

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Experimentální a numerická analýza různých druhů betonu tunelových ostění vystavených požáru

Experimental and numerical analysis
of different types of tunnel lining
concrete exposed to fire

Studijní program: Integrální bezpečnost staveb

Bc. Anna Lisová

Vedoucí práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

2026

Obsah

Obsah.....	2
Abstrakt.....	5
Abstract	5
Seznam zkratek	8
1 Úvod.....	9
1.1 Požární bezpečnost tunelových staveb.....	9
1.2 Cíle práce	9
2 Současný stav poznání	10
2.1 Normativní předpisy	10
2.1.1 Požadovaná požární odolnost.....	10
2.2 Odštěpování betonu.....	12
2.3 Vliv složení betonu na odštěpování.....	13
2.4 Polypropylenová vlákna.....	14
2.5 Provzdušňovací přísady	15
3 Příprava a průběh požární zkoušky	16
3.1 Příprava požární zkoušky.....	16
3.1.1 Zkušební vzorky.....	17
3.1.2 Složení betonových směsí.....	19
3.2 Průběh zkoušky	19
4 Vyhodnocení požární zkoušky.....	21
4.1 Odštěpení panelů	21
4.1.1 Odštěpení a bobtnání kameniva.....	24
4.2 Zkoušky reziduálních vlastností betonu.....	26
4.2.1 Tvrdoměrná zkouška.....	26
4.2.2 Reziduální pevnost betonu v tlaku a v tahu.....	29
4.3 Vizualizace výsledků.....	31
4.3.1 Vizualizační program.....	31
4.3.2 Výsledky vizualizace	32
4.3.3 Vyhodnocení a vizualizace odštěpení pomocí programu	40
4.4 Teplotní profily a teplotní vývoje.....	43
5 Numerická analýza transportu tepla.....	51
5.1 Popis matematického modelu sdílení tepla a jeho numerického řešení.....	51
5.1.1 Numerické řešení a formulace MKP	52
5.2 Teplotní a fyzikální parametry betonu	54
5.2.1 Tepelná vodivost.....	54
5.2.2 Tepelná kapacita.....	55
5.2.3 Objemová hmotnost	56

5.3	Teplotní křivky.....	57
5.3.1	Normová teplotní křivka	57
5.3.2	Uhlovodíková teplotní křivka.....	57
5.4	Numerické řešení.....	58
5.4.1	Výpočetní program	58
5.4.2	Postup výpočtu.....	58
5.5	Porovnání experimentálních dat s výsledky numerické analýzy.....	62
5.5.1	Okrajové podmínky	62
5.5.2	Vyhodnocení.....	62
6	Závěr.....	78
Seznam obrázků		82
Seznam tabulek.....		84
Přílohy.....		85
Literatura.....		86

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Lisová Jméno: Anna Osobní číslo: 501791
Fakulta/ústav: Fakulta stavební
Zadávající katedra/ústav: Katedra betonových a zděných konstrukcí
Studijní program: Integrální bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Experimentální a numerická analýza různých druhů betonu tunelových ostění vystavených požáru

Název diplomové práce anglicky:

Experimental and numerical analysis of different types of tunnel lining concrete exposed to fire

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Radek Štefan, Ph.D. katedra betonových a zděných konstrukcí FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: 23.09.2025

Termín odevzdání diplomové práce: 05.01.2026

Lukáš Vráblík

Digitálně podepsal(a)
Lukáš Vráblík
Datum: 25.09.2025
07:11:25
ID: 325371

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Jiří Máca

Digitálně podepsal(a)
Jiří Máca
Datum: 25.09.2025
07:21:56
ID: 10845

podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

25.09.2025

Datum převzetí zadání

Bc. Lisová Anna

Podpis studentky

Abstrakt

Tato práce se zaměřuje na problematiku požární bezpečnosti tunelových staveb, konkrétně na chování betonových ostění při vystavení vysokým teplotám. Cílem práce je experimentálně posoudit účinnost různých betonových směsí obsahujících polypropylenová vlákna anebo provzdušnění k prevenci odštěpování, které představuje vážnou hrozbu pro statickou stabilitu ostění a celkovou bezpečnost tunelové stavby. Ke sledování degradačních procesů materiálu a změn mechanických vlastností při vysokých teplotách byla provedena velkorozměrová požární zkouška. Praktickým přínosem práce je zhodnocení složení betonu tunelových ostění vystavených požáru zejména z hlediska obsahu polypropylenových vláken a provzdušnění. Reálné chování betonových směsí při požární zkoušce je v této práci porovnáno s numerickými modely (programy).

Klíčová slova

Degradace materiálu; odštěpování; polypropylenová vlákna; požární odolnost; provzdušnění; receptura betonu; specifikace betonu; tunelová ostění; požární zkouška; vlhkost; požární experiment; numerická analýza

Abstract

This thesis focuses on the issue of fire safety in tunnel structures, specifically on the behavior of concrete tunnel linings when exposed to high temperatures. The aim of the thesis is to experimentally evaluate the effectiveness of different concrete mixes containing polypropylene fibers and/or air-entraining agents in preventing spalling, which represents a serious threat to the structural stability of tunnel linings and the overall safety of the tunnel structure. To monitor the degradation processes of the material and changes in its mechanical properties at elevated temperatures, a large-scale fire test was carried out. The practical contribution of this work is the evaluation of tunnel lining concrete mixtures exposed to fire, focusing mainly on how the amount of PP fibers and air-entrainment affect their performance. The actual behavior of the concrete mixtures observed during the fire tests is compared with numerical models, providing a link between experimental findings and numerical simulation of thermal and mechanical response under fire exposure.

Keywords

Material degradation; spalling; polypropylene fibers; fire resistance; aeration; concrete mixture; concrete specification; tunnel linings; fire test; moisture; fire experiment; numerical analysis

PROHLÁŠENÍ

Já, níže podepsaná

Příjmení, jméno studenta: Lisová Anna
Osobní číslo: 501791
Název programu: Integrální bezpečnost staveb

prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem

Experimentální a numerická analýza různých druhů betonu tunelových ostění vystavených požáru

vypracovala samostatně a uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací a Rámcovými pravidly používání umělé inteligence na ČVUT pro studijní a pedagogické účely v Bc a NM studiu.

Prohlašuji, že jsem v průběhu příprav a psaní závěrečné práce použila nástroje umělé inteligence. Vygenerovaný obsah jsem ověřila. Stvrzuji, že jsem si vědoma, že za obsah závěrečné práce plně zodpovídám.

V Praze dne 25.09.2025

Bc. Anna Lisová

.....
podpis studenta

Poděkování

Velké poděkování patří především všem členům Katedry betonových a zděných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT v Praze za pomoc v průběhu celého procesu přípravy experimentu. Bez jejich přípravy a pomoci by tato práce nemohla vzniknout. Speciální dík směruji svému vedoucímu, Ing. Radku Štefanovi, Ph.D., za jeho nepřetržitou ochotu a pomoc v kteroukoliv denní i noční dobu. Stejně tak děkuji Ing. Jakubu Holanovi, Ph.D., za cenné konzultace. V neposlední řadě patří velké poděkování mé rodině za podporu během celých pěti let studia, a to i v náročnějších chvílích. Zvláště pak děkuji své sestře za veškerou IT pomoc a trpělivost, kterou mi věnovala.

Diplomová práce vznikla za podpory projektu TAČR CK04000274 „Výzkum a vývoj inovativních metod a materiálů pro navrhování tunelových staveb z hlediska požární bezpečnosti“ a také za podpory projektu Studentské grantové soutěže ČVUT SGS25/037/OHK1/1T/11 „Inovativní přístupy pro analýzu konstrukcí vystavených požáru a výbuchu“.

Seznam zkrátek

CFD – Computational Fluid Dynamics (Výpočetní dynamika tekutin)

ČSN – Česká technická norma

ČVUT – České vysoké učení technické v Praze

DP1 – Druh konstrukční části 1 (z hlediska požární odolnosti)

EN – Evropská norma

FDS – Fire Dynamics Simulator

HC – Uhlovodíková teplotní křivka

HCinc – Modifikovaná uhlovodíková teplotní křivka

HPC – High Performance Concrete (Vysokohodnotný beton)

ISO – International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)

ITA-AITES – International Tunnelling and Underground Space Association (Mezinárodní tunelářská asociace)

MKP – Metoda konečných prvků

PIARC – World Road Association (Světová silniční asociace)

PP – Polypropylenová vlákna

RWS – Rijkswaterstaat teplotní křivka

Sb. – Sbírka zákonů

SPB – Stupeň požární bezpečnosti

SVDult – Software pro vizualizaci dat z ultrazvukového měření

TA – TempAnalysis (software)

TA_s – TempAnalysis science (verze softwaru)

TČ – Termočlánek

UHPC – Ultra-High Performance Concrete (Ultra-vysokohodnotný beton)

w/c – Vodní součinitel (water/cement ratio)

1 Úvod

1.1 Požární bezpečnost tunelových staveb

Požární bezpečnost je jedním z klíčových prvků návrhu a realizace podzemních dopravních staveb. Tunely představují z hlediska požáru specifické a nebezpečné prostředí, které se zásadně liší od požárního zatížení nadzemních staveb. Uzavřený a omezený prostor výrazně urychluje šíření tepla, kouře a toxickejch plynů, což ztěžuje evakuaci i zásah hasičských jednotek. Zatímco standardní požáry v pozemních stavbách se typicky řídí normovou teplotní křivkou ISO 834, která simuluje požár s pomalejším nárůstem teploty, požáry v tunelech jsou typicky charakteristické extrémně rychlým nárůstem teploty a vysokou intenzitou sálání. Jsou generovány především hořených uhlovodíků (paliva, textil).

Se stále intenzivnějším provozem na silnicích se bezpečnost stává zásadní prioritou. Tunelové stavby jsou významnou součástí dopravní infrastruktury a usnadňují překonání často velmi dlouhých vzdáleností. Dlouhé tunelové stavby však představují hrozbu v případě vzniku požáru. Požáry představují extrémní nebezpečí nejen pro samotnou konstrukci, ale především pro životy cestujících. Vysoké teploty mohou vážně narušit statickou stabilitu tunelu – betonové ostění při požáru ztrácí své mechanické vlastnosti, což vede k rychlé degradaci materiálu a riziku jeho selhání. Proto je důkladný statický návrh, odolná konstrukce a moderní bezpečnostní řešení nezbytným předpokladem pro bezpečný a spolehlivý provoz tunelů. Součástí návrhu bezpečné konstrukce je klíčový materiál, ze kterého je konstrukce tvořena. V současném poznání víme, že nelze použít stejně betonové směsi pro tunelové ostění jako v běžných stavbách. Tunely se vyznačují zvýšenou vlhkostí vnitřního prostředí a vývoj požáru zde má jiný charakter.

1.2 Cíle práce

Tato diplomová práce se zaměřuje na experimentální ověření různých složení betonových směsí s cílem zhodnotit jejich chování při vysokých teplotách a schopnost odolávat odštěpování. Součástí výzkumu je provedení velkorozměrové požární zkoušky, která umožní komplexní sledování změn materiálových vlastností a degradace betonu v reálném měřítku a čase.

Hlavním cílem práce je přispět k hlubšímu porozumění mechanismům, které vedou k poškození betonového ostění při požáru, a navrhnut směsi betonu s vyšší odolností proti odštěpování. Získané poznatky mohou být využity nejen při navrhování nových tunelových staveb, ale i při sanacích a modernizacích stávajících podzemních děl. Práce má za cíl nejen teoretický, ale i praktický přínos pro oblast navrhování a hodnocení bezpečnosti podzemních konstrukcí vystavených účinkům požáru.

2 Současný stav poznání

Beton je všeobecný kompozitní materiál, jehož vlastnosti lze cíleně ovlivnit správnou volbou a poměrem jednotlivých složek. Standardní beton se skládá z pěti základních složek: cementu, kameniva (písek a štěrk), vody, příměsi (např. popílku či strusky) a chemických přísad (např. zpomalovačů tuhnutí nebo plastifikátorů). Jejich kvalita a přesné dávkování mají zásadní vliv na výsledné vlastnosti materiálu [1]. Konstrukce tunelového ostění je tvořena často vysokopevnostním betonem, který díky své husté mikrostruktury a nízké propustnosti efektivně odolává mechanickým účinkům a průsakům. Tato výhoda se však stává kritickou nevýhodou při požáru [2].

Jedním z moderních přístupů ke zvýšení požární odolnosti betonu je právě úprava jeho složení. Významnou roli zde hrají polypropylenová vlákna [3], která se při působení vysokých teplot roztaží a vytvoří v betonu jemné mikrokanálky. Tyto kanálky umožňují únik vodní páry, čímž se snižuje riziko explozivního odštěpení betonu při požáru [4].

Dalším efektivním prvkem jsou provzdušňovací přísady, které zajišťují vznik jemně póravité struktury. Tato struktura napomáhá rovnoměrnému rozložení tlaku uvnitř betonu při zahřátí a přispívá k jeho vyšší teplotní stabilitě [5]. Normy, jako například ČSN EN 1992-1-2 [6], definují doporučené dávkování těchto příměsí či přísad i požadavky na složení a vlastnosti betonu určeného pro konstrukce vystavené účinkům požáru.

2.1 Normativní předpisy

V českých i evropských předpisech je požár považován za mimořádné zatížení viz ČSN EN 1990 [7]. Pro projektování tunelových staveb neexistují v současné době v ČR normativní postupy pro exaktní navrhování požární bezpečnosti tunelových staveb. V současné době se tunelové stavby projektují na základě požárních předpisů stanovující obecné požadavky na požární bezpečnost staveb jako jsou ČSN 73 0802 [8] a ČSN 73 0804 [9] a doplňují se inženýrským přístupem na základě modelování požáru v programech jako jsou například CFD nebo FDS programy. Nařízení vlády č. 264/2009 Sb., o bezpečnostních požadavcích na tunely pozemních komunikací delší než 500 metrů udává povinnost zpracovat bezpečnostní dokumentaci. Bezpečnostní dokumentace pro tunel ve fázi projektování obsahuje zejména odborné stanovisko k celkové bezpečnosti tunelu zpracované autorizovaným inženýrem, kterému byla udělena autorizace pro obory dopravní stavby a požární bezpečnost staveb [10].

2.1.1 Požadovaná požární odolnost

V současné době se tunelové stavby projektují dle ČSN 73 7507 - Projektování tunelů pozemních komunikací [11]. Tato norma řeší návrh nových tunelových staveb z hlediska konstrukčních pokynů, požadavků na bezpečnostní úpravy a zásady požární bezpečnosti. V rámci projektové

dokumentace se kromě požárně bezpečnostní dokumentace zpracovává hodnocení rizik daného tunelu a pro tunely delší než 500 m se zpracovává navíc bezpečnostní dokumentace tunelu. Všechny tyto požadavky pomáhají docílit co nejvyšší bezpečnosti tunelových staveb, avšak stále není dostupný konkrétní předpis, který by stanovil přesná pravidla, jako mají například pozemní stavby [10].

Požární odolnost v tunelech se stanovuje na základě stupně požární bezpečnosti a charakteru provozu (ČSN 73 7507 [11]; ČSN 73 7508 [12]).

Požadovaná požární odolnost konstrukcí tunelů záleží na mnoha faktorech – např. zatřídění tunelu dle jeho délky dle ČSN 73 7507, čl. 4.2.3 [11], dělí tunely na:

- a) krátké – délky větší než 100 m až 500 m včetně,
- b) střední – délky větší než 500 m až 1000 m včetně,
- c) dlouhé – délky přes 1000 m.

V české legislativě nejsou požadavky na požární odolnost tunelů nikde explicitně definovány. Lze je pouze nepřímo odvodit z požadavků na požární stěny a stropy v podzemních podlažích dle Tabulky 12 normy ČSN 73 0802 ed. 2 [8], resp. tabulky 10 ČSN 73 0804 [9].

Dopravní prostor tunelové trouby je dle ČSN 73 7507 čl. 13.3.2 [11] taxativně zatříděn z hlediska požární bezpečnosti jako:

- a) V. SPB – krátké tunely (PO 120/DP1 podle [8, 9])
- b) VII. SPB – střední a dlouhé tunely (PO 180/DP1 podle [8, 9])

Tyto požadavky na požární odolnost tunelového ostění vycházejí z norem [8, 9], které hodnotí a vztahují své výsledky k normové teplotní křivce. Kromě místních českých předpisů a norem, jsou další mezinárodní předpisy stanovující obecná pravidla pro tunelové konstrukce. Pro silniční tunely s umožněním vjezdu nákladních aut a cisteren doporučují Světová silniční asociace PIARC a Mezinárodní tunelářské asociace ITA – AITES následující možnosti pro stanovení požadavků na požární odolnost konstrukcí:

- a) RWS/HC inc 120 minut, pokud je potřebná velká odolnost s ohledem na majetek (např. tunel pod zastavěnou oblastí) nebo velký význam pro silniční síť,
- b) ISO 120 minut ve většině případů, kdy to představuje relativně levný způsob omezování majetkových škod,
- c) vůbec žádná ochrana, bezpečnost není kritériem a nevyžaduje protipožární odolnost (jinou než jako prevenci progresivního zhroucení)

Zohlednění dalších cílů může vést k následujícím závěrům:

- ISO 60 minut (většina případů)
- vůbec žádná ochrana, pokud by ochrana konstrukce byla neúměrně nákladná v porovnání s cenou a narušením provozu během oprav po požáru [10].

Světová silniční asociace PIARC a Mezinárodní tunelářská asociace ITA – AITES reagovaly dále na sérii velkých tunelových požárů (např. Mont Blanc 1999, Tauern 1999) a stanovily cíle požární bezpečnosti – bezpečnou evakuaci, podmínky pro zásah, omezení škod a prevenci kolapsu. Pro tunely s provozem těžkých vozidel doporučují uhlovodíkové křivky nebo RWS s dobou trvání 120–180 min, zatímco pro osobní dopravu často postačí křivka ISO 834 [13].

Doplňujícím prvkem pro podložení požárně bezpečnostního řešení pro tunelové stavby jsou také teplotní analýzy požárního úseku. Jedná se o zpřesněné zónové modely, což jsou výpočetní modely založené na dynamice tekutin tzv. CFD modely.

2.2 Odštěpování betonu

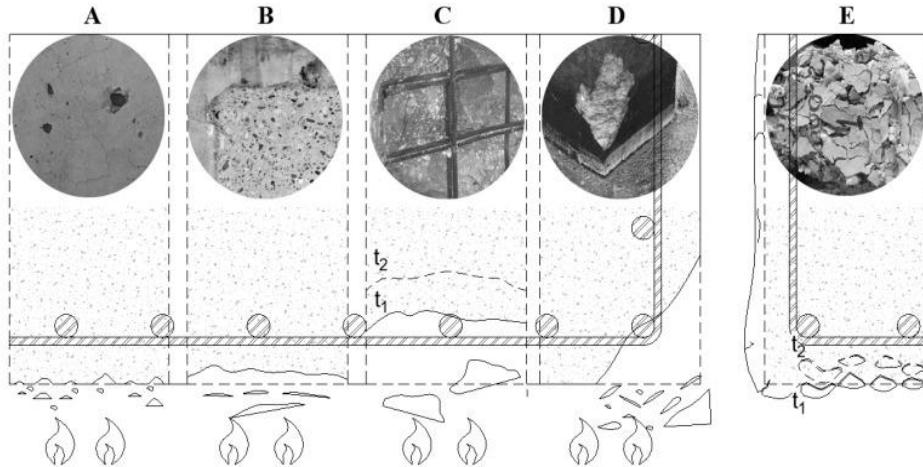
Odštěpování betonu je náhlá ztráta materiálu z povrchu prvku při vysokých teplotách, často doprovázená slyšitelným „výbuchem“ a prudkým odlomením vrstev krycího betonu. V literatuře se rozlišuje povrchové odštěpení/odlupování tenkých šupin, vrstvené odštěpování (po vrstvách), rohové/hranové odštěpování a tzv. explozivní odštěpování. Po požáru se může objevit i následné odloupání oslabených vrstev. Důsledkem odštěpování není pouze ztráta povrchové vrstvy, ale především zrychlení průniku tepla do hlubších vrstev konstrukce a k ocelové výztuži. Ztráta krycí vrstvy zrychluje ohřev výztuže. Výztuž rychleji ztrácí svou pevnost a mezi kluzu. Snižuje zbytkovou únosnost, vede k významnému zmenšení průřezu a tuhosti ostění, což může způsobit lokální nebo globální kolaps tunelové konstrukce [14].

Převládají dva vzájemně provázané mechanismy – hygro-termální, který představuje vznik vysokých tlaků vodní páry v pórech při rychlém ohřevu a omezeném odvětrání a termomechanický, při kterém vznikají tahová napětí z teplotních gradientů a z teplotních deformací mezi cementovou matricí a kamenivem. Výsledkem je ztráta stability ohřáté povrchové vrstvy a náhlé uvolnění akumulované energie ve formě odštěpování [15].

Souhrn experimentů ukazuje, že riziko explozivního odštěpování je vysoké při kombinaci: nízké počáteční propustnosti (HPC/UHPC, malý w/c), vyšší vlhkosti, rychlého ohřevu, vnějšího či vnitřního omezování teplotních deformací a nepříznivé petrografie kameniva. Naopak při velmi nízké vlhkosti nebo u materiálů s otevřenou pórovitou strukturou se destruktivní tlaky par nevyvinou do kritické úrovně [14].

K explozivnímu odštěpování dochází, když je beton náhle vystaven rychlému zahřívání. Voda uvnitř betonu se rychle mění na páru, která se snaží expandovat k povrch směrem ven z konstrukce. Pokud pára nemá možnost uniknout, vzniká v materiálu extrémní tlak, který má za následek odštěpování a odpadávání betonových vrstev často i v hlubších partiích. V této zóně se zvyšuje pórový tlak vodní páry, která působí tlakem na vnitřní strukturu materiálu. Když tento tlak překročí pevnost betonu v tahu, dochází k odštěpování.

Na základě přechozího zkoumání [3] můžeme popsat různé druhy odštěpování. Rozlišujeme odštěpování kameniva (A), povrchové odštěpování (B), explozivní odštěpování (C), odštěpování rohů konstrukce (D) a odštěpování vlivem chladnutí konstrukce (E). Jednotlivé typy viz Obrázek 1.



Obrázek 1 – Typy odštěpování (převzato z [3])

Odštěpování lze předcházet několika způsoby, které jsou v rámci této práce zkoumány. Použitím polypropylenových vláken, která při teplotách 170-175 °C tavením vytvářejí další únikové cesty pro páru. Dále lze tomuto jevu předcházet pomocí optimalizace vlhkostního součinitele betonu, jelikož vysoký obsah počáteční vody zvyšuje riziko odštěpování. Správným návrhem složení směsi např. snížení hutnosti pomocí provzdušnění nebo například použití správného kameniva [3].

2.3 Vliv složení betonu na odštěpování

Beton je kompozitní materiál, jehož výsledné atributy závisí na přesném poměru jednotlivých složek a jejich vlastnostech. Norma ČSN EN 206 [1] stanovuje základní požadavky na složení betonu a popisuje jednotlivé složky, ze kterých se beton připravuje. Správná definice jednotlivých složek je dále určeno v předpisech zaměřených na jednotlivé odvětví. Pro účely navrhování na odolnost proti odštěpování a obecně pro návrh za zvýšených teplot jsou tyto složky definovány dle ČSN EN 1992 1-2 [6], například doporučené dávkování polypropylenových vláken.

Jedním z přístupů ke zvýšení požární odolnosti betonu je úprava jeho složení prostřednictvím příměsí, především polypropylenových vláken, a optimalizací například pomocí provzdušnění. Polypropylenová vlákna vytváří při působení tepla tavením mikro kanálky [16], které umožňují únik vodní páry a snižují riziko explozivního odštěpování. Provzdušněné betony pak díky svému vnitřnímu pórrozitému systému mohou rovněž napomáhat vyrovnání vnitřních tlaků.

Kamenivo tvoří 70-80 % objemu betonu, a proto zásadně řídí jeho chování při požáru. Norma ČSN EN 1992-1-2 [6] rozlišuje betony s křemičitým a vápencovitým kamenivem s ohledem

na rozdílnou teplotní roztažnost a tepelné vlastnosti. U křemičitanů je klíčová polymorfní přeměna křemene $\alpha \rightarrow \beta$ při ~ 573 °C, která indukuje vnitřní napětí. Křemenný pazourek (flint) s velmi nízkou půroditostí může vykazovat odštěpování už kolem 300 °C, silný vliv má vlhkost a velikost zrna. Zatímco křemence (quartzite) mohou bez porušení snášet i 750 °C, vápenců dominuje dekarbonatace, doprovázená významnými objemovými změnami. Zrnitost, textura, půroditost a krystalinita ovlivňují expanzi a mikrotrhlinování. U kalcitických kameniv se při 750 °C měří lineární roztažnost cca 1–1,33 % [17].

2.4 Polypropylenová vlákna

Použití polypropylenových vláken je v současnosti jednou z nejúčinnějších a nejrozšířenějších metod ochrany betonu proti explozivnímu odštěpování. Tato metoda je doporučována i normou ČSN EN 1992-1-2 [6] a její princip spočívá v modifikaci mikrostruktury betonu během zahřívání, což umožnuje bezpečné uvolnění vnitřního tlaku. Ochranná funkce polypropylenových vláken je založena na jejich bodu tání, který se pohybuje v rozmezí 160–170 °C. Tato teplota je pro integritu betonu klíčová, neboť k roztavení vláken dochází dříve, než tlak vodní páry v pórech dosáhne svého maxima. K nejvýraznějšímu nárůstu tlaku par v betonové struktuře totiž dochází až při teplotách mezi 190–260 °C [14][16].

Ochrana betonu pomocí polypropylenových vláken probíhá ve dvou navazujících fázích. V první fázi, ještě před dosažením bodu tání, dochází vlivem rostoucí teploty k tepelné roztažnosti vláken. Jelikož je součinatel tepelné roztažnosti polypropylenu výrazně vyšší než u okolní betonové matrice, vznikají v blízkosti vláken radiální mikrotrhliny, které iniciují propojení pórové struktury. V druhé fázi, po překročení teploty tání, se vlákna roztaví a polymer je částečně absorbován do pórů cementové matrice. Na místě původních vláken tak vzniká soustava prázdných kanálků, které vytvářejí spojitou drenážní síť. Tato síť umožňuje volný únik vodní páry směrem k povrchu konstrukce. Tím se zamezuje nárůstu tlaku par na kritickou hodnotu, která by jinak překročila tahovou pevnost betonu a způsobila jeho explozivní odštěpování [14].

Pro efektivní fungování této ochrany je nutné zajistit, aby vzniklé kanálky tvořily spojitu síť dosahující až k povrchu prvku. Tohoto stavu je dosaženo správným dávkováním, které vytvoří takzvaný práh perkolace. Numerické analýzy ukázaly, že pro dosažení tohoto prahu je potřeba přidat do směsi polypropylenová vlákna v objemu přibližně 0,1 % (což odpovídá cca 0,9–1,0 kg/m³) [2]. Eurokódy, které se používají pro navrhování betonových směsí, předepisují objem PP do 2 kg/m³ [6]. Pokud je dávka vláken příliš nízká, vzniklé kanálky zůstanou izolovány a neumožní efektivní odvod páry. Naopak příliš vysoké dávkování může negativně ovlivnit zpracovatelnost čerstvé betonové směsi [2].

2.5 Provzdušňovací přísady

Jednou z metod ochrany betonu proti explozivnímu odštěpování při požáru je použití provzdušňovacích příslušenství. Tato metoda spočívá v cíleném vytvoření sítě mikroskopických vzduchových pórů uvnitř cementové matrice [5].

Princip ochranné funkce provzdušnění je založen na vytvoření expanzních komor pro vodní páru. Při zahřátí betonu na vysoké teploty dochází k odpařování vody v pôrech. Pokud beton nemá dostatečnou propustnosť, tlak vodní páry narůstá, dokud nepřekročí tahovou pevnost betonu, což vede k destrukci. Provzdušňovací příslušenství vytvářejí systém uzavřených, rovnoměrně rozmiestnených vzduchových pór. Tyto pory snižují hydraulický tlak tím, že poskytují prostor, kam může expandovat stlačená vodní pára, přerušují kapilárni pory, což může pozitivně ovlivnit transport vlhkosti. Zároveň zkracují vzdáenosť, kterou musí pára urazit k nejbližšímu volnému prostoru [18].

Je nutné rozlišovat mezi provzdušněním (pomocí AEA) a pouhým zvýšením pórovitosti betonu prostredníctvím vyššího vodního součinitele (w/c). Zvyšování pórovitosti záměsovou vodou zvyšuje náchylnosť betonu absorbovat z okolního prostredia více vlhkosti a húře jí odolává. Zvýšení pórovitosti provzdušněním vytváří uzavřenou síť pór, které nepohlcují vlhkost. Pro betony s vyšší pevností je však provzdušnění klíčové. Umožnuje totiž dosáhnout vysoké požární odolnosti při zachování relativně vysoké mechanické pevnosti, což pouhé zvýšení w/c neumožňuje [19].

Vliv provzdušnění na chování betonu při požáru byl experimentálně zkoumán na směsích typických pro tunelová ostění (referenční pevnost cca 60 MPa). Bylo zjištěno, že přidání provzdušňovací příslušenství sice snižuje pevnost v tlaku (např. z 60 MPa na 45 MPa, resp. 38,5 MPa dle dávkování), ale zásadně zvyšuje odolnost proti odštěpení [5][4].

3 Příprava a průběh požární zkoušky

3.1 Příprava požární zkoušky

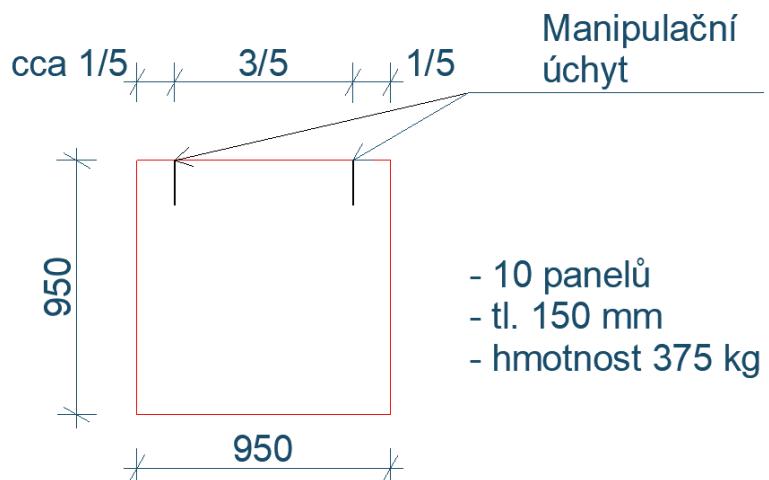
Cílem experimentu bylo ověřit chování vybraných specifikovaných betonových směsí vyrobených ve dvou odlišných betonárnách (Obrázek 2). Součástí specifikace směsi byla kombinace vybraných parametrů požadovaných dle ČSN EN 206 [1], mezi které patřila pevnostní třída, třída prostředí, míra provzdušnění betonu a exaktní množství PP vláken. Tyto parametry byly zadány ČVUT do betonáren a bylo povinné dodržet. Ostatní parametry, jako typ kameniva, množství cementu, druhy a množství přísad (např. plastifikátorů), byly ponechány na uvážení betonáren. Celkové složení jednotlivých směsí je uvedeno v Příloze 1 této práce.

Hlavní část experimentu představovala požární zkouška panelů a testování mechanických vlastností doprovodných vzorků, jak při běžné, tak při zvýšené teplotě. Celkem bylo testováno 15 panelů o rozměru 950x950x150 mm, viz Obrázek 3 – Výkres panelu (převzato z [20]) Obrázek 3, (panel 15 není zahrnut do analýzy této práce) a 42 doprovodných vzorků, které byly umístěny do stěnové pece pro tlakové a tahové zkoušky. Dalších 42 doprovodných vzorků bylo testováno za běžné teploty.

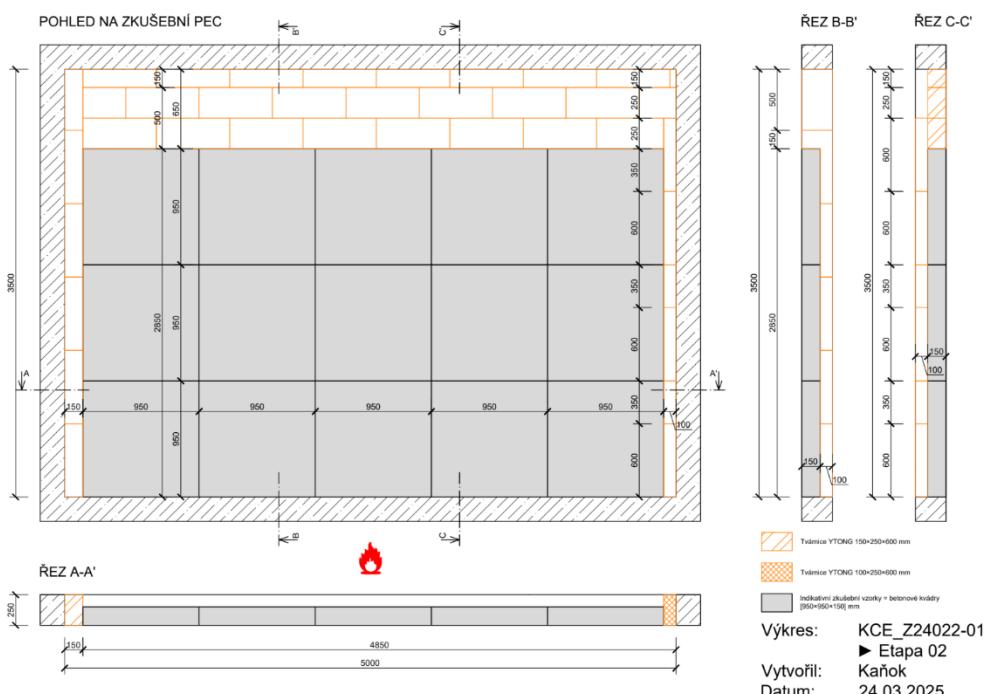
Ve zkušební peci (Obrázek 4) byla nasimulována uhlovodíková teplotní křivka dle ČSN EN 1991-1-2 [21]. Tento typ teplotního zatížení byl zvolen se záměrem co nejlépe nasimulovat požár vznikající v tunelech. Tento typ požáru je charakteristický velmi rychlým náběhem vysokých teplot a extrémní intenzitou. Maximální dosažitelná teplota uhlovodíkové křivky činí přibližně 1100 °C.



Obrázek 2 – Betonáž panelů (převzato z [20])



Obrázek 3 – Výkres panelu (převzato z [20])



Obrázek 4 – Zkušební pec výkres (převzato z [22])

3.1.1 Zkušební vzorky

V průběhu roku 2024 byly vyrobeny všechny zkušební vzorky pro plánovanou požární zkoušku. Celkem bylo vyrobeno 14 deskových panelů o rozměrech 950x950x150 mm pro zkoušení odštěpování a celkem 84 doprovodných těles pro zkoušku betonu v tahu a tlaku, jak za běžné teploty, tak po působení vysokých teplot. Doprovodná tělesa byla vyrobena ke všem 14 zkoušeným paneľům.

