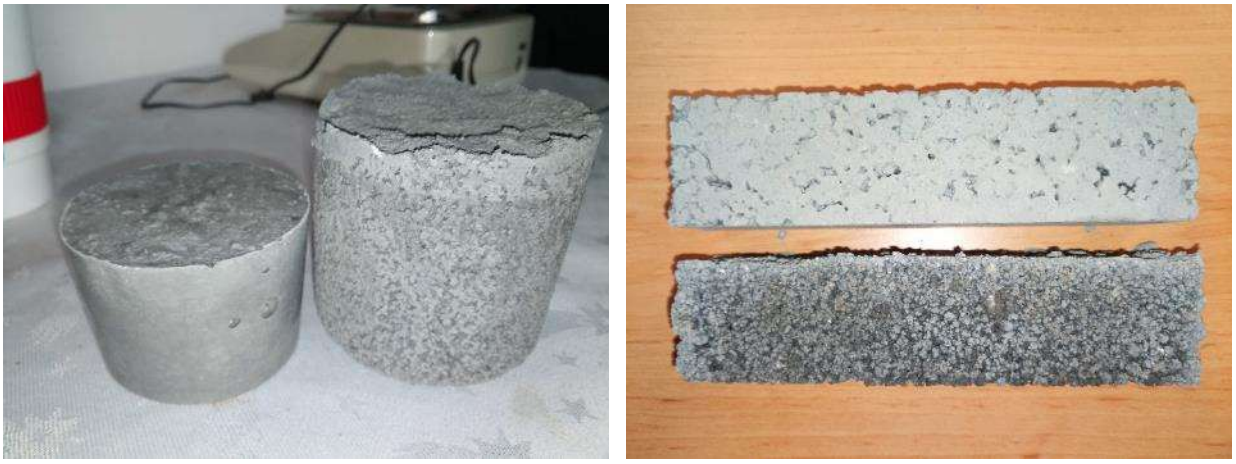
(C) *(D)*

Obrázek 8: (A) Vzorky pod odbednění, shora vzorek w/c = 0,4, w/c = 0,3 a w/c = 0,26 (pořadí platí i pro ostatní případy); (B) Pohled na vrchní strany vzorků, pohledová část; (C) Stav vzorků pohledem na bok, rozložení celistvosti po výšce prvku; (D) Pohled na řez vzorků, zleva w/c = 0,4, w/c = 0,3 a w/c = 0,26

4.3.2 Kompozitní směs H-Cementu s experlitem

Hlavní předpokládanou charakteristikou vrstvy H-Cementu je jeho izolační schopnost a z ní plynoucí ochrana ocelového prvku před působením požáru. Pro docílení co nejnižší tepelné vodivosti zde bylo využito experlitu jako plniva. Tento velmi lehký, sypký materiál s nízkou objemovou hostností a výbornými tepelnými vlastnostmi je coby přísada do tepelně izolačních směsí ideální.

Nevýhodou experlitu je jeho křehkost, výrazně ovlivňující proces výroby směsi s H-Cementem. Při dlouhém nebo nešetrném míchání směsi dochází k rozdrcení experlitu na menší částečky. Tento stav lze odpozorovat z obrázku 9, kdy jediným rozdílem mezi jednotlivými vzorky byla doba míchání.



(A) *(B)*

Obrázek 9: (A) Vliv délky a intenzity míchání na konzistenci směsi experlitu s H-Cementem; vlevo více rozdrcený experlit, vpravo nerozdrcený experlit; (B) Vylití směsi do trámečků 40 × 40 × 160 mm, nahoře s rozdrceným experlitem, dole s experlitem v požadovaném stavu

Pro stanovení receptury směsi H-Cementu s experlitem byly využity konzultace s Ing. Pavlem Reitermanem, Ph.D. (Experimentální centrum ČVUT, Fakulta stavební ČVUT v Praze) a poznatky získané z prvních zkoušek míchatelnosti a zpracovatelnosti malty z H-Cementu (viz 4.3.1). Receptura byla po konzultacích stanovena s vodním součinitelem w/c = 0,77 a byl zvolen jiný plastifikátor. Namísto plastifikátoru SIKA 1035 je použit STACHEMA. Navýšení hodnot vodního součinitele směsi je způsobeno použitím experlitu coby velmi porézního materiálu.

Při citlivém míchání a získání správné konzistence směsi, aniž by došlo k rozdrcení experlitu, bylo ve vlhkém stavu docíleno objemové hustoty vzorku 587 kg/m^3. Touto objemovou hmotností ve vlhkém stavu bylo dosaženo podobné hustoty jako u průmyslových požárních omítek.

Tabulka 10: Receptura H-Cement s experlitem na 1 m^3

Složka	*Navážka [kg]*	*Poznámka*
H-Cement	*305*	
Experlit 0-1	*38,8*	
Experlit 1-2	*51,3*	
Plastifikátor Sika 1035	*4,7*	*1,54 %*
Voda	*235*	*w/c = 0,77*

Vzorek byl velmi porézní. Pro dosažení vyšší přilnavosti k ocelovému povrchu byly zvažovány dvě varianty. První variantou bylo vytvoření sendvičového materiálu, kdy spodní vrstva splňuje požadavek na adhezi k ocelovému prvku. Spodní vrstva má poměr cca 1/3 výšky celkové vrstvy.

Obrázek 10: Vytvoření sendviče ze dvou vrstev H-Cementu, kombinace rozdrceného experlitu a experlitu v celku; nahoře reprezentativní prvek tl. 20 mm (návrhová vrstva H-Cementu), dole zkušební vzorek 40 × 40 × 160 mm

Druhou variantou byla možnost využití pouze směsi s nerozdrceným experlitem s kontaktní plochou ze směsi pojiva a vody, „tzv. špritz“ v tenké vrstvě o tloušťce < 2 mm. Tato vrstva zajistila lepší adhezi. Zbytek vzorku byl ze směsi H-Cementu s nerozdrceným experlitem.

4.4 Stanovení jednotlivých směsí pro experimenty

Na základě poznatků zjištěných v kapitole 4.3 byly stanoveny jednotlivě směsi pro porovnání vlastností H-Cementu jako možného požárního materiálu. Cílem bylo porovnat vliv lehčení směsi H-Cementu experlitem a zároveň vytvoření referenčního materiálu z alternativního cementu s poznatky z předchozích výzkumů.

Při tvorbě receptur pro směsi H-Cementu je uvažováno se třemi základními variantami:

a) malta s H-Cementem, žáruvzdorné plnivo, PVA (polyvinylalkoholová) vlákna

b) malta s H-Cementem, lehčená experlitem

c) malta s H-cementem, lehčená experlitem, s čedičovými vlákny

Tyto varianty umožní porovnání varianty lehčené experlitem, kde je dosaženo nízké objemové hmotnosti, která se dá téměř rovnat komerčním požárním omítkám, a nelehčené varianty se žáruvzdorným plnivem, kde budou zkoumány především vlastnosti cementu z hlediska malé smrštitelnosti prvku, možné absorpce tepla pro krystalickou přeměnu.

Poslední dvě varianty slouží pro porovnání jako referenční. Bylo využito zkušeností z dřívějších experimentů s hlinitanovými cementy z hlediska pevností a z hlediska tepelného namáhání (M. Jogl, P. Reitermann). Opět zde bylo uvažováno s verzí lehčenou pomocí experlitu a nelehčenou verzí se žáruvzdorným plnivem a PVA vlákny.

Za žáruvzdorné plnivo byl zvolen šamotový písek ve dvou frakcích. Výběr tohoto kameniva měl za následek stabilní směs s dobře predikovanými vlastnostmi. PVA (polyvinylalkoholová) vlákna v nelehčených směsích slouží především jako pojistka pro zamezení odpadnutí ochranné vrstvy od zkoušeného plechu vlivem nárůstu vnitřních tlaků v důsledku přeměny vody ve vodní páru. Z toho vyplynula úvaha o využití PVA vlákna pouze v nejmenším nutném množství, dostačujícím k tomu, aby nebylo ovlivněno chování ochranné vrstvy jako celku, ale aby obsažené PVA vlákno posloužilo k zamezení odchlípnutí a vyboulení ochranné vrstvy od zkoumaného plechu (viz kapitola 2.4).

4.4.1 Malta s H-Cementem, nelehčená s PVA vlákny

Základním výzkumným materiálem je nelehčená malta z H-Cementu, která reprezentuje vlastnosti zmiňované v kapitole 4.2. Z důvodu vystavení zkoušených prvků vyšším teplotám a plánu zatížit prvek během experimentu teplotami okolo 900 °C byl v receptuře namísto klasického použit šamotový písek. Tento krok zajistil přenos vyšších teplot dále po tloušťce zkoušeného prvku. Pro porovnání pevností této receptury byla vybrána receptura založená na hlinitanovým cementu. Oba typy cementu spadají do skupiny alternativních cementů (nedošlo tak k porovnání s portlandským cementem).

Tabulka 11: Receptura pro směs 1; Hlinitanový cement, Šamotový písek, PVA vlákna

Navážka 0,00423 m^3

Typ prvku *Malta se žáruvzdorným pojivem, nelehčená, PVA vlákna*	*Označení prvku* *Vzorek 1-x*	*Váha* *[g]*
Gorkál 50		*506*
Voda		*233*
Šamot	*0-1 mm*	*506*
	1-2 mm	*1012*
PVA vlákna 12 mm	*12mm*	*1,3*

Navážka 1,00 m^3

Typ prvku *Malta se žáruvzdorným pojivem, nelehčená, PVA vlákna*	*Označení prvku* *Vzorek 1-x*	*Váha* *[kg]*
Gorkál 50		*119,62*
Voda		*55,08*
Šamot	*0-1 mm*	*119,62*
	1-2 mm	*239,24*
PVA vlákna 12 mm	*12mm*	*0,31*

U obou směsí bylo jako druhý bezpečnostní prvek pro zamezení odchlípnutí či vyboulení ochranné vrstvy od ocelového plechu využito PVA vláken, která se vlivem vyšších teplot rozpustí a v mezerách vzniklých po vláknech se vhodně redistribuuje tlak vzniklý v H-Cementu. Odhadované vlastnosti směsi se blíží klasickému betonu (objemová hmotnost = 2030 kg/m^3), ale směs si díky využití H-Cementu zachovává své kladné vlastnosti. Délka PVA vláken byla zvolena s ohledem na rozměry zkušebních prvků, aby jejich délka nebyla omezující pro plnění forem.

Obrázek 11: Odbedněné vzorky nelehčené malty H-Cementu, šamotového písku a PVA vláken

Šamotový písek byl zvolen ve dvou frakcích pro dosažení ideální míchatelnosti malty a k vyplnění mezer mezi větší frakcí. Při výrobě vzorků pro zkoušky v rámci této diplomové práce nebylo pracováno s výrazným zhutňováním na vibrační stolici, ale pouze s mírným zhutněním při plnění forem. Tím se sjednotil především styl přípravy chráněných plechů a zkušebních trámečků. Při vibraci forem pro chráněné plechy by došlo k vychýlení plechu a tím i k narušení požadované tloušťky ochranné vrstvy H-Cementu.

Tabulka 12: Receptura pro směs 2; H-Cement, Šamotový písek, PVA vlákna

Navážka 0,00423 m^3

Typ prvku *Malta s H-Cementem, nelehčená, PVA vlákna*	*Označení prvku* *Vzorek 2-x*	*Váha* *[g]*
H-cement		*506*
Voda		*187*
Šamot	*0-1 mm*	*506*
	1-2 mm	*1012*
PVA vlákna	*12 mm*	*1,3*

Navážka 1,00 m^3

Typ prvku *Malta se žáruvzdorným pojivem, nelehčená, PVA vlákna*	*Označení prvku* *Vzorek 1-x*	*Váha* *[kg]*
H-cement		*119,62*
Voda		*44,21*
Šamot	*0-1 mm*	*119,62*
	1-2 mm	*239,24*
PVA vlákna 12 mm	*12mm*	*0,31*

4.4.2 Malta s H-Cementem, lehčená expandovaným perlitem

Pro zlepšení tepelně izolačních vlastností malty H-cementu byla receptura upravena o vylehčení experlitem, tzn. došlo k nahrazení šamotového písku experlitem a k doplnění receptury o plastifikátor pro lepší zpracovatelnost. Poměr H-Cementu a vody zůstal v porovnání s nelehčenou maltou shodný. Množství experlitu bylo vypočítáno přes objemovou hmotnost experlitu a původního šamotu. Z důvodu nasákavosti experlitu a zlepšení vlastností vody byl použit plastifikátor Stachema v objemu 1,55 %. Opět pro porovnání jednotlivých směsí byla vyrobena směs s hlinitanovým cementem a experlitem. Tento krok byl opět učiněn, aby bylo možné porovnat chvání nově zkoušené malty H-Cementu s experlitem za zvýšených teplot nebo z hlediska pevností. Receptury obou směsí jsou uvedeny v tabulce 10 a 11.

Tabulka 13: Receptura pro směs 3; Hlinitanový cement s experlitem

Navážka 0,00423 m^3

Typ prvku *Malta s hlinitanovým cementem, lehčená ex. Perlitem*	*Označení prvku* *Vzorek 3-x*	*Váha* *[g]*
Gorkál 50		*305*
Voda		*282*
Ex. Perlit	*0-1 mm*	*38,8*
	1-2 mm	*51,3*

Navážka 1,00 m^3

Typ prvku *Malta se žáruvzdorným pojivem, nelehčená, PVA vlákna*	*Označení prvku* *Vzorek 1-x*	*Váha* *[kg]*
Gorkál 50		*72,10*
Voda		*66,67*
Ex. Perlit	*0-1 mm*	*9,17*
	1-2 mm	*12,13*

Výroba vzorků směsi 3 (hlinitanový cement) a 4 (H-Cement) byla mírně rozdílná od nelehčených směsí. Na základě zkušeností z předchozích zkoušek míchatelnosti bylo přistoupeno k namíchání cementové pasty pomocí míchacího stroje a bylo do pasty ručně s vysokou citlivostí vmícháno požadované množství experlitu. U lehčené hlinitanové směsi (směs 3) byl v prvním kroku pro přimíchání experlitu použit míchací stroj, při čemž však došlo k přílišnému rozdrcení experlitu. Problém s drcením byl zjištěn při plnění zkušebních trámečků, proto bylo přistoupeno k domíchání druhé směsi již pouze ručně. Tato směs byla použita pro ochrannou vrstvu ocelových plechů.

Obrázek 12: Odbedněné vzorky lehčené malty H-Cementu s experlitem a plastifikátorem

Výroba vzorků H-Cementu s experlitem a s přimíchanými čedičovými vlákny byla provedena manuálně. V první fázi byla namíchána pasta společně s plastifikátorem pro zlepšení vlastností vody, a tím i snížení jejího objemu potřebného množství. V následném kroku byl do vzniklé pasty opatrně vmíchán experlit v obou frakcích. Konečná receptura je uvedena v Tabulce 11.

Tabulka 14: Receptura pro směs 4; H-Cement s experlitem, zlepšení vlastností vody plastifikátorem

Navážka 0,00423 m^3

Typ prvku *Malta s H-Cementem, lehčená ex. Erlitem*	*Označení prvku* *Vzorek 4-x*	*Váha* *[g]*
H-cement		*305*
Voda		*235*
Plastifikátor Stachema		*4,7*
Ex. Perlit	*0-1 mm*	*38,8*
	1-2 mm	*51,3*

Navážka 1,00 m^3

Typ prvku *Malta se žáruvzdorným pojivem, nelehčená, PVA vlákna*	*Označení prvku* *Vzorek 1-x*	*Váha* *[kg]*
H-cement		*72,10*
Voda		*55,56*
Plastifikátor Stachema		*1,11*
Ex. Perlit	*0-1 mm*	*9,17*
	1-2 mm	*12,13*

4.4.3 Malta s H-Cementem, lehčená expandovaným perlitem a s čedičovými vlákny

Pro vyřešení otázky, jestli vzorky H-Cementu vylehčené experlitem vlivem působení požáru nebudou praskat na povrchu nebo zda nebudou kusy ochranné vrstvy odpadávat, byla do receptury směsi 4 přidána čedičová vlákna. Čedičová vlákna zlepší vlastnosti receptury především v rozích zkoušených vzorků. U zkoušených ocelových prvků bylo odhadováno, že se vliv čedičových vláken projeví v krajních místech vzorku, kde dochází k většímu tepelnému namáhání, i když budou chráněné minerální vatou. Možné napětí, vzniklé rozdílným zahříváním zkoušeného vzorku, způsobí narušení adheze ochranné vrstvy a ocelového plechu. V tomto případě dochází k znepřesnění měřených dat vlivem jiných přestupových koeficientů mezi oběma povrchy v důsledku vzniku vzduchové mezery. Upravená receptura pro směs 5 je uvedena v tabulce 12.

Tabulka 15: Receptura pro směs 5; H-Cement s experlitem, zlepšení vlastností vody plastifikátorem a čedičovými vlákny

Navážka 0,00423 m^3

Typ prvku *Malta s H-Cementem, lehčená ex. Erlitem*	*Označení prvku* *Vzorek 5-x*	*Váha* *[g]*
H-cement		*305*
Voda		*235*
Plastifiátor Stachema		*4,7*
Ex. Perlit	*0-1 mm*	*38,8*
	1-2 mm	*51,3*
Čedičová vlákna	*12,6 mm*	*0,725*

Navážka 1,00 m^3

Typ prvku *Malta s H-Cementem, lehčená ex. Erlitem*	*Označení prvku* *Vzorek 5-x*	*Váha* *[kg]*
H-cement		*72,10*
Voda		*55,56*
Plastifiátor Stachema		*1,11*
Ex. Perlit	*0-1 mm*	*9,17*
	1-2 mm	*12,13*
Čedičová vlákna	*12,6 mm*	*0,17*

Podíl čedičových vláken byl stanoven na 0,25 %. Za tohoto procentuálního zastoupení čedičová vlákna neplní funkci rozptýlené výztuže, která zajišťuje přenos napětí. Hlavním účelem čedičových vláken je zde pouze zajištění kompaktnosti ochranné vrstvy. Podobnou funkci plní PVA vlákna, která byla použita pro nelehčené varianty. Z důvodu, že ochranná vrstva H-Cementu lehčená experlitem byla již dostatečně porézní, aby případný tlak vzniklý odpařovanou vodou mohl uniknout, zde není nutné, aby byla použita vlákna, která se ve vyšších teplotách roztaví a vytvoří póry pro rozptýlení nově vzniklého tlaku.

Obrázek 13: Odbedněné vzorky lehčené malty H-Cementu s experlitem a plastifikátorem s přidanými čedičovými vlákny

4.5 Představení vzorků

Pro experiment a zjištění, zdali vrstva H-cementu s experlitem dokáže za zvýšených teplot ochránit ocelové konstrukce, byly zvoleny vzorky dle tabulky 13. Pro malorozměrové zkoušky, které byly provedeny v rámci této diplomové práce, byl zvolen ocelový plech o tl. 12 mm, šířce 100 mm a délce 180 mm. Tyto rozměry byly stanoveny na základě potřeby umístit při jedné zkoušce 4 vzorky do malorozměrové pece a zvolit jejich rozměry správně tak, aby nebyly ovlivněny plameny z hořáku umístěného v peci a zároveň nenarušily proudění v peci.

Tabulka 16: Rozměry zkušebních prvků

Rozměr	*[mm]*
Tloušťka	*12*
Šířka	*100*
Délka	*180*

Plechy byly chráněny vrstvami na základě H-Cementu s experlitem a případně s čedičovými vlákny. Pro zkoušené prvky budou vždy vyrobeny 4 vzorky chráněné danou směsí:

a) malta se žáruvzdorným plnivem, H-Cementem, nelehčená s PVA vlákny (směs 2)

b) malta s hlinitanovým cementem, lehčená experlitem (směs 3)

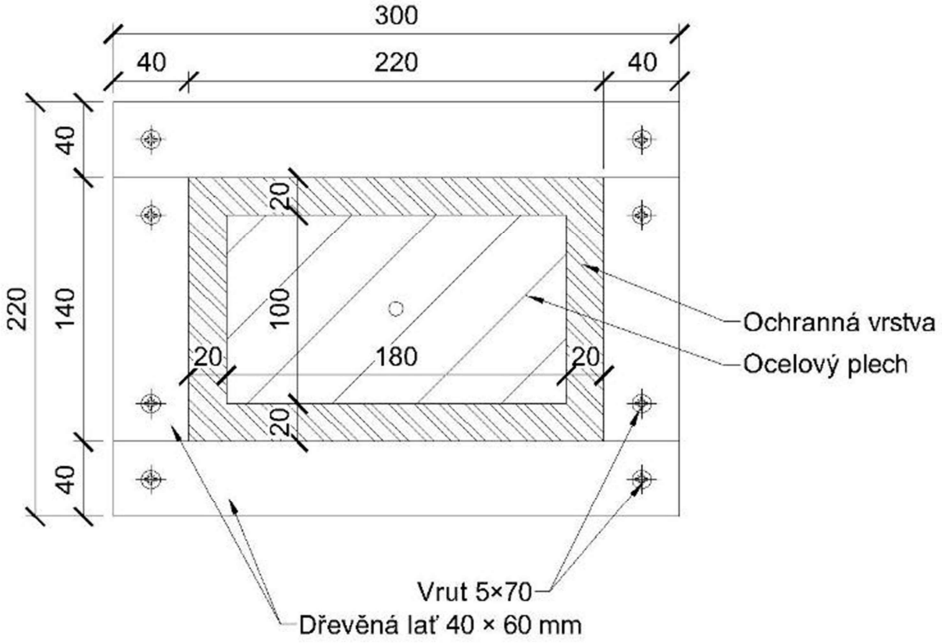
c) malta s H-Cementem, lehčená experlitem (směs 4)

d) malta s H-cementem, lehčená experlitem, s čedičovými vlákny (směs 5)

Obrázek 14: Ocelové plechy s ochranou vrstvou z nelehčené malty H-Cementu, šamotovým pískem a PVA vlákny (směs 2)

Ocelový plech pro aplikaci ochranné vrstvy s H-cementem byl pouze zbaven mastnoty, ale nebyl nadále nikterak ošetřován. Pro zvýšení adheze ochranných vrstev na ocelovém plechu, a to především pro lehčené varianty, byl povrch natřen „špritzem“ z daného pojiva v tloušťce <2 mm. Pro ověření odlišností kvality adheze H-Cementu byly provedeny mechanické povrchové úpravy ocelového plechu, kdy byly vždy 2 ze čtyř zkoumaných prvků zbroušeny a pomocí ocelového kartáče a zdrsněny drobnými vrypy po povrchu. Vrypy nenarušily celistvost povrchu, tento krok byl učiněn z důvodu imitování přepady a mírného opotřebení obroušeného prvku do lesku při přepravě. Předchozí pilotní výzkumy (Dr. Daxner, 2019) uvažovaly využití návarů v rastru 300 × 300 mm. Pro prvky zkoušené v rámci této diplomové práce provedení návarů nemělo význam z důvodu malého rozměru testovaného prvku.

Pro výrobu plošných vzorků ocelového plechu s ochrannou vrstvou bylo využito dřevěného bednění, které bylo vyrobeno přímo pro tento případ. Pro zajištění vycentrování ocelového prvku v bednění bylo využito navařené matice pro systém uchycení, která zapadla do předem předvrtaného otvoru v podkladní desce z betonářské překližky tl. 15 mm.



Obrázek 15: Schéma bednění pro výrobu chráněných ocelových plechů

Před plněním byla každá forma vystříkána odbedňovací emulzí, při čemž byl kladen zvýšený důraz na dodržení čistoty povrchu ocelových prvků pro ideální adhezi ochranné vrstvy na ocelovém plechu. Požadovaná výška pro plnění ochranné vrstvy byla zaznačena po celém vnitřním obvodu vyrobeného bednění pro snazší dodržení požadované vrstvy. Postup stanovení ochranné vrstvy je uveden v kapitole 4.5.1.

Obrázek 16: Vyrobené bednění se zaznačením hranice pro plnění

4.5.1 Tloušťka ochranné vrstvy z H-Cementu

Výpočet tloušťky pro vrstvu H-Cementu byl proveden výpočet pomocí přírůstkové metody pro chráněný ocelový průřez [19]. Pro základní stanovení tloušťky byly stanoveny dvě kritéria, která byla rozdělena dvou samostatných výpočetních kroků.

a) kritérium teploty průřezu pro kritickou teplotu oceli, kdy dochází k prvním změnám tepelně mechanických charakteristik oceli.

b) kritérium teploty dosažené na povrchu ocelového prvku na 650 °C.

První kritérium bylo přijato především pro porovnání s kritériem 650 °C. Při výpočtu pro stanovení vrstvy H-Cementu byl využit program Microsoft Excel 365. Celý princip výpočtu spočíval na citlivostní analýze výpočetního postupu (Obrázek 17), kdy se hledalo přesné řešení, aby bylo dosaženo jednoho ze dvou kritérií v jednotlivých časech. Časy pro citlivostní analýzu byly voleny shodné s dobou požární odolnosti, jakou stanovují normy požárního kodexu [3, 4], tedy 15, 30, 45, 60, 90 min. Otázkou byl způsob uchycení zkoušených vzorků, kdy volba uchycení skrze závitovou tyč definované tloušťky mohla přerušit experiment z důvodu odpadnutí/vychýlení vzorku mino předem určení místo.

Navrhni tloušťku H-Cementu 15 min (při stanoveném čase na oceli 400 °C)	STANOVENÍ TLOUŠŤKY VRSTVY H-CEMENTU	Navrhni tloušťku H-Cementu 15 min (při stanoveném čase na oceli 650 °C)
Navrhni tloušťku H-Cementu 30 min (při stanoveném čase na oceli 400 °C)		Navrhni tloušťku H-Cementu 30 min (při stanoveném čase na oceli 650 °C)
Navrhni tloušťku H-Cementu 45 min (při stanoveném čase na oceli 400 °C)		Navrhni tloušťku H-Cementu 45 min (při stanoveném čase na oceli 650 °C)
Navrhni tloušťku H-Cementu 60 min (při stanoveném čase na oceli 400 °C)		Navrhni tloušťku H-Cementu 60 min (při stanoveném čase na oceli 650 °C)
Navrhni tloušťku H-Cementu 90 min (při stanoveném čase na oceli 400 °C)		Navrhni tloušťku H-Cementu 90 min (při stanoveném čase na oceli 650 °C)

Obrázek 17: Schéma ovládacího panelu makra pro výpočet tloušťky H-Cementu

Pro stanovení předpokládané vrstvy H-Cementu v kombinaci s experlitem se vyšlo ze základních předpokladů lineárního průběhu materiálových charakteristik. Jelikož H-Cement snadno přechází v „keramickou fázi“ (viz 4.2), přičemž dochází jen k poměrně malému smrštění vzorku s předpokladem nevzniknutí trhlin, byla pro základní stanovení tloušťky vrstvy H-Cementu uvažována tepelná vodivost rovna 0,12 W/m. Na základě tohoto předpokladu a pomocí přírůstkové

metody (Rovnice 4,Rovnice 5) byly stanoveny základní tloušťky vrstvy H-Cementu pro kritérium 400 °C viz Tabulka 17, a pro kritérium 650 °C viz tabulka 15.

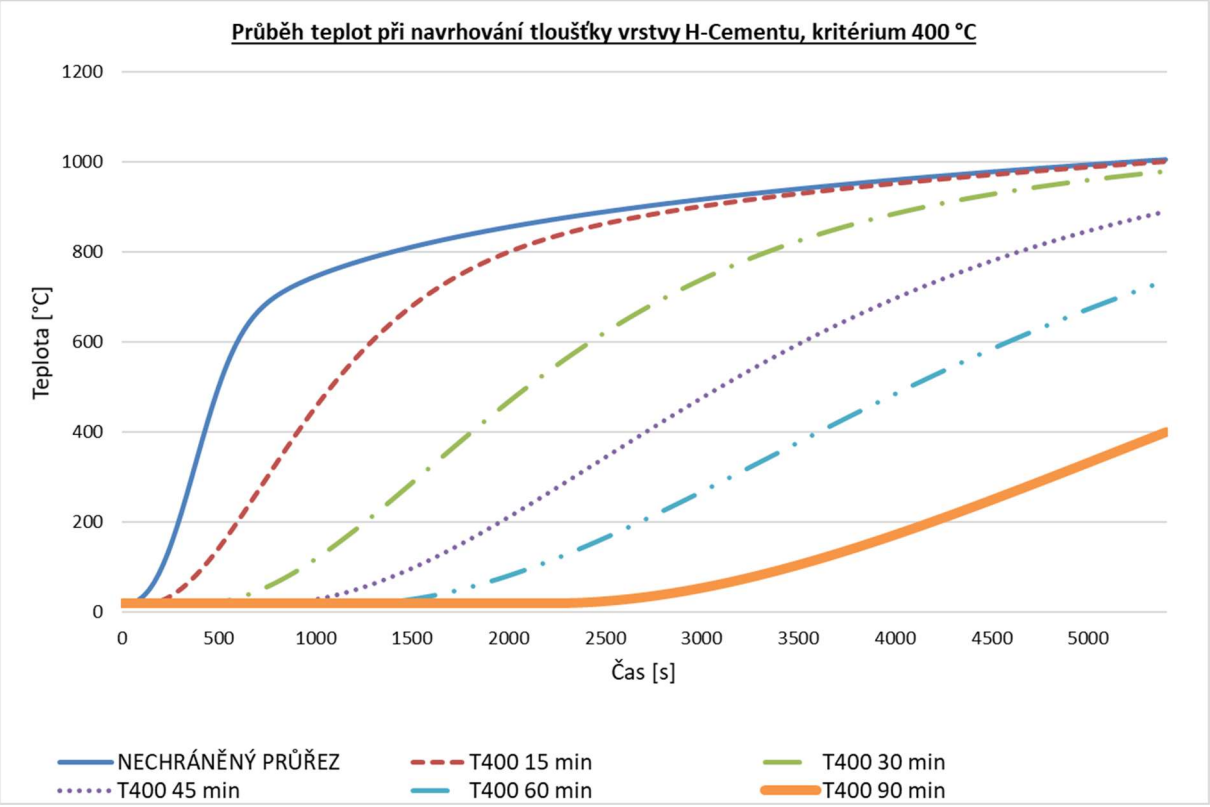
Rovnice 4: Přírůstek teploty chráněného průřezu [19]

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \left(\frac{A_p}{V}\right)}{d_p c_a \rho_a} \times \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{1 + \frac{\emptyset}{3}} \times \Delta t - \left(e^{\frac{\emptyset}{10}} - 1\right) \times \Delta\theta_{g,t}$$

Rovnice 5: Součinitel p pro přírůstkovou metodu [19]

$$\emptyset = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_p} \times d_p \times \frac{A_p}{V}$$

Při vyšetřování průběhu teplot pro jednotlivá kritéria a pro vypočtené tloušťky ochranné vrstvy byly výsledky srovnány s průběhem teplot pro nechráněný průřez. V případě kritéria 400 °C byl předpoklad konzervativnější a měl za účel kompletně zabránit změnu materiálových charakteristik oceli. Výsledkem byl stav, kdy plech byl chráněn tloušťkou ochranné vrstvy až o síle 50 mm pro splnění kritéria pro 60 min viz. Tabulka 17. Pro tento příklad by se kompletně změnil předpoklad využití ochranné vrstvy pouze jako tepelně izolačního materiálu, neboť by tloušťka ochrany převyšovala tloušťku chráněného plechu.



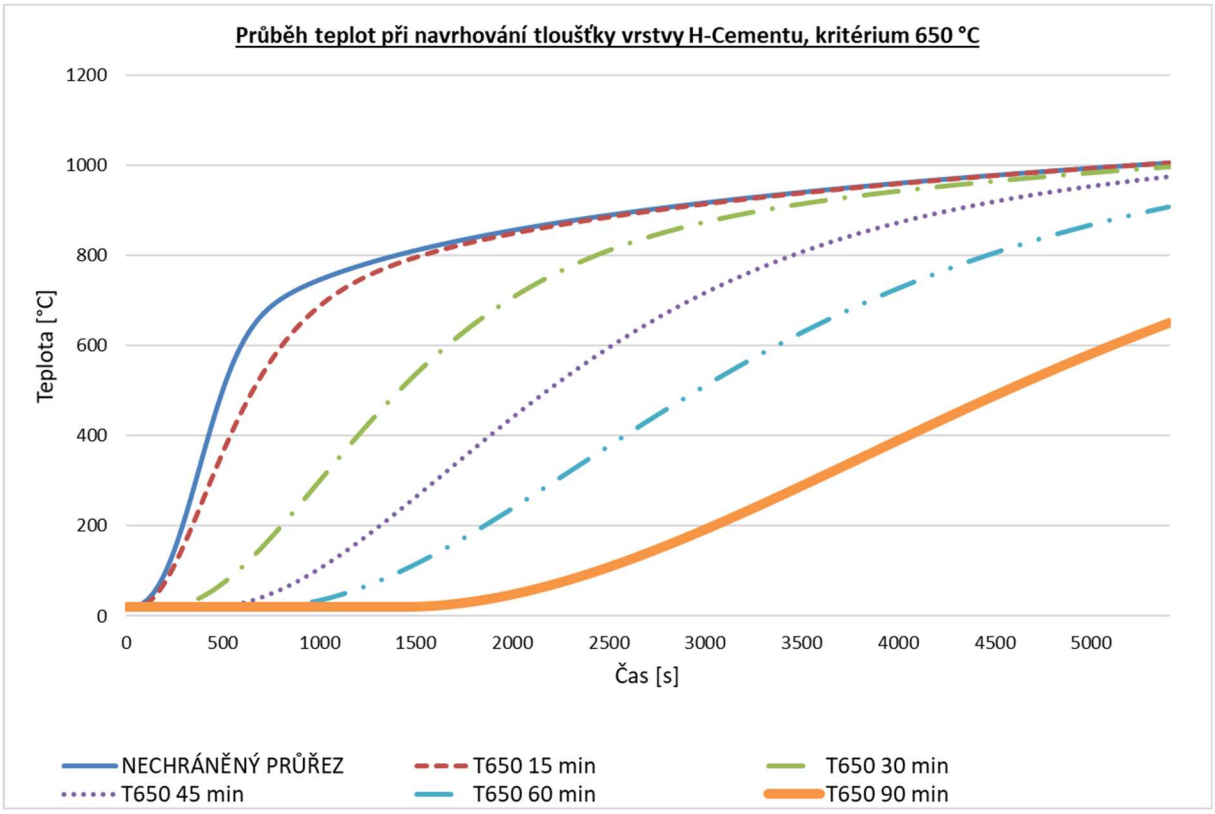
Obrázek 18: Průběh teplot při návrhu tloušťky H-Cementu pro dodržení teploty 400 °C v dané minutě

Tabulka 17: Tloušťka vrstvy H-Cementu pro dodržení kritéria teploty 400 °C

Čas [min]	*Tloušťka vrstvy H-Cementu [mm]*

15	*6,77*
30	*20,60*
45	*34,92*
60	*48,67*
90	*74,22*

Ocelové prvky není třeba chránit před vyššími teplotami než 400 °C. Proto bylo upřednostněno kritérium 650 °C a přihlédnuto k času 45 min pro stanovení návrhové tloušťky ochranné vrstvy. Tímto požadavkem byla spočtena potřeba tloušťky vrstvy směsi H-Cementu o 21,82 mm. Za předpokladu návrhové tepelné vodivosti a při dalších odhadových faktorech byla návrhová ochranná vrstva stanovena na tloušťku 20 mm. S předpokladem tloušťky ochranné vrstvy 20 mm pracuje i Dr. Daxner a Ing. Moravec, kdy Dr. Daxner používá kombinaci experlitu s vermikulitem v poměru 1:1 a Ing. Moravec využívá pouze experlit. Průběhy teplot při výpočtu tlouštěk vrstev jsou zaneseny v tabulkách 15 a 16.

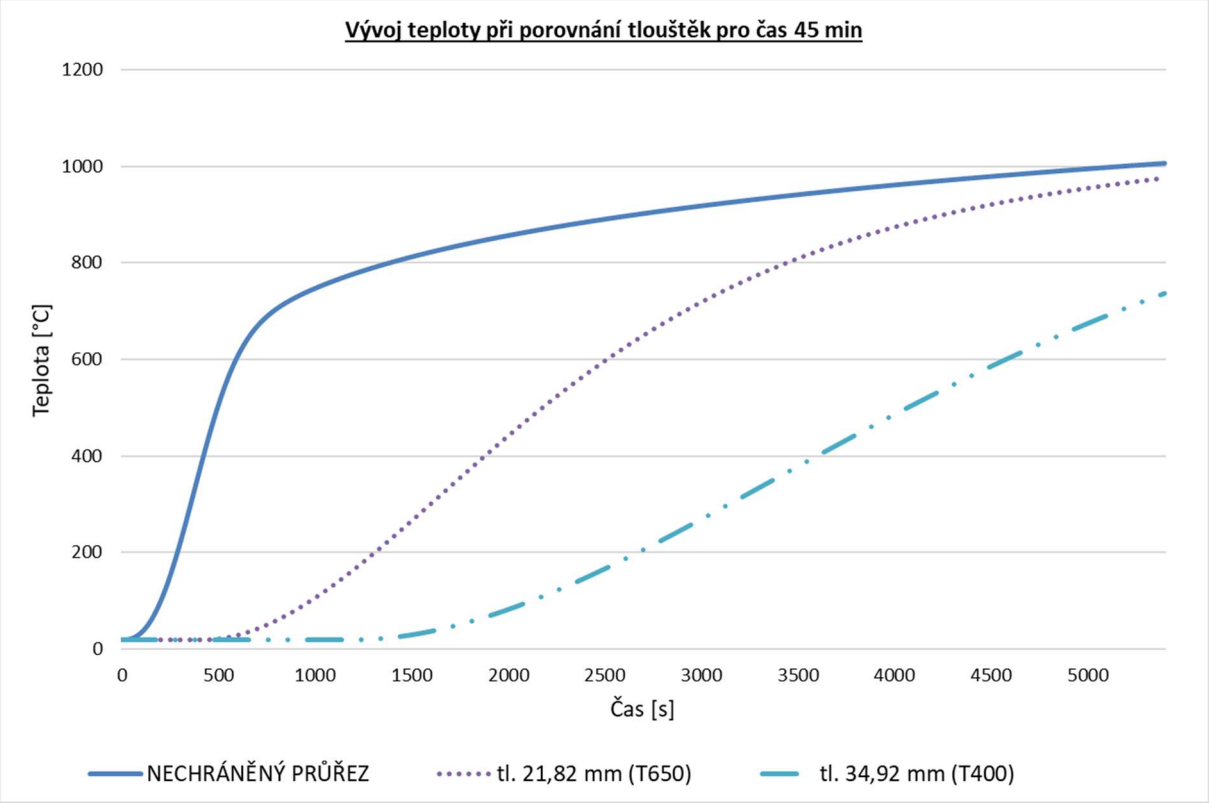


Obrázek 19:Průběh teplot při návrhu tloušťky H-Cementu pro dodržení teploty 650 °C v dané minutě

Tabulka 18: Tloušťka vrstvy H-Cementu pro dodržení kritéria teploty 650 °C

Čas [min]	*Tloušťka vrstvy H-Cementu [mm]*
15	*2,37*
30	*11,02*
45	*21,82*
60	*34,05*
90	*55,25*

Pro závěrečné porovnání jednotlivých průběhů teplot pod ochrannou vrstvou byl vybrán čas 45 min z důvodu konečné volby tloušťky ochranné vrstvy 20 mm. Na obrázku 20 je znázorněn rozdíl jednotlivých teplot pro nechráněný průřez, průřez chráněný vrstvou tl. 21,82 mm a vrstvou tl. 34,92 mm. Pro experiment byla zvolena tl. 20 mm z důvodu proveditelnosti, viz kapitola 5.2.



Obrázek 20: Vývoj teploty na povrchu ocelového prvku při porovnání požadovaných tlouštěk v čase 45 min

4.6 Zrání a sušení vzorků

Pro zrání vzorků a urychlení tohoto kroku bylo využito výpočtu skrze Arrheniovu rovnici. Odbedněné vzorky byly uleženy do zvýšené teploty. Vzorky byly uloženy v tepelném výměníku, ve kterém byla téměř konstantní teplota 32 °C. Následujícím krokem bylo tedy stanovit zrychlení chemických reakcí a kolik dní musely zrát vyrobené vzorky právě při této teplotě. Tímto postupem, tedy modelováním vývinu hydratačního tepla a úpravy doby zrání, se zabýval M. Kubík (2007) [20]. Z těchto poznatků byl dopočten čas potřebný pro hydrataci vyrobených vzorků uložených v 32 °C. Při uložení vzorků do teploty 32 °C je doba hydratace zkrácena na 14 dní. V Rovnici 6

byl dopočten potřebný čas t_{req}. První tři dny byly vzorky uloženy v laboratoři, ve které je udržovaných 19 °C (druhá část vzorce). Tento krok byl důležitý při stanovování t_{req}.

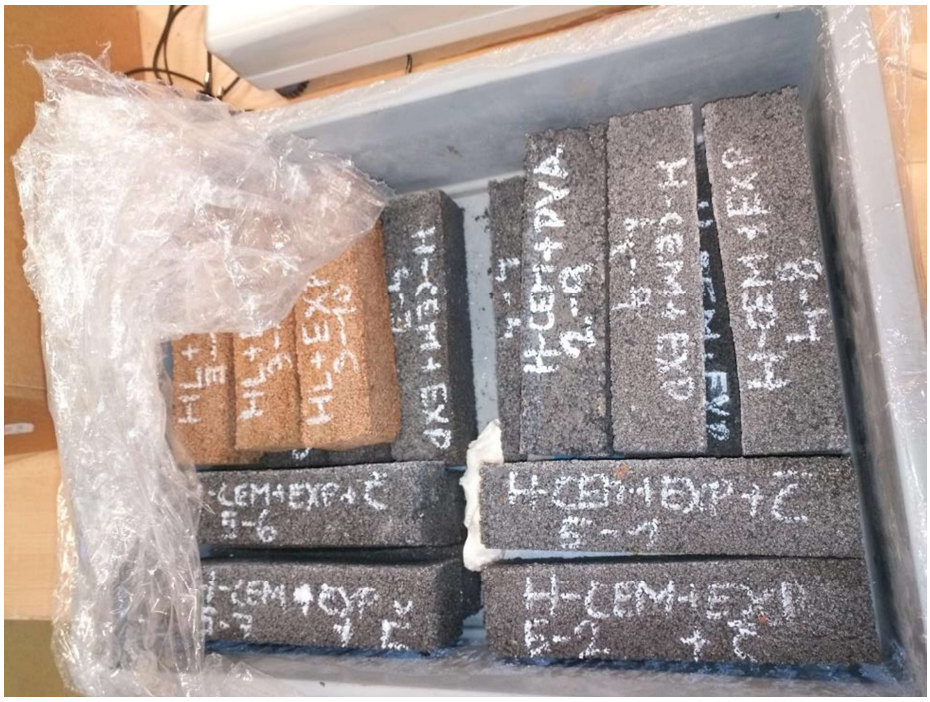
Rovnice 6: Výpočet potřebného času hydratace vzorků při teplotě 32 °C

$$t_{req} * exp\left(-\frac{Ea}{8.315} * \left(\frac{1}{273.15+32} - \frac{1}{273.15+20}\right)\right) + 3 * exp\left(-\frac{Ea}{8.315} * \left(\frac{1}{273.15+19} - \frac{1}{273.15+20}\right)\right) = t_{28}$$

$$Ea = 40000\ J/mol$$
$$t_{req} = 14\ dní$$

$$14 * exp\left(-\frac{Ea}{8.315} * \left(\frac{1}{273.15+32} - \frac{1}{273.15+20}\right)\right) + 3 * exp\left(-\frac{Ea}{8.315} * \left(\frac{1}{273.15+19} - \frac{1}{273.15+20}\right)\right) = 29.528$$

Vzorky po celou dobu byly neprodyšně zapečetěny strečovou folií v bednách a do volných prostor byly přidány vlhčené ubrousky pro zachování zvlhčení a zajištění potřebné hydratace.



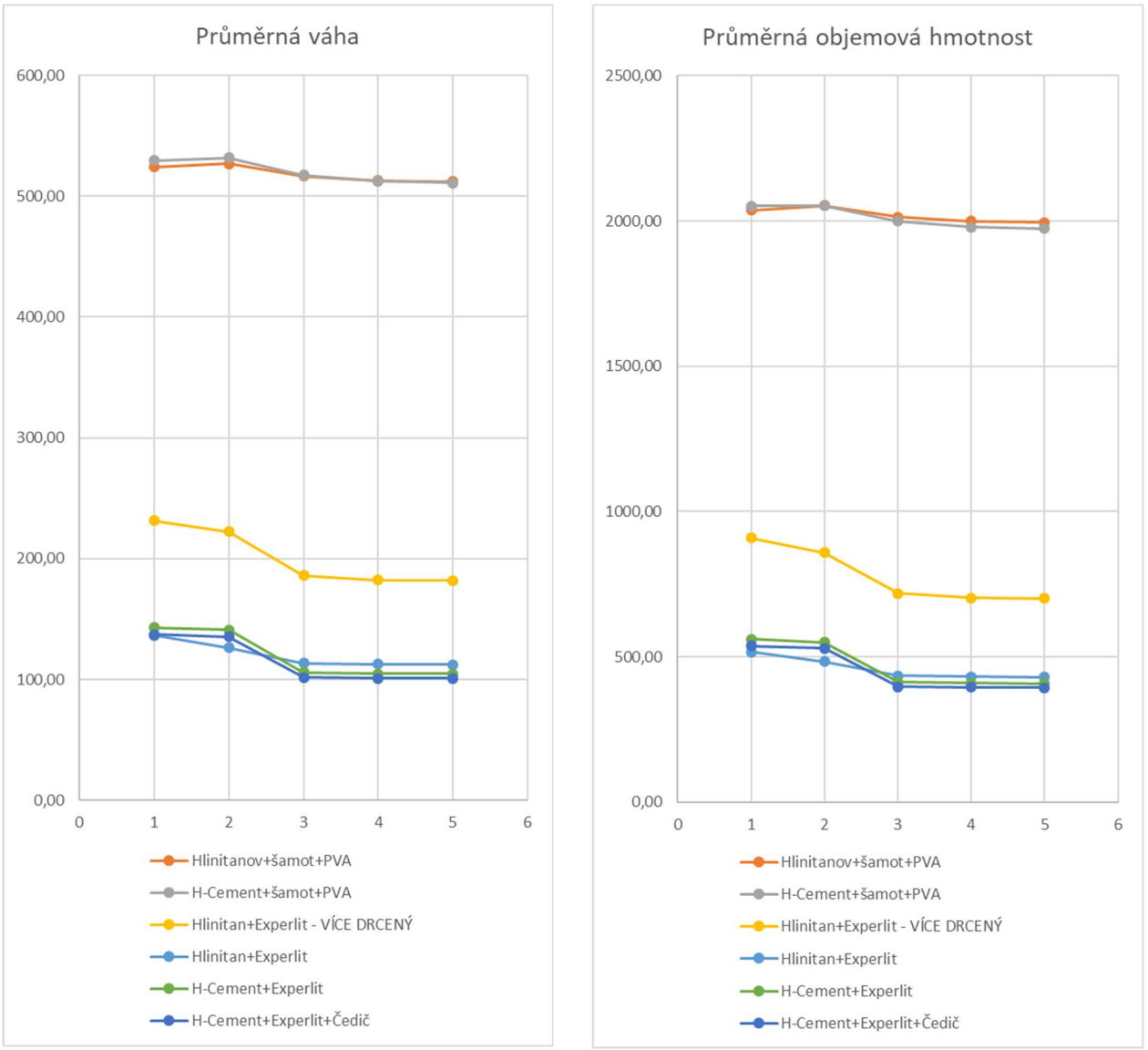
Obrázek 21: Rozpečetěné vzorky po 14 dnech zrání v teplotě 32 °C

Před uložením vzorků do sušící pece byly vzorky zbaveny povrchové vlhkosti, převáženy a oměřeny. Záznamy z postupných převažování jsou uvedeny v příloze č. 3. Teplota pro sušení vzorků byla stanovena na 40 °C pro zachování stability aluminátů obsažených v H-Cementu. Vzorky byly v intervalu 2-3 dní převažovány pro pozorování postupného úbytku hmotnosti z důvodu vysychání vzorků. Pro kritérium zastavení vysušování vzorků bylo stanoven úbytek hmotnosti ve dvou po sobě jdoucích převážení <1% hmotnosti.

