

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra betonových a zděných konstrukcí



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Integrovaná bezpečnost staveb

**Materiálové řešení betonových tunelových ostění
s ohledem na požární odolnost**

Material solution of concrete tunnel lining with
regard to fire resistance

Vypracoval:

Bc. Martin Hnyk

Vedoucí práce:

Ing. Radek Štefan, Ph.D., FEng.

Ing. Roman Chylík

2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hnyk** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **477462**
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:

Materiálové řešení betonových tunelových ostění s ohledem na požární odolnost

Název diplomové práce anglicky:

Material Solution of Concrete Tunnel Lining with Regard to Fire Resistance

Pokyny pro vypracování:

Rešerše stávajícího stavu poznání

- Legislativní požadavky, rozbor vybraných požárů v tunelech a jejich následky
- stávající materiálová řešení, opatření proti odštěpování

Experimentální část

- provedení indikativních zkoušek vybraných materiálů
- vyhodnocení výsledků (odštěpování)

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 1992-1-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1 - 2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru (2006), Opr. 1 (2009), A1 (2020)

Tunel, Časopis České tunelářské asociace a Slovenskej tunelárskej asociácie ITA-AITES. 2016, 25. ročník(č. 3/2016). ISSN 1211 - 0728.

PICHLER, Christian, Roman LACKNER a Herbert A. MANG. Safety Assessment of Concrete Tunnel Linings under Fire Load. Journal of Structural Engineering [online]. 2006, 132(6), 961–969. ISSN 0733-9445, 1943-541X. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:6(961)

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: **05.10.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Radek Štefan, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen 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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě závěrečných vysokoškolských prací.

V Praze dne.....

.....

Bc. Martin Hnyk



Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucím diplomové práce, pánům Ing. Radku Štefanovi, Ph.D., FEng. a Ing. Romanu Chylíkovi za odborné a cenné rady jak při konzultacích teoretické části práce, tak zejména při provádění experimentální části práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Tomáši Trtíkovi za pomoc při experimentální části práce.

Zároveň bych rád poděkoval své rodině a blízkým za podporu při studiu a důvěru, kterou ve mě během celého studia na vysoké škole vkládali.



Obsah

Abstrakt	9
Abstract	10
Seznam použitých zkratk, pojmů a definic	11
1.1 Zkratky.....	11
1.2 Pojmy a definice.....	11
2 Úvod	15
2.1 Motivace.....	15
2.2 Stanovení výzkumné otázky.....	16
2.3 Cíle práce.....	16
3 Legislativa	17
3.1 ČSN 73 7507 Projektování tunelů pozemních komunikací.....	17
3.1.1 Platnost normy.....	17
3.1.2 Druhy tunelů.....	17
3.1.3 Navrhování tunelů z hlediska požární bezpečnosti.....	18
3.2 ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty.....	19
3.3 ČSN 73 0810 Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení.....	19
3.3.1 Mezní stavy požární odolnosti.....	19
3.3.2 Třída reakce na oheň.....	19
3.3.3 Doplnková klasifikace.....	20
3.4 Shrnutí požadavků na betonové tunelové ostění z hlediska požární bezpečnosti ...	20
4 Teplotní analýza požárního úseku tunelu	21
4.1 Pojmy.....	21
4.2 Obecně.....	21
4.3 ČSN EN 1991 – 1 – 2 – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru.....	21
4.3.1 Obsah normy relevantní vzhledem k problematice analýzy požárního úseku tunelu	21
4.3.2 Nominální teplotní křivky.....	21
4.3.3 Přirozené modely požáru.....	21
4.4 Modely požáru.....	22
4.4.1 Úvod.....	22
4.4.2 Základní dělení modelů.....	22
4.4.3 Matematické modely požáru.....	22



4.4.4	Modely požáru pro silniční tunely	23
5	Vlastnosti betonu za zvýšené teploty	26
5.1	Chování betonu za zvýšené teploty	26
5.2	Mechanické vlastnosti betonu za zvýšené teploty	26
5.3	Vliv kameniva na odštěpování a jeho vlastnosti za zvýšené teploty	28
6	Odštěpování	30
6.1	Co je to odštěpování	30
6.2	Příčiny odštěpování	30
6.3	Možná porušení odštěpováním	33
6.4	Jaké betony mají tendenci odštěpovat	34
6.5	Metody k omezení či zabránění odštěpování	35
6.5.1	ČSN EN 1992 – 1 – 2	35
6.5.2	Odborná literatura	35
6.5.3	Experimenty a studie	36
7	Experimentální část	40
7.1	Zkušební vzorky	40
7.2	Zkoušky betonu v tlaku	47
7.3	Další receptury	51
7.3.1	Rozdílnosti oproti zkušebním vzorkům	51
7.3.2	Panel z UHPC	51
7.3.3	Panely z UHPC + AKU mezerovitého betonu	56
7.3.4	UHPC s drátky a polypropylenovými vlákny	62
7.3.5	UHPC s drátky	67
7.3.6	UHPC s polypropylenovými vlákny (PPF)	75
7.3.7	C 30/37	80
7.4	Zkoušky v lisu	85
7.5	Shrnutí a celkové vyhodnocení experimentální části	91
8	Závěr	96
	Literatura	98
	Použitý software	100
	Seznam tabulek	101



Abstrakt

Tato práce je zaměřena na problematiku tunelových betonových ostění za požáru, zejména na negativní jev betonu při vystavení požáru, tj. odštěpování. Nejprve byly shrnuty normové požadavky na betonové ostění. Těmito požadavky jsou požadovaná požární odolnost betonového ostění a třída reakce na oheň ostění a jeho povrchových úprav. Dále byla stručně shrnuta problematika analýzy požárního úseku tunelu, tj. relevantní požární scénáře. Následně byly uvedeny vlastnosti betonu a jeho složek při zvýšených teplotách. Dále byla podrobně rozebrána problematika odštěpování betonu, tj. jeho příčiny, charaktery porušení a opatření eliminující odštěpování. Odštěpování má totiž značný vliv právě na požární odolnost konstrukce. Následovala experimentální část, respektive řešený příklad této práce, ve kterém bylo zkoumáno odštěpování betonu a případný charakter poškození. Byly zkoušeny panely 400 x 400 x 100 mm různých receptur a pevnostních tříd. Jednalo se o panely z C 25/30 s různým množstvím PPF, C 30/37 s různým množstvím PPF a UHPC s $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ PPF nebo s ocelovými drátky. Panely byly teplotně namáhány různými způsoby. Cílem byla optimalizace malorozměrové zkoušky požární odolnosti. Následně byly výsledky zkoušek vyhodnoceny a porovnány s teoretickými poznatky a předpoklady, tj. zda k odštěpování došlo, či nikoliv.

Klíčová slova

Požár; ostění tunelu; beton; drátky; polypropylenová vlákna; odštěpování; požární odolnost; namáhání požárem



Abstract

This work is focused on the issue of tunnel concrete linings during fire, especially on the negative phenomenon of concrete when exposed to fire, i.e. spalling. First, the standard requirements for concrete lining were summarized. These requirements are the required fire resistance of the concrete lining and the fire reaction class of the lining and its surface treatments. Next, the issue of analyzing the fire section of the tunnel, i.e. the relevant fire scenarios, was briefly summarized. Subsequently, the properties of concrete and its components at elevated temperatures were presented. Next, the issue of concrete spalling was analyzed in detail, i.e. its causes, failure characteristics and measures to eliminate spalling. Splitting has a significant effect on the fire resistance of the structure. This was followed by the experimental part, i.e. a solved example of this work, in which concrete spalling and the possible nature of the damage were investigated. Panels of 400 x 400 x 100 mm of different recipes and strength classes were tested. These were panels made of C 25/30 with different amounts of PPF, C 30/37 with different amounts of PPF and UHPC with 1 kg·m⁻³ PPF or with steel fibers. The panels were thermally stressed in different ways. The target was the optimization of a the small-scale simulation. Subsequently, the results of the tests were evaluated and compared with theoretical knowledge and assumptions, i.e. whether splitting has occurred or not.

Keywords

Fire; tunnel lining; concrete; fibers; polypropylene fibers; spalling; fire resistance; fire load



Seznam použitých zkratek, pojmů a definic

1.1 Zkratky

ČSN	Česká technická norma
PBŘ	Požárně bezpečnostní řešení
SPB	Stupeň požární bezpečnosti
PO	Požární odolnost
PDK	Požárně dělicí konstrukce
DPx	Druh konstrukční části
ŽB	Železobeton
UHPC	Ultra-high-performance concrete (ultra vysokohodnotný beton)
PPF	Polypropylene fibers (polypropylenová vlákna)
RTPF	Recycled tyre polymer fibers (polymerová vlákna z recyklovaných pneumatik)
HRR	Rychlost uvolňování tepla

1.2 Pojmy a definice

Tunel

je liniový podzemní objekt, kterým prochází pozemní komunikace (silnice, dálnice nebo místní komunikace), umožňující plynulou a bezpečnou jízdu vozidel podcházejícím horských masivů, vodních překážek, osídlených oblastí, kulturně, historicky či ekologicky cenných území apod.; vyznačuje se uzavřeným příčným profilem. [1]

Tunelová trouba

je část tunelu, vymezená portály tunelu, kterou je vedena pozemní komunikace. [1]

Portál tunelu

je část tunelu, která zvnějšku ohraničuje tunelovou troubu a utváří vjezdový, výjezdový nebo kombinovaný otvor tunelové trouby a prostor kolem něho. [1]



Ostění tunelu

je stavební konstrukce, která zabezpečuje vnitřní prostor tunelové trouby a odporuje tlaku horninového prostředí a chrání tunel před účinky podzemní vody; v případě raženého tunelu spolupůsobí s okolním horninovým prostředím. [1]

Ražený tunel

je druh tunelu budovaný ražením, tj. výrubem v horninovém prostředí, bez odstranění jeho nadloží, nebo ražený pod zastropením. [1]

Hloubený tunel

je druh tunelu budovaný hloubením ve stavební jámě nebo rýze, tj. s dočasným odstraněním nadloží nad tunelem, nebo budovaný na povrchu a později zasypaný. [1]

Délka tunelu

je vzdálenost mezi vnějšími líci obou tunelových portálů, měřená v ose tunelové trouby v úrovni nivelety; v případě skloněných portálů se tato vzdálenost uvažuje mezi rovinami vedenými kolmo na osu tunelové trouby v místě plného průřezu tunelu; u tunelů s několika tunelovými troubami se stanoví délka každé tunelové trouby samostatně; za délku tunelu se pak považuje délka nejdelší tunelové trouby. [1]

Požární bezpečnost stavebních objektů

je schopnost stavebních objektů bránit v případě požáru ztrátám na životech a zdraví osob, popř. zvířat a ztrátám majetku; dosahuje se jí vhodným urbanistickým začleněním objektu, jeho dispozičním, konstrukčním a materiálovým řešením nebo požárně bezpečnostními zařízeními a opatřeními. [2]

Požárně bezpečnostní zařízení a opatření

je technické nebo organizační opatření ke snížení teoretické intenzity případného požáru v posuzovaném stavebním objektu nebo jeho části (např. požární signalizace, samočinné stabilní hasicí zařízení, požární odvětrání, stálý dohled požárních jednotek). [2]

Nehořlavé stavební výrobky

jsou výrobky třídy reakce na oheň A1 a třídy A2, které ani při požáru neuvolňují teplo, popř. množství uvolněného tepla je zanedbatelné. [2]

Hořlavé stavební výrobky

jsou výrobky třídy reakce na oheň B až F, které při požáru mohou uvolňovat teplo, šířit požár apod. [2]



Reakce na oheň

je odezva stavebního výrobku za určitých podmínek příspěvkem vlastního rozkladu k rozvoji ohně (požáru), kterému je vystavena. [2]

Požární zatížení

je pomyslné množství dřeva (kg) na jednotce plochy (m^2), jehož normová výhřevnost je ekvivalentní normové výhřevnosti všech hořlavých látek nacházejících se na stejné posuzované ploše (např. na ploše požárního úseku); sestává se ze stálého a nahodilého požárního zatížení a vyjadřuje se v $kg \cdot m^{-2}$. [2]

Požární úsek

je prostor stavebního objektu, ohraničený od ostatních částí tohoto objektu, popř. od sousedních objektů, požárně dělicími konstrukcemi, popř. požárně bezpečnostním zařízením; je základní posuzovanou jednotkou z hlediska požární bezpečnosti stavebních objektů. [2]

Požárně dělicí konstrukce

je stavební konstrukce, bránící šíření požáru mimo požární úsek, schopná po stanovenou dobu odolávat účinkům vzniklého požáru; je to zejména požární strop nebo střešní konstrukce, požární stěna (vnitřní, obvodová, štítová apod.) a požární uzávěr otvoru v těchto konstrukcích. [2]

Požární odolnost

je doba, po kterou jsou stavební konstrukce nebo požární uzávěry schopny odolávat teplotám vznikajícím při požáru, aniž by došlo k porušení jejich funkce. [2]

Stupeň požární bezpečnosti

je klasifikační zatřídění vyjadřující schopnost stavebních konstrukcí požárního úseku jako celku čelit požáru z hlediska rozšíření požáru a stability konstrukcí objektu. [2]

Analýza prvku (při požáru)

je tepelná a mechanická analýza nosného prvku vystaveného účinkům požáru, při níž se prvek uvažuje jako samostatný, s příslušnými podporovými a okrajovými podmínkami; nepřímé zatížení vyvolané požárem se neuvažuje, kromě toho, které je vyvoláno teplotním gradientem. [3]

Teplotní analýza

je postup určení vývoje teploty v prvcích na základě tepelných zatížení (čistý tepelný tok) a tepelných vlastností materiálu prvků a případných ochranných povrchových úprav. [3]



Tepelná zatížení

jsou zatížení konstrukce vyjádřena čistým tepelným tokem na prvky. [3]

Požární scénář

je kvalitativní vyjádření průběhu požáru v čase, udávající klíčové události, které charakterizují požár a odlišují jej od jiných možných požárů; obvykle definuje vznícení a průběh rozvoje požáru, plně rozvinuté stádium, stádium dohořívání, spolu s prostředím v budově a zařízeními, které mají vliv na průběh požáru. [3]

Návrhový požární scénář

je specifický požární scénář, který se použije pro analýzu. [3]

Lokální požár

je požár, kterého se účastní pouze omezená plocha požárního zatížení v požárním úseku. [3]

Rychlost uvolňování tepla

je teplo (energie) uvolňované hořlavým výrobkem jako funkce času. [3]



2 Úvod

2.1 Motivace

Tato práce je primárně zaměřena na betonová ostění silničních tunelů z hlediska požární odolnosti. Tunely často tvoří důležité dopravní tepny a jejich případné uzavření má za následek logistické problémy a s tím související ekonomické ztráty z mnoha pohledů a různých odvětví. Proto je důležité, aby i případně vzniklé požáry v tunelu měly co možná nejmenší dopad na jeho provoz. Tj. aby byla co možná nejméně poškozená konstrukce tunelu a tím pádem rychlejší a levnější opravy. Problematické jsou požáry především ve strategických a dlouhých tunelech, například pod Alpami. V nedávné minulosti došlo pod Alpami k několika tragickým a fatálním požárům. Například požár pod Mont Blancem, v Gotthardském tunelu nebo v Tauernském tunelu. V Tauernském tunelu byl provoz přerušen na 3 měsíce.

Beton je v porovnání s ostatními materiály odolný vůči účinkům požáru. Jedná se o nehořlavý materiál, který nepřispívá k rozvoji a šíření požáru, nezvyšuje požární zatížení a při vystavení účinkům požáru neprodukuje kouř ani jiné toxické plyny a zplodiny. Beton má relativně nízkou tepelnou vodivost a vysokou měrnou tepelnou kapacitu, což rovněž přispívá k vysoké odolnosti vůči účinkům požáru. Velkému porušení konstrukce při působení požáru je v současné době zabraňováno nejrůznějšími metodami a postupy. K docílení požadované požární odolnosti a co možná nejmenšímu porušení konstrukce jsou využívány obklady ostění, vícevrstvé ostění, protipožární omítky a různé receptury samotného betonu.

Největším problémem betonu při vystavení požáru je odštěpování. Odštěpením krycí vrstvy výztuže při požáru dojde k jejímu obnažení, a tudíž k výraznému poklesu únosnosti konstrukce. Současné normy a odborné publikace uvádí několik metod a řešení, jak odštěpování omezit, či dokonce zastavit. Jednou z těchto metod, konkrétně u vysokohodnotného betonu, je přidání $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ polypropylenových vláken. Toto množství se však dle některých experimentů ukázalo jako příliš velké a zbytečné. Navíc takové množství jemných vláken je technologicky náročné na zpracování betonové směsi.

Dalším problémem je, že zkušební normy ČSN EN 1363 – 1 Zkoušky požární odolnosti – Obecné požadavky [4] a ČSN EN 1365 – 1 Zkoušení požární odolnosti nosných prvků – Stěny [5] se zabývají pouze požární odolností konstrukce, tj. docílení mezních stavů R, E a I po požadované dobu. Odštěpováním, respektive metodikou zkoušení a jeho vyhodnocováním, se tyto normy nezabývají.



2.2 Stanovení výzkumné otázky

Alternativní materiálová řešení tunelových ostění se zaměřením na odštěpování, únosnost, ale se zohledněním dalších faktorů jako jsou například cena, technologie a akustika.

Jaké betony mají tendenci odštěpovat?

Je množství polypropylenových vláken, které uvádí norma, tj. $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ příliš velké? Je možné docílit zamezení odštěpování u vysokohodnotného betonu i při sníženém množství PP vláken?

2.3 Cíle práce

Hlavním cílem práce je porovnání receptur (pevnostních tříd a složení) betonu s ohledem na odštěpování.

Dílčí cíle:

- 1) Shrnutí normových požadavků ve vztahu k požární odolnosti konstrukcí v tunelu
- 2) Analýza současného stavu poznání vztažena primárně na odštěpování betonu
- 3) Shrnutí současných opatření pro zamezení odštěpování betonu
- 4) Příprava experimentu
- 5) Realizace experimentu
- 6) Vyhodnocení experimentu
- 7) Ověření / optimalizace malorozměrové zkoušky požární odolnosti



3 Legislativa

3.1 ČSN 73 7507 Projektování tunelů pozemních komunikací

3.1.1 Platnost normy

Základní normou pro projektování silničních tunelů na území České republiky je norma ČSN 73 7507 *Projektování tunelů pozemních komunikací* v aktuálním znění z prosince 2013. [1]

Předmětem této normy je navrhování tunelů pozemních komunikací a varianty jejich šířkového uspořádání, průjezdný prostor tunelu, jeho příčné uspořádání, směrové a výškové vedení komunikace v tunelu. Obsahuje konstrukční pokyny, bezpečnostní úpravy i zásady požární bezpečnosti.

Tato norma platí pro projektování, prostorové uspořádání a vybavení nově navrhovaných tunelů silnic, dálnic a místních komunikací. V maximálně využitelném rozsahu platí pro projektování rekonstrukcí a nového technického vybavení stávajících tunelů. Přiměřeně tato norma platí i pro projektování výstavby, rekonstrukcí a technické vybavení protihlukových tunelů a technické vybavení podjezdů pozemních komunikací.

Tato norma neplatí pro tunely místních komunikací s městskou kolejovou hromadnou dopravou, pro samotné tunely nemotoristických komunikací a pro tunely účelových komunikací. Norma rovněž neplatí pro podjezdy a tunely do 100 m.