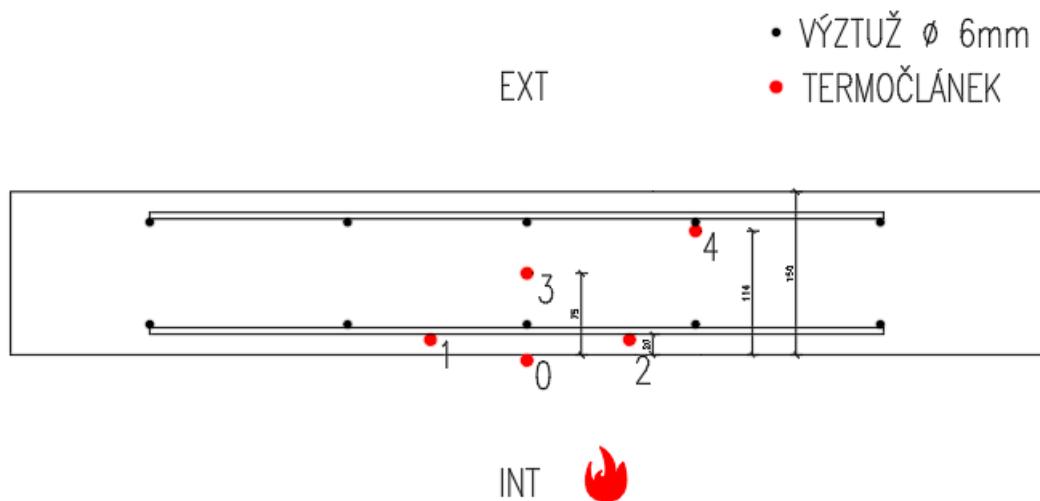
Doprovodná tělesa ke každému panelu se skládala z:

- 2 krychlí (150x150x150 mm) pro zkoušku pevnosti betonu v tlaku za běžné teploty,
- 2 krychlí pro zkoušku reziduální pevnosti,
- 1 trámce pro zkoušku za běžné teploty (100x100x400 mm),
- 1 trámeček pro zkoušku reziduálních vlastností.

Příprava výzvuže a termočlánků byla provedena v laboratoři ČVUT. Betonáž vzorků byla realizována příslušných betonárnách. V každém panelu bylo zabetonováno celkem 5 termočlánků v různých hloubkách, viz Tabulka 1 a Obrázek 5. Termočlánky byly umístěny na povrchu vystaveném požáru, na povrchu výzvuží a v jádře panelu. Rozložení panelů v peci a jednotlivá umístění termočlánků v peci, viz Obrázek 6.

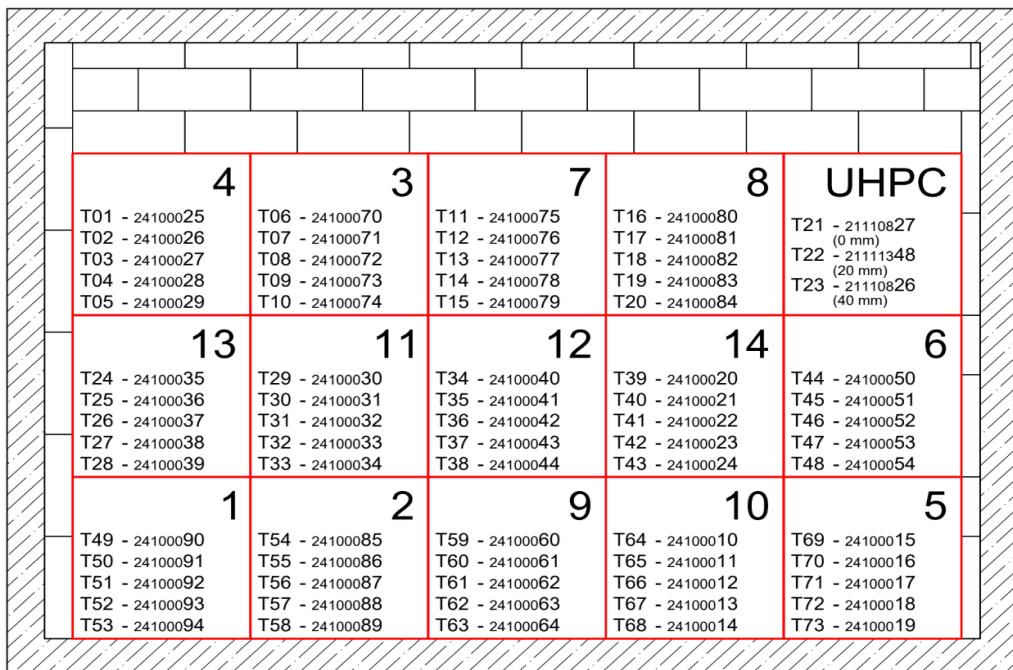
Tabulka 1 - Umístění termočlánků

Termočlánek	Hloubka
T0	0 mm
T1	20 mm
T2	20 mm
T3	75 mm
T4	114 mm



Obrázek 5 – Rozložení termočlánků ve vzorcích

POHLED NA ZKUŠEBNÍ PEC



Legenda:

T01 = označení konektoru v ústředně
24100025 = výrobní číslo termočlánku

Výkres: TCE_Z24022-01
Vytvořil: Kaňok
Datum: 02.04.2025

Obrázek 6 – Schéma umístění panelů a termočlánků (převzato z [22])

3.1.2 Složení betonových směsí

Definice složení betonových směsí spočívala převážně na pevnostní třídě, třídě prostředí, množství polypropylenových vláken a míře provzdušňovacích příasad. Parametry jako typ kameniva, množství cementu, typy a množství plastifikátoru byly ponechány na usouzení betonáren. Pro tuto práci budou betonárny označovány jako Betonárna 1 a Betonárna 2. Betonárna 1 vyrobila 10 panelů (panel 1-10) a betonárna 2 vyrobila 4 panely (panely 11-14). Panel číslo 10 byl dodán Betonárnou 1 bez konkrétní receptury (obchodní tajemství).

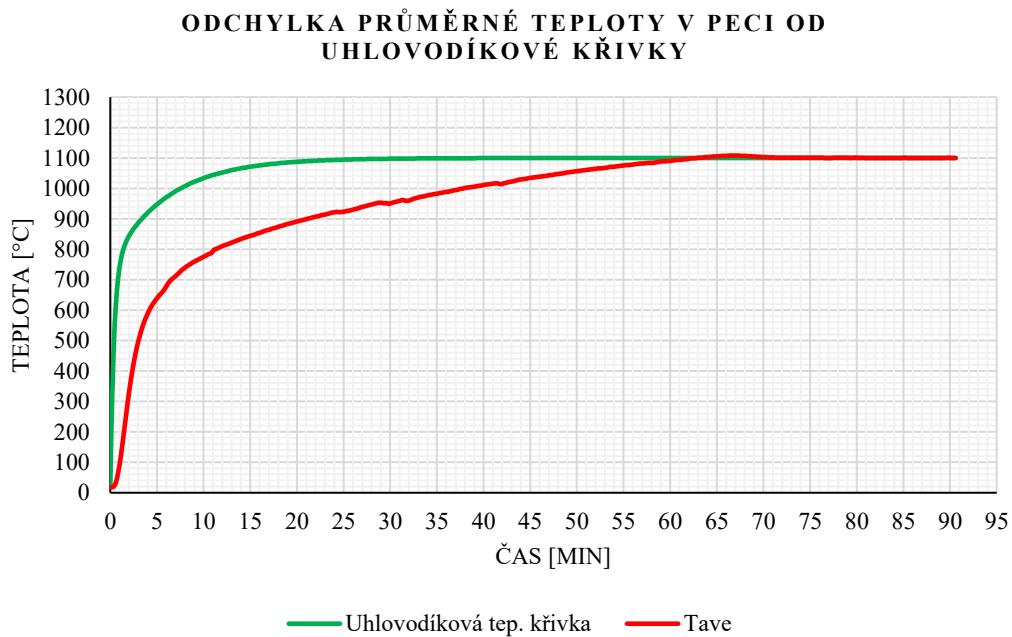
Hlavní rozdíl ve složení se projevil především v použitém kamenivu. Betonárna 1 používala na směsi kamenivo ze štěrkopísku, těženého z vody a druhá betonárna volila přírodně těžené kamenivo. Převážně se obě složení kameniva skládala ze silikátových kameniv jako křemene, granitoid, živce, prachovce a pískovce. Betonárna 1 ovšem ve svém složení hrubějšího kameniva 8/16 použila rulu, která ve složení měla méně křemene a jiných křemičitých kameniv než Betonárna 2. Největší frakce kameniva byla použita 8/16 [23].

3.2 Průběh zkoušky

Zkouška probíhala v certifikované zkušební laboratoři Afire v Klecanech u Prahy. Ve zkušebně bylo do stěnové pece o velikosti 3,5x5 m zazděno a utěsněno 15 deskových panelů (pro nás

experiment složilo pouze 14 panelů). Do pece bylo umístěno 42 doprovodných vzorků pro zkoušení reziduální pevnosti. Všechny vzorky byly před začátkem zkoušky zváženy, aby se poté porovnala jejich hmotnost.

Vzhledem k velkému objemu vzorků uvnitř pece a celkovému množství zkoušených panelů nebyla v prvotní fázi zahřívání dosažena rychlosť nárůstu teplot, jak předepisuje uhlovodíková teplotní křivka. Beton umístěný ve zkušební peci a jeho vysoká tepelná kapacita zapříčinila odebírání velkého množství tepelné energie [23]. Po zahřátí betonových vzorků se teplota v peci začala zvedat k požadovaným teplotám a po 60 minutách dosáhla uhlovodíkové křivky na maximální teplotu 1150 °C. Celková doba zahřívání trvala 91 minut. Průměrná teplota v peci (Tave) v porovnání s uhlovodíkovou křivkou je vidět v grafu, viz Obrázek 7.



Obrázek 7 – Teplotní křivka v peci (převzato z [22])

4 Vyhodnocení požární zkoušky

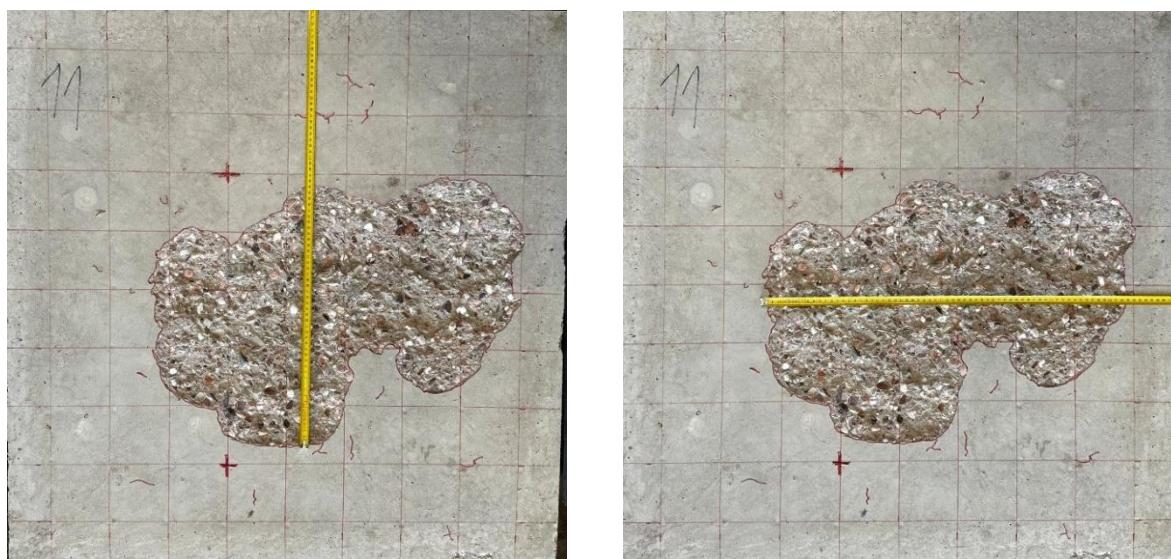
V této kapitole budou vyhodnoceny výsledky požární zkoušky a popsány všechny zkoušené parametry, které byly ke zkoušce naplánovány. Vyhodnocení zkoušky probíhalo pomocí mechanických zkoušek (in situ a v laboratoři) a pomocí zobrazovacích programů.

4.1 Odštěpení panelů

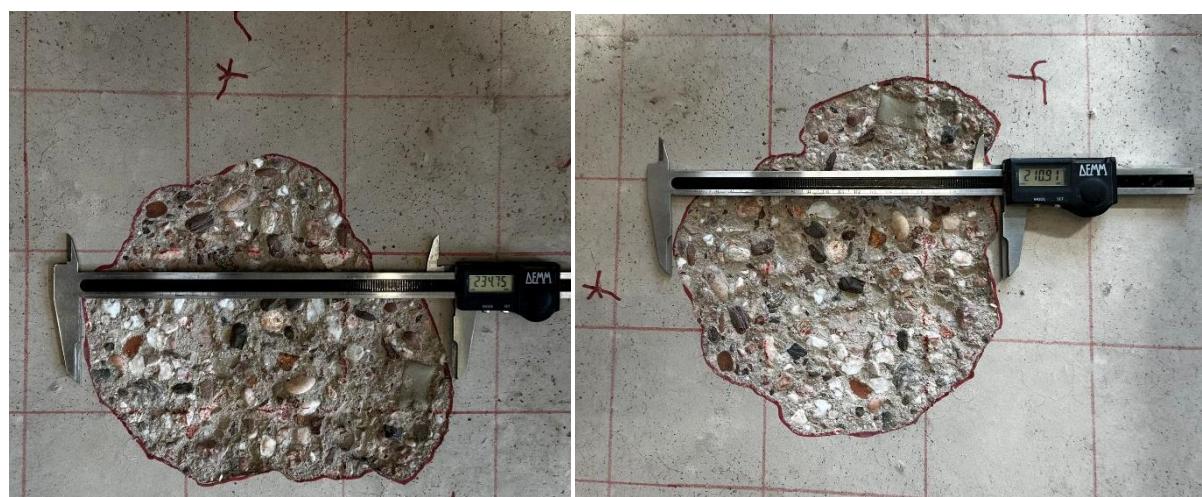
Požární zkouška potvrdila výskyt několika druhů odštěpení, které jsou popsány v kapitole 2.2, viz Obrázek 1. Největší výskyt odštěpení byl pozorován na panelech 11 a 12, které byly porušeny povrchovým odštěpením. Panely 11 a 12 vyrobeny v Betonárně 2, která používala kamenivo s vyšším obsahem silikátových (křemičitých) kameniv, které ztrácí stabilní formu při vyšších teplotách [14]. Panel 11 (Obrázek 8) vykazoval známky největšího odštěpení s velikostí odštěpené části 640x460 mm, s hloubkou 21,9 mm v nejvíce poškozeném místě. Panel 12 (Obrázek 9) vykazoval stejně známky povrchového odštěpení, velikost této oblasti byla menší, o velikosti 235x211 mm. Nejhlubší místo této oblasti bylo 9,74 mm. Příčiny povrchového odštěpování jsou popsány v kapitole 2.1.

Tyto panely nebyly využity polypropylenovými vlákny ani nebyly provzdušněny žádnými písadami. Panel 11 měl oproti panelu 12 vyšší pevnost a to C30/45. Porušení u ostatních vzorků bylo způsobeno především odštěpením kameniva, které bobtnalo a způsobovalo porušení povrchu. Nejvíce poškozený panel bobtnajícím kamenivem byl panel 14 na Obrázku 10. Velikost největšího odštěpeného místa od bobtnajícího kameniva bylo 36x37,6 mm, viz Obrázek 10.

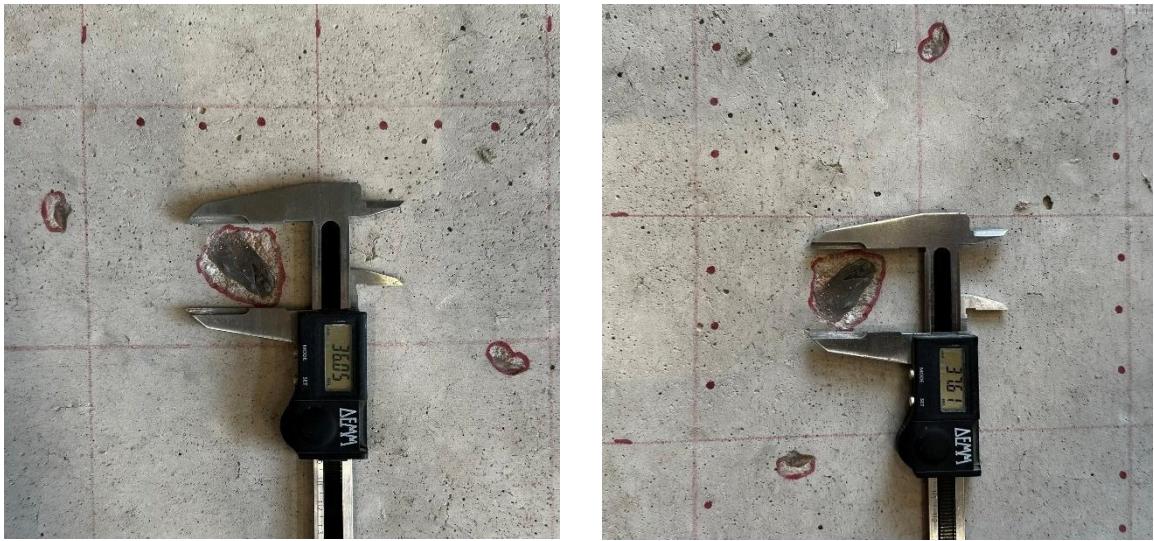
V rámci vyhodnocení zkoušky byly všechny panely po zkoušce zváženy, byla provedena Schmidtova tvrdoměrná zkouška. Odštěpení na panelech bylo detailně změřeno, označeny všechny trhliny a byla zaměřena hloubka odštěpení. Dopravná tělesa, která vydržela pohromadě byla převezena do laboratoře a na těchto vzorcích se zkoušela reziduální pevnost v tlaku a v tahu.



Obrázek 8 – Odštěpení panelu 11



Obrázek 9 – Odštěpení panelu 12



Obrázek 10 – Odštěpení bobtnajícího kameniva na panelu 14

4.1.1 Odštěpení a bobtnání kameniva

Důvodem, proč se zrna kameniva odštěpují, jsou rozdíly v tepelné roztažnosti minerálů, z nichž se skládají. Rozdílné složky zrn se od sebe oddělují a jejich struktura se mění, z hladkého kameniva se stává drsnější. K tomuto typu odštěpování dochází v teplotním rozmezí od 350 do 380 °C. Tento typ „zdrsnění“ se využívá například při výrobě protiskluzné kamenné dlažby. Většina kameniva obsahuje křemen, který je při pokojové teplotě stabilní jako polymorfní β , ale při teplotě 573 °C se přemění na fázi α . Tato změna je doprovázena zvýšením objemu o přibližně 0,84 %. Další přeměna α -křemene na α -tridymit, ke které dochází při teplotě 870 °C a která má za následek zvýšení objemu o přibližně 14 %, není tak nebezpečná, protože v důsledku poškození cementové malty se kamenivo může volně deformovat, přesto však vznikají drobné trhliny v betonu. Křemík se v přírodě vyskytuje v mnoha polymorfních fázích, z nichž pouze β -křemen je stabilní pouze při pokojové teplotě [14].

Pozorované bobtnání zrn (Obrázek 11) při požární zkoušce odpovídá známému mechanismu zvanému bloating (bobtnání): při teplotách ~450–700 °C dochází v jílových/slídových složkách k dehydroxylaci a uvolnění H_2O , zatímco kalcitický cement ~700–900 °C dekarbonatuje za vzniku CO_2 . Živce díky svému složení snižují teplotu tavení křemičité matrice a při ~1100–1200 °C vzniká viskózní sklovitá fáze, která uvolněné plyny uvězní jako bubliny, což vede k pěnění a trvalému objemovému nárůstu zrna [24].

Bobtnání kameniva není pro betonovou konstrukci destruktivní jev nebo jev, který by výrazně narušoval statickou funkci. Nabobtnalé kamenivo však tvoří na povrchu betonu jemné trhliny, které způsobují možnost přístupu vzduchu a vlhkosti hlouběji do konstrukce. Na první pohled může být tento projev neškodný, ovšem z hlediska dlouhodobého chování tunelových konstrukcí není tento jev příznivý a je dobré těmto deformacím předcházet (Obrázek 12).



Obrázek 11 – Nabobtnalé kamenivo [23]



Obrázek 12 – Doprovozný trámek s nabobtnalým kamenicem [23]

4.2 Zkoušky reziduálních vlastností betonu

4.2.1 Tvrdoměrná zkouška

Zkoušení reziduální pevnosti betonu pomocí Schmidtova kladívka lze popsat také jako metodu odrazu. Je to nedestruktivní zkouška pomocí, které pružinový úderník měřidla udeří do povrchu známou energií, část energie se vrátí odrazem a z této míry „odskoku“ se odvozuje tvrdost povrchové vrstvy, která koreluje s tlakovou pevností betonu. U digitálního kladívka SilverSchmidt (které bylo použito) se vyhodnocuje tzv. Q-hodnota, což je bezrozměrný poměr rychlosti po odrazu k rychlosti před nárazem (obvykle vyjádřený v %) – měření je tedy fyzikálně konzistentní a nevyžaduje korekci na úhel dopadu. U klasických analogových kladívek můžeme měřit R-hodnotou, která představuje stupnici zvanou „rebound number“.[25, 26]. V našem případě byl používán typ přístroje Proceq SilverSchmidt, typ N (2,207 J)[26].

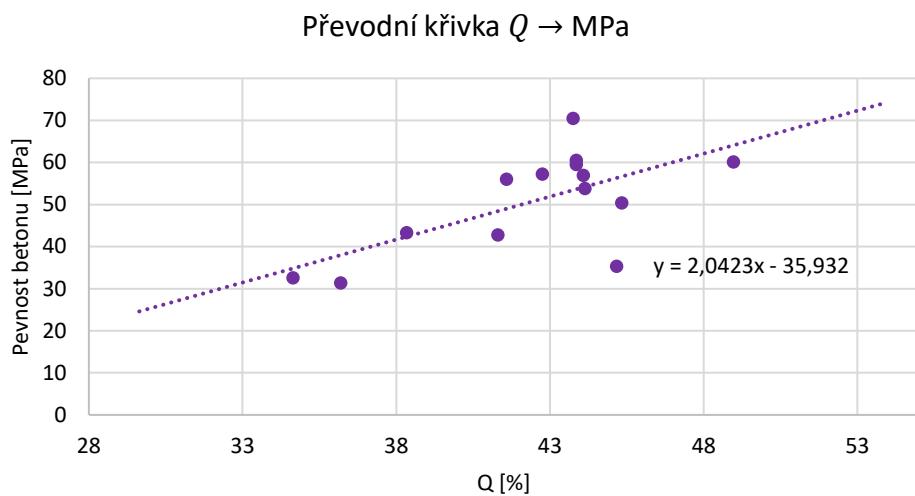
4.2.1.1 Aplikace metody

V rámci vyhodnocení byla provedena zkouška povrchové reziduální pevnosti na všech vzorcích. Reziduální pevnost se měřila pomocí tvrdoměrné zkoušky na malých doprovodných vzorcích, krychle o rozměrech 150x150x150 mm a na všech panelech. Zkušební krychle byly převezeny do laboratoře a zde byly podrobeny zkoušce. Některé vzorky po požární zkoušce vykazovaly značnou míru poškození a nebylo na nich možné zkoušku provést (konkrétně u vzorku krychle 1 a 10).

Betonové krychle byly testovány Schmidtovým kladívkem za běžných teplot i po expozici vysokým teplotám. Porovnáním naměřených hodnot odrazu s výsledky zkoušek reziduální pevnosti v tlaku byla odvozena převodní křivka $Q \rightarrow \text{MPa}$. Tato křivka definuje vzájemnou závislost mezi povrchovou tvrdostí a skutečnou pevností betonu, což umožňuje následný přepočet hodnot odrazu přímo na jednotky MPa. Výsledky přepočtu jsou přehledně zobrazeny v Tabulce 2.

Získaná data byla převedena do grafické podoby, ve které byla určena křivka trendu popsaná lineární rovnicí. Tato rovnice, znázorněná v grafu, viz Obrázek 13, představuje převodní vztah mezi hodnotou odrazu a pevností betonu a umožňuje tak následné vyhodnocení výsledků tvrdoměrných zkoušek provedených na panelech.

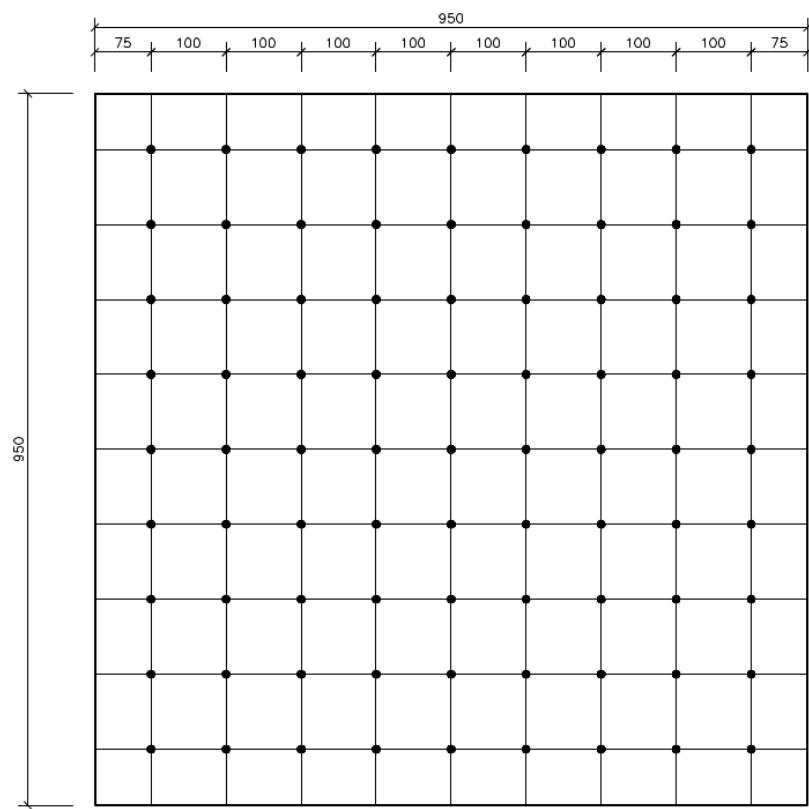
Tvrdoměrná zkouška panelů byla provedena pomocí Schmidtova kladívka přímo na místě po vychladnutí panelů. Na povrchu každého panelu byla vyznačena síť o velikosti $10 \times 10 \text{ cm}$, viz Obrázek 14. V každém průsečíku sítě byl proveden jeden měřicí úder, tudíž na každém panelu bylo získáno celkem 81 hodnot. Naměřené hodnoty byly následně přepočteny na pevnost v tlaku pomocí převodní křivky $Q \rightarrow \text{MPa}$. Jedná se pouze o povrchovou zkoušku, která neproniká do hlubších vrstev materiálu, názorně na Obrázek 15. Pro zkoumání mechanických vlastností do větší hloubky bylo potřeba použít metodu ultrazvukového měření, jako byla provedena například v práci [27].



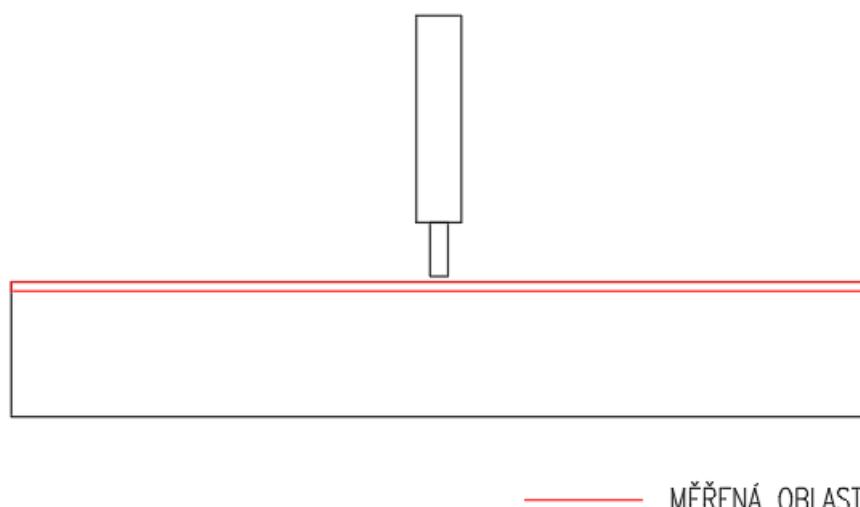
Obrázek 13 – Graf $Q \rightarrow \text{MPa}$

Tabulka 2 - Průměrná povrchová pevnost betonu

Panel	Qmean	Sm. odch.	MPa
1	28,8827	4,9227	23,1
2	35,87	3,7323	37,3
3	38,9383	5,037	43,6
4	41,5926	5,4538	49,0
5	39,6975	5,3243	45,1
6	34,8395	4,6042	35,2
7	34,9815	4,712	35,5
8	38,3827	4,8549	42,5
9	35,1975	5,4936	36,0
10	37,321	6,4291	40,3
11	26,4321	14,8252	18,1
12	29,4691	7,9559	24,3
13	33,629	4,7905	32,7
14	29,898	4	25,1



Obrázek 14 – Schéma panelu pro Schmidtovu zkoušku



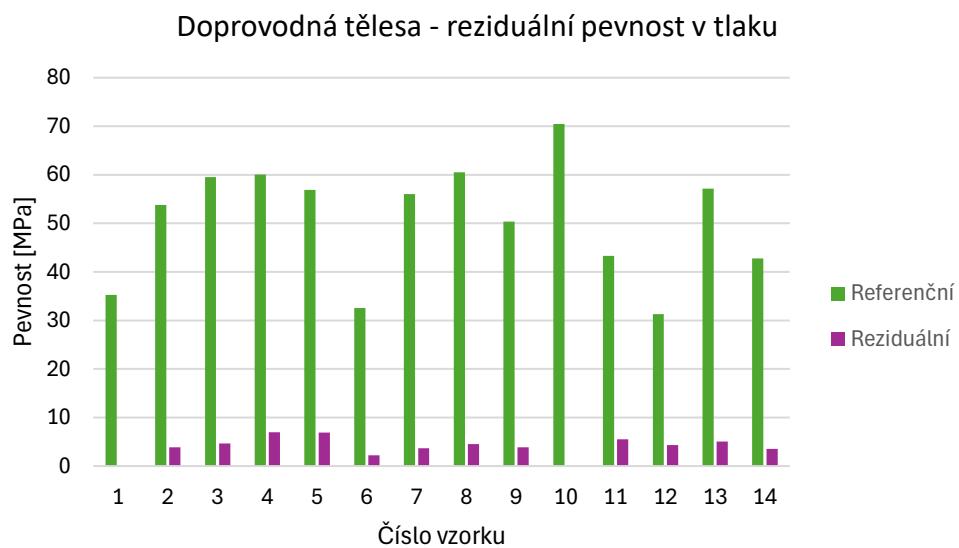
Obrázek 15 – Znázornění hloubky tvrdoměrné zkoušky

4.2.2 Reziduální pevnost betonu v tlaku a v tahu

Zkouška pevnosti betonu v tlaku byly provedeny jak za běžné teploty, tak po vystavení vzorků požáru, s cílem porovnat chování směsí a porovnat jejich reziduální pevnosti v závislosti na jejich složení. Tímto způsobem bylo možné posoudit vliv různých kameniv a úprav směsí na mechanické vlastnosti betonu po působení vysokých teplot. Vzorky krychlí č. 1 a č. 10 nebylo možné zkoušet, neboť byly po požáru natolik degradované, že došlo k jejich úplnému rozpadu. Složení jednotlivých směsí včetně obsahu příměsí je uvedeno v Tabulce 3.

Z výsledků zkoušek pevnosti vyplývá, že směsi obsahující polypropylenová (dále jen PP) vlákna nebo provzdušňovací přísady dosahovaly nižších hodnot reziduální pevnosti v tlaku ve srovnání se směsmi bez těchto přísad. Naopak vzorky bez PP vláken a bez provzdušnění vykazovaly známky výrazného odštěpování povrchových vrstev během působení vysokých teplot. Obecně lze konstatovat, že zvýšení množství PP vláken či míry provzdušnění vede ke snížení reziduální pevnosti betonu po požáru. Na druhou stranu tyto úpravy směsí významně přispívají k omezení rizika odštěpování materiálu.

Zkoušku pevnosti v tahu za ohybu na trámcích nebylo možné po zkoušce provést, jelikož se tyto vzorky v důsledku vysoké teploty rozpadly vlastní hmotností a nebyly schopné další manipulace.



Obrázek 16 – Reziduální pevnost doprovodných těles

Tabulka 3 - Specifikace betonových směsí (převzato z [20])

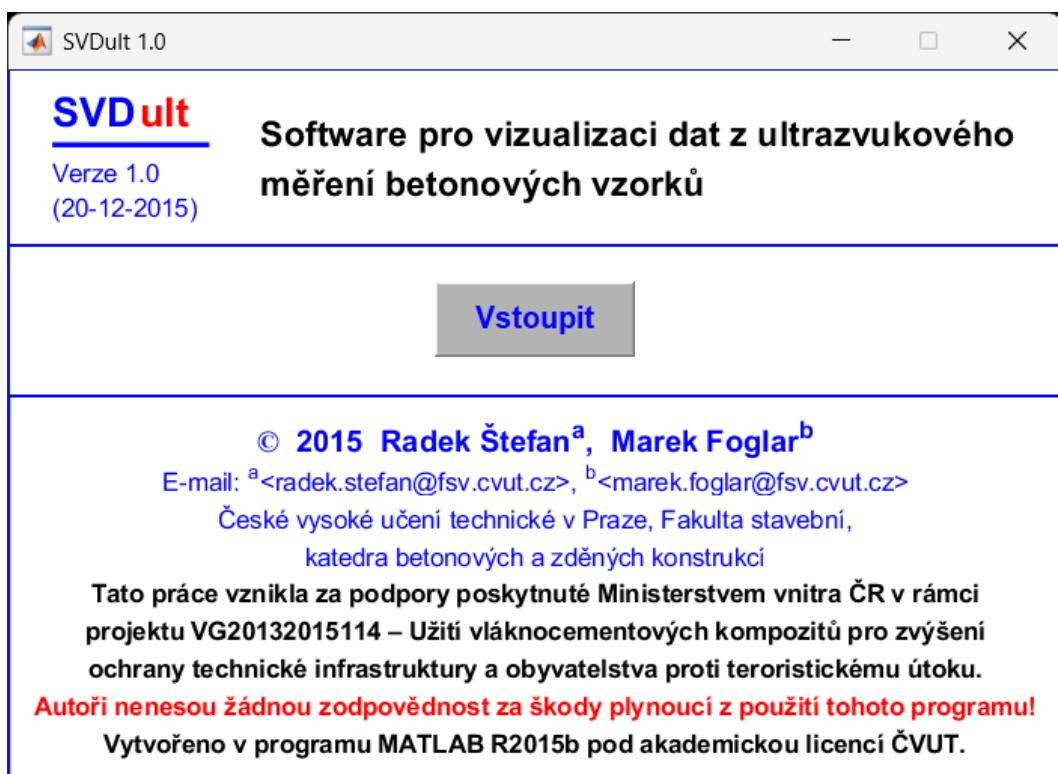
Panel	Pevnostní třída	Polypropylenová vlákna [kg/m³]	Provzdušnění
1	C30/45	1,0	0 %
2	C30/45	0,75	0 %
3	C30/45	0,5	0 %
4	C30/45	0,25	0 %
5	C30/45	0	0 %
6	C30/45	0	10 %
7	C30/45	0	5 %
8	C20/25	0	0 %
9	C20/25	1,0	0 %
10	-	-	-
11	C30/45	0	0 %
12	C20/25	0	0 %
13	C30/45	1,0	0 %
14	C20/25	1,0	0 %

4.3 Vizualizace výsledků

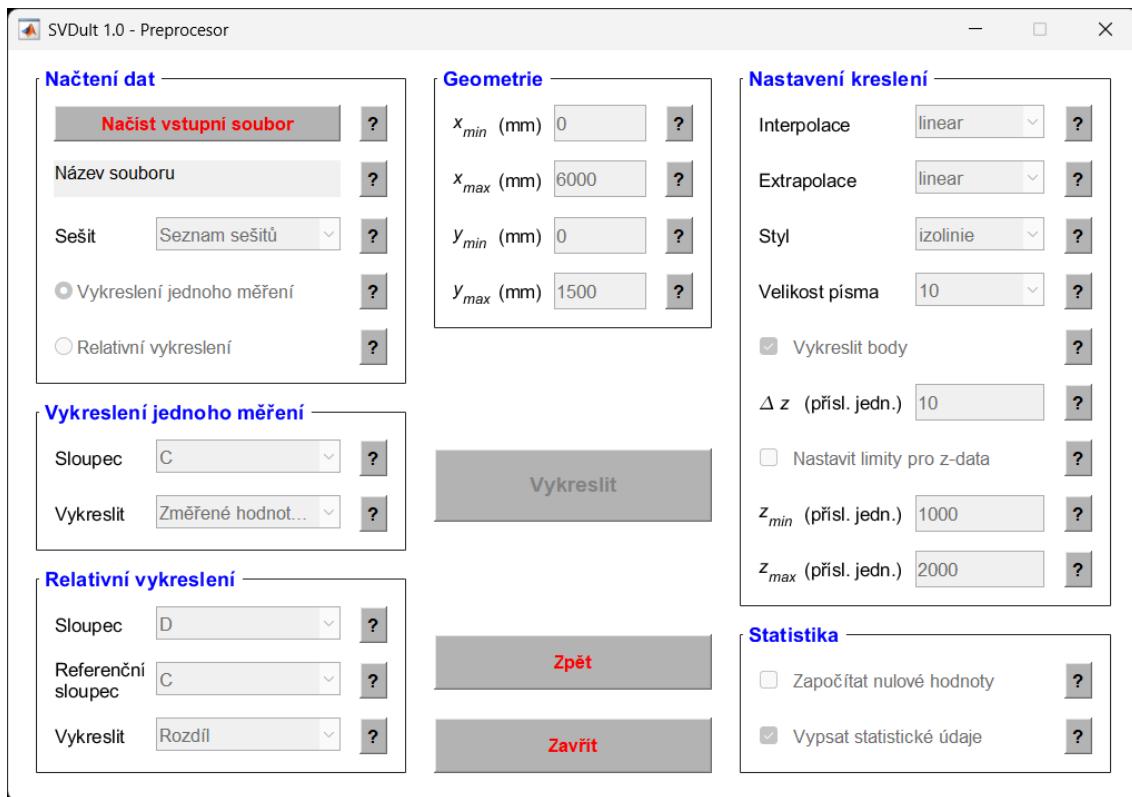
4.3.1 Vizualizační program

SVDult [28] je program vyvinutý na Katedře betonových a zděných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT v Praze (autoři: Radek Štefan, Marek Foglar). Slouží k vizualizaci a statistické analýze dat získaných měřením betonových vzorků. Program byl vyvinut pro ultrazvukové měření vzorků např. po výbuchu nebo požáru. Program byl vytvořen v prostředí MATLAB R2015b a ke spuštění vyžaduje odpovídající MATLAB Runtime. SVDult je zaměřen na zobrazení naměřených hodnot v přehledné mapové formě a na základní statistiku dat [29].