(A) *(B)*

Obrázek 22: (A) První převážení a změření vzorků po rozpečetění; (B) Uložení vzorků do sušící pece

Vzorky byly vysušovány po dobu 9 dní, kdy bylo dodrženo kritérium poklesu hmotnosti pod 1 % po dvou ve dvou měření. V obrázku 23 jsou zaneseny úbytky hmotnosti a objemové hmotnosti při všech zkoušených prvcích. Při postupném vysušování docházelo v prvních třech dnech u lehčených vzorků úbytku hmotnosti až 30 %, u nelehčených vzorků byl tento úbytek okolo 15 %. Při dosoušení vzorků v 7. a 9. dni byly úbytky již téměř konstantní a pohybovaly se okolo 0,8 %. Veškeré záznamy z jednotlivých měření jsou uvedeny v příloze č. 3.

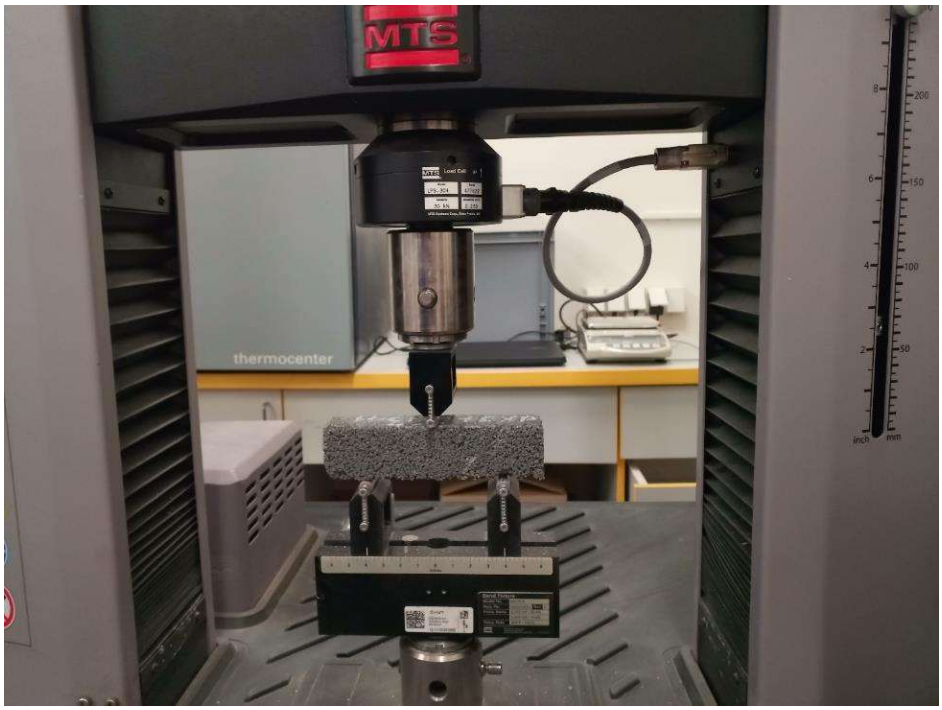


(A) *(B)*

Obrázek 23: (A) Průběh úbytku hmotnosti vzorků; (B) Průběh úbytku objemové hmotnosti vzorků

4.7 Zkoušky pevností navržených směsí

Pro základní stanovení pevností navržených směsí H-Cementu a hlinitanového cementu a k možnému srovnání pro další experimenty a vývoj směsí byly vzorky zkoušeny na ohyb a tlak dle zkušebních norem na trhacím stroji MTS, kterým disponuje Experimentální centrum ČVUT v Praze. Bylo využito nastavení trhacího stroje MTS na normový postup zatěžování vzorků při ohybu a tlaku. Pro porovnání pevností bylo možné použít prvotní zkoušky „ready-mixed“ směsí, které zkoušel P. Martauz a kol. [17]. U neupravovaných receptur pro betony s pojivem H-Cementu bez nutnosti zvýšené požární odolnosti vykazují vlastnosti podobných směsí CEN 32,5 R.



Obrázek 24: Trhací stroj MTS

Jednotlivé zkušební trámečky byly zkoušeny na ohyb a tlak se zaznamenáváním pracovního diagramu, kdy i po porušení zkoušeného vzorku bylo pokračováno v namáhání a zkoumání např. vlivu čedičových vláken ve směsi 5. Tento krok byl učiněn především, aby pro experiment bylo možné predikovat množství lomové energie pro porušení vzorku. Pro všechny typy zkoušených vzorků na ohyb byl zvolen zatěžovací čas 7 min. Tato volba zajistila, že všechny vzorky byly porušeny vlivem ohybového namáhání. Průměrně došlo k porušení vzorků při ohybu okolo 200 s.

Při průběhu zatěžování u nelehčených směsí byl znatelně slyšet bod zlomu, kdy prasklina ve zkoušených vzorcích byla i jasně viditelná. U lehčených směsí byl bod zlomu viditelný pouze při odečtení z grafu zatěžování. Prasklina z důvodu pórovitosti vzorků byla těžko identifikovatelná.

(A)

(B)

(C) *(D)*

Obrázek 25: (A) Zlom vzorku 4 a 5 H-Cement s experlitem (a čedičovými vlákny); (B) Zlom vzorku 2 H-Cement se šamotovým pískem a PVA vlákny; (C) Zlom vzorku 3 hlinitanový cement s experlitem; (D) Zlom vzorku 1 hlinitanový cement se šamotovým pískem a PVA vlákny

Tlakové zkoušky byly provedeny na zlomených částí, kdy byly vzorky vloženy do trhacího stroje MTS s nástavcem pro zkoušení v tlaku zkušebních krychliček 40 × 40 × 40 mm. Průběh zatěžování probíhal dle normových postupů z hlediska posunu příčníku 0.02 mm za sekundu.

4.7.1 Pevnosti vyrobených vzorků

Pro základní představu pevnosti jednotlivých zkoumaných vzorků byly provedeny destruktivní zkoušky v namáhání ohybem a tlakem. Zkušebními vzorky byly trámečky 160 × 40 × 40 mm. Pro stanovení byl využit trhací stroj MTS v laboratořích Experimentálního centra ČVUT. Zkouškou v ohybu byly podrobeny všechny typy vyrobených vzorků a v tlaku pouze lehčené varianty. Nelehčené varianty jsou využity jako porovnávací vzorky pro porovnání s lehčenými variantami.

Kompletní hodnoty z měření byly uvedeny v Příloze č. 3. Bylo zavedeno značení jednotlivých zkoušených vzorků navazující na předchozí značení, tedy dodržována označení pro jednotlivé směsi. Přehled průběrných pevností a maximálních sil pro porušení vzorku je uveden v tabulce 19.

.

$$Vzorek\ X.Y.Z$$
$$X = \text{číslo použité směsi}\ (1-5)$$
$$Y = \text{číslo vyrobeného trámečku}\ (1-12)$$
$$Z = Specifikace\ zlomené\ části\ vyrobeného\ trámečku\ (1-2)$$

Tabulka 19: Přehled průměrných pevností zkoušených prvků

Zkoušená směs	*Tříbodový ohyb*		*Tlak*	
	Maximální síla pro porušení [kN]	*Pevnost [MPa]*	*Maximální síla pro porušení [kN]*	*Pevnost [MPa]*
Směs 1 – Hlinitanový cement, šamotový písek a PVA vlákna	*2,91*	*8,15*	*-*	*-*
Směs 2 – H-Cement, šamotový písek a PVA vlákna	*3,02*	*8,35*	*-*	*-*
Směs 3 – Hlinitanový cement s experlitem	*0,14*	*0,39*	*1,37*	*0,85*
Směs 4 – H-Cement s experlitem	*0,11*	*0,32*	*0,97*	*0,61*
Směs 5 – H-Cement s experlitem a čedičovými vlákny	*0,12*	*0,34*	*1,07*	*0,67*

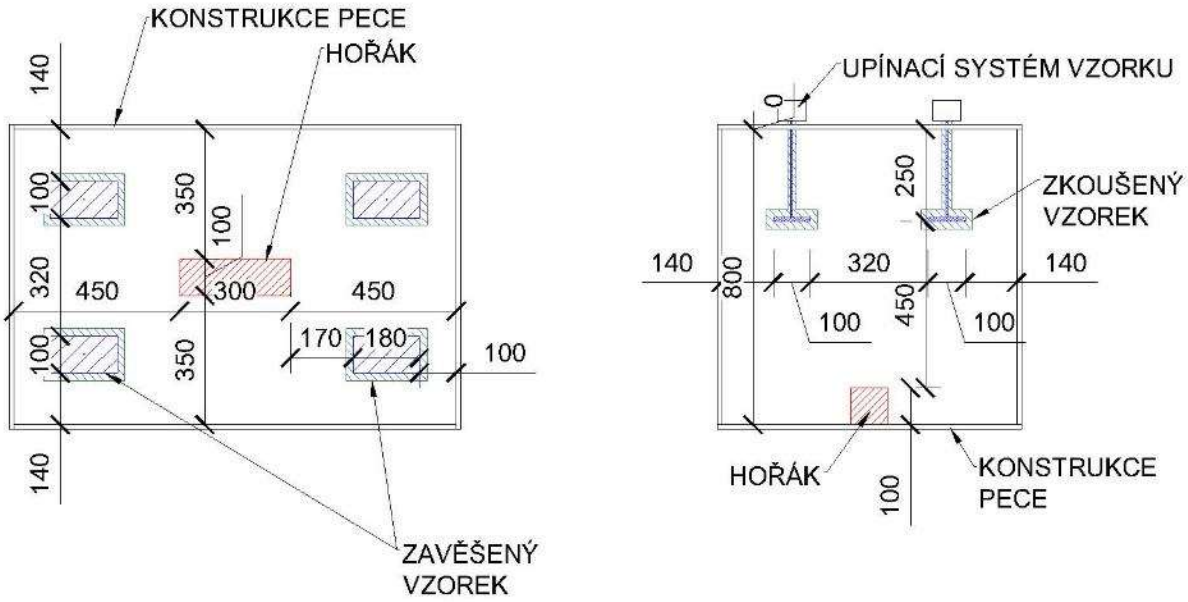
Při porovnání jednotlivých lehčených směsí byla prokazatelně vidět vyšší pevnost vzorků směsi 3. Tento vliv vyšší pevnosti byl zřetelný i při požárním experimentu. U lehčené varianty H-Cementu s experlitem a čedičovými vlákny nebyla prokázána vyšší pevnost vzorku vlivem přidaných čedičových vláken. Přidaná čedičová vlákna však při požárním experimentu mají zabránit odpadávání ochranné vrstvy ocelového plechu (jak již zmíněno výše, nebyla myšlena jako rozptýlená výztuž v betonovém vzorku). vliv na pevnost zkoušených vzorků měla i objemová hmotnost zkoušených vzorků, kdy u směsi 3 (hlinitanový cement s experlitem) bylo dosaženo objemové hmotnosti 436 Kg/m3 a u směsi 4 (H-Cement s experlitem) bylo dosaženo pouze 406 kg/m^3.

5 Experiment

Pro stanovení funkčnosti ochranných vrstev navržených směsí a vypočtené tloušťky ochranné vrstvy byla navržena zkouška v malorozměrové peci UCEEB ČVUT v Praze. Pro zkoumání průběhu vedení tepla a snížení tepelného namáhání, které ovlivňuje pevnosti a únosnosti ocelových plechů, byl stanoven průběh namáhání normovou teplotní křivkou [11]. Tento model byl zvolen i z hlediska využitelnosti simulačního modelu malorozměrové pece pro výpočet experimentu [14], kdy byl před experimenty vypočten předběžný průběh proudění v peci.

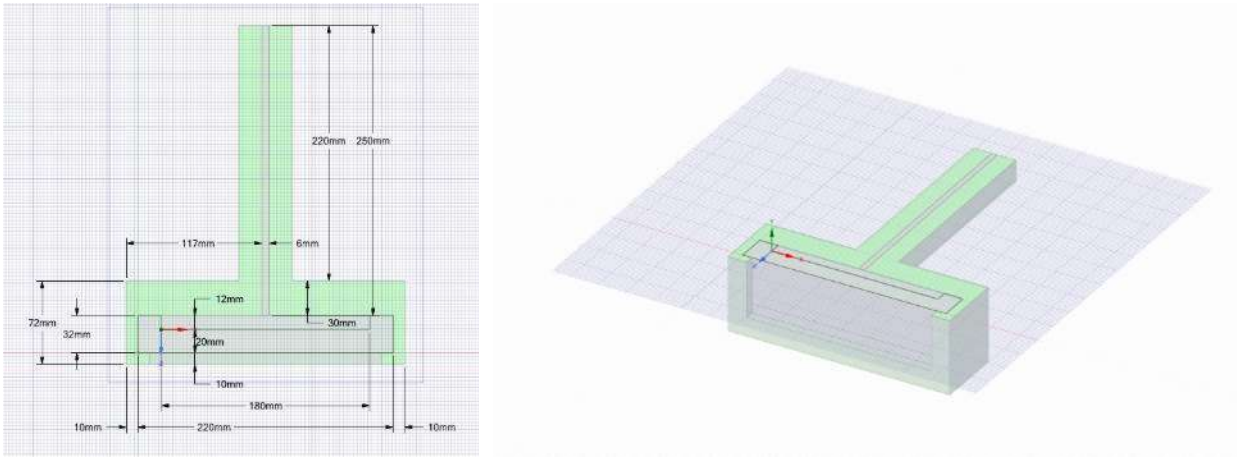
Dle sdělených informací možnosti rozmístění zkoumaných prvků v malorozměrové peci byly stanoveny vzdálenosti od stěn a stropů malorozměrové pece. Porušení těchto zásad by narušilo proudění plynů v peci, a tím ztížilo dosažení normové teplotní křivky v úrovni 0,7 m výšky pece.

Rozmístění vzorků v peci bylo konzultováno s vedoucím diplomové práce a s dalšími konzultanty. První výškové umístění vzorků v peci bylo myšleno právě v úrovni 0,7m výšky pece, kde by bylo namáhání povrchu ochranné vrstvy rovno teplotám normové teplotní křivky. Toto výškové uložení klade velké požadavky na vlastní uchycení vzorků a jeho možné selhání.



Obrázek 26: Pilotní navrhované rozmístění vzorků v peci

Při simulování pilotního umístění vzorků byly zjištěny vysoké odlišnosti a narušení proudění v peci. Druhým velkým problémem bylo izolování závitové tyče, která plnila funkci úchytného systému. Jako těžko proveditelné se jevilo zejména vedení kabelů termočlánků v izolační vrstvě závitové tyče.



(A) *(B)*

Obrázek 27: (A) Řez zkoušeným prvkem v pilotním navrhovaném zavěšení; (B) Model zkoušeného modelovaného vzorku v axonometrii

Upravené zavěšení eliminuje problém s namáháním závitové tyče, jejím možným selháním, a tím přerušením zkoušky. Finální umístění vzorků bylo zvoleno přímo pod stropem, kde byla na styku zkoušeného vzorku a stropu malorozměrové pece umístěna vrstva minerální vaty v tloušťce 25 mm pro zamezení možného proudění plynů ve vzniklé mezeře, a tím i znehodnocení měřených teplot na odlehlé straně plechu pod stropem pece. Výhodou tohoto umístění vzorků pod stropem pece byla i ochrana vedení kabelů termočlánků před plameny a vyššími teplotami.

Experiment byl proveden na čtyři základní části. Pokaždé byly v jednotlivých rozích dle kapitoly 5.1.1 zavěšeny vzorky ze stejné směsi. Mezi jednotlivými experimenty vždy byla pec ochlazena na pokojovou teplotu, aby nedocházelo k možným ovlivnění průběhu experimentu tím předešlým.

5.1.1 Rozmístění zkoušených prvků v peci a jejich zavěšení

Při finálním rozmístění rozmístěním vzorků v peci byly respektovány tyto požadavky:

a) Vzdálenost vzorku od stěny pece min 100 mm

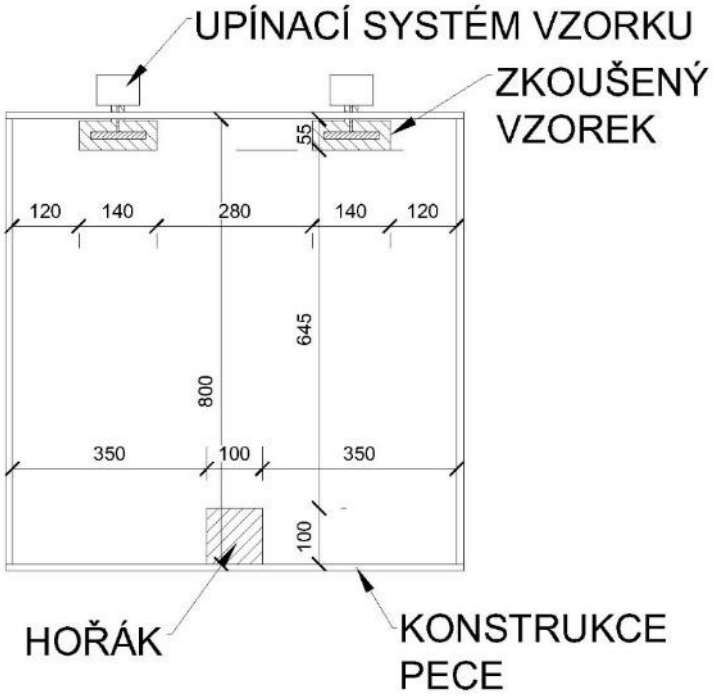
b) Umístění vzorku min 600 mm nad podlahou

c) Umístění vzorků mimo půdorys od hořáku a minimálně 100 mm od hrany hořáku

d) Omezení narušení proudění vlivem překážek v peci

Po zohlednění těchto požadavků bylo zvoleno řešení s vzorky zavěšenými pod stropem malorozměrové pece s vloženou izolací mezi strop pece a nechráněnou stranou ocelového plechu. Tímto krokem bylo docíleno minimalizace možného proudění mezi stropem pece a zkoumaným

prvkem. Předpoklad drobného spečení minerální vady a vytvoření štěrbiny byl zanedbán díky předchozí minimalizaci této štěrbiny.



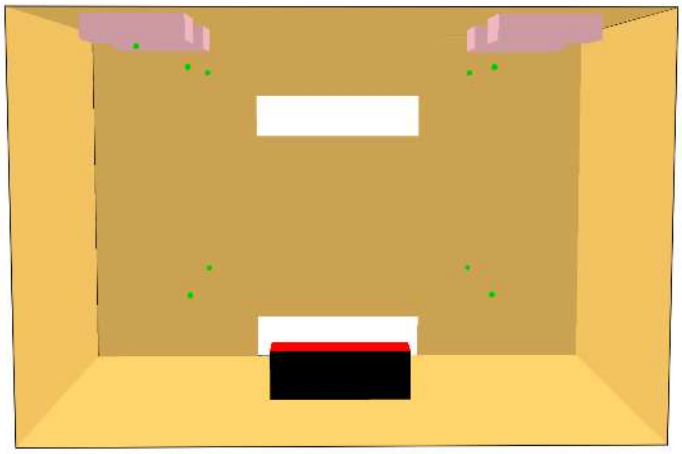
Obrázek 28: Schéma finálního uložení vzorků v peci

Ve finálním rozvržení byly vzorky umístěny 120 mm od delší stěny pece a 100 mm od kratší stěny pece. Mezi prvky je 280 mm mezera a nikterak nezasahují nad půdorys hořáku. V podílném směru byl tento rozdíl ještě větší. Upevnění vzorků v peci bylo realizováno pomocí závitové tyče M6, která plnila funkci pouze konstrukční. Tento průměr byl zvolen z důvodu minimalizace odebírání tepla ze zkoušeného prvku a také z důvodu potřeby protáhnout závitovou tyč skrze stropní desku malorozměrové pece. V případě velkého otvoru ve stropní desce (celkem čtyři), dochází k úniku tepla skrze tento otvor a narušení celkového proudění ve zkušební peci.

Upevnění bylo provedeno přes vynášecí ocelový profil L, který je položen na kovovou nosnou konstrukci malorozměrové pece. Toto řešení upevnění bylo zvoleno k snadné výměně zkoušených vzorků mezi jednotlivými dílčími experimenty.

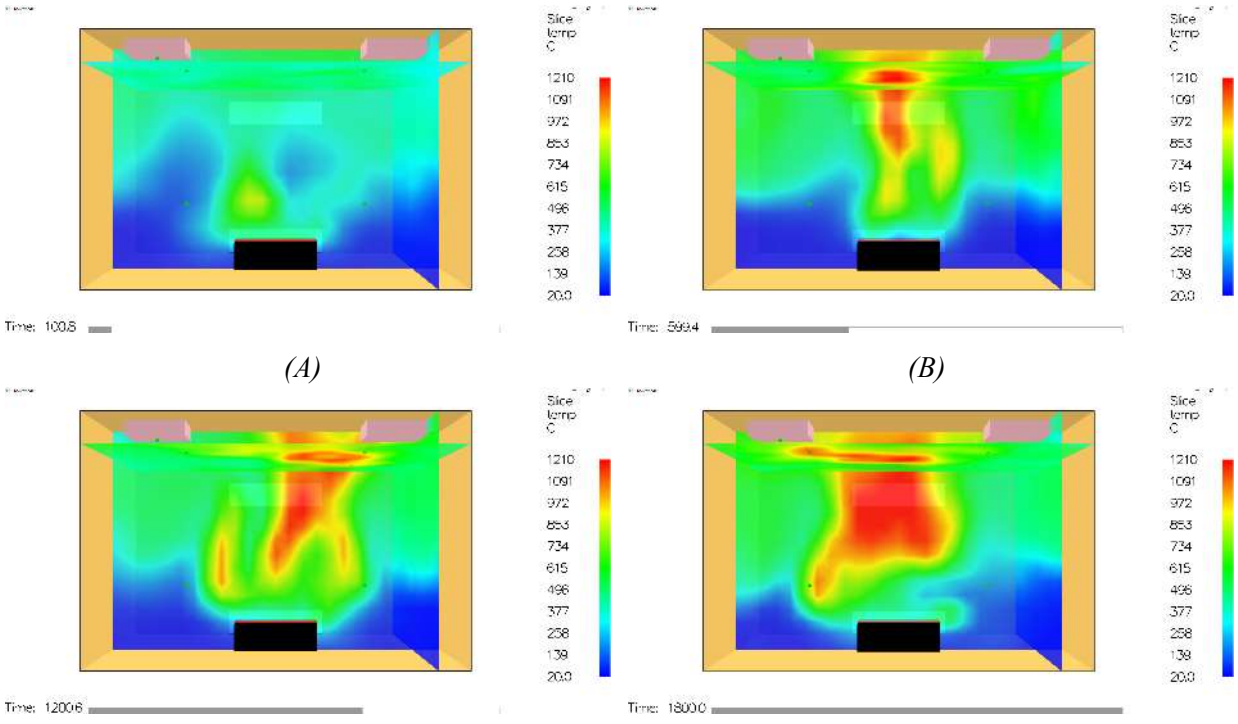
5.1.2 Návrh průběhu zkoušky

Pro provedení experimentu v malorozměrové peci byl vypočten pravděpodobný průběh teplot v peci po dobu 45 min. K simulaci byly využity poznatky z kapitol 2.5 a diplomové práce J. Chládka [14], který se zabýval vytvořením modelu pece. Kód výpočet CFD programem FDS byl upraven o zkoumané vzorky a termočlánek umístěný pod jeden ze vzorků. Tímto krokem bylo ověřováno případné narušení proudění v peci vlivem umístění vzorků a rozdílnost teploty v případě umístění zkoušeného vzorku přímo pod stropní desku.



Obrázek 29: Model FDS pro výpočet průběhu teplot při experimentu

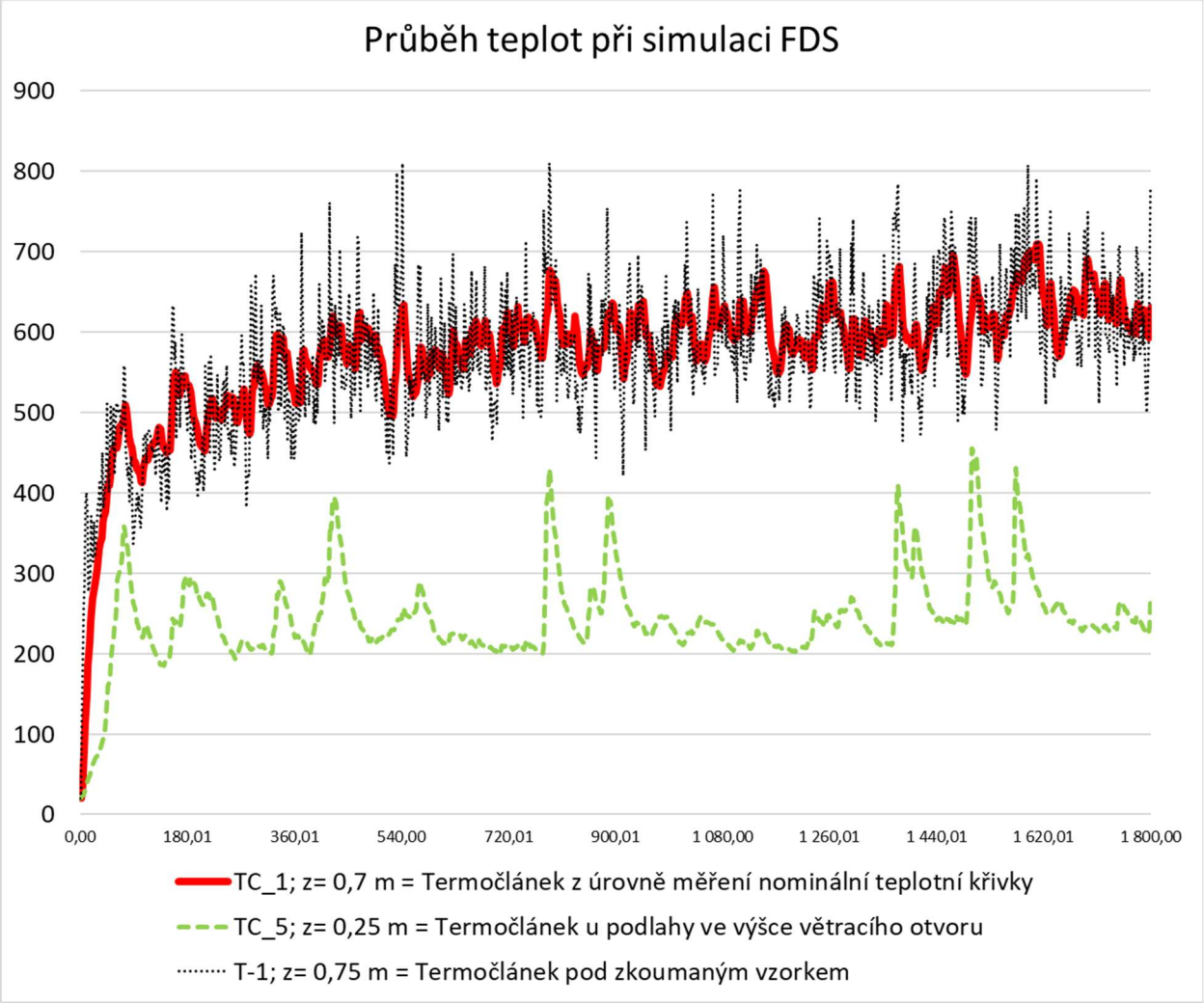
Kód pro FDS je uveden v Příloze č. 5. Termočlánkem pod vzorkem byla měřena adiabatická teplota, která byla využita pro tepelné namáhání modelu ve výpočetním programu ANSYS s využitím metody konečných prvků. Při simulaci byly měřeny teploty v modelu ve výšce 0,25 m. 0,7 m a 0,75 m. Ve výšce 0,7 m nad podlahou zkušení pece výpočetní model dovoluje simulovat přibližný průběh normové teplotní křivky. Tato vlastnost výpočetního modelu a malorozměrové zkoušky lze využít pro pilotní experimenty požární odolnosti.



Obrázek 30: Grafické znázornění teplot (A)Čas 100 s; (B) Čas 600 s; (C) Čas 1200 s; (D) Čas 1800 s

Při porovnání průběhu teplot naměřených v termočláncích byl velmi podobný průběh teplot ve výšce 0,7 m a 0,75 m. Vyšší rozptyl teplot v průběhu simulace u termočlánku u zkoumaného vzorku byl zapříčiněn prošlehnutím plamene v jeho okolí. Nedochází k trvalému působení

plamene na vzorky a jednotlivé špičky v grafu byly rovnoměrně rozložené pro všechny čtyři zkoumané prvky.



Obrázek 31: Průběh teplot při simulaci FDS

Simulací byl ověřen návrh umístění vzorků v peci pod stropní deskou. Tato poloha nikterak nenarušuje proudění v malorozměrové peci. Výkyvy v průběhu teplot v úrovni vzorků uvedené v obrázku č. 31 oproti termočlánkům umístěných ve výšce 0,7 m pod podlahy, kde byl možnost dosažení přibližného průběhu normové teplotní křivky ovlivňuje zašlehnutí plamenného hoření. Tento jev při provádění zkoušky nelze vyloučit.

5.2 Realizace experimentu

Experiment na UCEEB ČVUT byl proveden 13. 12. 2019 v FireLAB. Záměrem experimentu bylo ověření působení ochranné vrstvy, izolačních vlastností a celistvosti. Pro stanovení průběhu teplot v malorozměrové peci bylo postupováno dle normy ISO 9705 [21], která upravuje postupy pro malorozměrové experimenty. Nastavení výkonu hořáku umístěného v peci bylo použito nastavení, které již je odzkoušeno na mnoha experimentech.

Před experimentem byly připraveny vzorky, tzn. boční strany a nechráněná část ocelového plechu byly oblepeny tepelnou izolací z minerální vaty ISOVER tl. 25 mm a ovázány po obvodu vázacím drátem. Tepelná ochrana bočních stran vzorků byla pro omezení 3D namáhání zkoušeného vzorku, tedy aby byl primárně zahříván pouze ze spodní strany, kde bylo nejvíce ochranné vrstvy. Pro nalepení tepelné izolace byl použit kamnářský tmel, který odolává teplotám až 1200 °C, tedy aby byla zachována pevnost lepeného spoje i ve vyšších teplotách. Vázací drát s úhelníky byl po obvodu použit pouze jako pojistka proti odpadnutí izolace v průběhu experimentu.

(A) *(B)*

Obrázek 32: (A) Připravené otvor pro termočlánky a závitovou tyč; (B) Pohled na stranu, která bude namáhána požárem, H-Cement nelehčený

Termočlánky pro měření teploty byly použity od firmy MAVIS, Plášťový termočlánek s konektorem série MTC10, plášť o průměru 1,5 mm, materiál 2.4816, typ 1x „K“, izolovaný, třída přesnosti 2 dle ČSN EN 60584, délka pláště N = 3000 mm, miniaturní zástrčka konektoru.

Pro vzorek byly určeny dva termočlánky umístěné souměrně na nechráněné části oceli. Toto rozhodnutí bylo z důvodu možného uvolnění termočlánku a neplatnosti dat. Především toto umístění umožní validaci výpočetního modelu v programu ANSYS.

Vzorky byly převezeny do laboratoře FireLAB den předem z důvodu relaxace vzorků na stejné okrajové podmínky. V případě neprovedení tohoto kroku není možné porovnání mezi první a poslední zkouškou. Požární experiment byl rozdělen do čtyř etap, kdy byly jednotlivé zkoušky děleny podle jednotlivých směsí.

Celý průběh experimentu byl zaznamenáván na tři kamery pro využití pro propagaci požárního experimentu. Jedna kamera směřovala do odvětrávacího otvoru pece z důvodu možného zaznamenání odpadnutí ochranné vrstvy nebo selhání závěsného systému.

5.2.1 Průběh experimentu

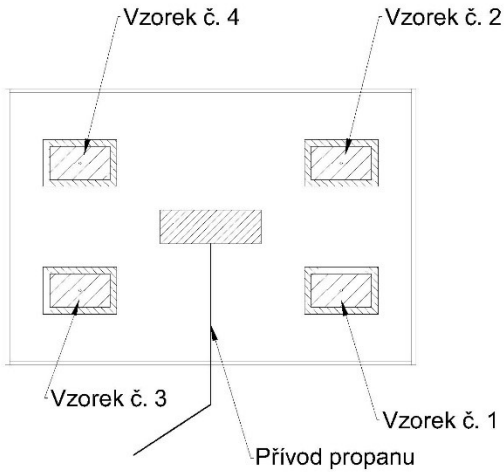
Zahájení experimentu bylo naplánováno na 7:00, tedy připravení celé laboratoře, provedení brainstormingu všech zúčastněných. Byly připraveny první vzorky pro namáhání teplotou.

Plánovaný harmonogram byl stanoven na 7:00 – Zahájení experimentu, brainstorming, příprava prvních vzorků, 7:15 – Experiment 1 – směs 2, H-Cement + šamot + PVA vlákna, 9:00 – Experiment 2 – směs 3, Hlinitanový cement + experlit, 12:00 – Experiment 3 – směs 4, H-Cement + experlit, 14:00 – Experiment 4 – směs 5, H-Cement + experlit + čedičová vlákna a 16:00 – Prvotní zhodnocení a úklid.

(A) *(B)*

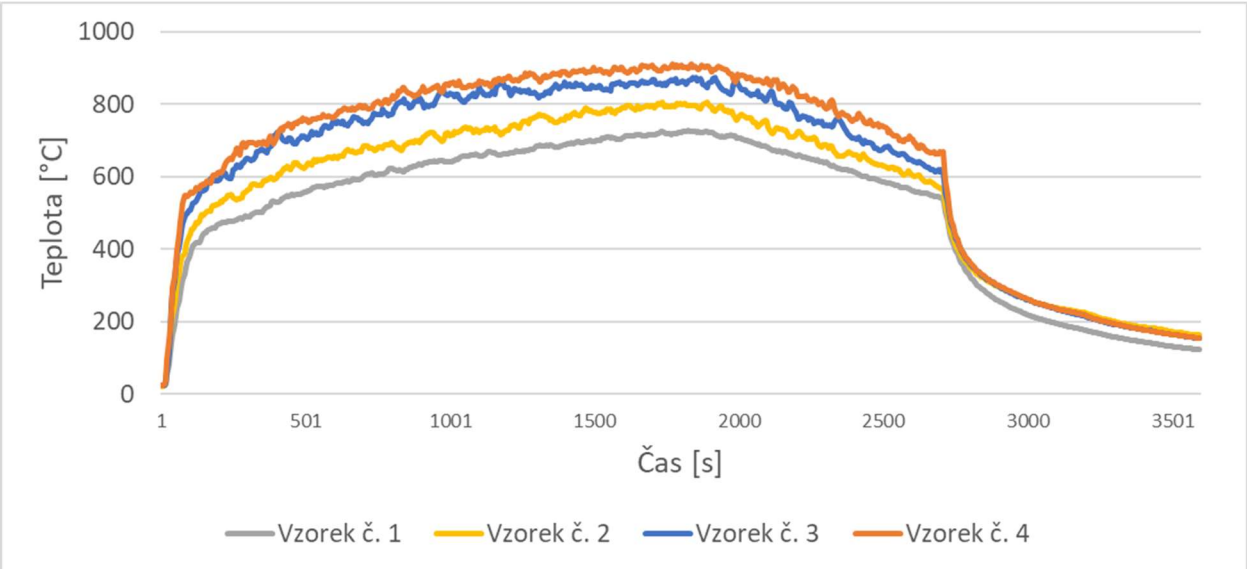
Obrázek 33: (A) Připravené vzorky pod stropem zkušební pece; (B) Pohled na umístěný hořák a termočlánky ve zkušební peci

Každý prvek byl zatěžován podobu 45 min a 15 min chladnutí. Nárůst teplot byl hlídán technickým zařízením laboratoře. Topný plyn byl použit propan, na kterém je deklarován průběh normové teplotní křivky v malorozměrové peci na UCEEB ČVUT. Zkušební pec byla umístěna pod zvonem odsávání, kdy regulace množství odváděného kouře a tepla z pece byla opět řízena systémově. V první fázi zahřívání vzorků v peci byl nastaven výkon 30 % a v pokročilejší fázi byl zvýšen na 60 %. Tento způsob zajišťuje optimální odvod tepla a kouře, ale zároveň neovlivňuje proudění plynů ve zkušební peci.



Obrázek 34: Označení vzorků v peci

Během experimentů byla zjištěna anomálie z hlediska proudění ve zkušební peci. V jedné části (levé) bylo dosahováno vyšších teplot než na odvrácené straně (pravé). Tento jev byl u všech dílčích experimentů stejný, tedy nebyla přijata nutná opatření pro upravení okrajových podmínek ve zkušební peci. Této anomálie bylo využito pro zkoumání chování jednotlivých prvků při rozdílném zahřívání. Na více zatížené prvky působila teplota cca 900 °C a na méně zahřívané prvky teplota cca 800 °C (měřeno v nejvyšší hodnotě). Hlavní rozdíl mezi jednotlivými způsoby zahřívání byla rozdílnost průběhu teplot. Výrazný zlom nastal při cca 100 s experimentu. Výrazně se projevoval vliv zašlehávání plamene na jednu stranu výrazněji než na druhou. Jev nebyl vysvětlen a byl přisouzen stylu zmenšení malorozměrové pece.



Obrázek 35: Rozdíly teplot ve zkušební peci, směs 2 H-Cement se šamotovým pískem a PVA vlákny

Postup všech čtyř částí experimentu (každý materiál tvoří část experimentu) byl shodný. V první fázi se jednalo o připevnění termočlánků na zkoušené vzorky, kdy každý vzorek byl vybaven dvěma termočlánky, které byly zakryty špunty z minerální vaty, které po zachycení

vzorků pod stropem dotvořila kompaktní ochranou izolační vrstvu mezi stropem zkušební pece a zkoušenými vzorky. Do stropu zkušební pece byly vyvrtány otvory dle předem definovaného umístění vzorků v peci. Otvory byly pomocí závitových tyčí a pomoví úhelníků L přichyceny zkoušené vzorky.

(A) *(B)*

(C) *(D)*

Obrázek 36: Průběh experimentu jedné části (A) Připevnění termočlánků ke zkoušenému vzorku a zakrytí otvoru; (B) Pohled na závěsný systém připravený pro tento experiment; (C) Připevnění vzorky pod stropem pece; (D) Vzorky po ukončeném experimentu

Po skončení dílčí části experimentu byly vzorky položeny na podložku z minerální vaty pro zchladnutí a pořízení fotodokumentace. Po poklesu teplot na úroveň, jež umožňovala vzorky přesunout bez ochranných pomůcek, byly vzorky přeneseny mimo laboratoř na venkovní prostředí, a to z důvodu zajištění nízké teploty pro převoz z areálu UCEEB ČVUT na Fakultu stavební ČVUT. Po přenesení vzorků mimo laboratoř byly vzorky zbaveny vrstvy minerální izolace.

U prvního (směs 2) a posledního (směs 5) vzorku došlo k poklesu výkonu hořáku z důvodu snížení tlaku v plynových lahvích. Pokles výkonu hořáku byl patrný od 35 min zkoušky. Tímto krokem došlo k mírnému zkreslení zkoušek.

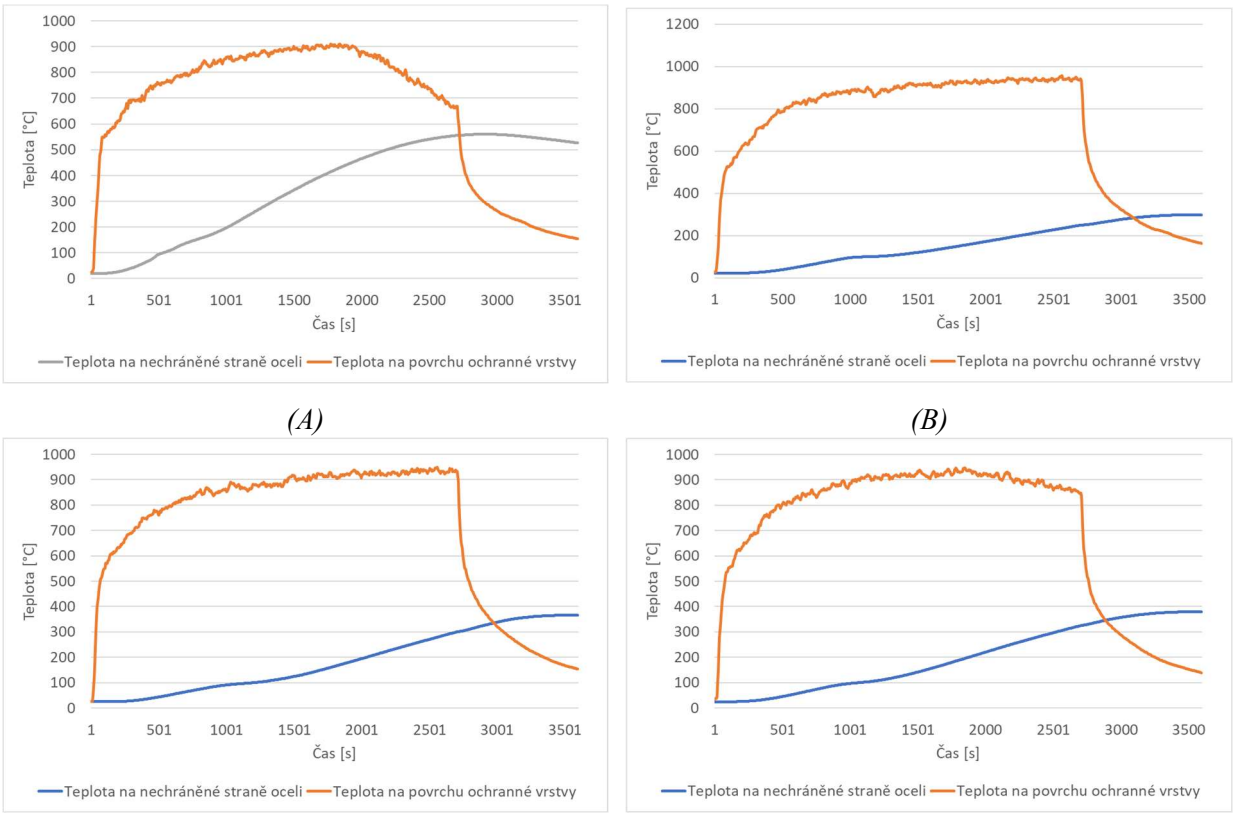
5.3 Teplota plynu v peci

Při prvotním srovnání všech vzorků ihned po vyjmutí ze zkušební pece na podklad z minerální vaty nebyly patrné výrazné trhliny v ochranné vrstvě. U vzorku s hlinitanovým cementem, lehčeným experlitem (směs 3) došlo k mikroskopickým trhlinám ve třetinách délky zkoušeného prvku. Vlivem chladnutí tyto trhliny postupovaly do hloubky a rozšiřovaly se. Varianty na bázi H-Cementu vydržely působení vysokých teplot bez trhlin. U lehčených variant H-Cementu a hlinitanového cementu vlivem chladnutí docházelo k odpadávání hran zkoušených vzorků. Vzorky chráněné vrstvou z H-Cementu, šamotového písku a PVA vláken odolávaly i po zchladnutí. Oproti lehčeným variantám však došlo k oddělení ochranné vrstvy od ocelového plechu z důvodu rozdílného chladnutí oceli a betonu. Ochranná vrstva ale neodpadla z ocelového plechu.

(A) *(B)*

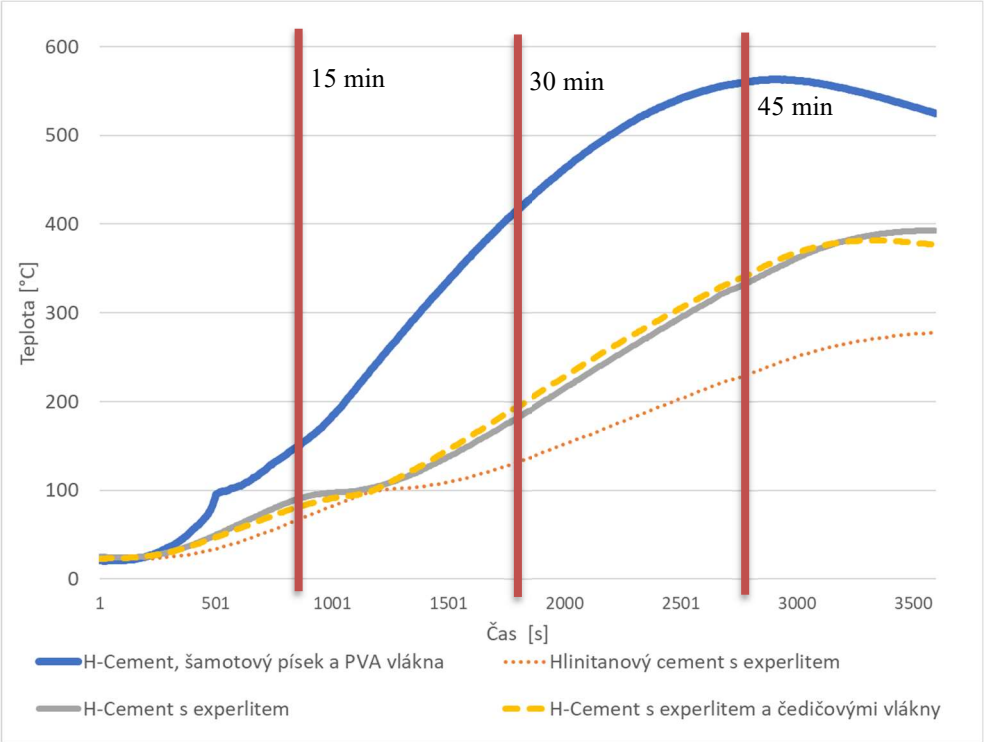
Obrázek 37: (A) Pohled na odzkoušený vzorek s hlinitanovým cementem s viditelnými prasklinami v dolní části obrázku; (B) Pohled odzkoušený vzorek H-Cementu s experlitem

Při postupném zahřívání byly splněny predikce předpokladů pro návrh potřebné tloušťky ochranné vrstvy z H-Cementu s šamotovým pískem a PVA vlákny. Předpoklad, který byl stanoven při výpočtu byl určen teplotou 650 °C na předělu vrstev H-Cementu a oceli. Při zaznamenávání teploty na nechráněné straně oceli bylo naměřeno 557 °C, což odpovídá cca 600 °C na styku ochranné vrstvy H-Cementu s ocelovým plechem. Oproti predikci tedy byly prokázány lepší izolační vlastnosti nelehčené varianty H-Cementu.