3.1.2 Druhy tunelů

Norma ČSN 73 7507 klasifikuje tunely dle různých kritérií. [1]

Dle průchodu:

- terénním převýšením v trase komunikace
- pod vodní překážkou
- pod jinými dopravními systémy
- pod zastavěným územím
- pod územím chráněné krajiny

Dle způsobu výstavby se tunely dělí na:

- ražené
- hloubené
- budované zvláštními způsoby výstavby

Dle druhu provozu na:

- jednosměrné
- obousměrné



Z hlediska požární bezpečnosti s ohledem na stanovení požadované požární odolnosti konstrukcí je nejpodstatnější dělení dle délky, a to na:

- krátké – délky větší než 100 m až 500 m včetně
- střední – délky větší než 500 m až 1000 m včetně
- dlouhé – délky přes 1000 m

V závislosti na délce tunelu a intenzitě dopravy se tunely třídí do kategorií.

3.1.3 Navrhování tunelů z hlediska požární bezpečnosti

Norma ČSN 73 7507 stanovuje v kapitole č. 13 požadavky pro tunely z hlediska požární bezpečnosti. Opírá se o základní normy z hlediska požární bezpečnosti staveb, tj. ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty [2], ČSN 73 0804 Požární bezpečnost staveb – Výrobní objekty [6], ČSN 73 0810 – Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení [7], ČSN 73 0873 Požární bezpečnost staveb – Zásobování požární vodou [8], ČSN 73 0875 Požární bezpečnost staveb – Stanovení podmínek pro navrhování elektrické požární signalizace v rámci požárně bezpečnostního řešení [9] a ČSN 73 0848 Požární bezpečnost staveb – Elektrická zařízení, elektrické instalace a rozvody [10]. Při navrhování tunelů se postupuje obdobně jako dle ČSN 73 0802.

Ve vztahu k betonovému ostění tunelu norma stanovuje následující požadavky:

- 1) Konstrukce tunelu musí odolávat účinkům požáru po stanovenou dobu, aniž by došlo k porušení její funkce z hlediska požadovaných mezních stavů požární odolnosti.
- 2) Nosné a požárně dělicí konstrukce tunelu jsou navrhovány v provedení z výrobků zařazených do třídy reakce na oheň A1.
- 3) Povrchové úpravy stavebních konstrukcí musí minimálně splňovat požadavky třídy reakce na oheň B s provedenou doplňkovou klasifikací s1, d0 a $i_s = 0$.

V tunelových stavbách musí tunelové trouby tvořit samostatné požární úseky. U tunelových trub se požární zatížení nestanovuje. Dopravní prostor tunelové trouby je taxativně zatříděn dle délky tunelu:

- krátké tunely do V. stupně požární bezpečnosti
- střední a dlouhé tunely do VII. stupně požární bezpečnosti

Požadovanou požární odolnost stanoví norma ČSN 73 0802 a požadované mezní stavy stanoví a definuje norma ČSN 73 0810. Kromě mezních stavů norma ČSN 73 0810 definuje také třídu reakce na oheň a doplňkovou klasifikaci pro výrobky povrchových úprav. Index šíření plamene po povrchu i_s ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$) pro výrobky stanovuje norma ČSN 73 0863. Je-li stavební výrobek třídy reakce na oheň A1 a A2, tak bez dalšího průkazu lze dle ČSN 73 0863 uvažovat $i_s = 0$ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. [1]



3.2 ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty

Stavební konstrukce se podle požární odolnosti zařazují do této stupnice požární odolnosti:

15, 30, 45, 60, 90, 120 a 180 minut

Požadovanou požární odolnost tunelového betonového ostění stanoví dle SPB Tabulka 12, položka pro požární stěny a stropy v podzemních podlažích. Pro krátké tunely zatříděné do V. SPB je stanoven požadavek 120 minut a pro střední a dlouhé tunely, které jsou zatříděny do VII. SPB, 180 minut. [2]

3.3 ČSN 73 0810 Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení

3.3.1 Mezní stavy požární odolnosti

Pro klasifikaci požární odolnosti konstrukcí se užívá podle této normy těchto základních písmenných značek charakterizujících dosažené mezní stavy požární odolnosti:

R	Únosnost nebo stabilita
E	Celistvost
I	Izolační schopnost
W	Hustota tepelného toku nebo radiace z povrchu konstrukce
M	Mechanická odolnost (odolnost proti nárazu)

R – schopnost konstrukce nebo prvku odolávat stanoveným zatížením během příslušného požáru, podle daných kritérií

E – schopnost dělicího prvku stavební konstrukce, vystaveného z jedné strany požáru, zabránit průchodu plamenů a horkých plynů a zabránit výskytu plamenů na straně nevystavené požáru

I – schopnost dělicího prvku stavební konstrukce, vystaveného z jedné strany požáru, omezit nárůst teploty nad stanovenou mez na straně nevystavené požáru

W – omezení tepelného toku z neohřívané strany konstrukce

Pozn.: Uvedeny jsou pouze mezní stavy vztahující se k problematice betonového ostění.

3.3.2 Třída reakce na oheň

Norma ČSN 73 0810 třídí stavební výrobky podle jejich vlivu na vznik a šíření požáru. Tento vliv je stanoven třídami reakce na oheň s písmenným označením A1, A2, B, C, D, E a F. A1 a A2 jsou výrobky nehořlavé a B až F hořlavé. Dle požadavku normy ČSN 73 7507 (viz 3.1.3 této práce) musí být nosné a požárně dělicí konstrukce třídy reakce na oheň A1 a povrchové úpravy ostění B.



TRO	Příklady materiálů a výrobků
A1	Beton, ocel, sklo, keramika, cementovláknitá deska, keramika, sádra, minerální vlna, měď, zinek, hliník, pálené prvky, olovo....
A2	Sádkartonové nebo sádrovláknité desky
B	Cementotřískové desky

Pozn.: Uvedeny jsou pouze třídy reakce na oheň relevantní vzhledem k požadavkům ČSN 73 7507.

3.3.3 Doplnková klasifikace

Společně s třídou reakce na oheň je u výrobků někdy uváděn také požadavek na intenzitu vývoje kouře s1, s2 nebo s3 („s = smoke“) a plamenně hořících kapek d0, d1 a d2 („s = droplet“). Dle požadavku normy ČSN 73 7507 (viz 3.1.3 této práce) musí povrchová úprava ostění splňovat s1 a d0, tj. výrobky, ze kterých je provedena povrchová úprava ostění, nesmí uvolňovat kouř a kapat. [7] [11]

3.4 Shrnutí požadavků na betonové tunelové ostění z hlediska požární bezpečnosti

Pro krátké tunely je stanoven požadavek R(EI) 120 DP1 a pro střední a dlouhé tunely R(EI) 180 DP1. Druh konstrukční části DP1 beton splňuje. EI bude vyžadováno zejména, pokud ostění tunelové trouby bude mít funkci požárně dělicí, například od prostorů pro evakuaci osob.



4 Teplotní analýza požárního úseku tunelu

4.1 Pojmy

Jednozónový model

je model požáru, kdy se v požárním úseku předpokládají rovnoměrné teploty plynů. [3]

Dvouzónový model

je model požáru, kdy jsou v požárním úseku definovány různé zóny: horní vrstva, spodní vrstva, požár a oblak plynů, vnější plyn a stěny; v horní vrstvě se předpokládá rovnoměrná teplota plynů. [3]

4.2 Obecně

Pro návrh požární bezpečnosti je třeba stanovit předpokládaný průběh/rozvoj požáru v požárním úseku, tzv. návrhový požár. Respektive je nutné zvolit vhodný model požáru/požární scénář. Proměnnými parametry v modelech požáru závislými na čase je především teplota plynů a rychlost uvolňování tepla (HRR).

4.3 ČSN EN 1991 – 1 – 2 – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru

4.3.1 Obsah normy relevantní vzhledem k problematice analýzy požárního úseku tunelu

Tato norma, mimo jiné, stanovuje a uvádí příklady analýzy požárního úseku právě z hlediska teplot plynů a rychlosti uvolňování tepla. Uvádí základní modely požáru a stanovuje pravidla a požadavky pro jejich tvorbu. Modely požáru uvedené v normě a další modely v normě neuvedené, viz následující podkapitoly.

4.3.2 Nominální teplotní křivky

Normová teplotní křivka

Křivka vnějšího požáru

Uhlovodíková křivka

4.3.3 Přirozené modely požáru

Parametrické teplotní křivky

Zjednodušené výpočetní metody



Lokální požáry

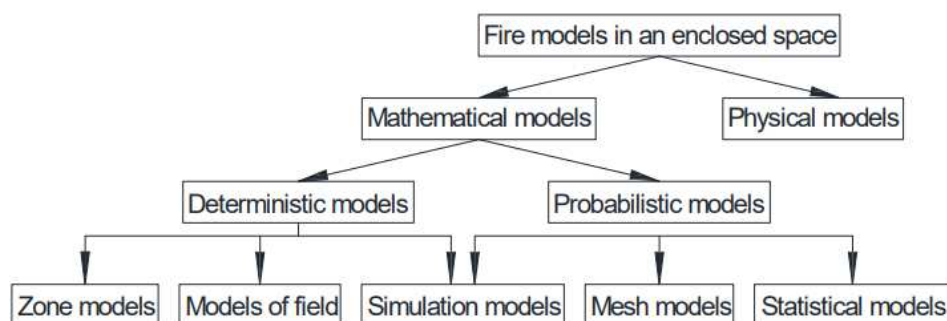
Zdokonalené modely požáru – jednozónový model, dvouzónový model, výpočetní dynamické modely kapalin a plynů CFD modely (Computational fluid dynamic models) [3]

4.4 Modely požáru

4.4.1 Úvod

ČSN EN 1991 – 1 – 2 neuvádí všechny modely požáru, např. všechny teplotní křivky apod. Proto v této podkapitole budou stručně shrnuty i další modely požáru, které norma neuvádí.

4.4.2 Základní dělení modelů



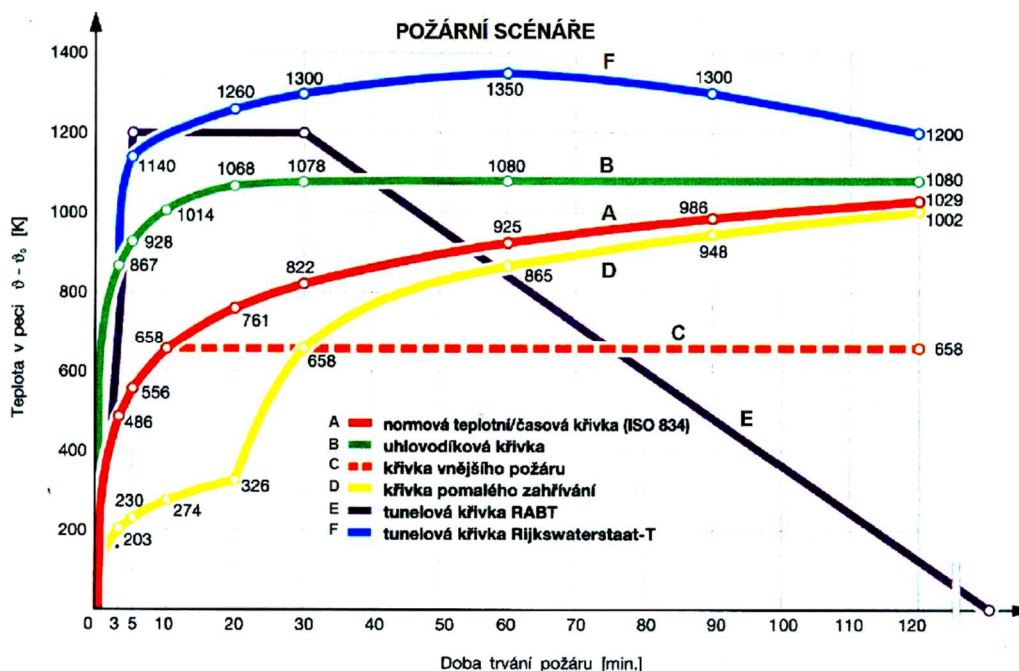
Obrázek 4 – 1 Schéma dělení modelů požáru [12]

4.4.3 Matematické modely požáru

Mezi matematické modely požáru patří nominální teplotní křivky a přirozené modely požáru.

Mezi nominální teplotní křivky patří:

- Normová teplotní křivka ISO 834
- Uhlovodíková křivka
- Modifikovaná uhlovodíková křivka
- Křivka vnějšího požáru
- Křivka pomalého zahřívání
- Tunelová RABT
- Tunelová RWS



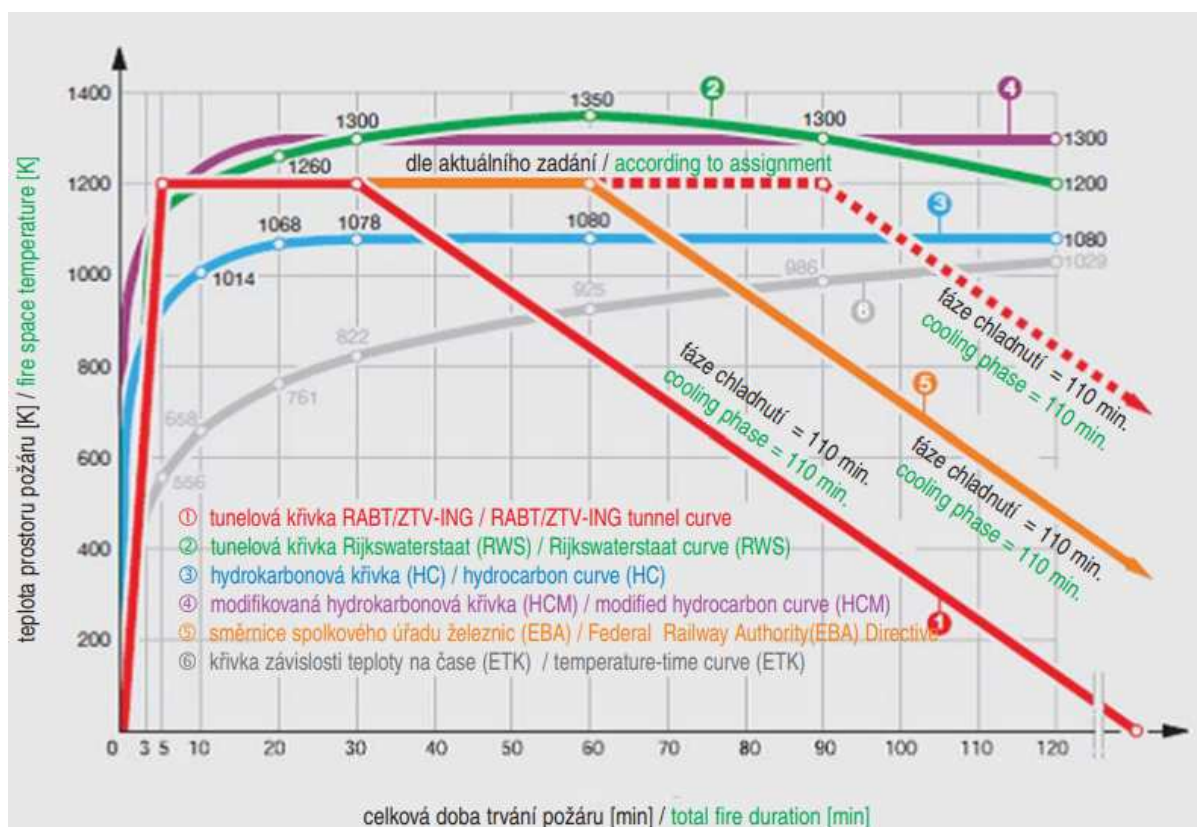
Obrázek 4 – 2 Teplotní křivky [13]

Přirozené modely požáru se rozdělují na jednoduché výpočetní modely a zpřesněné výpočetní modely. Mezi ty jednoduché modely patří například parametrické teplotní křivky, rychlost uvolňování tepla (HRR) a lokální požáry. Mezi zpřesněné modely patří zónové modely a CFD modely. Zónové modely jsou jednozónové a dvouzónové. Mezi zónové modely patří například programy CFAST, ARGOS nebo OZONE. Mezi CFD modely patří například FDS nebo FLUENT. [12]

4.4.4 Modely požáru pro silniční tunely

V současné době se na území ČR v podzemních stavbách uvažuje požární scénář podle normové teplotní křivky. V zahraničí jsou používány jiné křivky a mezi odborníky panují na vhodný požární scénář odlišné názory. [14]

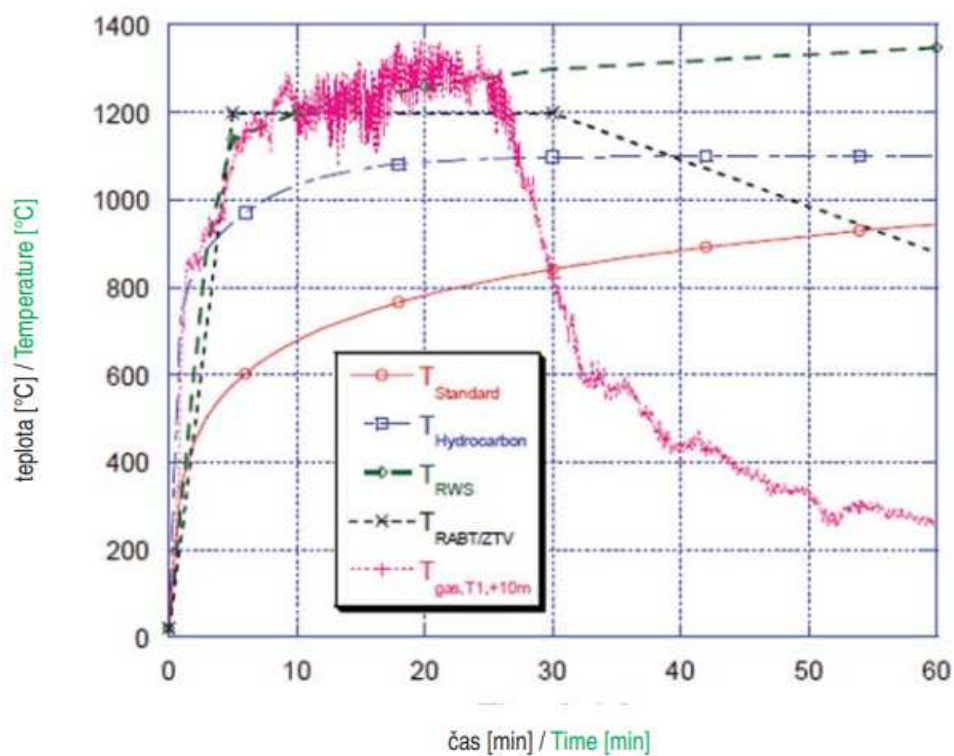
Aplikovatelné křivky pro tunely jsou uvedeny na Obr. 4 – 3.



Obrázek 4 – 3 Teplotní křivky užívané v tunelech [14]

K problematice teplotní analýzy tunelu byly v minulosti provedeny experimenty. Například v roce 2003 v Norsku Runehamar test.

Při tomto testu se v tunelu nechaly hořet běžně se vyskytující náklady bez zvláštního rizika. Teploty překračovaly 1300 °C a nárůst teplot byl mnohem rychlejší než u většiny teplotních křivek (viz Obr. 4 – 4). Nejreálněji tento průběh požáru vyjadřovala tunelová RABT/ZTV křivka. [14]



Obrázek 4 – 4 Průběh teplot plynů v porovnání s teplotními křivkami [14]

Pozn.: Problematika teplotní analýzy v tunelech je velice rozsáhlá a není předmětem této práce.



5 Vlastnosti betonu za zvýšené teploty

5.1 Chování betonu za zvýšené teploty

Při vystavení betonu vysokým teplotám v něm dochází k mnoha chemickým a fyzikální procesům, které zapříčiní vratné i nevratné změny vlastností betonu. Vysoké teploty mají rovněž vliv na teplotní a fyzikální vlastnosti betonu. Jedná se zejména o objemovou hmotnost, která se zvyšující se teplotou klesá, tepelnou vodivost, která taktéž se zvyšující se teplotou klesá a měrnou tepelnou kapacitu, která se nepatrně se zvyšující se teplotou zvyšuje.