V rámci vyhodnocení požární zkoušky byl tento program využit pro vizualizaci výsledků jednotlivých částí, konkrétně na reziduální pevnost betonů a zobrazení hloubky odštěpení na panelech. Program funguje na principu vložení .xlsx souboru, který obsahuje naměřené hodnoty ve správném pořadí. Další údaje jako vymezení velikosti zobrazované oblasti, metoda interpolace a extrapolace dat, limity a velikost délky škály zobrazovaných dat, forma zobrazení atd. se zadávají prostřednictvím uživatelského rozhraní. Výstupem je grafické znázornění zadaných hodnot a příslušné výsledky analýzy dat (průměr, směrodatná odchylka atd.).



Obrázek 17 – Úvodní stránka programu SVDult [28]



Obrázek 18 – Uživatelské rozhraní programu SVD ult [28]

Grafická forma výstupu jsou barevné obrazce, tzv. izoplochy, se zobrazením hodnot dle barevné škály, výsledky z analýzy dat. Obrázek s příslušným grafickým zobrazením zadaných hodnot vykreslí hodnoty dle barevné škály a zobrazení působí jako 3D model.

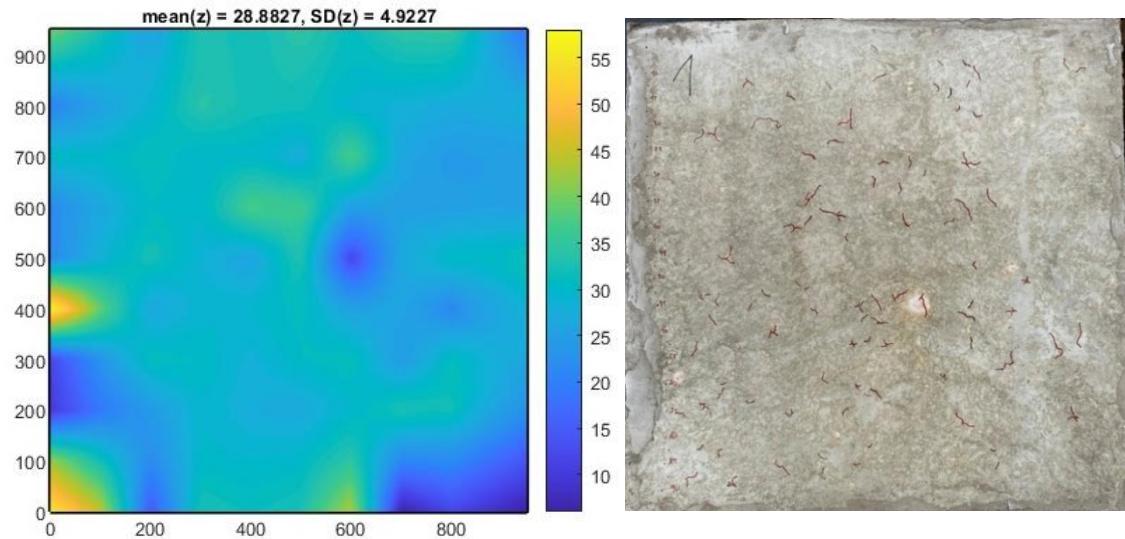
4.3.2 Výsledky vizualizace

Výsledky tvrdoměrné zkoušky byly následně převedeny do grafické podoby, aby byla umožněna jejich přehledná a snadná vizualizace. Na Obrázcích 19–32 jsou znázorněny jednotlivé panely po požární zkoušce včetně porovnání jejich povrchové pevnosti. Na pravé straně obrázku jsou panely, kde byly vyznačeny výrazné povrchové trhliny, které se po působení vysokých teplot objevily.

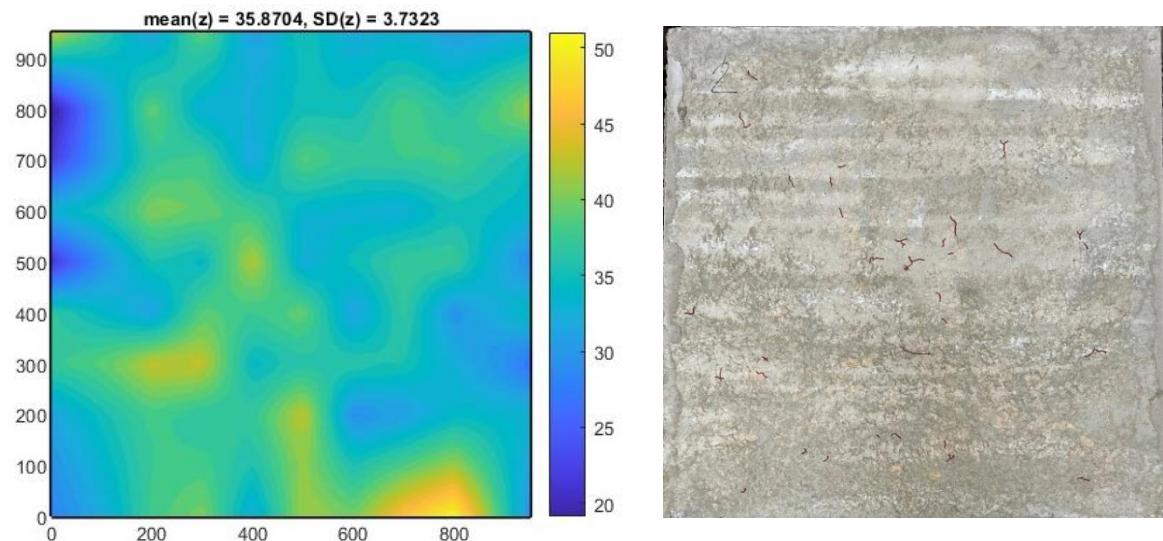
Program zobrazuje naměřené hodnoty v jednotkách Q, které byly konvertovány na pevnost v tlaku v jednotkách MPa. Postup převodu je podrobně popsán v kapitole 4.2.1 a výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 2. Barevná škála umožňuje rychlou orientaci v rozložení povrchové pevnosti, oblasti s nejvyššími hodnotami pevnosti jsou charakteristicky zbarveny do odstínů žluté.

Z výsledků tvrdoměrných měření vyplývá, že povrchová pevnost betonu se po působení zvýšených teplot nesnížila tak výrazně, jak by se dalo očekávat ve srovnání s původní pevností.

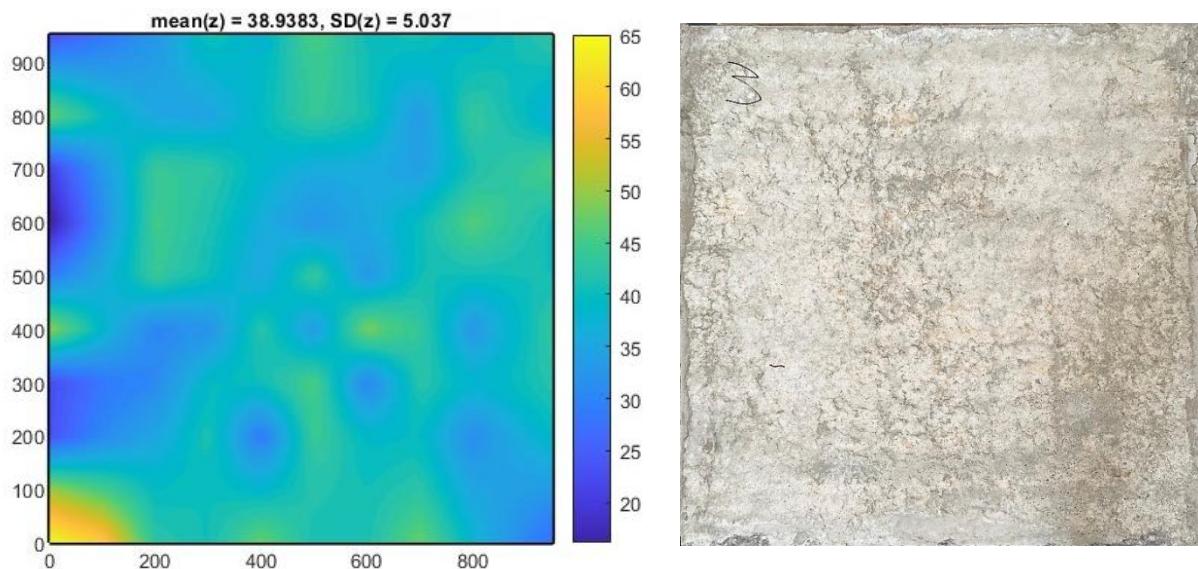
Je však nutné zdůraznit, že získané hodnoty se týkají výhradně povrchových vrstev materiálu a neumožňují jednoznačně posoudit pevnost betonu v jeho hlubších vrstvách.



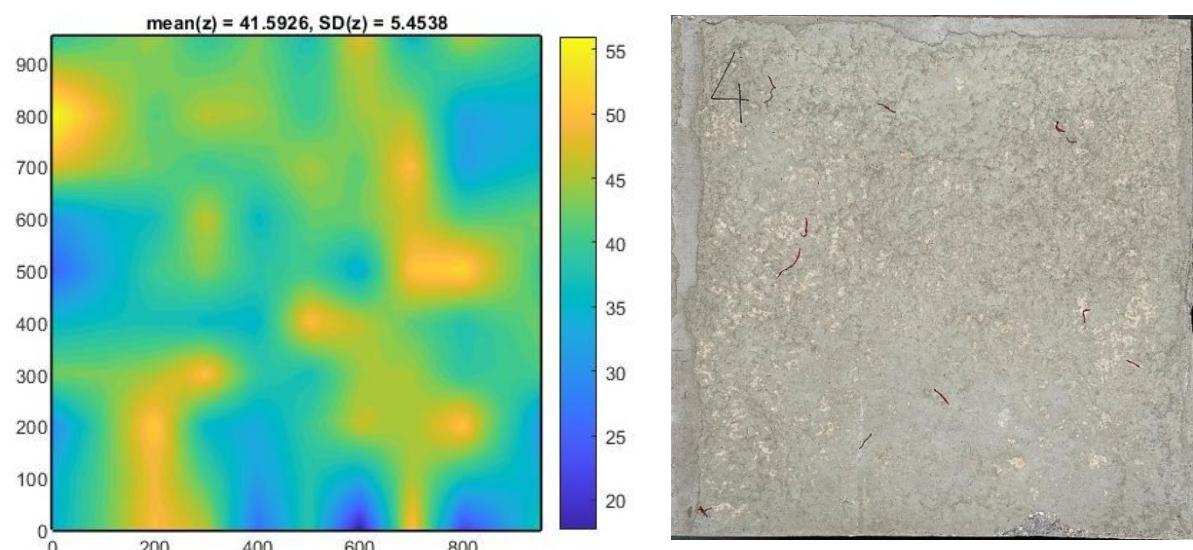
Obrázek 19 – Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 1



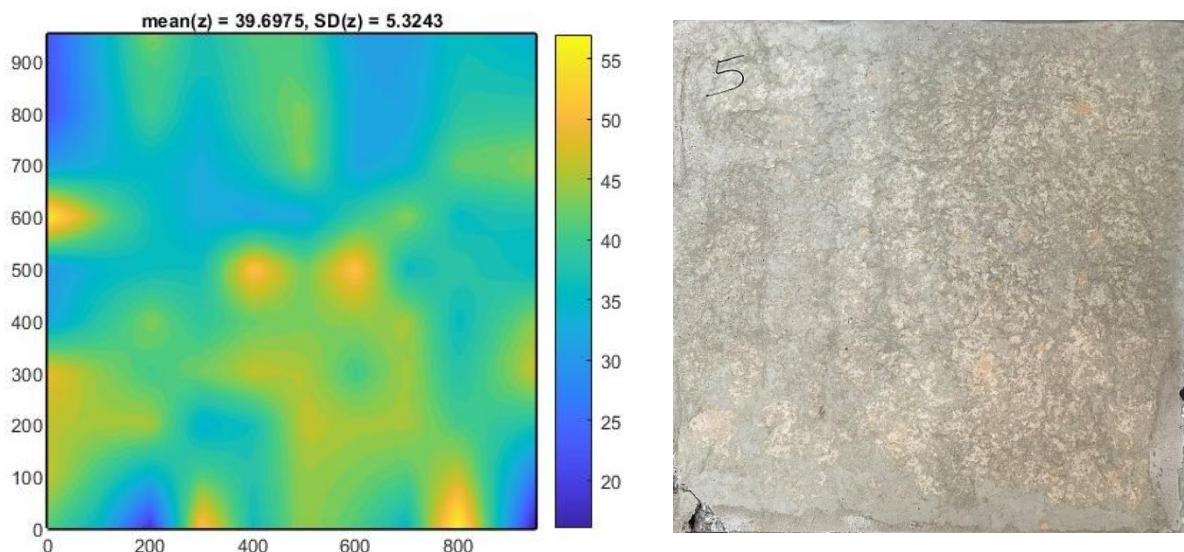
Obrázek 20 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 2



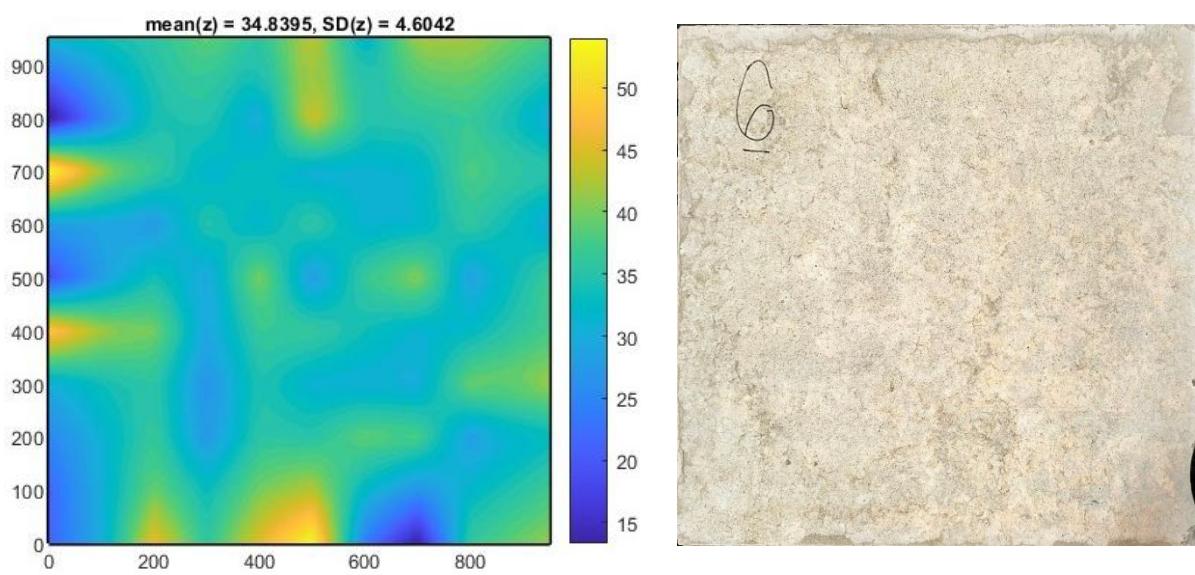
Obrázek 21 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 3



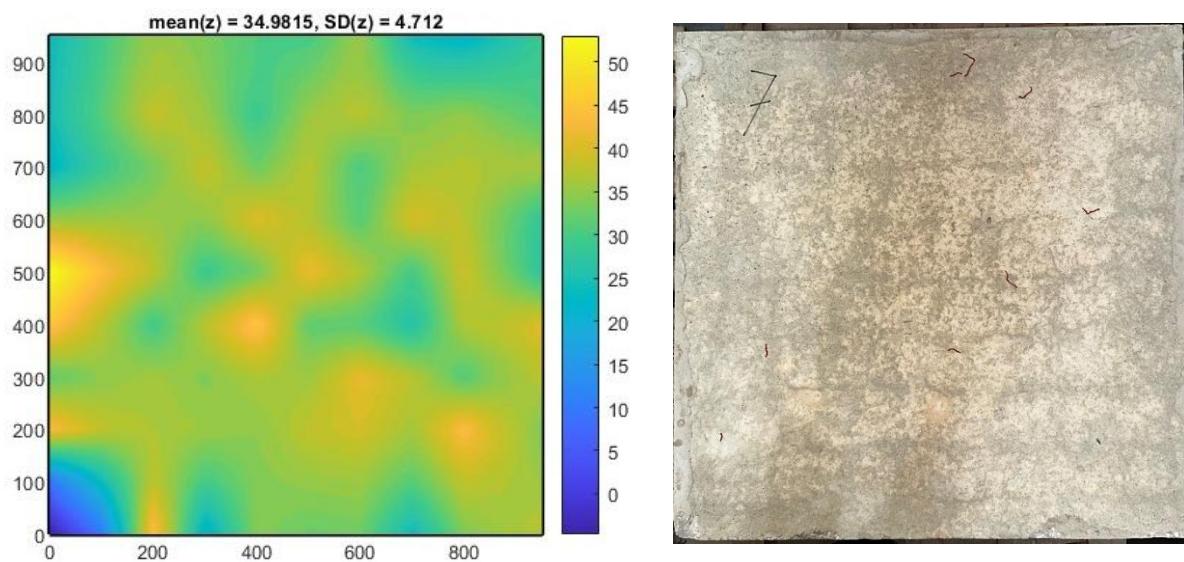
Obrázek 22 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 4



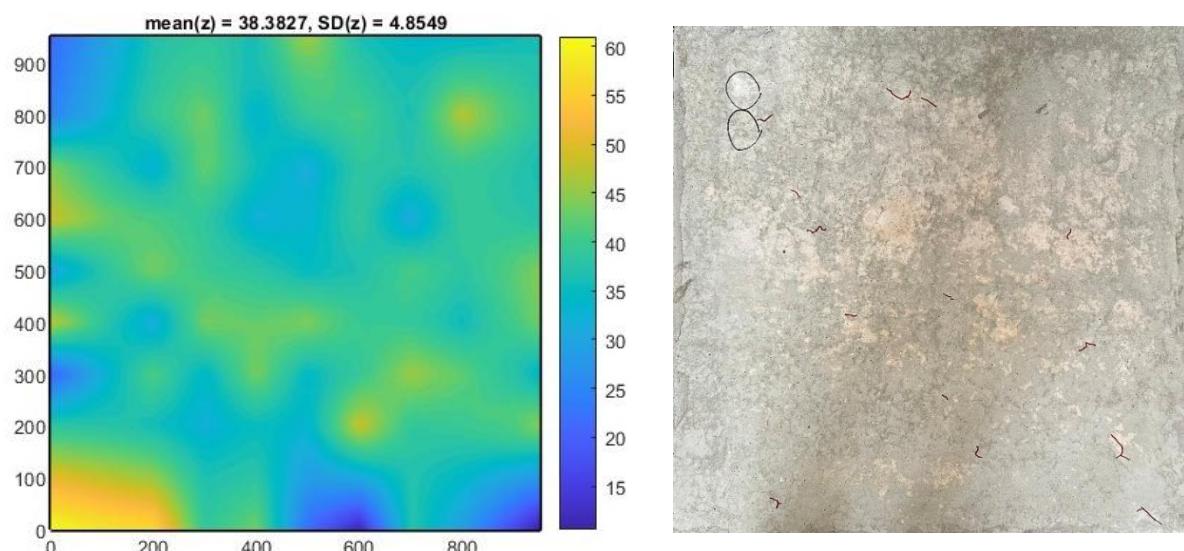
Obrázek 23 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 5



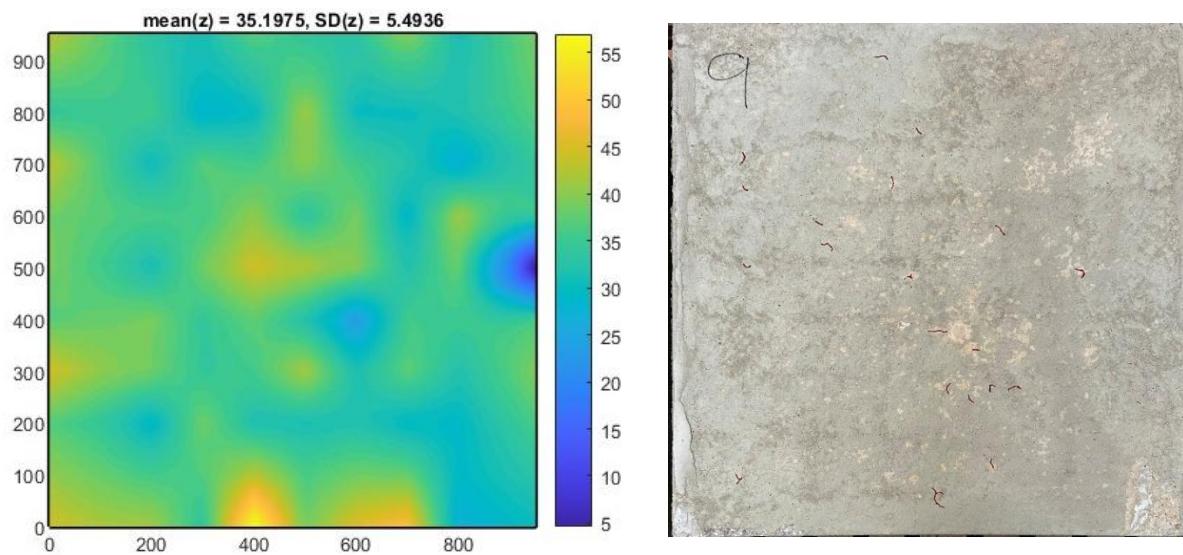
Obrázek 24 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 6



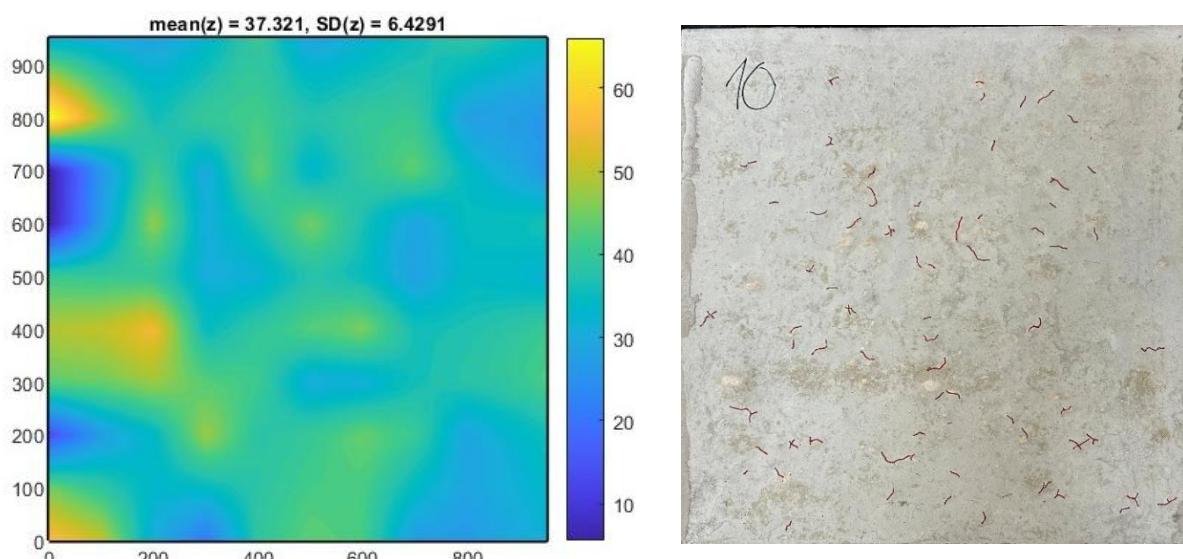
Obrázek 25 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 7



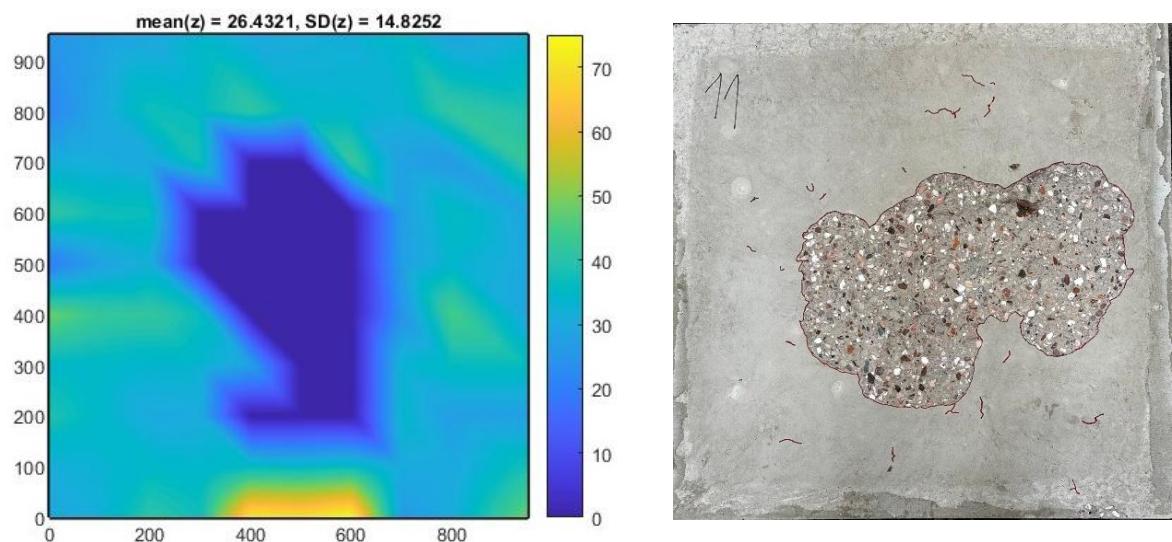
Obrázek 26 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 8



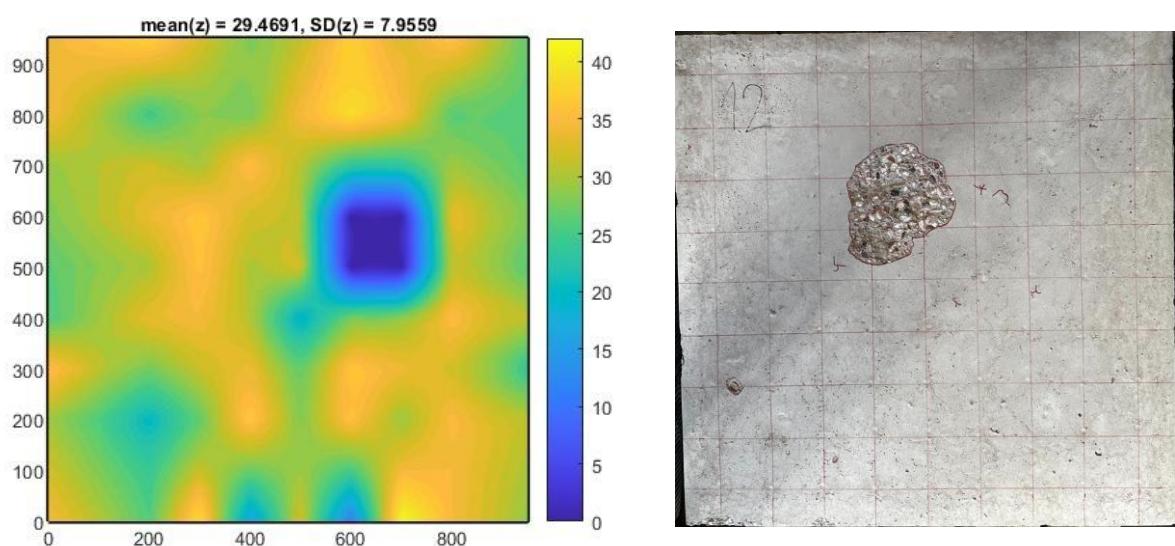
Obrázek 27 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 9



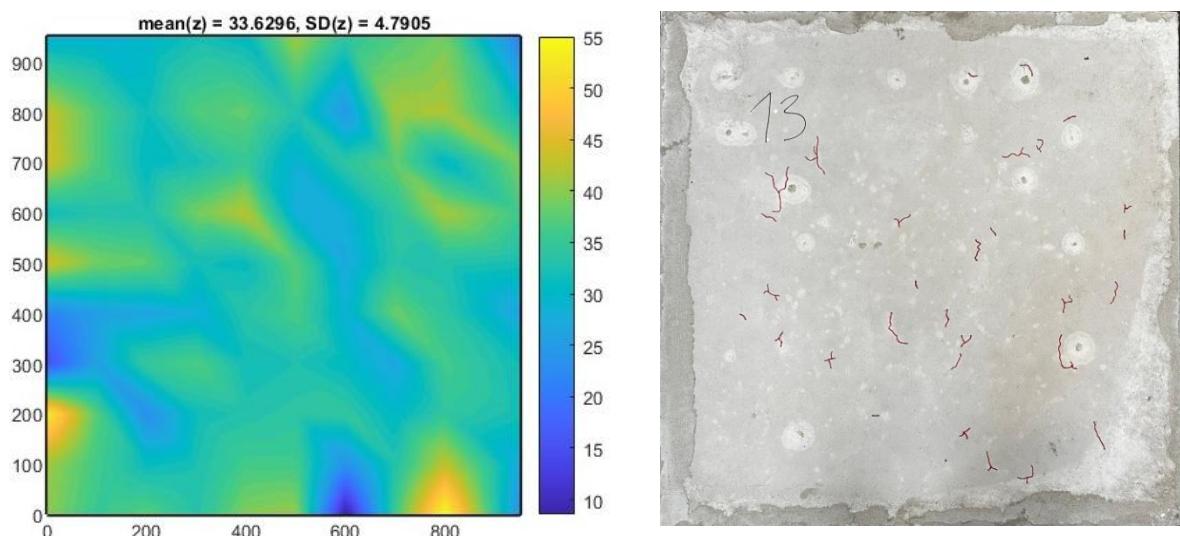
Obrázek 28 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 10



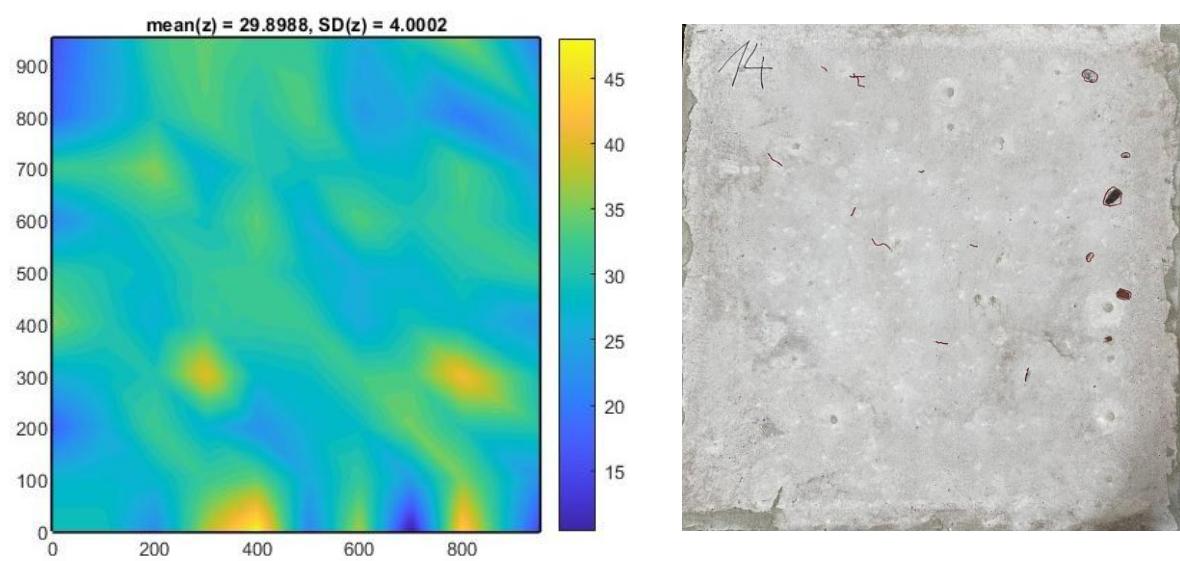
Obrázek 29 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 11



Obrázek 30 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 12



Obrázek 31 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 13



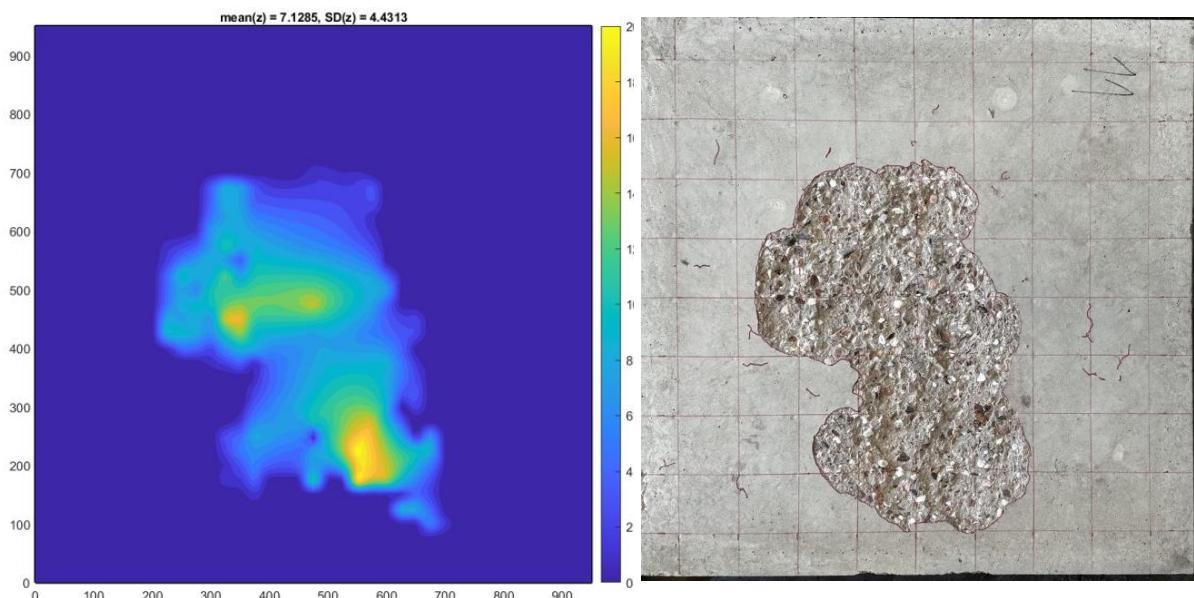
Obrázek 32 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 14

4.3.3 Vyhodnocení a vizualizace odštěpení pomocí programu

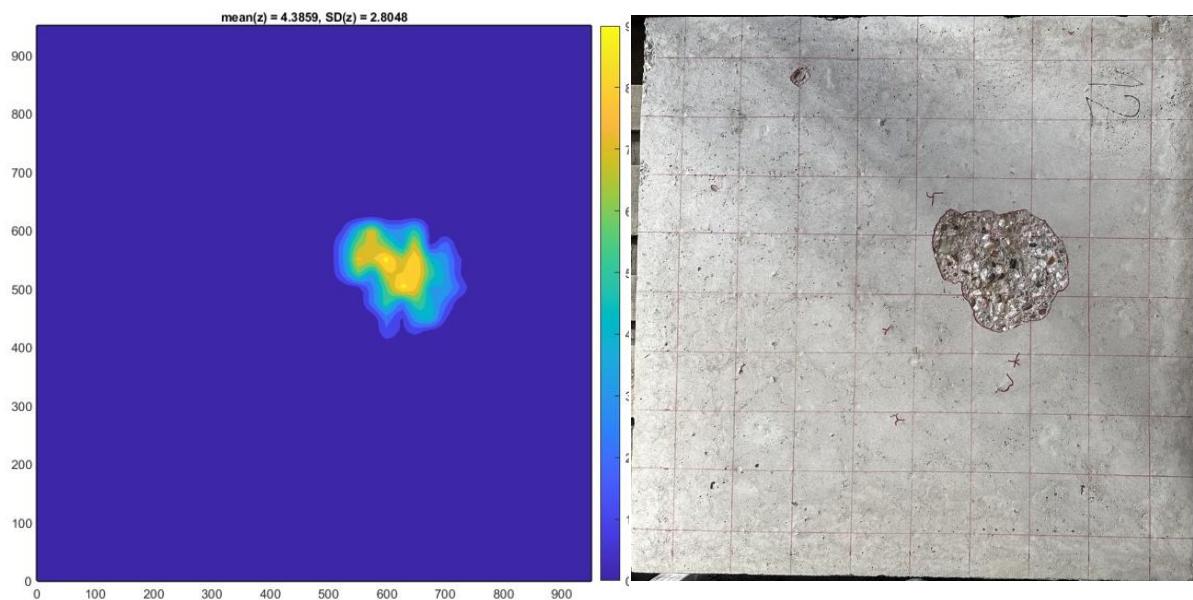
Pro detailní a kvantitativní vyhodnocení odštěpování byla naměřená data o hloubce a rozsahu poškození panelů vizualizována a analyzována pomocí softwarového nástroje SVDult [28]. Ačkoliv byl program primárně vyvinut pro zpracování ultrazvukových měření, v této práci slouží k vytvoření přehledného 2D zobrazení oblasti odštěpení na povrchu zkušebních těles. Hlavní cílem vizualizace bylo graficky znázornit topografii povrchového poškození u panelů, které během požární zkoušky utrpěly největší míru odštěpení. Na panelech byla vytvořena síť jemnější než pro vyhodnocení výsledků Schmidtovy zkoušky. Pro přesnější výsledky byla na panelu vytvořena síť o velikosti 2,5x2,5 cm a v každém tomto bodě v místě poškození panelu byla změřena hloubka odštěpení. Program SVDult [28] umožnil převést naměřené souřadnice poškozených ploch a hloubek do přehledné barevné mapy, kde intenzita barvy odpovídá hloubce odštěpení. Výsledky z programu jsou vidět na Obrázcích 32 a 33.