Obrázek 38: Průběh teplot u vzorku č. 4 (A) H-Cement se šamotovým pískem a PVA vlákny; (B) Hlinitanový cement s experlitem; (C) Připevnění vzorky pod stropem pece; (D) Vzorky po ukončeném experimentu

Lehčené směsi H-Cementu s experlitem dokazovaly ve 45 min zkoušky teplot na nechráněné straně oceli 330 °C. Podíl přidaných vláken neměl jakýkoli výrazný vliv na zvýšení odolnosti zkoušených prvků. Při chladnutí obou vzorků (směs 4 a 5) docházelo ke křehnutí a opadávání ochranné vrstvy po krajích vzorku. Při manipulaci docházelo k výraznému drolení vrstvy H-Cementu s experlitem.



Obrázek 39: Porovnání průběhu teplot na nechráněné straně oceli u jednotlivých směsí

Pro přijetí závěrů z experimentu byly stanoveny tyto parametry:

a) teplota na nechráněné straně oceli po 45 min
b) celistvost povrchu po ukončení experimentu
c) celistvost povrchu po zchladnutí
d) odpadnutí ochranné vrstvy po zchladnutí
e) křehkost ochranné vrstvy po experimentu

f) Tabulka 20: Zhodnocení kritérií

Kritérium	*Směs 2: H-Cement, šamotový písek a PVA vlákna*	*Směs 3: Hlinitanový cement, experlit*	*Směs 4: H-Cement, experlit*	*Směs 5: H-Cement, experlit a čedičová vlákna*
Teplota na nechráněné straně oceli po 45 min	*556,9 °C*	*223,5 °C*	*324,4 °C*	*333,0 °C*
Celistvost povrchu po ukončení experimentu	*Bez trhlin*	*Mikroskopické trhliny*	*Bez trhlin*	*Bez trhlin*
Celistvost povrchu po zchladnutí	*Bez trhlin*	*Zvětšení trhlin*	*Mikroskopické trhliny*	*Mikroskopické trhliny*

Odpadnutí ochranné vrstvy po zchladnutí	*Bez odpadnutí*	*Odpadnutí krajů ochranné vrstvy*	*Odpadnutí krajů ochranné vrstvy*	*Odpadnutí krajů ochranné vrstvy*
Křehkost ochranné vrstvy po experimentu	*Oddělení vrstev*	*Náchylný k lomu ochranné vrstvy*	*Křehký na manipulaci*	*Křehký na manipulaci*

(A) *(B)*

Obrázek 40: (A) Vznik trhlin ve vrstvě H-Cementu s Experlitem vlivem chladnutí; (B) Odpadnutí ochranné vrstvy na krajích zkoumaného vzorku H-Cementu s experlitem vlivem chladnutí

6 Tepelná vodivost

Při modelování přestupu tepla do dané konstrukce je potřeba zvážit použité metody, které mohou správně, ale i chybně, reflektovat způsoby přestupu tepla do konstrukce nebo průběh působení tepelného namáhání. V základní rovnici jednodimenzionálního sdílení tepla do konstrukce je uvažovat v základním pojetí sdílení tepla ustálené namáhání. Základem je využití Fourierova zákona vedení tepla [1, 2]:

Rovnice 7: Fourierův zákon vedení tepla

$$\dot{Q} = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

Pro konstrukce vystavené požáru je třeba uvažovat proměnné tepelné namáhání, kdy se tepelné namáhání mění v čase. V případě požáru nastává změna vývoje tepla v dané oblasti, a tedy tepelné namáhání, každou vteřinou. Pro tento případ je nutné do výpočtu zahrnout vlastnosti materiálu. Nestačí pouze uvažovat tepelnou vodivost jako v rovnici 7, ale je potřeba tepelnou kapacitu materiálu [1, 2]:

Rovnice 8: Proměnné tepelné namáhání a tepelný tok

$$\dot{Q} = mc \frac{dT}{dt}$$

Pro předpověď materiálových vlastností lehčeného H-Cementu s experlitem byly využity poznatky Y.C.Wanga a kol. [1]. V mnoha případech však nejsou dostupné hodnoty pro popsání materiálu. Pro popsání průběhu tepelné vodivosti pórovitého materiálu H-Cementu s experlitem byla proto využita predikční rovnice, kterou lze uplatnit právě v těchto případech.

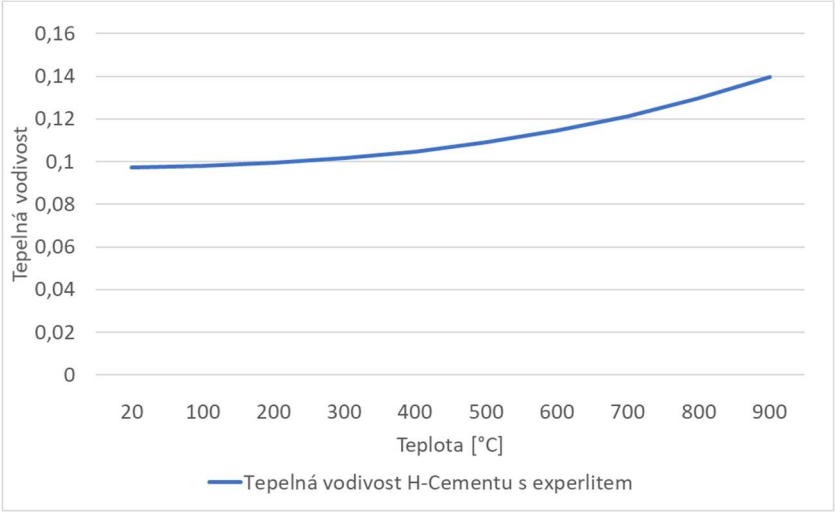
Rovnice 9: Obecná rovnice pro předpoklad průběhu tepelné vodivosti tepelně ochranných materiálů

$$\lambda^* = C_1 + C_2 T^3$$

Stanovení koeficientů C_1 a C_2 byly uvažovány velmi podobné vlastnosti experlitu jako u vermikulitu, kdy při objemové hustoty bylo dosahováno stejných hodnot, jako kdyby byl jako plnivo použit vermikulit. Součinitel C1 lze tedy nahradit tepelnou vodivostí při teplotě 20 °C a součinitel C2 vzorcem zohledňující vliv objemové hustoty.

Rovnice 10: Stanovení koeficientů A a B pro vermikulit [1]

$$C_1 = \lambda_0^* = A \frac{\rho}{1000} = 0{,}27 \frac{\rho}{1000}$$
$$C_2 = B \frac{(1000 - \rho)}{1000} = 0{,}18 \frac{(1000 - \rho)}{1000}$$



Obrázek 41: Změna tepelné vodivosti ochranné vrstvy H-Cementu s experlitem

Oproti původnímu předpokladu, kdy pro směs H-Cementu s experlitem (směs 4) byla predikována tepelná vodivost rovna 0,12 W/K/m při 20 °C, bylo dosaženo nižší hodnoty. Zlepšenou tepelnou vodivost lze přisuzovat vlivu vysušení vzorku a jeho nízké objemové hmotnosti. Tepelná vodivost je spočítána pomocí dat naměřených při experimentu. Metodou nejmenších čtverců byly stanoveny hodnoty koeficientů A a B pro H-Cement s experlitem.

Rovnice 11: Lineární regrese tepelné vodivosti H-Cementu s experlitem

$$y = 0{,}09221 - 1{,}586\mathrm{E}^{-11}x$$

Rovnice 12: Dopočet koeficientů A a B pro průběh tepelné vodivosti H-Cementu s experlitem

$$\lambda_0^* = A\frac{\rho}{1000} \rightarrow A = \lambda_0^*\frac{1000}{\rho} = 0{,}09221\frac{1000}{406} = 0{,}22712$$

$$C = B\frac{(1000-\rho)}{1000} \rightarrow B = C_2\frac{1000}{(1000-\rho)}1000^3 = -1{,}586\times10^{-11}\frac{1000}{(1000-406)}1000^3 = -0{,}0267$$

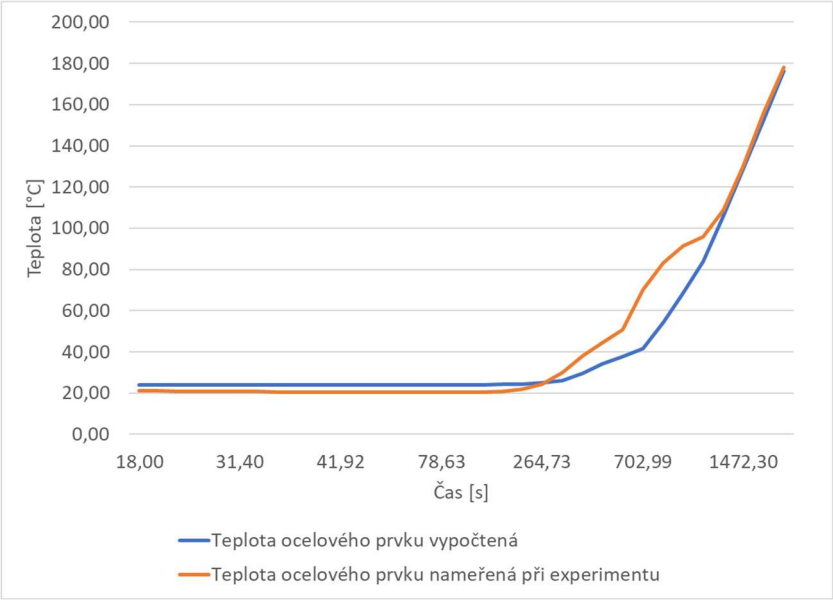
Rovnice 13: Výsledná rovnice tepelné vodivosti H-Cementu s experlitem

$$\lambda^* = 0{,}22712\frac{\rho}{1000} - 0{,}0267T^3$$

Pro výpočet koeficientu B se jako hodnota x bere hodnota T^3, rovnice se vynásobí 1000^3 z rovnice pro tepelnou vodivost λ^*.

Vliv teploty na změnu objemové hmotnosti a měrné tepelné kapacity byl pro malé vzorky zanedbán. Změna hustoty ochranných materiálů je způsobena vypařením obsažené vlhkosti ve zkušebních vzorcích. Vzorky byly sušeny v sušící peci, kdy byl měřen úbytek hmotnosti vlivem vypaření vázané vody ve vzorcích. Sušení bylo zastaveno ve chvíli při úbytku hmotnosti po dvou měřeních menší než 1 % předchozí hmotnosti. U vzorku H-Cementu s experlitem byl konečný úbytek hmotnosti 0,06 % hmotnosti. Konstantní hodnoty byly brány pro základní modely pro

beton s plnivem z perlitu, který odpovídá objemovou hmotností betonu H-Cementu s experlitem [22, 23]. Hodnoty pro základní modelování jsou uvedeny v tabulce 21.

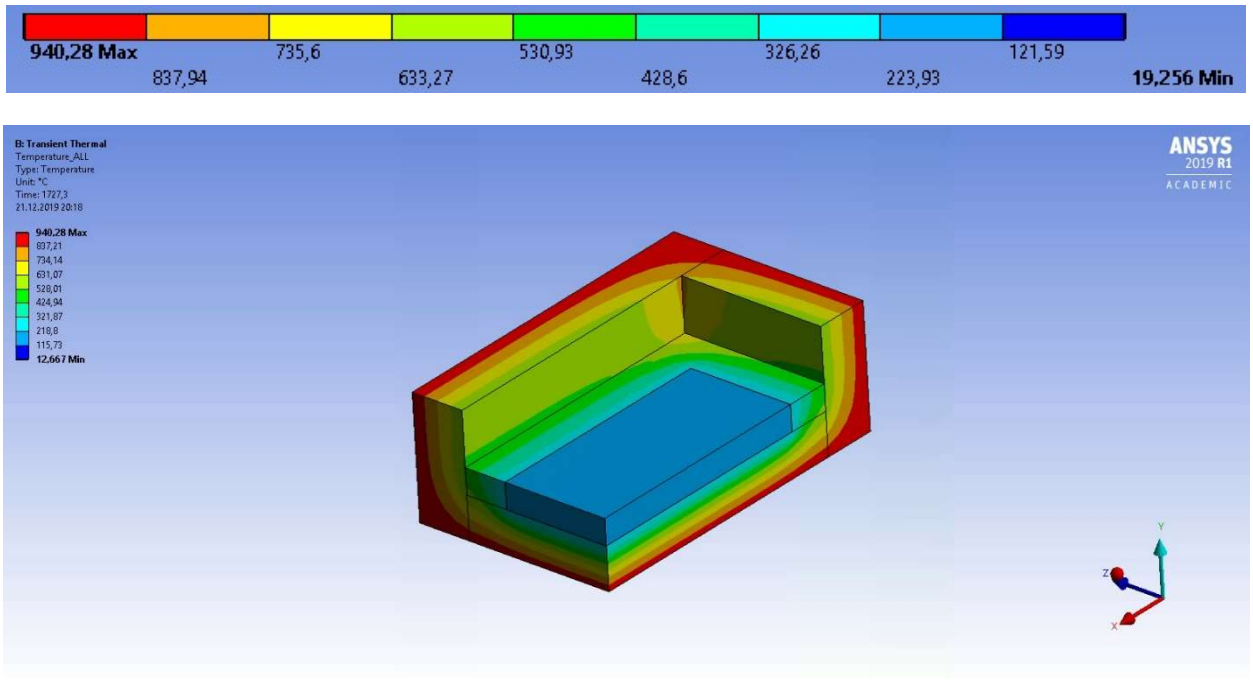


Obrázek 42: Porovnání tepelné vodivosti H-Cementu s experlitem při výpočtu a experimentu

Tabulka 21: Materiálové vlastnosti H-Cementu s experlitem

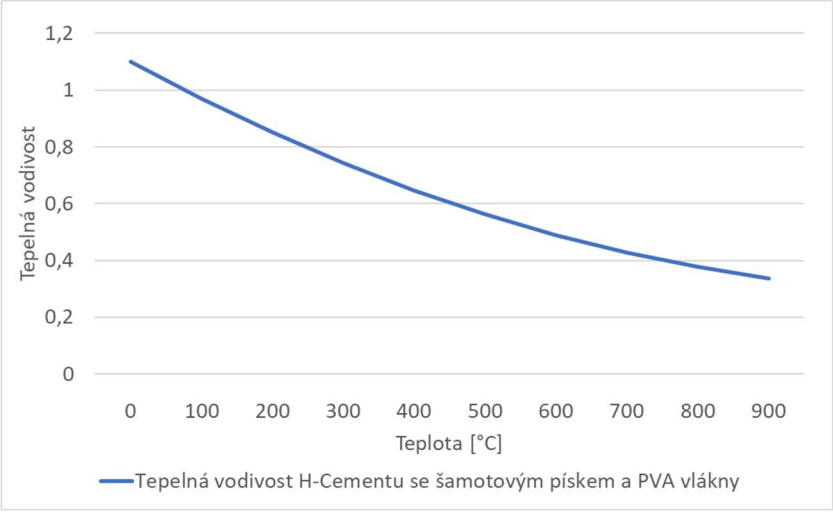
Materiálová charakteristika		*Hodnota*
Objemová hmotnost		*406 kg/m³*
Měrná tepelná kapacita		*1150 J/kg/K*
Tepelná vodivost	*20 °C*	*0,097425*
	100 °C	*0,0981*
	200 °C	*0,099312*
	300 °C	*0,101686*
	400 °C	*0,104763*
	500 °C	*0,109002*
	600 °C	*0,114456*
	700 °C	*0,121282*
	800 °C	*0,129738*
	900 °C	*0,139827*

Změna tepelné vodivosti byl ověřena pomocí modelu v programu ANSYS s využitím metody konečných prvků, rozložení teplot je uvedeno v Příloze č. 5. Výpočetním modelem byla ověřena hodnota tepelné vodivosti stanovená dle Rovnice 9 a Rovnice 10.



Obrázek 43: Rozložení teplot v 30 min výpočtu

Při porovnání teplot, zaznamenaných pomocí termočlánků na nechráněné straně oceli a na výpočetním modelu, byl změřen rozdíl 30 °C po 1800 s výpočtu a experimentu. V počátečních fázích byly teploty shodné. Rozdíl nastal při teplotě cca 50 °C, kdy vliv vlhkosti výrazně ovlivňuje měrnou tepelnou kapacitu. Při 100 °C u experimentu vliv vypařování vodní páry spotřeboval dodanou energii pro ohřev zkoušeného vzorku. Průběh je znázorněn na obrázku 44. Pro následující výzkumy ochranné vrstvy byly dány vzorky na zkušební metodu TGA, která dourčí tepelné vlastnosti zkoumané malty.



Obrázek 44: Změna tepelné vodivosti ochranné vrstvy H-Cementu se šamotovým pískem a PVA vlákny

Tepelná vodivost ochranné vrstvy z H-Cementu se šamotovým pískem a PVA vlákny byla dopočtena z naměřených hodnot v experimentu rovnicí 14. Výsledný průběh tepelné vodivosti

v závislosti na teplotě byla upravena rovnice pro tepelnou vodivost běžného betonu [1] v návaznosti na výpočet dat z experimentu.

Rovnice 14: Stanovení tepelné vodivosti podle EN 13381-4

$$\lambda_p = \left[\mathrm{d}_p \frac{V}{A_p} C_s \rho_s (1 + \emptyset/3) \frac{1}{(T_{fi} - T_s)\Delta t}\right] \left[\Delta T_s + \left(e^{\emptyset/10} - 1\right)\Delta T_{fi}\right]$$

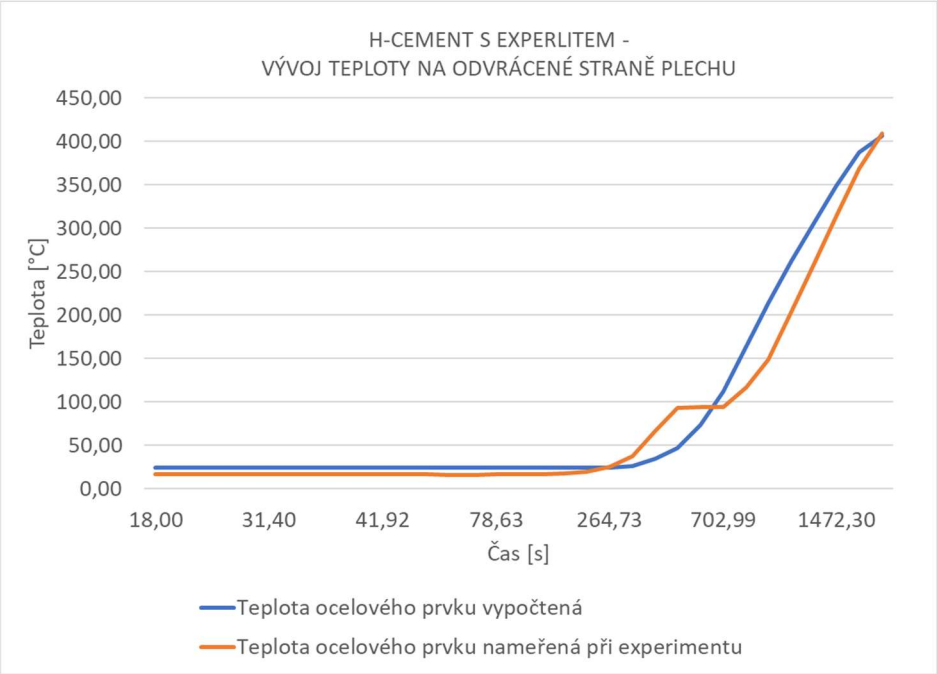
Rovnice 15: Stanovení rovnice tepelné vodivosti H-Cementu se šamotovým pískem a PVA vlákny

$$\lambda_p = 1{,}1 - 0{,}136 \times 10^{-2} T + 0{,}0057 \times 10^{-4} T^2$$

Tabulka 22: Materiálové vlastnosti H-Cementu s experlitem

Materiálová charakteristika		*Hodnota*
Objemová hmotnost		*1930 kg/m³*
Měrná tepelná kapacita		*1050 J/kg/K*
Tepelná vodivost	*20 °C*	*1,1*
	100 °C	*0,9697*
	200 °C	*0,8508*
	300 °C	*0,7433*
	400 °C	*0,6472*
	500 °C	*0,5625*
	600 °C	*0,4892*
	700 °C	*0,4273*
	800 °C	*0,3768*
	900 °C	*0,3377*

Pro ověření hodnot tepelné vodivosti byl průběh validován pomocí výpočetního modelu v programu ANSYS. Při porovnání obou průběhů nastal rozdíl při 100 °C. Tento rozdíl způsobila vlhkost vzorku a tedy pro další výzkum je nutné přihlédnout k TGA výsledkům.



Obrázek 45: Porovnání tepelné vodivosti H-Cementu se šamotovým pískem a PVA vlákny při výpočtu a experimentu

7 Shrnutí

7.1 Vyhodnocení experimentu

Experimenty v malorozměrové peci na UCEEB ČVUT byly ověřeny izolační vlastnosti ochranných vrstev na ocelovém plechu. Předpověď chování nelehčeného H-Cementu byla naplněna: ve 45 min experimentu byla na odvrácené straně oceli naměřena teplota 550 °C, což odpovídá cca 650 °C na styku vrstev H-Cementu a oceli. Lehčené varianty dosahovaly až o 200 °C nižších hodnot než ochranná vrstva z H-cementu se šamotovým pískem a PVA vlákny.

Vzorky představily ochranou vrstvu z H-Cementu jako možnou funkční variantu pro provádění požárních vrstev, zabraňujících prostupu tepla do konstrukce. Vzorky se vyznačují výbornou adhezí k ocelovému prvku, odpadá zde potřeba jakkoliv ošetřovat ocel podkladními vrstvami nebo proti korozi. Jedinou úpravou povrchu bylo odmaštění.

Nelehčenou směs H-Cementu lze snadno použít pro provádění požárních nástřiků, které snadno přilnou na ocelový prvek a vyznačují se vysokou tvrdostí povrchu. U nelehčených variant je potřebné respektovat křehkost experlitu, a tedy přizpůsobit způsob vedení směsi do nanášecího stroje a zohlednit nutnost nanášení směsi na povrch ocelových prvků pod nižším tlakem.

7.2 Tabulkové hodnoty

Pro stanovení tabulkových hodnot požární odolnosti ocelového prvku chráněného vrstvou z H-Cementu byla připravena tabulka pro stanovení tloušťky ochranné vrstvy. Stanovené tloušťky respektují ověřené hodnoty tepelné vodivosti ověřené kapitole 4.5.1. Tloušťka ochranné vrstvy je vždy zaokrouhlena na nejbližší násobek 5 z důvodu bezpečnosti. Pro uvažování použitelnosti H-Cementu jako ochranného materiálu musí být ověřeno velkorozměrovou zkouškou. Tabulka 23 slouží pro orientační hodnoty pro experimenty.

Tabulka 23: Přehled požárních odolností vzhledem k návrhové teplotě při užití ISO 834

Hodnota požární odolnosti	*Návrhová teplota ≤ 450 °C*			
Tloušťka ochranné vrstvy [mm]	*10*	*15*	*20*	*25*
Ochranná vrstva	*H-Cementu se šamotovým pískem a PVA vlákny V/A = 37,87 m^{-1}*			
R15	*208,7 °C*	*200,1 °C*	*151,6 °C*	*119,3 °C*
R30	*624,6 °C*	*515,7 °C*	*431,5 °C*	*365,3 °C*
R45	*811,3 °C*	*733,6 °C*	*649,5 °C*	*591,7 °C*
Ochranná vrstva	*H-Cement s experlitem V/A = 37,87 m^{-1}*			
R15	*77,28 °C*	*52,9 °C*	*40,1 °C*	*32,3 °C*
R30	*250,5 °C*	*174,7 °C*	*130,9 °C*	*102,3 °C*
R45	*448,3 °C*	*335,5 °C*	*262,3 °C*	*211,2 °C*
Hodnota požární odolnosti	*Návrhová teplota ≤ 550 °C*			
Tloušťka ochranné vrstvy [mm]	*10*	*15*	*20*	*25*
Ochranná vrstva	*H-Cementu se šamotovým pískem a PVA vlákny V/A = 37,87 m^{-1}*			
R15	*208,7 °C*	*200,1 °C*	*151,6 °C*	*119,3 °C*
R30	*624,6 °C*	*515,7 °C*	*431,5 °C*	*365,3 °C*
R45	*811,3 °C*	*733,6 °C*	*649,5 °C*	*591,7 °C*
Hodnota požární odolnosti	*Návrhová teplota ≤ 650 °C*			
Tloušťka ochranné vrstvy [mm]	*10*	*15*	*20*	*25*
Ochranná vrstva	*H-Cementu se šamotovým pískem a PVA vlákny V/A = 37,87 m^{-1}*			
R15	*208,7 °C*	*200,1 °C*	*151,6 °C*	*119,3 °C*
R30	*624,6 °C*	*515,7 °C*	*431,5 °C*	*365,3 °C*
R45	*811,3 °C*	*733,6 °C*	*649,5 °C*	*591,7 °C*

8 Závěr diplomové práce

V úvodních kapitolách byly shrnuty tři základní tematické okruhy, kterými se tato diplomová práce zabývala, a to nástin problematiky a vývoje požární ochrany v České republice, představení H-Cementu jako nového materiálu použitelného jako pojivo pro požární vrstvy k ochraně ocelových prvků, především jeho použití ve formě požárního nástřiku a byla představena malorozměrová zkušební pec. V zahraničí, ale též v České a Slovenské republice, je snaha vymyslet nové materiály, které by mohly nahradit klasický portlandský cement, který je z hlediska výroby poměrně nákladný. Nové materiály by měly též poskytnout lepší vlastnosti z hlediska požární ochrany.

Hlavním tématem této diplomové práce bylo proto ověření využití nového pojiva H-Cementu, který má ve vyšších teplotách výbornou soudržnost, není náchylný k prasklinám, ale především vykazuje vysokou adhezi k oceli. Jeho výroba je méně energeticky náročná než portlandský cement, a tím je možné dosáhnout i nižší ceny prvku. Vhledem k výborné adhezi ochranné vrstvy z H-Cementu na ocelovém prvku lze eliminovat jiné postupy úpravy povrchu ocelového prvku pro aplikaci ochranné vrstvy. H-Cement zde byl představen jako materiál, byly provedeny základní zkoušky jeho míchatelnosti, kdy byl upravován vodní součinitel pro potřeby stanovení receptur k výrobě zkušebních vzorků směsí.

Pro ověření požární odolnosti byly vyrobeny a odzkoušeny vzorky H-Cementu se šamotovým pískem, s experlitem, s experlitem a čedičovými vlákny a referenční vzorek z hlinitanového cementu s experlitem. Před experimentem bylo ověřeno umístění vzorků v malorozměrové peci simulací v FDS a ze získaných dat byla určena tepelná vodivost ochranné vrstvy z H-Cementu s experlitem a se šamotovým pískem. Průběh tepelné vodivosti byl validován pomocí ANSYSu metodou konečných prvků.

Zároveň s výrobou vzorků pro experiment v malorozměrové peci byly ze všech navržených směsí vyrobeny zkušební trámečky pro stanovení pevností v ohybu a tlaku pro snazší predikci chování deskových vzorků v experimentální peci na UCEEB. Poznatky ohledně pevností je možné využít ve výzkumu H-Cementu jako ochranné vrstvy oceli.

Experiment byl proveden v malorozměrové peci na UCEEB ČVUT v Buštěhradě, kdy byly zkoušeny všechny lehčené směsi a H-Cement se šamotovým pískem a PVA vlákny. Zkoumáno bylo především chování jednotlivých ochranných vrstev při působení požáru (praskání, odpadávání), ale i teploty na nechráněné straně ocelového plechu.

Závěrem a hlavním výsledkem experimentální části diplomové práce bylo stanovení možných tabulkových hodnot pro požární ochranu ocelových prvků H-Cementem, a to jak pro směs běžného betonu z H-Cementu, tak i pro směs H-Cementu s experlitem.

Fotodokumentace, která byla pořízena během zpracovávání jednotlivých částí této diplomové práce, je uvedena v Příloze č. 6 s popisky jednotlivých snímků včetně data pořízení.

V budoucím výzkumu lze provést experimenty vystavení ochranné vrstvy na bázi H-Cementu extrémním teplotám přes 1200 °C, ověření jeho adheze k ocelovým prvkům i při těchto teplotách a ověření tvrdosti povrchu při tepelném namáhání a provést velkorozměrovou zkoušku v akreditované zkušebně.

Literatura

[1] WANG, Y. C., Ian BURGESS, František WALD a Martin GILLIE, ed. *Performance-based fire engineering of structures*. Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN 978-0-415-55733-7.

[2] BUCHANAN, Andrew Hamilton. *Structural design for fire safety*. Chichester ; New York: Wiley, 2001. ISBN 978-0-471-88993-9.

[3] *ČSN 730802:2009+Z1:2013+Z2:2015 Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty*

[4] *ČSN 730804:2010+Z1:2013+Z2:2015 Požární bezpečnost staveb – Výrobní objekty*

[5] OTTO, Jan. *Ottův slovník naučný: illustrovaná encyklopaedie obecných vědomostí*. 1888.

[6] KARDA, Ladislav. *Vývoj právní úpravy požární ochrany v Čechách; příspěvek na konferenci Červený kohout 2009*. duben 2009

[7] *Zákon č. 133/1985 Sb., Zákon České národní rady o požární ochraně*

[8] SEIDL, J. a & SPOL. Technický zpravodaj č. 42: ČSN 73 0802 - stručná historie a zavádění do praxe. *seidl.cz* [online]. [vid. 2019-09-30]. Dostupné z: http://www.seidl.cz/cz/technicky-zpravodaj/technicky-zpravodaj-42/csn-73-0802-strucna-historie-a-zavadeni-do-praxe-510.html

[9] *Vyhláška č. 23/2008 Sb. ve znění pozdějších předpisů, Vyhláška o technických podmínkách požární ochrany staveb*

[10] PPLK. BRUMOVSKÁ, I., B. PLK. JENERÁLOVÁ, R. PPLK. KAISER, P. MJR. NEJTEK, Z. NPOR. RÁŽ, K. KPT. SKALSKÁ, M. PPLK. SVOBODA, M. NPOR. TAUFEROVÁ a K. NPOR. VOKÁLOVÁ. *Požární ochrana: příručka pro podnikatele*. 2004. vyd. Praha: MV - generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 2004. ISBN 978-80-86640-31-0.

[11] *ISO 834-11:2014, Fire resistance tests -- Elements of building construction -- Part 11: Specific requirements for the assessment of fire protection to structural steel elements*

[12] *ČSN EN 1993-1-2, Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru; 2010*

[13] WALD, František, Marek POKORNÝ, Kamila HOROVÁ, Petr HEJTMÁNEK, Hana NAJMANOVÁ, Martin BENÝŠEK, Marta KUREJKOVÁ, Ivo SCHWARZ, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE a STAVEBNÍ FAKULTA. *Modelování dynamiky požáru v budovách*. 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.

[14] CHLÁDEK, Jiří. *Malorozměrové zkoušky požární odolnosti, Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební.* B.m.: České vysoké učení technické v Praze

[15] KRAJČÍŘ, Maroš a Jana MÜLLEROVÁ. *3D Small-scale Fire Modeling Testing Preparation | Elsevier Enhanced Reader* [online]. [vid. 2019-10-07]. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.06.083

[16] FLÍDR, Václav. *Alternativní zjišťování požární odolnosti stěnových prvků. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební.* B.m.: České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební. 2017

[17] MARTAUZ, P., I. JANOTKA, J. STRIGÁČ a M. BAČUVČÍK. *Fundamental properties of industrial hybrid cement: utilization in ready-mixed concretes and shrinkage-reducing applications* [online]. červen 2016. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/303373745_Fundamental_properties_of_industrial_hybrid_cement_Utilization_in_ready-mixed_concretes_and_shrinkage-reducing_applications

[18] SÁNCHEZ-HERRERO, M. J., Ana FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ a A. PALOMO. Studies About the Hydration of Hybrid "Alkaline-Belite" Cement. *Frontiers in Materials* [online]. 2019, **6**, 66. ISSN 2296-8016. Dostupné z: doi:10.3389/fmats.2019.00066

[19] SOKOL, Z. Podklady pro posouzení požární odolnosti průvlaku, Fakulta Stavební ČVUT v Praze. In: . FSv ČVUT v Praze. 2016.

[20] KUBÍK, Martin. Modelování vývinu hydratačního tepla na betonových konstrukcích. nedatováno, 86.

[21] *ISO 9705-1:2016 — Room corner test for wall and ceiling lining products — Part 1: Test method for a small room configuration* [online]. [vid. 2019-12-15]. Dostupné z: http://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/05/98/59895.html

[22] RAŽNJEVIČ, K. *Termodynamické tabulky*. B.m.: ALFA Bratislava. 1984

[23] *ČSN 73 0540-3: Tepelná ochrana budov, ČNI Praha 1995*

Seznam příloh

PŘÍLOHA Č. 1 – RECEPTURY PRO VÝROBU VZORKŮ

PŘÍLOHA Č. 2 – ROZMĚRY VYROBENÝCH VZORKŮ

PŘÍLOHA Č. 3 – PEVNOSTI ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

PŘÍLOHA Č. 4 – KÓD FDS A VÝSTUPY

PŘÍLOHA Č. 5 – ANSYS VÝSTUP – H-CEMENT S EXPERLITEM

PŘÍLOHA Č. 6 – FOTODOKUMENTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PŘÍLOHA Č. 1 – RECEPTURY PRO VÝROBU VZORKŮ

0,00423 m^3

Typ prvku Malta se žáruvzdorným pojivem, nelehčená, PVA vlákna	Označení prvku Vzorek 1-x	Váha [g]
Gorkál 50		506
Voda		233
Šamot	0-1 mm	506
	1-2 mm	1012
PVA vlákna 12 mm	12mm	1,3

1,00 m^3

Typ prvku Malta se žáruvzdorným pojivem, nelehčená, PVA vlákna	Označení prvku Vzorek 1-x	Váha [kg]
Gorkál 50		119,62
Voda		55,08
Šamot	0-1 mm	119,62
	1-2 mm	239,24
PVA vlákna 12 mm	12mm	0,31

0,00423 m^3

Typ prvku Malta s H-Cementem, nelehčená, PVA vlákna	Označení prvku Vzorek 2-x	Váha [g]
H-cement		506
Voda		187
Šamot	0-1 mm	506
	1-2 mm	1012
PVA vlákna	12 mm	1,3

1,00 m^3

Typ prvku Malta se žáruvzdorným pojivem, nelehčená, PVA vlákna	Označení prvku Vzorek 1-x	Váha [kg]
H-cement		119,62
Voda		44,21
Šamot	0-1 mm	119,62
	1-2 mm	239,24
PVA vlákna 12 mm	12mm	0,31

0,00423 m^3

Typ prvku Malta s hlinitanovým cementem, lehčená ex. perlitem	Označení prvku Vzorek 3-x	Váha [g]
Gorkál 50		305
Voda		282
Ex. Perlit	0-1 mm	38,8
	1-2 mm	51,3

1,00 m^3

Typ prvku Malta se žáruvzdorným pojivem, nelehčená, PVA vlákna	Označení prvku Vzorek 1-x	Váha [kg]
Gorkál 50		72,10
Voda		66,67
Ex. Perlit	0-1 mm	9,17
	1-2 mm	12,13

0,00423 m^3

Typ prvku Malta s H-Cementem, lehčená ex. erlitem	Označení prvku Vzorek 4-x	Váha [g]
H-cement		305
Voda		235
Plastifiátor Stachema		4,7
Ex. Perlit	0-1 mm	38,8
	1-2 mm	51,3

1,00 m^3

Typ prvku Malta se žáruvzdorným pojivem, nelehčená, PVA vlákna	Označení prvku Vzorek 1-x	Váha [kg]
H-cement		72,10
Voda		55,56
Plastifiátor Stachema		1,11
Ex. Perlit	0-1 mm	9,17
	1-2 mm	12,13

0,00423 m^3

Typ prvku Malta s H-Cementem, lehčená ex. erlitem	Označení prvku Vzorek 5-x	Váha [g]
H-cement		305
Voda		235
Plastifiátor Stachema		4,7
Ex. Perlit	0-1 mm	38,8
	1-2 mm	51,3
Čedičová vlákna	12,6 mm	0,725

1,00 m^3

Typ prvku Malta s H-Cementem, lehčená ex. erlitem	Označení prvku Vzorek 5-x	Váha [kg]
H-cement		72,10
Voda		55,56
Plastifiátor Stachema		1,11
Ex. Perlit	0-1 mm	9,17
	1-2 mm	12,13
Čedičová vlákna	12,6 mm	0,17

PŘÍLOHA Č. 2 – ROZMĚRY VYROBENÝCH VZORKŮ

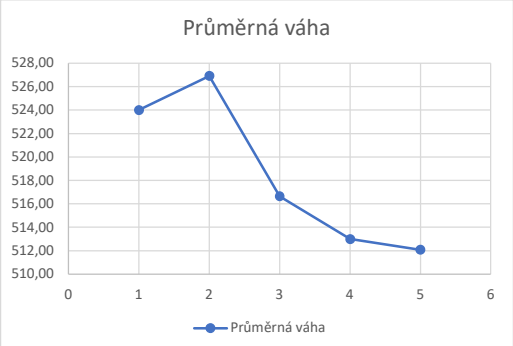
Typ prvku Hlinitanov+šamot+PVA (3 dny)	Označení prvku	Váha [g]	Rozměr 1 [mm]	Rozměr 2 [mm]	Rozměr 3 [mm]	Rozměr [mm]	Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-1	523,58	39,56	39,94	40,12	39,87	2051,73
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-2	535,56	40,56	40,02	40,36	40,31	2075,77
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-3	547,17	40,48	40,91	40,42	40,60	2105,62
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-4	518,91	40,17	40,10	40,67	40,31	2011,24
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-5	525,58	39,80	40,44	40,07	40,10	2047,76
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-6	520,14	40,32	39,92	40,14	40,13	2025,38
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-7	522,50	39,80	39,59	39,94	39,78	2052,48
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-8	510,45	40,25	39,46	40,08	39,93	1997,44
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-9	512,08	42,21	39,69	40,46	40,79	1961,73

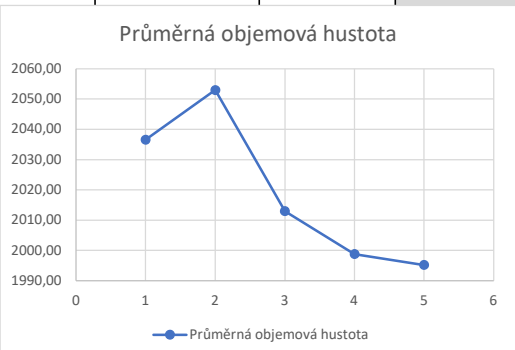
Typ prvku Hlinitanov+šamot+PVA (14 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Rozměr 1 [mm]	Rozměr 2 [mm]	Rozměr 3 [mm]	Rozměr [mm]	Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-1	526,83	40,48	40,03	40,19	40,23	2045,99
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-2	538,22	40,46	39,64	40,27	40,12	2095,96
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-3	549,87	40,12	40,34	40,53	40,33	2130,35
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-4	521,96	39,98	40,18	39,92	40,03	2037,55
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-5	528,69	39,86	40,50	40,07	40,14	2057,82
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-6	523,24	40,02	40,20	40,11	40,11	2038,30
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-7	525,24	39,71	39,83	39,86	39,80	2062,03
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-8	513,34	40,43	39,52	40,00	39,98	2006,07
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-9	514,84	39,74	40,23	40,52	40,16	2002,92

Typ prvku Hlinitanov+šamot+PVA (17 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Pokles hmotnosti [g]	Pokles hmotnosti [%]			Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-1	516,46	10,37	2,0%	-	-	2005,72
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-2	528,69	9,53	1,8%	-	-	2058,85
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-3	540,78	9,09	1,7%	-	-	2095,14
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-4	511,35	10,61	2,0%	-	-	1996,13
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-5	518,59	10,10	1,9%	-	-	2018,51
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-6	512,42	10,82	2,1%	-	-	1996,15
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-7	514,93	10,31	2,0%	-	-	2021,55
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-8	502,48	10,86	2,1%	-	-	1963,63
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-9	504,06	10,78	2,1%	-	-	1960,98

Typ prvku Hlinitanov+šamot+PVA (21dní)	Označení prvku	Váha [g]	Pokles hmotnosti [g]	Pokles hmotnosti [%]			Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-1	512,73	3,73	0,7%	-	-	1991,24
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-2	525,01	3,68	0,7%	-	-	2044,52
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-3	536,50	4,28	0,8%	-	-	2078,56
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-4	507,70	3,65	0,7%	-	-	1981,88
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-5	514,80	3,79	0,7%	-	-	2003,76
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-6	508,89	3,53	0,7%	-	-	1982,40
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-7	511,25	3,68	0,7%	-	-	2007,11
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-8	499,29	3,19	0,6%	-	-	1951,16
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-9	500,84	3,22	0,6%	-	-	1948,45

Typ prvku Hlinitanov+šamot+PVA (23dní)	Označení prvku	Váha [g]	Pokles hmotnosti [g]	Pokles hmotnosti [%]			Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-1	511,77	0,96	0,2%	-	-	1987,51
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-2	523,94	1,07	0,2%	-	-	2040,35
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-3	535,02	1,48	0,3%	-	-	2072,82
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-4	506,87	0,83	0,2%	-	-	1978,64
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-5	513,69	1,11	0,2%	-	-	1999,44
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-6	508,18	0,71	0,1%	-	-	1979,63
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-7	510,42	0,83	0,2%	-	-	2003,85
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-8	498,70	0,59	0,1%	-	-	1948,86
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-9	500,13	0,71	0,1%	-	-	1945,69





Hlinitanov+šamot+PVA

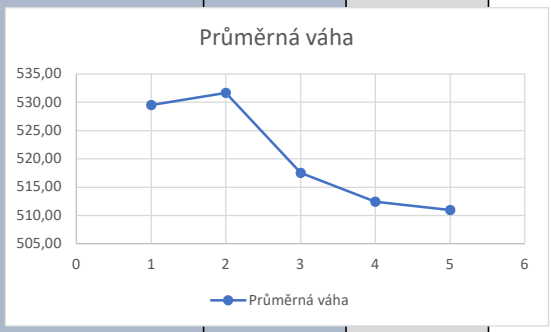
Typ prvku H-Cement+šamot+PVA (3 dny)	Označení prvku	Váha [g]	Rozměr 1 [mm]	Rozměr 2 [mm]	Rozměr 3 [mm]	Rozměr [mm]	Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-1	539,89	40,08	40,03	40,16	40,09	2104,21
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-2	535,22	39,71	39,63	39,92	39,75	2103,68
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-3	535,03	39,77	40,00	40,00	39,92	2093,97
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-4	495,12	40,03	39,52	39,91	39,82	1942,81
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-5	526,56	40,28	41,07	40,95	40,77	2018,19
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-6	524,65	40,67	41,13	41,05	40,95	2001,87
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-7	521,64	40,44	40,83	40,56	40,61	2007,05
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-8	552,41	40,68	41,08	41,08	40,95	2107,96
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-9	535,06	40,06	40,25	40,28	40,20	2079,85
Vzorek plechu	V2-1	3279,25					
Vzorek plechu	V2-2	3262,21					
Vzorek plechu	V2-3	3174,95					
Vzorek plechu	V2-4	3271,78					

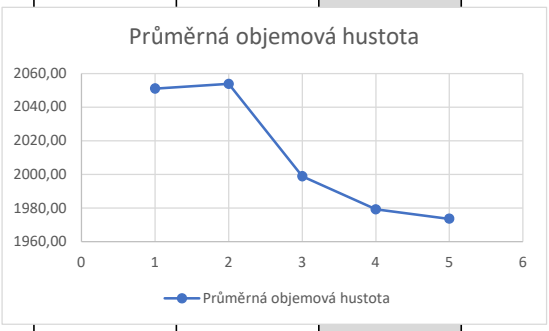
Typ prvku H-Cement+šamot+PVA (14 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Rozměr 1 [mm]	Rozměr 2 [mm]	Rozměr 3 [mm]	Rozměr [mm]	Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-1	540,93	40,34	40,09	40,54	40,32	2096,06
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-2	539,62	39,89	39,85	40,02	39,92	2112,11
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-3	536,69	40,56	40,06	39,80	40,14	2089,13
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-4	496,32	39,94	40,56	39,84	40,11	1933,27
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-5	527,77	40,10	41,25	40,46	40,60	2030,97
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-6	527,63	40,66	41,18	40,89	40,91	2015,21
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-7	524,81	40,61	41,35	40,56	40,84	2007,87
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-8	553,68	40,36	41,11	40,92	40,80	2120,58
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-9	537,58	40,27	40,42	40,54	40,41	2078,62
Vzorek plechu	V2-1	3281,39					
Vzorek plechu	V2-2	3263,71					
Vzorek plechu	V2-3	3175,52					
Vzorek plechu	V2-4	3273,49					

Typ prvku H-Cement+šamot+PVA (17 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Pokles hmotnosti [g]	Pokles hmotnosti [%]			Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-1	527,58	13,35	2,5%	-	-	2044,33
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-2	525,10	14,52	2,7%	-	-	2055,28
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-3	524,24	12,45	2,3%	-	-	2040,67
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-4	480,35	15,97	3,2%	-	-	1871,07
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-5	513,45	14,32	2,7%	-	-	1975,86
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-6	511,59	16,04	3,0%	-	-	1953,95
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-7	508,72	16,09	3,1%	-	-	1946,31
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-8	540,55	13,13	2,4%	-	-	2070,29
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-9	525,72	11,86	2,2%	-	-	2032,76
Vzorek plechu	V2-1	3254,63	26,76	0,8%			
Vzorek plechu	V2-2	3229,75	33,96	1,0%			
Vzorek plechu	V2-3	3139,32	36,20	1,1%			
Vzorek plechu	V2-4	3240,79	32,70	1,0%			