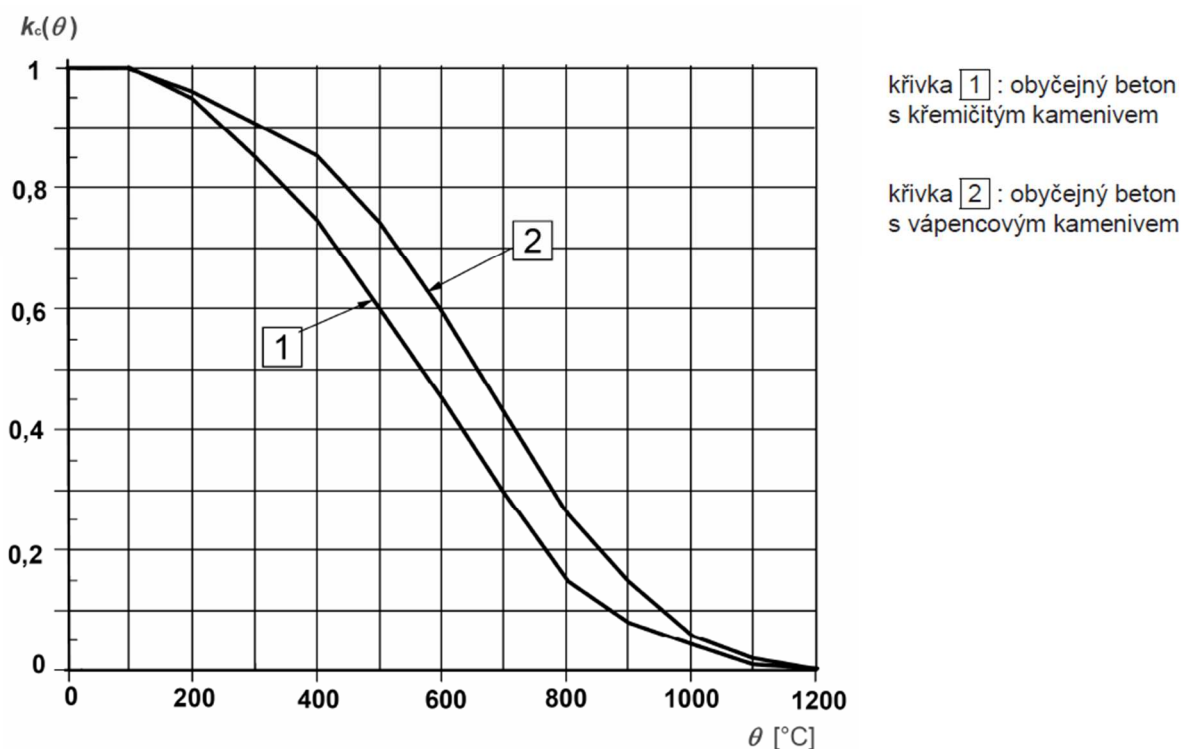
V průběhu zvyšování teploty dochází v betonu k následujícím chemickým procesům, které mají za následek fyzikální a chemické změny vlastností betonu. [15] [16]

- Do 100 °C dochází ke zrychlené hydrataci zbytků cementových zrn (přeměna volné vody na chemicky vázanou), dodatečnému vzniku CSH a Ca(OH)_2 a mírnému zvýšení pevnosti
- Při 100 °C dochází k dehydrataci cementového tmelu – ztrátě volné vody ze struktury
- Při 150 °C dochází k 1. fázi rozkladu CSH gelu
- Při 200 °C dochází k uvolňování vázané vody
- Při 300 °C dochází k výraznějšímu nárůstu pórovitosti a mikrotrhlin, dále pak k pokročilému rozkladu CSH a Ca(OH)_2 , začíná se porušovat kamenivo a dochází k prvnímu výraznějšímu poklesu pevnosti
- Při 550 °C dochází ke změně krystalické mřížky křemene z α -soustavy na β -soustavu. To vede k výrazně rozdílné teplotní roztažnost kameniva a cementové pasty a tím dochází k porušení vazeb mezi kamenivem a cementovou pastou => další výrazný pokles pevnosti
- Při 720 °C dochází k 2. fázi rozkladu CSH => β - C_2S a β -CS
- Při 800 °C a více dochází ke změnám hydraulických vazem v cementovém tmelu na keramické. Dochází k dekarbonataci vápencového kameniva, při které vzniká CO_2 .
- Při 1000 °C dochází k tavení některých složek betonu
- Při 1200 °C dochází k celkovému tavení materiálu

5.2 Mechanické vlastnosti betonu za zvýšené teploty

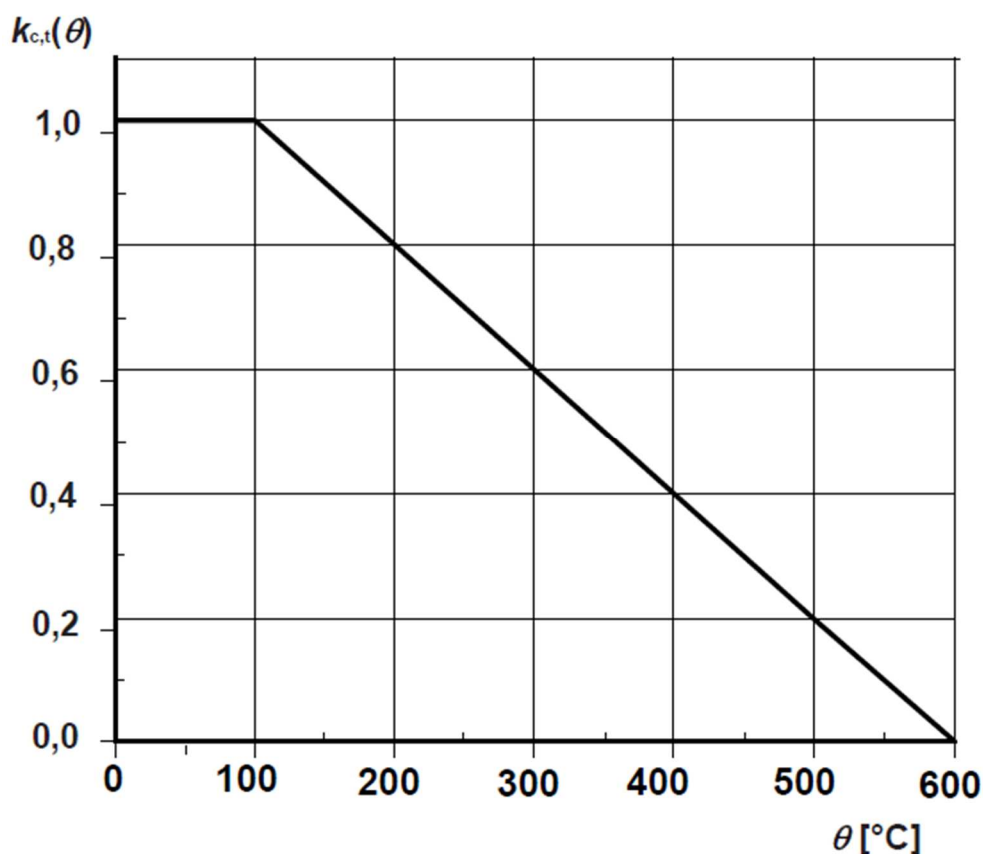
S nárůstem teploty se mechanické vlastnosti betonu zhoršují. Dochází ke snížení pevnosti betonu v tlaku, tahu a poklesu modulu pružnosti.

Charakteristická pevnost betonu v tlaku za zvýšené teploty je redukována pomocí redukčního součinitele $k_c(\theta)$, který je stanoven v normě ČSN EN 1992 – 1 – 2 (viz Obr. 5 – 1). [17]



Obrázek 5 – 1 – Součinitel $k_c(\theta)$ pro redukci pevnosti betonu v tlaku f_{ck} při zvýšených teplotách [17]

Pevnost betonu v tahu nebývá běžně při výpočtech uvažována. To se týká jak výpočtů za běžné teploty, tak při teplotě zvýšené. Nicméně při některých zpřesněných výpočetních metodách ji je zapotřebí využít. Pro vyjádření pevnosti betonu v tahu za zvýšené teploty slouží redukční součinitel $k_{c,t}(\theta)$, který je uveden v normě ČSN EN 1992 – 1 – 2 (viz Obr. 5 – 2) [17]. Tímto součinitelem je redukována charakteristická pevnost betonu v tahu $f_{ck,t}$. V problematice odštěpování má pevnost betonu v tahu značný vliv na charakter odštěpení (odpadnutí části betonu x explozivní charakter odštěpení) nebo vůbec na to, zda k odštěpování dojde, či nikoliv.



Obrázek 5 – 2 – Součinitel $k_{c,t}(\theta)$ pro redukci pevnosti betonu v tahu $f_{ck,t}$ při zvýšených teplotách [17]

5.3 Vliv kameniva na odštěpování a jeho vlastnosti za zvýšené teploty

Kamenivo tvoří v betonu největší hmotnostní i objemový podíl, proto značně ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti, a to jak za běžné teploty, tak za teploty zvýšené. Hlavními parametry kameniva, které následně stanovují vlastnosti betonu za zvýšené teploty jsou jeho druh, velikost (frakce), vlhkost a teplotní vlastnosti (teplotní roztažnost). Zmíněny jsou zejména vlastnosti, které mají značný vliv na odštěpování betonu.

Za vysoké teploty vykazují lepší vlastnosti čedič, škvára, pemza, umělá lehčená nebo vápencová kameniva. Naopak nejhorší vlastnosti vykazuje křemičité kamenivo. Ukazatelem vhodnosti použití druhu kameniva je zejména jeho teplotní roztažnost.

Kamenivo také mění při vystavení vysokým teplotám svoji barvu. To napomáhá k určení jednak druhu použitého kameniva v betonové konstrukci po požáru, ale také k analýze konstrukce, zejména zbytkové pevnosti apod. Dále pak lze dle barvy stanovit teploty v požárního úseku. Barevné změny jsou u křemičitého kameniva znatelné až při teplotách okolo 300 °C, kdy dochází ke zbarvení do oranžova až červena. Okolo 600 °C dochází k šedobílému zbarvení a okolo 900 °C ke žlutohnědému zbarvení u křemičitého kameniva. Změny barvy kameniva jsou



dány dehydratací a oxidací železa. U kameniva obsahující vápenec dochází při zahřívání ke změně barvy na bělavou. [18] [15]

Jak již bylo zmíněno dříve, tak náchylné na odštěpování jsou zejména betony obsahující vyšší podíl oxidu křemičitého, například křemence a žuly. Důvodem je vysoká teplotní roztažnost tohoto kameniva, která způsobí porušení vazby mezi kamenivem a cementovou pastou. Takové porušení sice zvýší permeabilitu materiálu (uvolnění pórových tlaků), ale také způsobí pokles tahové pevnosti. Naopak vhodné jsou například umělé lehčené kamenivo a vápencové kamenivo. Ovšem lehčené kamenivo je třeba používat pouze v prostředí, které nebude vlhké. Pokud bude beton v prostředí s vysokou vlhkostí, tak užití lehkého kameniva by mohlo podpořit odštěpování. Zvětšování velikosti zrn kameniva podporuje odštěpování. Důvodem je fakt, že větší zrna se více teplotně roztáhnou. Proti odštěpování je nejvhodnější použít kamenivo s nízkou teplotní roztažností a malými rozměry. [19]

Jak již bylo výše zmíněno, tak na charakter, popřípadě přítomnost a intenzitu odštěpování má značný vliv permeabilita materiálu. Permeabilita betonu při zvýšené teplotě je jedna z nejdůležitějších vlastností, dle které se řídí transport vlhkosti a nárůst pórových tlaků uvnitř betonu. Obecně lze tvrdit, že permeabilita se se zvyšující teplotou rovněž zvyšuje, což nepřispívá k odštěpování betonu. Kamenivo má také značný vliv na permeabilitu. Se zvyšující frakcí kameniva se zvyšuje také permeabilita betonu. Kromě kameniva má na permeabilitu vliv přítomnost polypropylenových vláken a ocelových drátků. To se týká zejména vysokohodnotných betonů. Zatímco polypropylenová vlákna permeabilitu značně zvyšují, tak ocelové drátky nikoliv. Kombinace polypropylenových vláken a kameniva o větších zrnech (vyšší frakce) vede k výraznému zvýšení permeability při vysoké teplotě. Zvýšení permeability je způsobeno tvorbou sítí mikrotrhlin při vysoké teplotě v důsledku tavení polypropylenových vláken a teplotní roztažností. Z důvodu teplotní roztažnosti vzniká napětí mezi kamenivem a cementovou maticí, což vede k narušení vazeb mezi těmito složkami. Kamenivo se totiž se zvyšující se teplotou roztahuje, zatímco cementová pasta se vlivem dehydratace smršťuje. Kolem vytavených polypropylenových vláken vznikají rovněž radiální mikrotrhliny. To vše způsobuje zvýšení permeability za vysokých teplot. [20] [21]



6 Odštěpování

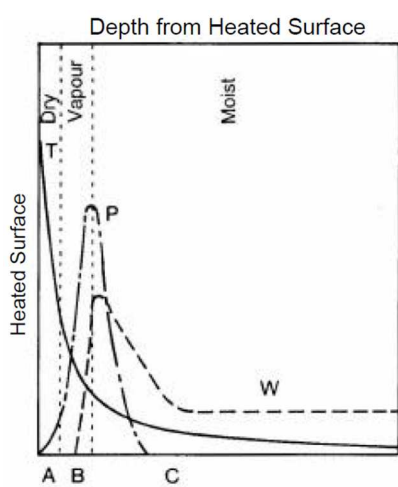
6.1 Co je to odštěpování

Odštěpování je oddělování vrstev nebo jednotlivých částí betonu z povrchu konstrukčního prvku při vystavení vysokým a rychle rostoucím teplotám. [19]

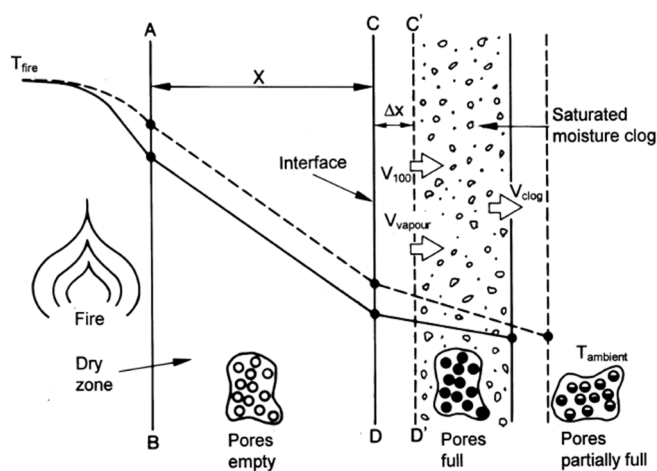
6.2 Příčiny odštěpování

K odštěpování betonu dochází ze 2 základních důvodů:

- Pórové tlaky



a) Rozložení teploty, tlaku a vlhkosti v průřezu (1D)



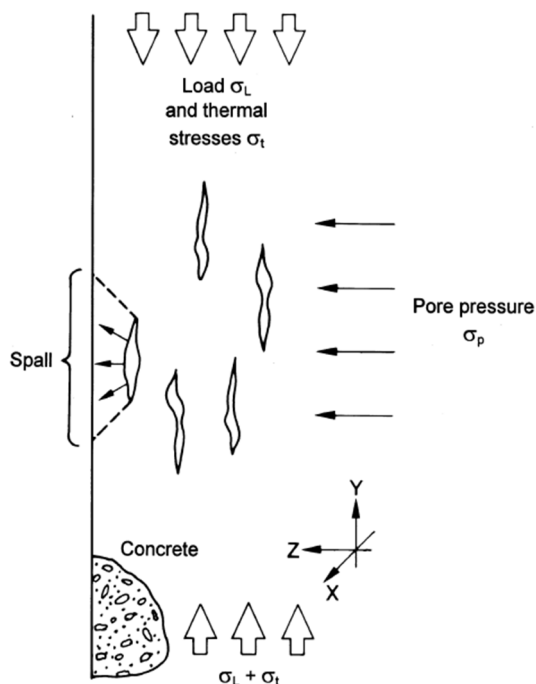
b) Transport vlhkosti při zahřívání (1D)

Obrázek 6 – 1 Vznik odštěpování v důsledku pórových tlaků [19]

Na Obr. 6 – 1a je rozložení teploty, tlaku a vlhkosti u UHPC v průřezu. Průřez je rozdělen na 3 zóny. První zóna (A) je zóna suchá, neboť to je zóna vystavená tepelnému toku. Střední zóna (B) je zóna odpařovací. Zde dochází k nárůstu pórových tlaků. Třetí zóna je zóna nasycená. K odštěpování dochází v bodě, kde je nejvyšší vlhkost (w) a zároveň nejvyšší pórový tlak (P). Obr. 6 – 1b vyjadřuje rovněž zóny s různou vlhkostí.



- Teplotní roztažnost



Obrázek 6 – 2 Vznik odštěpování v důsledku teplotní roztažnosti (napětí) [19]

Obr. 6 – 2 znázorňuje vznik odštěpování v důsledku teplotní roztažnosti betonu, respektive z důvodu teplotních napětí.