Experimentální zkouška potvrdila, že nejvážnější poškození a největší rozsah povrchového odštěpení se vyskytl u Panelu 11 a Panelu 12, které byly součástí referenčních směsí bez přítomnosti PP vláken a bez provzdušnění. Toto zjištění koresponduje s poznatkami z teorie [3], které připisují explozivní odštěpování akumulaci vysokých tlaků vodní páry, čemuž PP vlákna a provzdušnění efektivně brání. Porovnání výsledků odštěpení je uvedeno viz Tabulka 4.

Oba panely byly zhotoveny v Betonárně 2, která používala kamenivo s vyšším obsahem křemičitých kameniv, jež je náchylnější ke ztrátě stability a objemovým změnám při vysokých teplotách 573 °C, což dále zvyšuje riziko povrchového poškození.



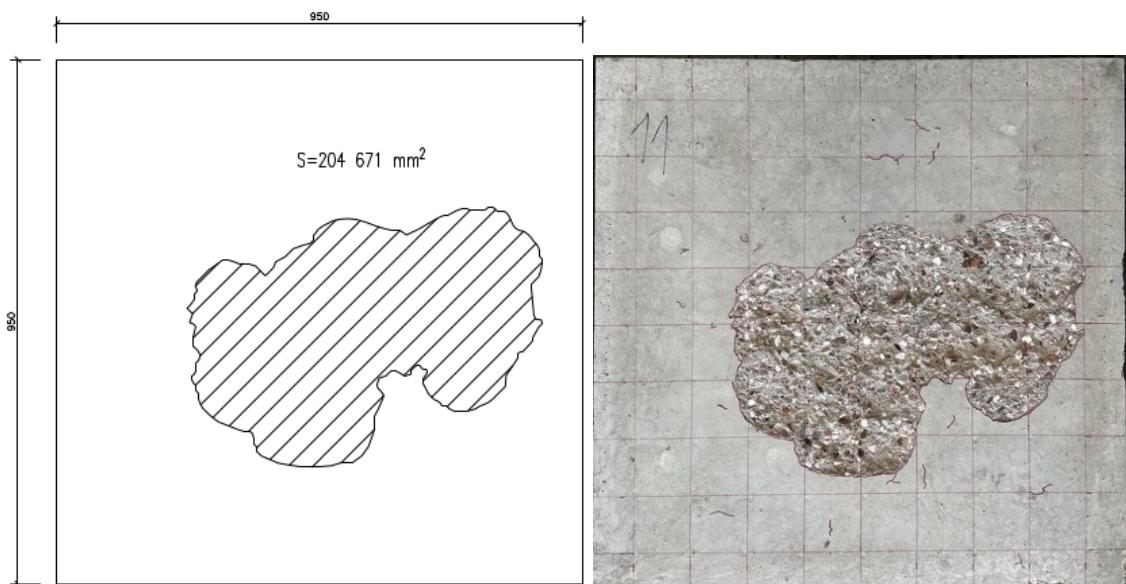
Obrázek 33 – Odštěpení panelu 11



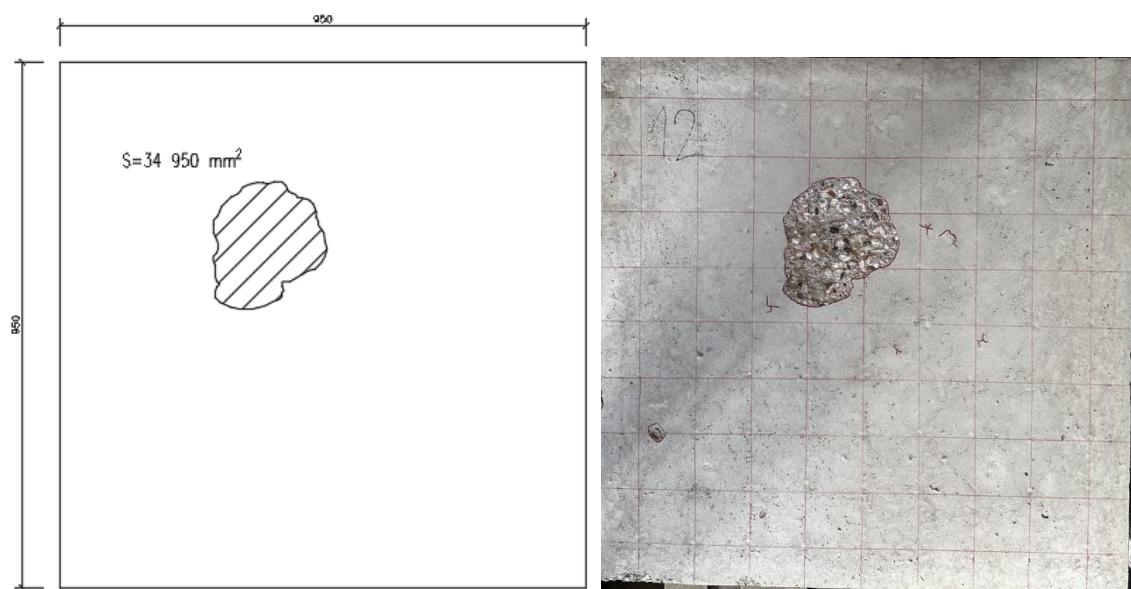
Obrázek 34 - Odštěpení panelu 12

Tabulka 4 - Porovnání odštěpených panelů

Panel	Popis poškození	Plocha odštěpení	Maximální hloubka odštěpení	Průměrná hloubka odštěpení
Panel 11	Největší povrchové odštěpení	204 671 mm ²	21,9 mm	7,13 mm
Panel 12	Výrazné povrchové odštěpení	34 950 mm ²	9,74 mm	4,39 mm



Obrázek 35 – Schéma plochy odštěpení panel 11



Obrázek 36 - Schéma plochy odštěpení panel 12

4.4 Teplotní profily a teplotní vývoje

Tato podkapitola se zaměřuje na interpretaci a analýzu primárních dat získaných v rámci velkorozměrové požární zkoušky, konkrétně na teplotní průběhy naměřené pomocí termočlánků uvnitř zkušebních panelů. Tato data představují klíčový experimentální podklad pro následující kapitolu, kde jsou využita k porovnání s daty z numerického modelu transportu tepla, viz kapitola 5.5.

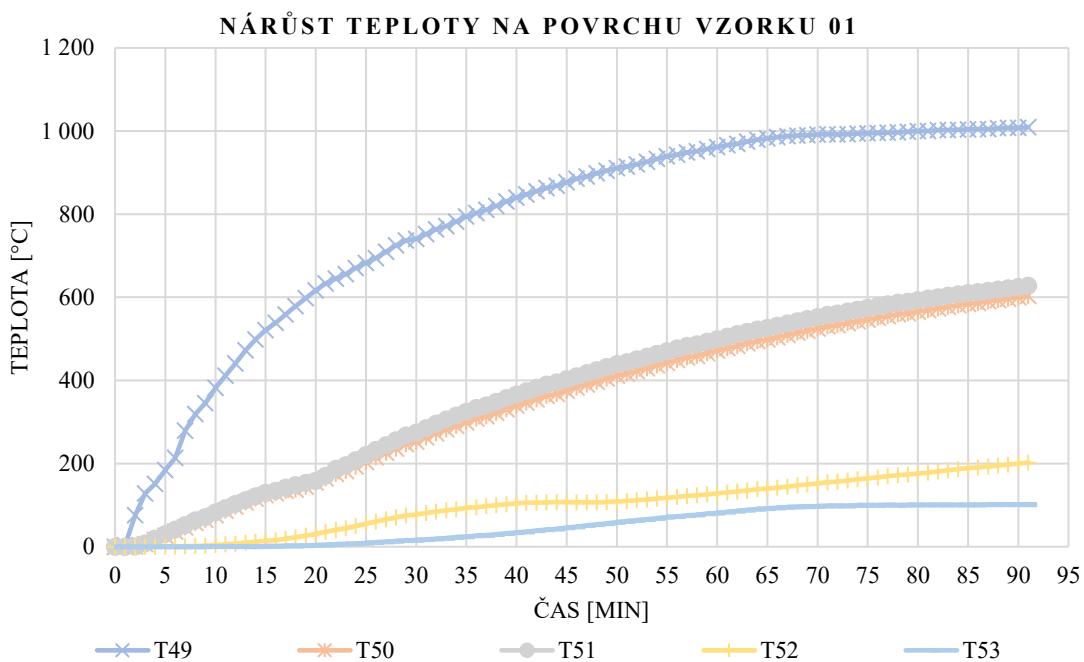
V každém zkušebním panelu bylo zabetonováno celkem pět termočlánků, které monitorovaly teplotní vývoj v různých hloubkách průřezu. Rozmístění termočlánků, vztažené k povrchu vystavenému požáru, bylo následující (viz Obrázek 5, kapitola 3.1.1) Zkušební vzorky:

- 0 mm (povrch vystavený požáru),
- 20 mm (krycí vrstva),
- 75 mm (jádro průřezu),
- 114 mm (výztuž na neohřívané straně).

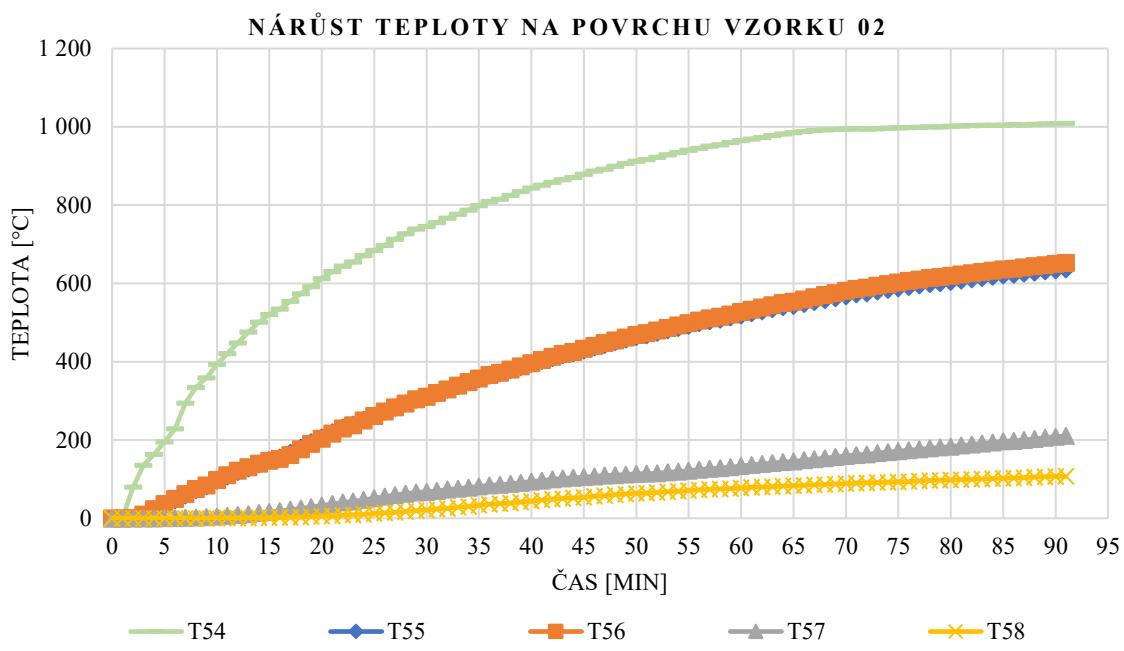
V každém panelu je umístěn termočlánek označen číslem pro přehlednou orientaci v naměřených datech.

Na teplotních vývojích panelů je patrné mírné teplotní zpoždění, způsobené vysokou tepelnou kapacitou betonu, která brání peci v rychlém nárůstu teploty v prвotní fázi zahřívání. Proto také nebylo možné v prвotní fázi zahřát pec dle průběhu uhlovodíkové křivky, vzhledem k objemu zahříváного materiálu. Panely, u kterých došlo k výraznému povrchovému odštěpení (Panely 11 a 12), vykazují rychlejší a strmější nárůst teploty v hloubce výztuže (20 mm). Teplotní průběhy v hlubších vrstvách demonstруjí tepelně-izolační schopnosti betonu. Nárůst teploty je zde mnohem pozvolnější a teplotní gradienty jsou menší. Teploty v hloubce 114 mm se po 90 minutách expozice pohybují řádově ve stovkách stupňů Celsia, což naznačuje, že v těchto vrstvách nedošlo k výrazné degradaci materiálu, a tyto části konstrukce si zachovávají původní vlastnosti.

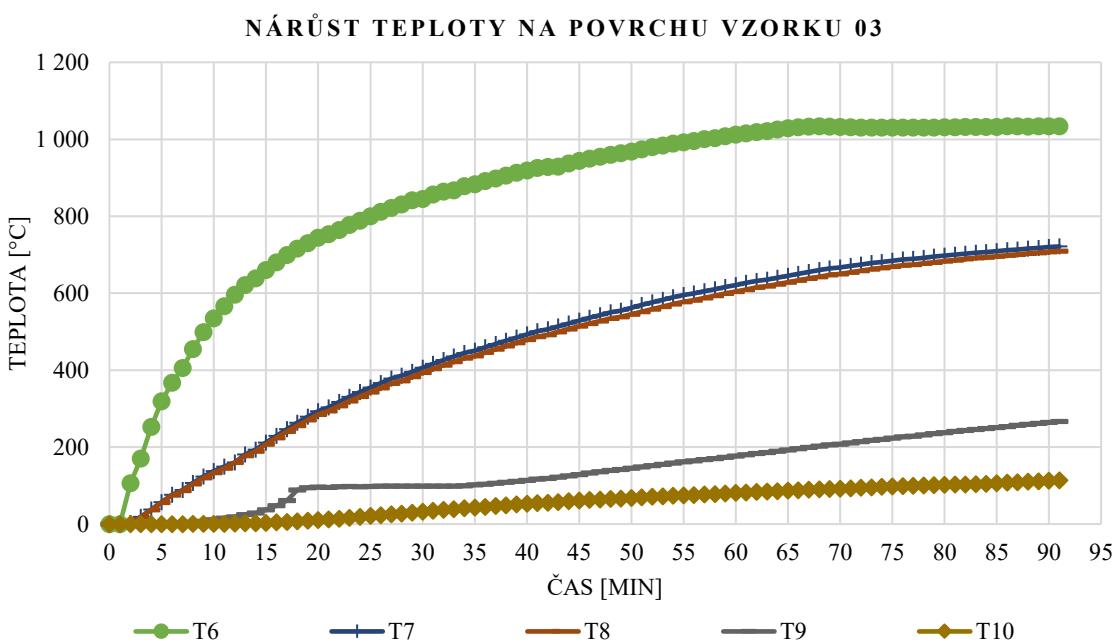
Tato experimentální data tvoří základ pro přechod z experimentální části do numerické simulace a jsou přímo porovnána s výsledky numerické analýzy v kapitole 5.6.



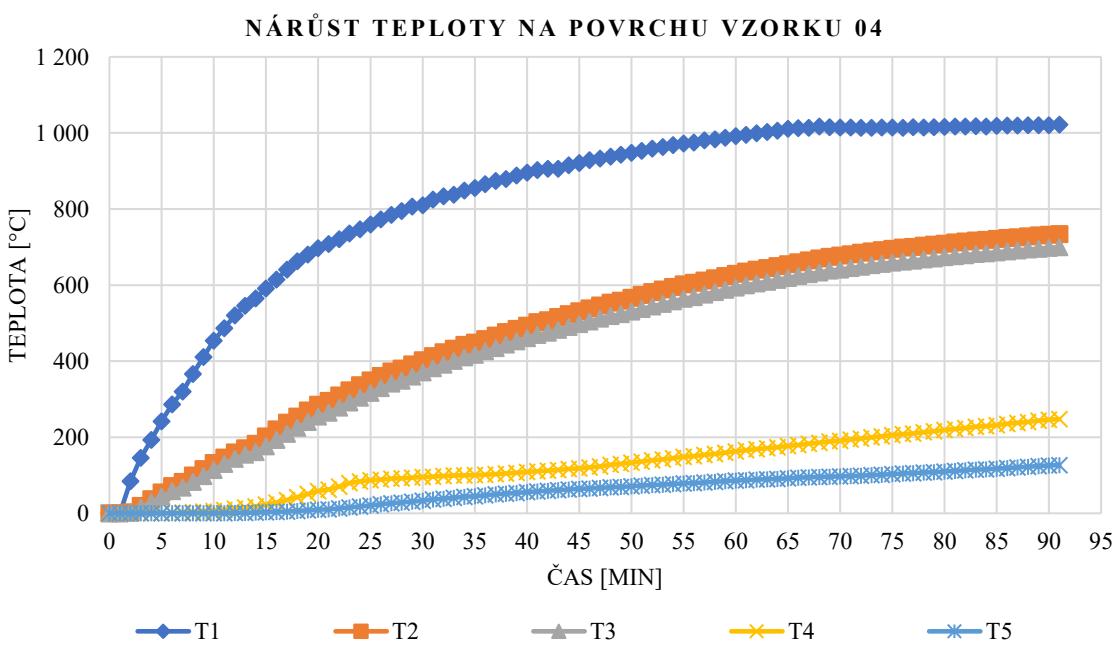
Obrázek 37 – Teplotní vývoj TČ panel 1 (převzato z [22])



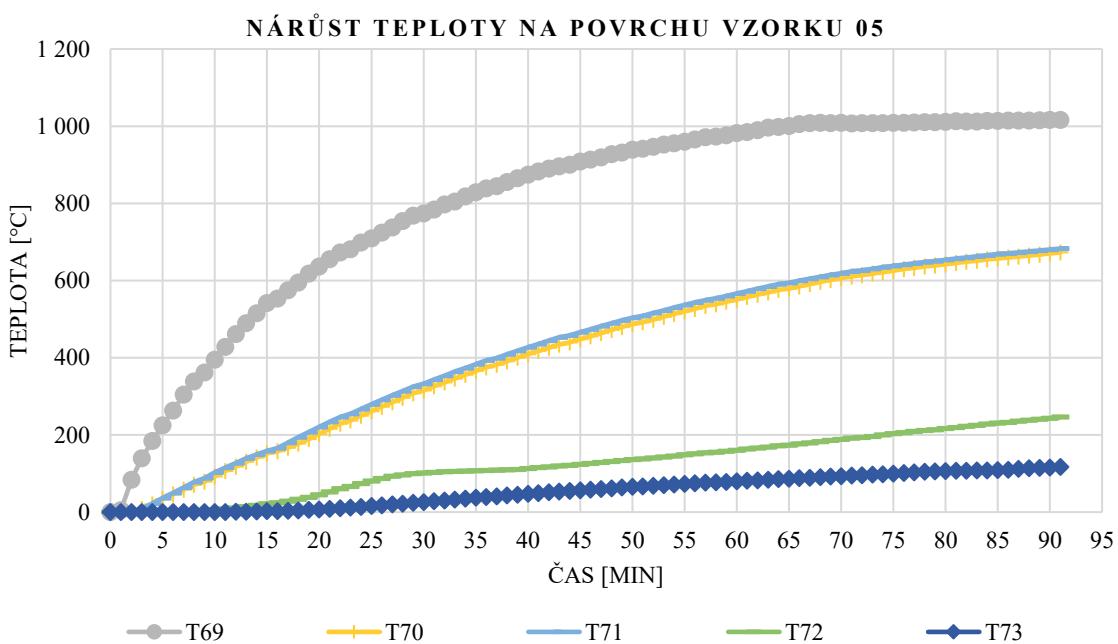
Obrázek 38 - Teplotní vývoj TČ panel 2 (převzato z [22])



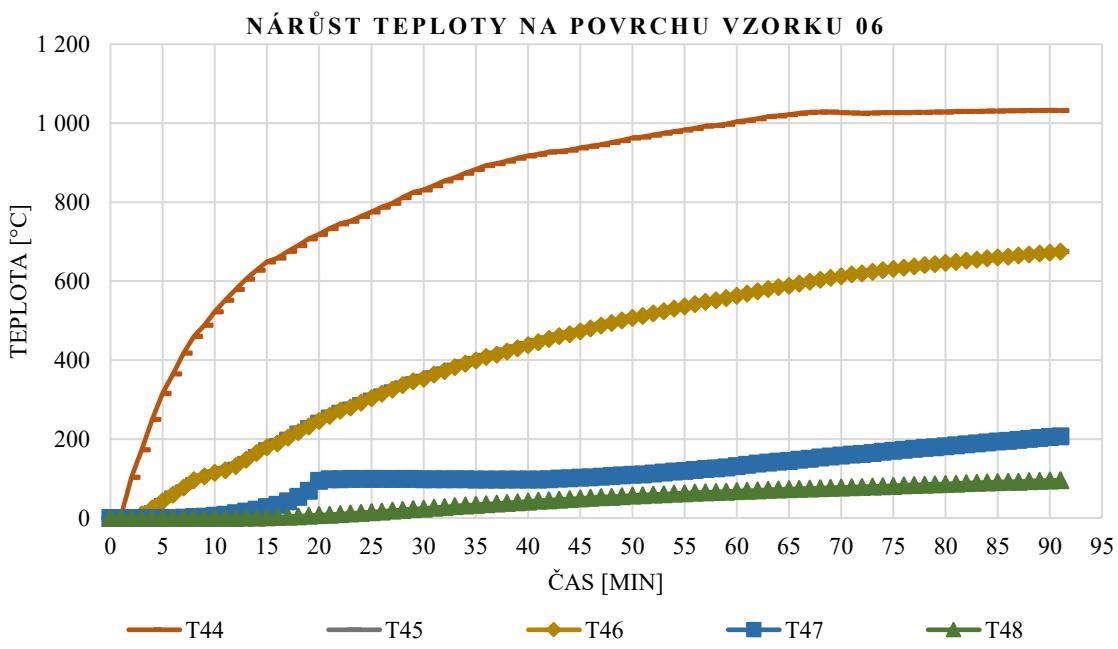
Obrázek 39 - Teplotní vývoj TČ panel 3 (převzato z [22])



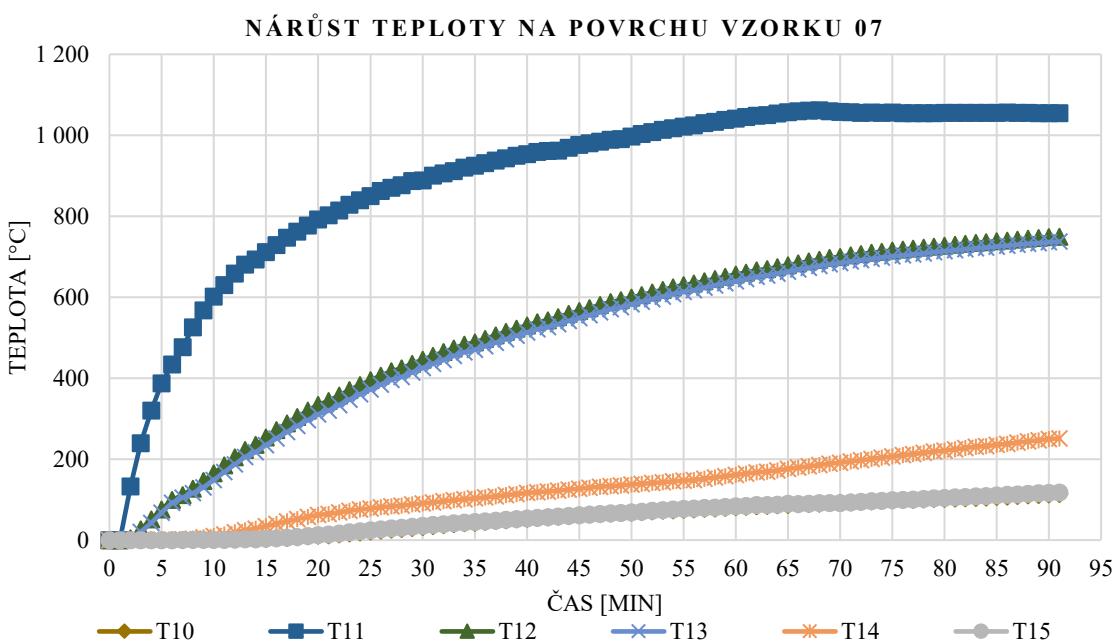
Obrázek 40 - Teplotní vývoj TČ panel 4 (převzato z [22])



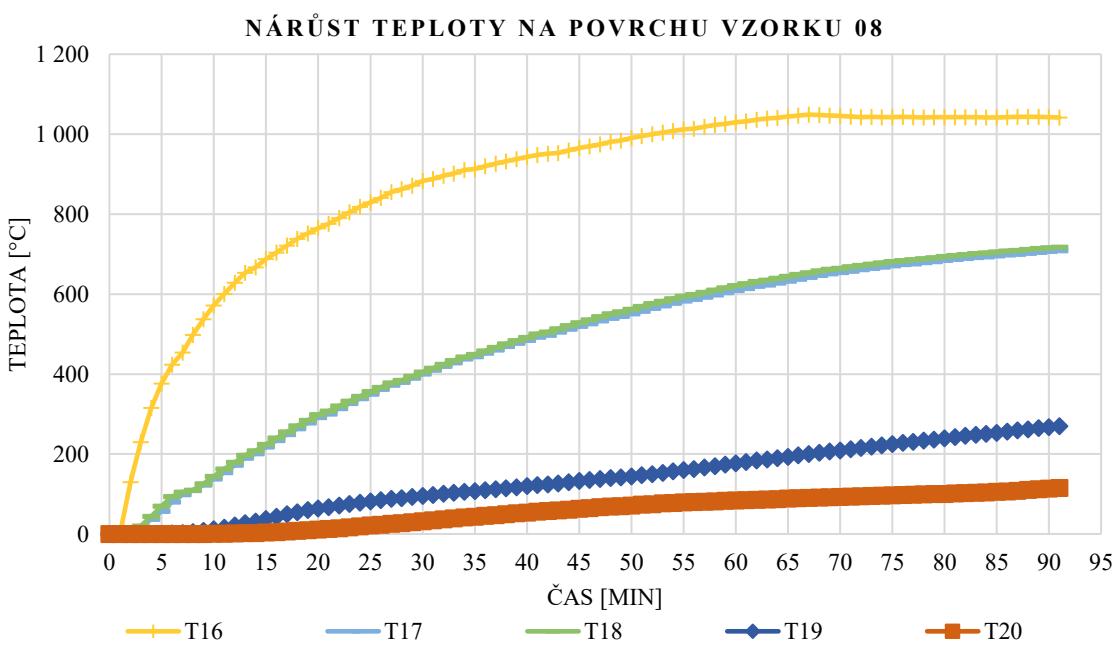
Obrázek 41 - Teplotní vývoj TČ panel 5 (převzato z [22])



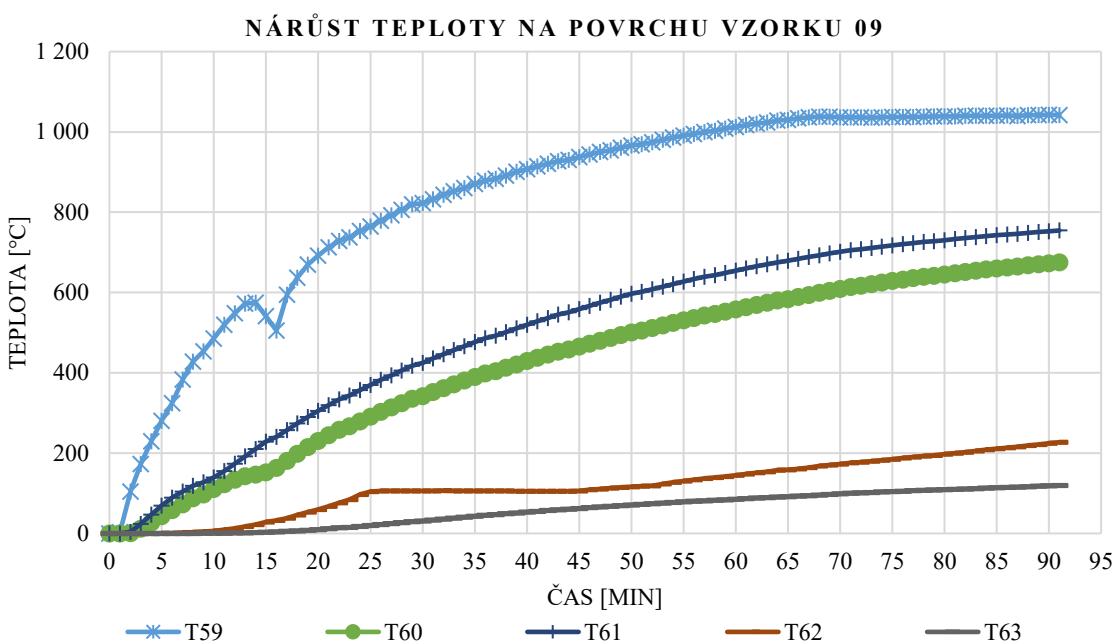
Obrázek 42 - Teplotní vývoj TČ panel 6 (převzato z [22])



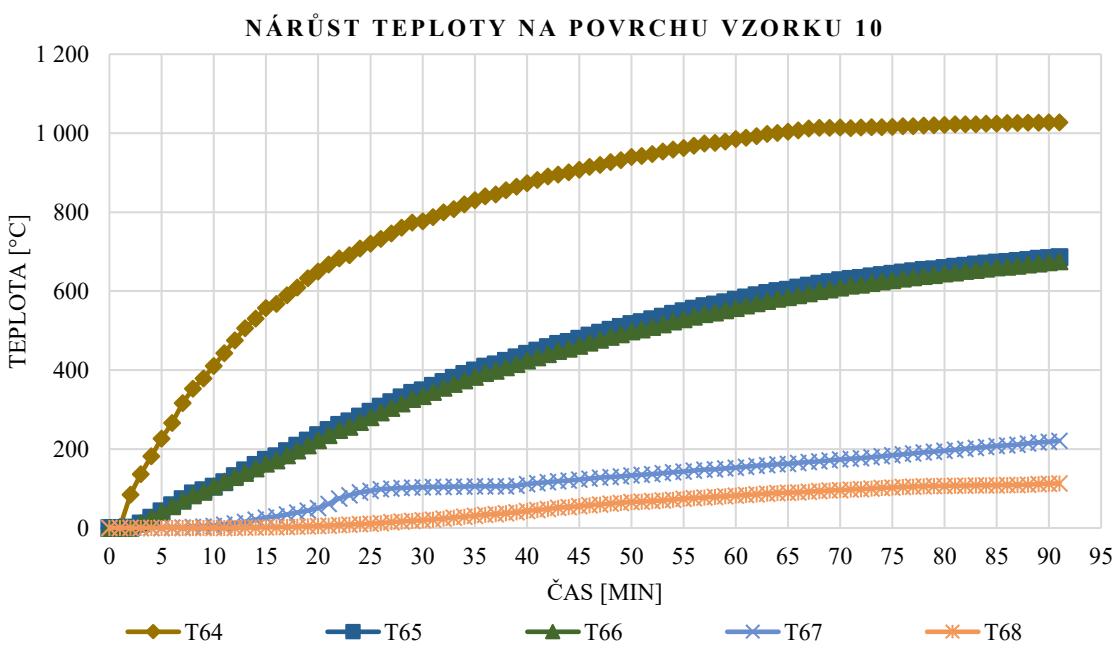
Obrázek 43 - Teplotní vývoj TČ panel 7 (převzato z [22])