Typ prvku H-Cement+šamot+PVA (21 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Pokles hmotnosti [g]	Pokles hmotnosti [%]			Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-1	522,83	4,75	0,9%	-	-	2025,93
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-2	519,68	5,42	1,0%	-	-	2034,07
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-3	519,42	4,82	0,9%	-	-	2021,91
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-4	475,35	5,00	1,0%	-	-	1851,59
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-5	508,39	5,06	1,0%	-	-	1956,39
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-6	506,18	5,41	1,1%	-	-	1933,28
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-7	503,59	5,13	1,0%	-	-	1926,69
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-8	535,41	5,14	1,0%	-	-	2050,60
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-9	520,86	4,86	0,9%	-	-	2013,97
Vzorek plechu	V2-1	3242,75	11,88	0,4%			
Vzorek plechu	V2-2	3216,56	13,19	0,4%			
Vzorek plechu	V2-3	3125,99	13,33	0,4%			
Vzorek plechu	V2-4	3228,02	12,77	0,4%			

Typ prvku H-Cement+šamot+PVA (23 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Pokles hmotnosti [g]	Pokles hmotnosti [%]			Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-1	521,44	1,39	0,3%	-	-	2020,54
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-2	518,03	1,65	0,3%	-	-	2027,61
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-3	517,86	1,56	0,3%	-	-	2015,84
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-4	474,04	1,31	0,3%	-	-	1846,49
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-5	506,93	1,46	0,3%	-	-	1950,77
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-6	504,65	1,53	0,3%	-	-	1927,44
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-7	502,22	1,37	0,3%	-	-	1921,45
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-8	533,83	1,58	0,3%	-	-	2044,55
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-9	519,38	1,48	0,3%	-	-	2008,24
Vzorek plechu	V2-1	3238,89	3,86	0,1%			
Vzorek plechu	V2-2	3212,57	3,99	0,1%			
Vzorek plechu	V2-3	3121,93	4,06	0,1%			
Vzorek plechu	V2-4	3224,04	3,98	0,1%			





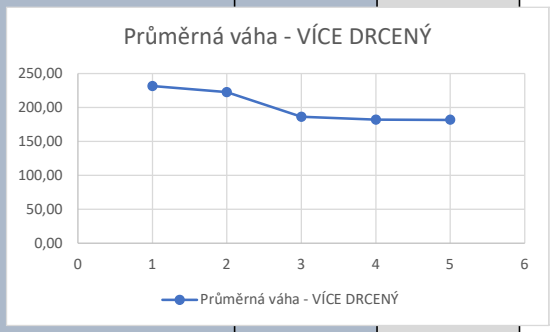
Typ prvku Hlinitan+Experlit (3 dny)	Označení prvku	Váha [g]	Rozměr 1 [mm]	Rozměr 2 [mm]	Rozměr 3 [mm]	Rozměr [mm]	Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-1	230,31	39,83	39,78	39,78	39,80	904,25
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-2	226,24	39,70	40,46	39,80	39,99	884,04
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-3	241,06	39,71	39,99	40,22	39,97	942,27
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-4	238,46	39,74	39,18	40,06	39,66	939,47
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-5	244,56	39,78	40,24	40,29	40,10	952,85
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-6	222,36	39,79	39,94	39,92	39,88	871,13
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-7	229,09	39,55	40,28	39,90	39,91	896,90
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-8	221,97	39,58	39,01	39,20	39,26	883,34
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-9	228,55	39,24	39,45	39,97	39,55	902,86
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3*-10	143,19	39,31	40,89	40,23	40,14	557,34
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3*-11	133,55	39,24	40,62	39,92	39,93	522,64
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3*-12	132,40	40,23	41,03	40,23	40,50	510,84
Vzorek plechu	V3-1	2081,23					
Vzorek plechu	V3-2	2293,14					
Vzorek plechu	V3-3	2391,98					
Vzorek plechu	V3-4	2394,13					

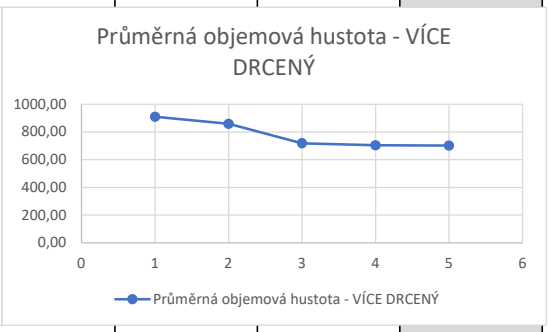
Typ prvku Hlinitan+Experlit (14 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Rozměr 1 [mm]	Rozměr 2 [mm]	Rozměr 3 [mm]	Rozměr [mm]	Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-1	221,73	39,75	39,80	39,55	39,70	872,68
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-2	217,23	39,51	41,15	40,11	40,26	843,14
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-3	232,80	39,61	40,02	40,44	40,02	908,84
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-4	224,69	39,80	39,53	39,90	39,74	883,36
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-5	236,38	39,81	40,95	40,39	40,38	914,59
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-6	215,71	40,02	39,92	59,96	46,63	722,76
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-7	219,74	39,30	40,19	39,73	39,74	863,98
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-8	214,39	39,70	39,31	39,19	39,40	850,21
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-9	218,76	39,00	39,63	39,87	39,50	865,35
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3*-10	131,30	39,57	41,53	40,58	40,56	505,81
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3*-11	124,47	39,40	40,18	40,01	39,86	487,88
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3*-12	123,39	39,90	40,80	39,83	40,18	479,87
Vzorek plechu	V3-1	2069,77					
Vzorek plechu	V3-2	2279,90					
Vzorek plechu	V3-3	2382,22					
Vzorek plechu	V3-4	2384,59					

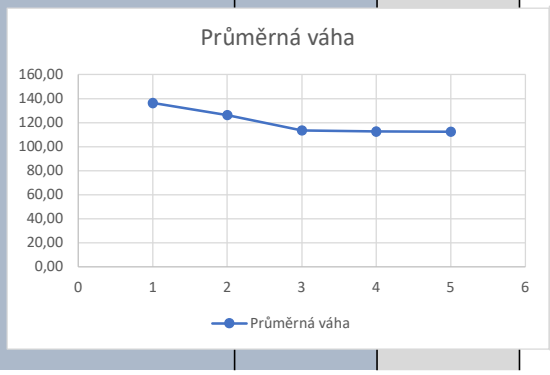
Typ prvku H-Cement+Experlit (17 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Pokles hmotnosti [g]	Pokles hmotnosti [%]			Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-1	185,83	35,90	16,2%	-	-	731,38
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-2	181,60	35,63	16,4%	-	-	704,85
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-3	192,39	40,41	17,4%	-	-	751,09
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-4	189,52	35,17	15,7%	-	-	745,09
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-5	195,48	40,90	17,3%	-	-	756,35
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-6	181,39	34,32	15,9%	-	-	607,77
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-7	184,39	35,35	16,1%	-	-	724,99
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-8	179,74	34,65	16,2%	-	-	712,80
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-9	184,52	34,24	15,7%	-	-	729,91
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3*-10	118,08	13,22	10,1%	-	-	454,88
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3*-11	111,53	12,94	10,4%	-	-	437,16
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3*-12	110,94	12,45	10,1%	-	-	431,45
Vzorek plechu	V3-1	2004,45	65,32	3,2%			
Vzorek plechu	V3-2	2171,26	108,64	4,8%			
Vzorek plechu	V3-3	2217,20	165,02	6,9%			
Vzorek plechu	V3-4	2231,19	153,40	6,4%			

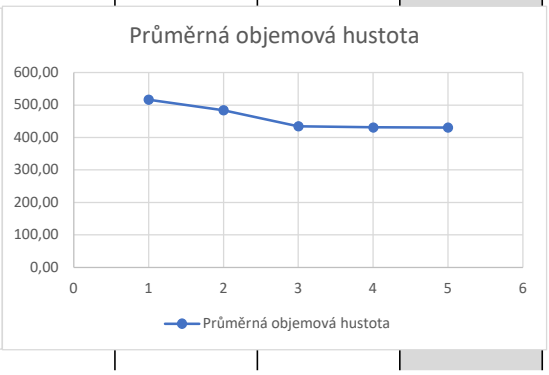
Typ prvku H-Cement+Experlit (21 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Pokles hmotnosti [g]	Pokles hmotnosti [%]			Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-1	182,11	3,72	2,0%	-	-	716,74
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-2	178,23	3,37	1,9%	-	-	691,77
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-3	187,44	4,95	2,6%	-	-	731,76
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-4	185,00	4,52	2,4%	-	-	727,32
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-5	190,21	5,27	2,7%	-	-	735,95
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-6	177,98	3,41	1,9%	-	-	596,34
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-7	180,81	3,58	1,9%	-	-	710,91
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-8	176,39	3,35	1,9%	-	-	699,52
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-9	180,66	3,86	2,1%	-	-	714,64
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3*-10	117,10	0,98	0,8%	-	-	451,11
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3*-11	110,64	0,89	0,8%	-	-	433,67
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3*-12	110,04	0,90	0,8%	-	-	427,95
Vzorek plechu	V3-1	2000,83	3,62	0,2%			
Vzorek plechu	V3-2	2162,33	8,93	0,4%			
Vzorek plechu	V3-3	2207,49	9,71	0,4%			
Vzorek plechu	V3-4	2218,03	13,16	0,6%			

Typ prvku H-Cement+Experlit (21 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Pokles hmotnosti [g]	Pokles hmotnosti [%]			Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-1	181,71	0,40	0,2%	-	-	715,17
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-2	177,87	0,36	0,2%	-	-	690,37
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-3	187,07	0,37	0,2%	-	-	730,32
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-4	184,63	0,37	0,2%	-	-	725,87
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-5	189,82	0,39	0,2%	-	-	734,45
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-6	177,61	0,37	0,2%	-	-	595,10
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-7	180,43	0,38	0,2%	-	-	709,42
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-8	176,05	0,34	0,2%	-	-	698,17
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-9	180,29	0,37	0,2%	-	-	713,17
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3*-10	116,92	0,18	0,2%	-	-	450,41
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3*-11	110,46	0,18	0,2%	-	-	432,96
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3*-12	109,85	0,19	0,2%	-	-	427,21
Vzorek plechu	V3-1	2000,19	0,64	0,03%			
Vzorek plechu	V3-2	2161,68	0,65	0,03%			
Vzorek plechu	V3-3	2206,91	0,58	0,03%			
Vzorek plechu	V3-4	2217,38	0,65	0,03%			









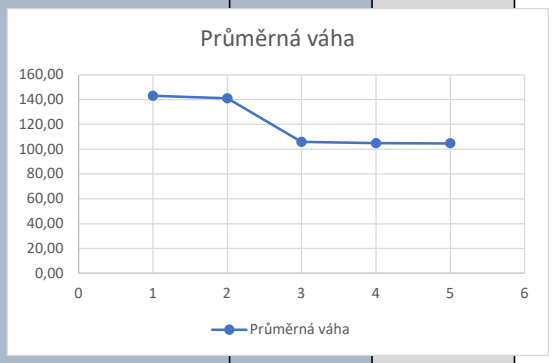
Typ prvku H-Cement+Experlit (3 dny)	Označení prvku	Váha [g]	Rozměr 1 [mm]	Rozměr 2 [mm]	Rozměr 3 [mm]	Rozměr [mm]	Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-1	131,35	38,98	38,67	39,10	38,92	527,37
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-2	130,77	39,24	39,74	40,53	39,84	512,91
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-3	137,10	39,92	39,45	40,10	39,82	537,92
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-4	147,98	39,69	39,26	40,16	39,70	582,37
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-5	149,23	39,79	40,20	39,81	39,93	583,90
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-6	157,36	40,15	40,23	40,13	40,17	612,09
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-7	146,95	39,64	40,88	40,30	40,27	570,13
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-8	147,59	40,25	40,65	38,92	39,94	577,39
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-9	138,73	39,83	39,63	39,29	39,58	547,62
Vzorek plechu	V4-1	2112,36					
Vzorek plechu	V4-2	2123,24					
Vzorek plechu	V4-3	2099,47					
Vzorek plechu	V4-4	2091,31					

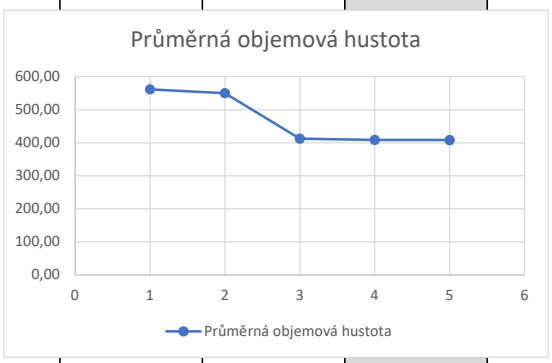
Typ prvku H-Cement+Experlit (14 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Rozměr 1 [mm]	Rozměr 2 [mm]	Rozměr 3 [mm]	Rozměr [mm]	Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-1	132,38	39,18	39,00	39,16	39,11	528,83
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-2	131,30	40,91	40,20	39,16	40,09	511,74
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-3	142,81	40,25	39,61	39,83	39,90	559,30
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-4	148,66	40,18	40,12	39,82	40,04	580,12
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-5	145,27	39,93	40,49	39,96	40,13	565,67
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-6	154,78	40,06	39,85	40,23	40,05	603,90
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-7	143,38	40,40	41,00	40,15	40,52	552,94
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-8	140,52	41,10	41,31	40,66	41,02	535,21
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-9	130,76	39,93	39,46	39,83	39,74	514,12
Vzorek plechu	V4-1	2099,22					
Vzorek plechu	V4-2	2112,71					
Vzorek plechu	V4-3	2093,38					
Vzorek plechu	V4-4	2083,60					

Typ prvku H-Cement+Experlit (17 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Pokles hmotnosti [g]	Pokles hmotnosti [%]			Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-1	97,13	35,25	26,6%	-	-	388,02
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-2	96,70	34,60	26,4%	-	-	376,89
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-3	104,80	38,01	26,6%	-	-	410,44
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-4	107,47	41,19	27,7%	-	-	419,39
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-5	109,60	35,67	24,6%	-	-	426,77
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-6	116,42	38,36	24,8%	-	-	454,24
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-7	107,93	35,45	24,7%	-	-	416,23
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-8	109,51	31,01	22,1%	-	-	417,10
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-9	102,87	27,89	21,3%	-	-	404,46
Vzorek plechu	V4-1	2005,23	93,99	4,5%			
Vzorek plechu	V4-2	2009,06	103,65	4,9%			
Vzorek plechu	V4-3	2001,32	92,06	4,4%			
Vzorek plechu	V4-4	1989,16	94,44	4,5%			

Typ prvku H-Cement+Experlit (21 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Pokles hmotnosti [g]	Pokles hmotnosti [%]			Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-1	96,71	0,42	0,4%	-	-	386,34
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-2	96,26	0,44	0,5%	-	-	375,17
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-3	103,86	0,94	0,9%	-	-	406,75
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-4	106,44	1,03	1,0%	-	-	415,37
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-5	108,53	1,07	1,0%	-	-	422,61
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-6	113,75	2,67	2,3%	-	-	443,82
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-7	106,94	0,99	0,9%	-	-	412,41
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-8	108,55	0,96	0,9%	-	-	413,45
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-9	102,31	0,56	0,5%	-	-	402,26
Vzorek plechu	V4-1	1997,87	7,36	0,4%			
Vzorek plechu	V4-2	1994,07	14,99	0,7%			
Vzorek plechu	V4-3	1989,00	12,32	0,6%			
Vzorek plechu	V4-4	1977,39	11,77	0,6%			

Typ prvku H-Cement+Experlit (23 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Pokles hmotnosti [g]	Pokles hmotnosti [%]			Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-1	96,64	0,07	0,07%	-	-	386,06
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-2	96,20	0,06	0,06%	-	-	374,94
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-3	103,77	0,09	0,09%	-	-	406,40
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-4	106,39	0,05	0,05%	-	-	415,17
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-5	108,44	0,09	0,08%	-	-	422,26
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-6	113,71	0,04	0,04%	-	-	443,66
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-7	106,90	0,04	0,04%	-	-	412,25
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-8	108,52	0,03	0,03%	-	-	413,33
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-9	102,26	0,05	0,05%	-	-	402,07
Vzorek plechu	V4-1	1997,76	0,11	0,01%			
Vzorek plechu	V4-2	1993,42	0,65	0,03%			
Vzorek plechu	V4-3	1988,98	0,02	0,00%			
Vzorek plechu	V4-4	1976,90	0,49	0,02%			





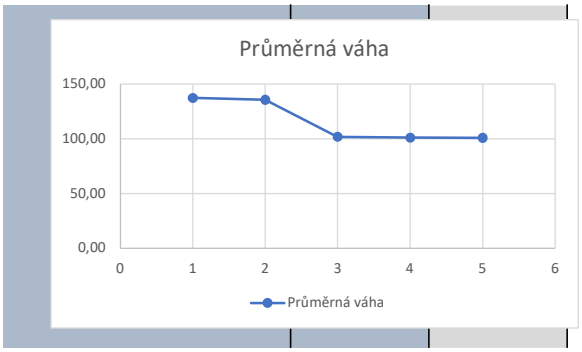
Typ prvku H-Cement+Experlit + čedič (3 dny)	Označení prvku	Váha [g]	Rozměr 1 [mm]	Rozměr 2 [mm]	Rozměr 3 [mm]	Rozměr [mm]	Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-1	138,19	39,67	39,20	39,52	39,46	547,15
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-2	135,71	40,12	39,84	40,07	40,01	529,98
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-3	134,14	39,64	40,29	40,51	40,15	522,07
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-4	139,23	39,27	40,49	39,80	39,85	545,87
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-5	147,54	40,57	39,53	40,06	40,05	575,56
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-6	136,80	40,36	39,47	39,62	39,82	536,84
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-7	136,68	39,37	39,93	39,80	39,70	537,94
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-8	131,15	39,75	39,53	40,02	39,77	515,31
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-9	135,48	40,45	39,53	40,22	40,07	528,34
Vzorek plechu	V5-1	2093,54					
Vzorek plechu	V5-2	2001,35					
Vzorek plechu	V5-3	2049,54					
Vzorek plechu	V5-4	2042,71					

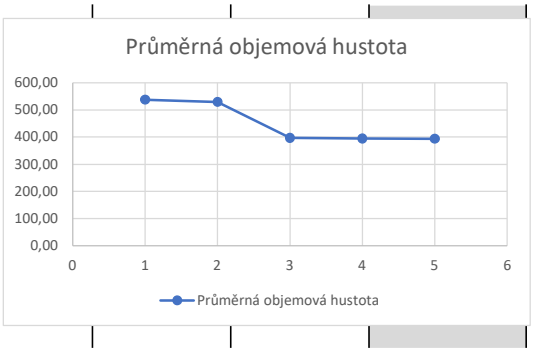
Typ prvku H-Cement+Experlit + čedič (14 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Rozměr 1 [mm]	Rozměr 2 [mm]	Rozměr 3 [mm]	Rozměr [mm]	Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-1	129,64	39,68	40,13	39,91	39,91	507,59
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-2	130,13	40,40	40,12	40,34	40,29	504,70
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-3	139,59	40,37	40,91	40,23	40,50	538,50
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-4	152,22	38,84	40,31	39,50	39,55	601,37
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-5	142,01	40,73	40,23	40,04	40,33	550,14
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-6	126,67	40,25	39,76	39,11	39,71	498,46
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-7	130,12	39,30	40,14	39,72	39,72	511,86
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-8	129,56	39,83	39,85	39,88	39,85	507,96
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-9	139,52	40,31	39,72	40,45	40,16	542,83
Vzorek plechu	V5-1	2081,09					
Vzorek plechu	V5-2	1992,54					
Vzorek plechu	V5-3	2041,15					
Vzorek plechu	V5-4	2035,85					

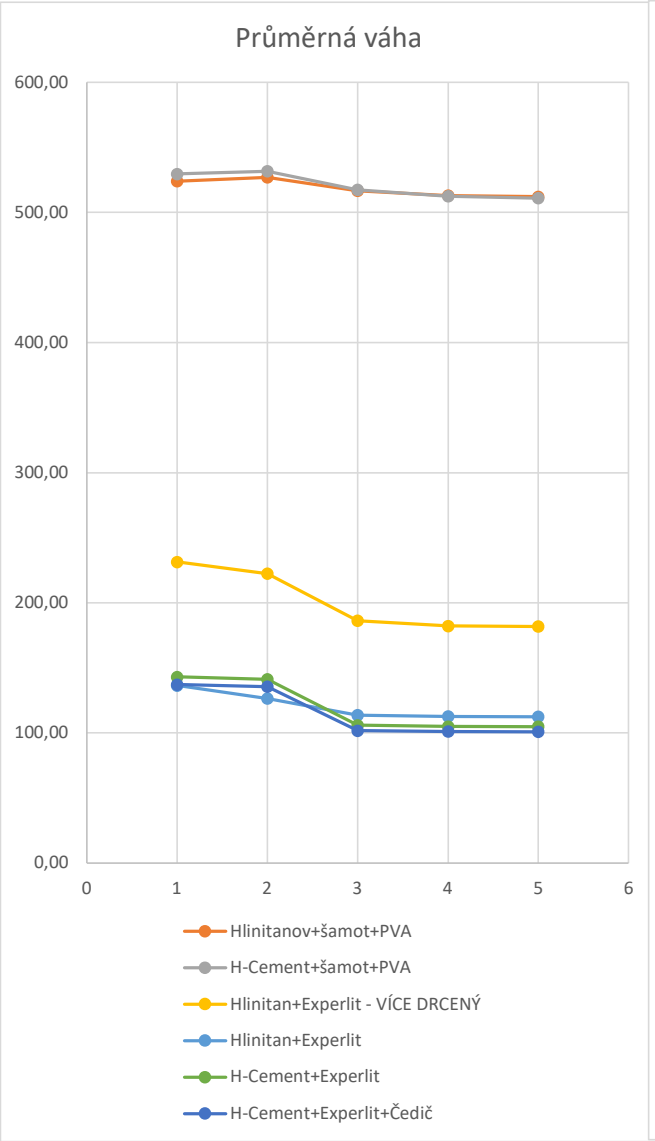
Typ prvku H-Cement+Experlit + čedič (17 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Pokles hmotnosti [g]	Pokles hmotnosti [%]			Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-1	104,00	25,64	19,8%	-	-	407,20
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-2	100,86	29,27	22,5%	-	-	391,18
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-3	100,64	38,95	27,9%	-	-	388,24
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-4	102,64	49,58	32,6%	-	-	405,50
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-5	106,73	35,28	24,8%	-	-	413,47
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-6	99,03	27,64	21,8%	-	-	389,69
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-7	100,64	29,48	22,7%	-	-	395,90
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-8	99,27	30,29	23,4%	-	-	389,20
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-9	101,80	37,72	27,0%	-	-	396,07
Vzorek plechu	V5-1	1959,03	122,06	5,9%			
Vzorek plechu	V5-2	1896,64	95,90	4,8%			
Vzorek plechu	V5-3	1947,25	93,90	4,6%			
Vzorek plechu	V5-4	1936,29	99,56	4,9%			

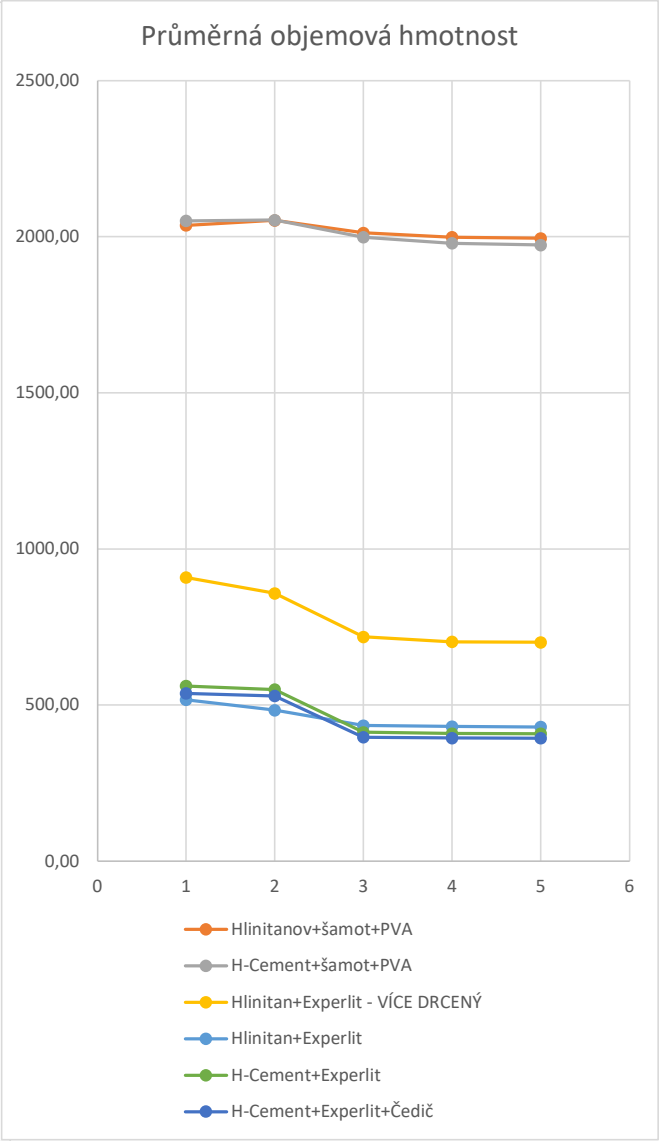
Typ prvku H-Cement+Experlit + čedič (21 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Pokles hmotnosti [g]	Pokles hmotnosti [%]			Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-1	103,22	0,78	0,8%	-	-	404,15
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-2	100,41	0,45	0,4%	-	-	389,44
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-3	100,13	0,51	0,5%	-	-	386,27
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-4	100,99	1,65	1,6%	-	-	398,98
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-5	105,80	0,93	0,9%	-	-	409,87
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-6	98,58	0,45	0,5%	-	-	387,92
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-7	100,16	0,48	0,5%	-	-	394,01
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-8	98,87	0,40	0,4%	-	-	387,63
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-9	101,23	0,57	0,6%	-	-	393,85
Vzorek plechu	V5-1	1947,04	11,99	0,6%			
Vzorek plechu	V5-2	1894,09	2,55	0,1%			
Vzorek plechu	V5-3	1932,49	14,76	0,8%			
Vzorek plechu	V5-4	1933,10	3,19	0,2%			

Typ prvku H-Cement+Experlit + čedič (23 dní)	Označení prvku	Váha [g]	Pokles hmotnosti [g]	Pokles hmotnosti [%]			Objemová hmotnost [kg/m^3]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-1	103,08	0,14	0,14%	-	-	403,60
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-2	100,35	0,06	0,06%	-	-	389,20
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-3	100,05	0,08	0,08%	-	-	385,96
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-4	100,07	0,92	0,91%	-	-	395,35
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-5	105,76	0,04	0,04%	-	-	409,71
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-6	98,55	0,03	0,03%	-	-	387,80
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-7	100,11	0,05	0,05%	-	-	393,81
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-8	98,82	0,05	0,05%	-	-	387,44
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-9	101,18	0,05	0,05%	-	-	393,66
Vzorek plechu	V5-1	1946,27	0,77	0,04%			
Vzorek plechu	V5-2	1893,82	0,27	0,01%			
Vzorek plechu	V5-3	1932,26	0,23	0,01%			
Vzorek plechu	V5-4	1932,16	0,94	0,05%			


Průměrná váha
150,00
100,00
50,00
0,00
0
1
2
3
4
5
6
Průměrná váha


Průměrná objemová hustota
600,00
500,00
400,00
300,00
200,00
100,00
0,00
0
1
2
3
4
5
6
Průměrná objemová hustota


Průměrná váha
600,00
500,00
400,00
300,00
200,00
100,00
0,00
0
1
2
3
4
5
6
Hlinitanov+šamot+PVA
H-Cement+šamot+PVA
Hlinitan+Experlit - VÍCE DRCENÝ
Hlinitan+Experlit
H-Cement+Experlit
H-Cement+Experlit+Čedič


Průměrná objemová hmotnost
2500,00
2000,00
1500,00
1000,00
500,00
0,00
0
1
2
3
4
5
6
Hlinitanov+šamot+PVA
H-Cement+šamot+PVA
Hlinitan+Experlit - VÍCE DRCENÝ
Hlinitan+Experlit
H-Cement+Experlit
H-Cement+Experlit+Čedič

PŘÍLOHA Č. 3 – PEVNOSTI ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Typ prvku Hlinitanov+šamot+PVA	Označení prvku	Váha [g]	Rozměr [mm]	Objemová hmotnost [kg/m3]		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-1	511,77	40,23	1987,51		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-2	523,94	40,12	2040,35		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-3	535,02	40,33	2072,82		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-4	506,87	40,03	1978,64		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-5	513,69	40,14	1999,44		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-6	508,18	40,11	1979,63		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-7	510,42	39,80	2003,85		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-8	498,70	39,98	1948,86		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-9	500,13	40,16	1945,69		
			Typ zkoušky	Maximální síla [kN]	Něpětí [MPa]	Napětí průměrné [MPa]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-1		Tříbodový ohyb	2,19	6,10	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-2			3,16	8,84	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-3			3,24	8,96	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-4			3,08	8,65	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-5			3,35	9,36	8,15
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-6			2,75	7,70	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-7			3,20	9,09	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-8			2,46	6,91	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	1-9			2,77	7,72	

Typ prvku H-Cement+šamot+PVA	Označení prvku	Váha [g]	Rozměr [mm]	Objemová hmotnost [kg/m3]		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-1	521,44	40,09	2020,54		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-2	518,03	39,75	2027,61		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-3	517,86	39,92	2015,84		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-4	474,04	39,82	1846,49		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-5	506,93	40,77	1950,77		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-6	504,65	40,95	1927,44		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-7	502,22	40,61	1921,45		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-8	533,83	40,95	2044,55		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-9	519,38	40,20	2008,24		

			Typ zkoušky	Maximální síla [kN]	Nèpětí [MPa]	Napětí průměrné [MPa]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-1			3,10	8,67	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-2			2,84	8,10	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-3			3,02	8,53	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-4			2,74	7,76	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-5		Tříbodový ohyb	3,09	8,36	8,35
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-6			3,22	8,65	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-7			2,47	6,74	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-8			3,13	8,41	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	2-9			3,56	9,92	

Typ prvku Hlinitan+Experlit	Označení prvku	Váha [g]	Rozměr [mm]	Objemová hmotnost [kg/m3]		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-1	181,71	39,70	715,17		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-2	177,87	40,26	690,37		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-3	187,07	40,02	730,32		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-4	184,63	39,74	725,87	436,86	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-5	189,82	40,38	734,45		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-6	177,61	46,63	595,10		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-7	180,43	39,74	709,42		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-8	176,05	39,40	698,17		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-9	180,29	39,50	713,17		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-10	116,92	40,56	450,41		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-11	110,46	39,86	432,96		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-12	109,85	40,18	427,21		

			Typ zkoušky	Maximální síla [kN]	Nèpětí [MPa]	Napětí průměrné [MPa]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-1		Tříbodový ohyb	0,38	1,10	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-2			0,38	1,04	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-3			0,34	0,95	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-4			0,41	1,17	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-5			0,33	0,91	0,98
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-6			0,45	0,94	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-7			0,29	0,83	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-8			0,30	0,87	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-9			0,35	1,02	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-10			0,16	0,43	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-11			0,14	0,38	0,39
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-12			0,13	0,36	

			Typ zkoušky	Maximální síla [kN]	Nèpětí [MPa]	Napětí průměrné [MPa]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-1-1		Tlak	6,19	3,90	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-1-2			5,47	3,44	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-2-1			5,68	3,53	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-2-2			4,66	2,90	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-3-1			5,78	3,61	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-3-2			5,41	3,38	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-4-1			5,83	3,67	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-4-2			5,59	3,52	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-5-1			5,89	3,64	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-5-2			5,83	3,61	3,40
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-6-1			6,30	3,38	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-6-2			4,87	2,61	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-7-1			5,62	3,53	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-7-2			5,07	3,19	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-8-1			4,90	3,11	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-8-2			5,17	3,28	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-9-1			4,43	2,80	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-9-2			6,52	4,13	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-10-1			1,04	0,64	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-10-2			1,81	1,12	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-11-1			1,53	0,96	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-11-2			1,05	0,66	0,85
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-12-1			0,95	0,59	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	3-12-2			1,86	1,16	

Typ prvku H-Cement+Experlit	Označení prvku	Váha [g]	Rozměr [mm]	Objemová hmotnost [kg/m3]		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-1	96,64	39,11	386,06		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-2	96,20	40,09	374,94		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-3	103,77	39,90	406,40		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-4	106,39	40,04	415,17		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-5	108,44	40,13	422,26		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-6	113,71	40,05	443,66		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-7	106,90	40,52	412,25	408,46	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-8	108,52	41,02	413,33		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-9	102,26	39,74	402,07		
			Typ zkoušky	Maximální síla [kN]	Něpětí [MPa]	Napětí průměrné [MPa]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-1		Tříbodový ohyb	0,08	0,24	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-2			0,09	0,25	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-3			0,07	0,20	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-4			0,13	0,37	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-5			0,11	0,30	0,32
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-6			0,15	0,43	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-7			0,15	0,40	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-8			0,16	0,42	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-9			0,10	0,29	
			Typ zkoušky	Maximální síla [kN]	Něpětí [MPa]	Napětí průměrné [MPa]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-1-1		Tlak	0,66	0,42	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-1-2			0,54	0,34	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-2-1			0,65	0,41	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-2-2			0,85	0,53	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-3-1			0,54	0,34	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-3-2			0,81	0,51	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-4-1			0,94	0,59	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-4-2			1,25	0,78	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-5-1			1,06	0,66	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-5-2			0,90	0,56	0,61
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-6-1			1,34	0,84	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-6-2			1,73	1,08	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-7-1			1,22	0,75	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-7-2			1,01	0,63	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-8-1			1,19	0,73	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-8-2			1,12	0,68	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-9-1			1,00	0,63	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	4-9-2			0,68	0,43	

Typ prvku H-Cement+Experlit + čedič	Označení prvku	Váha [g]	Rozměr [mm]	Objemová hmotnost [kg/m3]		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-1	103,08	39,91	403,60		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-2	100,35	40,29	389,20		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-3	100,05	40,50	385,96		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-4	100,07	39,55	395,35		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-5	105,76	40,33	409,71		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-6	98,55	39,71	387,80		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-7	100,11	39,72	393,81		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-8	98,82	39,85	387,44		
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-9	101,18	40,16	393,66		

			Typ zkoušky	Maximální síla [kN]	Něpětí [MPa]	Napětí průměrné [MPa]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-1			0,11	0,30	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-2			0,12	0,34	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-3			0,11	0,30	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-4			0,14	0,39	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-5		Tříbodový ohyb	0,13	0,35	0,34
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-6			0,15	0,42	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-7			0,09	0,25	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-8			0,12	0,35	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-9			0,12	0,33	

			Typ zkoušky	Maximální síla [kN]	Něpětí [MPa]	Napětí průměrné [MPa]
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-1-1			0,83	0,52	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-1-2			1,07	0,67	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-2-1			1,05	0,65	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-2-2			1,12	0,69	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-3-1			0,86	0,53	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-3-2			1,02	0,63	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-4-1			1,08	0,68	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-4-2			0,73	0,46	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-5-1		Tlak	1,73	1,07	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-5-2			1,16	0,72	0,67
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-6-1			0,80	0,51	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-6-2			1,16	0,73	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-7-1			0,86	0,54	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-7-2			1,01	0,64	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-8-1			1,27	0,80	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-8-2			0,97	0,61	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-9-1			1,17	0,73	
Trámeček 40 × 40 × 160 mm	5-9-2			1,29	0,80	

PŘÍLOHA Č. 4 – KÓD FDS A VÝSTUPY

ZDROJOVÝ KÓD PRO VÝPOČETV FSD-

*** Obecné informace o modelu ***

&HEAD

CHID='FDS refmodel',

TITLE='simulace referenční zkoušky'/

*** Čas simulace a výpočetní oblast ***

&TIME T_END=1800.0/ čas simulace 1800

DUMP DT_RESTART=30.0/ ukládání simulace po 30 sekundách

&MESH

ID='sit'

IJK=24,16,16,

XB=0.0,1.2,0.0,0.8,0.0,0.8/ vnitřní výpočetní síť,

velikost jedné buňky 50x50x50 mm

*** Povrch a materiál požárně odolné desky Farmacell Powerpanel ***

&SURF

ID='STENA'

MATL_ID='FARMACELL'

COLOR='GRAY'

THICKNESS=0.0125/ SURF=surface,

tloušťka 12,5 mm (0,0125 m)

&MATL

ID='FARMACELL'

DENSITY=1000.0,

SPECIFIC_HEAT=1.0

CONDUCTIVITY=0.17/ MATL=materiál,

hustota (kg/m3),

specifické teplo (J/(kg.K)),

souč. tepelné vodivosti "lambda" (W/(m.K))

*** Otvory (OPEN = otevřená plocha)***

&VENT

XB=0.4,0.8,0.0,0.0,0.0,0.1

SURF_ID='OPEN'/ otvor pro přívod vzduchu - boční 1 (400x100 mm)

&VENT

XB=0.4,0.8,0.8,0.8,0.0,0.1

SURF_ID='OPEN'/ otvor pro přívod vzduchu - boční 2 (400x100 mm)

&VENT

XB=0.4,0.8,0.0,0.0,0.55,0.65

SURF_ID='OPEN'/ otvor pro odvod kouře - boční 1 (400x100 mm)

&VENT

XB=0.4,0.8,0.8,0.8,0.55,0.65

SURF_ID='OPEN'/ otvor pro odvod kouře - boční 2 (400x100 mm)

*** Hořák (OBST=obstruction) ***

&REAC

ID='PROPANE'

FUEL='PROPANE'

C=3.0

H=8.1

SOOT_YIELD=0.024/ definice reakční hořící látky,

tj. propanu (plynový hořák)

&SURF

ID='HORAK'

HRRPUA=6666.666667

RAMP_Q='fireramp'/ maximální výkon hořáku = 200 kW,

HRRPUA=200/(0,3.0,1)=6666.666667 kW/m2

&VENT

XB=0.45,0.75,0.35,0.45,0.1,0.1

SURF_ID='HORAK'

COLOR='RED'/ hořící plocha hořáku

&OBST

XB=0.45,0.75,0.35,0.45,0.0,0.1

SURF_ID='INERT'

COLOR='BLACK'/ těleso hořáku

&RAMP ID = 'fireramp', T = 0.0, F = 0.0 / časově proměnlivý výkon,T = čas (s),F = % podíl v příslušném čase

&RAMP ID = 'fireramp', T = 3.0, F = 0.3 /

&RAMP ID = 'fireramp', T = 5.0, F = 0.3 /

&RAMP ID = 'fireramp', T = 10.0, F = 0.3 /

&RAMP ID = 'fireramp', T = 15.0, F = 0.305 /

&RAMP ID = 'fireramp', T = 20.0, F = 0.310 /

&RAMP ID = 'fireramp', T = 25.0, F = 0.315 /

&RAMP ID = 'fireramp', T = 30.0, F = 0.320 /

&RAMP ID = 'fireramp', T = 35.0, F = 0.330 /

&RAMP ID = 'fireramp', T = 40.0, F = 0.350 /

&RAMP ID = 'fireramp', T = 45.0, F = 0.360 /

&RAMP ID = 'fireramp', T = 50.0, F = 0.370 /

&RAMP ID = 'fireramp', T = 55.0, F = 0.380 /

&RAMP ID = 'fireramp', T = 60.0, F = 0.390 /

```
&RAMP ID = 'fireramp', T = 90.0, F = 0.400 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 120.0, F = 0.43 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 150.0, F = 0.44 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 180.0, F = 0.45 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 210.0, F = 0.46 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 240.0, F = 0.48 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 270.0, F = 0.50 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 300.0, F = 0.52 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 330.0, F = 0.53 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 360.0, F = 0.55 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 390.0, F = 0.56 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 420.0, F = 0.56 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 450.0, F = 0.565 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 480.0, F = 0.570 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 510.0, F = 0.575 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 540.0, F = 0.580 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 570.0, F = 0.585 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 600.0, F = 0.587 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 630.0, F = 0.590 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 660.0, F = 0.595 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 690.0, F = 0.598 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 720.0, F = 0.600 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 750.0, F = 0.605/
&RAMP ID = 'fireramp', T = 780.0, F = 0.610 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 810.0, F = 0.615/
&RAMP ID = 'fireramp', T = 840.0, F = 0.620 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 870.0, F = 0.625 /
```

```
&RAMP ID = 'fireramp', T = 900.0, F = 0.630 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 930.0, F = 0.633 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 960.0, F = 0.635 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 990.0, F = 0.638 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1020.0, F = 0.64 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1050.0, F = 0.642 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1080.0, F = 0.643 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1110.0, F = 0.644 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1140.0, F = 0.6442 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1170.0, F = 0.6445 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1200.0, F = 0.645 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1230.0, F = 0.65 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1260.0, F = 0.662 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1290.0, F = 0.665 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1320.0, F = 0.6655 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1350.0, F = 0.667/
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1380.0, F = 0.67 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1410.0, F = 0.68 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1440.0, F = 0.685 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1470.0, F = 0.686/
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1500.0, F = 0.687 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1530.0, F = 0.688 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1560.0, F = 0.689 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1590.0, F = 0.690/
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1620.0, F = 0.701 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1650.0, F = 0.702 /
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1680.0, F = 0.703 /
```

```
&RAMP ID = 'fireramp', T = 1710.0, F = 0.704 /

&RAMP ID = 'fireramp', T = 1740.0, F = 0.705 /

&RAMP ID = 'fireramp', T = 1770.0, F = 0.706 /

&RAMP ID = 'fireramp', T = 1800.0, F = 0.707 /


*** VZORKY ***

&OBST

XB=0.1,0.32,0.14,0.28,0.758,0.8

SURF_ID='STENA'

COLOR='PINK'/ Vzorek 1

&OBST

XB=0.1,0.32,0.52,0.66,0.758,0.8

SURF_ID='STENA'

COLOR='PINK'/ Vzorek 2

&OBST

XB=0.88,1.1,0.14,0.28,0.758,0.8

SURF_ID='STENA'

COLOR='PINK'/ Vzorek 3

&OBST

XB=0.88,1.1,0.52,0.66,0.758,0.8

SURF_ID='STENA'

COLOR='PINK'/ Vzorek 4


*** Termočlánky (°C) ***

&DEVC

XYZ = 0.3,0.2,0.7

QUANTITY ='THERMOCOUPLE'
```

```
ID = 'TC 1'
PROP_ID='TC_1 props'/ Nad hořákem - horní TC
&DEVC
XYZ = 0.3,0.6,0.7
QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
ID = 'TC_2'
PROP_ID='TC_2 props'/ Nad hořákem - horní TC
&DEVC
XYZ = 0.9, 0.2,0.7
QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
ID = 'TC_3'
PROP_ID='TC_3 props'/ Nad hořákem - horní TC
&DEVC
XYZ = 0.9,0.6,0.7
QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
ID = 'TC_4'
PROP_ID='TC_4 props'/ Nad hořákem - horní TC
&DEVC
XYZ = 0.3,0.2,0.25
QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
ID = 'TC_5'
PROP_ID='TC_5 props'/ Nad hořákem - dolní TC
&DEVC
XYZ = 0.3,0.6,0.25
QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
ID = 'TC_6'
PROP_ID='TC_6 props'/ Nad hořákem - dolní TC
```

```
&DEVC
XYZ = 0.9, 0.2, 0.25
QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
ID = 'TC_7'
PROP_ID='TC_7 props'/ Nad hořákem - dolní TC
&DEVC
XYZ = 0.9,0.6,0.25
QUANTITY = 'THERMOCOUPLE'
ID = 'TC_8'
PROP_ID='TC_8 props'/ Nad hořákem - dolní TC
&DEVC
ID='T-1'
XYZ=0.2,0.2,0.74
QUANTITY='TEMPERATURE'
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0/


&PROP ID='TC_1 props', BEAD_DIAMETER=0.003/ průměr termočlánku 3,0 mm
&PROP ID='TC_2 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_3 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_4 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_5 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_6 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_7 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
&PROP ID='TC_8 props', BEAD_DIAMETER=0.003/
```

*** Barevné iso-plochy (SLICEFile) teplotní a rychlostní pole ***

&SLCF PBX = 0.6, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./

&SLCF PBX = 1.1, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./

&SLCF PBY = 0.4, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./

&SLCF PBZ = 0.7, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./

&SLCF PBZ = 0.755, QUANTITY = 'TEMPERATURE', VECTOR = .TRUE./

&SLCF PBX = 0.6, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./

&SLCF PBX = 1.1, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./

&SLCF PBY = 0.4, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./

&SLCF PBZ = 0.7, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./

&SLCF PBZ = 0.755, QUANTITY = 'VELOCITY', VECTOR = .TRUE./

*** Hodnoty na hranici výpočetní oblasti ***

&BNDF QUANTITY ='GAUGE HEAT FLUX'/ BNDF = boundery file - dopadající tepelný tok

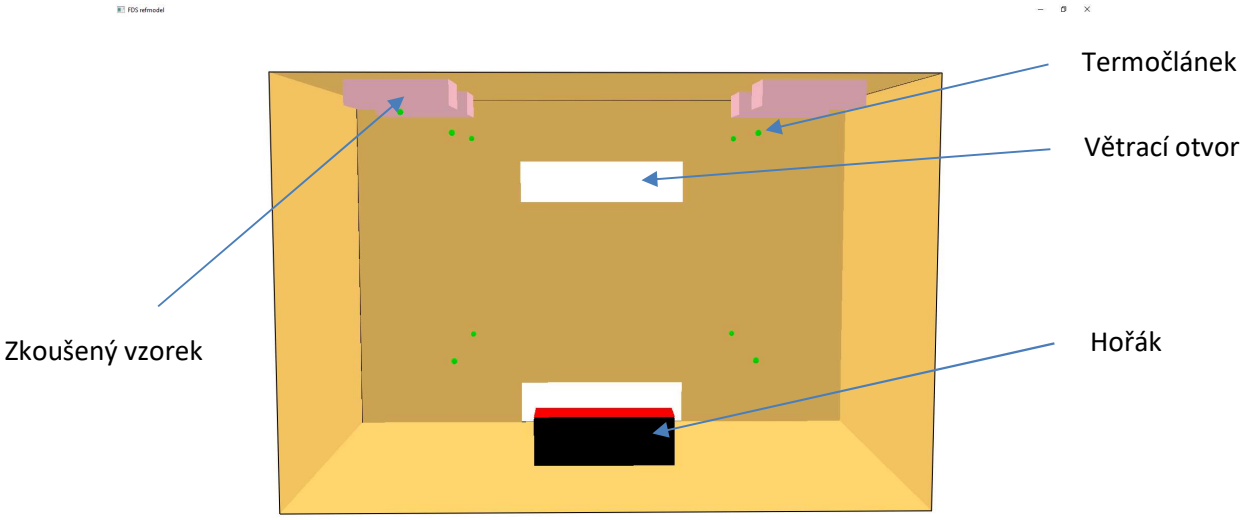
&BNDF QUANTITY ='WALL TEMPERATURE'/ teplota povrchů