V důsledku teplotní roztažnosti dochází k odštěpování betonu z následujících důvodů:

- Vznik smykového napětí způsobeného rozdílnou teplotní roztažností betonu po průřezu (viz Obr. 6 – 3)
- Vznik napětí způsobeného nerovnoměrným ohřátím prvku (3D vedení tepla)
- Rozdílná teplotní roztažnost betonu a výztuže při vysokých teplotách
- Rozdílná teplotní roztažnost cementové pasty a kameniva

Uvedené důvody působí téměř vždy současně, pouze se mění jejich dominance (podíl na odštěpování) v závislosti na:

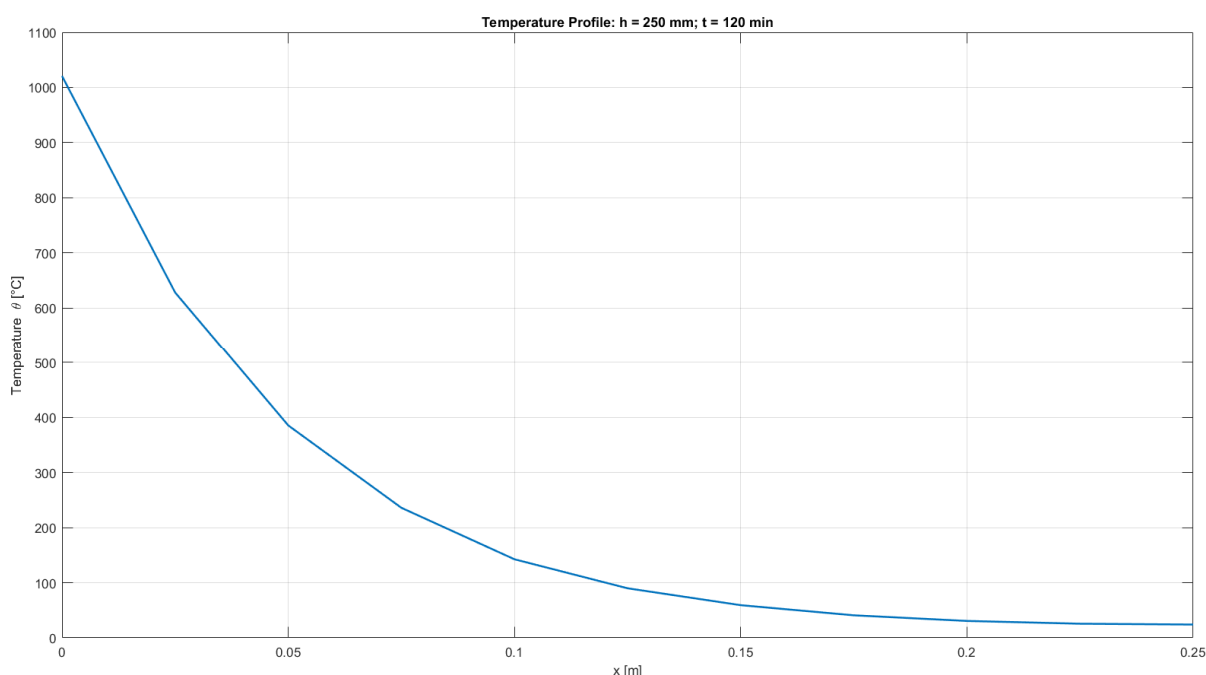
- rozdílných způsobech zahřívání (rovnoměrně x nerovnoměrně; rychlý x pozvolný nárůst teploty; lokálně x plošně)
- tom, o jaký se jedná prvek (stěna, stropní deska, klenba, sloup, trám,...)
- recepturách a vlastnostech betonu (viz dále), tj. pevnosti a permeabilitě



Pórové tlaky – Při vystavení betonu vysokým teplotám dochází ke změně skupenství vázané vody v betonu. Dochází k přeměně vody na páru. Pára má větší objem a zapříčiní vznik tlaků v pórech. Při překročení pevnosti betonu v tahu dojde k:

- vzniku mikrotrhlin a uvolnění tlaku, tj. zvýšení permeability (nastane obvykle u betonu běžných pevnostních tříd)
- odštěpování, především u vysokohodnotných betonů (viz Obr. 6 – 1)

Smykové napětí – Rozložení teploty po průřezu prvku (např. stěny) není lineární. U ohřívaného povrchu je mnohem větší teplota betonu než ve „zbytkovém“ průřezu. To zapříčiní, že kvůli teplotní roztažnosti se vrstva u ohřívaného povrchu má snahu deformovat („roztáhnout“) podstatně více, než vrstva ve větší hloubce => smykové napětí (viz Obr. 6 – 3).



Obrázek 6 – 3 Rozložení teploty po průřezu ŽB stěny tl. 250 mm při namáhání teplotou dle normové teplotní křivky po dobu 120 minut (TempAnalysis 1.2)

Rozdílná teplotní roztažnost betonu a výztuže při vysokých teplotách – Vlivem rozdílné teplotní roztažnosti betonu a výztuže při vysokých teplotách dochází k porušení soudržnosti mezi betonem a výztuží. To napomáhá odštěpení, respektive oddělení vrstvy betonu právě v místě výztuže.

Rozdílná teplotní roztažnost cementové pasty a kameniva – Vlivem rozdílné teplotní roztažnosti cementové pasty a kameniva dochází k porušení soudržnosti vazeb jeho složek. To zapříčiní pokles mechanických vlastností (pevnosti v tlaku a tahu, modul pružnosti) a následně přispěje k odštěpování. Nicméně porušením vazeb mezi složkami betonu dojde také ke zvýšení permeability, což naopak zapříčiní uvolnění pórového tlaku a snížení odštěpování.



6.3 Možná porušení odštěpováním

Charakter porušení odštěpováním závisí na mnoha faktorech. Zejména na tom, o jaký prvek se jedná (deska, stěna, sloup, trám), na tvaru jeho průřezu (např. čtvercový x kulatý průřez sloupu) a na způsobu namáhání teplotou (lokálně x na celý prvek). To souvisí s vedením tepla v průřezu. Je rozdíl, zda se jedná o 1D nebo 3D vedení tepla.



a) Namáhání teplotou 1D



b) Charakter porušení při 1D vedení tepla

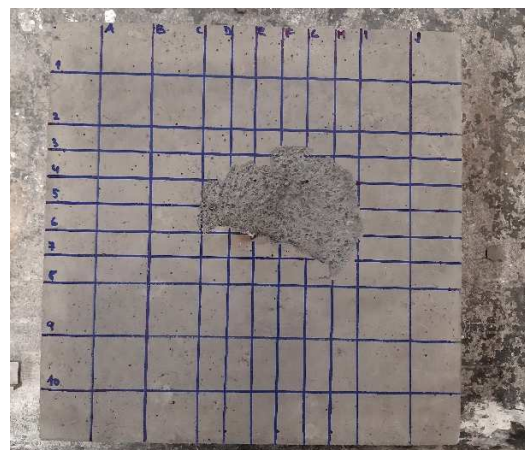
Obrázek 6 – 4 Porušení panelu z UHPC při 1D vedení tepla

Na Obr. 6 – 4a a 6 – 4b lze předpokládat 1D vedení tepla, tj. vedení pouze po tloušťce průřezu. Jedná se totiž o plošný prvek, který je zahříván s malou idealizací „rovnoměrně po celé své ploše“ (Obr. 6 – 4a). To má za následek rovnoměrnou deformaci na ohřívaném povrchu vlivem teplotní roztažnosti, které nic nebrání (nebrání roztažení do příčného a podélného směru). Dále dochází také k rovnoměrnému nárůstu pórových tlaků. Porušení, které lze vidět na Obr. 6 – 4b, nasvědčuje tomu, že se skutečně jednalo o 1D vedení tepla. Porušení má charakter rovnoměrného odštěpení (přibližně stejná tloušťka) po celém průřezu prvku.

Konkrétně v tomto případě došlo k odštěpení betonu ve chvíli, kdy už nebyl namáhán teplotou, tj. ve fázi chladnutí. Došlo totiž k otočení teplotního gradientu a horký beton uvnitř prvku začal ohřívát ochlazující se beton na povrchu. Relativně prudké ochlazení okolním vzduchem zapříčinilo odštěpení.



a) Namáhání teplotou 3D



b) Charakter porušení při 3D vedení tepla

Obrázek 6 – 5 Porušení panelu z UHPC při 3D vedení tepla

Na Obr. 6 – 5a a 6 – 5b se jedná o 3D vedení tepla, tj. vedení tepla po tloušťce průřezu, v podélném a příčném směru. Jedná se totiž o plošný prvek, který je namáhán teplotou lokálně, nikoliv plošně. To má za následek dominantní nárůst pórových tlaků pouze v nejvíce teplotou namáhaném místě. Dále pak vlivem teplotní roztažnosti dochází k napětí, které je způsobené nerovnoměrným ohřátím povrchu prvku, tj. beton v místě namáhání teplotou má tendenci se roztáhnout, ale je sepnut („držen“) okolním podstatně chladnějším betonem, který tendenci se roztáhnout nemá.

6.4 Jaké betony mají tendenci odštěpovat

Tendenci odštěpovat mají především vysokohodnotné betony (HPC). Důvody jsou vysoká hutnost, nízký vodní součinitel, nízká pórovitost a permeabilita. Dále je z hlediska výskytu odštěpování, respektive jeho charakteru, důležitá pevnost betonu v tahu, která navíc se zvyšující se teplotou materiálu klesá. Když dojde v důsledku vystavení prvku vysoké teplotě k nárůstu teploty materiálu, vzniknou u běžných betonů mikrotrhliny a zvýší se permeabilita materiálu. Tím se uvolní akumulovaný pórový tlak v cementové matici. K tomuto procesu dojde u běžných betonů už při nízkých pórových tlacích v závislosti právě na pevnosti betonu v tahu. U vysokohodnotných betonů s relativně vysokou pevností v tahu dojde k porušení uvedeném výše až při vysokých pórových tlacích, které přispějí k explozivnímu charakteru odštěpení.



6.5 Metody k omezení či zabránění odštěpování

6.5.1 ČSN EN 1992 – 1 – 2

ČSN EN 1992 – 1 – 2 uvádí předpoklady, kdy dojde x nedojde k odštěpování betonu v závislosti především na vlhkosti a pevnosti betonu. Dále uvádí možná opatření pro zabránění odštěpování u běžných betonů a u betonů vysokohodnotných.

U běžných betonů se má provést povrchová výztuž, pokud osová vzdálenost „a“ je rovna nebo větší než 70 mm. Výztužná síť musí být z prutů s průměrem nejméně 4 mm a s roztečemi nejvýše 100 mm.

U vysokohodnotných betonů je uvedeno, že pokud se jedná o betony třídy C 55/67 až C 80/95, tak platí pravidla jako pro běžné betony, pokud obsah křemičitého úletu je menší než 6 % hmotnosti cementu. U betonů tříd C 80/95 a C 90/105 se má použít jeden z následujících postupů:

- Výztužná síť se jmenovitou krycí vrstvou 15 mm. Tato síť má mít drátky o průměru ≥ 2 mm a oka $\leq 50 \times 50$ mm. Jmenovitá krycí vrstva hlavní výztuže musí být ≥ 40 mm.
- Přidání propylenových vláken do betonové směsi v množství větším než $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Pozn.: Norma neuvádí vyšší třídu betonu než C 90/105.

Kromě výše zmíněných konkrétních opatření norma také uvádí jako řešení, že je možné použít typ betonu, u kterého bylo prokázáno (například zkouškou), že za požáru k odštěpování nedochází. A dále, že je možné využít ochranné vrstvy, u kterých bylo prokázáno, že za požáru nedochází k odštěpování betonu. [17]

6.5.2 Odborná literatura

Kromě výše uvedených metod, které uvádí norma, existují i jiné možnosti, jak zamezit odštěpování. Jednou z nich je například provzdušnění betonu pomocí provzdušňovacího činidla. To sice zapříčiní snížení pevnosti, ale zvýší permeabilitu betonu. Další možností je například použití tepelných bariér v podobě obkladů protipožárními deskami. Výhodou desek je jejich víceúčelovost. Kromě požární ochrany mají desky také funkci ochrannou před agresivními látkami, které jsou s tunely spjaty. Jedná se zejména o chloridy z posypových solí a emise z výfukových plynů. Použitím desek je omezena koroze ocelové výztuže. Dále desky mohou mít také funkci akustickou, což v určitých případech může být také velkou výhodou. Další výhodou je rychlá a snadná výměna poškozených desek po případném požáru. Nevýhodou jsou zvýšené náklady. [14] [19]

Další variantou omezení odštěpování a zvýšení požární odolnosti tunelových ostění je použití speciálních protipožárních omítek, jejichž základem jsou zejména portlandský cement a vermikulit. Jejich výhodou je aplikace na jakýkoliv zakřivený povrch ostění. Naopak jejich nevýhodou je problematická přilnavost k podkladům. [14]



6.5.3 Experimenty a studie

Nedávné požáry v tunelech (Mont Blanc Tunnel, Tauern Tunnel) odhalily, že při nich dojde k velkému poškození betonového ostění z důvodu odštěpování. Odštěpování dosahovalo až do tloušťky 25 cm, což značně ovlivnilo nosnou konstrukci tunelu. Negativním důsledkem odštěpování byla jednak ztráta části průřezu ostění, ale také obnažení výztuže.

Na základě těchto zkušeností bylo provedeno několik tuzemských i zahraničních experimentů a studií, jejichž cílem bylo stanovit betonovou směs pro ostění tak, aby bylo odštěpování zamezeno nebo alespoň eliminováno na akceptovatelnou míru. Akceptovatelnou mírou se rozumí to, aby byly následné opravy co možná nejrychleji provedené a málo nákladné.

Většina studií a experimentů je založena na užití polypropylenových vláken (PPF). Ty mají zabránit explozivnímu odštěpování. Princip je takový, že PPF tají při 170 °C a zcela se rozpadají při 340 °C. Po jejich rozpadu v betonu vznikají dutiny, díky kterým dojde k uvolnění tlaku par, tj. zvýší se permeabilita materiálu. Účinnost eliminace či zabránění odštěpování závisí na mnoha faktorech, jako je například množství, průměr, délka a typ PPF. [22]

Safety Assessment of Concrete Tunnel Linings under Fire Load (2006) – Lainzer Tunnel

Jeden z experimentů proběhl v Rakousku na nově budovaném Lainz Tunnel (německy Lainzer Tunnel). Byla použita polypropylenová vlákna v množství 0; 1,5 a 3 kg·m⁻³. Požárním scénářem byla uhlovodíková teplotní křivka (viz Obr. 4 – 3). Při experimentu bylo mimo jiné zjištěno, že při množství polypropylenových vláken větším než 1,5 kg·m⁻³ dochází k výraznějším problémům při zpracování betonové směsi, například problémy se zhuštěním betonu. Proto je třeba pro lepší zpracovatelnost uvažovat poměrně vysoký vodní součinitel v/c. To zapříčiňuje větší množství pórů. To je ovšem z pohledu účinků požáru výhodné a spolu s PP vlákny dochází k výraznému omezení až zastavení odštěpování. [23]

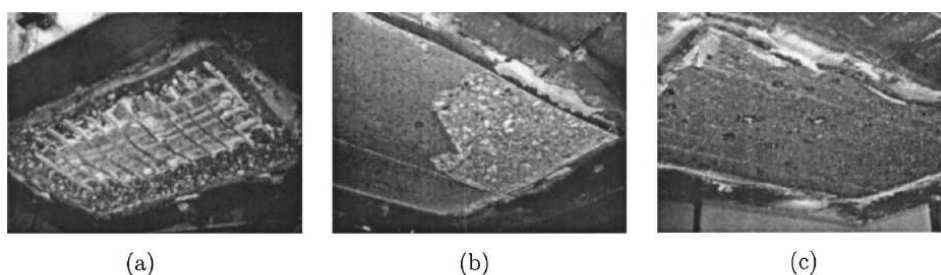


Fig. 1. Spalling depth obtained from large-scale experiments for concrete with (a) 0, (b) 1.5, and (c) 3.0 (kg PP fibers)/(m³ concrete) (photographs were taken within the research project reported in Kusterle et al. 2004)

Obrázek 6 – 6 Experiment z Lainz Tunnel [23]

Fire Protection of Concrete Tunnel Linings with Waste Tyre Fibers (2017)

Jeden z výzkumů, který není založen na užití PPF pro omezení odštěpování betonu, je výzkum na Univerzitě v Sheffieldu. Zde zkoumají využití polymerních vláken, které vznikají jako vedlejší produkt recyklace pneumatik. Tato vlákna jsou kontaminována kaučukem, a proto ztrácí



v mnoha oblastech další využití a jsou obvykle likvidována spalováním. Předmětem výzkumu je způsob a možnost zavedení těchto RTPF (Recycled Tyre Polymer Fibre) do betonu, tj. jejich následné možné využití. Dále je předmětem výzkumu také zjištění účinnosti těchto vláken na odštěpování, respektive, zda je možné nahrazení „standardních“ polypropylenových vláken.

Odpadní vlákna jsou zprvu po recyklaci silně kontaminována kaučukem (cca 30 % hmotnosti) a dalším jiným znečištěním (Obr. 6 – 7 vlevo), což může značně ovlivnit vlastnosti betonu. Proto je třeba před použitím těchto odpadních vláken jejich intenzivní čištění. Vyčištěné vlákno je nazvané RTPF (Obr. 6 – 7 vpravo).

Fabio P. Figueiredo et al. / Procedia Engineering 210 (2017) 472–478



Fig. 1. (a) Waste fibre before the cleaning process; (b) cleaned fibre for use in concrete (RTPF)

Obrázek 6 – 7 Kontaminovaná odpadní vlákna (vlevo); vyčištěná vlákna (vpravo) [22]

Dále byly posouzeny geometrické charakteristiky RTPF, tj. průměr a délka. Vzorky byly náhodně odebrány z vyčištěných RTPF. V analýze zjišťování délky bylo měřeno 1200 vzorků a v analýze zjišťování průměru bylo měřeno 991 vzorků. Výsledky ukázaly, že délka RTPF se pohybuje od 0,8 mm do 16 mm a průměr od 7,5 μm do 41 μm , a že více než 90 % vláken je kratších než 7 mm a průměr více než 89 % vláken menších než 25 μm (Obr. 6 – 8).

Fabio P. Figueiredo et al. / Procedia Engineering 210 (2017) 472–478

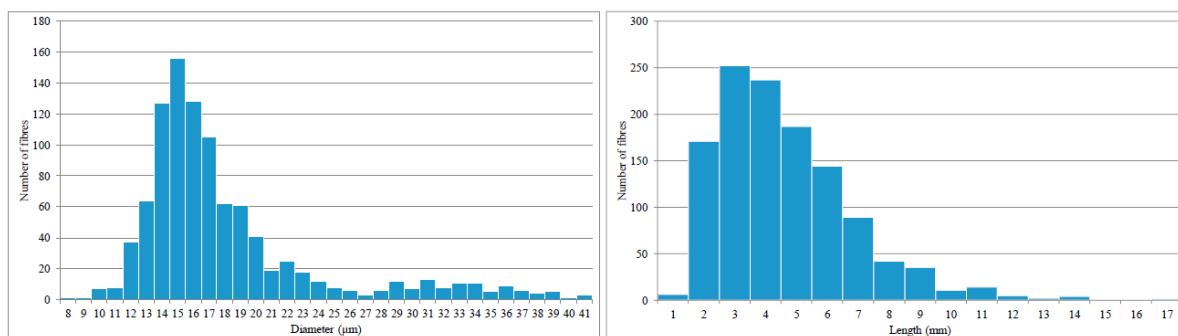


Fig. 3. RTPF length and diameter distributions.

Obrázek 6 – 8 Grafické výsledky měření geometrických charakteristik vláken; vlevo četnost/průměr; vpravo četnost/délka [22]



Problémem RTPF je jejich shlukování a zamotanost. Proto nemohou být přímo přidány do betonové směsi, neboť by tím byla výrazně snížena kvalita betonu a jeho vlastnosti by se v jednotlivých částech betonového prvku značně lišily v závislosti na rozptýlení vláken po prvku. Proto byl v rámci tohoto výzkumu vyvinut prototyp stroje pro integraci a rozptýlení RTPF do betonové směsi.

Při zkouškách na odštěpování bylo testováno 24 vysokopevnostních betonových desek (panelů) s RTPF a bez nich. Desky byly z vysokopevnostní samozhutnitelné betonové směsi C 70 a měly rozměry 500 x 220 x 100 mm. Desky byly vystaveny jednoosé tlakové síle a byly namáhány teplotou. Pro každou recepturu byly použity 3 desky. 12 desek bylo vyztuženo ocelovou sítí (pletivem), jejichž pruty měly průměr 5 mm a velikost ok byla 50 x 50 mm. Do 9 vzorků byla přidána ocelová vlákna (RTSF) v množství $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Table 1. Results of the fire-induced spalling test.