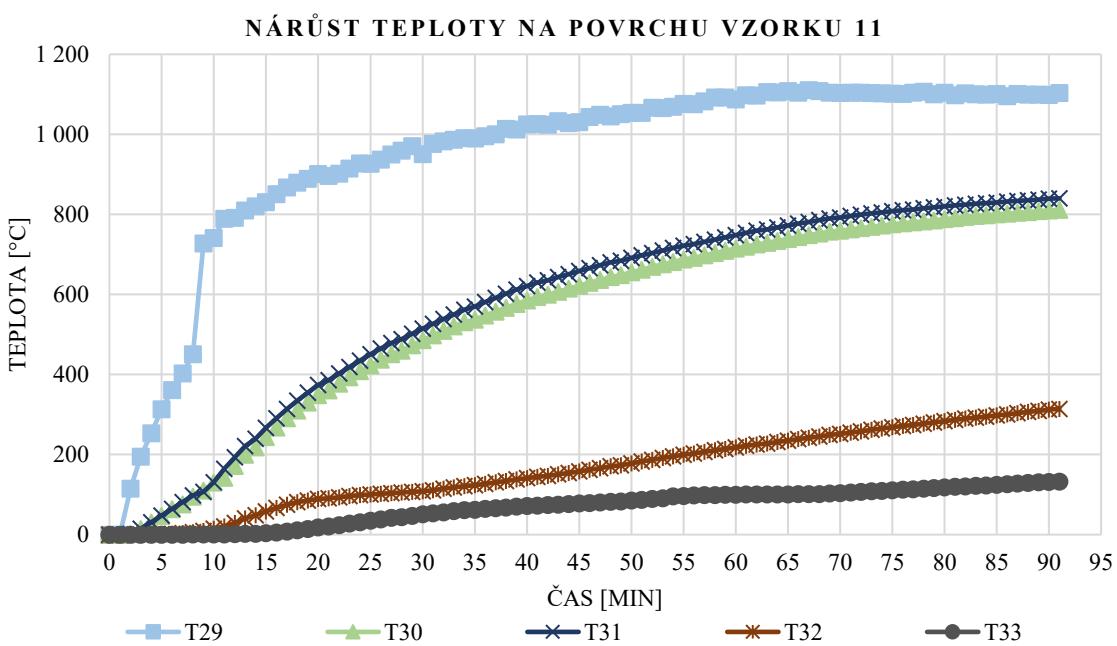
Obrázek 44 - Teplotní vývoj TČ panel 8 (převzato z [22])



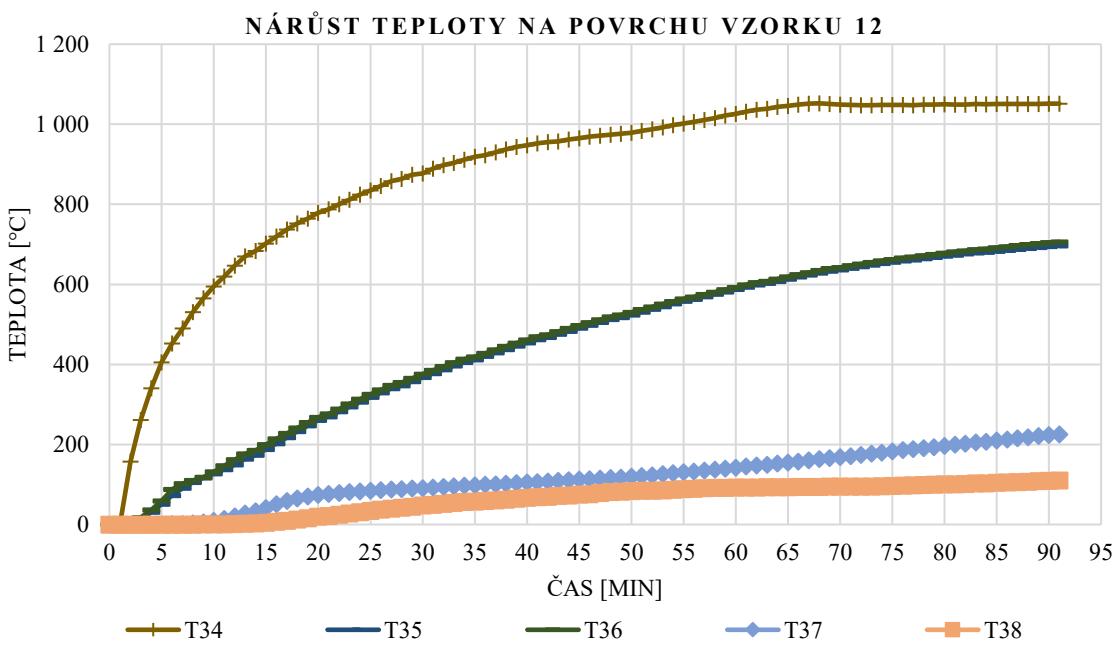
Obrázek 45 - Teplotní vývoj TČ panel 9 (převzato z [22])



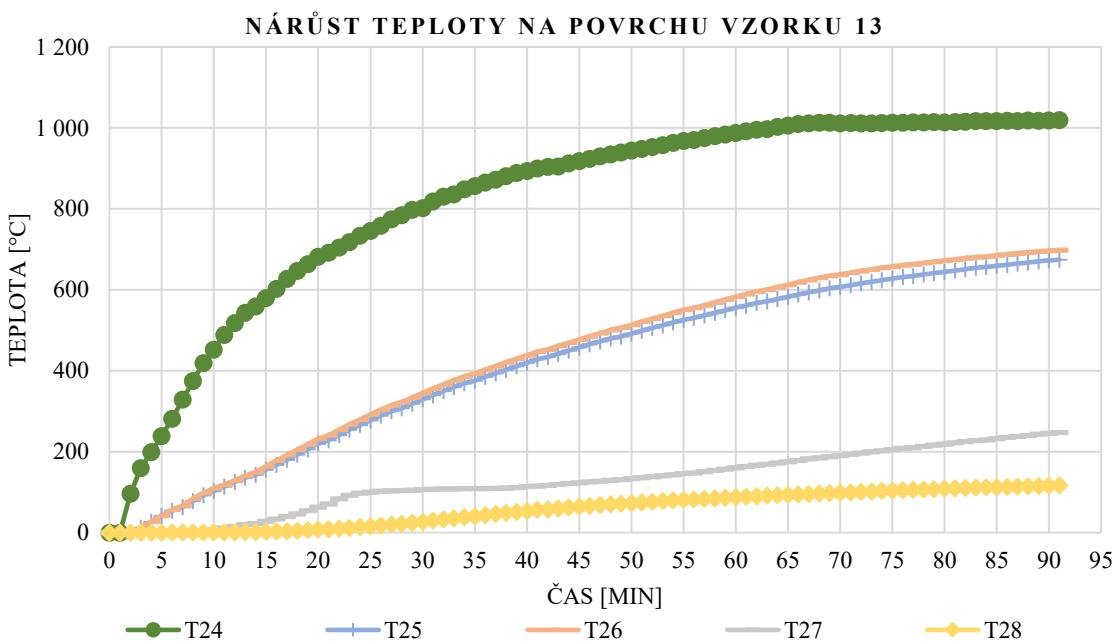
Obrázek 46 - Teplotní vývoj TČ panel 10 (převzato z [22])



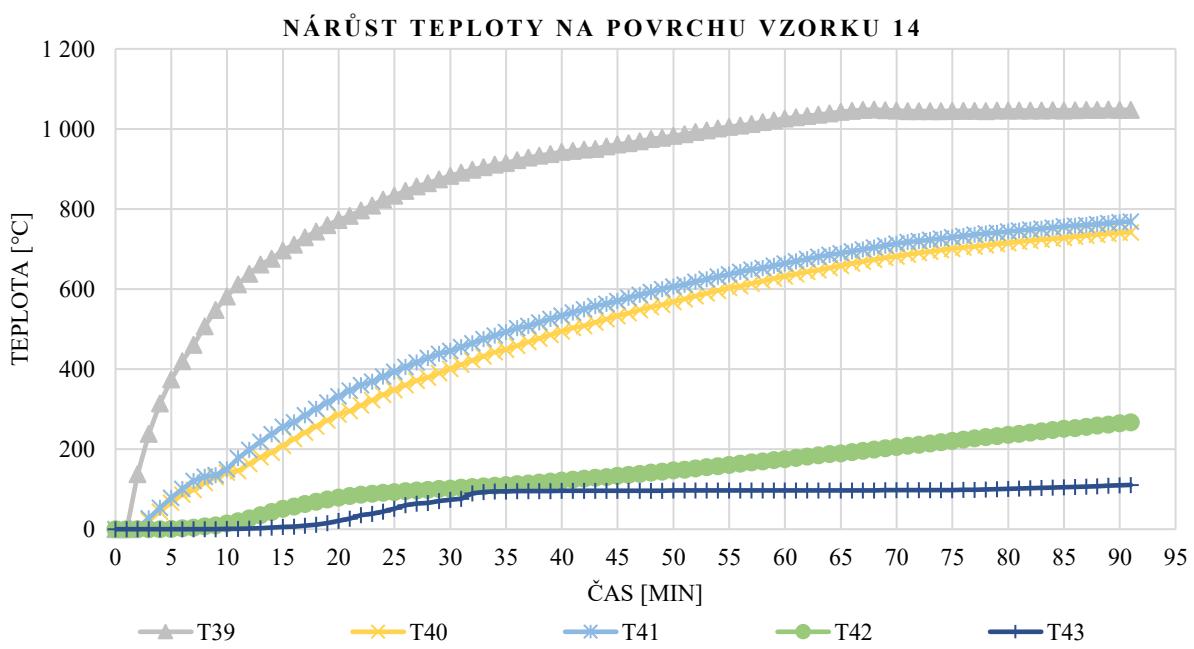
Obrázek 47 - Teplotní vývoj TČ panel 11 (převzato z [22])



Obrázek 48 - Teplotní vývoj TČ panel 12 (převzato z [22])



Obrázek 49 - Teplotní vývoj TČ panel 13 (převzato z [22])



Obrázek 50 - Teplotní vývoj TČ panel 14 (převzato z [22])

5 Numerická analýza transportu tepla

5.1 Popis matematického modelu sdílení tepla a jeho numerického řešení

Analýza teplotních polí v betonovém ostění vystaveném požáru vychází z fyzikálního principu zachování energie a Fourierova zákona vedení tepla. Vzhledem k charakteru zatížení se jedná o nestacionární (časově závislý) a nelineární problém vedení tepla v pevném tělese.

Opomeneme-li vliv transportu hmoty (vlhkosti) na sdílení tepla a vnitřní zdroje tepla, lze rovnici energetické bilance pro beton zapsat v diferenciálním tvaru (tzv. silná formulace) jako:

$$\text{Pro } t \in (0, t): \quad \rho_c(\theta) c_{p,c}(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot q_{cd} \quad (1)$$

kde:

- θ [K] je teplota,
- t [s] je čas,
- $\rho_c(\theta)$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] je objemová hmotnost betonu závislá na teplotě,
- $c_{p,c}(\theta)$ [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] je měrná tepelná kapacita betonu závislá na teplotě,
- q_{cd} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] je vektor tepelného toku vedením.

Vztah mezi tepelným tokem a teplotním gradientem je dán Fourierovým zákonem:

$$q_{cd} = -\lambda_c(\theta) \nabla \theta \quad (2)$$

kde λ_c [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] je součinitel tepelné vodivosti betonu, rovněž závislý na teplotě. Dosazením Fourierova zákona do rovnice energetické bilance získáme řídící diferenciální rovnici vedení tepla, která popisuje časoprostorové rozložení teploty v řešené oblasti Ω :

$$\rho_c(\theta) c_{p,c}(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_c(\theta) \nabla \theta) \quad (3)$$

Okrajové a počáteční podmínky

Aby byla úloha jednoznačně řešitelná, je nutné definovat počáteční stav a podmínky na hraničích oblasti Γ .

Počáteční podmínka definuje rozložení teploty v čase $t=0$:

$$\theta(x, 0) = \theta_0 \quad \text{v oblasti } \Omega \quad (4)$$

Okrajové podmínky při požáru jsou specifické tím, že k přenosu tepla dochází kombinací konvekce (proudění) a radiace (sálání). Na hranici vystavené požáru Γ_E je tedy předepsán tepelný tok smíšenou okrajovou podmínkou (Newtonův a Stefan-Boltzmannův zákon):

$$-(\lambda \nabla \theta) \cdot n = \alpha_c(\theta - \theta_\infty) + \varepsilon \sigma_{SB} (\theta^4 - \theta_\infty^4) \quad \text{na } \Gamma_E \quad (5)$$

kde:

- n [-] je vnější normála k povrchu,
- α_c [W·m⁻²·K⁻¹] je součinitel přestupu tepla konvekcí,
- θ_∞ [K] je teplota plynů v okolí (teplota požáru daná teplotní křivkou),
- ε [-] je emisivita povrchu (pro beton doporučeno 0,7 dle ČSN EN 1992-1-2),
- σ_{SB} je Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,67 \times 10^{-8}$ W·m⁻²·K⁻⁴).

Kvůli nelineárnímu chování sálavého tepla a proměnlivosti materiálových vlastností (λ, c_p, ρ) v závislosti na teplotě není možné nalézt přesné řešení pouze podle těchto matematických vzorců. Je nutné přistoupit k numerickému modelování, které proces simuluje v postupných krocích.

5.1.1 Numerické řešení a formulace MKP

Pro numerické řešení výše popsaného matematického modelu byla zvolena Metoda konečných prvků (MKP), která je pro úlohy vedení tepla v konstrukcích nejvhodnější. Přechod od diferenciální rovnice k soustavě algebraických rovnic řešitelných počítačem probíhá ve dvou krocích: prostorová diskretizace a časová diskretizace [30].

Slabá formulace (Galerkinova metoda)

Výchozím bodem pro MKP je tzv. slabá formulace problému. Aplikací Galerkinovy metody vážených reziduí, kdy se rovnice vedení tepla vynásobí libovolnou váhovou funkcí ψ a integruje přes celou oblast Ω , získáme integrální tvar rovnice. S využitím Greenovy věty (integrace per partes) lze snížit řád derivace a zahrnout okrajové podmínky:

$$\int_{\Omega} \Psi \rho_c c_{p,c} \frac{\partial \theta}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \nabla \Psi \cdot (\lambda_c \nabla \theta) d\Omega + \int_{\Gamma_E} \Psi [\alpha_c(\theta - \theta_\infty) + \varepsilon \sigma_{SB} (\theta^4 - \theta_\infty^4)] d\Gamma = 0 \quad (6)$$

kde $\psi = 0$ na Γ_D

Prostorová diskretizace

Oblast Ω je rozdělena na konečný počet prvků. Neznámé rozložení teploty θ je v rámci prvku approximováno pomocí tvarových (bázových) funkcí N a uzlových hodnot teplot T . Po dosazení approximací do slabé formulace přejde integrální rovnice na soustavu obyčejných diferenciálních rovnic v maticovém tvaru:

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} + K(T)T = f(T) \quad (7)$$

Jednotlivé členy rovnice představují:

$C(T)$ – Matice tepelné kapacity: Vyjadřuje schopnost materiálu akumulovat teplo. Je závislá na hustotě ρ_c a měrné tepelné kapacitě $c_{p,c}$.

$$C^e = \int_{\Omega^e} (N^e)^T \rho_c(\tilde{\theta}) c_{p,c}(\tilde{\theta}) (N^e)^T d\Omega \quad (8)$$

$K(T)$ – Matice tepelné vodivosti: Reprezentuje odpor materiálu proti vedení tepla. Je závislá na součiniteli tepelné vodivosti λ_c .

$$K^e = \int_{\Omega^e} (\nabla N)^T \lambda_c \nabla N d\Omega \quad (9)$$

$f(T)$ – Vektor tepelného zatížení: Obsahuje vliv okrajových podmínek (konvekce a radiace) na hranici prvku.

$$f^e = \int_{\Gamma_E} N^T [\alpha_c(\theta - \theta_\infty) + \varepsilon \sigma_{SB} (\theta^4 - \theta_\infty^4)] d\Gamma \quad (10)$$

Časová diskretizace a iterační řešení

Jelikož se tepelné vlastnosti betonu s rostoucí teplotou výrazně mění (problém je nelineární), nelze spočítat teploty v konstrukci pro celý průběh požáru najednou. Výpočet je proto nutné provádět postupně v malých časových krocích Δt .

V každém tomto časovém kroku program hledá výsledné teploty. Protože rovnice nelze vyřešit přímo jednoduchým vzorcem, používá se tzv. iterační (opakovací) postup. Konkrétně je využita Newton-Raphsonova metoda. Ta funguje na principu postupného zpřesňování výsledku: program provede odhad, zjistí velikost chyby (reziduum) a výpočet opakuje tak dlouho, dokud chyba klesne pod stanovenou, velmi malou toleranci. Tím je zajištěno, že výsledné teploty odpovídají fyzikální realitě. Celý tento numerický postup je plně automatizován a implementován v programu TempAnalysis, který byl v této práci využit pro simulaci teplotních polí.

5.2 Teplotní a fyzikální parametry betonu

Rozložení teploty a její časový vývoj v průřezu konstrukce při zvýšených teplotách je dáno tepelným chováním materiálu. Popis tohoto chování vychází z modelu vedení tepla, ve kterém vystupují tři klíčové materiálové vlastnosti závislé na teplotě:

- součinitel tepelné vodivosti $\lambda(\theta)$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
- měrná tepelná kapacita $c_p(\theta)$ [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
- objemová hmotnost $\rho(\theta)$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

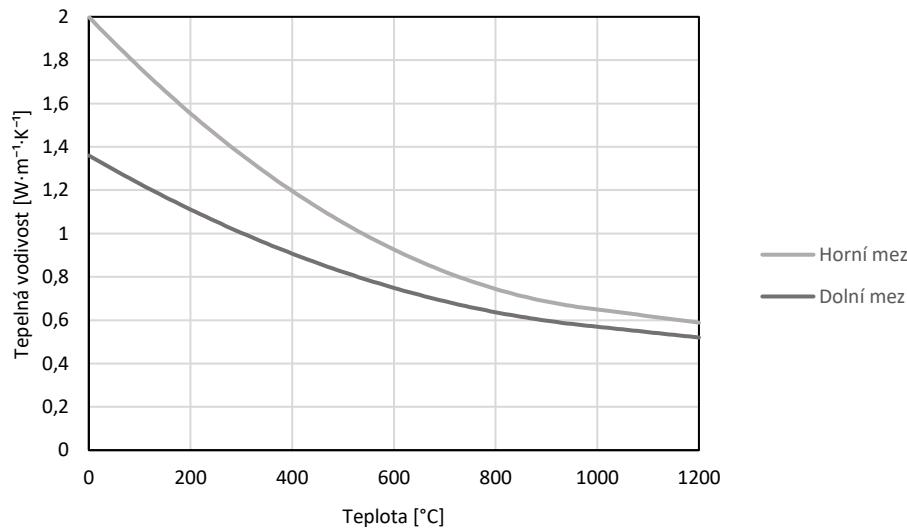
5.2.1 Tepelná vodivost

Součinitel tepelné vodivosti charakterizuje schopnost betonu vést teplo vedením. U běžných konstrukčních betonů při laboratorní teplotě nabývá typicky hodnot přibližně $1,5\text{--}2,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Přesná hodnota závisí na složení směsi, především na typu a podílu kameniva, póravitosti a stavu nasycení vodou. S rostoucí teplotou tepelná vodivost obvykle klesá, protože v matrici vznikají mikrotrhliny a zvětšuje se otevřená póravitost, což snižuje efektivní schopnost materiálu přenášet teplo. Naopak vyšší počáteční vlhkost může tepelnou vodivost dočasně zvýšit, neboť voda má větší vodivost než vzduch. Po odpaření a následné ztrátě vlhkosti vodivost opět klesá [31][21].

Významný je také vliv kameniva: křemičitá kameniva (žuly, ruly) mírají vyšší vodivost než vápencová. Kameniva s vyšší hustotou a nižší póravitostí obecně zvyšují součinitel tepelné vodivosti výsledného betonu. Naopak provzdušnění nebo přídavek polypropylenových vláken vede k mírnému snížení součinitele tepelné vodivosti díky vyššímu podílu vzduchu v mikrostruktúře. Účinek je zpravidla v jednotkách procent a je druhotný ve srovnání s typem kameniva a obsahem vody. Vedle materiálového složení má vliv i objemová hmotnost. S rostoucí objemovou hmotností roste i vodivost (více pevné fáze, méně vzduchu)[30][17]. Norma ČSN EN 1992-1-2 [6] udává pro součinitel tepelné vodivosti vztahy (11) a (12), které jsou graficky znázorněny, viz Obrázek 51.

$$\text{Dolní mez } (\theta) = 1,36 - 0,136 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 0,0057 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \quad (11)$$

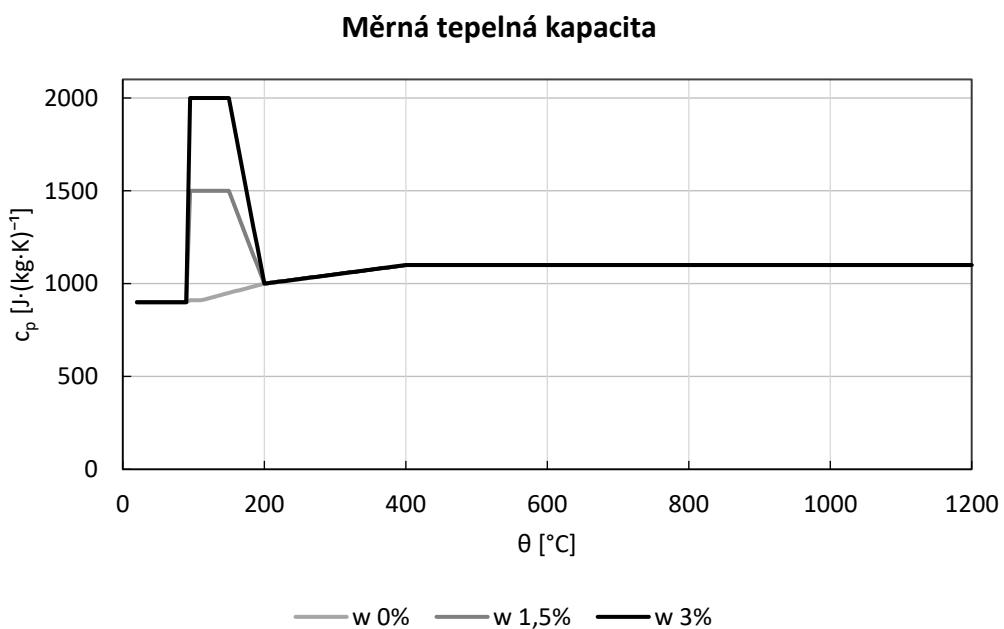
$$\text{Horní mez } (\theta) = 2,0 - 0,245 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 0,011 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \quad (12)$$



Obrázek 51 – Tepelná vodivost betonu (podle [21])

5.2.2 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita udává, kolik tepla je potřeba dodat 1 kg materiálu, aby se jeho teplota změnila o 1 K. U suchého betonu bez fázových změn roste c_p s teplotou pozvolna. Pokud je však beton vlhký, do odezvy se promítá latentní teplo odpařování, v okolí 100 °C dochází k intenzivnímu vypařování pórové vody a efektivní tepelná kapacita c_p má výrazný vzestup. Amplituda vrcholu je přímo úměrná obsahu vody – čím vyšší vlhkost, tím více tepla se spotřebuje na fázovou přeměnu a tím vyšší je efektivní kapacita viz Obrázek 52 [6].



Obrázek 52 – Měrná tepelná kapacita (podle [6])

5.2.3 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost se definuje jako množství či hmotnost materiálu na jednotku objemu, základní jednotka je $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Za zvyšující se teploty se objemová hmotnost mění, respektive postupně klesá, což je především při počátku zahřívání materiálu. Kolem hodnoty 100 °C dochází k odparu vody, která je chemicky vázaná ve směsi betonu. To má za následek zvětšování objemu a snižování hmotnosti betonu [35] [37].

Posloupnost tohoto vývinu zachycují následující vzorce [21] a ilustrativní grafické zobrazení vývoje hodnot hustoty betonu pro $\rho = 2300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ viz Obrázek 53.

Norma ČSN EN 1992-1-2 [6] popisuje závislost hustoty na teplotě pomocí lineárních funkcí se zlomy v typických „fyzikálních“ bodech, tj. cca 115 °C (počátek vypařování vody), 200 °C a 400 °C.

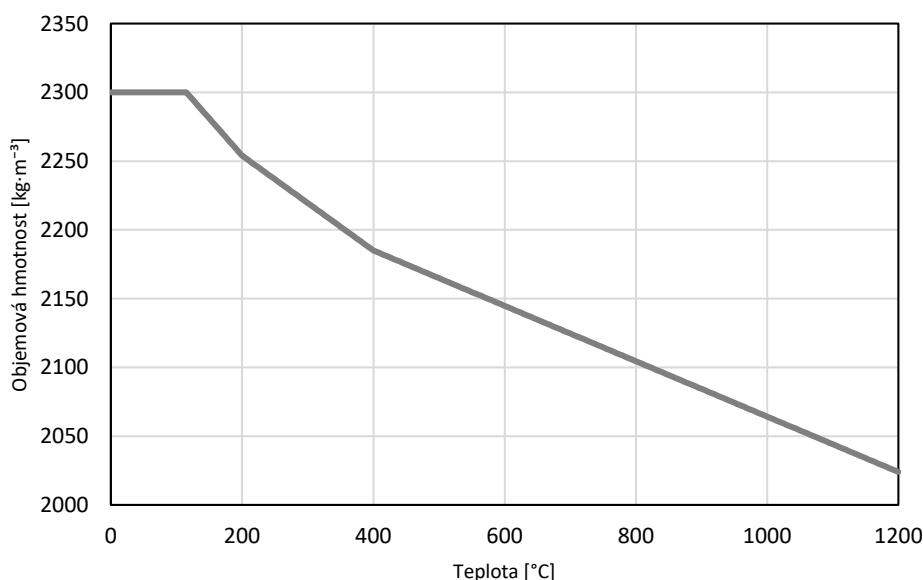
Rovnice jsou popsány vztahy (13)-(16) podle [6]:

$$\rho(\theta) = \rho_{20^\circ\text{C}} \quad \text{pro } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 115^\circ\text{C} \quad (13)$$

$$\rho(\theta) = \rho_{20^\circ\text{C}} \times \left(1 - 0,02 \times \frac{(\theta - 115)}{85}\right) \quad \text{pro } 115^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C} \quad (14)$$

$$\rho(\theta) = \rho_{20^\circ\text{C}} \times \left(0,98 - 0,03 \times \frac{(\theta - 200)}{200}\right) \quad \text{pro } 200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C} \quad (15)$$

$$\rho(\theta) = \rho_{20^\circ\text{C}} \times \left(0,95 - 0,07 \times \frac{(\theta - 400)}{800}\right) \quad \text{pro } 400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (16)$$



Obrázek 53 - Průběh hodnot objemové hmotnosti v závislosti na teplotě (podle [6])

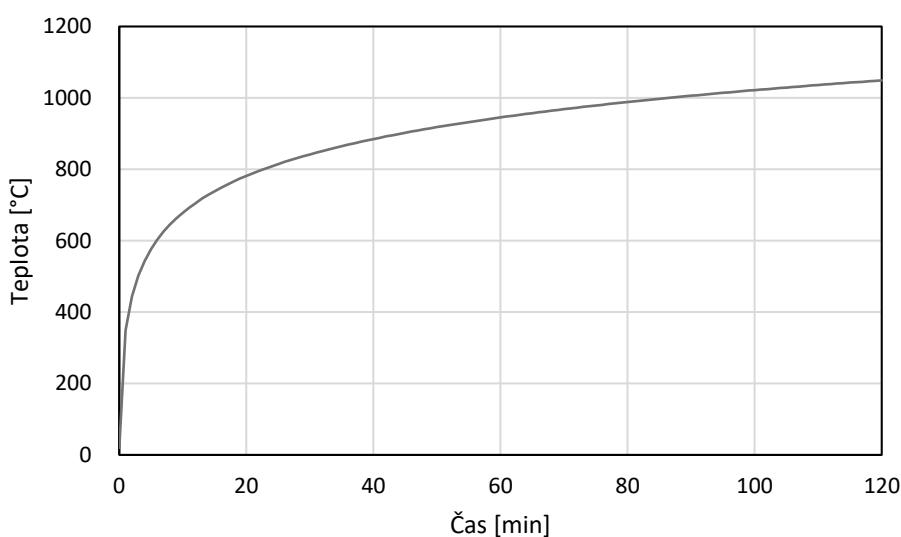
5.3 Teplotní křivky

5.3.1 Normová teplotní křivka

Teplotní křivka patří do skupiny nominálních teplotních křivek, které představují nejjednodušší modely požáru. Používají při požárních zkouškách a ke stanovení požární odolnosti konstrukcí. Vychází z předpokladu, že hlavním palivem jsou celulózové materiály (dřevo, papír, textilie) a že požár rychle přejde do plně rozvinuté fáze. K této křivce jsou vztaženy veškeré hodnoty požární odolnosti, které se uvádí v normě ČSN EN 1992-1-2 [6].

Její tvar je popsán vztahem (13) viz Obrázek 54 - Normová teplotní křivka (podle [6])

$$\Theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) [^{\circ}\text{C}] \quad (17)$$



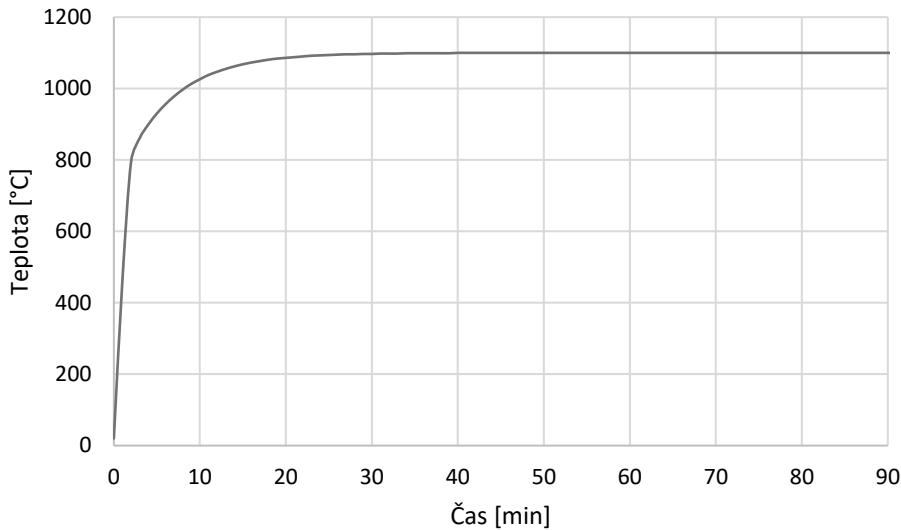
Obrázek 54 - Normová teplotní křivka (podle [6])

5.3.2 Uhlovodíková teplotní křivka

Uhlovodíková teplotní křivka popisuje plně rozvinuté požáry hořlavých kapalin (ropa) specifické rychlým nárůstem teploty. Uhlovodíková křivka na rozdíl od normové teplotní křivky ISO 834 vystoupá již během prvních 5 minut k teplotě 1050 °C, proto byla tato křivka převzata a implementována pro modelování požárů v tunelech. Křivka dosáhne maximální teploty cca 1100 °C. Stejně jako normová teplotní křivka ISO 834, avšak uhlovodíková teplotní křivka nezohledňuje závěrečnou chladnoucí fazu požáru.

Teplotní křivka je popsána vztahem (14), viz Obrázek 55 podle [6]:

$$\theta_g = 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) + 20 \text{ [°C]} \quad (18)$$



Obrázek 55 – Uhlovodíková teplotní křivka (podle [6])

5.4 Numerické řešení

5.4.1 Výpočetní program

Numerická analýza transportu tepla byla provedena za použití specializovaného softwaru TempAnalysis [32]. Výpočetní program byl vyvinutý na FSv ČVUT a řeší teplotní analýzu obdélníkových průřezů konstrukčních prvků jako jsou desky, stěny, trámy, sloupy. Umožňuje modelovat prvky z betonu podle ČSN EN 1992-1-2 [6]. Dokáže zohlednit také protipožární izolaci. Výstupem z programu jsou teplotní profily a teplotní vývoje v libovolných bodech. Program řeší vedení tepla metodou konečných prvků pro 1D a 2D průřezy. Program má verzi TempAnalysis 1.2 [32] a verzi TempAnalysis science (dále jen TA_s). Ve verzi TA_s lze počítat pouze 1D prvky. Pro tuto práci byla využita verze TA_s. Program byl verifikován porovnáním s normovými teplotními profily ČSN EN 1992-1-2 [6]. Verifikace a validace samotného kódu byla blíže popsána v disertační práci [30].

5.4.2 Postup výpočtu

Pro vykreslení grafů a grafických výstupů z programu je nejprve potřeba zadat základní vlastnosti betonového prvku. Jako vstupní data se nahrají do programu dva excelové soubory, které obsahují vše nezbytné k výpočtu. První vstupní soubor .xlsx definuje teplotně závislé materiálové charakteristiky:

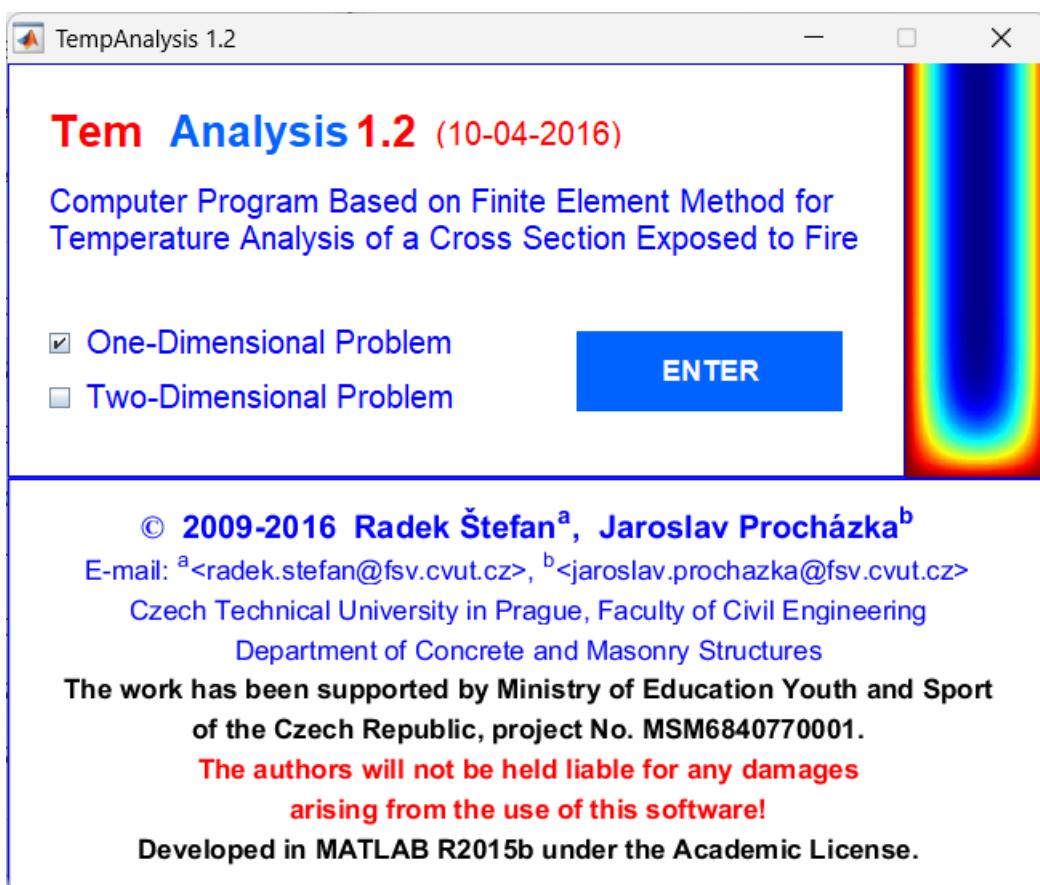
- tepelnou vodivost λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
- měrnou tepelnou kapacitu c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],

- objemovou hmotnost ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
- vlhkost materiálu.