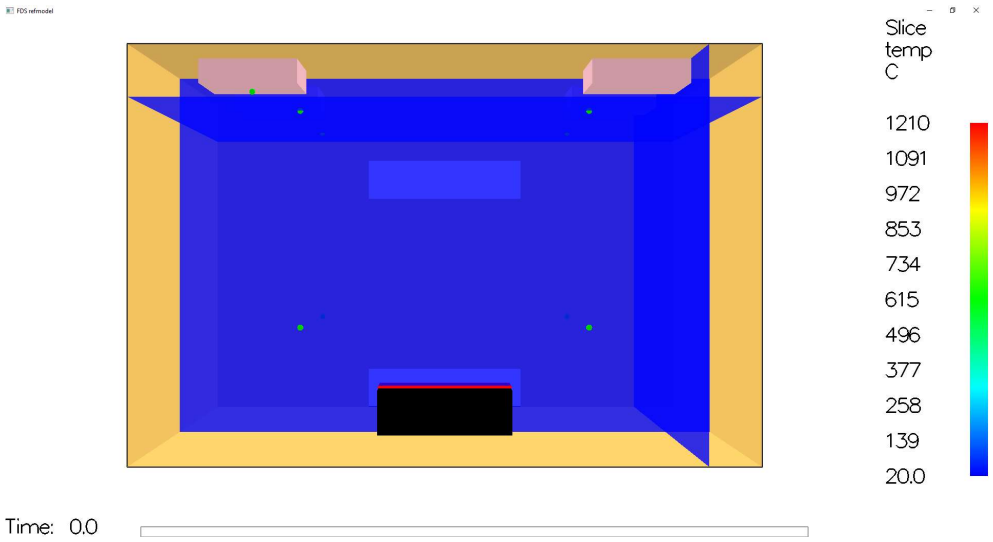
&BNDF QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE'/