Slab Ref.	Slab Dimensions (mm)	RTPF (kg/m^3)	RTSF (kg/m^3)	Mesh Reinforcement (mm×mm)	Occurrence of Explosive Spalling	Spalling Time (mm:ss)
PC1-1	500×220×100	-	-	-	Yes	00:30
PC1-2	500×220×100	-	-	-	No	-
PC1-3	500×220×100	-	-	-	Yes	00:24
PF1-1	500×220×100	1	-	-	No	-
PF1-2	500×220×100	1	-	-	Yes	01:00
PF1-3	500×220×100	1	-	-	Yes	00:49
PF2-1	500×220×100	2	-	-	-	-
PF2-2	500×220×100	2	-	-	No	-
PF2-3	500×220×100	2	-	-	No	-
PF7-1	500×220×100	7	-	-	No	-
PF7-2	500×220×100	7	-	-	No	-
PF7-3	500×220×100	7	-	-	No	-
PC2-1	500×200×200	-	-	50×50	Yes	01:12
PC2-2	500×200×200	-	-	50×50	Yes	00:41
PC2-3	500×200×200	-	-	50×50	No	-



SF401-1	500×200×200	-	40	50×50	No	-
SF401-2	500×200×200	-	40	50×50	No	-
SF401-3	500×200×200	-	40	50×50	No	-
SF40PF2-1	500×200×200	2	40	50×50	Yes	01:07
SF40PF2-2	500×200×200	2	40	50×50	No	-
SF40PF2-3	500×200×200	2	40	50×50	No	-
SF40PF5-1	500×200×200	5	40	50×50	No	-
SF40PF5-2	500×200×200	5	40	50×50	No	-
SF40PF5-3	500×200×200	5	40	50×50	No	-

Obrázek 6 – 9 Výsledky zkoušek [22]

U čtyř ze šesti desek z prostého betonu (PC1 a PC2) došlo k poměrně silnému odštěpování. Dále došlo k odštěpování u dvou ze tří desek s $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ RTPF (PF1). Odštěpování nastalo také u jedné ze tří desek s $2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, ocelovou výztužnou sítí a ocelovými vlákny RTSF. Nicméně v tomto případě nedošlo k explozivnímu odštěpení, neboť odštěpený beton byl držen právě ocelovými vlákny. U ostatních desek nedošlo k explozivnímu odštěpování.

Z výše uvedených výsledků vyplývá (Obr. 6 – 9), že při dodržení zkušebních podmínek jsou RTPF schopna zabránit explozivnímu odštěpování, pokud je jejich množství vyšší než $2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, tj. se jedná o stejné množství, které stanovuje norma ČSN EN 1992 – 1 – 2 v případě PPF. Výsledky signalizují možnost nahrazení „standardních“ polypropylenových vláken za RTPF za účelem omezení explozivního odštěpování betonu za požáru. [22]



7 Experimentální část

7.1 Zkušební vzorky

V rámci experimentální části byly zprvu vyrobeny 2 panely 400 x 400 x 100 mm. První panel byl z betonu třídy pevnosti C 30/37 s $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ PPF délky 6 mm o vodním součiniteli 0,45. Druhý panel byl z UHPC (ultra-high-performance concrete) o pevnosti v tlaku cca 120 MPa s ocelovými drátky v množství $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a vodním součiniteli 0,27 (některé suroviny betonové směsi viz Obr. 7 – 1).



a) Suroviny na přípravu panelu z C 30/37 s PPF

b) Ocelové drátky do panelu z UHPC

Obrázek 7 – 1 Suroviny k přípravě panelů

Na každý panel byly umístěny celkem 4 termočlánky. 2 plášťové (T_p), které byly připevněny k teplotou namáhanému povrchu panelu z vnější strany a 2 kabelové (T_k) (viz Obr. 7 – 2). Jeden kabelový termočlánek byl připevněn taktéž k teplotou namáhanému povrchu, ovšem nikoliv z vnější strany, nýbrž byl veden skrz celou tloušťku panelu. Druhý kabelový termočlánek byl v hloubce 20 mm.



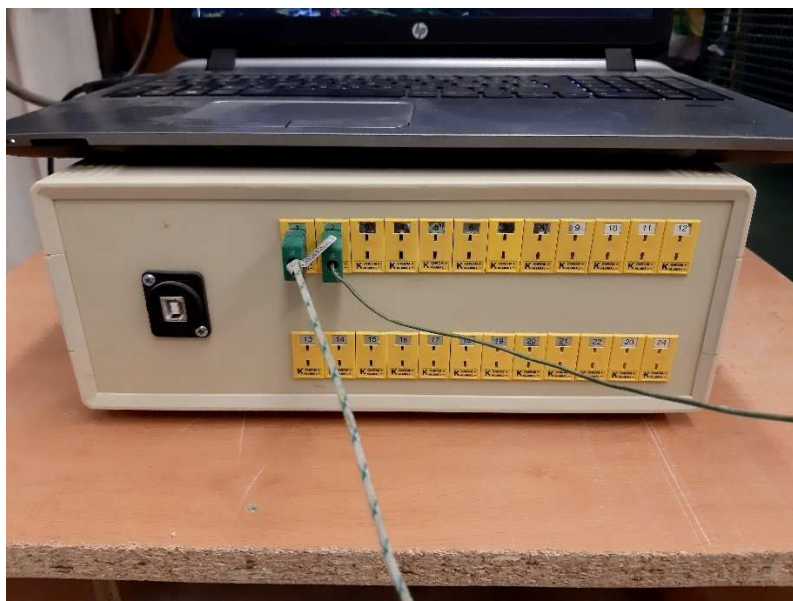
a) Kabelové termočlánky T_k ve vzdálenosti 20 mm od sebe



b) Umístění a připevnění kabelových termočlánků T_k do kovové formy

Obrázek 7 – 2 Příprava kabelových termočlánků T_k

Všechny termočlánky byly napojeny na datalogger (viz Obr. 7 – 3), což je převodní přístroj z elektrického napětí (volty) na teplotu (stupně Celsia). Časový krok zaznamenávání teplot byl nastaven na 15 vteřin.



Obrázek 7 – 3 Datalogger

V následujících tabulkách jsou uvedeny přesné receptury betonové směsi, z nichž byly panely vyrobeny.



Tabulka 7 – 1 Receptura panelu z C 30/37 s PPF 6 mm

C 30/37 s 1 kg·m⁻³ PP vláken			
		kg·m⁻³	
Kamenivo	Cement	42,5 R	350
	Voda	Voda	156
	v/c	0,45	-
	Jemné	0 – 4	980
	Střední	4 – 8	300
	Hrubé	8 – 16	600
	Plastifikátor	Stachement 787 0,75 %	5
	Vlákna	PP 6 mm	1
	Vzduch	Mikroporan 2 0,12 %	0,875
		2 393	

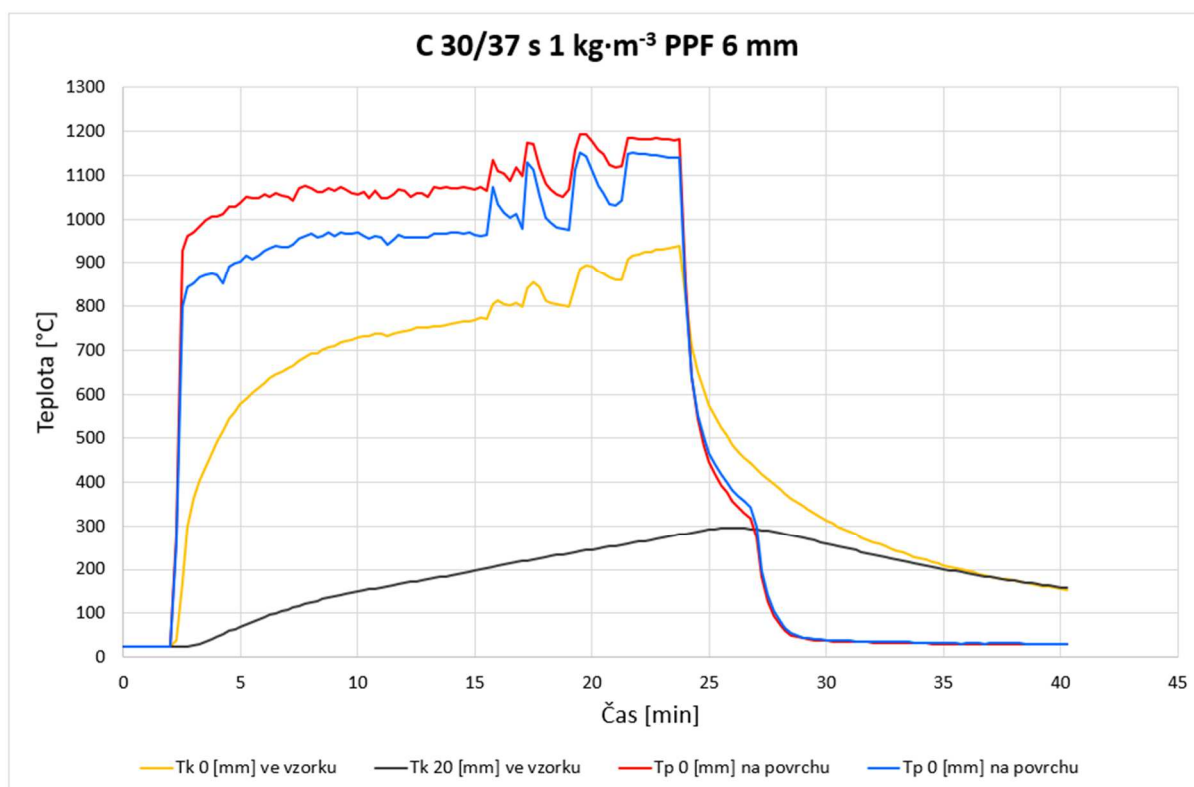
Tabulka 7 – 2 Receptura panelu z UHPC s drátky

UHPC s ocelovými drátky			
		kg·m⁻³	
Kamenivo	Cement	42,5 R	650
	Voda	Voda	190
	v/c	0,27	-
	Jemné	0 – 4	1645
	Střední	4 – 8	0
	Hrubé	8 – 16	0
	Drátky	-	40
	Plastifikátor	Stachement 787 0,75 %	26
	Mikrosilika	Stachesil S	80
		2 631	

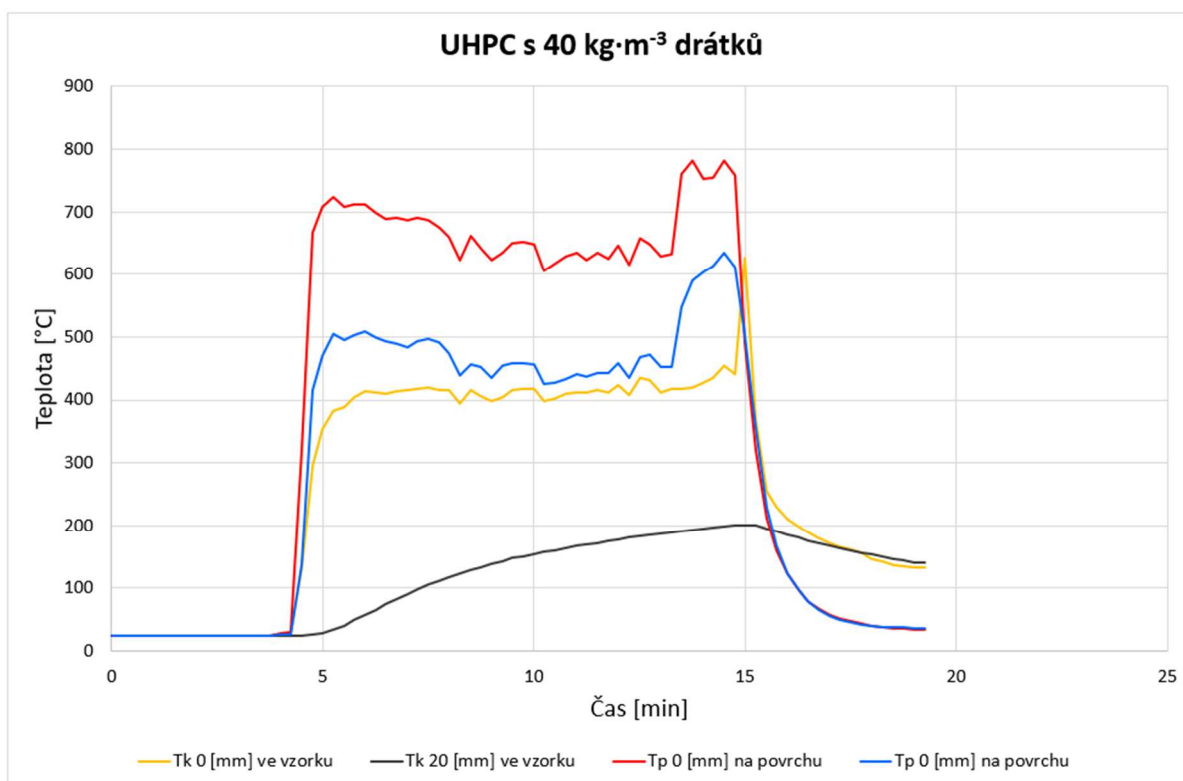
Následně byly panely vystaveny plynovému hořáku, který simuloval požár (požární scénář) dle teplotní tunelové křivky RABT/ZTV (viz Obr. 7 – 4 a 7 – 5). Výkon hořáku byl regulován ventily



buď přímo na hořáku nebo na tlakové lahvi. Panely byly teplotou namáhány lokálně, tudíž došlo k 3D vedení tepla v panelu.



Obrázek 7 – 4 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích v čase u panelu z C 30/37 s PPF;
 T_k – termočlánek kabelový a T_p – termočlánek plášťový



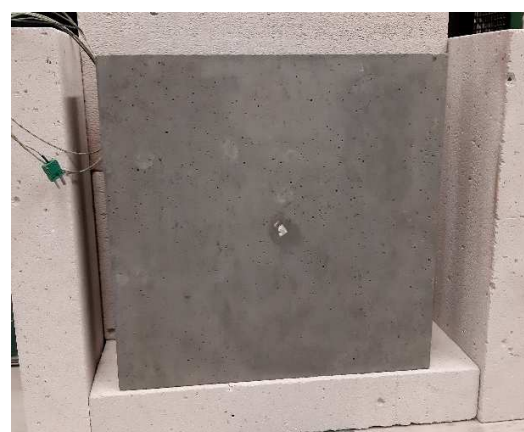
Obrázek 7 – 5 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích v čase u panelu z UHPC;

T_k – termočlánek kabelový a T_p – termočlánek plášťový

Z Obr. 7 – 4 je patrné, že po cca 25 minutách byla zkouška ukončena s tím, že k odštěpování nedošlo. Na Obr. 7 – 5 je patrný čas, kdy byl hořák vypnut, tj., kdy došlo k prvnímu odštěpení a při jakých teplotách na jednotlivých termočláncích. Kdyby v případě UHPC hořák vypnut nebyl, tak by pravděpodobně časem docházelo k dalšímu odštěpování jednotlivých vrstev více do hloubky.



a) Panel z C 30/37 s PPF



b) Panel z UHPC s drátky

Obrázek 7 – 6 Panely před zkouškou

Na Obr. 7 – 6 jsou znázorněny panely z betonu C 30/37 s PPF a UHPC s drátky před zkouškou. Již na první pohled je zřejmý rozdíl ve strukturách obou panelů. Zatímco panel z betonu C



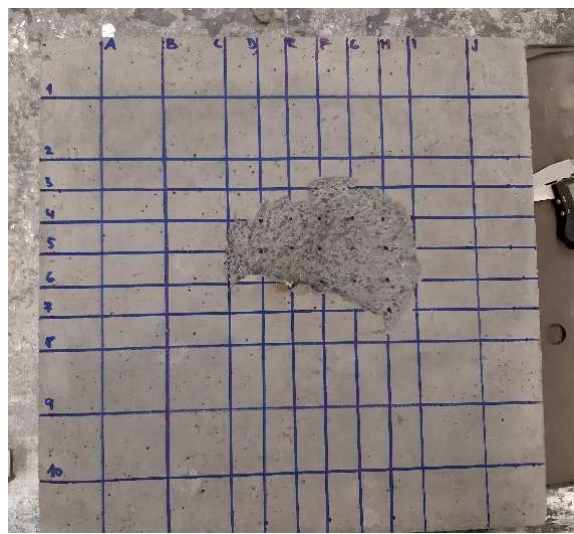
30/37 s PPF je pórovitý, tak panel z UHPC s drátky působí mnohem hutněji a s mnohem nižší permeabilitou.

Cílem experimentu bylo na základě získaných poznatků stanovit nejprve předpoklad, zda u jednotlivých panelů dojde k odštěpování, či nikoliv. Předpoklad byl takový, že u betonu C 30/37 s PP vlákny (PPF) k odštěpování nedojde, zatímco u UHPC s drátky ano. Předmětem zkoumání bylo pouze odštěpování, nikoliv například pevnost betonu v tlaku po zkoušce, neboť by v takovém případě byla zjištěna pevnost konkrétního prvku o konkrétních rozměrech, nikoliv pevnost materiálu.

Následně byl proveden experiment a byly vyhodnoceny výsledky.



a) Panel z C 30/37 s PPF



b) Panel z UHPC s drátky

Obrázek 7 – 7 Panely po zkoušce

Obr. 7 – 7a znázorňuje panel z C 30/37 s PPF, kde k odštěpování sice nedošlo, ale beton v místě namáhání hořákem výrazně změnil barvu. Obrázek 7 – 7b znázorňuje charakter porušení UHPC panelu. Charakter porušení je typický pro tento způsob namáhání teplotou a tento druh betonu. Dominantním důvodem odštěpování byly pórové tlaky v kombinaci s omezenou teplotní roztažností. Hodnoty času a hloubky odštěpení jsou uvedeny v Tabulce 7 – 3. Hloubky odštěpení na rastru jsou uvedeny na Obr. 7 – 9.



a) Panel z C 30/37 s PPF



b) Panel z UHPC s drátky

Obrázek 7 – 8 Panely po zkoušce

Obr. 7 – 8a znázorňuje vodu vytékající z trhliny. Trhлина byla způsobena vlivem teplotní roztažnosti betonu při lokálním teplotním namáhání. Vznikem trhliny se uvolnilo napětí způsobné právě teplotní roztažností při 3D vedení tepla v panelu. Vytékající voda je z kondenzovaná transportovaná vlhkost v trhlíně. Vlhkost zkondenzovala na výrazně chladnějším místě, tj. ve vzniklé trhlíně.

Obr. 7 – 8b znázorňuje detailněji charakter porušení panelu z UHPC s drátky. Lze vidět neodštěpenou část panelu, která je držena drátky.

	A	B	C	D	E	F	G
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	1,50	1,10	0,00	0,00
3	0,00	1,00	2,90	3,60	3,30	3,30	0,00
4	0,00	3,50	5,50	8,70	7,80	3,20	0,00
5	0,00	4,30	8,30	9,90	6,20	2,80	0,00
6	0,00	0,00	0,00	5,80	3,70	0,70	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Obrázek 7 – 9 Hloubka odštěpení u panelu z UHPC s drátky v milimetrech



Tabulka 7 – 3 Vyhodnocení výsledků odštěpování

Druh betonu	Předpoklad	Skutečnost	Čas [min]	Max. hloubka [mm]
C 30/37 s PPF	ne	ne	-	-
UHPC s drátky	ano	ano	11	9,9

Tyto panely sloužily jako zkušební vzorky. Byly zkoušeny ve stáří cca 4 týdny a byla v nich uchována veškerá vlhkost, která, jak ukázalo další zkoušení, je v tomto případě dominantním faktorem při odštěpování. Dominantním z toho důvodu, že napětí způsobené teplotní roztažností je uvolněno vznikem příčných a podélných trhlin po obvodě panelu (viz např. Obr. 7 – 8a), tudíž toto napětí nepřispívá k odštěpování.

7.2 Zkoušky betonu v tlaku

Pro stanovení charakteristické pevnosti betonu v tlaku a následné pevnostní třídy UHPC různých receptur byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku. Zkoušky byly provedeny pouze pro UHPC, neboť pro betony pevnostních tříd C 25/30 a C 30/37 byly použity již dříve odzkoušené a osvědčené receptury.