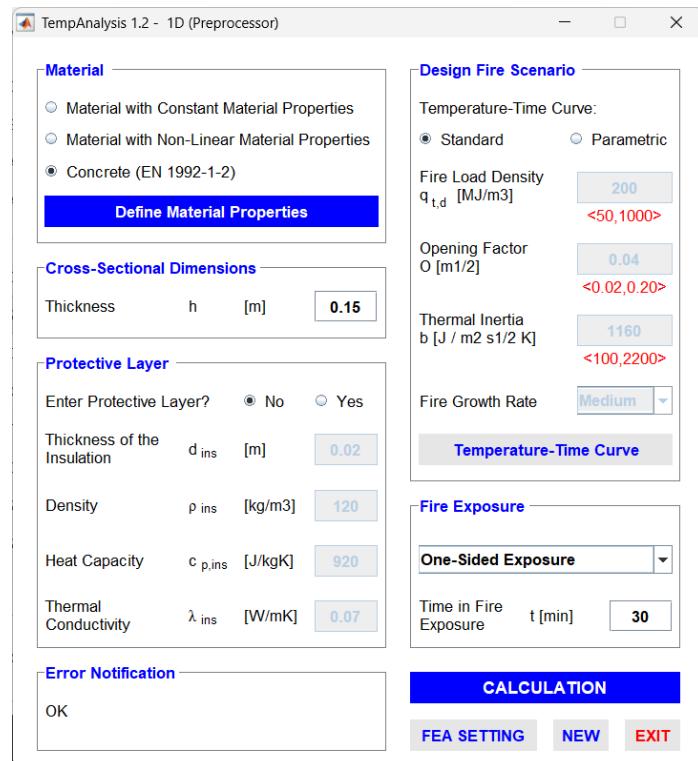
V průběhu výpočtu jsou hodnoty těchto veličin v rámci zadaného teplotního intervalu získávány interpolací. Mimo definovaný rozsah jsou uvažovány okrajové hodnoty příslušných funkcí, extrapolace se v tomto případě neprovádí.

Druhý vstupní soubor .xlsx obsahuje časově-teplotní průběh požáru, podle něhož jsou následně vykreslovány výsledky. Ve verzi TempAnalysis 1.2 lze zadávat parametry pro požadovanou parametrickou požární křivku. Oproti tomu ve verzi TA_s se vkládá uživatelsky definovaná teplotní křivka získaná z jiného výpočetního nástroje nebo – jako v této práci – z experimentální požární zkoušky. Tento způsob zadání představuje zásadní rozdíl mezi verzemi programu.

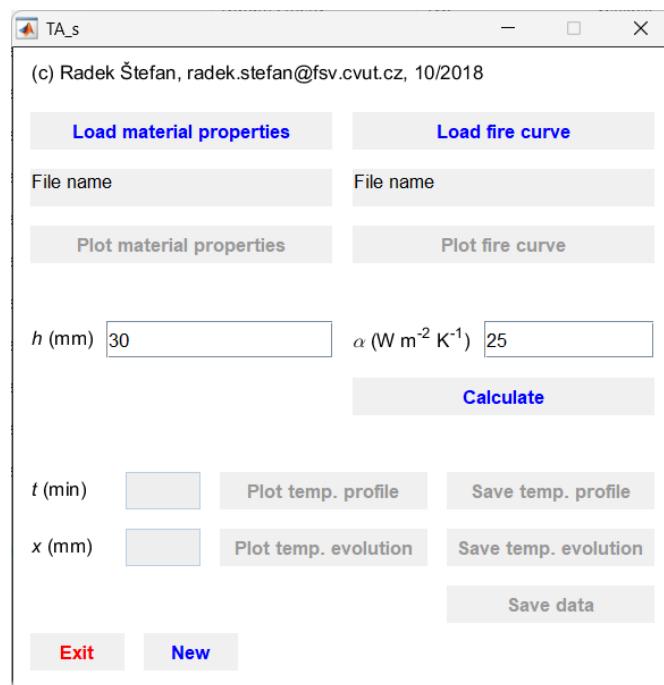
Oba excelové vstupy musí zachovat šablonu vytvořenou pro tento software (strukturu listů, názvy a pořadí sloupců, umístění buněk), aby bylo zajištěno korektní načtení dat a výpočet. Nedodržení požadovaného formátu vede k chybovému hlášení o nevalidním formátu a výpočet není proveden.



Obrázek 56 – Úvodní stránka programu TempAnalysis [32]



Obrázek 57 – Pracovní rozhraní TempAnanlysis [32]

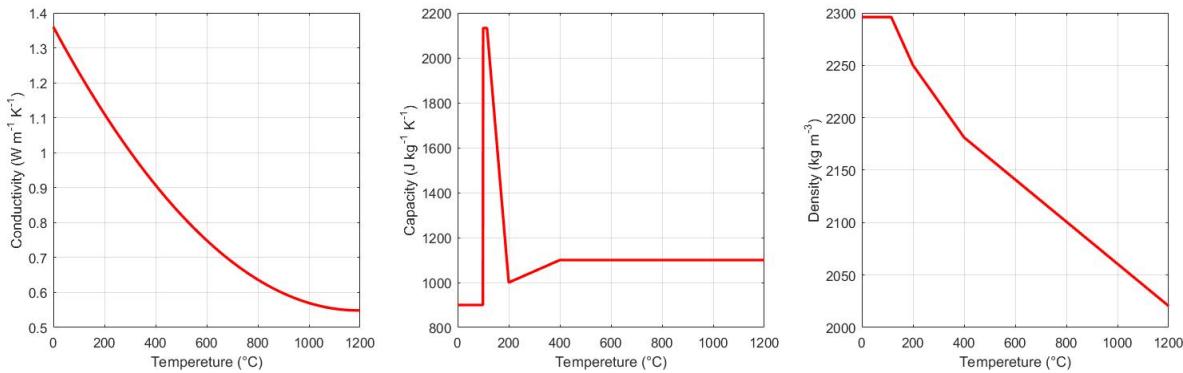


Obrázek 58 – Úvodní stránka TA_s [32]

V dalším kroku je třeba zadat tloušťku daného prvku, pro který chceme výpočet udělat. Tloušťka se zadává v celých milimetrech bez desetinné čárky. Volba součinitele přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] závisí na typu teplotní křivky:

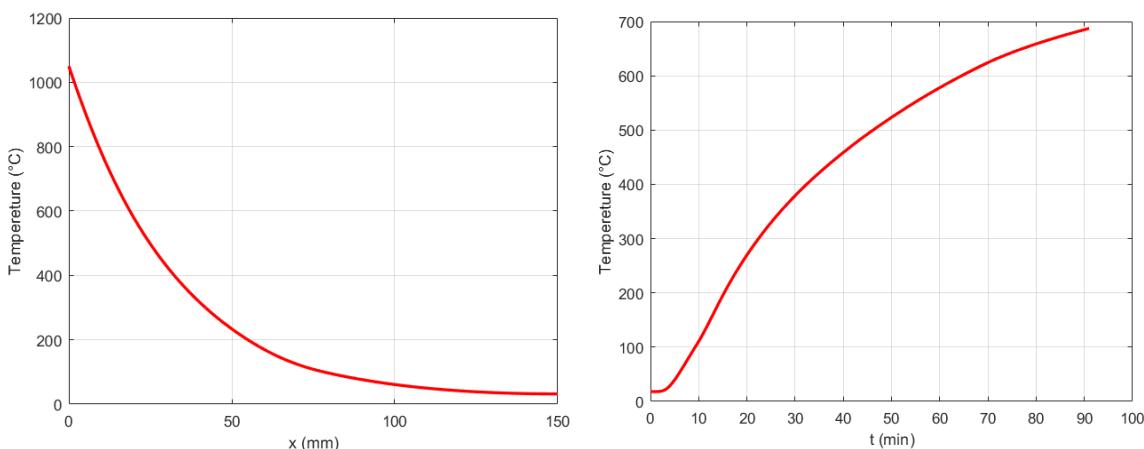
- Normová křivka: $\alpha=25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$,
- parametrická křivka: $\alpha = 35 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$,
- uhlovodíková: $\alpha = 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ [21].

Pro náš případ by měla být zvolena $\alpha = 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, jelikož při požární zkoušce byla simulována uhlovodíková teplotní křivka.



Obrázek 59 – Materiálové vlastnosti v TA_s [32]

Po vložení všech povinných dat je možné přejít k výpočtu. Výsledky výpočtu lze zobrazit v závislosti na čase, ve kterém chceme teplotní profil vykreslit, anebo lze vykreslit teplotní vývoj pro určitou hloubku x v mm. V těchto dvou případech se vykreslí křivka, viz Obrázek 60. Pro detailní analýzu výsledků lze data přes funkci Save data uložit jako tabulkou v excelu s podrobným výpočtem pro všechny místa x v čase po 30 s.



Obrázek 60 – Výsledky z programu TA_s [32]

5.5 Porovnání experimentálních dat s výsledky numerické analýzy

V této kapitole budou porovnány teplotní záznamy z požární zkoušky s numerickými výsledky získanými programem TempAnalysis [32].

Program řeší nestacionární vedení tepla v obdélníkových průřezech metodou konečných prvků popsaný v kapitole 5.8.5.4.1. Okrajové podmínky na ohřívaném povrchu zahrnují konvekci a sálání, v tomto případě byla použita verze programu TA_s, kde se jako vstupní teplotní křivka použil časový vývoj teploty v peci změřený při experimentu. Tento vývoj byl řízen uhlovodíkovou teplotní křivkou. Porovnání v této kapitole probíhá ve stejných časových okamžicích a ve stejných hloubkách, v nichž byly teploty měřeny termočlánky během zkoušky.

Vyhodnocení bylo provedeno dvěma teplotními analýzami. Na každém panelu byl porovnán teplotní průběh v hloubkách, kde byly umístěny termočlánky, viz kapitola 3.1.1, a teplotní vývoj v časech 15 minut, 30 minut, 60 minut a 90 minut. Teplotní vývoj z experimentální části je porovnán v grafu bodově. Výsledky jsou vyobrazeny na Obrázcích 61–88 a popsány v legendách¹.

5.5.1 Okrajové podmínky

Vstupní data pro výpočet v programu byly okrajové podmínky nastaveny:

- $\alpha_c = 35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,
- $\varepsilon_s = 0,7, \varepsilon_f = 1$,
- materiálové vlastnosti betonu dle ČSN EN 1992-1-2 [21] - dolní mez λ .

Okrajová podmínka součinitele přestupu tepla odpovídající uhlovodíkové teplotní křivce ($\alpha_c = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) nebyla v modelu použita, jelikož teplotní křivka simulovaná při experimentu v rané fázi zkoušky neodpovídala průběhu uhlovodíkové křivky, což vedlo k významným odchylkám výpočtu od experimentu. Snížením součinitele přestupu tepla na hodnotu pro parametrickou křivku dle normy ČSN EN 1991-1-2 [21], z hodnoty $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ na hodnotu $35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, bylo dosaženo lepší shody s naměřenými teplotami. Vypočtené teploty věrněji popisovaly naměřený průběh.

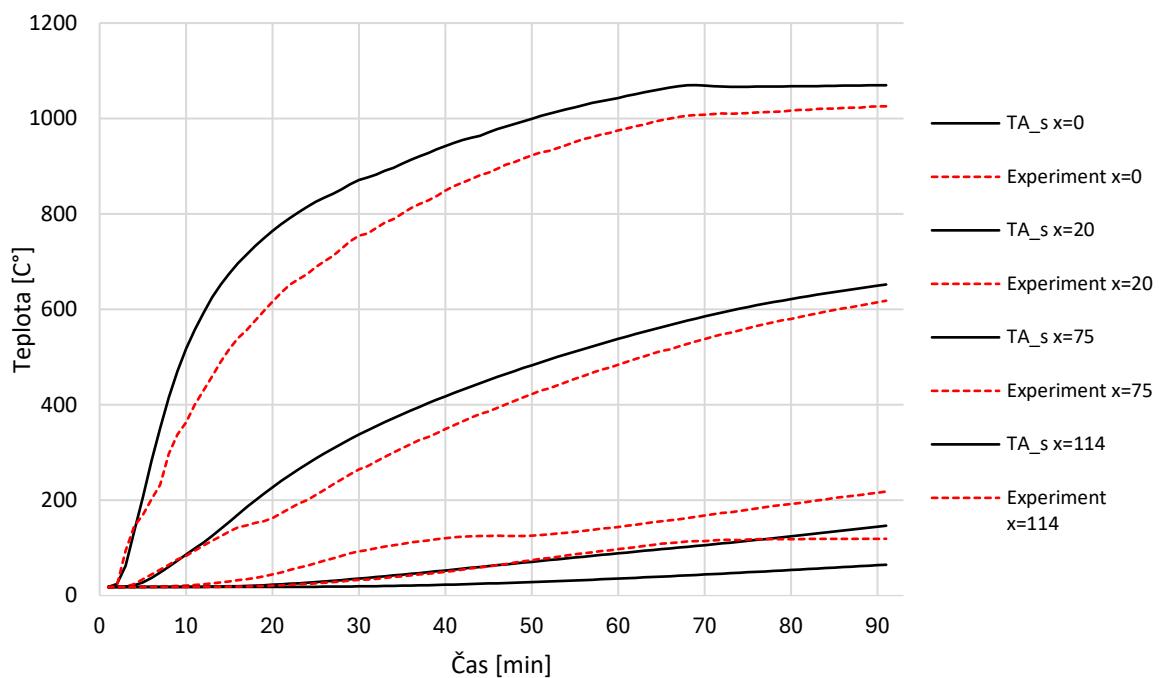
5.5.2 Vyhodnocení

Na výsledcích z této části je možné pozorovat, že se výsledky z programu po kalibraci vstupních dat přibližují naměřeným hodnotám z experimentu. Teploty měřené blíže k povrchu jsou srovnatelné s výsledky z TA_s. Termočlánky umístěné blíže k neohřívané straně povrchu se s výsledky programu mírně liší. Experimentálně naměřené teploty jsou u většiny panelů vyšší než teploty vypočítané programem. Hodnoty se liší v průměru o 50–75 °C. Rozdíl není až tak vysoký s ohledem na to, že se jedná o hlubší vrstvy materiálu, které nejsou náchylné na odštěpování a porušení

¹ Legenda odpovídá pořadí křivek (od shora dolů).

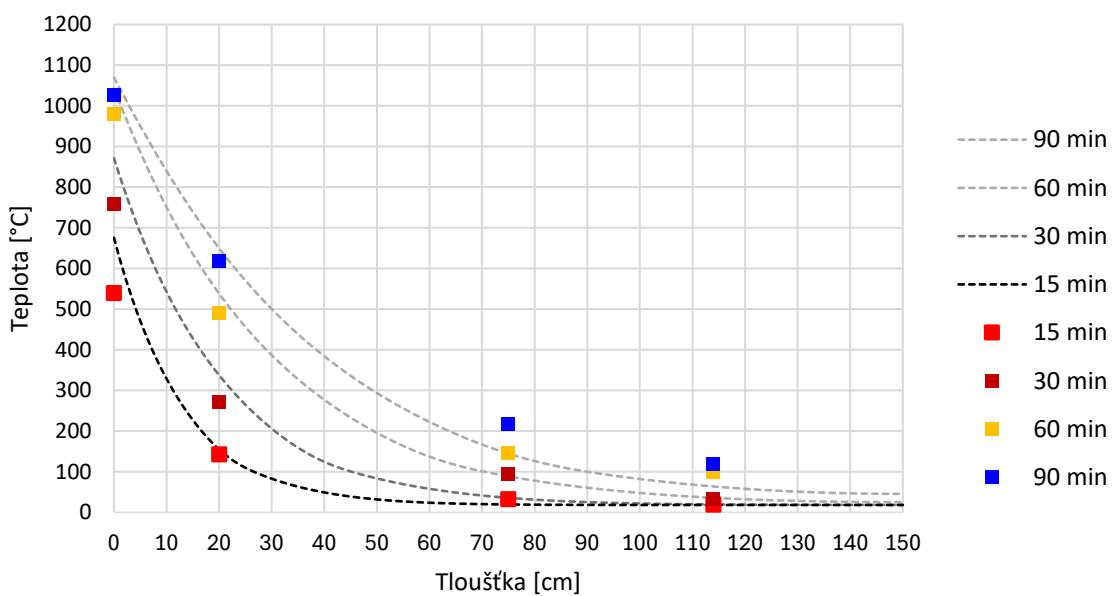
celkové soudržnosti prvku. Výsledky naměřené na povrchu jsou v této analýze zásadnější a je na ně kladen větší důraz z hlediska jejich náhylnosti na odštěpení.

PANEL 1



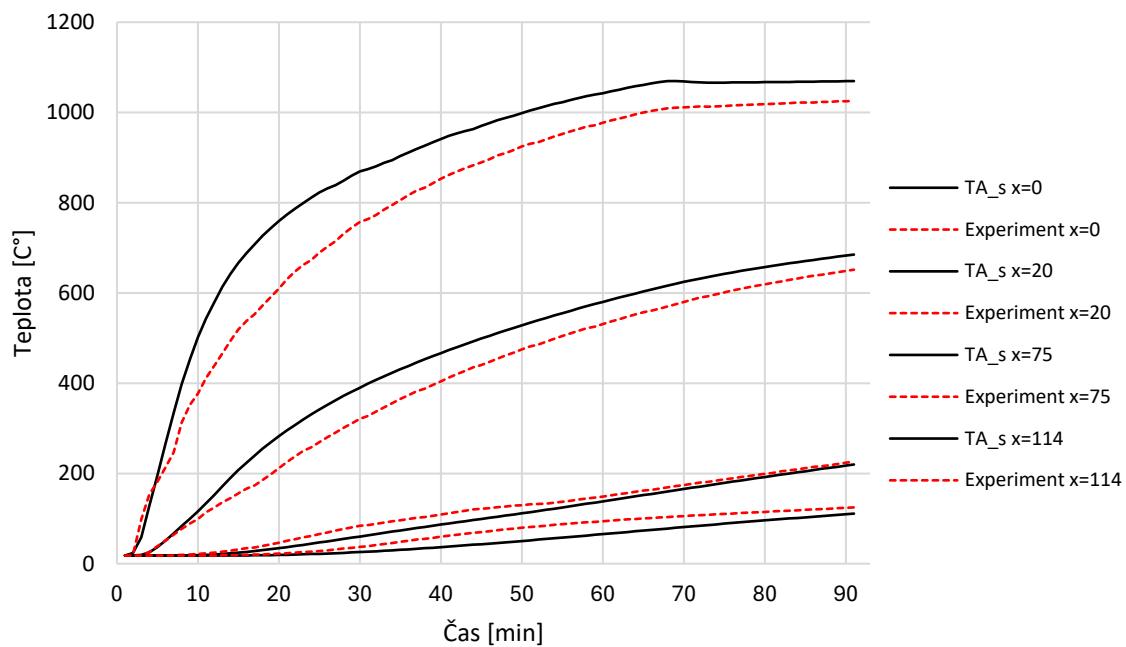
Obrázek 61 – Teplotní vývoj pro panel 1

PANEL 1

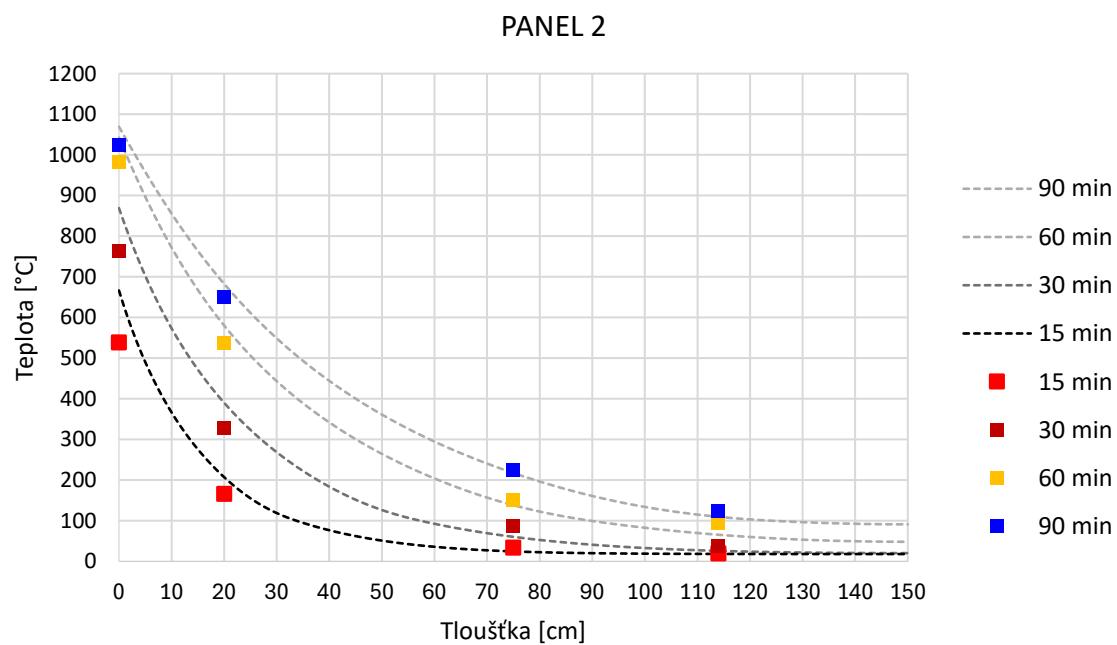


Obrázek 62 – Teplotní profil pro panel 1

PANEL 2

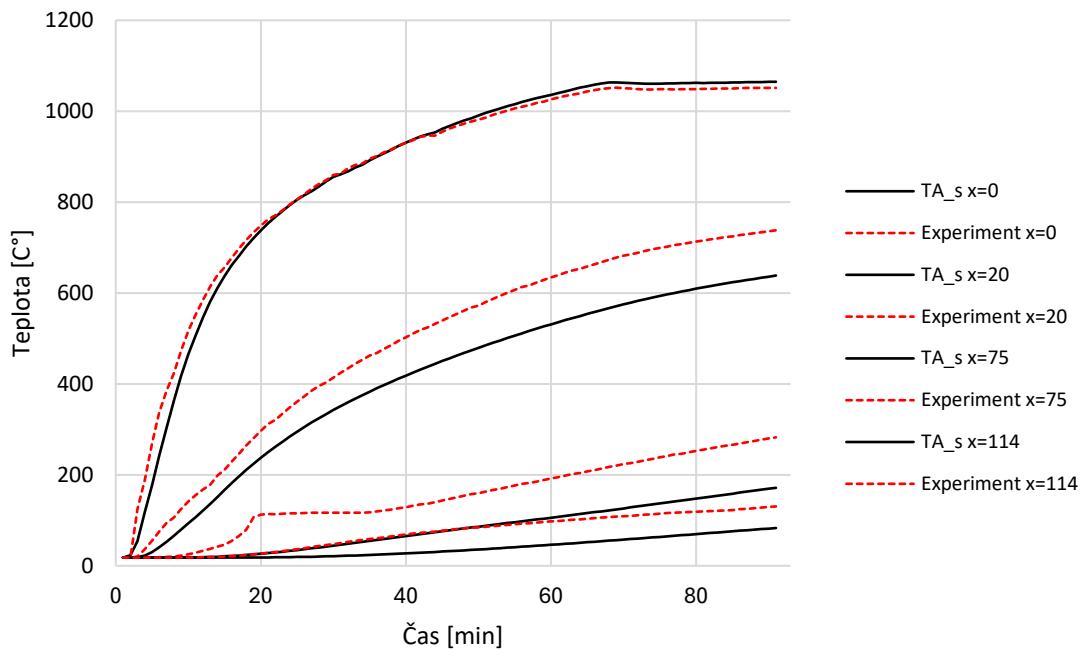


Obrázek 63 – Teplotní vývoj pro panel 2



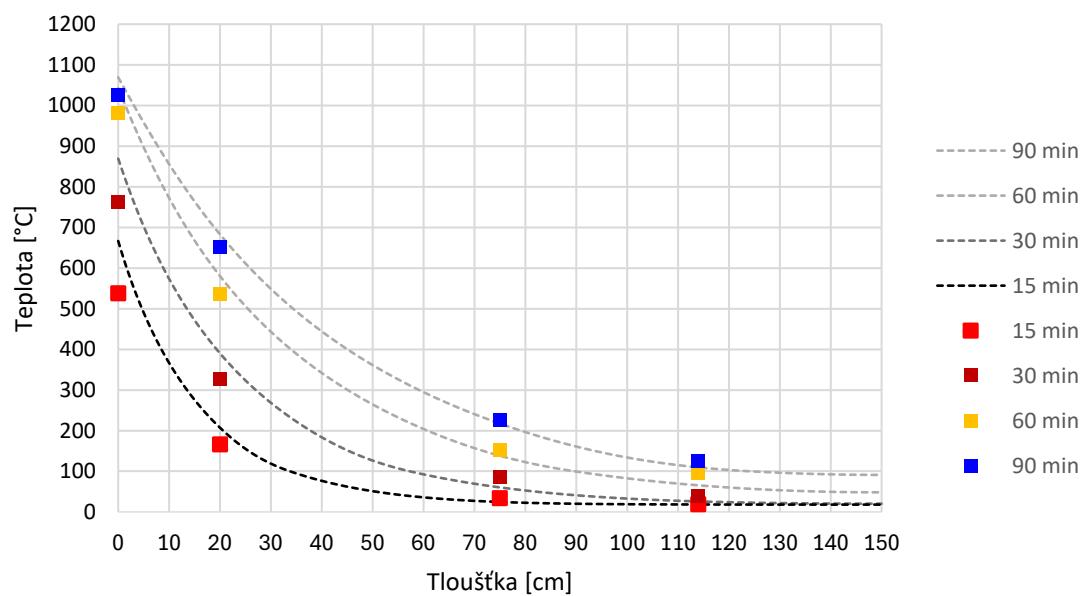
Obrázek 64 - Teplotní profil pro panel 2

PANEL 3



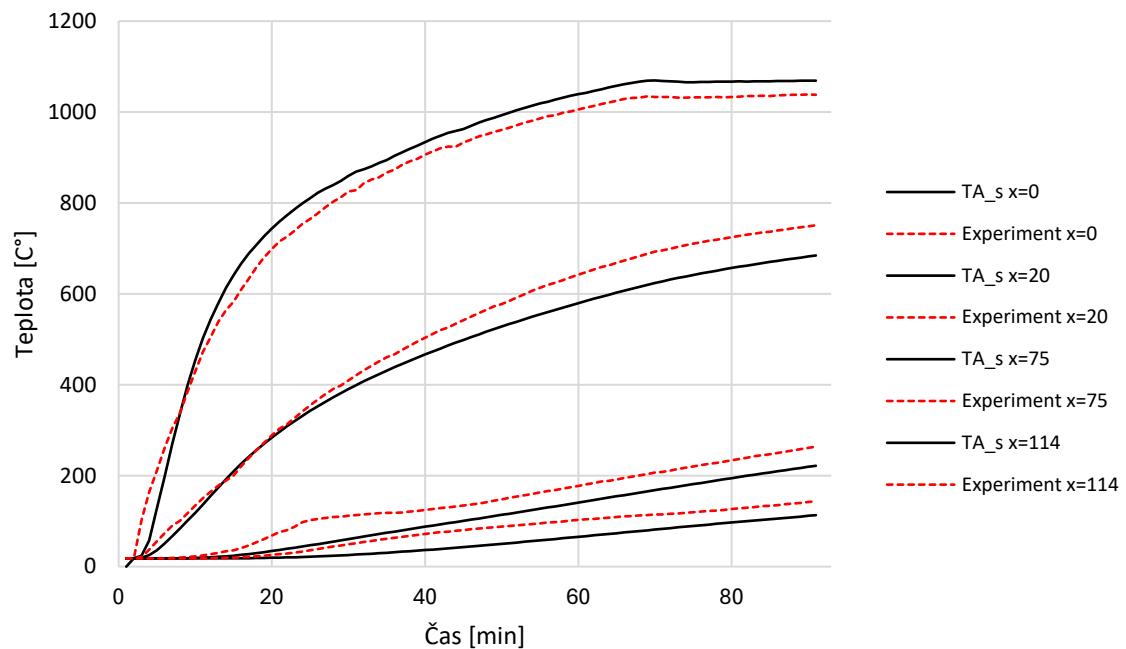
Obrázek 65 - Teplotní vývoj pro panel 3

PANEL 3



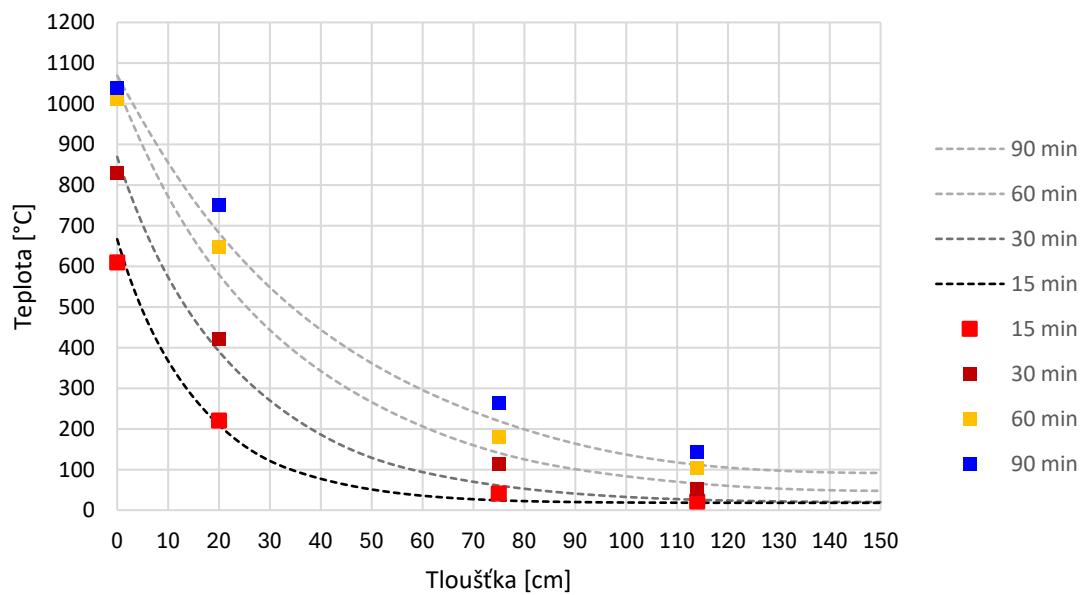
Obrázek 66 - Teplotní profil pro panel 3

PANEL 4



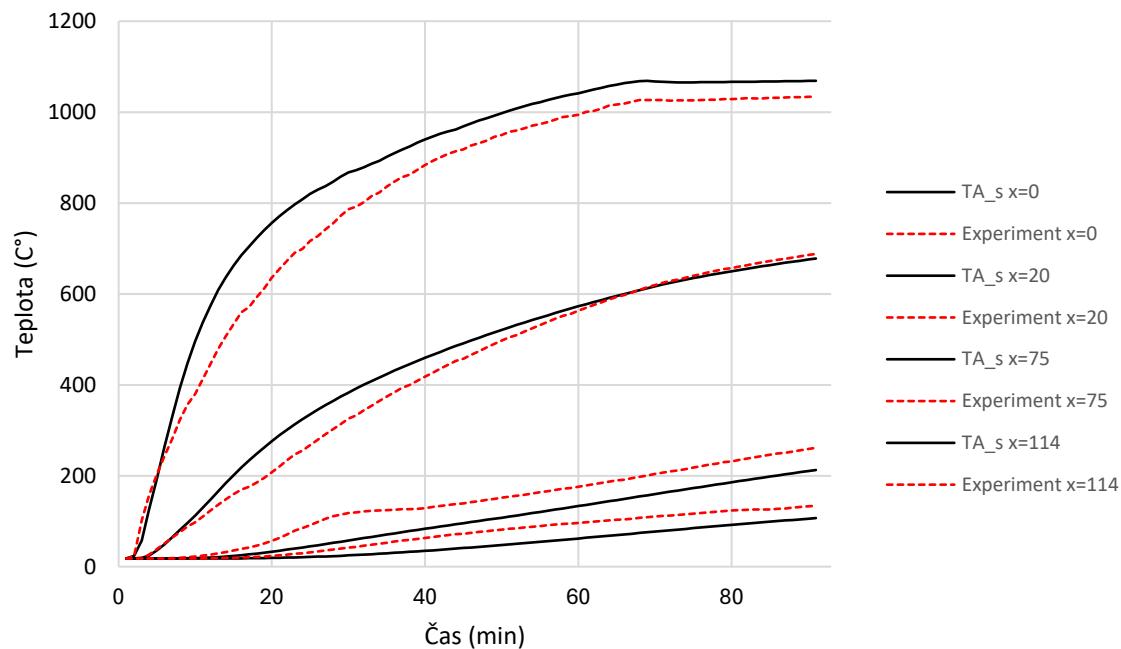
Obrázek 67 - Teplotní vývoj pro panel 4

PANEL 4



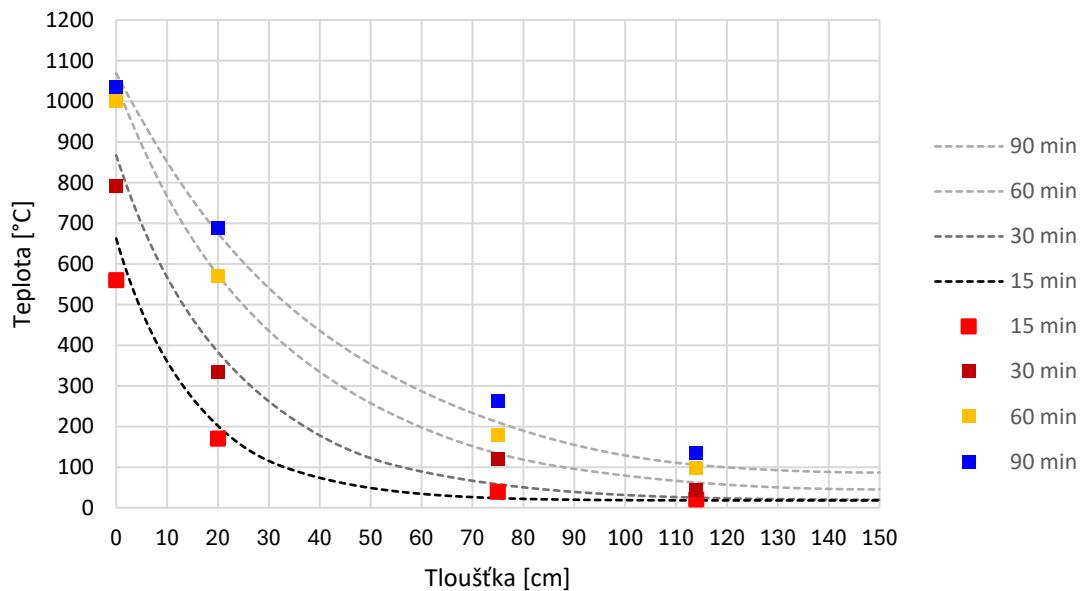
Obrázek 68 - Teplotní profil pro panel 4