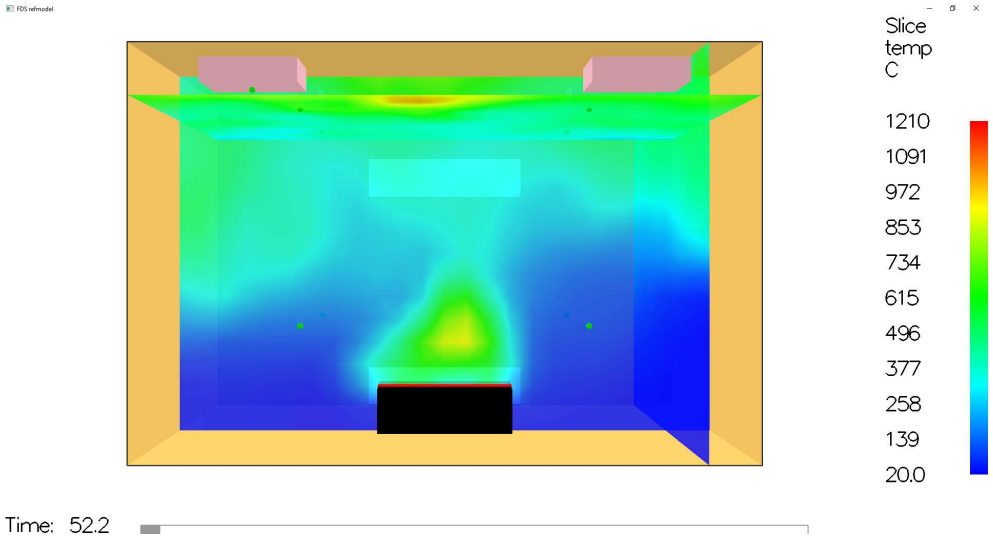
*** Konec simulace ***

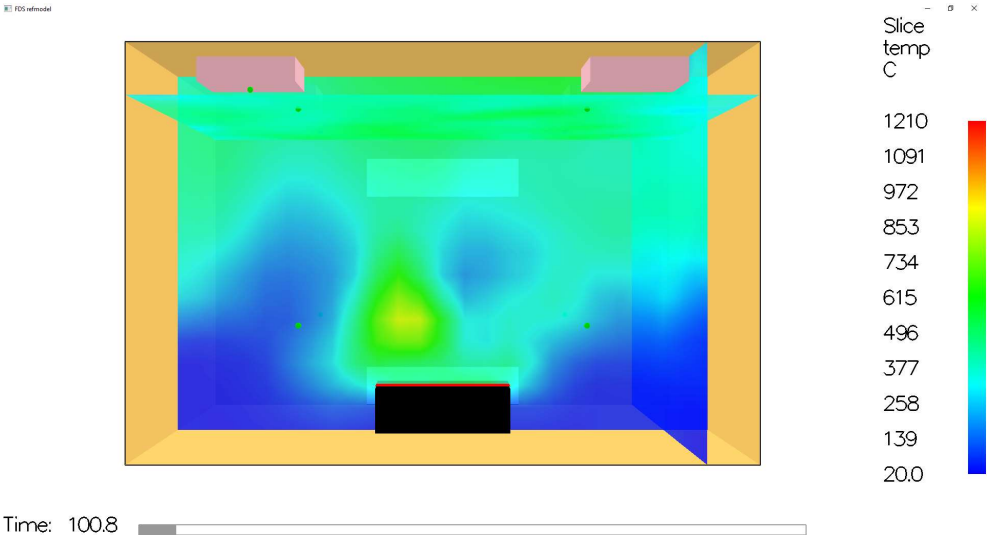
&TAIL/ konec simulace

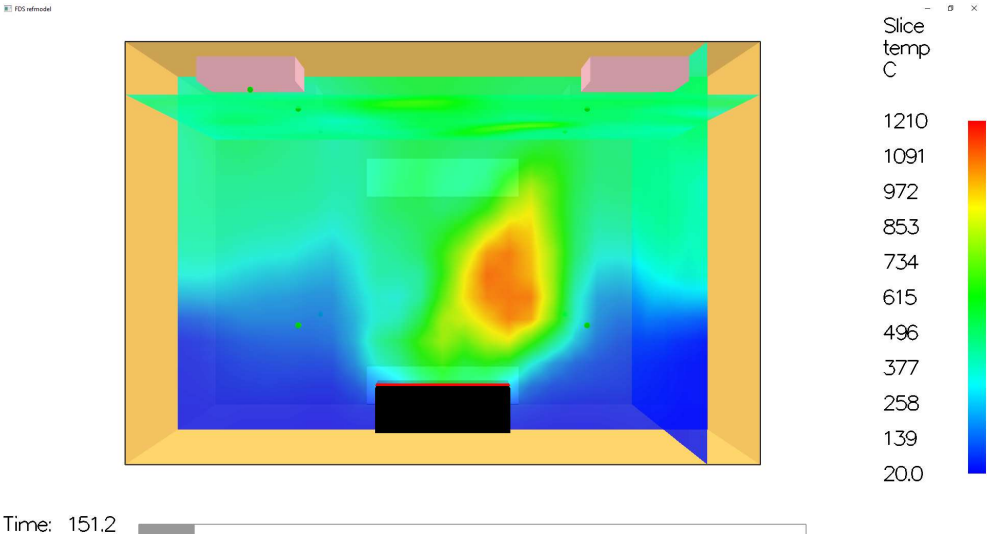
GRAFICKÝ EXPORT Z FDS

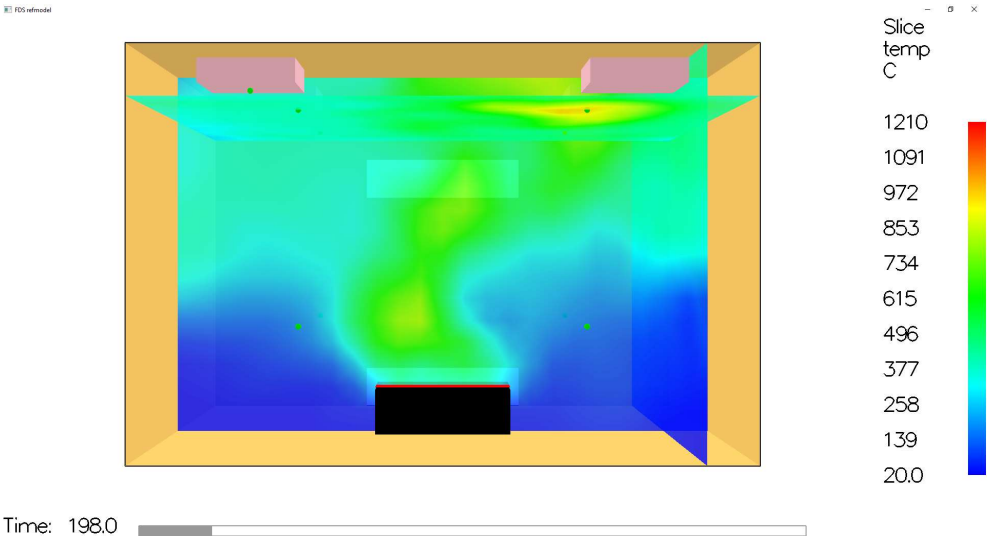


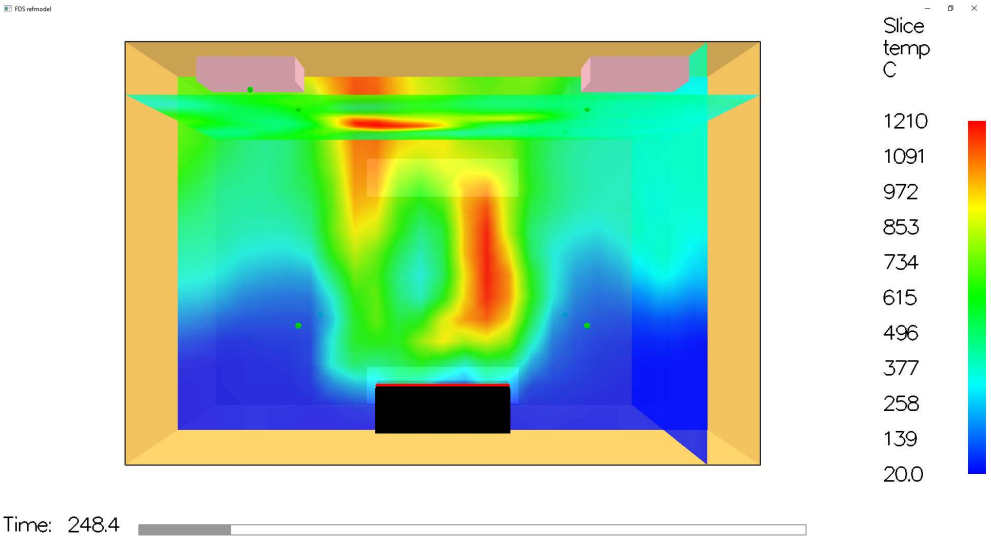


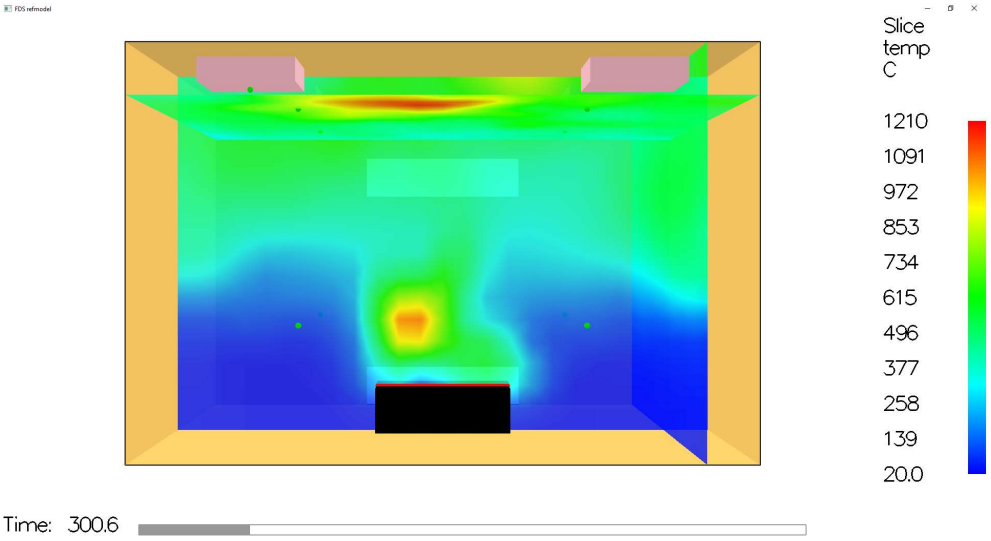


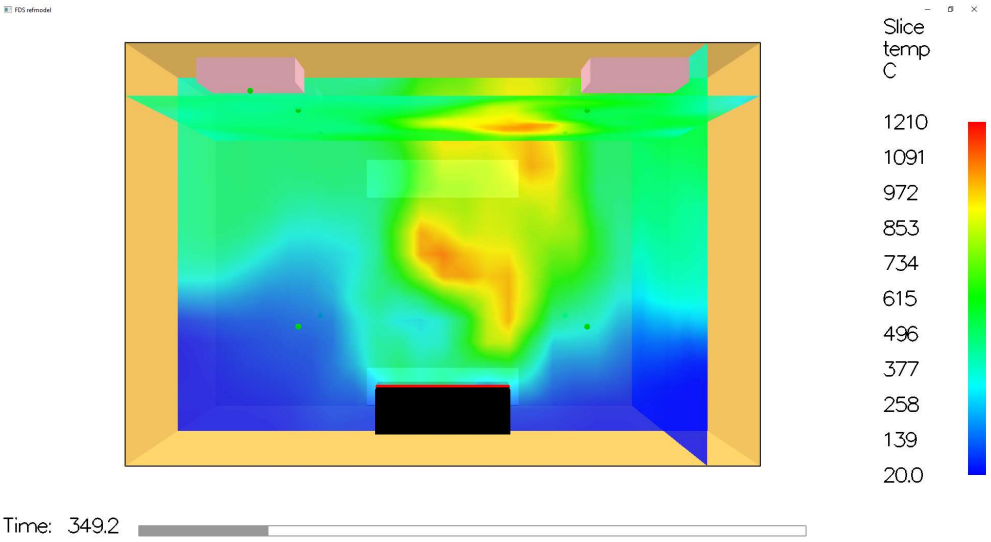

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 100.8

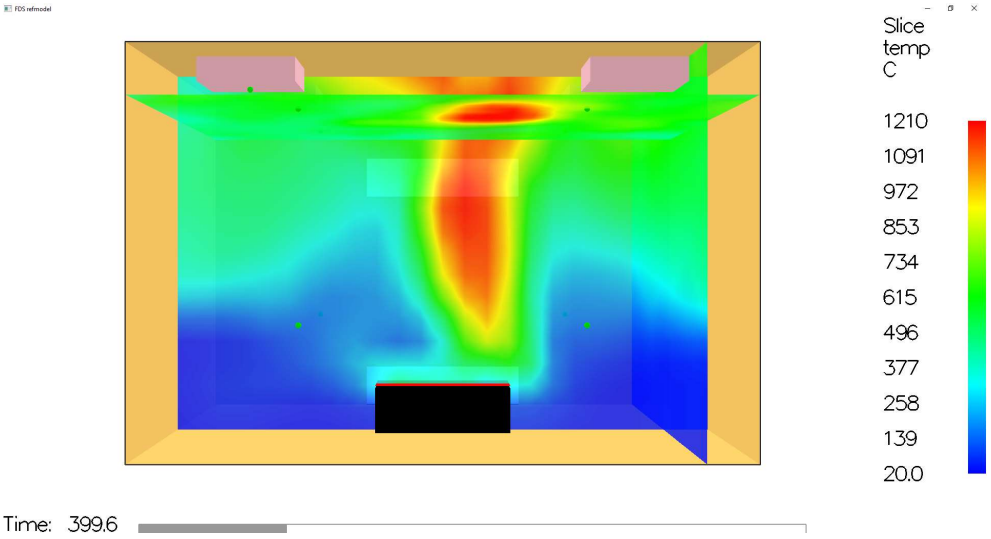

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 151.2

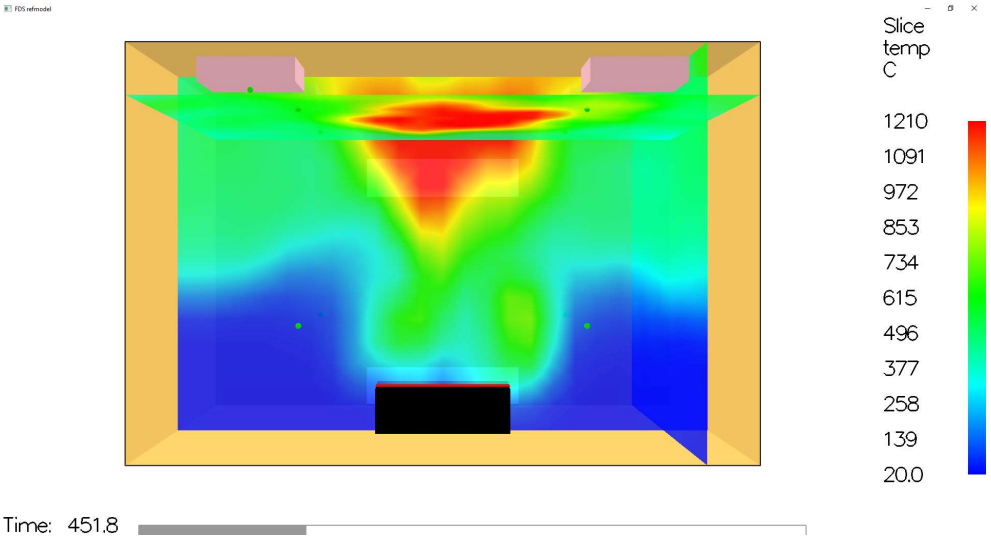

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 198.0

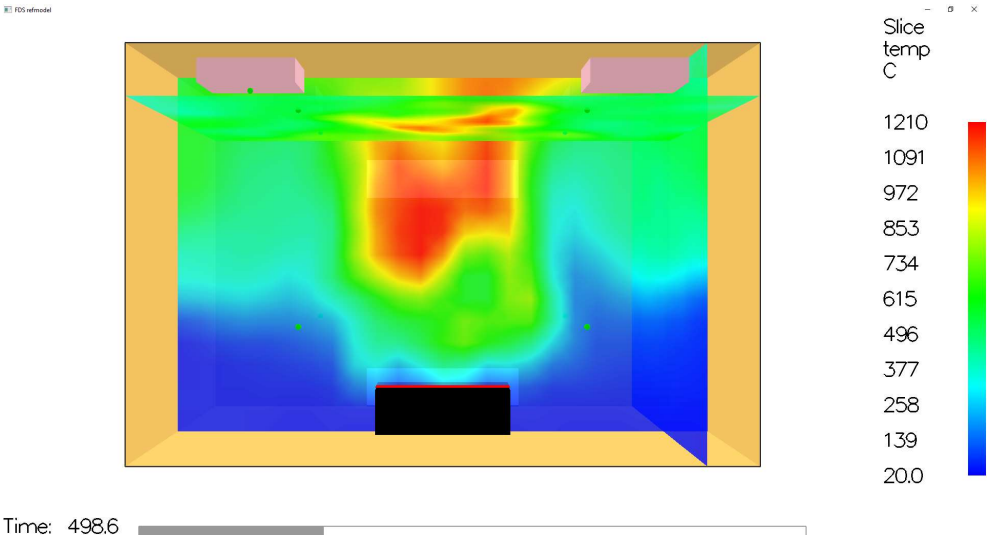

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 248.4

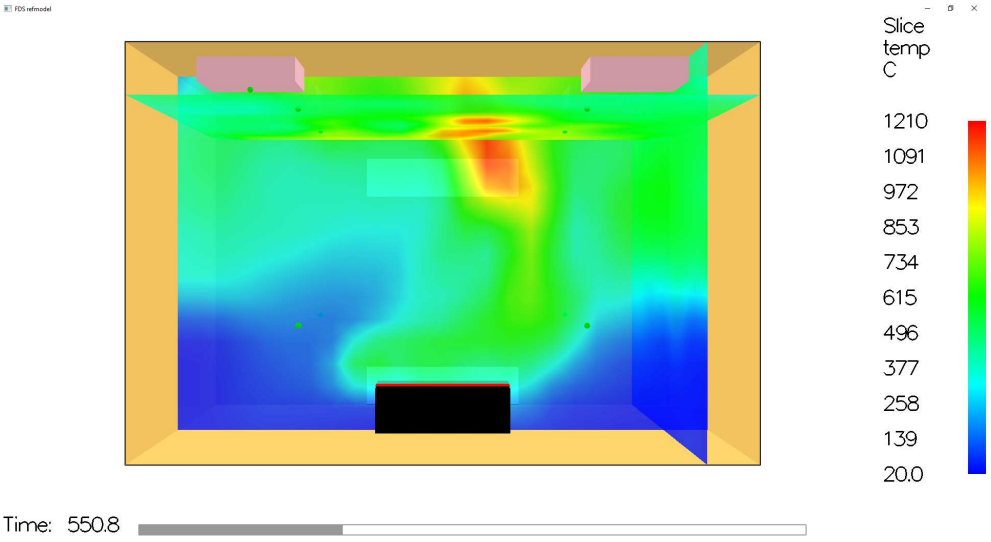

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 300.6

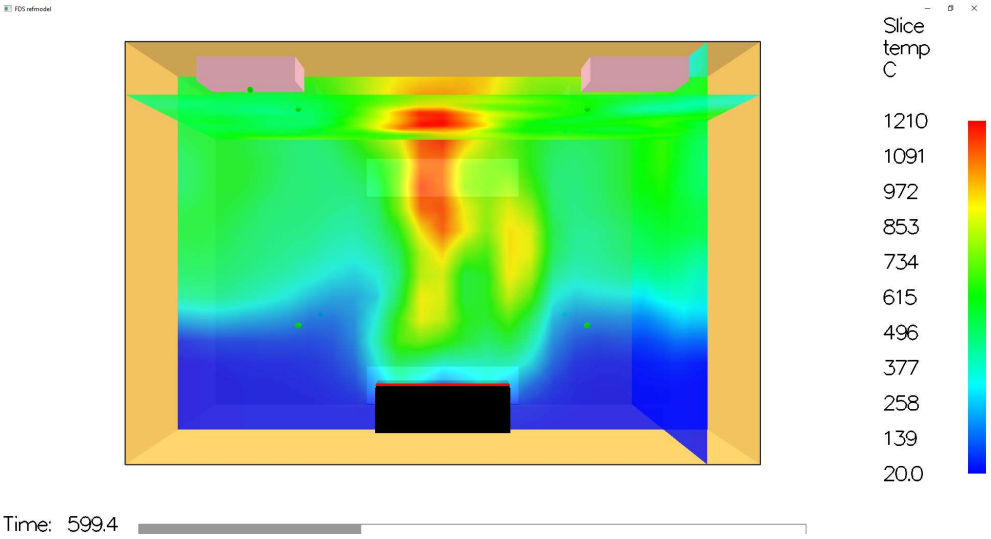

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 349.2

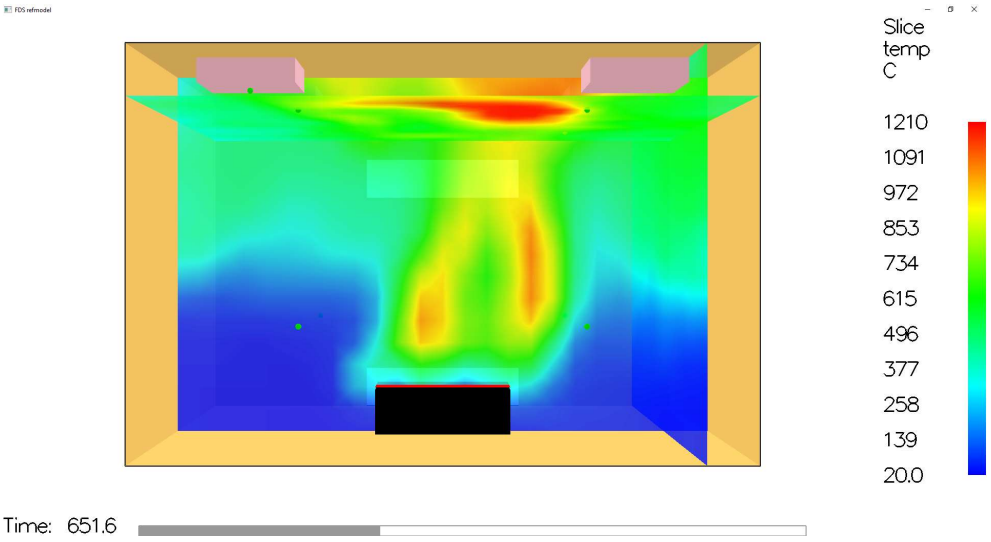

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 399.6

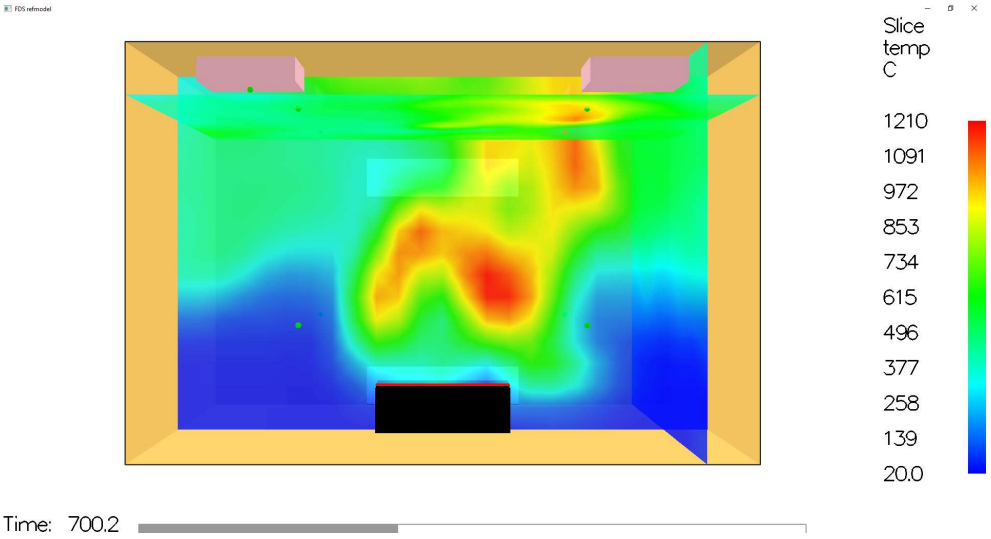

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 451.8

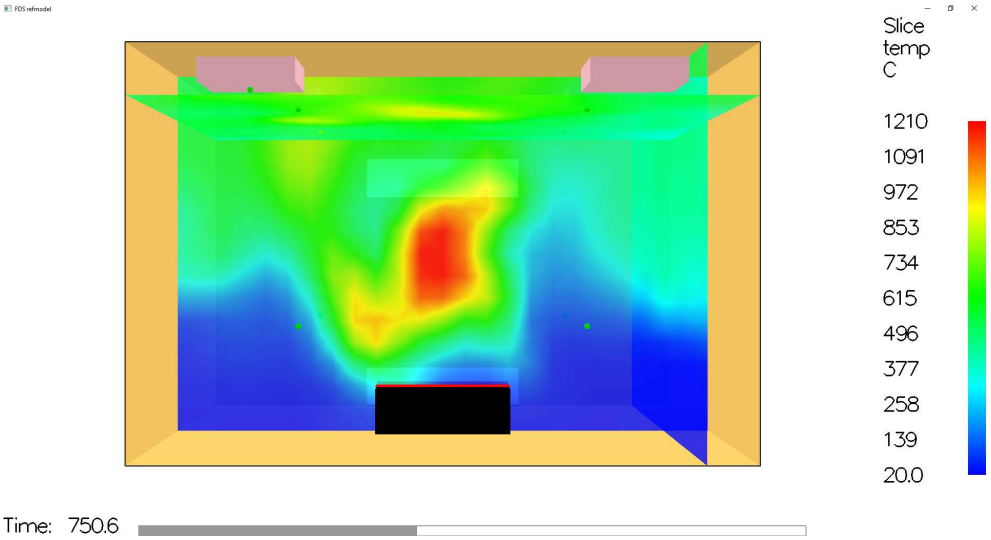

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 498.6

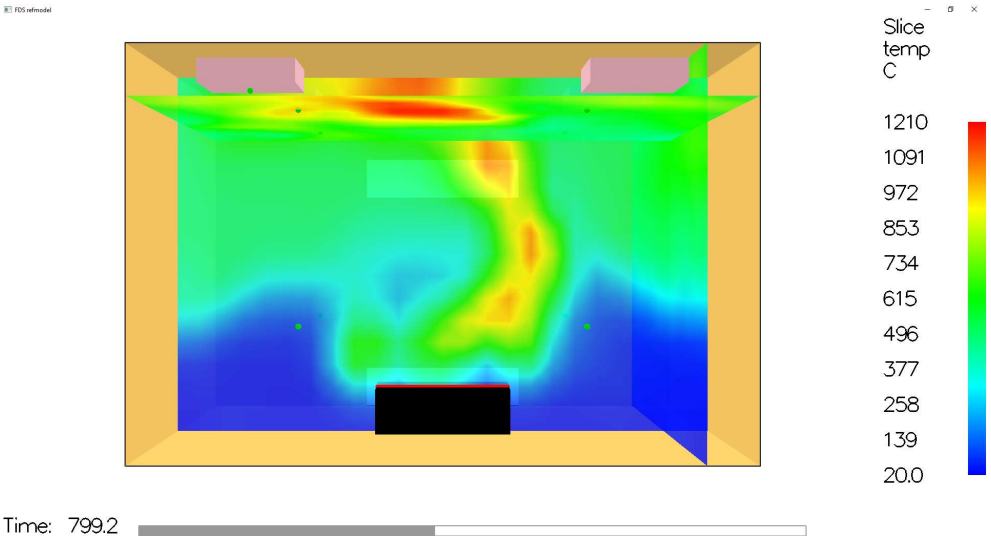

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 550.8

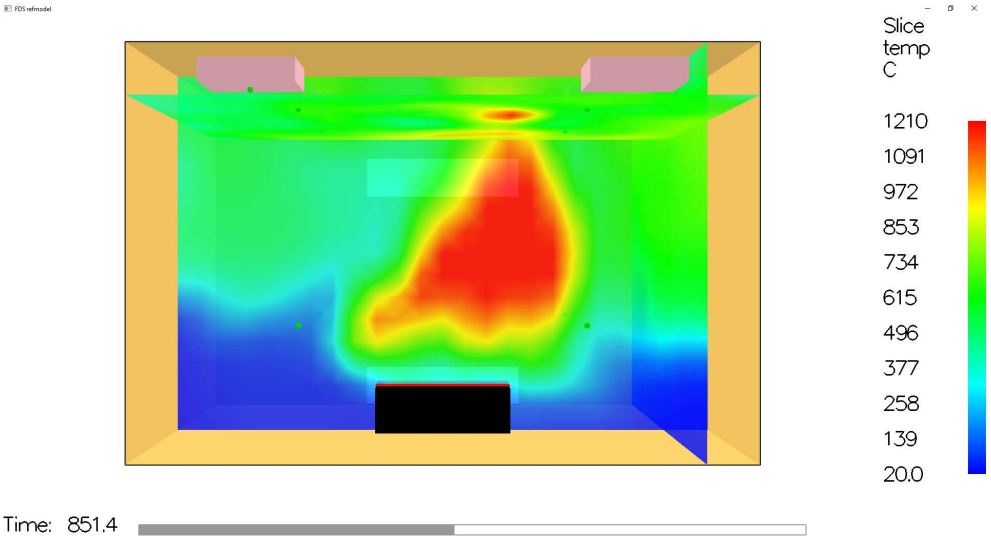

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 599.4

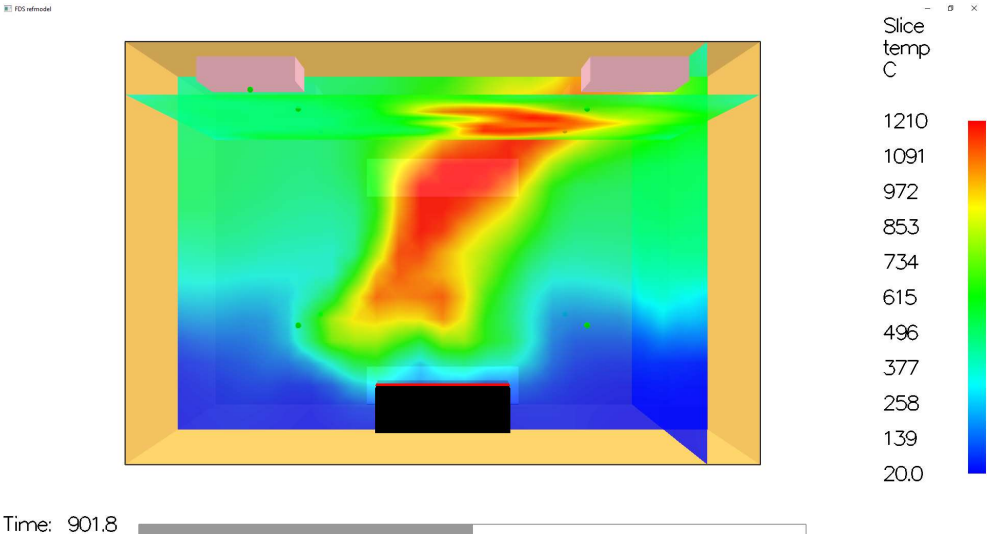

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 651.6

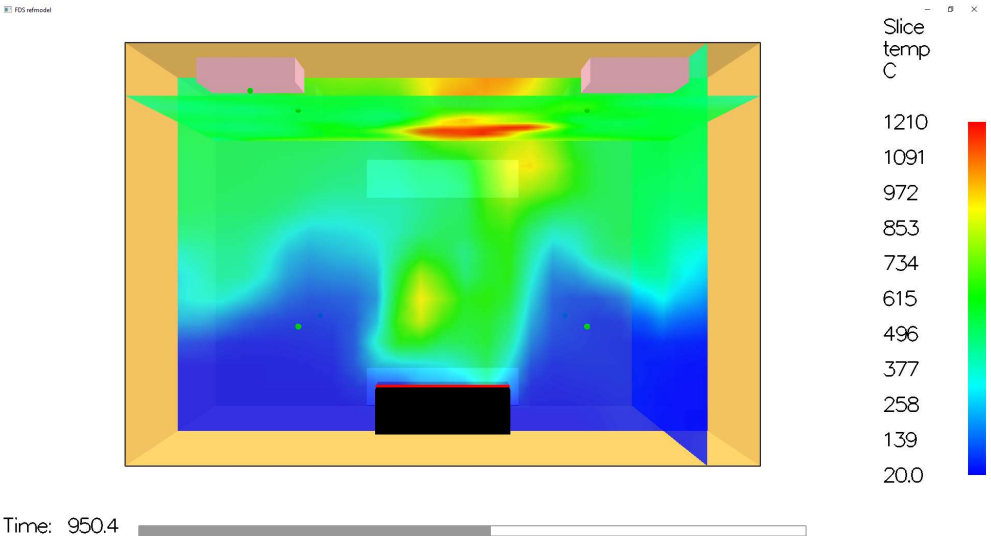

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 700.2

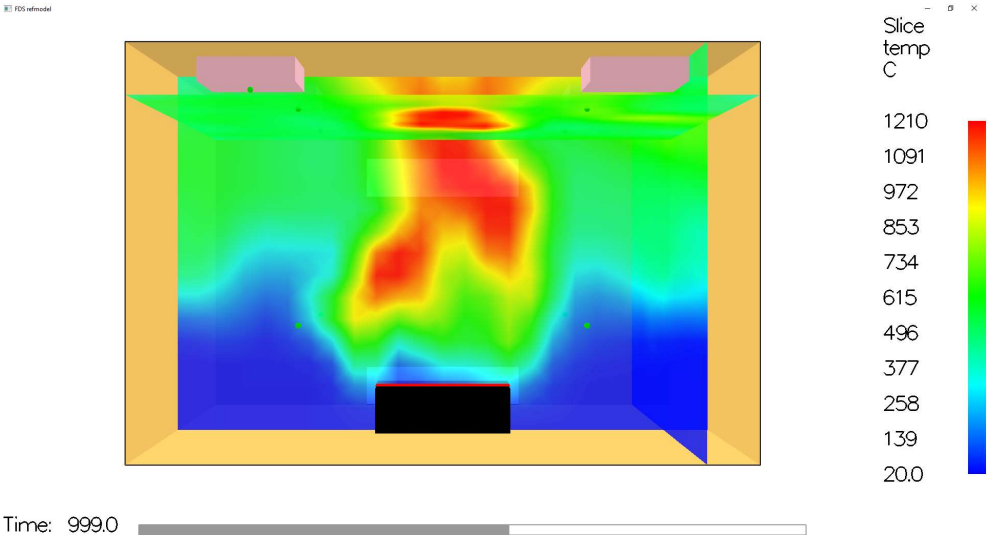

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 750.6

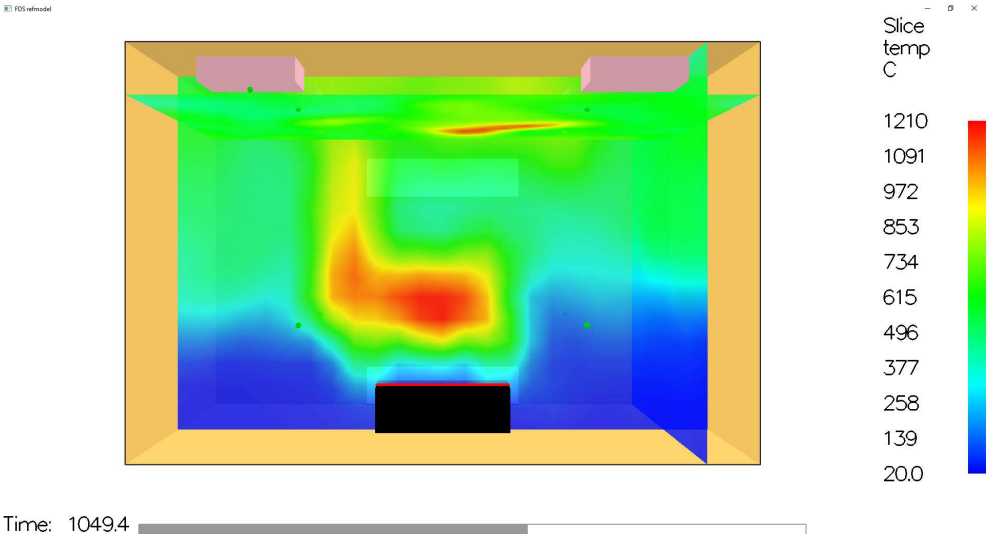

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 799.2

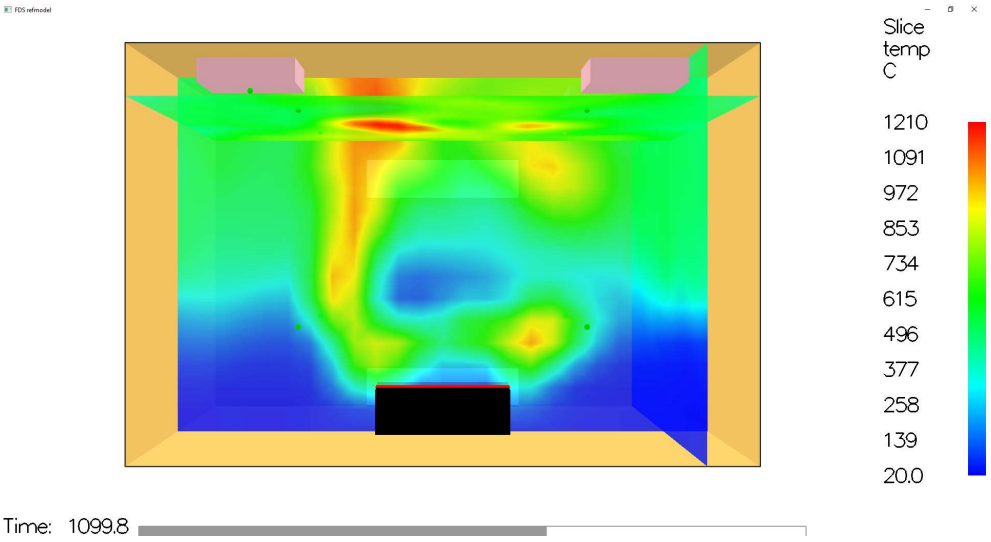

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 851.4

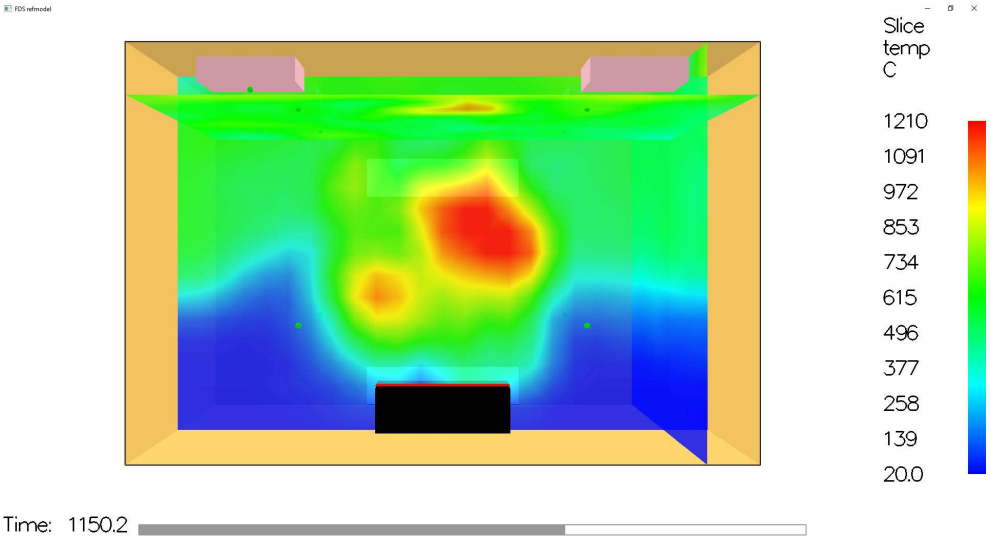

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 901.8

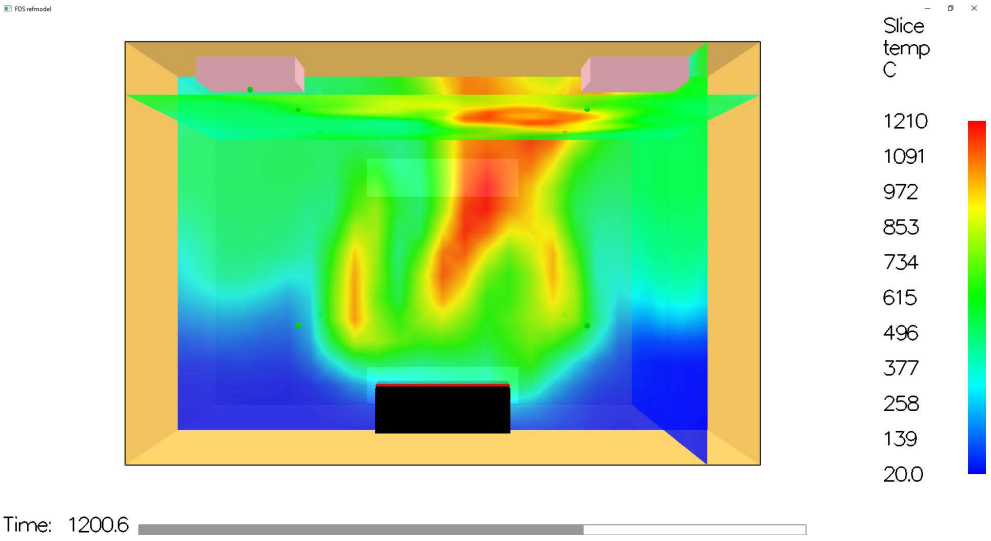

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 950.4

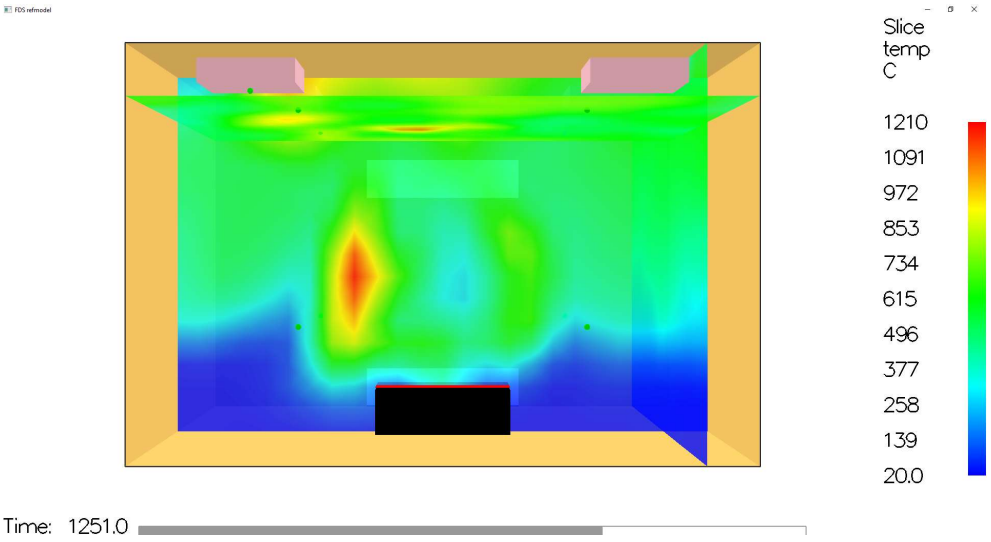

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 999.0

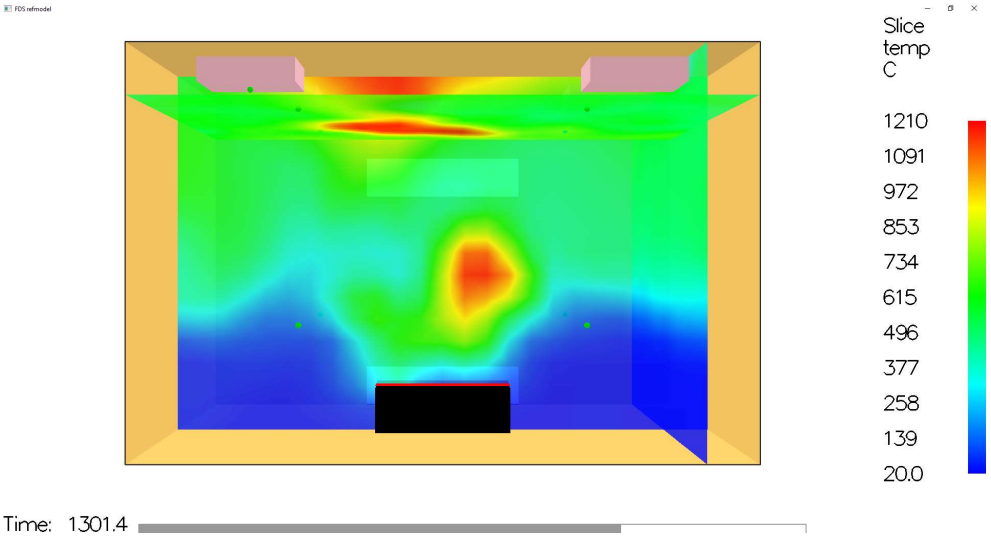

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1049.4

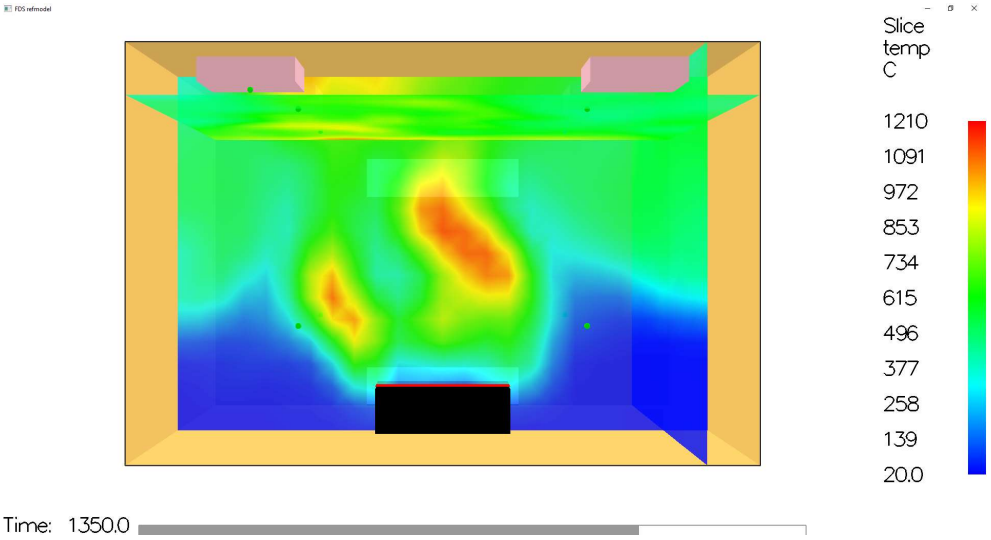

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1099.8

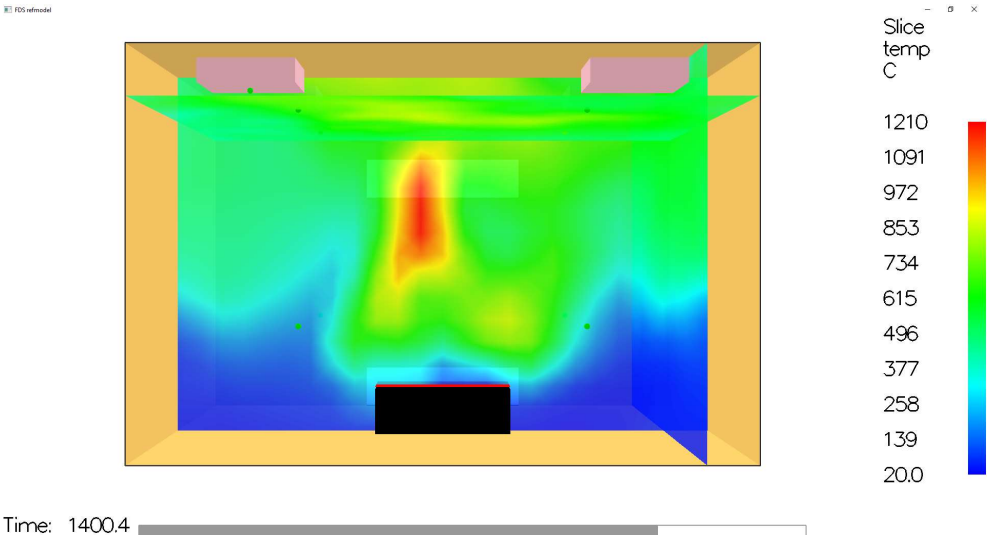

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1150.2

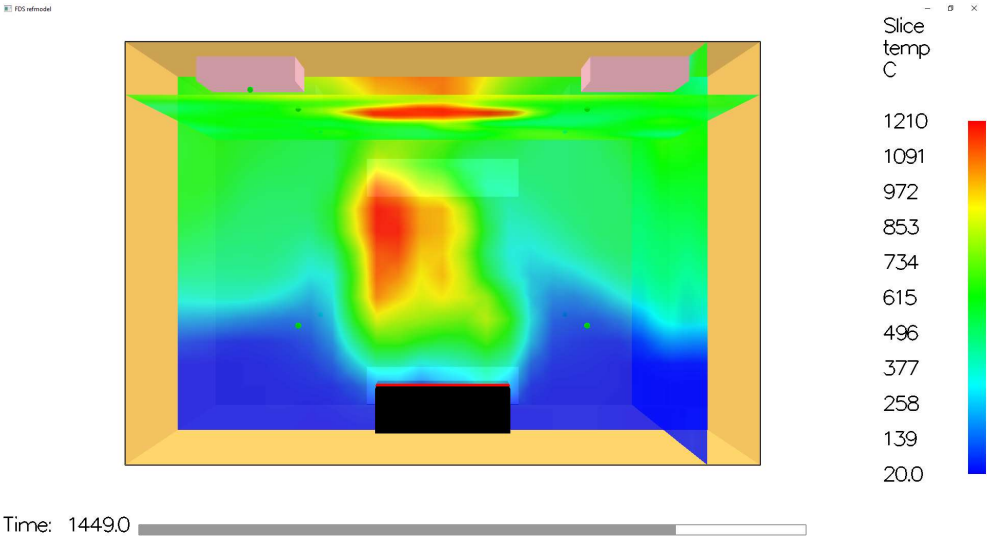

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1200.6

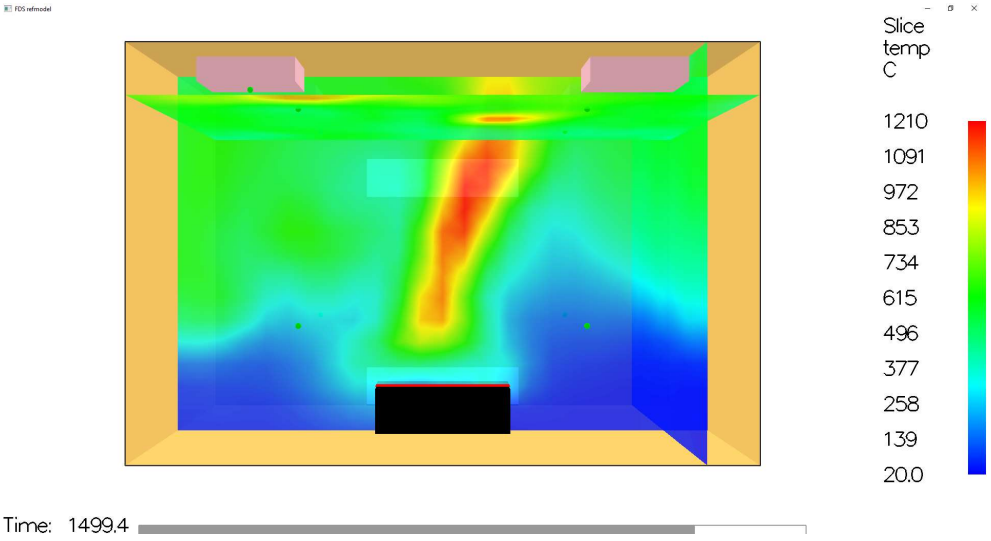

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1251.0

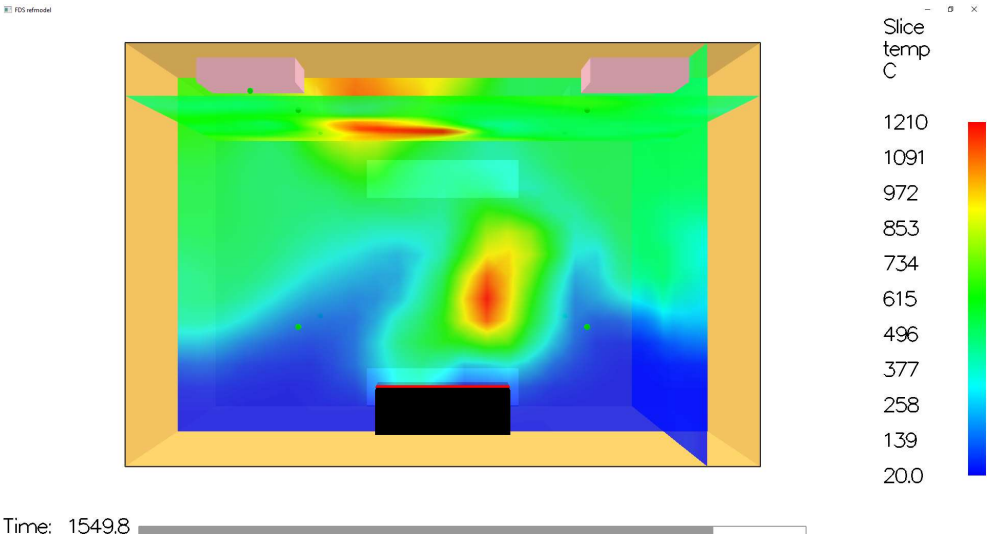

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1301.4

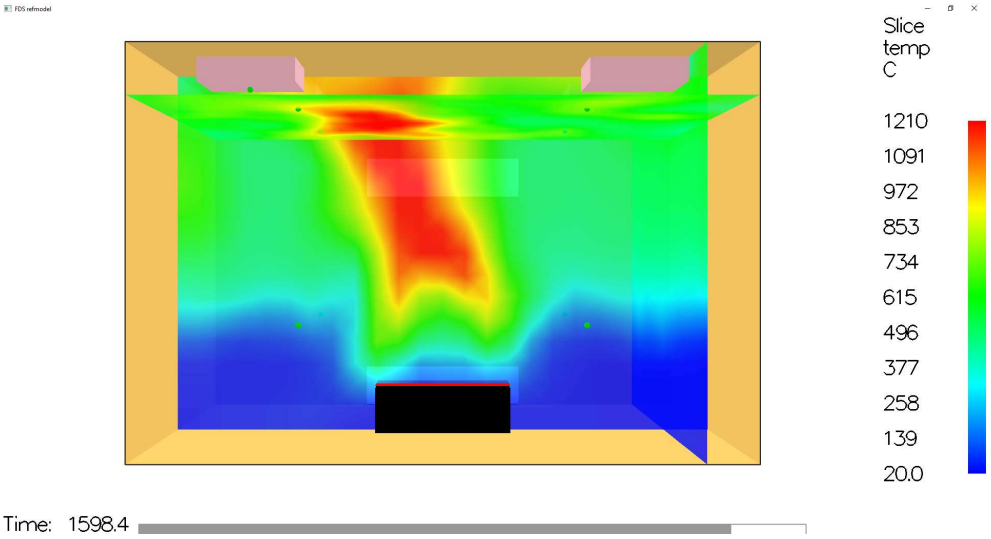

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1350.0

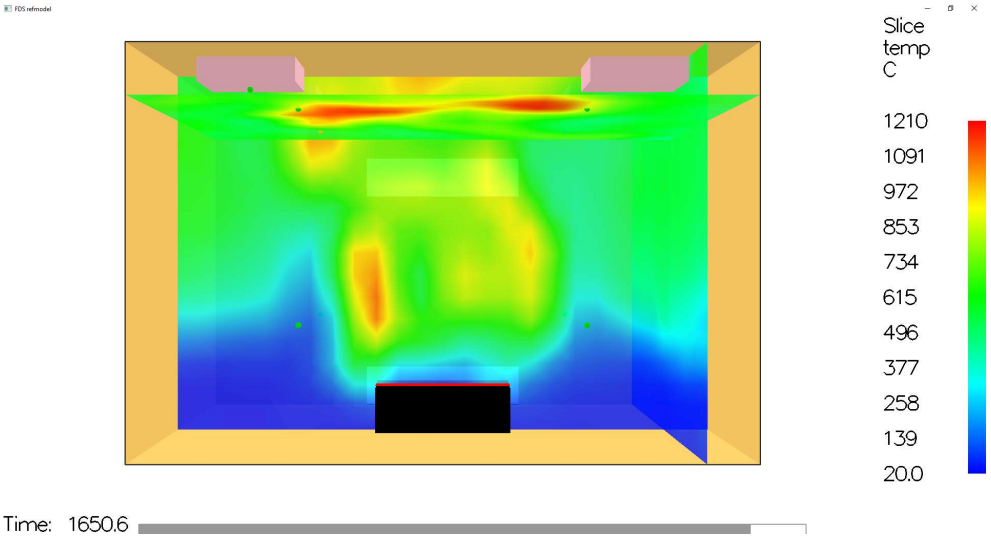

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1400.4

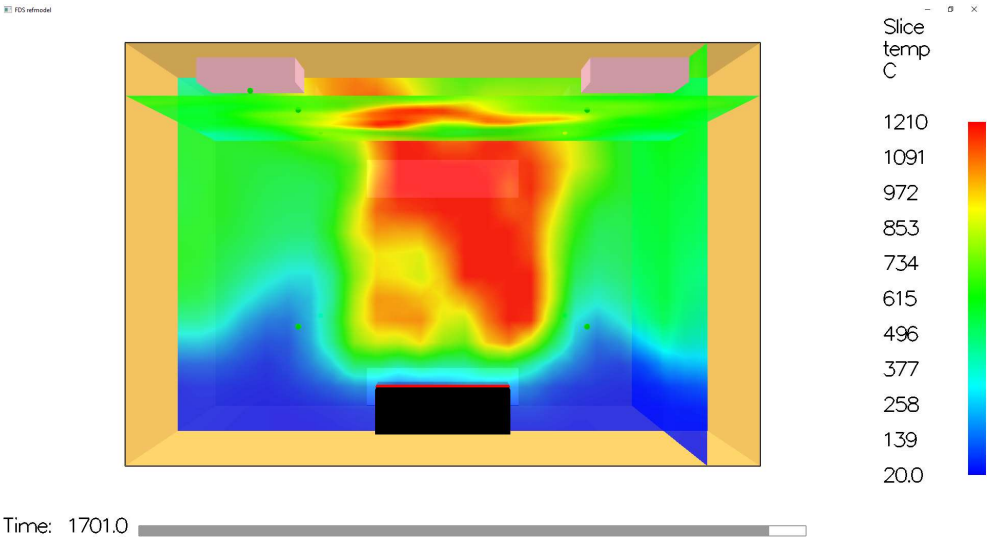

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1449.0

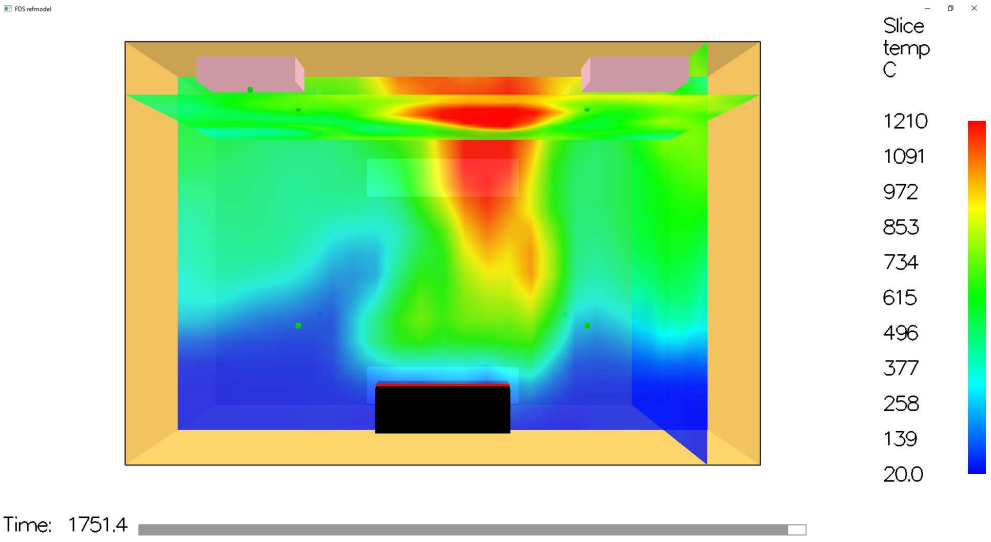

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1499.4

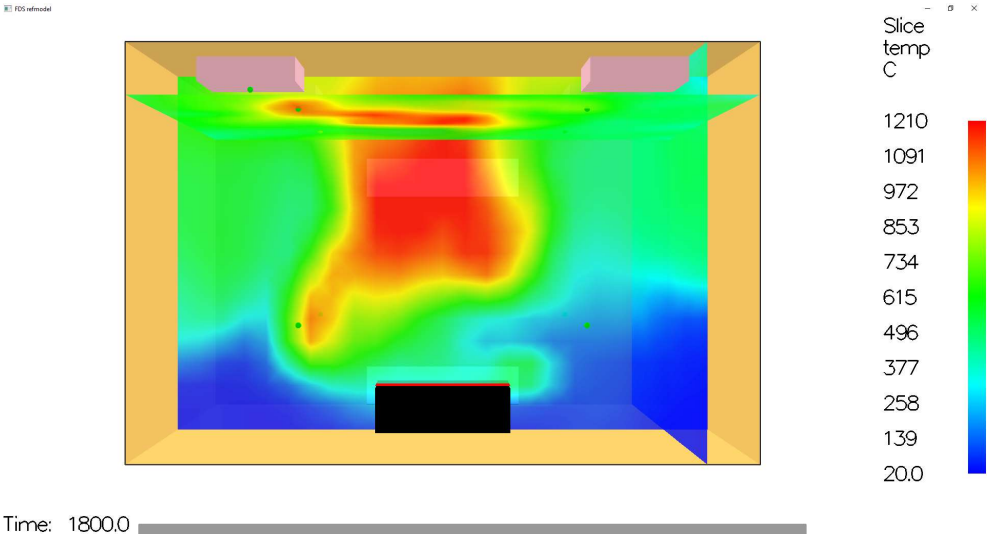

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1549.8


Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1598.4

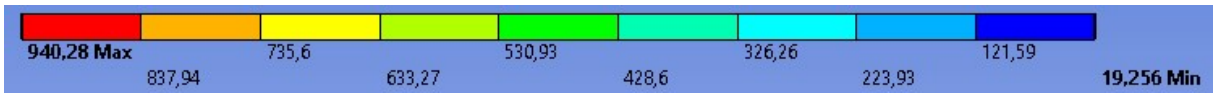

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1650.6

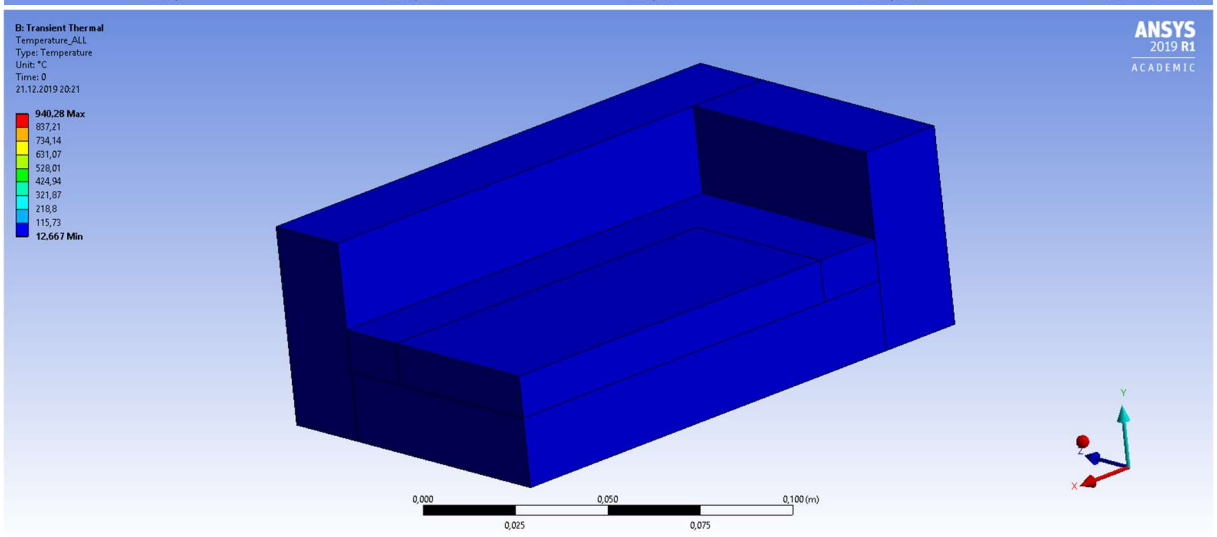

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1701.0

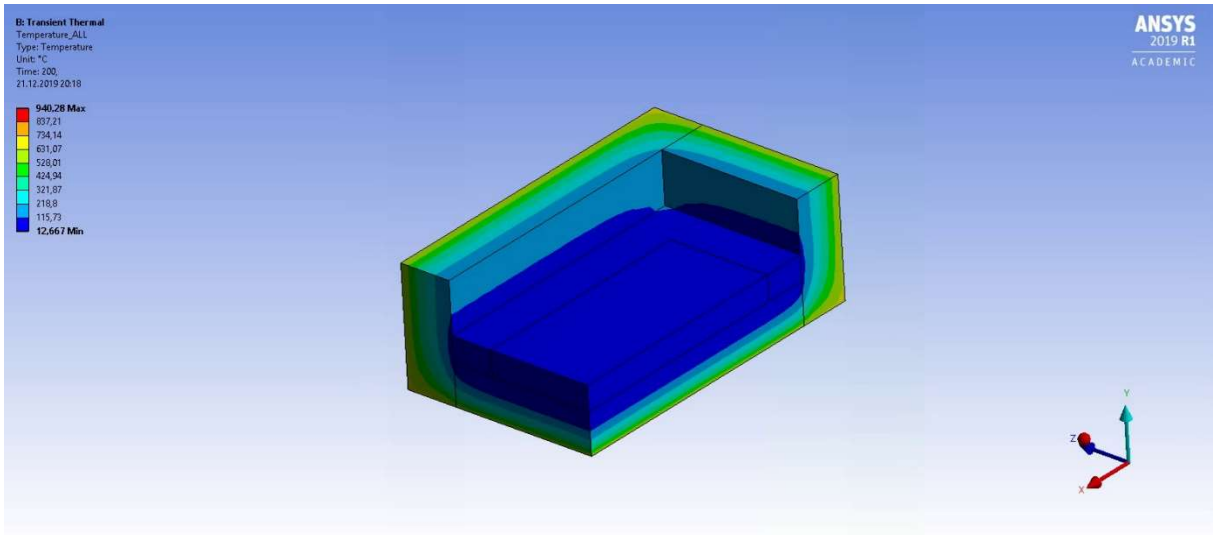

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1751.4

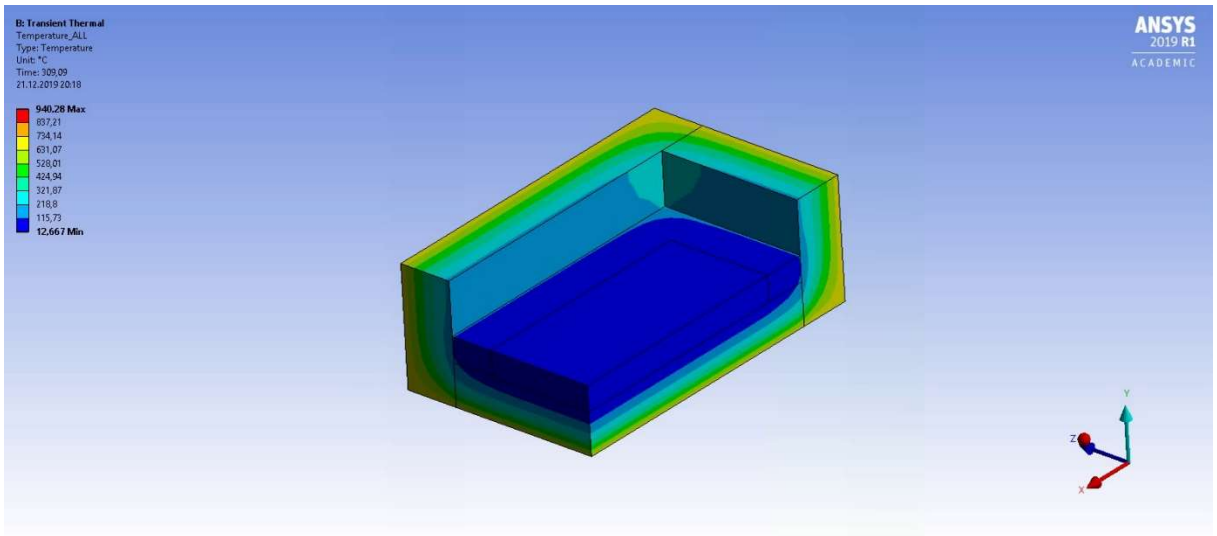

Slice
temp
C
1210
1091
972
853
734
615
496
377
258
139
20.0
Time: 1800.0

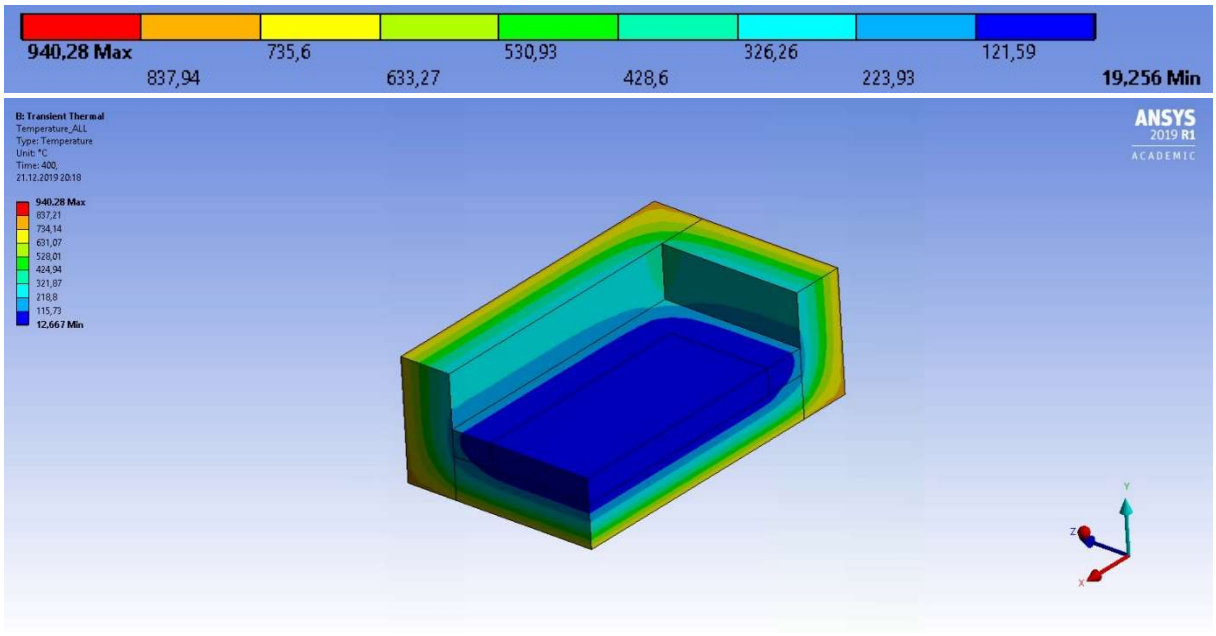
PŘÍLOHA Č. 5 – ANSYS VÝSTUP –H-CEMENT S EXPERLITEM

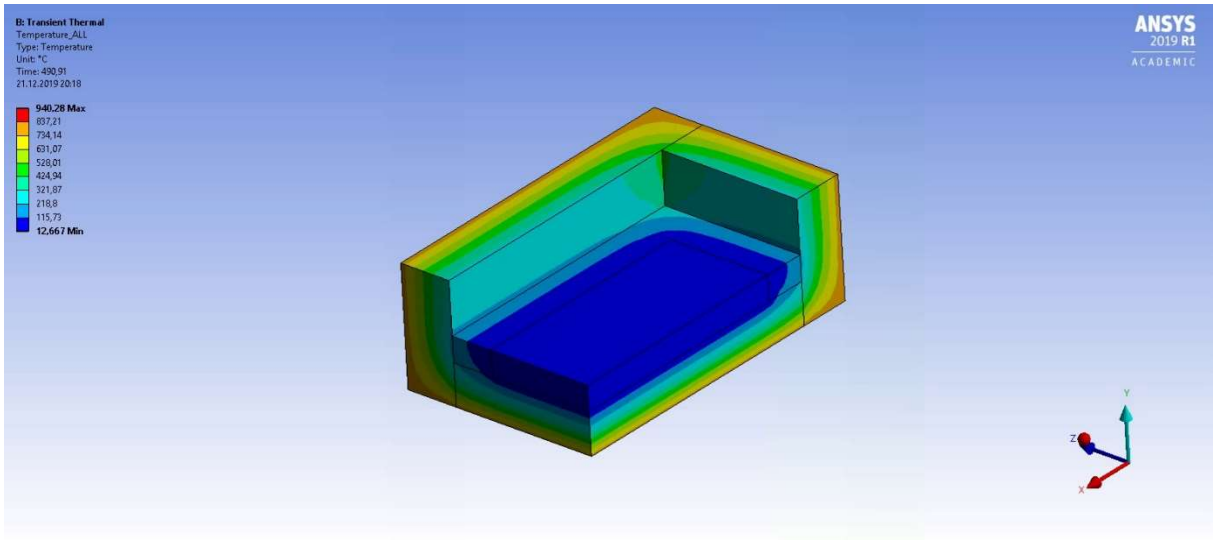

940,28 Max
837,94
735,6
633,27
530,93
428,6
326,26
223,93
121,59
19,256 Min

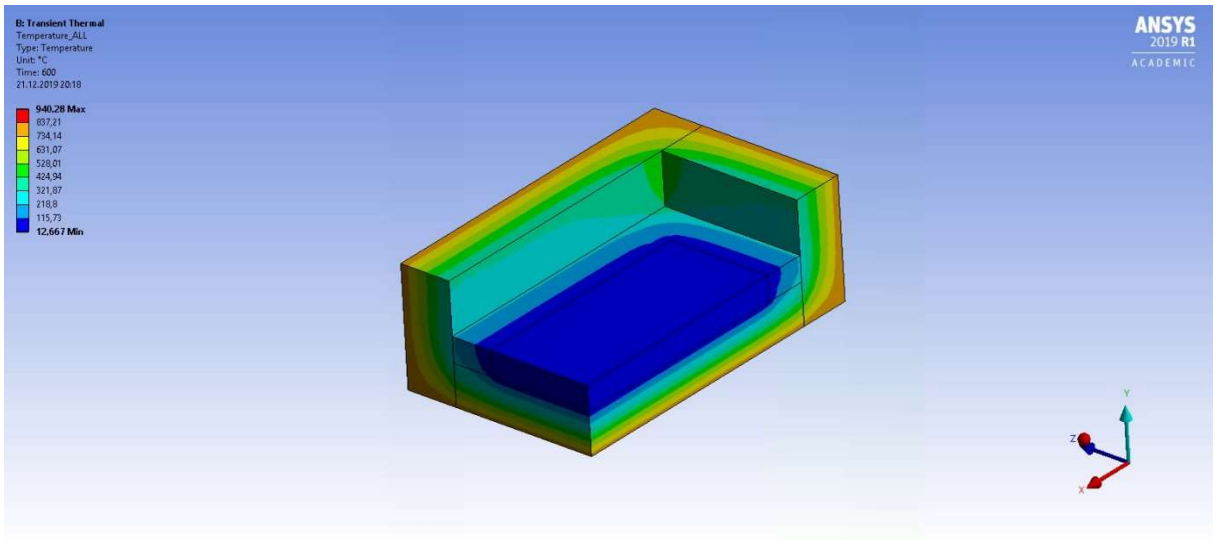

B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 0
21.12.2019 20:21
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC
0,000
0,050
0,100 (m)
0,025
0,075
Y
Z
X

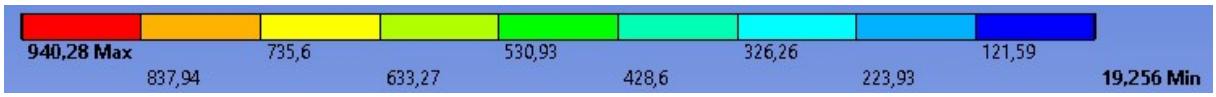

B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 200,
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC
Y
Z
X

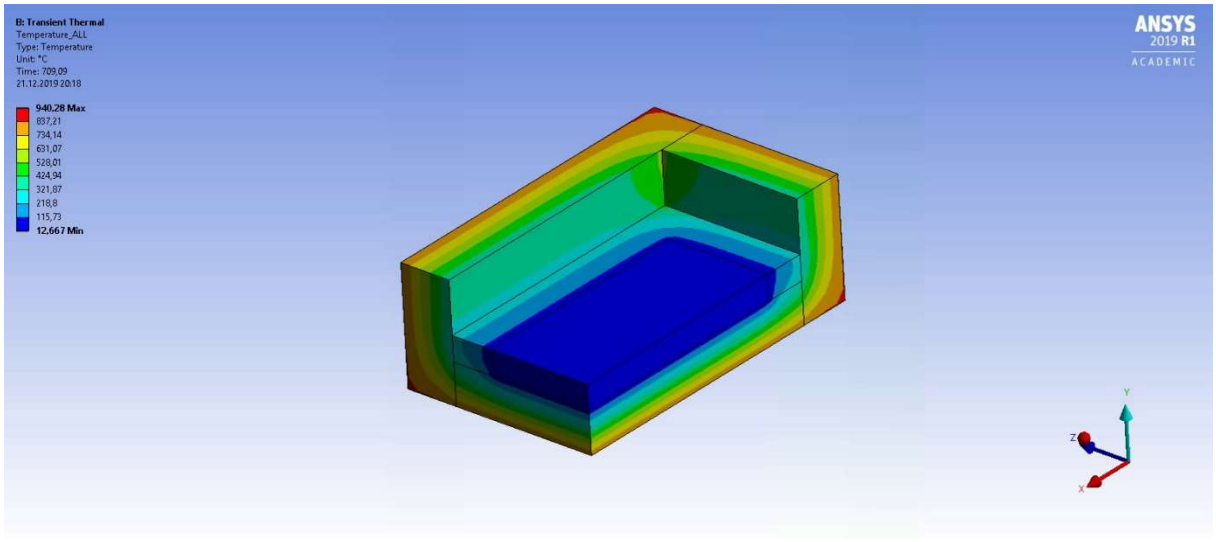

B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 309,09
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC
Y
Z
X

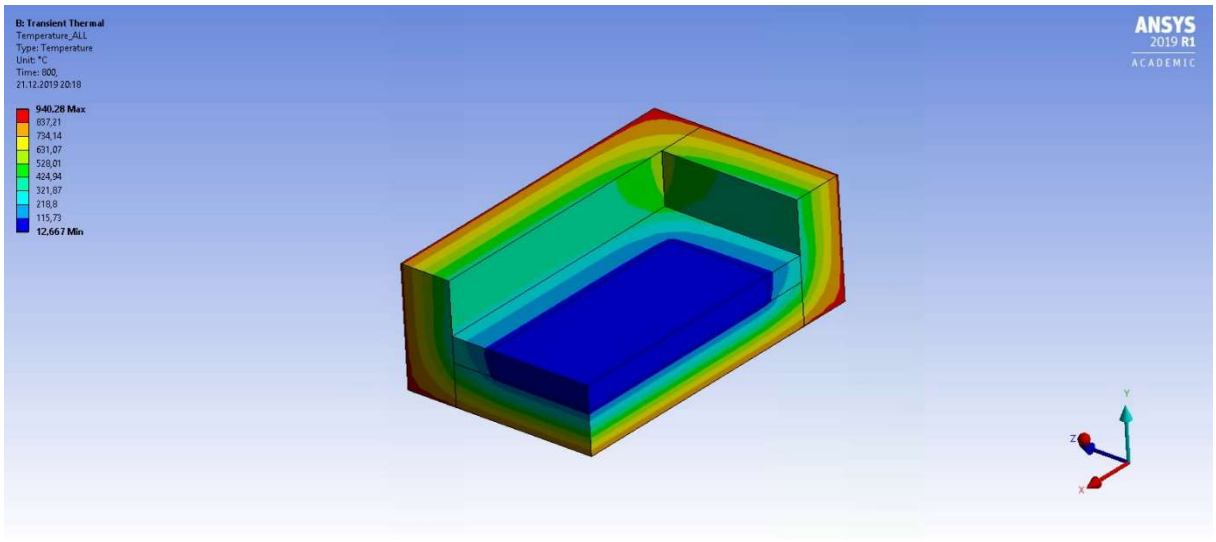

940,28 Max
837,94
735,6
633,27
530,93
428,6
326,26
223,93
121,59
19,256 Min
B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 400,
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC

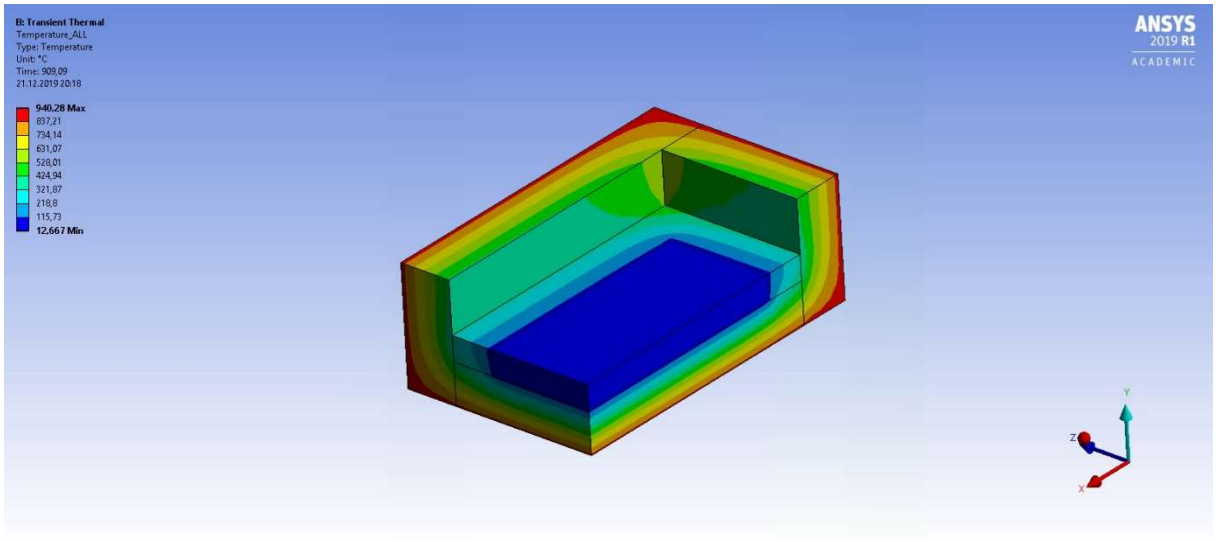

B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 490,91
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC

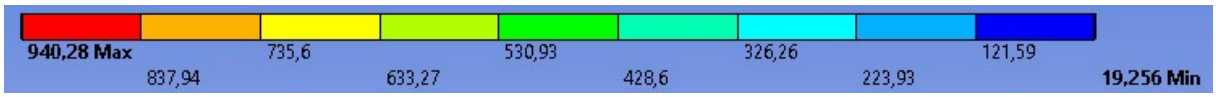

B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 600
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC

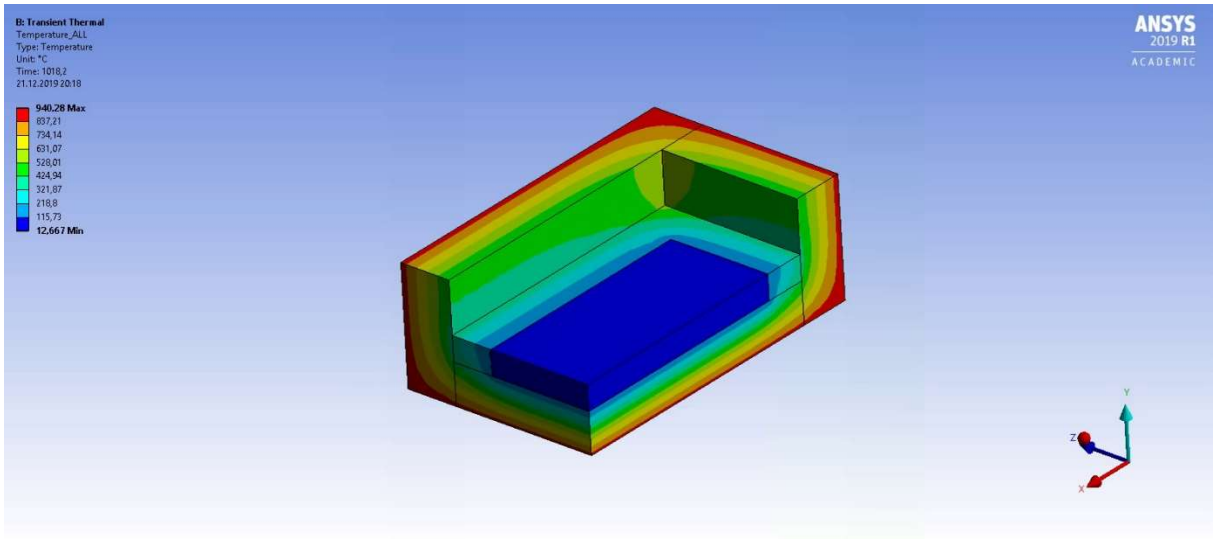

940,28 Max
837,94
735,6
633,27
530,93
428,6
326,26
223,93
121,59
19,256 Min

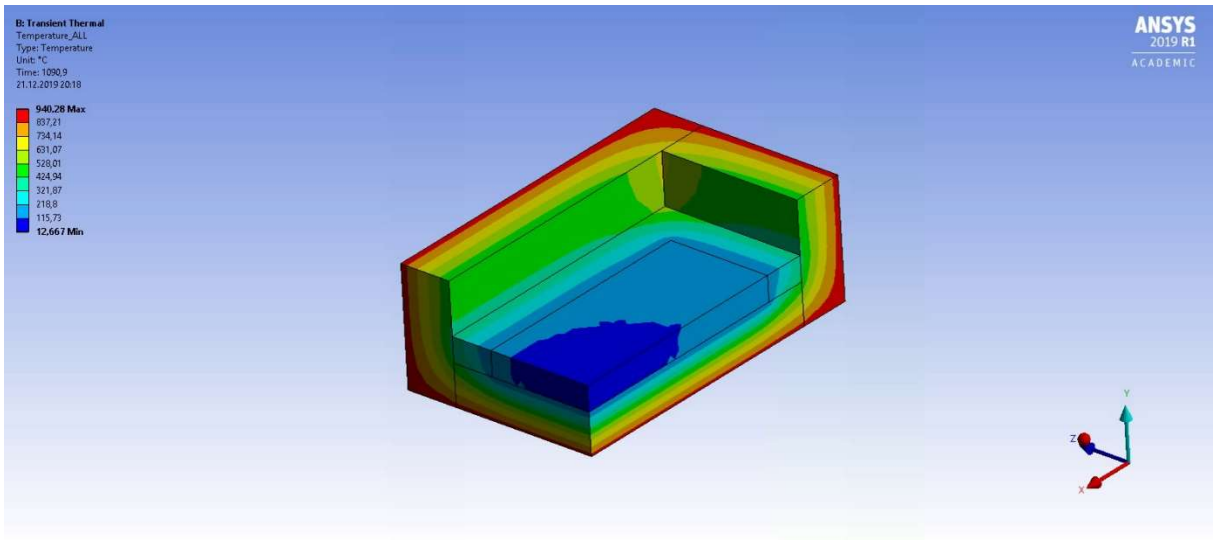

B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 709,09
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC

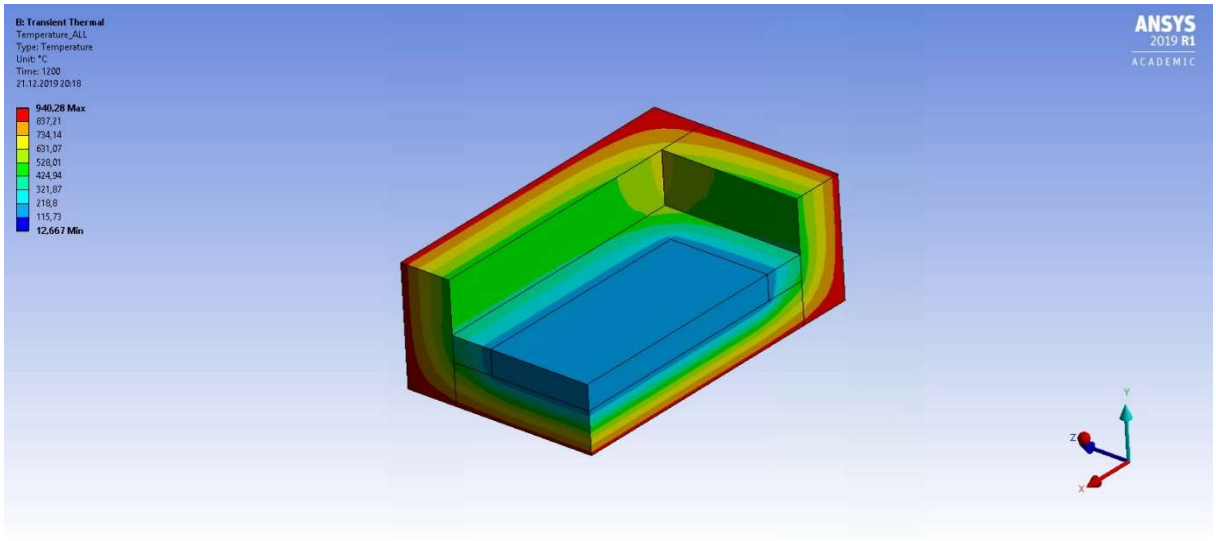

B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 800,
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC

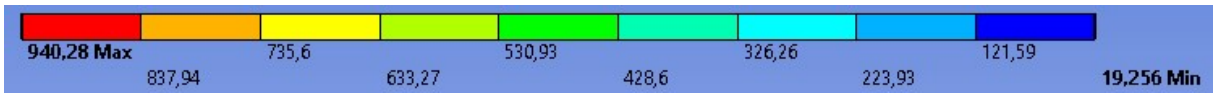

B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 909,09
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC

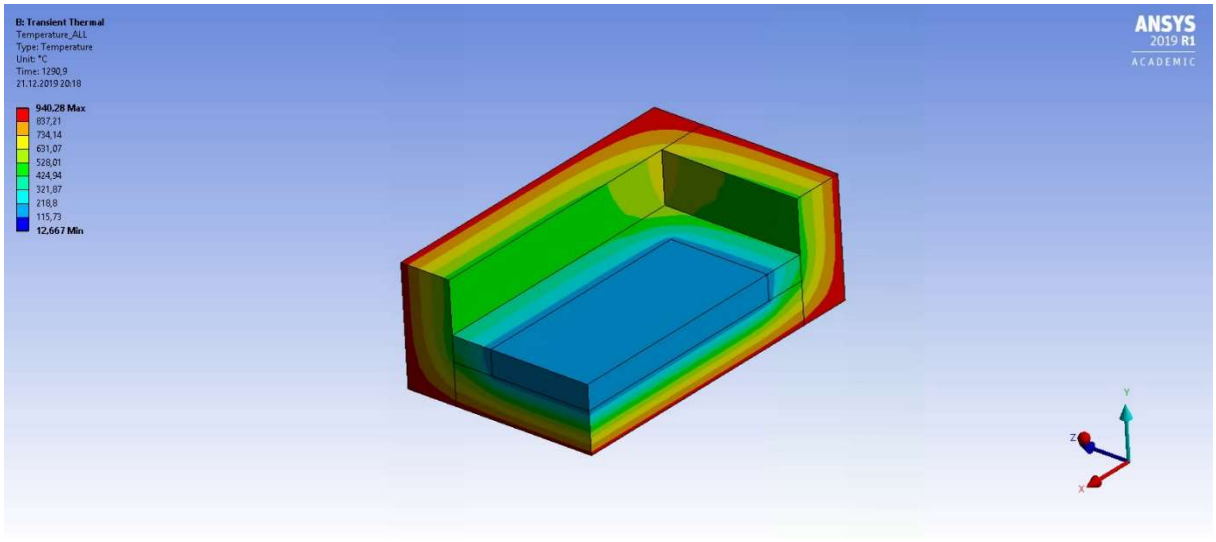

940,28 Max
837,94
735,6
633,27
530,93
428,6
326,26
223,93
121,59
19,256 Min

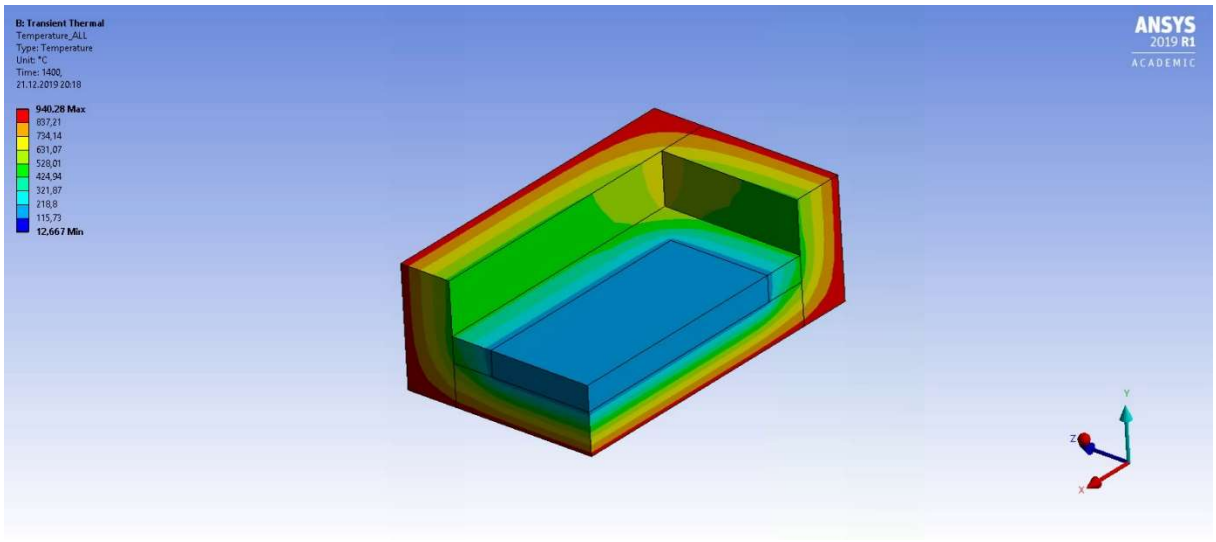

B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1018,2
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC

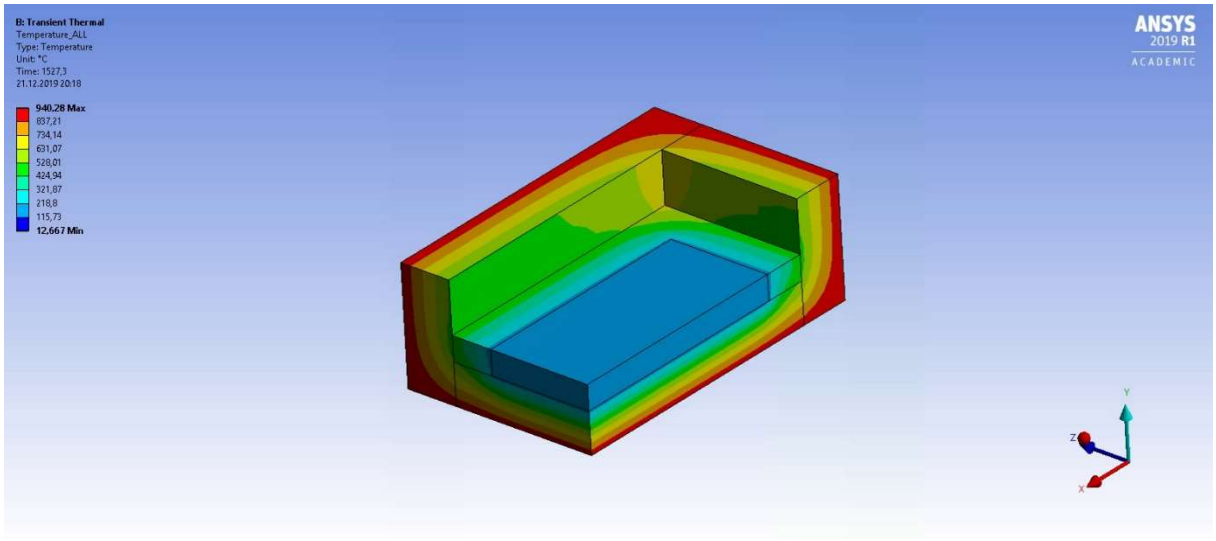

B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1090,9
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC

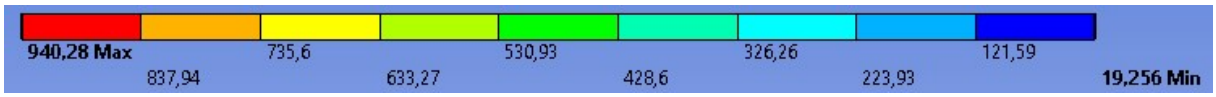

B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1200
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC

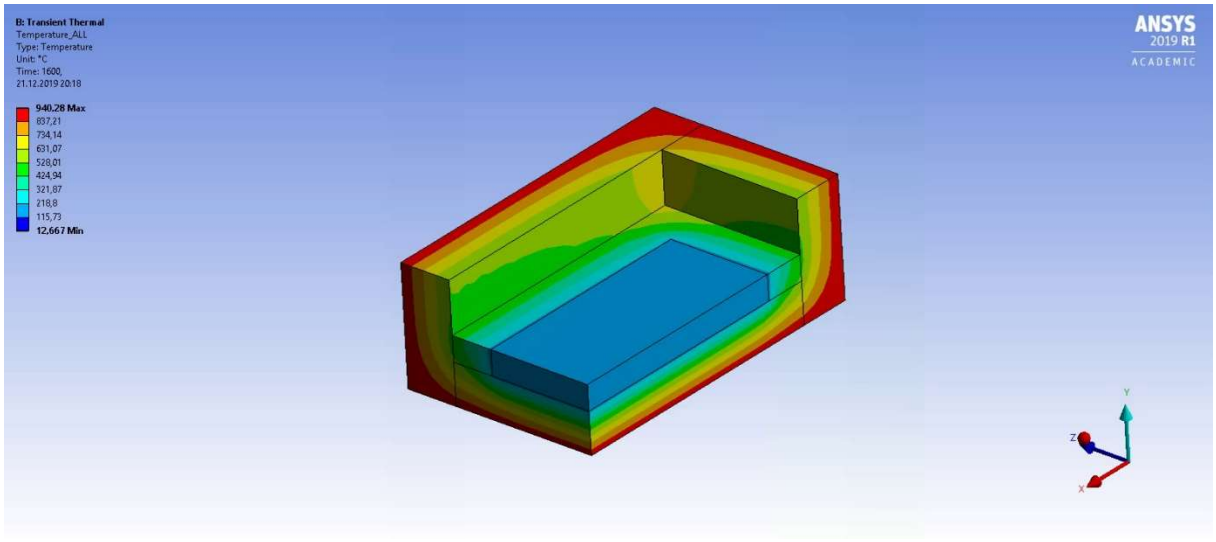

940,28 Max
837,94
735,6
633,27
530,93
428,6
326,26
223,93
121,59
19,256 Min

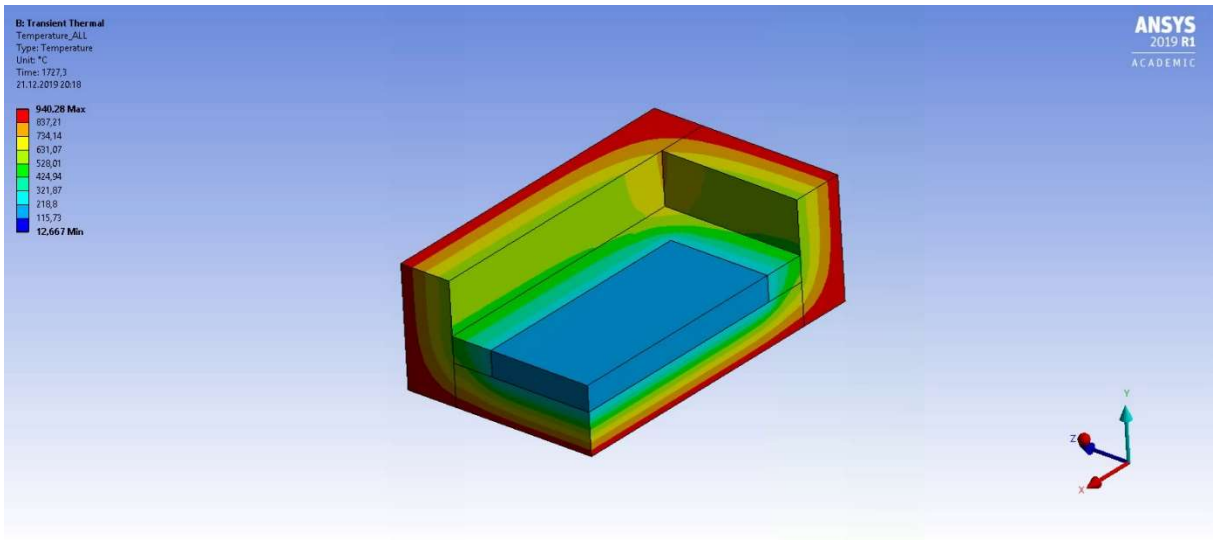

B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1290,9
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC


B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1400,
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC


B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1527,3
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC


940,28 Max
837,94
735,6
633,27
530,93
428,6
326,26
223,93
121,59
19,256 Min


B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1600,
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC
Y
Z
X


B: Transient Thermal
Temperature_ALL
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1727,3
21.12.2019 20:18
940,28 Max
837,21
734,14
631,07
528,01
424,94
321,87
218,8
115,73
12,667 Min
ANSYS
2019 R1
ACADEMIC
Y
Z
X

PŘÍLOHA Č. 6 – FOTODOKUMENTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Obrázek 1: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – jednotlivé navážené složky pro neupravenou recepturu 1; Zleva bílé kádinky: plastifikátor SIKA 1035, voda 7
Obrázek 2: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – míchání směsi 7
Obrázek 3: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – namíchaná směs 8
Obrázek 4: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – namíchaná směs 8
Obrázek 5: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – namíchaná směs 9
Obrázek 6: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – namíchaná směs 9
Obrázek 7: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – namíchaná směs 10
Obrázek 8: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – namíchaná směs 10
Obrázek 9: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – namíchaná směs 11
Obrázek 10: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – porovnání jednotlivých vzorků po odbednění; zleva w/c = 0,26, 0,30, 0,40 (21.10.2019) 11
Obrázek 11: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – porovnání jednotlivých vzorků po odbednění, povrch hutnění; shora w/c = 0,26, 0,30, 0,40 (21.10.2019) 12
Obrázek 12: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – porovnání jednotlivých vzorků po odbednění, povrch z formy; shora w/c = 0,26, 0,30, 0,40 (21.10.2019) 12
Obrázek 13: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – porovnání jednotlivých vzorků po odbednění, řez prvkem; zleva w/c = 0,26, 0,30, 0,40 (21.10.2019) 13
Obrázek 14: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – porovnání jednotlivých vzorků po odbednění, řez prvkem s přisvícením; shora w/c = 0,26, 0,30, 0,40 (21.10.2019) 13
Obrázek 15: Zkouška míchatelnosti H-Cementu s experlitem – zkouška vlivu doby míchání směsi na drolení experlitu; zleva: míchání delší dobu s vyšší intenzitou s rozdroleným experlitem, požadovaný stav směsi pro zpracování (J. Šejna, V. Šmilauer, P. Reitermann, S. Šulc, všichni FSv ČVUT v Praze) (30.10.2019) 14
Obrázek 16: Zkouška plnitelnosti a zpracovatelnosti H-Cementu s experlitem – Postup míchání směsi 14
Obrázek 17: Zkouška plnitelnosti a zpracovatelnosti H-Cementu s experlitem – Plnění forem 20×20×100 mm (31.10.2019) 15
Obrázek 18: Tvorba sendviče ze záměsi H-Cementu s experlitem – porovnání jednotlivých vrstev 15
Obrázek 19:Tvorba sendviče ze záměsi H-Cementu s experlitem – zkouška tl. 20 mm v porovnání se zkušebním trámečkem(31.10.2019) 16
Obrázek 20:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou 16
Obrázek 21:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou 17
Obrázek 22:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou 17
Obrázek 23:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou 18
Obrázek 24:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou 18
Obrázek 25:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou 19
Obrázek 26:Příprava forem na trámečky 40 × 40 × 160 mm 19
Obrázek 27:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou – zaznamenání vrstvy pro plnění (7.11.2019) 20
Obrázek 28:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou – označení prvních plechů s navařenou maticí (7.11.2019) 20
Obrázek 29:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou – označení prvních plechů s navařenou maticí (7.11.2019) 21

Obrázek 30:Výroba vzorků pro experiment – směs 1, hlinitanový cement, šamotový písek a PVA vlákna (8.11.2019) 21
Obrázek 31:Výroba vzorků pro experiment – směs 1, hlinitanový cement, šamotový písek a PVA vlákna; plnění forem (8.11.2019) 22
Obrázek 32:Výroba vzorků pro experiment – směs 1, hlinitanový cement, šamotový písek a PVA vlákna; míchatelnosti směsi (8.11.2019) 22
Obrázek 33:Výroba vzorků pro experiment – směs 3, H-Cement, experlit; příprava pasty pro vsypání experlitu (8.11.2019) 23
Obrázek 34:Výroba vzorků pro experiment –připravené formy pro lití, vystříkané odbedňovací emulzí 23
Obrázek 35:Výroba vzorků pro experiment – směs 3, H-Cement, experlit; plnění forem s ocelovým plechem (8.11.2019) 24
Obrázek 36:Výroba vzorků pro experiment – pohled na vyplněné všechny formy 24
Obrázek 37:Výroba vzorků pro experiment – pohled na vyplněné všechny formy 25
Obrázek 38:Výroba vzorků pro experiment – pohled na vyplněné všechny formy pro ocelový plech. 25
Obrázek 39:Výroba vzorků pro experiment – pohled na vyplněné všechny formy pro ocelový plech. 26
Obrázek 40:Výroba vzorků pro experiment – pohled na vyplněné všechny formy pro ocelový plech. 26
Obrázek 41:Výroba vzorků pro experiment – pohled na vyplněné všechny formy pro ocelový plech. 27
Obrázek 42:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 4 27
Obrázek 43:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 3 28
Obrázek 44:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 2 28
Obrázek 45:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 2 29
Obrázek 46:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 2 29
Obrázek 47:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 1 30
Obrázek 48:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 1 30
Obrázek 49:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 1 31
Obrázek 50:Odbedňování vzorků – směs 1 31
Obrázek 51:Odbedňování vzorků – směs 1 32
Obrázek 52:Odbedňování vzorků – směs 2 32
Obrázek 53:Odbedňování vzorků – směs 2, přisvíceno 33
Obrázek 54:Odbedňování vzorků – směs 2 33
Obrázek 55:Odbedňování vzorků – směs 3 34
Obrázek 56:Odbedňování vzorků – směs 3, přisvíceno 34
Obrázek 57:Odbedňování vzorků – směs 3 35
Obrázek 58:Odbedňování vzorků – směs 3 35
Obrázek 59:Odbedňování vzorků – směs 3, přisvíceno 36
Obrázek 60:Odbedňování vzorků – směs 3*, méně rozdrcený experlit 36
Obrázek 61:Odbedňování vzorků – směs 3*, méně rozdrcený experlit 37
Obrázek 62:Odbedňování vzorků – směs 4 37
Obrázek 63:Odbedňování vzorků – směs 4, přisvíceno 38
Obrázek 64:Odbedňování vzorků – směs 4 38
Obrázek 65:Odbedňování vzorků – směs 5 39
Obrázek 66:Odbedňování vzorků – směs 5 39
Obrázek 67:Odbedňování vzorků – směs 5 40

Obrázek 68:Odbedňování vzorků – uložení vzorků do beden 40
Obrázek 69:Odbedňování vzorků – uložení vzorků do beden 41
Obrázek 70:Odbedňování vzorků – chráněné plechy 41
Obrázek 71:Odbedňování vzorků – směs 5 42
Obrázek 72:Odbedňování vzorků – směs 4 42
Obrázek 73:Odbedňování vzorků – směs 3 43
Obrázek 74:Odbedňování vzorků – směs 2 43
Obrázek 75:Uskladnění vzorků – převoz vzorků na přeměření a uložení do teploty 32 °C 44
Obrázek 76:Uskladnění vzorků – převoz vzorků na přeměření a uložení do teploty 32 °C 44
Obrázek 77:Uskladnění vzorků – převoz vzorků na přeměření a uložení do teploty 32 °C 45
Obrázek 78:Uskladnění vzorků – převoz vzorků na přeměření a uložení do teploty 32 °C 45
Obrázek 79:Úklid po odbedňovacích pracích– čištění forem 46
Obrázek 80: První měření vzorků po odbednění 46
Obrázek 81: První měření vzorků po odbednění 47
Obrázek 82: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – vybalení ze zapečetěné bedny 47
Obrázek 83: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – vybalení ze zapečetěné bedny 48
Obrázek 84: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – Porušený jediný vzorek, směs 5 48
Obrázek 85: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – Porušený jediný vzorek, směs 5 49
Obrázek 86: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – Porušený jediný vzorek, směs 5 49
Obrázek 87: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – vybalení ze zapečetěné bedny 50
Obrázek 88: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – rozmístění vzorků v sušárně 50
Obrázek 89: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – rozmístění vzorků v sušárně 51
Obrázek 90: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – rozmístění vzorků v sušárně 51
Obrázek 91: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – rozmístění vzorků v sušárně 52
Obrázek 92: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – rozmístění vzorků v sušárně 52
Obrázek 93: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – rozmístění vzorků v sušárně 53
Obrázek 94: Zkoušky pevnosti vzorků – Trhací stroj MTS 53
Obrázek 95: Zkoušky pevnosti vzorků – vzorek směs 4, viditelná prasklina 54
Obrázek 96: Zkoušky pevnosti vzorků – vzorek směs 4, rozlomený 54
Obrázek 97: Zkoušky pevnosti vzorků – vzorek směs 4, pohled na strukturu v lomu 55
Obrázek 98: Zkoušky pevnosti vzorků – vzorek směs 2, viditelná prasklina 55
Obrázek 99: Zkoušky pevnosti vzorků – vzorek směs 2, pohled na strukturu v lomu 56
Obrázek 100: Zkoušky pevnosti vzorků – vzorek směs 3, pohled na strukturu v lomu 56
Obrázek 101: Příprava vzorků na experiment – výroba svorek pro připevnění termočlánků 57
Obrázek 102: Příprava vzorků na experiment – výroba izolační vrstvy, rozkreslení 57
Obrázek 103: Příprava vzorků na experiment – výroba izolační vrstvy, rozkreslení 2 58
Obrázek 104: Příprava vzorků na experiment – výroba izolační vrstvy, řezání 58
Obrázek 105: Příprava vzorků na experiment – výroba izolační vrstvy, vykroužení prostupu pro závitovou tyč a termočlánky (10.12.2019) 59
Obrázek 106: Příprava vzorků na experiment – výroba izolační vrstvy, zátky pro zakrytí termočlánků 59
Obrázek 107: Příprava vzorků na experiment – zatížení pro vytvrdnutí lepidla 60
Obrázek 108: Příprava vzorků na experiment – zatížení pro vytvrdnutí lepidla 60
Obrázek 109: Příprava vzorků na experiment – nalepené strany izolace na vzorek 61

Obrázek 110: Příprava vzorků na experiment – pohled na hotový vzorek ze spodní strany, která bude zatěžována (11. 12. 2019) 61
Obrázek 111: Příprava vzorků na experiment – lepení boční izolace 62
Obrázek 112: Příprava vzorků na experiment – zabalený vzorek pro převoz na UCCEB ČVUT 62
Obrázek 113: Experiment – přichycení termočlánků ke zkoušeným vzorkům 63
Obrázek 114: Experiment – zadělaný otvor pro termočlánky, připravený vzorek na experiment, směs 2 H-Cement, šamotový písek a PVA vlákna (13. 12. 2019)..... 63
Obrázek 115: Experiment – závěsný systém na peci..... 64
Obrázek 116: Experiment – zavěšené vzorky v peci..... 64
Obrázek 117: Experiment – pohled na všechny vzorky v peci připravené na experiment, směs 2 H-Cement, šamotový písek a PVA vlákna (13. 12. 2019) 65
Obrázek 118: Experiment zahájení prvního zatěžování vzorků, směs 2 65
Obrázek 119: Experiment – záznam průběhu experimentu 66
Obrázek 120: Experiment – příprava druhé sady vzorků, Hlinitanový cement s experlitem..... 66
Obrázek 121: Experiment – otestovaný vzorek ze směsi 2 67
Obrázek 122: Experiment – otestovaný vzorek ze směsi 2 67
Obrázek 123: Experiment – pohled na spodní stranu vzorku 68
Obrázek 124: Experiment – porovnání vzorků, vlevo vzorek po experimentu, vpravo vzorek před experimentem (13. 12. 2019)..... 68
Obrázek 125: Experiment – pohled na spálená místa na podkladové ploše z minerální vaty pro chladnutí vzorků (13. 12. 2019)..... 69
Obrázek 126: Experiment – oddělení minerální vaty vlivem chladnutí vzorku..... 69
Obrázek 127: Experiment – oddělané boční izolace, povrh neporušený, směs 2 H-Cement, šamotový písek a PVA vlákna (13. 12. 2019)..... 70
Obrázek 128: Experiment – Příprava vzorků třetí sady, H-Cement s experlitem..... 70
Obrázek 129: Experiment – odzkoušené vzorky Hlinitanového cementu s experlitem..... 71
Obrázek 130: Experiment – změna barvy vzorku s hlinitanovým cementem 71
Obrázek 131: Experiment – viditelné praskliny v třetinách vzorku, směs 3 Hlinitanový cement s experlitem (13. 12. 2019) 72
Obrázek 132: Experiment – viditelné praskliny v třetinách vzorku, pohled z boku (13. 12. 2019)..... 72
Obrázek 133: Experiment – pozůstatky očouzení na stropě pece po vzorcích 73
Obrázek 134: Experiment – odzkoušený vzorek směsi 4, H-Cement s expelitem..... 73
Obrázek 135: Experiment – viditelné praskliny po zchladnutí vzorku po oddělání izolační vrstvy..... 74
Obrázek 136: Experiment – viditelné praskliny po zchladnutí vzorku po oddělání izolační vrstvy..... 74
Obrázek 137: Experiment – uložení vzorků před přepravou..... 75
Obrázek 138: Experiment – odpadnutí rohů po zchladnutí vzorku, směs 4 H-Cement s experlitem ... 75
Obrázek 139: Experiment – odpadnutí rohů po zchladnutí vzorku, směs 4 H-Cement s experlitem ... 76
Obrázek 140: Experiment – odpadnutí rohů po zchladnutí vzorku, směs 4 H-Cement s experlitem ... 76
Obrázek 141: Experiment – odpadnutí rohů po zchladnutí vzorku, směs 4 H-Cement s experlitem ... 77
Obrázek 142: Experiment – připravená čtvrtá sada vzorků pro zkoušení, směs 5 H-Cement s experlitem a čedičovými vlákny (13. 12. 2019)..... 77
Obrázek 143: Experiment – zahájení čtvrté části experimentu, směs 5 H-Cement s experlitem a čedičovými vlákny (13. 12. 2019) 78
Obrázek 144: Experiment – odzkoušené prvky směsi 5 (13. 12. 2019)..... 78

Obrázek 145: Experiment – odpadnutí rohů po zchladnutí vzorku, směs 5 H-Cement s experlitem a čedičovými vlákny (13. 12. 2019) 79
Obrázek 146: Experiment – odpadnutí rohů po zchladnutí vzorku, směs 5 H-Cement s experlitem a čedičovými vlákny (13. 12. 2019) 79

Obrázek 1: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – jednotlivé navážené složky pro neupravenou recepturu 1; Zleva bílé kádinky: plastifikátor SIKA 1035, voda Zleva černé kýble: písek frakce 0-4, H-Cement (17.10.2019)

Obrázek 2: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – míchání směsi (17.10.2019)

Obrázek 3: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – namíchaná směs w/c = 0,26 (17.10.2019)

Obrázek 4: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – namíchaná směs w/c = 0,30 (17.10.2019)

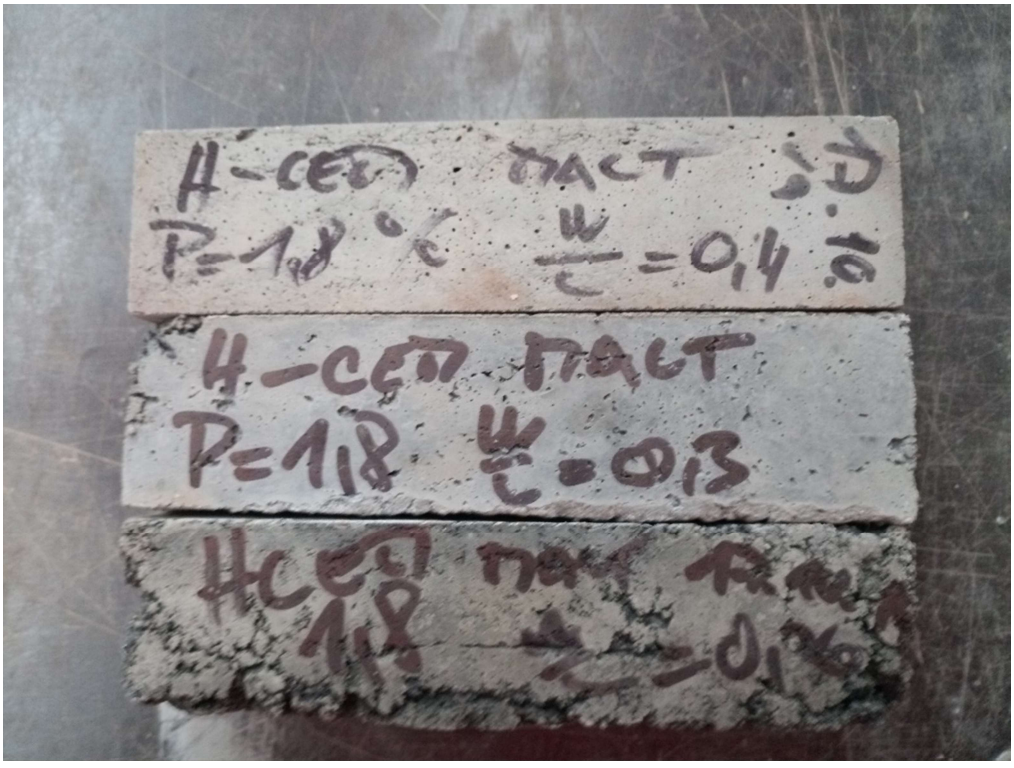
Obrázek 5: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – namíchaná směs w/c = 0,26 (17.10.2019)

Obrázek 6: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – namíchaná směs w/c = 0,30 (17.10.2019)

Obrázek 7: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – namíchaná směs w/c = 0,30 (17.10.2019)

Obrázek 8: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – namíchaná směs w/c = 0,40 (17.10.2019)

Obrázek 9: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – namíchaná směs w/c = 0,40 (17.10.2019)



Obrázek 10: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – porovnání jednotlivých vzorků po odbednění; zleva w/c = 0,26, 0,30, 0,40 (21.10.2019)

Obrázek 11: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – porovnání jednotlivých vzorků po odbednění, povrch hutnění; shora w/c = 0,26, 0,30, 0,40 (21.10.2019)

Obrázek 12: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – porovnání jednotlivých vzorků po odbednění, povrch z formy; shora w/c = 0,26, 0,30, 0,40 (21.10.2019)

Obrázek 13: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – porovnání jednotlivých vzorků po odbednění, řez prvkem; zleva w/c = 0,26, 0,30, 0,40 (21.10.2019)

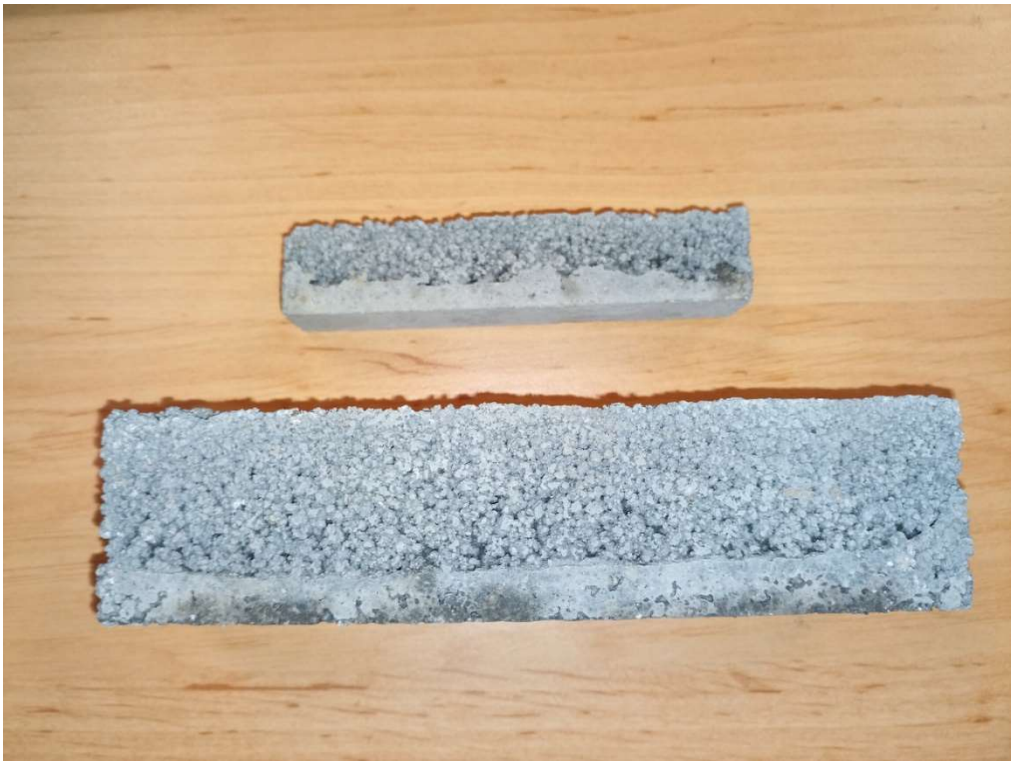
Obrázek 14: Pilotní zkouška míchatelnosti malty z H-Cementu – porovnání jednotlivých vzorků po odbednění, řez prvkem s přisvícením; shora w/c = 0,26, 0,30, 0,40 (21.10.2019)

Obrázek 15: Zkouška míchatelnosti H-Cementu s experlitem – zkouška vlivu doby míchání směsi na drolení experlitu; zleva: míchání delší dobu s vyšší intenzitou s rozdroleným experlitem, požadovaný stav směsi pro zpracování (J. Šejna, V. Šmilauer, P. Reitermann, S. Šulc, všichni FSv ČVUT v Praze) (30.10.2019)

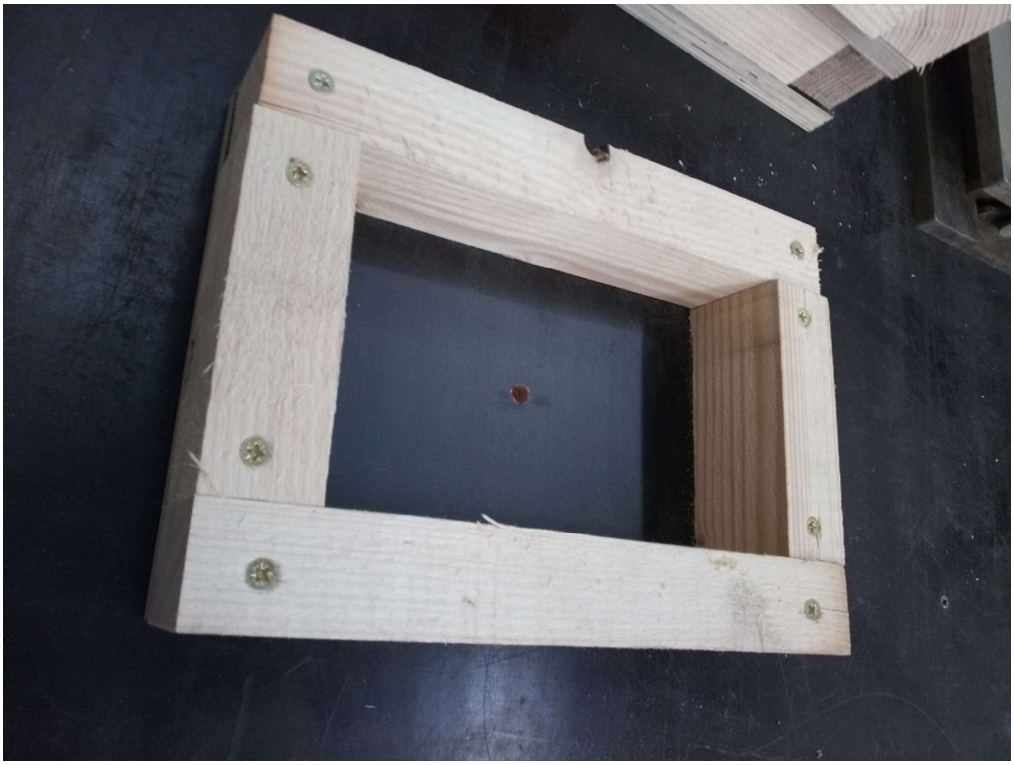
Obrázek 16: Zkouška plnitelnosti a zpracovatelnosti H-Cementu s experlitem – Postup míchání směsi (31.10.2019)

Obrázek 17: Zkouška plnitelnosti a zpracovatelnosti H-Cementu s experlitem – Plnění forem 20×20×100 mm (31.10.2019)

Obrázek 18: Tvorba sendviče ze záměsi H-Cementu s experlitem – porovnání jednotlivých vrstev (31.10.2019)



Obrázek 19:Tvorba sendviče ze záměsi H-Cementu s experlitem – zkouška tl. 20 mm v porovnání se zkušebním trámečkem(31.10.2019)



Obrázek 20:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou (7.11.2019)

Obrázek 21:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou (7.11.2019)

Obrázek 22:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou (7.11.2019)

Obrázek 23:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou (7.11.2019)

Obrázek 24:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou (7.11.2019)

Obrázek 25:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou (7.11.2019)

Obrázek 26:Příprava forem na trámečky 40 × 40 × 160 mm (7.11.2019)

Obrázek 27:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou – zaznamenání vrstvy pro plnění (7.11.2019)

Obrázek 28:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou – označení prvních plechů s navařenou maticí (7.11.2019)

Obrázek 29:Výroba forem pro vyrobení chráněného plechu ochrannou vrstvou – označení prvních plechů s navařenou maticí (7.11.2019)

Obrázek 30:Výroba vzorků pro experiment – směs 1, hlinitanový cement, šamotový písek a PVA vlákna (8.11.2019)

Obrázek 31:Výroba vzorků pro experiment – směs 1, hlinitanový cement, šamotový písek a PVA vlákna; plnění forem (8.11.2019)

Obrázek 32:Výroba vzorků pro experiment – směs 1, hlinitanový cement, šamotový písek a PVA vlákna; míchatelnosti směsi (8.11.2019)

Obrázek 33:Výroba vzorků pro experiment – směs 3, H-Cement, experlit; příprava pasty pro vsypání experlitu (8.11.2019)

Obrázek 34:Výroba vzorků pro experiment –připravené formy pro lití, vystříkané odbedňovací emulzí (8.11.2019)

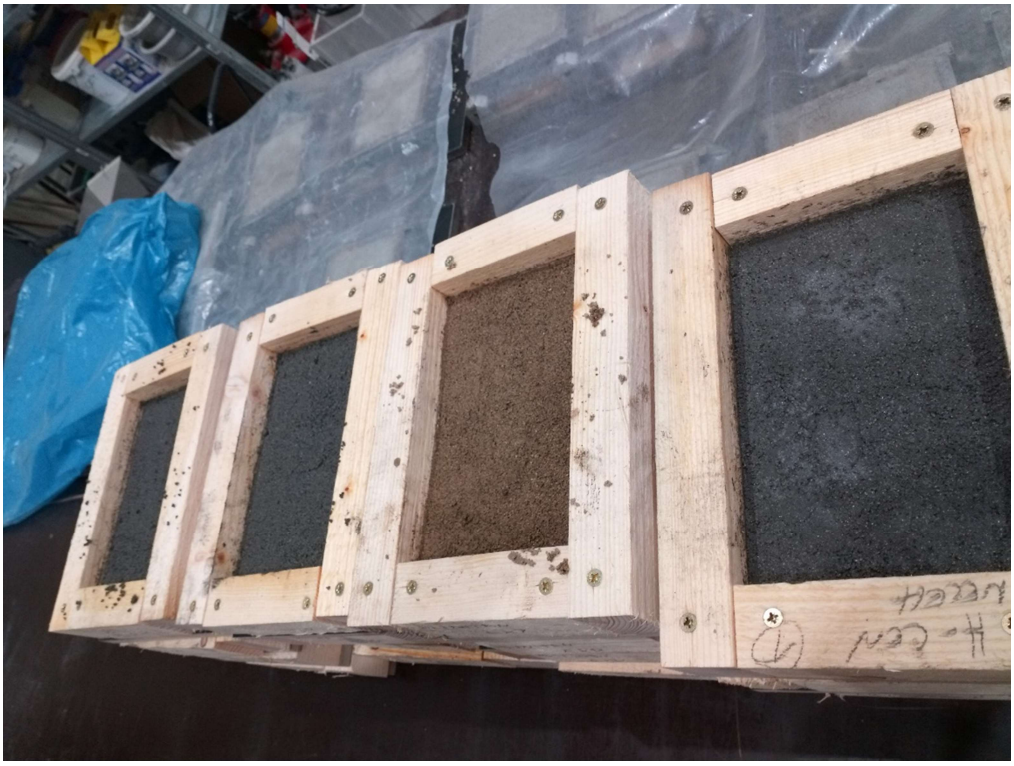
Obrázek 35:Výroba vzorků pro experiment – směs 3, H-Cement, experlit; plnění forem s ocelovým plechem (8.11.2019)

Obrázek 36:Výroba vzorků pro experiment – pohled na vyplněné všechny formy (8.11.2019)

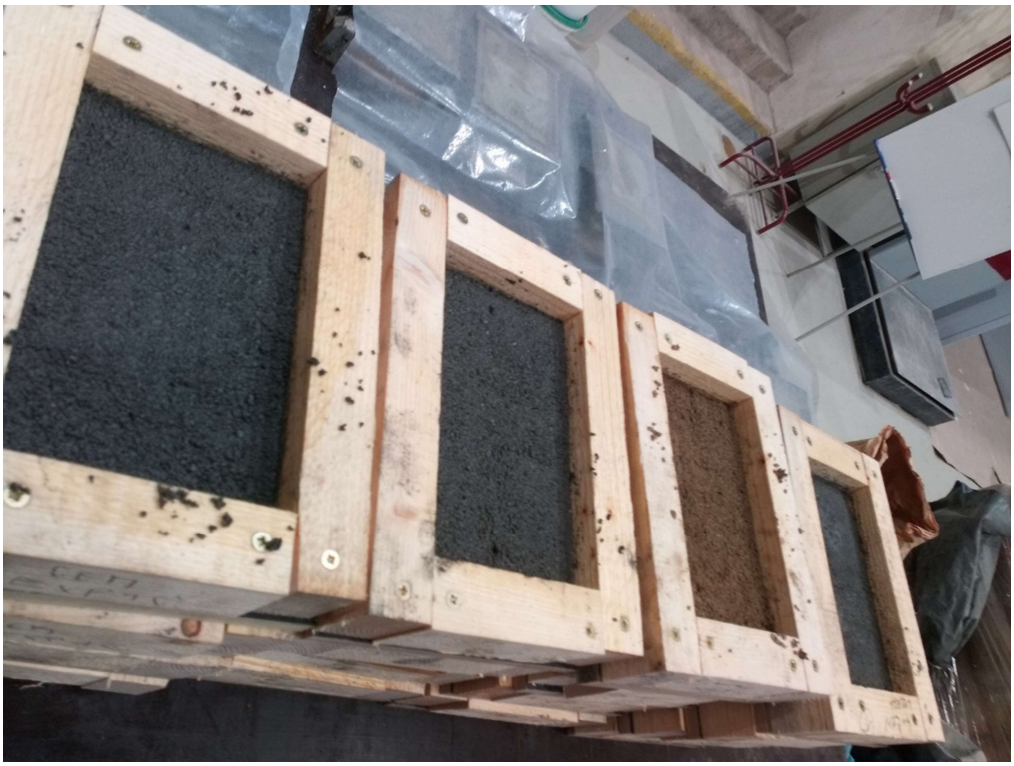
Obrázek 37:Výroba vzorků pro experiment – pohled na vyplněné všechny formy (8.11.2019)

Obrázek 38:Výroba vzorků pro experiment – pohled na vyplněné všechny formy pro ocelový plech (8.11.2019)

Obrázek 39:Výroba vzorků pro experiment – pohled na vyplněné všechny formy pro ocelový plech (8.11.2019)



Obrázek 40:Výroba vzorků pro experiment – pohled na vyplněné všechny formy pro ocelový plech (8.11.2019)



Obrázek 41:Výroba vzorků pro experiment – pohled na vyplněné všechny formy pro ocelový plech (8.11.2019)

Obrázek 42:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 4 (11.11.2019)

Obrázek 43:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 3

(11.11.2019)

Obrázek 44:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 2

(11.11.2019)

Obrázek 45:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 2 (11.11.2019)

Obrázek 46:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 2 (11.11.2019)

Obrázek 47:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 1 (11.11.2019)

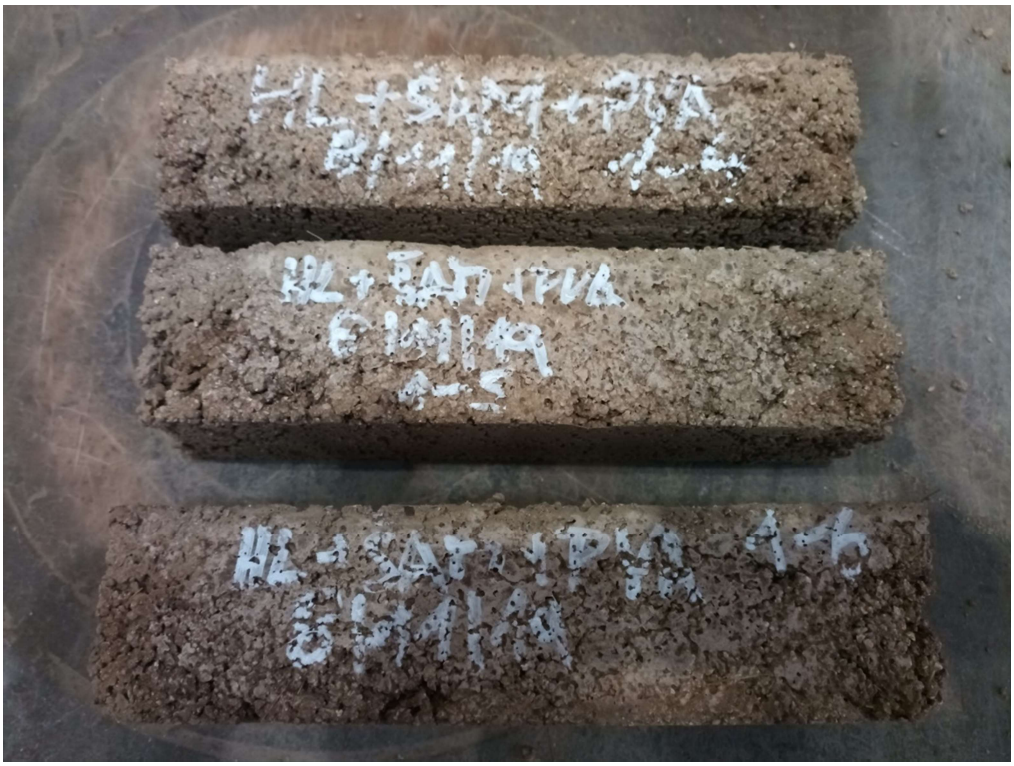
Obrázek 48:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 1 (11.11.2019)

Obrázek 49:Odbedňování vzorků – pohled na vyplněné formy; směs 1

(11.11.2019)

Obrázek 50:Odbedňování vzorků – směs 1

(11.11.2019)