Zkoušeny byly krychle 100 x 100 x 100 mm. Protokoly ze zkoušek viz Obr. 7 – 10 a 7 – 11.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE																
FAKULTA STAVEBNÍ																
Thákurova 7, 166 28 PRAHA - 6, tel : 224 354 627 , fax : 224 354 446 , email : k133@fsv.cvut.cz																
ODBOURNÁ LABORATOŘ KATEDRY BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ																
Zpráva o zkoušce										ze dne:	14.12.23	Číslo protokolu :	Diplomová práce Martin Hnyk			
Zákazník :											Pořadové číslo :					
Akce :											Poznámka :					
Výsledky laboratorních zkoušek																
Číslo vzorku	Ozn. tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem. hmot. kg/m ³	Datum		Stáří vzorku dny	Tah za ohybu		Tlak		Příčný tah		Poznámka ke zkoušce
		Šířka mm	Výška mm	Délka mm			výroby d.m.r.	zkoušky d.m.r.		síla kN	pevnost MPa	síla kN	pevnost MPa	síla kN	pevnost MPa	
UHPC		100,0	100,6	99,7	2539,0	2532	17.05.23	14.12.23	211			1477,90	146,9			*17.5
UHPC		100,0	97,9	99,7	2476,0	2537	17.05.23	14.12.23	211			1369,73	140,0			*17.5
UHPC		100,2	98,7	99,9	2501,0	2532	17.05.23	14.12.23	211			1326,02	134,1			*17.5
UHPC		99,9	98,4	100,2	2506,0	2545	17.05.23	14.12.23	211			1406,96	143,2			*17.5
UHPC		99,9	98,1	99,6	2461,0	2521	17.05.23	14.12.23	211			1263,78	129,0			*17.5
UHPC		100,0	100,1	99,8	2533,0	2537	17.05.23	14.12.23	211			1390,29	139,0			*17.5
UHPC		99,8	97,6	100,8	2487,0	2533	17.05.23	14.12.23	211			1366,77	140,3			*17.5
UHPC		99,8	98,4	99,9	2480,0	2529	17.05.23	14.12.23	211			1197,84	122,0			TAH.PORUŠ
UHPC		99,9	99,7	99,8	2516,0	2530	17.05.23	14.12.23	211			1397,52	140,3			*17.5
UHPC		99,8	98,8	101,3	2526,0	2528	17.05.23	14.12.23	211			1282,68	130,1			*17.5
UHPC		99,9	99,2	99,9	2507,0	2531	17.05.23	14.12.23	211			1348,80	136,0			*17.5
UHPC		99,8	98,4	100,9	2515,0	2537	17.05.23	14.12.23	211			1177,28	119,8			*17.5
Typ zkoušky		: Tlak					Zkoušel		: Ing. Tomáš Trtík		Podpis :					
Druh vzorku		: Krychle 100x100x100					Vypracoval		: Ing. Tomáš Trtík		Podpis :					
Teplota		: 22 °C					Vedoucí laboratoře		: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.		Podpis :					
Relativní vlhkost		: 38%					Kontroloval		: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.		Podpis :					

Obrázek 7 – 10 Protokol ze zkoušky pevnosti betonu v tlaku pro referenční UHPC



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE																
FAKULTA STAVEBNÍ																
Thákurova 7, 166 28 PRAHA - 6, tel : 224 354 627 , fax : 224 354 446 , email : k133@fsv.cvut.cz																
ODBORNÁ LABORATOŘ KATEDRY BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ																
Zpráva o zkoušce																
Zákazník :										ze dne: 14.12.23		Číslo protokolu : Diplomová práce Martin Hnyk				
Akce :												Pořadované číslo :				
												Poznámka :				
Výsledky laboratorních zkoušek																
Číslo vzorku	Ozn. tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem. hmot. kg/m ³	Datum		Stáří vzorku dny	Tah za ohybu		Tlak		Příčný tah		Poznámka ke zkoušce
		Šířka mm	Výška mm	Délka mm			výroby d.m.r.	zkoušky d.m.r.		síla kN	pevnost MPa	síla kN	pevnost MPa	síla kN	pevnost MPa	
UHPC	PPF 1kg	100,0	98,5	100,0	2499,0	2536						1267,30	128,6			
UHPC	PPF 1kg	100,1	98,8	100,4	2517,0	2537						1275,45	129,0			
UHPC	PPF 1kg	99,8	99,7	100,1	2500,0	2512						1355,47	136,3			
UHPC	PPF 1kg	100,1	98,6	100,0	2490,0	2523						1161,91	117,8			TAH.PORUŠ
UHPC	PPF 1kg	100,0	97,4	99,9	2456,0	2525						1276,38	131,1			NEJLEPŠÍ
UHPC	PPF 1kg	99,8	99,3	99,9	2501,0	2526						1265,64	127,6			
UHPC	PPF + drátky	99,8	97,2	100,7	2438,0	2496	09.05.23	14.12.23	219			957,05	98,7			*9.5.
UHPC	PPF + drátky	99,8	96,1	100,4	2419,0	2513	09.05.23	14.12.23	219			955,76	99,6			*9.5.
UHPC	PPF + drátky	99,9	100,2	100,9	2473,0	2449	09.05.23	14.12.23	219			997,99	99,7			*9.5.
UHPC	drátky	99,8	100,1	100,4	2559,0	2551	10.05.23	14.12.23	218			1258,41	126,0			*10.5
UHPC	drátky	100,0	99,0	100,4	2524,0	2540	10.05.23	14.12.23	218			1192,84	120,5			*10.5
UHPC	drátky	100,7	97,4	100,1	2485,0	2529	10.05.23	14.12.23	218			1078,93	109,9			*10.5
UHPC	drátky	100,2	97,3	100,0	2486,0	2551	10.05.23	14.12.23	218			1163,58	119,3			*10.5
UHPC	drátky	100,6	99,3	99,8	2518,0	2524	10.09.23	14.12.23	95			899,26	90,0			*10.9
UHPC	drátky	100,4	96,3	100,2	2473,0	2552	10.09.23	14.12.23	95			855,55	88,5			*10.9
Typ zkoušky		: Tlak				Zkoušel				: Ing. Tomáš Trtík		Podpis :				
Druh vzorku		: Krychle 100x100x100				Vypracoval				: Ing. Tomáš Trtík		Podpis :				
Teplota		: 22 °C				Vedoucí laboratoře				: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.		Podpis :				
Relativní vlhkost		: 38%				Kontroloval				: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.		Podpis :				

Obrázek 7 – 11 Protokol ze zkoušky pevnosti betonu v tlaku pro UHPC s PPF a drátky

Následně byly výsledky zkoušek vyhodnoceny. Byla stanovena charakteristická pevnost betonu v tlaku f_{ck} pro jednotlivé receptury a bylo provedeno zatřídění do pevnostních tříd.

Číslo vzorku	Označení tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem. hmotnost kg/m ³	Datum		Stáří vzorku dny	Tlak síla kN	Pevnost MPa	Pevnost průměrná MPa	Orientační kontrola $f_{ck} - 8$ MPa	Směrodatná odchylka V_n	f_{ck} MPa	Zatřídění	
		Šířka mm	Výška mm	Délka mm			výroby d.m.r.	zkoušky d.m.r.									
		mm	mm	mm			d.m.r.	d.m.r.									
UHPC	99,99	100,59	99,68	2539	2532,46	17.05.23	14.12.23	211	1477,9	146,9							
UHPC	99,95	97,91	99,72	2476	2537,22	17.05.23	14.12.23	211	1369,7	140,0							
UHPC	100,22	98,65	99,89	2501	2532,45	17.05.23	14.12.23	211	1326,0	134,1							
UHPC	99,90	98,38	100,20	2506	2544,73	17.05.23	14.12.23	211	1407,0	143,2							
UHPC	99,93	98,06	99,63	2461	2520,77	17.05.23	14.12.23	211	1263,8	129,0							
UHPC	99,96	100,09	99,79	2533	2537,06	17.05.23	14.12.23	211	1390,3	139,0							
UHPC	99,83	97,59	100,78	2487	2533,00	17.05.23	14.12.23	211	1366,8	140,3	135,1	127,1	8,3494	1,72	120,69	C 100/115	
UHPC	99,81	98,38	99,88	2480	2528,67	17.05.23	14.12.23	211	1197,8	122,0							
UHPC	99,91	99,71	99,81	2516	2530,40	17.05.23	14.12.23	211	1397,5	140,3							
UHPC	99,81	98,81	101,31	2526	2528,17	17.05.23	14.12.23	211	1282,7	130,1							
UHPC	99,93	99,22	99,90	2507	2531,01	17.05.23	14.12.23	211	1348,8	136,0							
UHPC	99,80	98,43	100,92	2515	2536,90	17.05.23	14.12.23	211	1177,3	119,8							
UHPC	PPF 1kg	100,00	98,54	100,01	2499	2535,77			1267,3	128,6							
UHPC	PPF 1kg	100,08	98,77	100,36	2517	2537,17			1275,5	129,0							
UHPC	PPF 1kg	99,78	99,70	100,05	2500	2511,80			1355,5	136,3	128,4	120,4	6,0461	1,77	117,69	C 100/115	
UHPC	PPF 1kg	100,05	98,61	100,04	2490	2522,83			1161,9	117,8							
UHPC	PPF 1kg	100,04	97,35	99,88	2456	2524,88			1276,4	131,1							
UHPC	PPF 1kg	99,81	99,34	99,87	2501	2525,69			1265,6	127,6							
UHPC	PPF + drátky	99,78	97,21	100,70	2438	2496,03	09.05.23	14.12.23	219	957,1	98,7						
UHPC	PPF + drátky	99,84	96,08	100,35	2419	2512,93	09.05.23	14.12.23	219	955,8	99,6	99,3	91,3	0,5707	3,37	97,40	C 80/95
UHPC	PPF + drátky	99,88	100,24	100,87	2473	2448,74	09.05.23	14.12.23	219	998,0	99,7						
UHPC	drátky	99,78	100,13	100,41	2559	2550,85	10.05.23	14.12.23	218	1258,4	126,0						
UHPC	drátky	99,96	99,03	100,37	2524	2540,34	10.05.23	14.12.23	218	1192,8	120,5						
UHPC	drátky	100,72	97,44	100,13	2485	2528,77	10.05.23	14.12.23	218	1078,9	109,9						
UHPC	drátky	100,20	97,31	99,96	2486	2550,64	10.05.23	14.12.23	218	1163,6	119,3	109,0	101,0	16,1941	1,77	80,36	C 60/75
UHPC	drátky	100,64	99,31	99,81	2518	2524,17	10.09.23	14.12.23	95	899,3	90,0						
UHPC	drátky	100,40	96,33	100,19	2473	2552,14	10.09.23	14.12.23	95	855,5	88,5						

Obrázek 7 – 12 Vyhodnocení zkoušek pevnosti betonu v tlaku

Na Obr. 7 – 12 jsou zobrazeny výsledky zkoušek. Je patrné, že receptura s nejvyšší pevností je referenční UHPC, u které byla naměřena průměrná pevnost 135,1 MPa. Charakteristická pevnost byla 120,69 MPa, a tudíž spadá do pevnostní třídy C 100/115.



Naopak nejnižší pevnost byla naměřena u receptury UHPC s drátky, kde průměrná pevnost byla 109,0 MPa. Charakteristická pevnost byla 80,36 MPa, a tudíž receptura spadá do pevnostní třídy C 60/75.

Lze si rovněž všimnout, že na pevnost betonu v tlaku mají větší negativní vliv drátky než polypropylenová vlákna. V tomto případě je to pravděpodobně způsobeno množstvím drátků ve vzorcích. Charakteristická pevnost betonu v tlaku u těchto vzorků s drátky je rovněž výrazně snížena vysokou směrodatnou odchylkou. Dále jsou zobrazeny fotografie ze zkoušek.



Obrázek 7 – 13 Zkouška pevnosti betonu v tlaku

Na Obr. 7 – 13 je zobrazena krychle 100 x 100 x 100 mm z referenčního UHPC v lisu před zkouškou.



a) Správné porušení



b) Nesprávné porušení

Obrázek 7 – 14 Zkouška pevnosti betonu v tlaku

Při zkoušení nebyly všechny krychle porušeny správným způsobem. Na Obr. 7 – 14a je fotografie správného porušení krychle. Lze si všimnout typického porušení vzorku při zkoušce betonu v tlaku, tj. porušení vlivem příčných tahů. Porušená krychle má tvar přesýpacích hodin. Na Obr. 7 – 14b je uveden příklad nesprávného porušení krychle. Jedná se o porušení jednak tlakové (rozdrcený beton na krychli na odvrácené straně), ale také o porušení tahové. Na fotografii je zobrazena tahová trhлина, která symbolizuje nesprávné porušení krychle.

Terminologie v oblasti vysokohodnotných a ultra-vysokohodnotných betonů není jednoznačná. Na území ČR se v odborné literatuře, internetových portálech a firmách za ultra-vysokohodnotné betony (UHPC – ultra-high-performance concrete) považují takové betony, které mají pevnost v tlaku vyšší než 120 MPa.

Nicméně v této práci jsou jako UHPC označovány i betony, které mají pevnost nižší (viz Obr. 7 – 12). Důvodem je stejný základ receptur betonů. Rozdílnost je ve výskytu drátků a polypropylenových vláken. Jak je patrné z Obr. 7 – 12, tak polypropylenová vlákna a drátky mají značný vliv na pevnost betonu v tlaku. Snahou bylo zachovat označení (názvy) všech panelů jako UHPC a pouze více konkretizovat jejich složení. Důvodem takového označení je také větší přehlednost při dalším vyhodnocování odštěpování.



7.3 Další receptury

7.3.1 Rozdílnosti oproti zkušebním vzorkům

Po zkušebních vzorcích byly odzkoušeny další receptury. Pro každou recepturu byly vyrobeny 2 panely stejných rozměrů jako panely zkušební, tj. 400 x 400 x 100 mm. Oproti zkušebním panelům byl časový krok zaznamenávání teplot z termočlánků zkrácen z 15 sekund na 5 sekund.

Na každý panel bylo umístěno celkem 5 termočlánků. K teplotou namáhanému povrchu z vnější strany byly připevněny 2 termočlánky, 1 plášťový (T_p) a 1 kabelový (T_k). Dále byl jeden kabelový připevněn rovněž k ohřivanému povrchu panelu, nikoliv však z vnější strany, nýbrž byl veden skrz celou tloušťku panelu. Druhý kabelový termočlánek byl v hloubce 20 mm a třetí kabelový v hloubce 40 mm.

Zatímco zkušební panely byly zkoušeny po cca 4 týdnech od jejich výroby, tak následující panely byly zkoušeny po více než 3 měsících od jejich výroby. To mělo vliv zejména na množství vody v panelech (vlhkost), neboť panely měly čas vyschnout.

7.3.2 Panel z UHPC

V Tabulce 7 – 4 je uvedena přesná receptura betonové směsi, z které byly vyrobeny 2 panely z UHPC.

Tabulka 7 – 4 Receptura panelu z UHPC

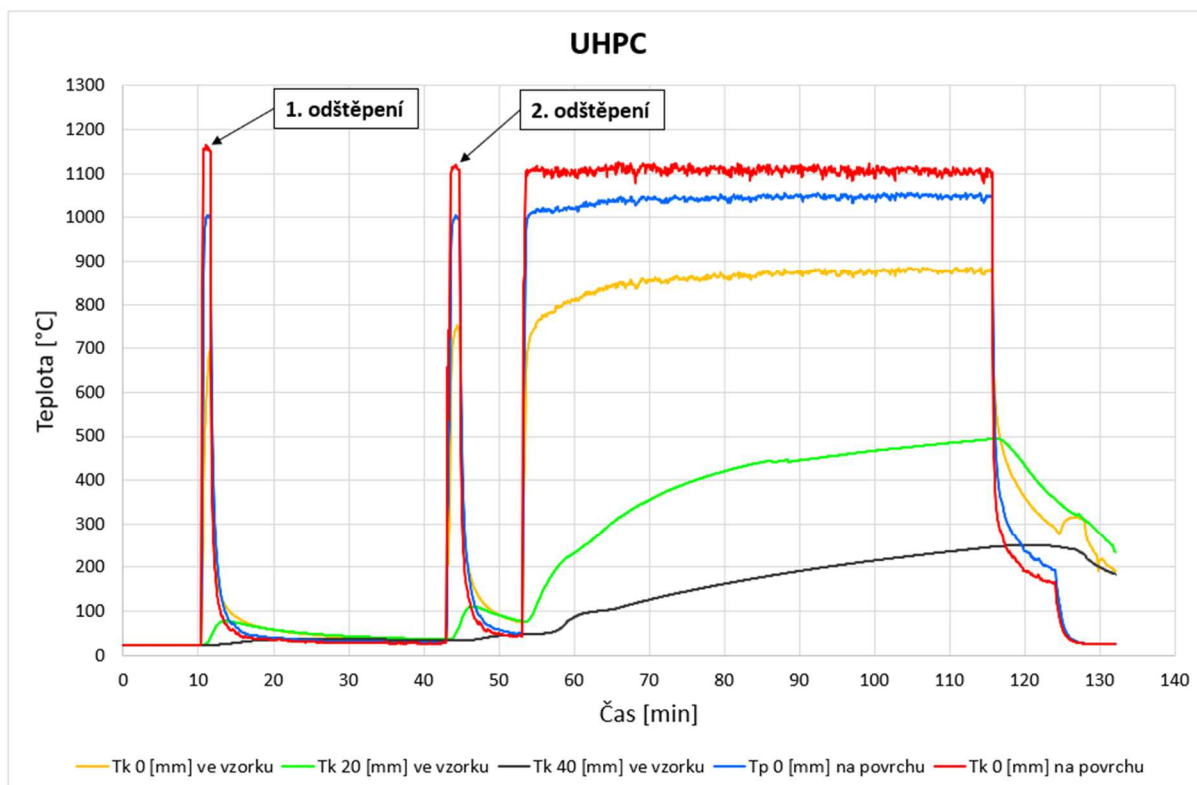
UHPC			kg·m ⁻³
	Cement	42,5 R	650
	Voda	Voda	190
	v/c	0,27	-
Kamenivo	Jemné	0 – 4	1645
	Střední	4 – 8	0
	Hrubé	8 – 16	0
	Plastifikátor	Stachement 787 0,75 %	26
	Mikrosilika	Stachesil S	80
			2 591



Oba panely byly den před zkouškou ponořeny do vody, aby byla částečně navracena vlhkost, která byla snížena z důvodu vysychání panelu. Vlivem nízké nasákavosti a permeability UHPC došlo k saturování pouze vrchních vrstev panelu. Celková saturace by trvala mnohem déle.

Předpoklad byl takový, že k odštěpování dojde ihned po vystavení panelu vysokým teplotám. Důvodem odštěpování budou pórové tlaky.

Následně byly panely opět vystaveny plynovému hořáku, který simuloval požár (požární scénář) dle tunelové teplotní křivky RABT/ZTV (viz Obr. 7 – 10 a 7 – 11).



Obrázek 7 – 15 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích v čase u panelu 1 z UHPC;

T_k – termočlánek kabelový a T_p – termočlánek plášťový

Na Obr. 7 – 15 lze vidět, že k odštěpování dle předpokladu skutečně došlo ihned po vystavení panelu vysokým teplotám. Po prvním a druhém odštěpení byl hořák na chvíli vypnut a byly zpracovány videozáznamy odštěpení. K třetímu odštěpení již nedošlo z několika důvodů. Prvním důvodem je odštěpení saturované vrchní vrstvy. Beton ve větší hloubce byl podstatně sušší, a proto se zde vliv pórových tlaků neprojevil. Druhým důvodem je možný vznik mikrotrhlin po prvním odštěpení, díky kterým se zvýšila permeabilita betonu a mohl uvolňovat pórový tlak.



a) Panel před zkouškou



b) Panel během zkoušky

Obrázek 7 – 16 Panel 1 z UHPC



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 17 Panel 1 z UHPC

Na Obr. 7 – 17 je možné vidět charakter poškození panelu po zkoušce. Lze vidět odštěpenou část panelu a vznik podélné trhliny, která je způsobena vlivem teplotní roztažnosti. Tato trhlina jednak uvolní napětí od teplotní roztažnosti, ale také umožní uvolnění pórových tlaků v trhlinou dotčených místech.