PANEL 5



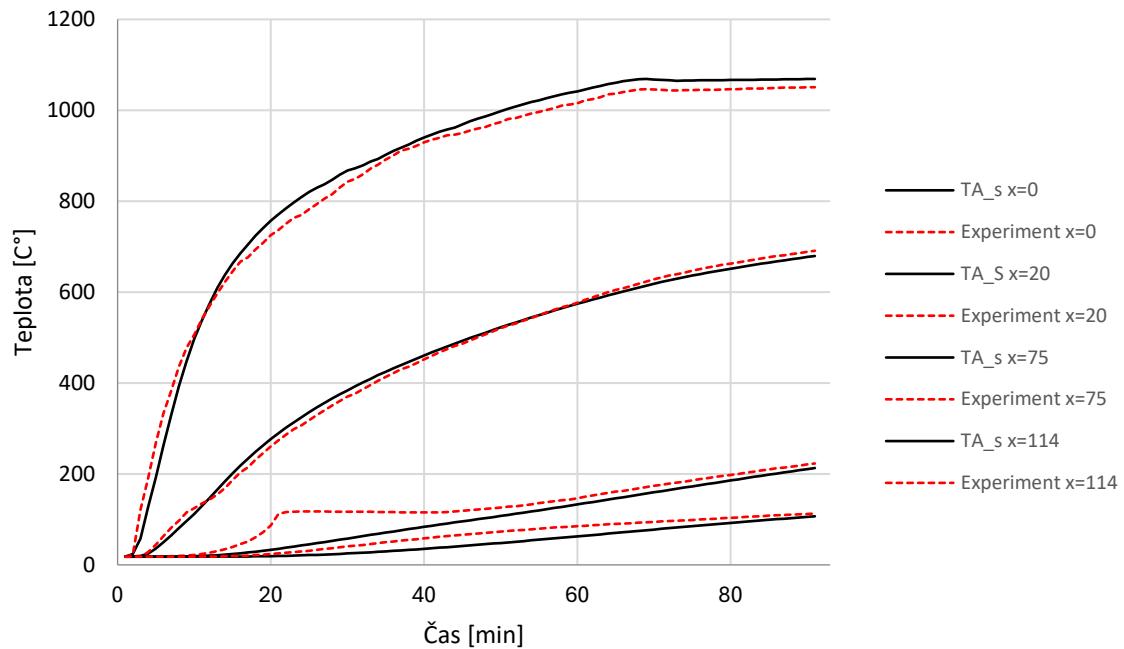
Obrázek 69 - Teplotní vývoj pro panel 5

PANEL 5



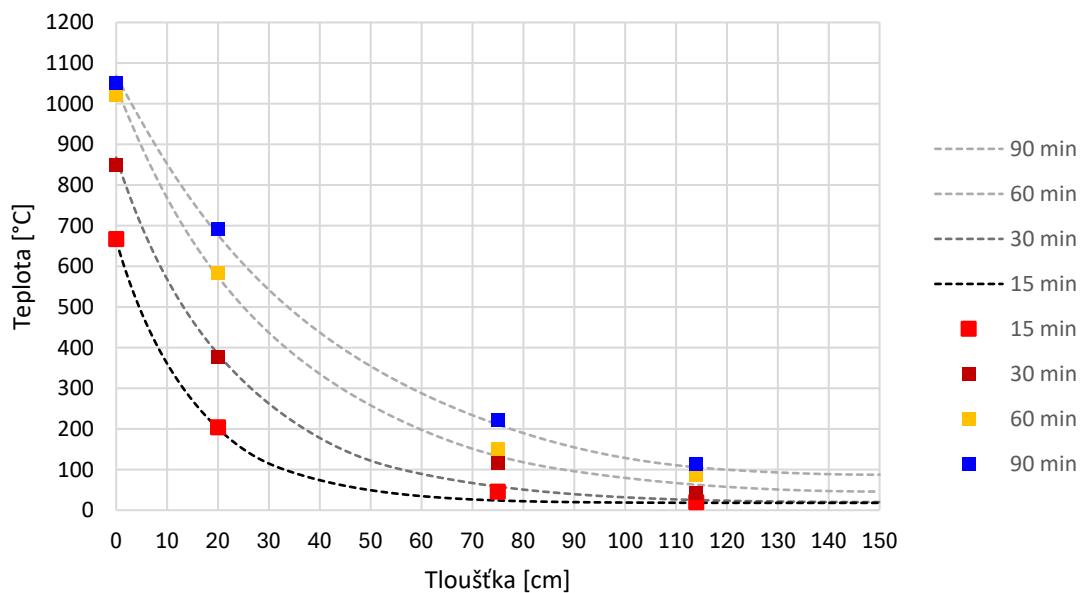
Obrázek 70 - Teplotní profil pro panel 5

PANEL 6



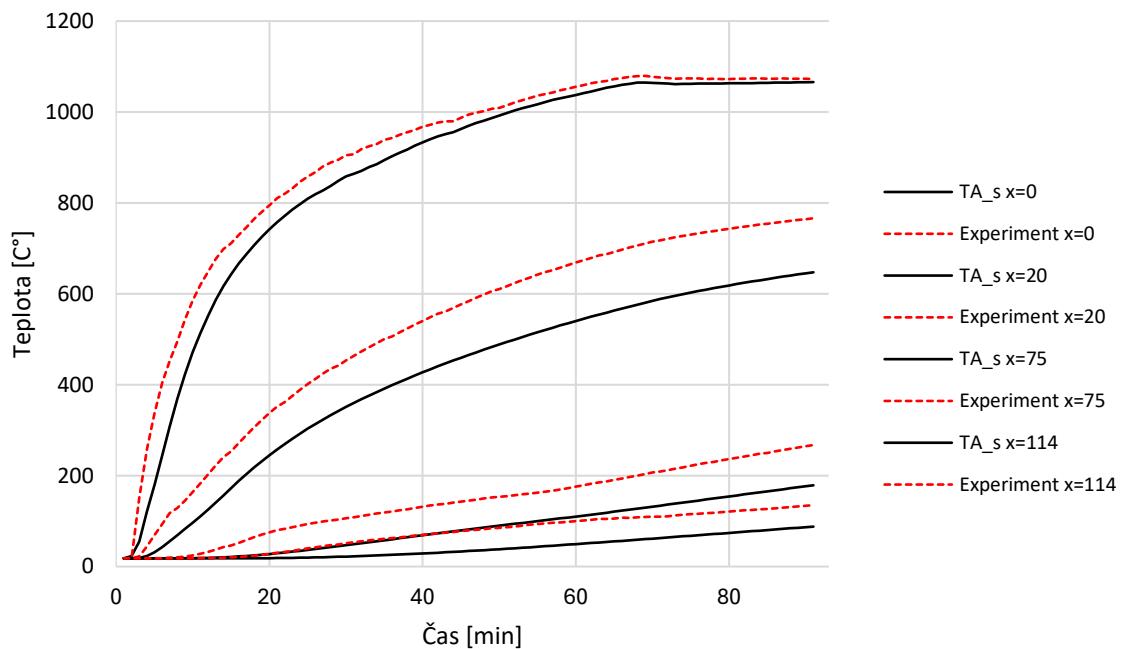
Obrázek 71 – Teplotní vývoj pro panel 6

PANEL 6



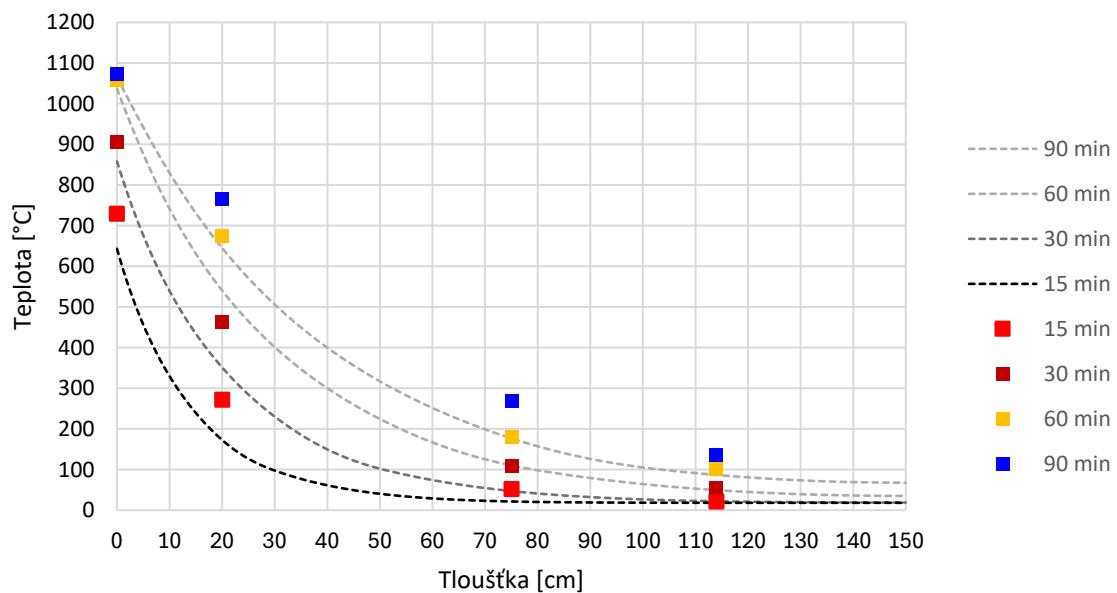
Obrázek 72 - Teplotní profil pro panel 6

PANEL 7



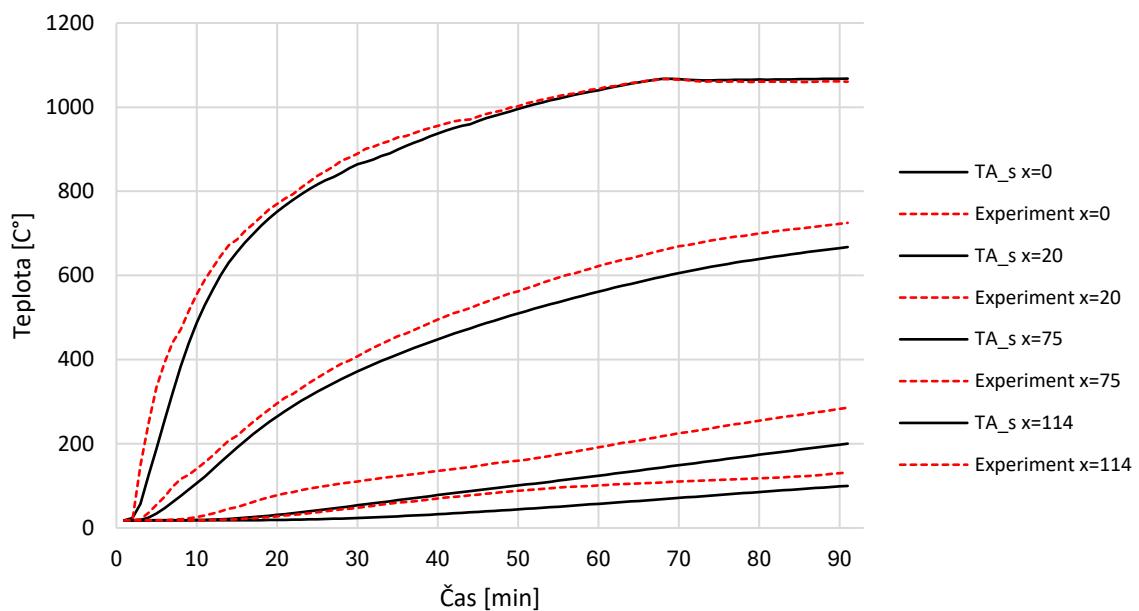
Obrázek 73 - Teplotní vývoj pro panel 7

PANEL 7



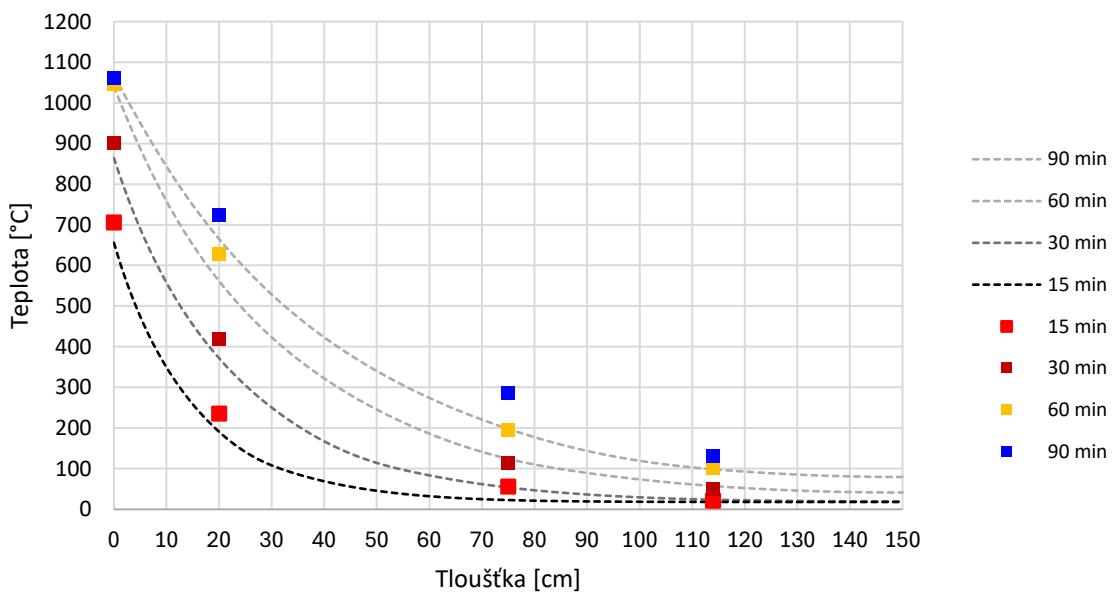
Obrázek 74 - Teplotní profil pro panel 7

PANEL 8



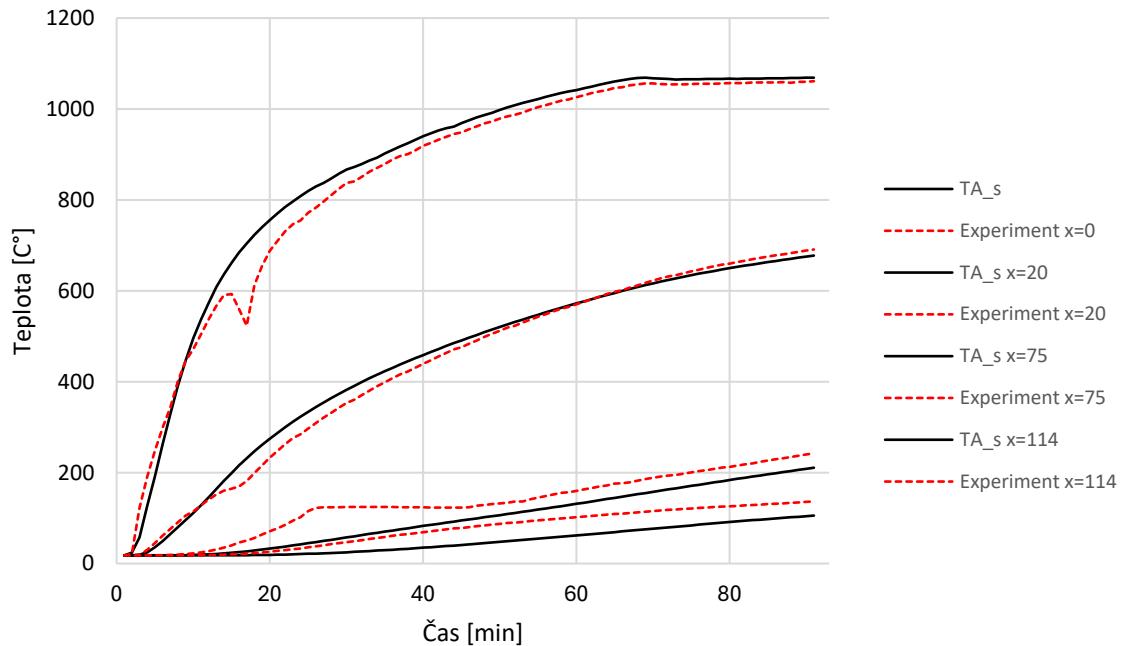
Obrázek 75 - Teplotní vývoj pro panel 8

PANEL 8

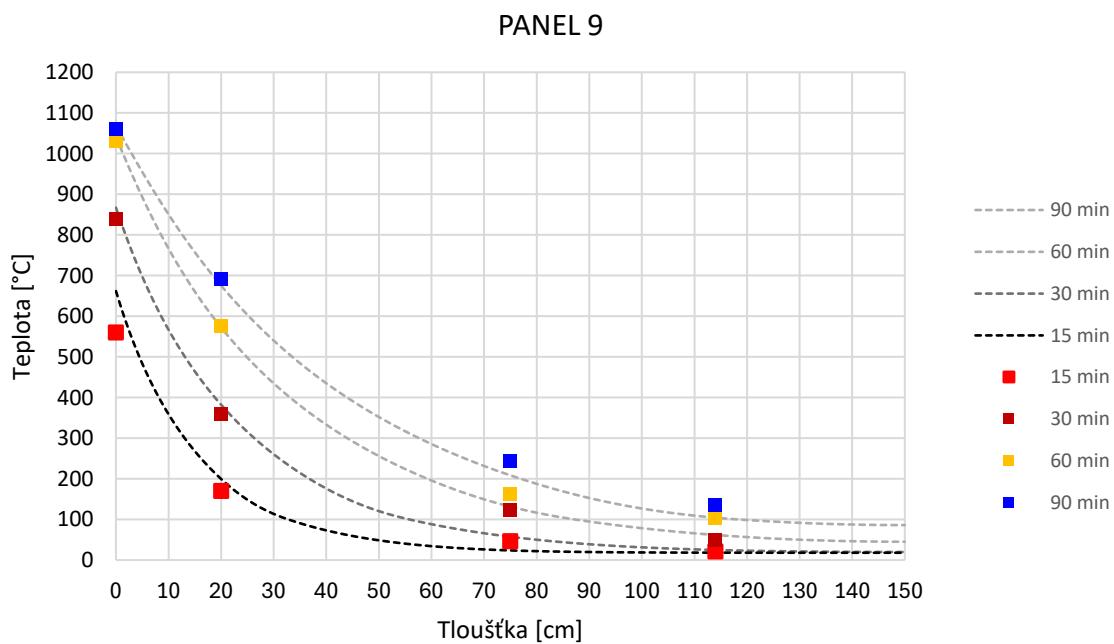


Obrázek 76 - Teplotní profil pro panel 8

PANEL 9

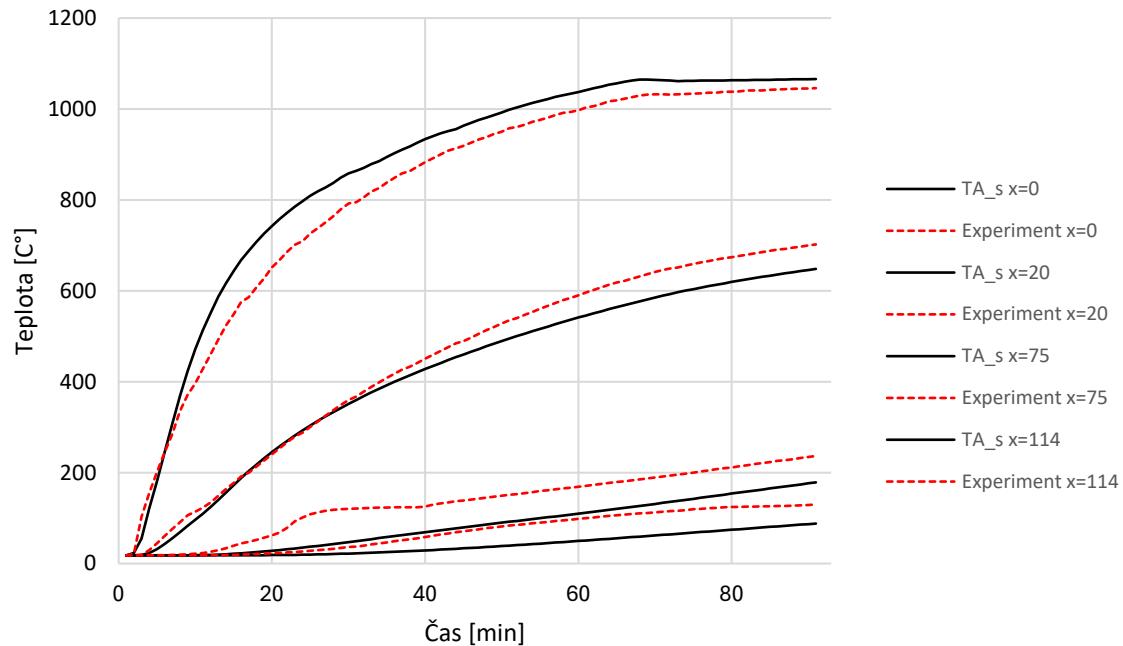


Obrázek 77 - Teplotní vývoj pro panel 9



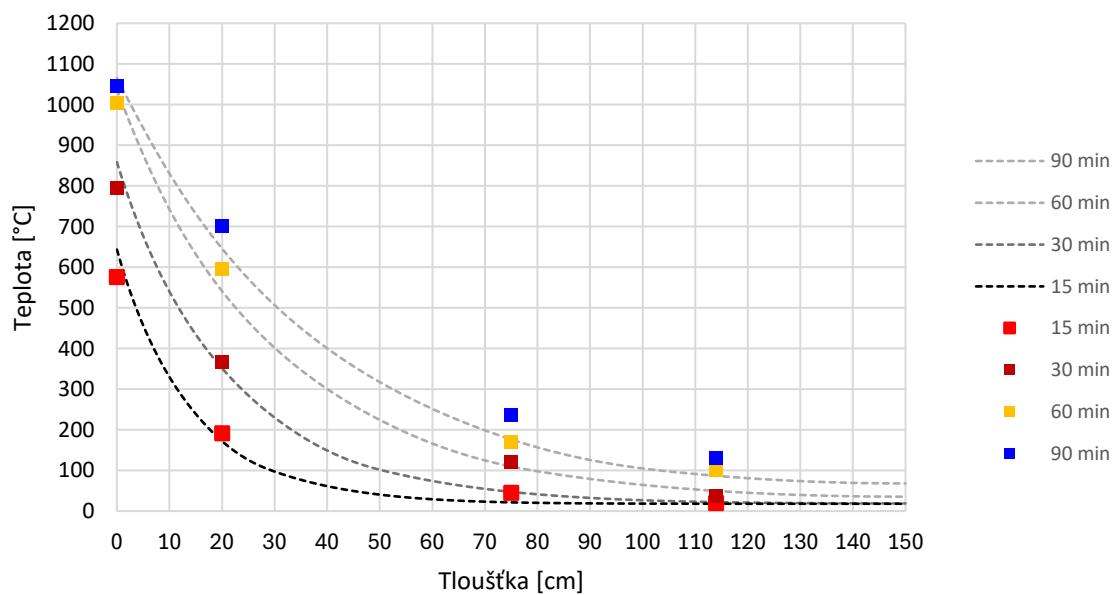
Obrázek 78 - Teplotní profil pro panel 9

PANEL 10



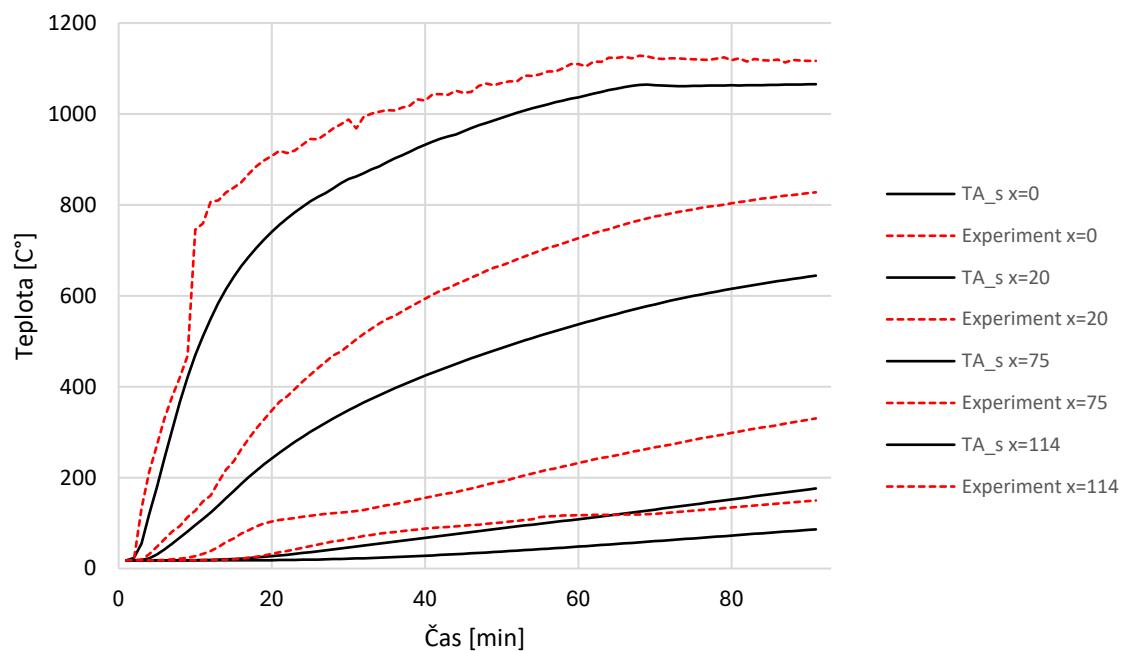
Obrázek 79 - Teplotní vývoj pro panel 10

PANEL 10



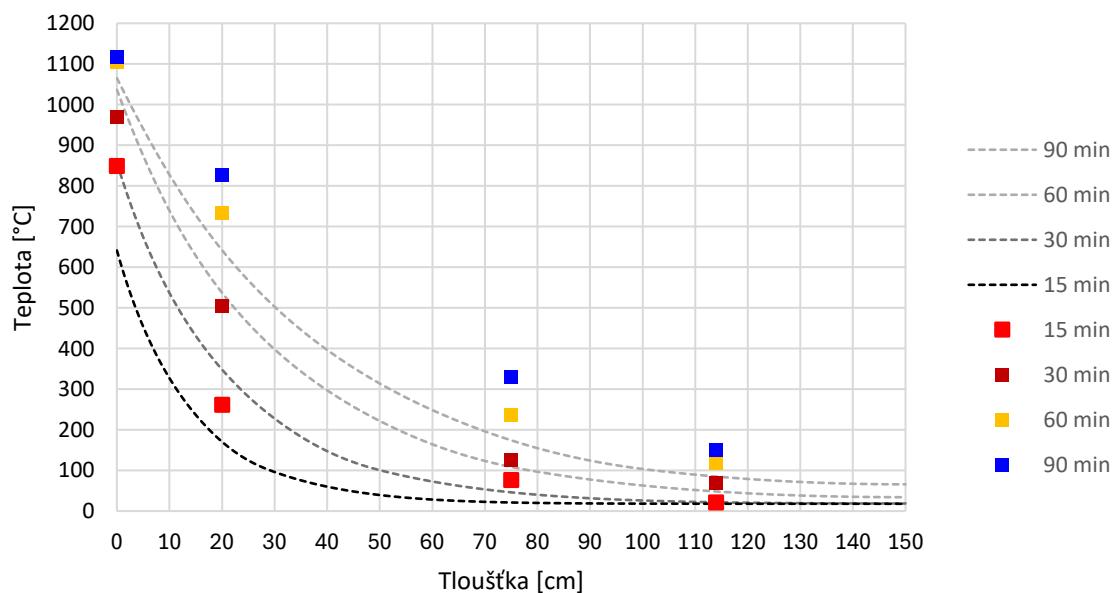
Obrázek 80 - Teplotní profil pro panel 10

PANEL 11



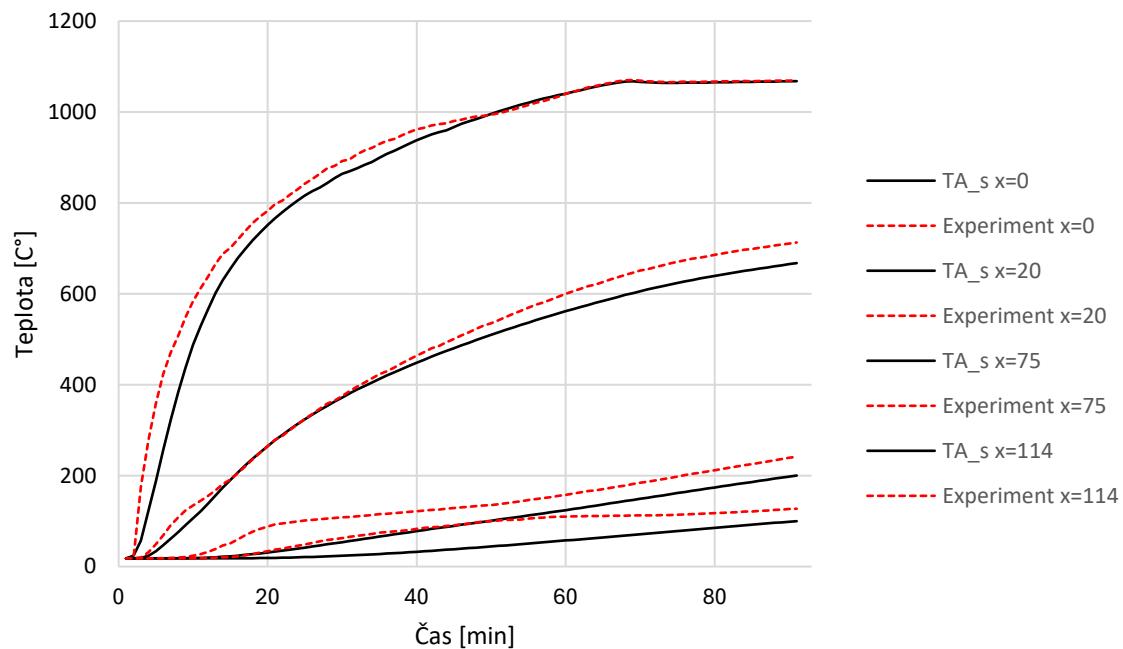
Obrázek 81 - Teplotní vývoj pro panel 11