Obrázek 51:Odbedňování vzorků – směs 1

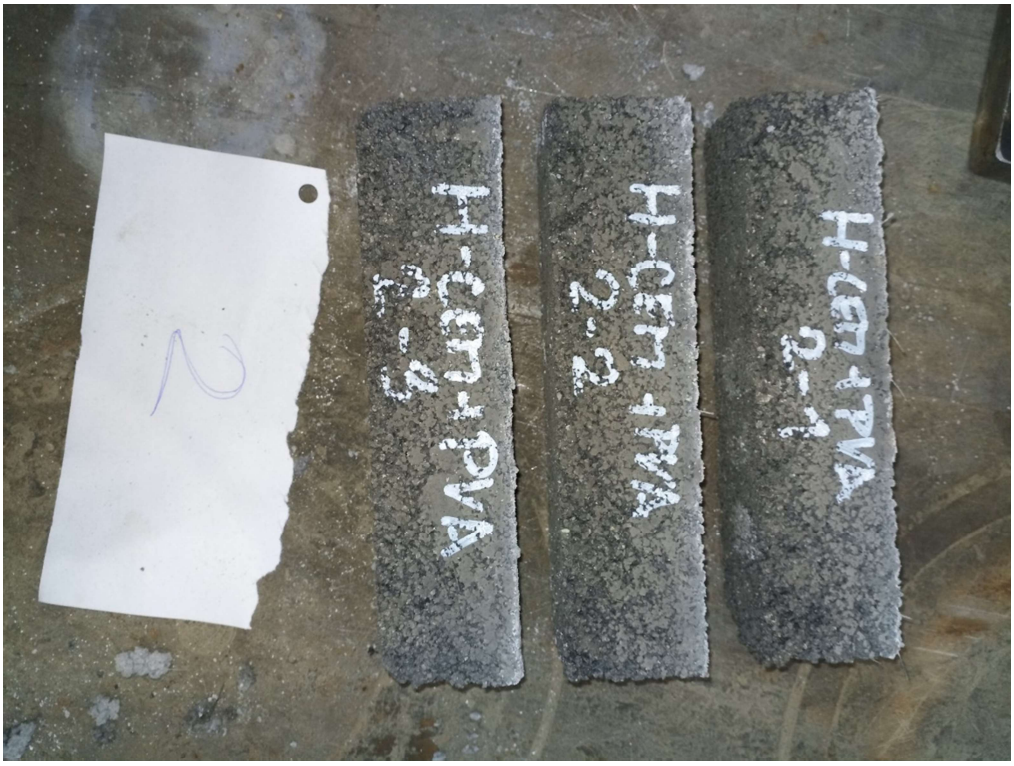
(11.11.2019)

Obrázek 52:Odbedňování vzorků – směs 2

(11.11.2019)

Obrázek 53:Odbedňování vzorků – směs 2, přisvíceno

(11.11.2019)



Obrázek 54:Odbedňování vzorků – směs 2

(11.11.2019)

Obrázek 55:Odbedňování vzorků – směs 3

(11.11.2019)

Obrázek 56:Odbedňování vzorků – směs 3, přisvíceno

(11.11.2019)

Obrázek 57:Odbedňování vzorků – směs 3

(11.11.2019)

Obrázek 58:Odbedňování vzorků – směs 3

(11.11.2019)

Obrázek 59:Odbedňování vzorků – směs 3, přisvíceno

(11.11.2019)

Obrázek 60:Odbedňování vzorků – směs 3, méně rozdrcený experlit*

(11.11.2019)

Obrázek 61:Odbedňování vzorků – směs 3, méně rozdrcený experlit*

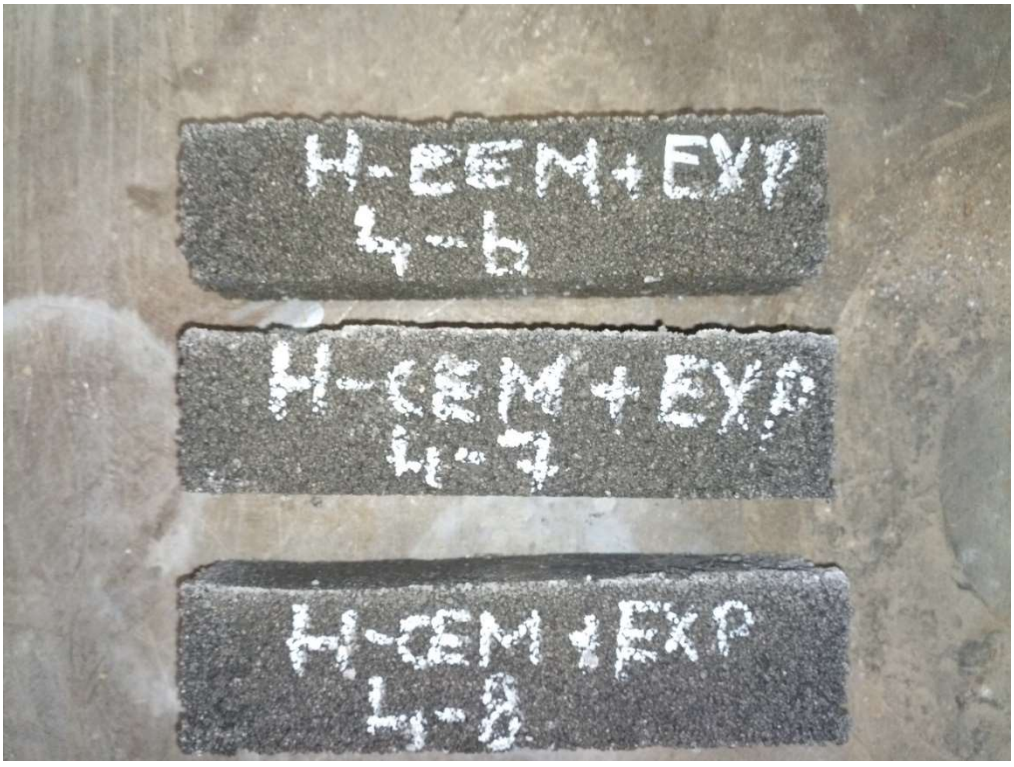
(11.11.2019)

Obrázek 62:Odbedňování vzorků – směs 4

(11.11.2019)

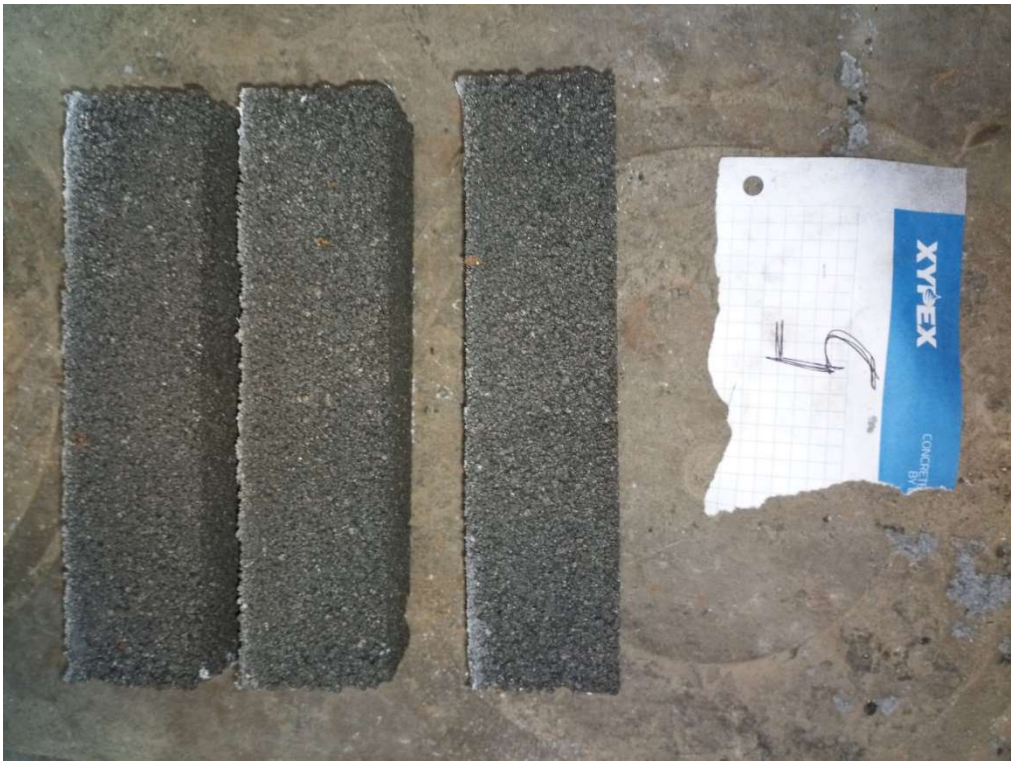
Obrázek 63:Odbedňování vzorků – směs 4, přisvíceno

(11.11.2019)



Obrázek 64:Odbedňování vzorků – směs 4

(11.11.2019)



Obrázek 65:Odbedňování vzorků – směs 5

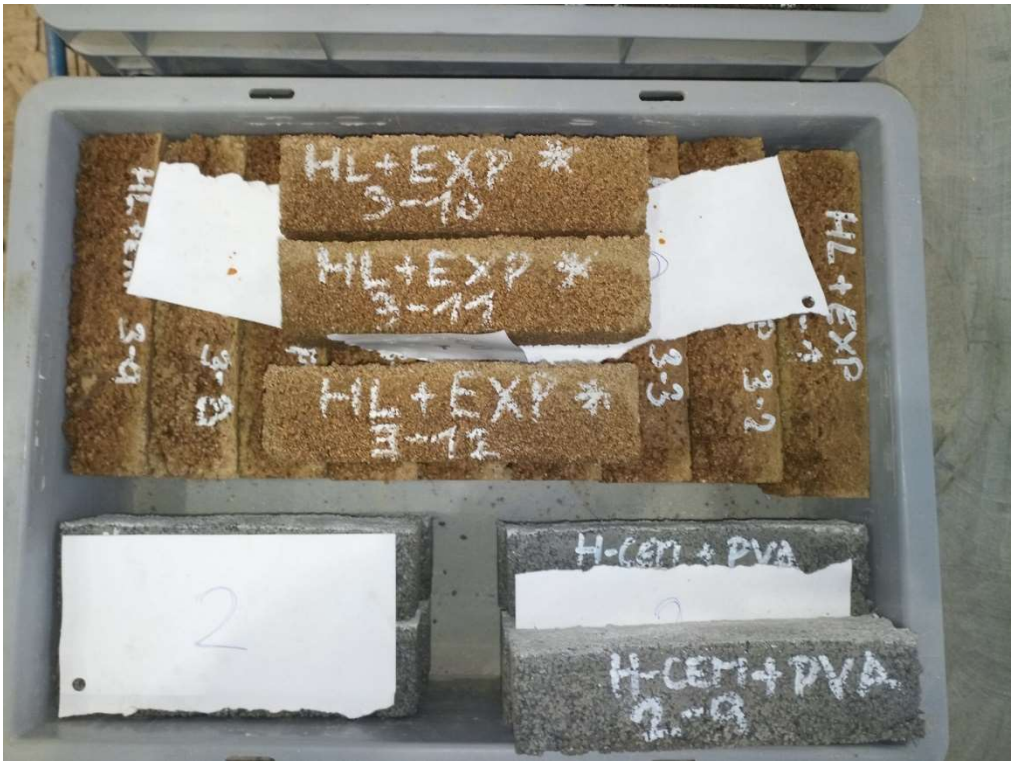
(11.11.2019)

Obrázek 66:Odbedňování vzorků – směs 5

(11.11.2019)

Obrázek 67:Odbedňování vzorků – směs 5

(11.11.2019)

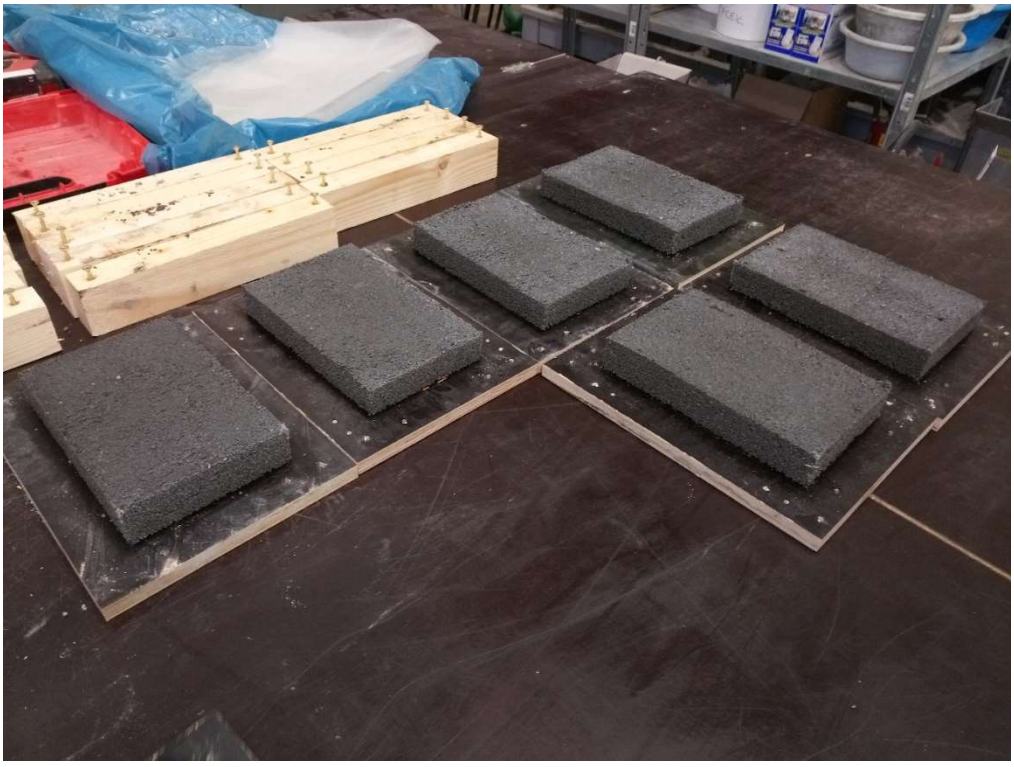


Obrázek 68:Odbedňování vzorků – uložení vzorků do beden

(11.11.2019)

Obrázek 69:Odbedňování vzorků – uložení vzorků do beden

(11.11.2019)



Obrázek 70:Odbedňování vzorků – chráněné plechy

(11.11.2019)

Obrázek 71:Odbedňování vzorků – směs 5

(11.11.2019)

Obrázek 72:Odbedňování vzorků – směs 4

(11.11.2019)

Obrázek 73:Odbedňování vzorků – směs 3

(11.11.2019)

Obrázek 74:Odbedňování vzorků – směs 2

(11.11.2019)

Obrázek 75:Uskladnění vzorků – převoz vzorků na přeměření a uložení do teploty 32 °C (11.11.2019)

Obrázek 76:Uskladnění vzorků – převoz vzorků na přeměření a uložení do teploty 32 °C (11.11.2019)

Obrázek 77:Uskladnění vzorků – převoz vzorků na přeměření a uložení do teploty 32 °C (11.11.2019)

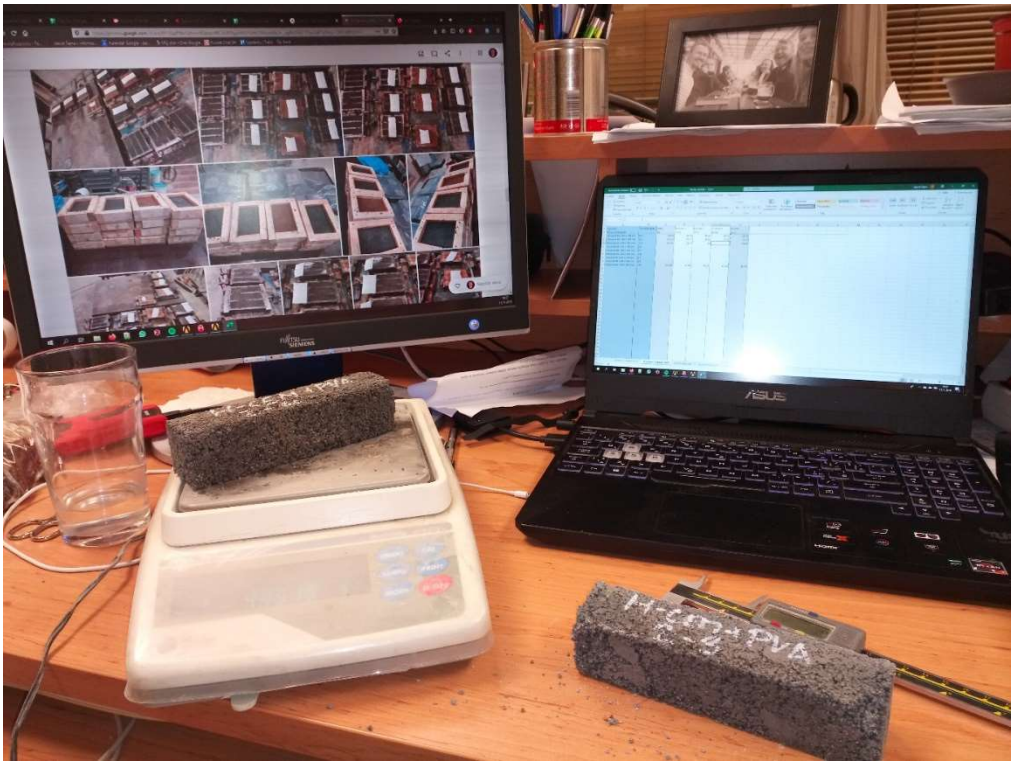
Obrázek 78:Uskladnění vzorků – převoz vzorků na přeměření a uložení do teploty 32 °C (11.11.2019)

Obrázek 79:Úklid po odbedňovacích pracích– čištění forem

(11.11.2019)

Obrázek 80: První měření vzorků po odbednění

(11.11.2019)



Obrázek 81: První měření vzorků po odbednění

(11.11.2019)

Obrázek 82: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – vybalení ze zapečetěné bedny

(25.11.2019)

Obrázek 83: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – vybalení ze zapečetěné bedny (25.11.2019)

Obrázek 84: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – Porušený jediný vzorek, směs 5 (25.11.2019)

Obrázek 85: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – Porušený jediný vzorek, směs 5 (25.11.2019)

Obrázek 86: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – Porušený jediný vzorek, směs 5 (25.11.2019)

Obrázek 87: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – vybalení ze zapečetěné bedny (25.11.2019)

Obrázek 88: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – rozmístění vzorků v sušárně (25.11.2019)

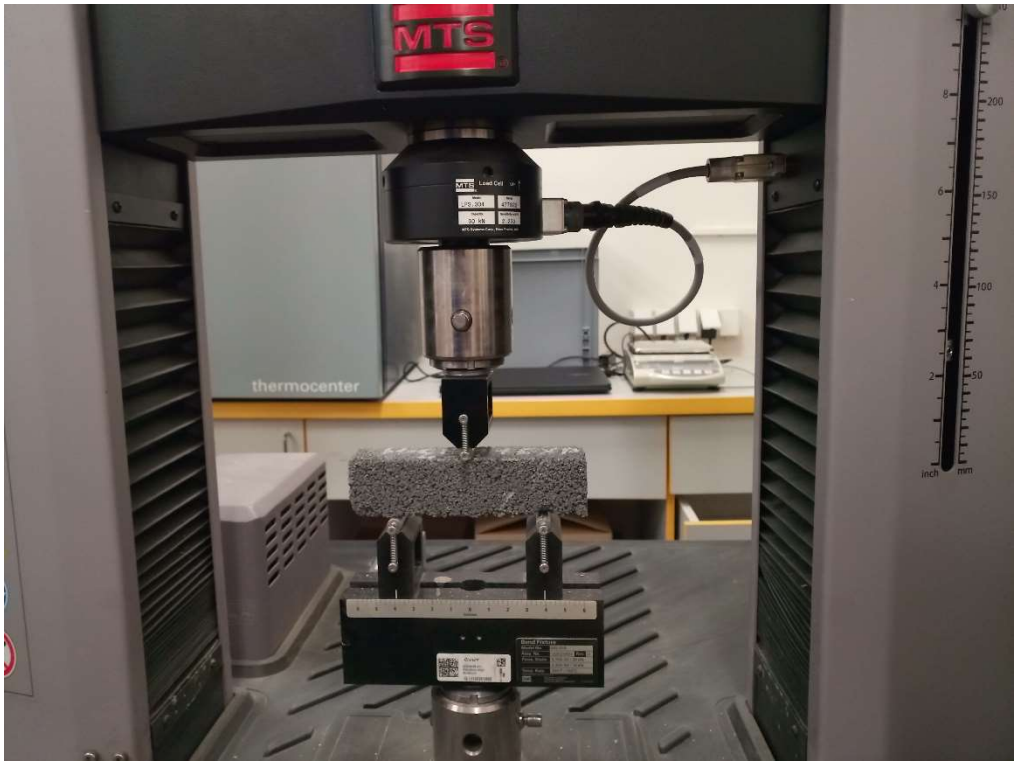
Obrázek 89: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – rozmístění vzorků v sušárně (25.11.2019)

Obrázek 90: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – rozmístění vzorků v sušárně (25.11.2019)

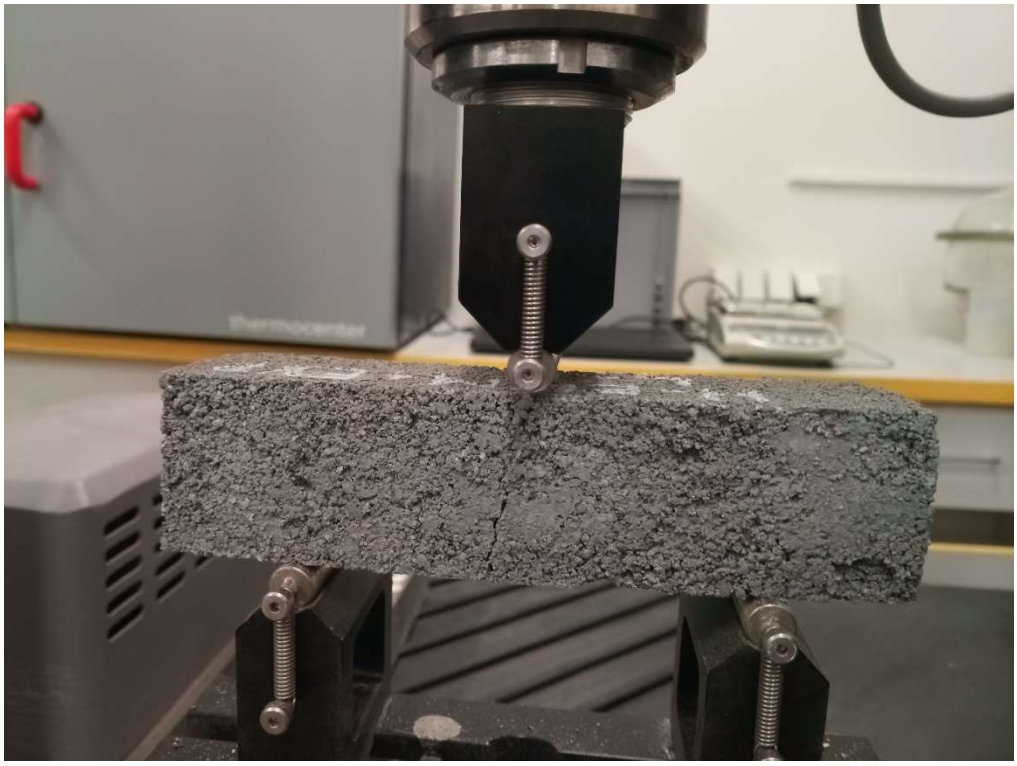
Obrázek 91: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – rozmístění vzorků v sušárně (25.11.2019)

Obrázek 92: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – rozmístění vzorků v sušárně (25.11.2019)

Obrázek 93: Příprava vzorků na sušení v 40 °C – rozmístění vzorků v sušárně (25.11.2019)



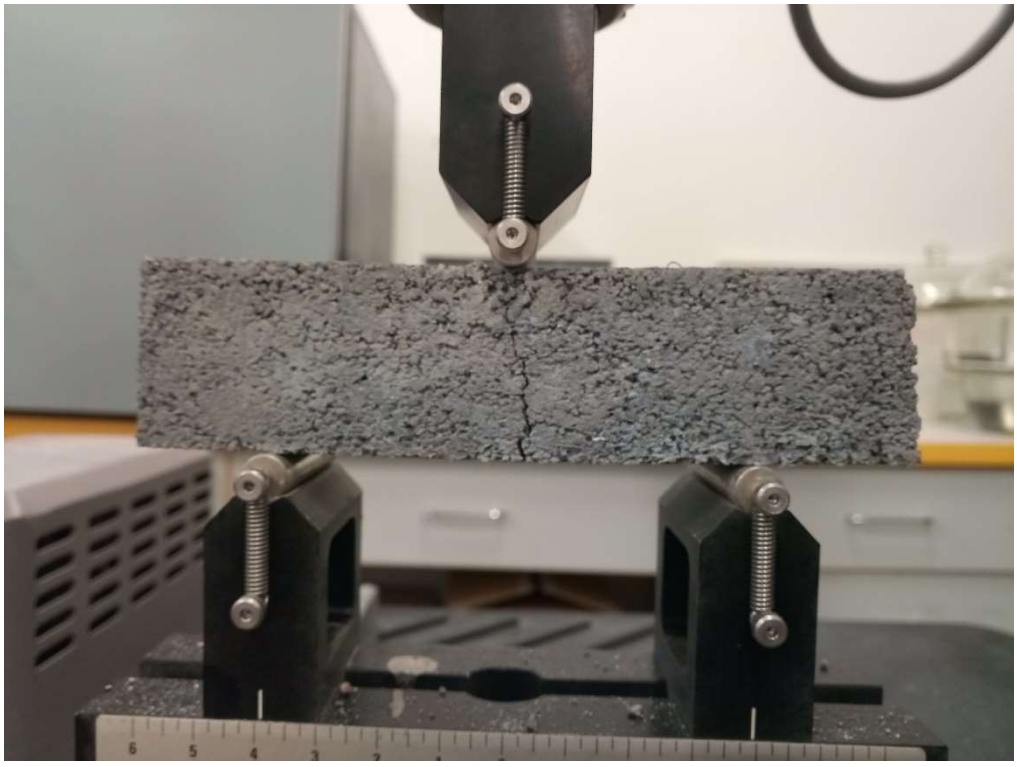
Obrázek 94: Zkoušky pevnosti vzorků – Trhací stroj MTS (4.12.2019)



Obrázek 95: Zkoušky pevnosti vzorků – vzorek směs 4, viditelná prasklina (4.12.2019)

Obrázek 96: Zkoušky pevnosti vzorků – vzorek směs 4, rozlomený (4.12.2019)

Obrázek 97: Zkoušky pevnosti vzorků – vzorek směs 4, pohled na strukturu v lomu (4.12.2019)



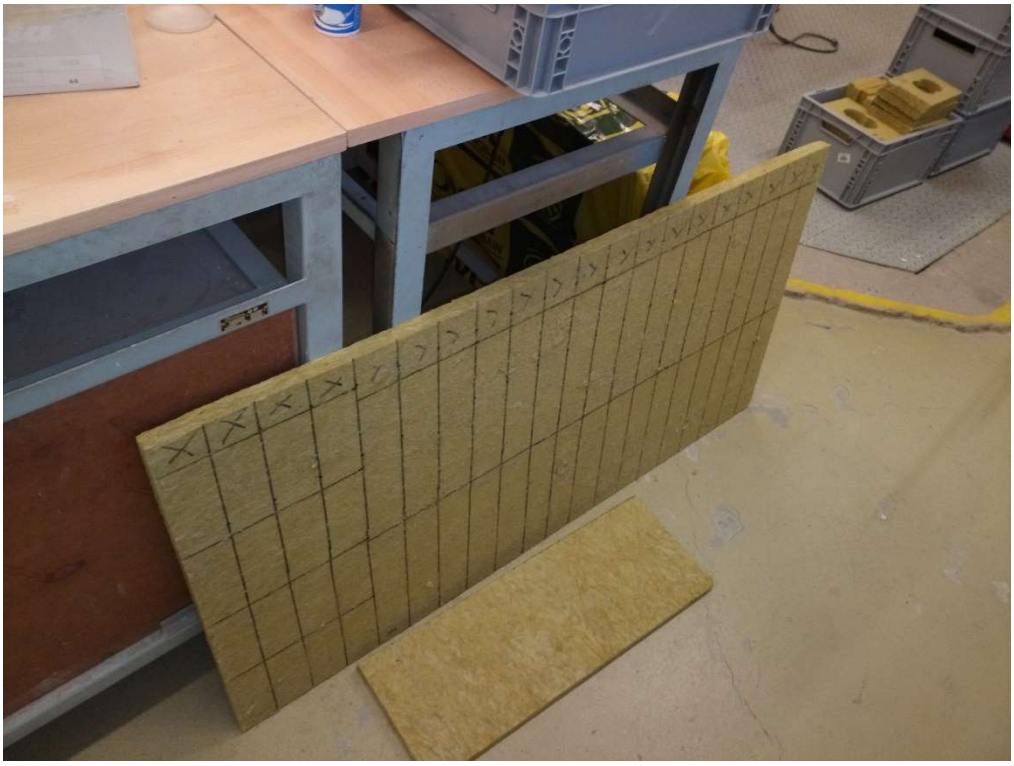
Obrázek 98: Zkoušky pevnosti vzorků – vzorek směs 2, viditelná prasklina (4.12.2019)

Obrázek 99: Zkoušky pevnosti vzorků – vzorek směs 2, pohled na strukturu v lomu (4.12.2019)

Obrázek 100: Zkoušky pevnosti vzorků – vzorek směs 3, pohled na strukturu v lomu (4.12.2019)

Obrázek 101: Příprava vzorků na experiment – výroba svorek pro připevnění termočlánků (10.12.2019)

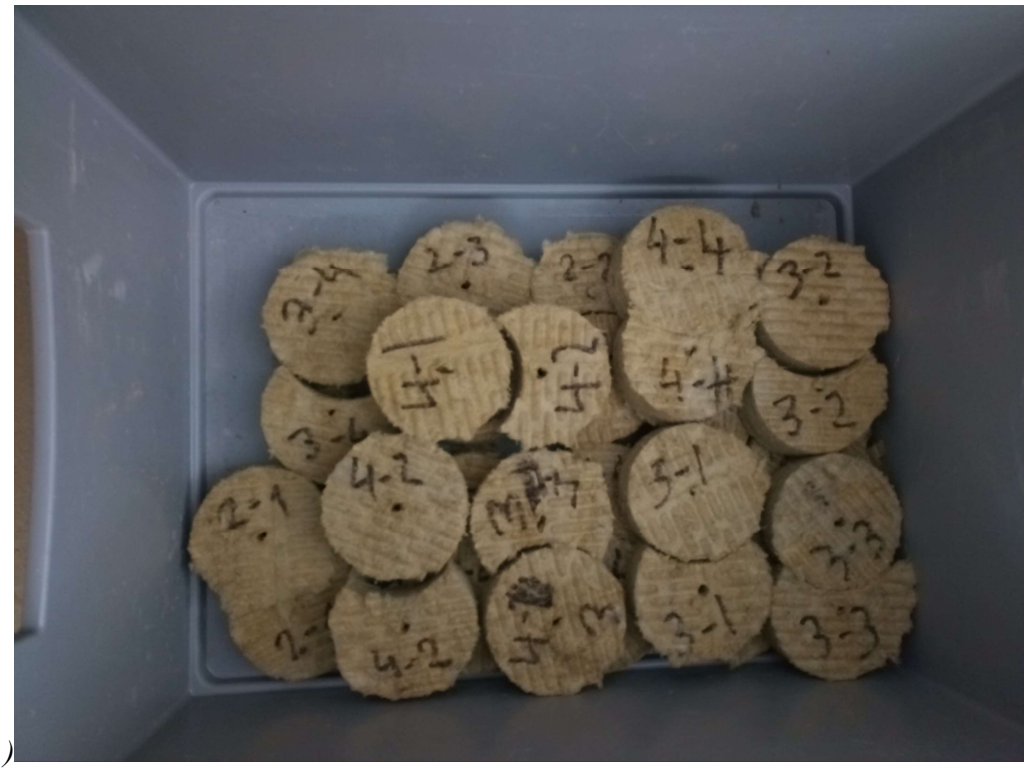
Obrázek 102: Příprava vzorků na experiment – výroba izolační vrstvy, rozkreslení (10.12.2019)



Obrázek 103: Příprava vzorků na experiment – výroba izolační vrstvy, rozkreslení 2 (10.12.2019)

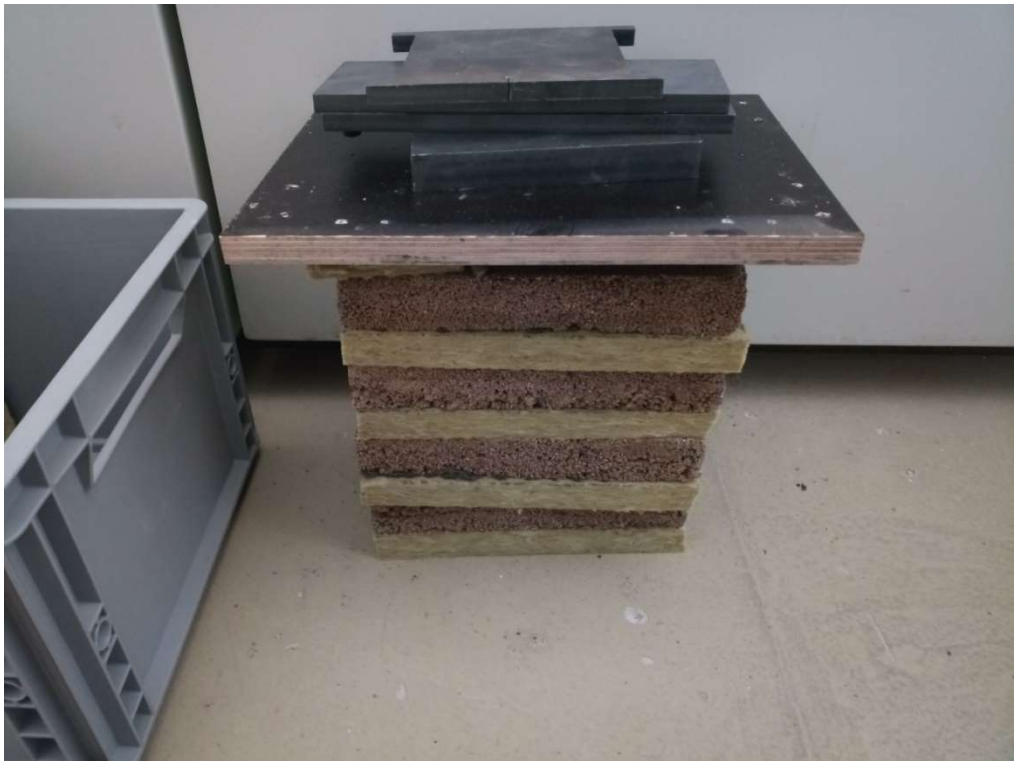
Obrázek 104: Příprava vzorků na experiment – výroba izolační vrstvy, řezání (10.12.2019)

Obrázek 105: Příprava vzorků na experiment – výroba izolační vrstvy, vykroužení prostupu pro závitovou tyč a termočlánky (10.12.2019)



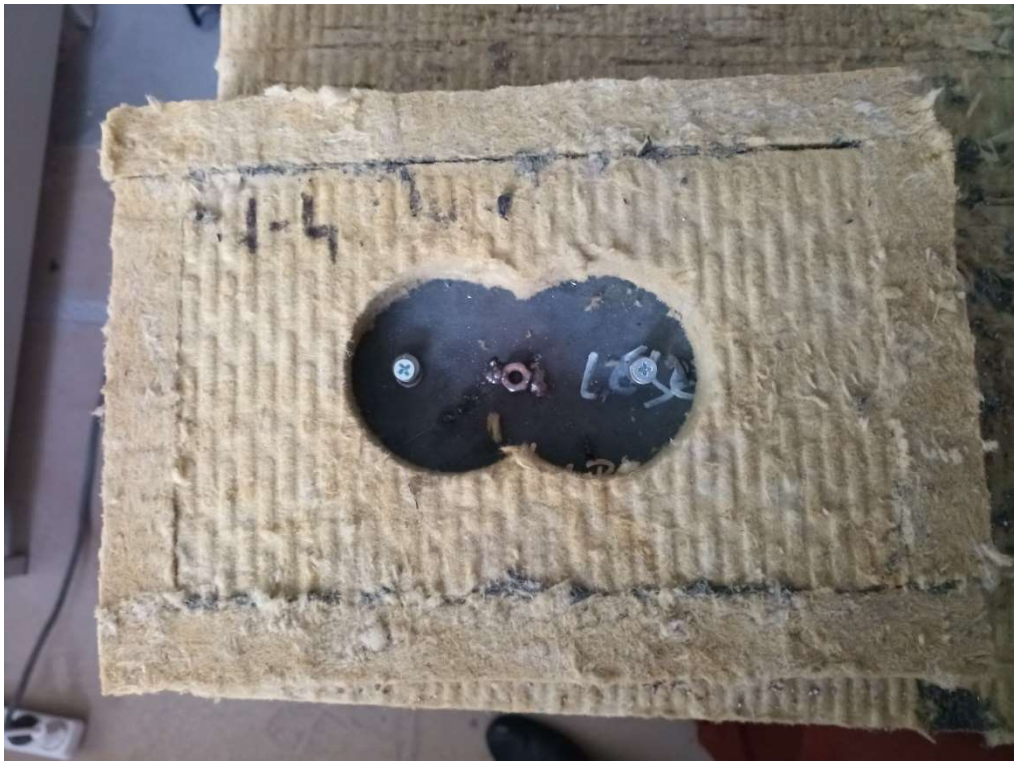
)

Obrázek 106: Příprava vzorků na experiment – výroba izolační vrstvy, zátky pro zakrytí termočlánků (10.12.2019)



Obrázek 107: Příprava vzorků na experiment – zatížení pro vytvrdnutí lepidla (11. 12. 2019)

Obrázek 108: Příprava vzorků na experiment – zatížení pro vytvrdnutí lepidla (11. 12. 2019)



Obrázek 109: Příprava vzorků na experiment – nalepené strany izolace na vzorek (11. 12. 2019)

Obrázek 110: Příprava vzorků na experiment – pohled na hotový vzorek ze spodní strany, která bude zatěžována (11. 12. 2019)

Obrázek 111: Příprava vzorků na experiment – lepení boční izolace

(11. 12. 2019)

Obrázek 112: Příprava vzorků na experiment – zabalený vzorek pro převoz na UCCEB ČVUT

(11. 12. 2019)

Obrázek 113: Experiment – přichycení termočlánků ke zkoušeným vzorkům (13. 12. 2019)

Obrázek 114: Experiment – zadělaný otvor pro termočlánky, připravený vzorek na experiment, směs 2 H-Cement, šamotový písek a PVA vlákna (13. 12. 2019)

Obrázek 115: Experiment – závěsný systém na peci

(13. 12. 2019)

Obrázek 116: Experiment – zavěšené vzorky v peci

(13. 12. 2019)

Obrázek 117: Experiment – pohled na všechny vzorky v peci připravené na experiment, směs 2 H-Cement, šamotový písek a PVA vlákna (13. 12. 2019)

Obrázek 118: Experiment zahájení prvního zatěžování vzorků, směs 2 (13. 12. 2019)

Obrázek 119: Experiment – záznam průběhu experimentu

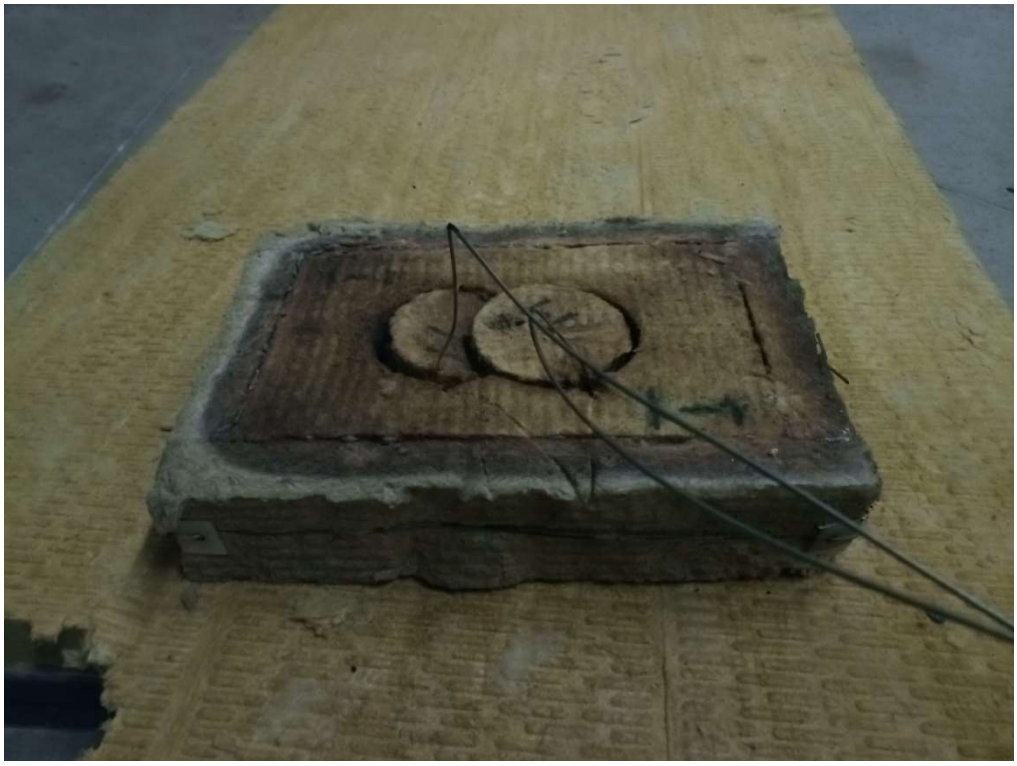
(13. 12. 2019)

Obrázek 120: Experiment – příprava druhé sady vzorků, Hlinitanový cement s experlitem

(13. 12. 2019)

Obrázek 121: Experiment – otestovaný vzorek ze směsi 2

(13. 12. 2019)



Obrázek 122: Experiment – otestovaný vzorek ze směsi 2

(13. 12. 2019)

Obrázek 123: Experiment – pohled na spodní stranu vzorku

(13. 12. 2019)

Obrázek 124: Experiment – porovnání vzorků, vlevo vzorek po experimentu, vpravo vzorek před experimentem (13. 12. 2019)

Obrázek 125: Experiment – pohled na spálená místa na podkladové ploše z minerální vaty pro chladnutí vzorků (13. 12. 2019)

Obrázek 126: Experiment – oddělení minerální vaty vlivem chladnutí vzorku (13. 12. 2019)

Obrázek 127: Experiment – oddělané boční izolace, povrh neporušený, směs 2 H-Cement, šamotový písek a PVA vlákna (13. 12. 2019)

Obrázek 128: Experiment – Příprava vzorků třetí sady, H-Cement s experlitem (13. 12. 2019)

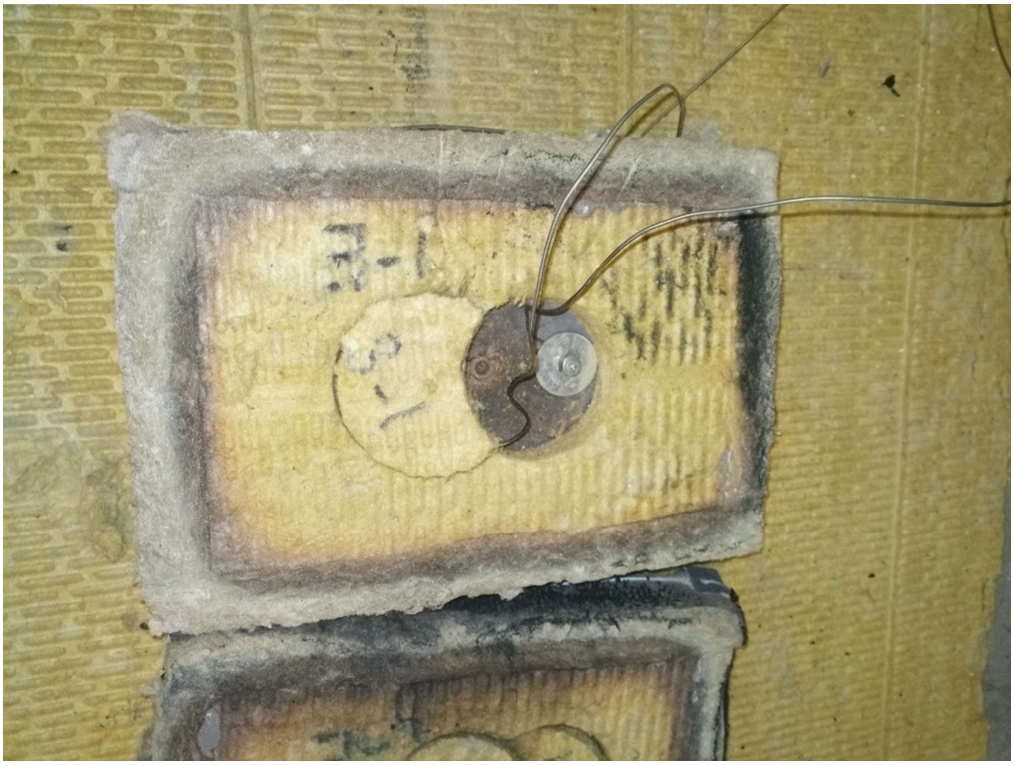
Obrázek 129: Experiment – odzkoušené vzorky Hlinitanového cementu s experlitem (13. 12. 2019)

Obrázek 130: Experiment – změna barvy vzorku s hlinitanovým cementem (13. 12. 2019)

Obrázek 131: Experiment – viditelné praskliny v třetinách vzorku, směs 3 Hlinitanový cement s experlitem (13. 12. 2019)

Obrázek 132: Experiment – viditelné praskliny v třetinách vzorku, pohled z boku (13. 12. 2019)

Obrázek 133: Experiment – pozůstatky očouzení na stropě pece po vzorcích (13. 12. 2019)



Obrázek 134: Experiment – odzkoušený vzorek směsi 4, H-Cement s expelitem (13. 12. 2019)

Obrázek 135: Experiment – viditelné praskliny po zchladnutí vzorku po oddělání izolační vrstvy (13. 12. 2019)

Obrázek 136: Experiment – viditelné praskliny po zchladnutí vzorku po oddělání izolační vrstvy (13. 12. 2019)

Obrázek 137: Experiment – uložení vzorků před přepravou

(13. 12. 2019)

Obrázek 138: Experiment – odpadnutí rohů po zchladnutí vzorku, směs 4 H-Cement s experlitem

(13. 12. 2019)

Obrázek 139: Experiment – odpadnutí rohů po zchladnutí vzorku, směs 4 H-Cement s experlitem (13. 12. 2019)

Obrázek 140: Experiment – odpadnutí rohů po zchladnutí vzorku, směs 4 H-Cement s experlitem (13. 12. 2019)

Obrázek 141: Experiment – odpadnutí rohů po zchladnutí vzorku, směs 4 H-Cement s experlitem (13. 12. 2019)

Obrázek 142: Experiment – připravená čtvrtá sada vzorků pro zkoušení, směs 5 H-Cement s experlitem a čedičovými vlákny (13. 12. 2019)

Obrázek 143: Experiment – zahájení čtvrté části experimentu, směs 5 H-Cement s experlitem a čedičovými vlákny (13. 12. 2019)

Obrázek 144: Experiment – odzkoušené prvky směsi 5 (13. 12. 2019)

Obrázek 145: Experiment – odpadnutí rohů po zchladnutí vzorku, směs 5 H-Cement s experlitem a čedičovými vlákny (13. 12. 2019)

Obrázek 146: Experiment – odpadnutí rohů po zchladnutí vzorku, směs 5 H-Cement s experlitem a čedičovými vlákny (13. 12. 2019)