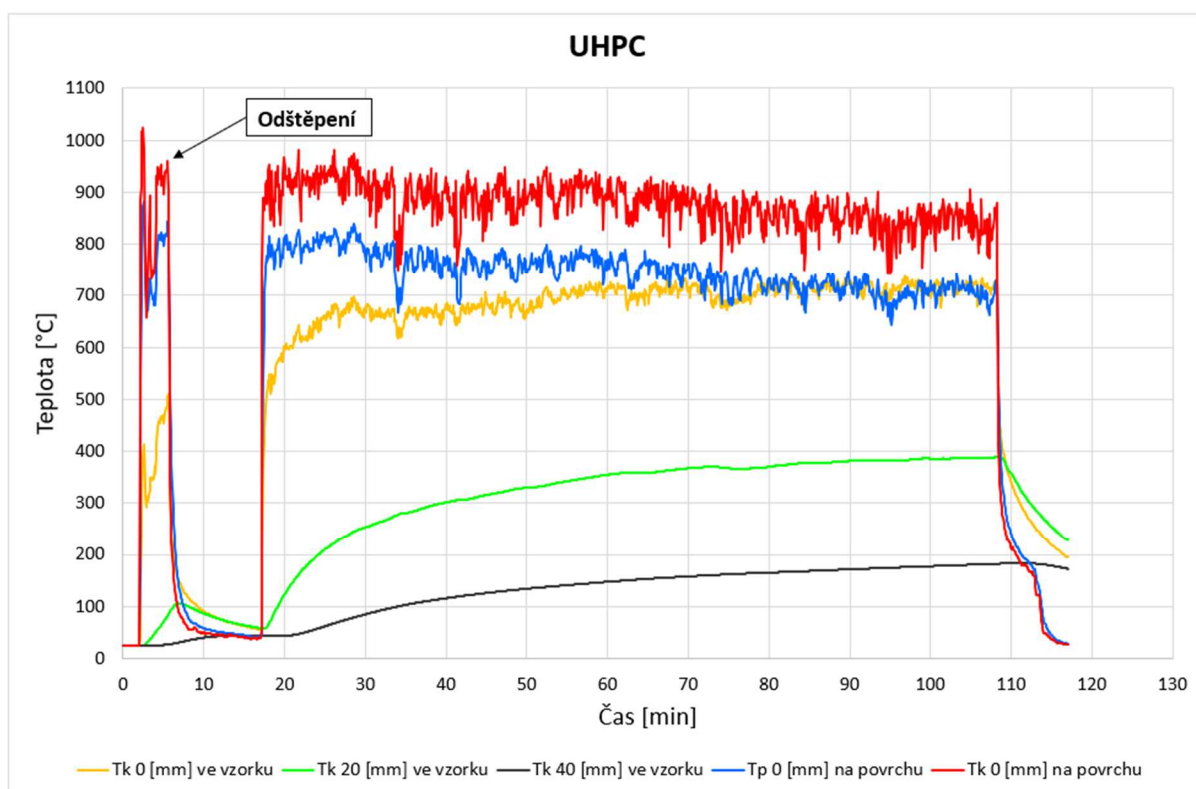
a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 18 Panel 1 z UHPC

Na Obr. 7 – 18 je možné vidět, že panel 1 z UHPC byl po zkoušce rozbit. Cílem bylo opticky analyzovat vlhkost panelu po průřezu. Na Obr. 7 – 18a si lze všimnout rozdílné barvy panelu v levé části a pravé části. V levé části je panel podstatně tmavší, tj. má vyšší vlhkost. V pravé části byl panel namáhán teplotou, proto zde má podstatně nižší vlhkost a je světlejší. Co se týče vlhkosti v levé části panelu, tak se nejedná pouze o vlhkost počáteční (před zkouškou), ale také o vlhkost, která jsem byla transportována při zahřívání (do chladnější oblasti panelu).

**Obrázek 7 – 19 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích v čase u panelu 2 z UHPC;**

T_k – termočlánek kabelový a T_p – termočlánek plášťový



Na Obr. 7 – 19 si lze všimnout, že k odštěpování došlo opět ihned po vystavení panelu vysokým teplotám. Po odštěpení byl opět hořák na chvíli vypnut a zpracován videozáznam.



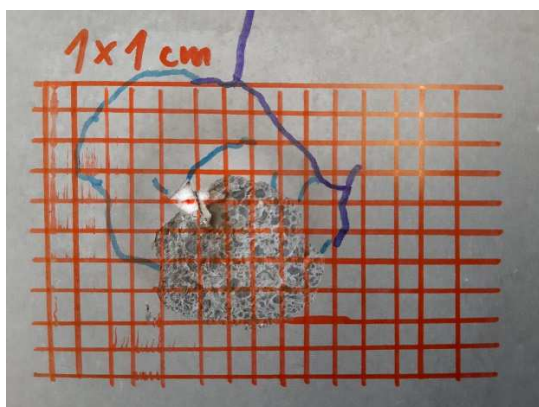
a) Panel po zkoušce



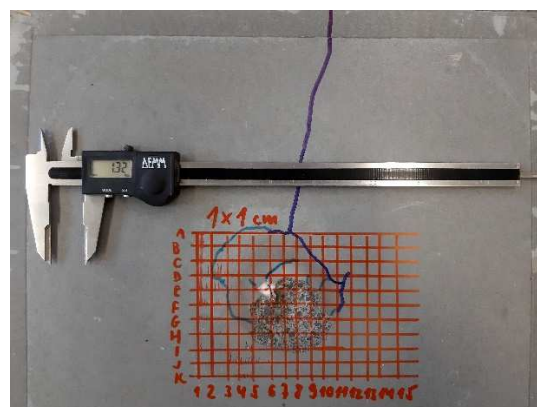
b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 20 Panel 2 z UHPC

Na Obr. 7 – 20 lze opět vidět charakter odštěpení a vznik příčné trhliny z důvodu teplotní roztažnosti. Následně byly zpracovány výsledky odštěpení, tj. hloubka, plocha a objem.



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 21 Panel 2 z UHPC

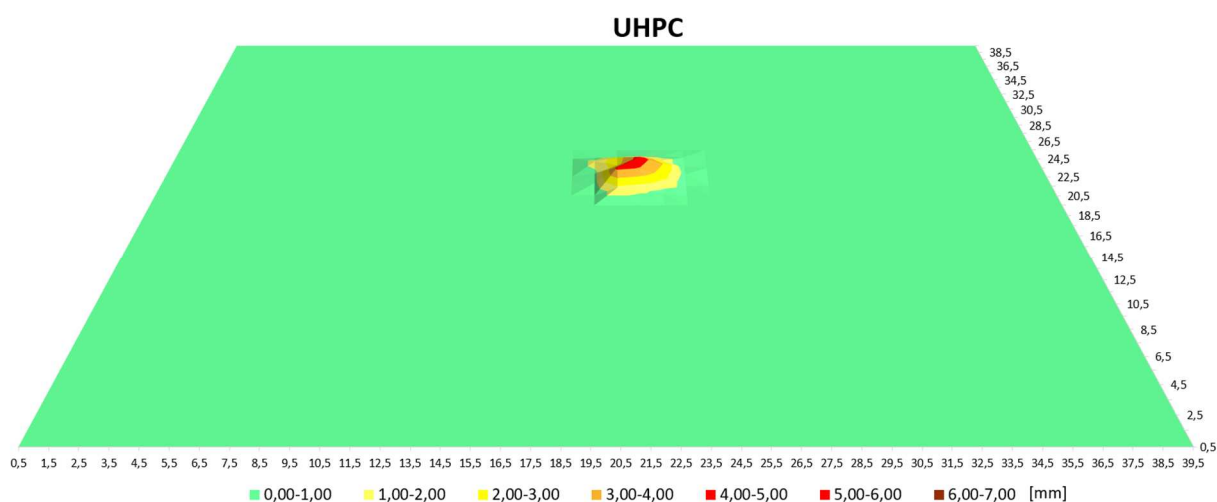
Na Obr. 7 – 21 je vidět rastr 1 x 1 cm, pomocí kterého bylo vyhodnoceno odštěpování. Dále také jsou na obrázku barevně zvýrazněny trhliny.



	A	B	C	D	E	F	G
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	1,85	1,30	0,55	0,00	0,00
3	0,00	0,65	4,31	3,90	2,43	0,10	0,00
4	0,00	0,75	2,66	4,58	3,04	0,60	0,00
5	0,00	1,45	2,39	2,28	1,68	0,27	0,00
6	0,00	0,19	0,19	0,69	0,54	0,31	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Obrázek 7 – 22 Hloubka odštěpení u panelu 2 z UHPC v milimetrech

Na Obr. 7 – 22 je zobrazen rastr s hloubkami odštěpení v milimetrech. Z důvodu větší přehlednosti je dále na Obr. 7 – 23 zobrazen 3D model celého panelu s taktěž hloubkami odštěpení.



Obrázek 7 – 23 Hloubka odštěpení u panelu 2 z UHPC v 3D modelu

Tabulka 7 – 5 Vyhodnocení výsledků odštěpení u panelu 2 z UHPC

Druh betonu	Předpoklad	Skutečnost	Čas [min]	Max. hloubka [mm]	Plocha [mm ²]	Objem odštěpení [mm ³]
UHPC	ano	ano	4	4,58	2300	3671

V Tabulce 7 – 5 jsou uvedeny výsledky odštěpení panelu 2 z UHPC. Plocha odštěpení a celkový objem odštěpené části panelu nebyl nikterak velký.

7.3.3 Panely z UHPC + AKU mezerovitého betonu

Dále byly zkoušeny sendvičové panely z UHPC + mezerovitý AKU (akustický, dále jen AKU) beton. Panel byl vyroben tak, že do formy byla nejprve dána směs mezerovitého betonu,



následovalo udusání, a poté byla na mezerovitý beton nalita směs UHPC. Následná vibrace byla provedena s oběma směsmi. Směs UHPC během vibrace nepronikla příliš hluboko do mezerovitého AKU betonu.

V Tabulce 7 – 6 je uvedena přesná receptura betonové směsi, z které byla vyrobena část panelů z UHPC. V Tabulce 7 – 7 je uvedena přesná receptura betonové směsi, z které byla vyrobena druhá část panelů, tj. mezerovitý AKU beton.

Tabulka 7 – 6 Receptura sendvičového mezerovitého panelu AKU + UHPC (část UHPC)

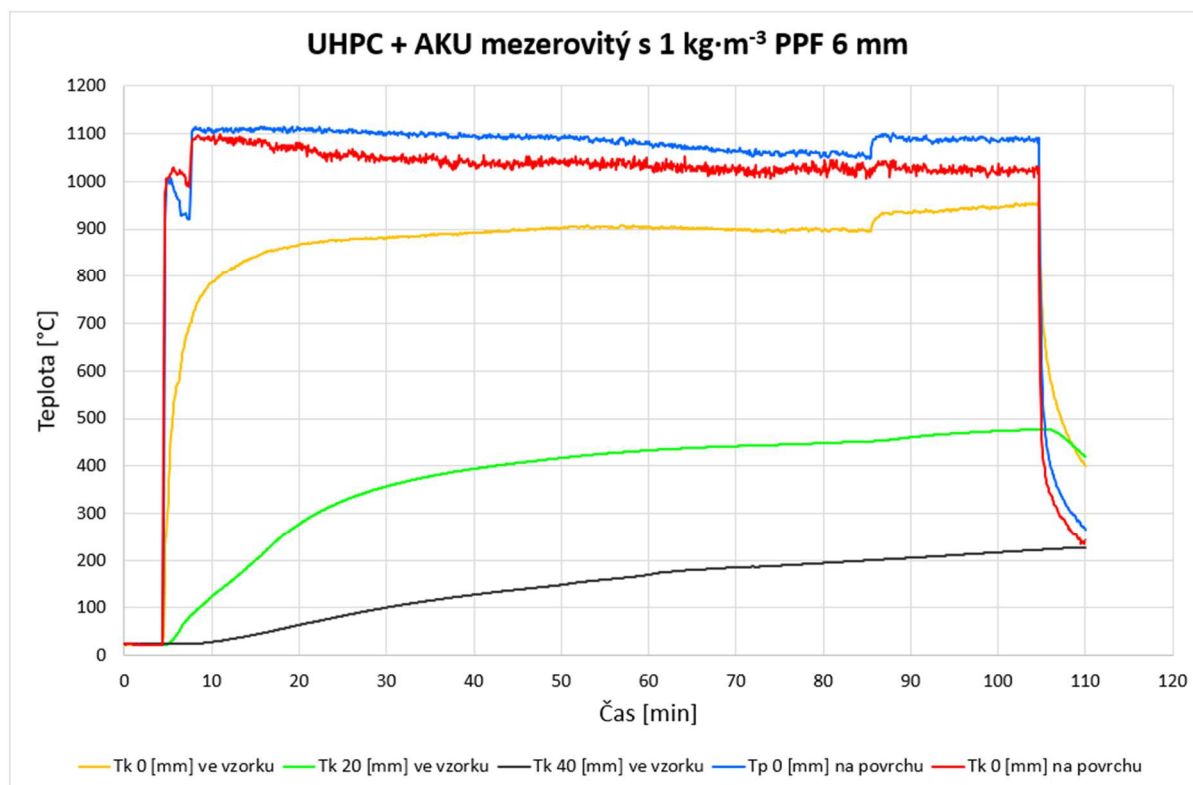
		UHPC	
			kg·m⁻³
	Cement	42,5 R	650
	Voda	Voda	190
	v/c	0,27	-
Kamenivo	Jemné	0 – 4	1645
	Střední	4 – 8	0
	Hrubé	8 – 16	0
	Plastifikátor	Stachement 787 0,75 %	26
	Mikrosilika	Stachesil S	80
			2 591



Tabulka 7 – 7 Receptura sendvičového mezerovitého panelu AKU + UHPC (část AKU)

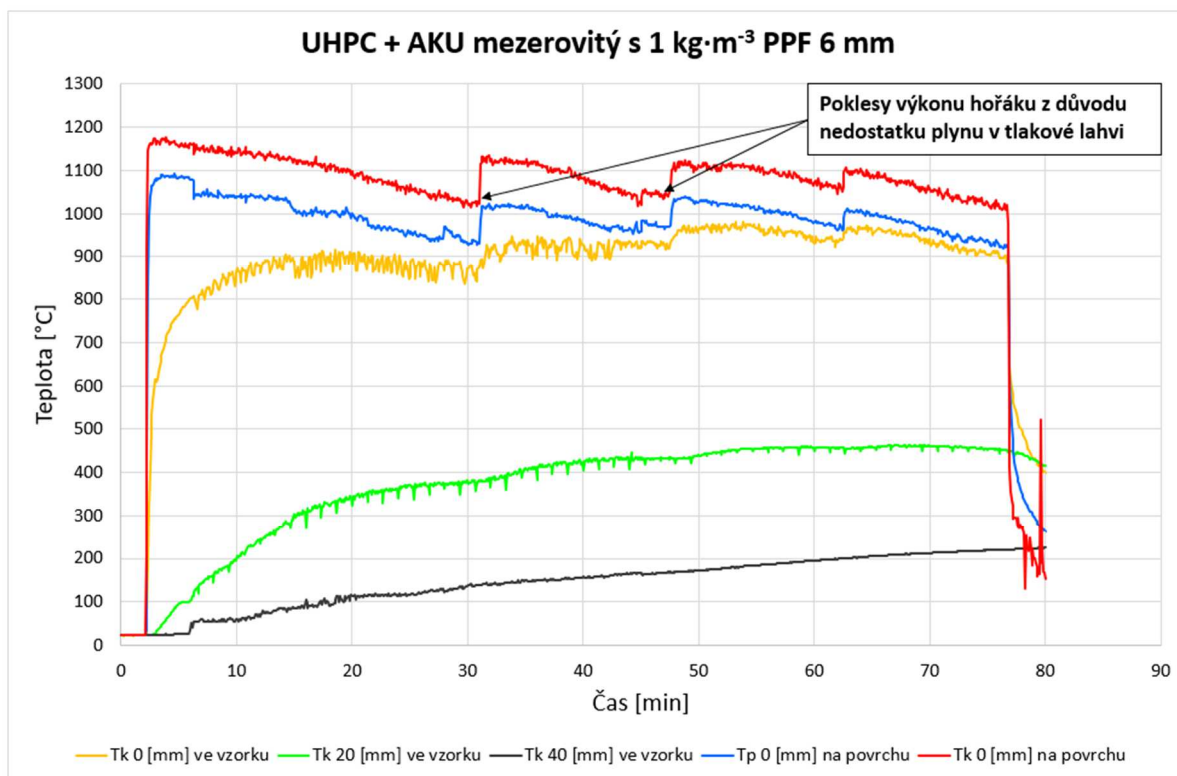
MEZEROVITÝ AKU			kg·m ⁻³
Kamenivo	Cement	42,5 R	340
	Voda	Voda	96
	v/c	0,22	-
	Jemné	0 – 4	0
	Střední	4 – 8	1940
	Hrubé	8 – 16	0
	Plastifikátor	Stachement 787 0,75 %	7
	Mikrosilika	Stachesil S	60
	PP vlákna	PP 6 mm	1

Následně byly panely opět vystaveny plynovému hořáku, který simuloval požár (požární scénář) dle teplotní tunelové křivky RABT/ZTV (viz Obr. 7 – 24 a 7 – 25).



Obrázek 7 – 24 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích v čase u panelu 1 z UHPC + AKU;

T_k – termočlánek kabelový a T_p – termočlánek plášťový



Obrázek 7 – 25 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích v čase u panelu 2 z UHPC + AKU;

T_k – termočlánek kabelový a T_p – termočlánek plášťový



a) Panel před zkouškou



b) Panel během zkoušky

Obrázek 7 – 26 Sendvičový panel z UHPC a mezerovitého AKU betonu

Předpoklad byl takový, že k odštěpování u panelu nedojde. Prvním důvodem je, že přímo ohříváný je AKU beton, nikoliv UHPC. AKU beton má otevřenou pórovitost a je provzdušněný. To je důvod, proč nedojde k odštěpování v důsledku vlivu pórových tlaků. Mezery způsobí, že se pára může uvolňovat, tj. beton má vysokou permeabilitu. Spodní vrstva panelu z UHPC má předpoklady k odštěpování, avšak AKU beton na povrchu působí jako funkční ochranná vrstva,



kteřá pohlcuje lokální vysoký tepelný tok a zpomaluje prohřívání UHPC. AKU beton má totiž výrazně nižší součinitel tepelné vodivosti, a tím zpomaluje prohřívání UHPC.

Panely byly 1 den před zkouškou ponořeny do vody (viz Obr. 7 – 26a). Cílem ponoření nebylo saturovat AKU beton, nýbrž povrch UHPC a zvýšit tím pravděpodobnost odštěpování u UHPC. Motivací bylo sledovat možné odštěpení UHPC pod AKU betonem a charakter porušení. Pokud by k odštěpování u UHPC došlo, tak zda by energie odštěpování byla natolik vysoká, že spolu s UHPC dojde k odštěpení AKU betonu na povrchu, tj. k odmrštění vrstvy nad UHPC.



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 27 Sendvičový panel z UHPC a mezerovitého AKU betonu

Obr. 7 – 27a znázorňuje fakt, že k odštěpování dle předpokladu skutečně nedošlo. Respektive došlo k odštěpení pouze tenké vrstvy (slupky) na povrchu AKU betonu, která vznikla při betonáži. Jednalo se o cementové mléko s nízkou permeabilitou.