PANEL 11

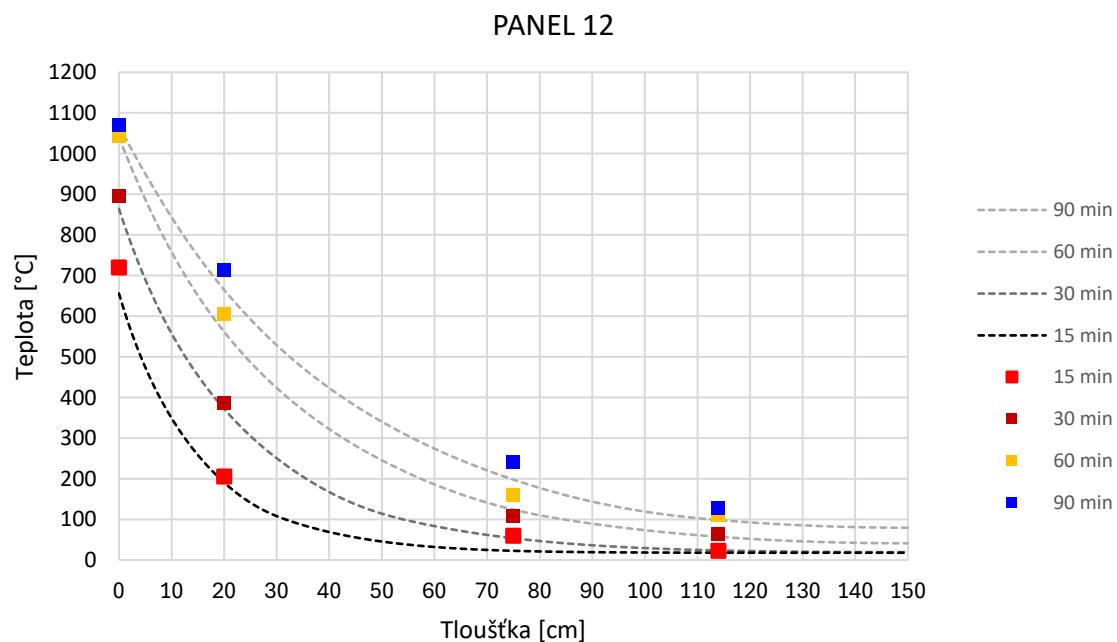


Obrázek 82 - Teplotní profil pro panel 11

PANEL 12

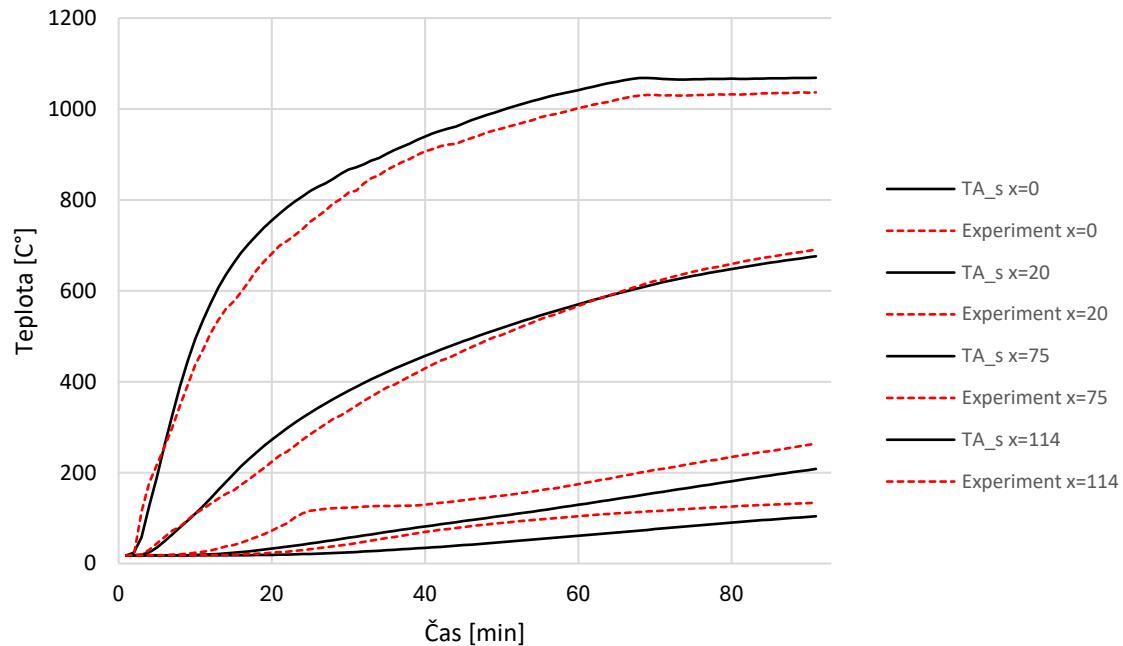


Obrázek 83 - Teplotní vývoj pro panel 12

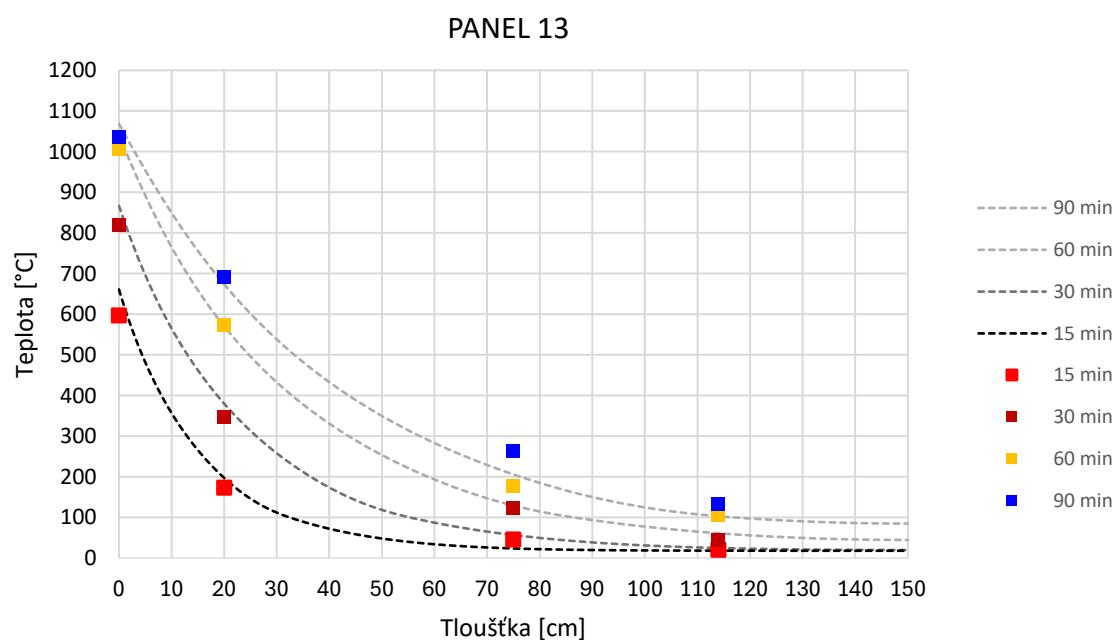


Obrázek 84 - Teplotní profil pro panel 12

PANEL 13

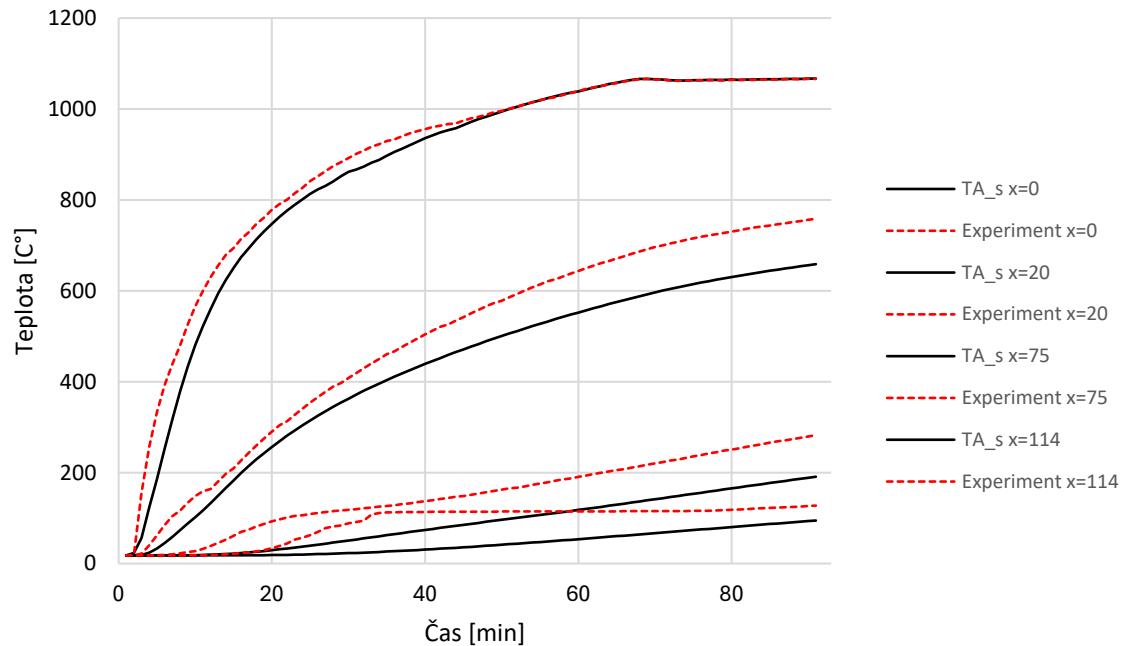


Obrázek 85 - Teplotní vývoj pro panel 13

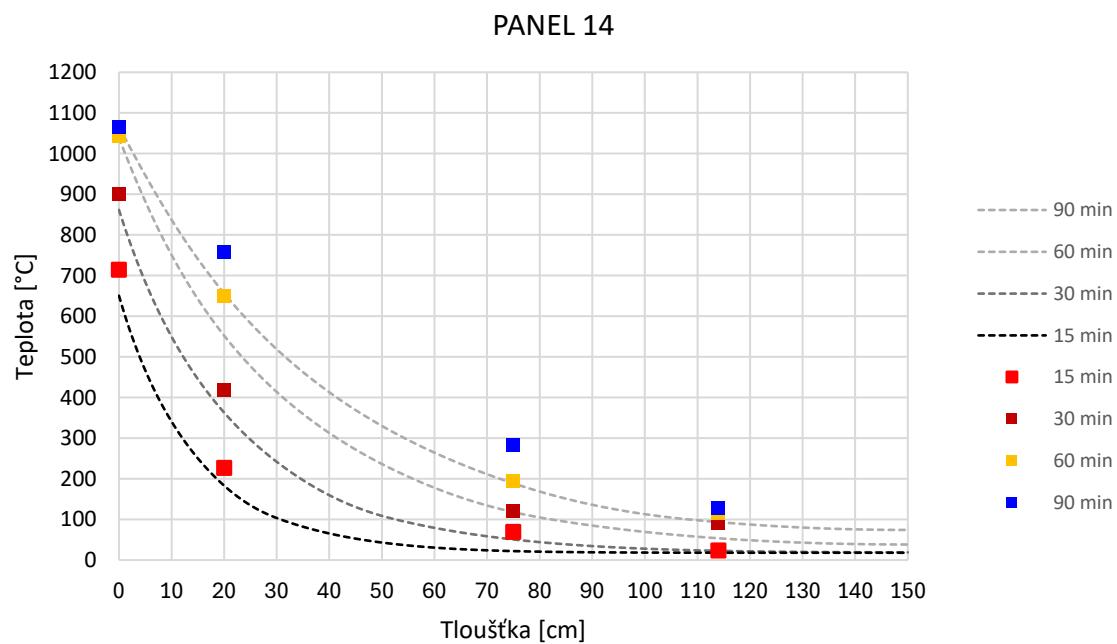


Obrázek 86 - Teplotní profil pro panel 13

PANEL 14



Obrázek 87 - Teplotní vývoj pro panel 14



Obrázek 88 - Teplotní profil pro panel 14

6 Závěr

V oblasti požární bezpečnosti staveb přetrvává značný nedostatek v legislativě týkající se podzemních staveb, především dopravních. Veškerá legislativa, doporučení a vnitřní předpisy jednotlivých subjektů se snaží kompenzovat absenci specifických norem pro tunelové stavby, avšak neexistuje jednotná metodika pro bezpečný návrh takto komplexních a náročných konstrukcí.

Tato práce měla za cíl přesněji objasnit oblast požární bezpečnosti betonových ostění v tunelových stavbách, a to zejména s ohledem na fenomén explozivního odštěpování. Zásadním faktorem ovlivňujícím tento jev je materiálové složení použitého betonu. Záměrem diplomové práce bylo experimentálně a numericky analyzovat chování různých druhů betonových směsí určených pro tunelová ostění při vystavení vysokým teplotám odpovídajícím reálnému tunelovému požáru, který simuluje uhlovodíková teplotní křivka.

V rámci experimentální části byla provedena velkorozměrová požární zkouška 14 panelů, jejímž účelem bylo posoudit účinnost použití polypropylenových vláken a provzdušňovacích příasad při snižování rizika odštěpování. Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že složení betonu má dominantní vliv na jeho chování při požáru, a to jak z hlediska náchylnosti k explozivnímu odštěpování, tak i z hlediska teplotní odolnosti a zbytkové pevnosti. Výsledky požární zkoušky prokázaly následující rozdíly mezi jednotlivými typy směsí.

Referenční panely bez polypropylenových vláken a bez provzdušnění (zejména Panely 11 a 12) vykazovaly nejvyšší míru poškození. U Panelu 11 došlo k masivnímu povrchovému odštěpení na ploše 204 671 mm² s maximální hloubkou 21,9 mm. Průměrná hloubka odštěpení dosáhla 7,13 mm. Panel 12 vykazoval poškození na ploše 34 950 mm² s maximální hloubkou 9,74 mm. Tato poškození vedla k porušení krycí vrstvy a výraznému zrychlení nárůstu teplot v průřezu.

Směsi obsahující polypropylenová vlákna (v dávkování 0,25 až 1,0 kg/m³) vykázaly výrazně vyšší odolnost. U těchto panelů nedošlo k explozivnímu odštěpování, což potvrzuje funkci vláken při tvorbě únikových mikrokanálků pro vodní páru a efektivní snížení vnitřního pórového tlaku.

Provzdušněné směsi (s obsahem vzduchu 5 % a 10 %) rovněž prokázaly vyšší stabilitu povrchu a menší rozsah mikrotrhlin. Nevýhodou však byl dopad na mechanické vlastnosti. Poměrná reziduální pevnost doprovodných těles z provzdušněného betonu byla nižší než u neprovzdušněných směsí po požáru.

Významným faktorem se ukázal i typ kameniva. Směsi z Betonárny 2 s vyšším obsahem silikátových kameniv (křemene), který při teplotě cca 573 °C podléhá objemové expanzi ($\alpha \rightarrow \beta$ přeměna), vykazovaly vyšší náchylnost k poškození. Tento efekt se projevil zejména u panelů 11

a 12, kde kombinace absence vláken a nevhodného kameniva vedla k nejrozsáhlejší destrukci. U doprovodných těles z této betonárny bylo rovněž pozorováno výrazné bobtnání kameniva.

Doprovodné destruktivní a nedestruktivní zkoušky potvrdily pokles reziduální pevnosti betonů po vystavení vysokým teplotám. Průměrné hodnoty zbytkové pevnosti povrchových vrstev se pohybovaly v rozmezí 18–49 MPa. Nejnižší povrchovou pevnost vykazoval poškozený Panel 11 (18,1 MPa), naopak nejvyšší hodnoty byly naměřeny u panelů s polypropylenovými vlákny (např. Panel 4 s 49,0 MPa).

Numerická část práce se zaměřila na teplotní analýzu betonových panelů pomocí programu TempAnalysis [32] a vizualizaci výsledků v prostředí SVDult [28]. Simulace vedení tepla metodou konečných prvků umožnila získat teplotní profily a teplotní vývoje. Po kalibraci vstupních parametrů, zejména snížení součinitele přestupu tepla konvekcí na $\alpha = 35 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (oproti normové hodnotě $\alpha = 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pro HC křivku) z důvodu pomalejšího náběhu teploty v peci. Byla dosažena shoda mezi numerickými výsledky a experimentálními daty. Průměrné odchylky teplot v hlubších vrstvách se pohybovaly v intervalu 50–75 °C, což lze vzhledem k fyzikální složitosti problému a přirozené variabilitě betonu považovat za uspokojivou přesnost.

Z provedeného srovnání vyplynulo, že program TempAnalysis [32] dokáže věrně simuloval teplotní chování betonových konstrukcí vystavených požáru, pokud jsou správně zvoleny vstupní okrajové podmínky a materiálové parametry odpovídající reálnému složení betonu. Program byl tak úspěšně verifikován vůči experimentálním datům a lze jej využít jako funkční nástroj pro inženýrské posouzení teplotního namáhání konstrukcí.

Z hlediska praktického přínosu lze konstatovat, že polypropylenová vlákna prokazatelně zvyšují požární odolnost betonu a snižují riziko explozivního odštěpování, přičemž i nižší dávkování (0,25–0,5 kg/m³) se ukázalo jako efektivní. Provzdušněné směsi vykazují vyšší teplotní stabilitu povrchu, avšak za cenu nižší počáteční i reziduální pevnosti. Složení kameniva hraje významnou roli v průběhu teplotních přeměn, a proto by mělo být voleno s ohledem na teplotní roztažnost a mineralogické složení (preference vápencového kameniva před křemičitým). Numerická simulace je efektivním doplňkem experimentálních zkoušek, který umožňuje predikci chování konstrukce v podmírkách, které nelze jednoduše experimentálně ověřit.

Výsledky této diplomové práce by mohly být využity jako podklad pro optimalizaci recepcí betonů určených pro tunelová ostění a pro návrh konstrukcí vystavených riziku požáru. Získané poznatky přispívají k hlubšímu pochopení procesů degradace betonu při vysokých teplotách a umožňují efektivnější návrh bezpečnějších a odolnějších konstrukcí v podzemním stavitelství.

V rámci dalšího postupu by bylo vhodné provést rozšířenou sérii experimentálních zkoušek s větším spektrem betonových směsí, zejména s ohledem na různé typy kameniva a různé

vlhkostní stavu. Dalším směrem výzkumu by mohla být komplexní spojitá termomechanická analýza zahrnující i modelování napětí, porovnání vnitřních deformací a vlivu ocelové výztuže, která by umožnila ještě přesnější předpověď odštěpování a celkové stability konstrukce po požáru.

Tabulka 5 - Celkové výsledky

Panel	Pevnostní třída	PP vlákna [kg]	Provdušení	Vlhkost	Odštěpení	Poměrná rezidální pevnost dopr. těles	Max Teplota výztuže [°C]	Průměrná povrchová tvrdost [MPa]
1	C35/45	1	0%	3,22%	NE	0%	602,1	23,06
2	C35/45	0,75	0%	2,70%	NE	7,20%	635,3	37,33
3	C35/45	0,5	0%	2,64%	NE	7,87%	721,4	43,59
4	C35/45	0,25	0%	2,05%	NE	11,64%	734,3	49,01
5	C35/45	0	0%	2,49%	NE	12,12%	671,6	45,14
6	C35/45	0	10%	2,83%	NE	6,86%	674,6	35,22
7	C35/45	0	5%	2,91%	NE	6,50%	749,5	35,51
8	C20/25	0	0%	2,76%	NE	7,47%	708,6	42,46
9	C20/25	1	0%	2,85%	NE	7,66%	674,6	35,95
10	-	-	-	3,12%	NE	0%	685,6	40,29
11	C35/45	0	0%	2,82%	ANO	12,67%	811	18,05
12	C20/25	0	0%	2,76%	ANO	13,83%	696,6	24,25
13	C35/45	1	0%	3,04%	NE	8,83%	674,3	32,75
14	C20/25	1	0%	2,76%	Pouze kamenivo	8,32%	741,8	25,13
Betonár 2								

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Typy odštěpování (převzato z [3]).....	13
Obrázek 2 – Betonáž panelů (převzato z [21])	16
Obrázek 3 – Výkres panelu (převzato z [21])	17
Obrázek 4 – Zkušební pec výkres (převzato z [22])	17
Obrázek 5 – Rozložení termočlánků ve vzorcích	18
Obrázek 6 – Schéma umístění panelů a termočlánků (převzato z [22])	19
Obrázek 7 – Teplotní křivka v peci (převzato z [22])	20
Obrázek 8 – Odštěpení panelu 11	22
Obrázek 9 – Odštěpení panelu 12	22
Obrázek 10 – Odštěpení bobtnajícího kameniva na panelu 14.....	23
Obrázek 11 – Nabobtnalé kamenivo [23]	25
Obrázek 12 – Dopravný trámek s nabobtnalým kamenicem [23]	25
Obrázek 13 – Graf $Q \rightarrow \text{MPa}$	27
Obrázek 14 – Schéma panelu pro Schmidtovu zkoušku	28
Obrázek 15 – Znázornění hloubky tvrdoměrné zkoušky	28
Obrázek 16 – Reziduální pevnost doprovodných těles	29
Obrázek 17 – Úvodní stránka programu SVDult [28]	31
Obrázek 18 – Uživatelské rozhraní programu SVD ult [28]	32
Obrázek 19 – Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 1	33
Obrázek 20 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 2	33
Obrázek 21 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 3	34
Obrázek 22 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 4	34
Obrázek 23 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 5	35
Obrázek 24 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 6	35
Obrázek 25 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 7	36
Obrázek 26 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 8	36
Obrázek 27 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 9	37
Obrázek 28 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 10.....	37
Obrázek 29 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 11.....	38
Obrázek 30 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 12.....	38
Obrázek 31 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 13.....	39
Obrázek 32 - Výsledky tvrdoměrné zkoušky Panel 14.....	39
Obrázek 33 – Odštěpení panelu 11.....	40
Obrázek 34 – Odštěpení panelu 12.....	41
Obrázek 35 – Schéma plochy odštěpení panel 11	42
Obrázek 36 – Schéma plochy odštěpení panel 12	42
Obrázek 37 – Teplotní vývoj TČ panel 1 (převzato z [22])	44
Obrázek 38 - Teplotní vývoj TČ panel 2 (převzato z [22]).....	44
Obrázek 39 - Teplotní vývoj TČ panel 3 (převzato z [22]).....	45

Obrázek 40 - Teplotní vývoj TČ panel 4 (převzato z [22]).....	45
Obrázek 41 - Teplotní vývoj TČ panel 5 (převzato z [22]).....	46
Obrázek 42 - Teplotní vývoj TČ panel 6 (převzato z [22]).....	46
Obrázek 43 - Teplotní vývoj TČ panel 7 (převzato z [22]).....	47
Obrázek 44 - Teplotní vývoj TČ panel 8 (převzato z [22]).....	47
Obrázek 45 - Teplotní vývoj TČ panel 9 (převzato z [22]).....	48
Obrázek 46 - Teplotní vývoj TČ panel 10 (převzato z [22]).....	48
Obrázek 47 - Teplotní vývoj TČ panel 11 (převzato z [22]).....	49
Obrázek 48 - Teplotní vývoj TČ panel 12 (převzato z [22]).....	49
Obrázek 49 - Teplotní vývoj TČ panel 13 (převzato z [22]).....	50
Obrázek 50 - Teplotní vývoj TČ panel 14 (převzato z [22]).....	50
Obrázek 51 – Tepelná vodivost betonu (podle [20])	55
Obrázek 52 – Měrná tepelná kapacita (podle [6]).....	55
Obrázek 53 - Průběh hodnot objemové hmotnosti v závislosti na teplotě (podle [6]).....	56
Obrázek 54 - Normová teplotní křivka (podle [6]).....	57
Obrázek 55 – Uhlovodíková teplotní křivka (podle [6]).....	58
Obrázek 56 – Úvodní stránka programu TempAnalysis [32]	59
Obrázek 57 – Pracovní rozhraní TempAnanlysis [32]	60
Obrázek 58 – Úvodní stránka TA_s [32]	60
Obrázek 59 – Materiálové vlastnosti v TA_s [32]	61
Obrázek 60 – Výsledky z programu TA_s [32]	61
Obrázek 61 – Teplotní vývoj pro panel 1	64
Obrázek 62 – Teplotní profil pro panel 1	64
Obrázek 63 – Teplotní vývoj pro panel 2	65
Obrázek 64 - Teplotní profil pro panel 2.....	65
Obrázek 65 - Teplotní vývoj pro panel 3.....	66
Obrázek 66 - Teplotní profil pro panel 3.....	66
Obrázek 67 - Teplotní vývoj pro panel 4.....	67
Obrázek 68 - Teplotní profil pro panel 4.....	67
Obrázek 69 - Teplotní vývoj pro panel 5.....	68
Obrázek 70 - Teplotní profil pro panel 5.....	68
Obrázek 71 - Teplotní vývoj pro panel 6	69
Obrázek 72 - Teplotní profil pro panel 6.....	69
Obrázek 73 - Teplotní vývoj pro panel 7	70
Obrázek 74 - Teplotní profil pro panel 7	70
Obrázek 75 - Teplotní vývoj pro panel 8.....	71
Obrázek 76 - Teplotní profil pro panel 8.....	71
Obrázek 77 - Teplotní vývoj pro panel 9	72
Obrázek 78 - Teplotní profil pro panel 9	72
Obrázek 79 - Teplotní vývoj pro panel 10	73

Obrázek 80 - Teplotní profil pro panel 10	73
Obrázek 81 - Teplotní vývoj pro panel 11	74
Obrázek 82 - Teplotní profil pro panel 11	74
Obrázek 83 - Teplotní vývoj pro panel 12	75
Obrázek 84 - Teplotní profil pro panel 12	75
Obrázek 85 - Teplotní vývoj pro panel 13	76
Obrázek 86 - Teplotní profil pro panel 13	76
Obrázek 87 - Teplotní vývoj pro panel 14	77
Obrázek 88 - Teplotní profil pro panel 14	77

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Umístění termočlánků	18
Tabulka 2 - Průměrná povrchová pevnost betonu	27
Tabulka 3 - Specifikace betonových směsí (převzato z [21])	30
Tabulka 4 - Porovnání odštěpených panelů	41
Tabulka 5 - Celkové výsledky.....	81

Přílohy

Příloha 1 – Detailní složení betonových panelů

Literatura

- [1] ČSN EN 206 – Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: ÚNMZ. říjen 2021
- [2] DALE P. BENTZ. Fibers, Percolation, and Spalling of High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal* [online]. 2000, 97(3), 351–359. ISSN 0889-325X. Dostupné z: doi:10.14359/9878
- [3] HAGER, Izabela a Katarzyna MRÓZ. *Role of polypropylene fibres in concrete spalling risk mitigation in fire and test methods of fibres effectiveness evaluation* [online]. B.m.: Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). 1. prosinec 2019. ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12233869
- [4] HOLAN, Jakub, Josef NOVÁK a Radek ŠTEFAN. Provzdušnění betonu jako alternativa k polypropylenovým vláknům a jeho vliv na pevnost v tlaku běžného betonu vystaveného působení vysokých teplot. *Časopis Beton* [online]. 2020, 20(2), 40–43 [vid. 2025-12-06]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/clanky/2020_2_40_-provzdusneni-betonu-jako-alternativa-k-polypropylenovym-vlaknum-a-jeho-vliv-na-pevnost-v-tlaku-bezneho-betonu-vystaveneho-pusobeni-vysokych-teplot/
- [5] L., D'Aloia a Robert F. Improving the behavior of concrete exposed to fire by using an air entraining agent (AEA): Assessment of spalling. *EDP Sciences*. 2013, 2–8.
- [6] ČSN EN 1992-1-2 ed. 2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru. 1. říjen 2024
- [7] ČSN EN 1990 ed.2 - Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. B.m.: ÚNMZ. březen 2021
- [8] ČSN 73 0802 ed. 2 Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty. Praha: ÚNMZ. říjen 2023
- [9] ČSN 73 0804 ed.2 Požární bezpečnost staveb - Výrobní objekty. Praha: ÚNMZ. říjen 2023
- [10] ŠTEFAN, Radek, Kamila CÁBOVÁ, Jan KOS, Daniel JIRÁSKO a Jakub HOLAN. *Požární odolnost ostění tunelů*. Praha: www.cesti.cz. 2019
- [11] ČSN 73 7507 - Projektování tunelů pozemních komunikací. Praha: ÚNMZ. leden 2014
- [12] ČSN 73 7508 - Železniční tunely. Praha: ÚNMZ. září 2002
- [13] Systems and equipment for fire and smoke control in road tunnels [online]. B.m.: PIARC, 2007 [vid. 2025-12-28]. ISBN 2840601753. Dostupné z: <https://www.piarc.org/ressources/publications/3/5431,05-16-bilingue0207.pdf>
- [14] HAGER, Izabela a Katarzyna MRÓZ. Causes and Mechanism of Concrete Spalling under High Temperature Caused by Fire. *Cement Wapno Beton*. 2017.

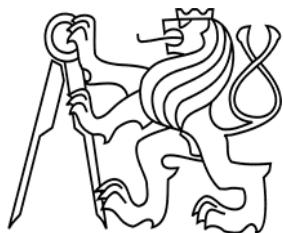
- [15] LOTTMAN, B. B.G., E. A.B. KOENDERS, C. B.M. BLOM a J. C. WALRAVEN. Spalling of concrete due to fire exposure: A coupled fracture mechanics and pore pressure approach. In: *MATEC Web of Conferences* [online]. B.m.: EDP Sciences, 2013. ISBN 9782759810741. Dostupné z: doi:10.1051/matecconf/20130605002
- [16] ALVES AMANCIO, Felipe a Maria FABÍOLA DE CARVALHO RAFAEL. Behavior of concrete reinforced with polypropylene fiber exposed to high temperatures. *Procedia Structural Integrity*. 2018, 91–98.
- [17] NIRY RAZAFINJATO, Rijaniaina, Anne Lise BEAUCOUR, Ronan L. HEBERT, Béatrice LE-DESERT, Raphaël BODET a Albert NOUMOWE. High temperature behaviour of a wide petrographic range of siliceous and calcareous aggregates for concretes. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, 123, 261–273. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.097
- [18] REITERMAN, Pavel. Požární odolnost betonu s obsahem provzdušňovacích přísad. *Beton TKS*. 2015, 15(5), 52–56.
- [19] JANSSON, Robert a Lars BOSTRÖM. Factors influencing fire spalling of self compacting concrete. *Materials and Structures* [online]. 2013, 46(10), 167–168. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-012-0007-z
- [20] ŠTEFAN, Radek a spol. *Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2024*. 2024.
- [21] ČSN EN 1991-1-2 ed.2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení. září 2004
- [22] KAŇOK, Kryštof a spol. *Zpracování dat ze zkoušky požární odolnosti*. 2025.
- [23] CHYLÍK, Roman. *Předběžný souhrn požárních zkoušek materiálů betonového tunelového ostění konané ve zkušebně Afire*. Praha: ČVUT. 2025
- [24] HANEIN, Theodore a Karl Christian THIENEL A SPOL. *Clay calcination technology: state-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL* [online]. B.m.: Springer Science and Business Media B.V. 1. leden 2022. ISSN 13595997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-021-01807-6
- [25] *Schmidtovo kladívko / Ebeton* [online]. [vid. 2025-10-14]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/schmidtovo-kladivko/>
- [26] HAMMERLINK, Silverschmidt &. Operating Instructions. 2017.
- [27] ŠTEFAN, Radek, Marek FOGLAR, Radek HÁJEK a Josef FLÁDR. Experimentální analýza stropních panelů z různých druhů betonu vystavených výbuchu a následnému požáru. *Beton TSK*. 2016, 15, 42–48. ISSN 1213-3116.

- [28] RADEK, Štefan a Foglar MAREK. *SVDult - Software pro vizualizaci dat z ultrazvukového měření betonových vzorků*. Praha: ČVUT. 2015
- [29] Výsledky vědecké činnosti k133 [online]. [vid. 2025-10-27]. Dostupné z: <https://concrete.fsv.cvut.cz/vystupy/?id=SVDult>
- [30] ŠTEFAN, Radek. *Transport Processes in Concrete at High Temperatures Mathematical Modelling and Engineering Applications with Focus on Concrete Spalling*. 2015.
- [31] GUO, Zhenhai. a Xudong. SHI. *Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures*. B.m.: Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 9780123869623.
- [32] ŠTEFAN, Radek a Jaroslav PROCHÁZKA. *TempAnalysis - Computer Program for Temperature Analysis of Cross Sections Exposed to Fire*. Praha: ČVUT. 2009

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových konstrukcí



PŘÍLOHA 1

Detailní složení betonových panelů

Betonárná 1

panel č.	naše označení	cement	Cement [kg/m ³]	voda dávkovaná	voda přidaná	voda celkem	W / C
1	C30/45, PP 1,0 kg/m ³ ; Vzduch 0,0%	350 - 52,5 Čížkovice	350	204	12	216	0,62
2	C30/45, PP 0,75 kg/m ³ ; Vzduch 0,0%	350 - 52,5 Čížkovice	350	128	10	138	0,39
3	C30/45, PP 0,50 kg/m ³ ; Vzduch 0,0%	350 - 52,5 Čížkovice	350	115	7	122	0,35
4	C30/45, PP 0,25 kg/m ³ ; Vzduch 0,0%	350 - 52,5 Čížkovice	350	122	0	122	0,35
5	C30/45, PP 0,00 kg/m ³ ; Vzduch 0,0%	350 - 52,5 Čížkovice	350	114	0	114	0,33
6	C30/45, PP 0,00 kg/m ³ ; Vzduch 10%	350 - 52,5 Čížkovice	350	130	0	130	0,37
7	C30/45, PP 0,00 kg/m ³ ; Vzduch 5,0%	350 - 52,5 Čížkovice	350	127	0	127	0,36
8	C20/25, PP 0,00 kg/m ³ ; Vzduch 0,0%	310 - 52,5 Čížkovice	310	115	0	115	0,37
9	C20/25, PP 1,0 kg/m ³ ; Vzduch 0,0%	310 - 52,5 Čížkovice	310	158	0	158	0,51
10	-	395 - 52,5 Čížkovice	395	145	0	145	0,37
11	C30/45, PP 0,00 kg/m ³ ; Vzduch 0,0%	390 - 42,5 Radotín	390	145		145	0,37
12	C20/25, PP 0,00 kg/m ³ ; Vzduch 0,0%	310 - 32,5 Radotín	310	130		130	0,42
13	C30/45, PP 1,0 kg/m ³ ; Vzduch 0,0%	390 - 42,5 Radotín	390	133		133	0,34
14	C20/25, PP 1,0 kg/m ³ ; Vzduch 0,0%	310 - 32,5 Radotín	310	127		127	0,41

Beton. 2

Betonárna 1

panel č.	Splněné třídy prostředí	kamenivo 8-16	
1	XC1	720 - Plaňany	rula - drcené; 36% plagioklas, 30% křemen, 18% biotit, 15% draselné živce
2	XC4, XD3,XF4	720 - Plaňany	rula - drcené; 36% plagioklas, 30% křemen, 18% biotit, 15% draselné živce
3	XC4, XD3,XF4	720 - Plaňany	rula - drcené; 36% plagioklas, 30% křemen, 18% biotit, 15% draselné živce
4	XC4, XD3,XF4	720 - Plaňany	rula - drcené; 36% plagioklas, 30% křemen, 18% biotit, 15% draselné živce
5	XC4, XD3,XF4	720 - Plaňany	rula - drcené; 36% plagioklas, 30% křemen, 18% biotit, 15% draselné živce
6	XC4, XD3,XF4	725 - Plaňany	rula - drcené; 36% plagioklas, 30% křemen, 18% biotit, 15% draselné živce
7	XC4, XD3,XF4	725 - Plaňany	rula - drcené; 36% plagioklas, 30% křemen, 18% biotit, 15% draselné živce
8	XC4, XD2, XF2	660 - Plaňany	rula - drcené; 36% plagioklas, 30% křemen, 18% biotit, 15% draselné živce
9	XC3, XD2,XF2	660 - Plaňany	rula - drcené; 36% plagioklas, 30% křemen, 18% biotit, 15% draselné živce
10	XC4, XD3,XF4	650 - Plaňany	rula - drcené; 36% plagioklas, 30% křemen, 18% biotit, 15% draselné živce
11	XC4, XD3,XF4	Nucničky	Přírodní, těžené; 50% křemen, 20% granitoid; 20% sediment (prach, pískovec, opuka)
12	XC4, XD2, XF2	Nucničky	Přírodní, těžené; 50% křemen, 20% granitoid; 20% sediment (prach, pískovec, opuka)
13	XC4, XD3,XF4	Nucničky	Přírodní, těžené; 50% křemen, 20% granitoid; 20% sediment (prach, pískovec, opuka)
14	XC4, XD2, XF2	Nucničky	Přírodní, těžené; 50% křemen, 20% granitoid; 20% sediment (prach, pískovec, opuka)

Beton. 2

	panel č.	kamenivo 4-8
Betonárná 1	1	360 - Křenek
	2	Štěrkopísek, těžen z vody; 65% křemen, 5% granitoid; 2% živec, 17% sediment (droba, prachovec, pískovec)
	3	360 - Křenek
	4	Štěrkopísek, těžen z vody; 65% křemen, 5% granitoid; 2% živec, 17% sediment (droba, prachovec, pískovec)
	5	360 - Křenek
	6	Štěrkopísek, těžen z vody; 65% křemen, 5% granitoid; 2% živec, 17% sediment (droba, prachovec, pískovec)
Beton. 2	7	144 - Křenek
	8	Štěrkopísek, těžen z vody; 65% křemen, 5% granitoid; 2% živec, 17% sediment (droba, prachovec, pískovec)
	9	300 - Křenek
	10	Štěrkopísek, těžen z vody; 65% křemen, 5% granitoid; 2% živec, 17% sediment (droba, prachovec, pískovec)
	11	Zlosyň
	12	Štěrkopísek, přírodní těžený, suchá těžba; 60% křemen, 23% sediment (pískovec, opuka, železivec), 10% granitoid
	13	Zlosyň
	14	Štěrkopísek, přírodní těžený, suchá těžba; 60% křemen, 23% sediment (pískovec, opuka, železivec), 10% granitoid

Betonárná 1

panel č.	kamenivo 0-4	
1	780 - Křenek	Štěrkopísek, těžen z vody; 65% křemen, 5% granitoid; 2% živec, 17% sediment (droba, prachovec, pískovec)
2	780 - Křenek	Štěrkopísek, těžen z vody; 65% křemen, 5% granitoid; 2% živec, 17% sediment (droba, prachovec, pískovec)
3	780 - Křenek	Štěrkopísek, těžen z vody; 65% křemen, 5% granitoid; 2% živec, 17% sediment (droba, prachovec, pískovec)
4	780 - Křenek	Štěrkopísek, těžen z vody; 65% křemen, 5% granitoid; 2% živec, 17% sediment (droba, prachovec, pískovec)
5	780 - Křenek	Štěrkopísek, těžen z vody; 65% křemen, 5% granitoid; 2% živec, 17% sediment (droba, prachovec, pískovec)
6	890 - Křenek	Štěrkopísek, těžen z vody; 65% křemen, 5% granitoid; 2% živec, 17% sediment (droba, prachovec, pískovec)
7	890 - Křenek	Štěrkopísek, těžen z vody; 65% křemen, 5% granitoid; 2% živec, 17% sediment (droba, prachovec, pískovec)
8	860- Křenek	Štěrkopísek, těžen z vody; 65% křemen, 5% granitoid; 2% živec, 17% sediment (droba, prachovec, pískovec)
9	860- Křenek	Štěrkopísek, těžen z vody; 65% křemen, 5% granitoid; 2% živec, 17% sediment (droba, prachovec, pískovec)
10	755- Křenek	Štěrkopísek, těžen z vody; 65% křemen, 5% granitoid; 2% živec, 17% sediment (droba, prachovec, pískovec)
11	Nucničky	Přírodní, těžené; 50% křemen, 20% granitoid; 20% sediment (prach, pískovec, opuka)
12	Nucničky	Přírodní, těžené; 50% křemen, 20% granitoid; 20% sediment (prach, pískovec, opuka)
13	Nucničky	Přírodní, těžené; 50% křemen, 20% granitoid; 20% sediment (prach, pískovec, opuka)
14	Nucničky	Přírodní, těžené; 50% křemen, 20% granitoid; 20% sediment (prach, pískovec, opuka)

Beton. 2

Betonárna 1

panel č.	plastifikátory	provzdušňovač	PP vlákna
1	3,0 - Stachement 508		1 - fibrexcrete
2	3,0 - Stachement 508		0,75 - fibrexcrete
3	3,0 - Stachement 508		0,5 - fibrexcrete
4	3,0 - Stachement 508		0,25 - fibrexcrete
5	3,0 - Stachement 508		
6	3,0 - Stachement 508	1,52 - mikroporan	
7	3,0 - Stachement 508	0,76 - mikroporan	
8	2,5 - Stachement 508		
9	2,5 - Stachement 508		1 - fibrexcrete
10	4,2 - Stachement 508		
11	3,9 - BASF 641		
12	3,1 - BASF 641		
13	3,9 - BASF 641		1 - fibrexcrete
14	3,1 - BASF 641		1 - fibrexcrete

Betonárna 2