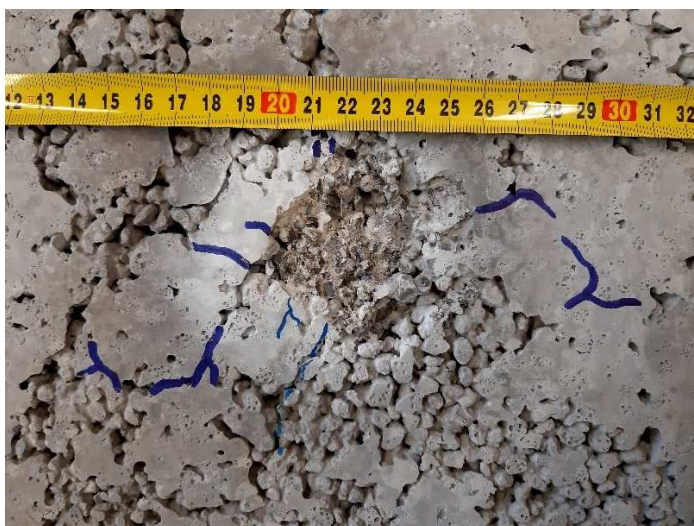
a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 28 Sendvičový panel z UHPC a mezerovitého AKU betonu

Obr. 7 – 27b, 7 – 28a a 7 – 28b zobrazují opět vznik příčné trhliny vlivem teplotní roztažnosti a vlivem deformace od nerovnoměrného ohřívání panelu.



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 29 Sendvičový panel z UHPC a mezerovitého AKU betonu

Na Obr. 7 – 29a jsou barevně vyznačeny trhliny vzniklé v místě teplotního namáhání a na Obr. 7 – 29b je vyznačena příčná trhlina vzniklá vlivem teplotní roztažnosti.



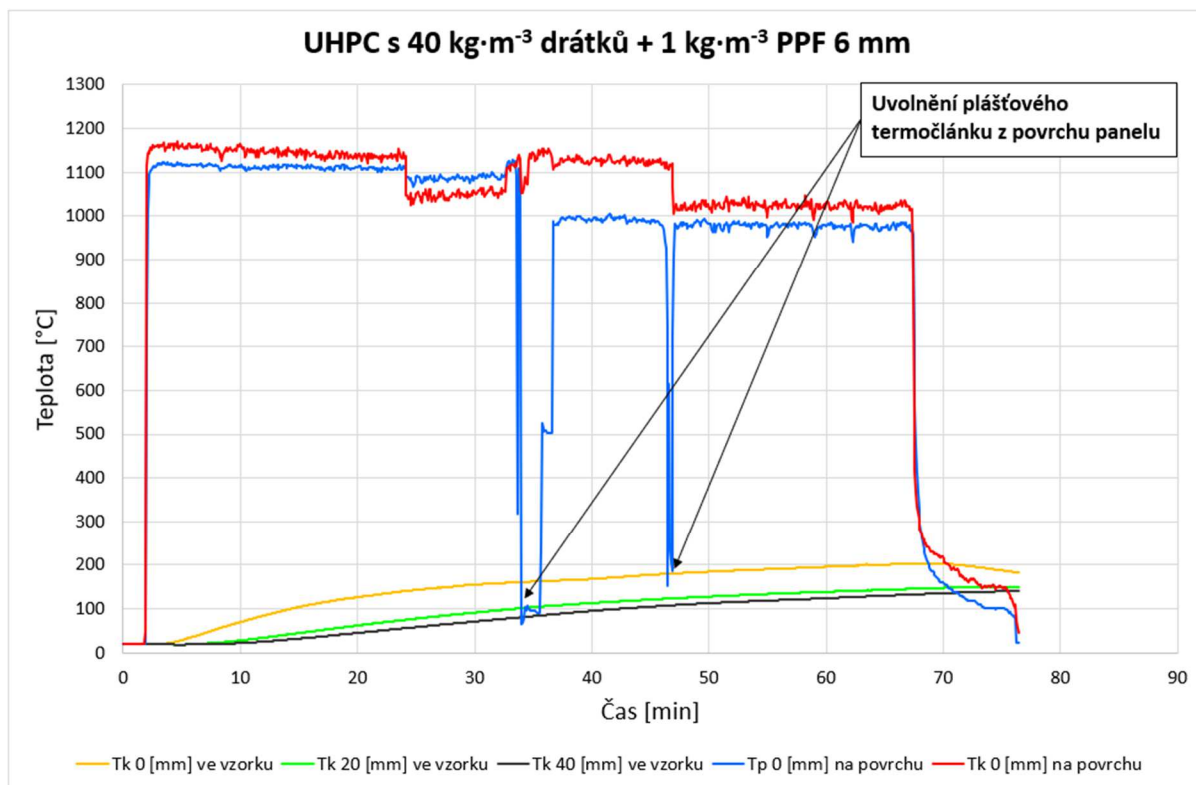
7.3.4 UHPC s drátky a polypropylenovými vlákny

V Tabulce 7 – 8 je uvedena receptura betonové směsi, z které byly vyrobeny 2 panely z UHPC s drátky a polypropylenovými vlákny (PPF). Z důvodu zpracovatelnosti betonové směsi bylo u této receptury navýšeno množství vody o $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, tj. z $190 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ původních na $200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Důvodem potřebného navýšení množství vody je právě výskyt polypropylenových vláken. Vlákna totiž navážou podstatné množství vody na sebe a betonová směs je sušší. Jedná se o tzv. stěnový efekt.

Tabulka 7 – 8 Receptura panelu z UHPC s drátky a PPF

UHPC s drátky a PPF			$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
	Cement	42,5 R	650
	Voda	Voda	200
	v/c	0,27	-
Kamenivo	Jemné	0 – 4	1645
	Střední	4 – 8	0
	Hrubé	8 – 16	0
	Drátky	-	40
	Plastifikátor	Stachement 787 0,75 %	26
	Mikrosilika	Stachesil S	80
	PP vlákna	PP 6 mm	1
			2 642

Předpoklad byl, že k odštěpování nedojde právě z důvodu výskytu polypropylenových vláken.



Obrázek 7 – 30 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích v čase u panelu 1 z UHPC s drátky a PPF;

T_k – termočlánek kabelový a T_p – termočlánek plášťový

Na Obr. 7 – 30 lze vidět, že v průběhu zkoušky došlo k uvolnění plášťového termočláčku z povrchu panelu.



a) Panel před zkouškou



b) Panel během zkoušky

Obrázek 7 – 31 Panel 1 z UHPC s drátky a PPF



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 32 Panel 1 z UHPC s drátky a PPF

Na Obr. 7 – 32 lze vidět drobné odštěpení betonu z povrchu panelu. Jedná se odštěpení pouze povrchové, nikoliv do hloubky. K tomuto drobnému odštěpení došlo i přes to, že se v panelu vyskytují polypropylenová vlákna, a to z několika důvodů. Podstatnou roli zde hraje nehomogenita materiálu.

Prvním důvodem je rozdílná teplotní roztažnost mezi kamenivem a cementovou pastou. Tím pádem dojde při vystavení vysokým teplotám k nesoudržnosti mezi těmito složkami. Druhým důvodem je nižší permeabilita cementového mléka. Třetím důvodem je, že se jedná o dno formy, ve které byl panel vyroben. Panel je na této straně dokonale hladký a téměř bez pórů. Dalším důvodem je nedokonalé a nerovnoměrné rozprostření polypropylenových vláken v panelu. To zapříčiní, že vlákna při rychlém nárůstu teploty veškeré tlaky nepohltí. V tomto případě je tedy odštěpení způsobené kombinací teplotní roztažnosti a pórových tlaků.



a) Panel po zkoušce



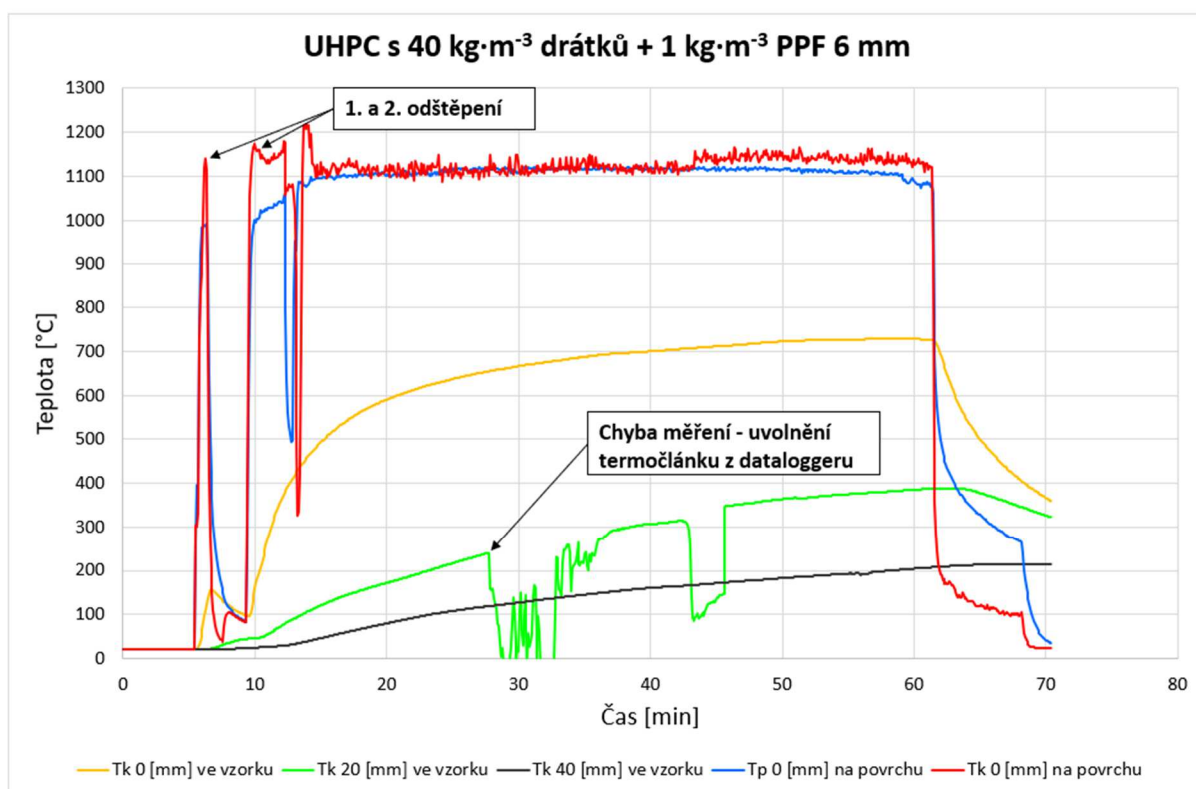
b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 33 Panel 1 z UHPC s drátky a PPF



Na Obr. 7 – 33a lze opět vidět příčnou trhlinu vzniklou z důvodu teplotní roztažnosti a na Obr. 7 – 33b jsou barevně zobrazeny všechny trhliny, tj. trhliny vzniklé v místě teplotního namáhání a příčné trhliny.

Druhý panel této receptury se od toho prvního liší tím, že byl den před zkouškou ponořen do vody. Důvodem bylo saturovat vrchní vrstvu panelu a následně sledovat, zda se průběh a výsledky zkoušky liší oproti panelu prvnímu. Předpoklad byl takový, že neprodleně po vystavení panelu vysoké teplotě dojde k mírnému odštěpení povrchové vrstvy panelu z důvodu pórových tlaků.



Obrázek 7 – 34 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích v čase u panelu 2 z UHPC s drátky a PPF;

T_k – termočlánek kabelový a T_p – termočlánek plášťový

Na Obr. 7 – 34 je možné vidět, že došlo k odštěpení prakticky ihned po vystavení panelu vysoké teplotě. Vždy po odštěpení byl hořák na chvíli vypnut a byly zpracovávány videozáznamy odštěpení. Při zkoušce došlo k chybě měření, respektive zaznamenávání teplot, u kabelového termočlánku v hloubce 20 mm. Důvodem byl špatný kontakt termočlánku s dataloggerem.



a) Panel před zkouškou



b) Panel po zkoušce

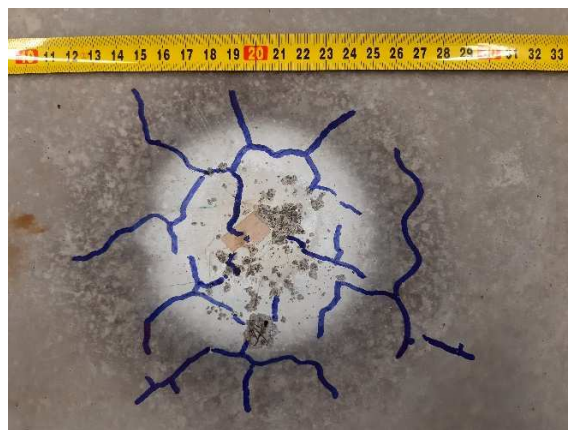
Obrázek 7 – 35 Panel 2 z UHPC s drátky a PPF

Na Obr. 7 – 35a je možné vidět rozdílnou barvu panelu oproti panelu na Obr. 7 – 31a. Důvodem je rozdílná vlhkost na povrchu, neboť panel na Obr. 7 – 35a byl den před zkouškou ponořen do vody.

Obr. 7 – 35b zobrazuje charakter odštěpení. Byl potvrzen předpoklad, že k odštěpení dojde neprodleně po vystavení panelu vysoké teplotě. Důvodem byly právě vzniklé pórové tlaky ve vysoce saturované vrstvě panelu. Vysoké množství vlhkosti a rychlost vzniku pórových tlaků zapříčinilo povrchové odštěpení i přes to, že se v panelu vyskytovala polypropylenová vlákna.



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 36 Panel 2 z UHPC s drátky a PPF

Na Obr. 7 – 36 jsou barevně zobrazeny vzniklé trhliny v místě teplotního namáhání. Hloubka, plocha a objem odštěpení nebyly na tomto panelu vzhledem k velikosti odštěpení více vyhodnocovány.



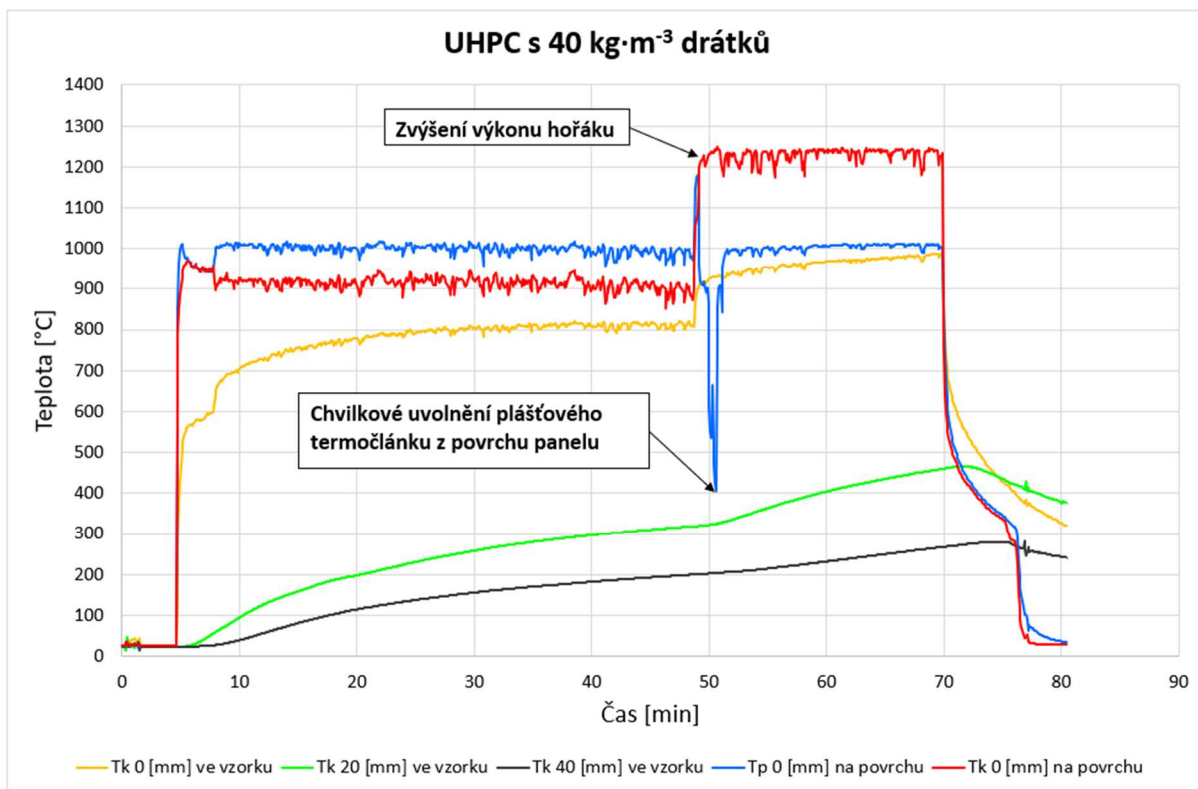
7.3.5 UHPC s drátky

V Tabulce 7 – 9 je uvedena receptura betonové směsi, z které byly vyrobeny 2 panely z UHPC s drátky.

Tabulka 7 – 9 Receptura panelu z UHPC s drátky

UHPC s drátky			
			kg·m ⁻³
	Cement	42,5 R	650
	Voda	Voda	190
	v/c	0,27	-
Kamenivo	Jemné	0 – 4	1645
	Střední	4 – 8	0
	Hrubé	8 – 16	0
	Drátky	-	40
	Plastifikátor	Stachement 787 0,75 %	26
	Mikrosilika	Stachesil S	80
	PP vlákna	PP 6 mm	0
			2 631

Předpoklad byl takový, že k odštěpování dojde.



Obrázek 7 – 37 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích v čase u panelu 1 z UHPC s drátky;

T_k – termočlánek kabelový a T_p – termočlánek plášťový

Na Obr. 7 – 37 lze vidět, že během zahřívání došlo k chvilkovému uvolnění plášťového termočláčku z povrchu panelu. Po cca 45 minutách byl zvýšen výkon hořáku tak, aby bylo dosaženo povrchových teplot větších než 1200 °C.



a) Panel před zkouškou



b) Panel během zkoušky

Obrázek 7 – 38 Panel 1 z UHPC s drátky



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 39 Panel 1 z UHPC s drátky

a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 40 Panel 1 z UHPC s drátky

Z Obr. 7 – 39 a 7 – 40 je patrné, že k povrchovému explozivnímu odštěpování sice nedošlo, ale došlo k oddělení poměrně velké části panelu. Důvodem byly pórové tlaky. Následně byl panel rozříznut na 2 části, aby bylo možné stanovit přibližnou hloubku a charakter onoho oddělení. K úplnému odpadnutí oddělené části však nedošlo, a to z důvodu přítomnosti drátků, které oddělenou část držely.



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 41 Panel 1 z UHPC s drátky

Na Obr. 7 – 41 jsou barevně zvýrazněny trhliny. Toto zvýrazňování proběhlo cca 2 měsíce po zkoušení, tj. když byl panel už chladný. Lze si všimnout rozdílu na Obr. 7 – 41 oproti Obr. 7 – 39 a 7 – 40. Rozdíl spočívá v otevřenosti trhlin. Zatímco na Obr. 7 – 39 a 7 – 40 jsou trhliny dobře vidět i bez barevného zvýraznění, tak na Obr. 7 – 41 by byly bez zvýraznění vidět podstatně hůře. Důvodem je teplotní roztažnost betonu. Zatímco panel na Obr. 7 – 39 a 7 – 40 je vyfotografován ihned po zkoušce, tak panel na Obr. 7 – 41 je vyfotografován už chladný. Malé trhliny se během chladnutí opět uzavřely. Nepochybně se zmenšila také trhlina hloubková, která je zobrazena na Obr. 7 – 42.



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

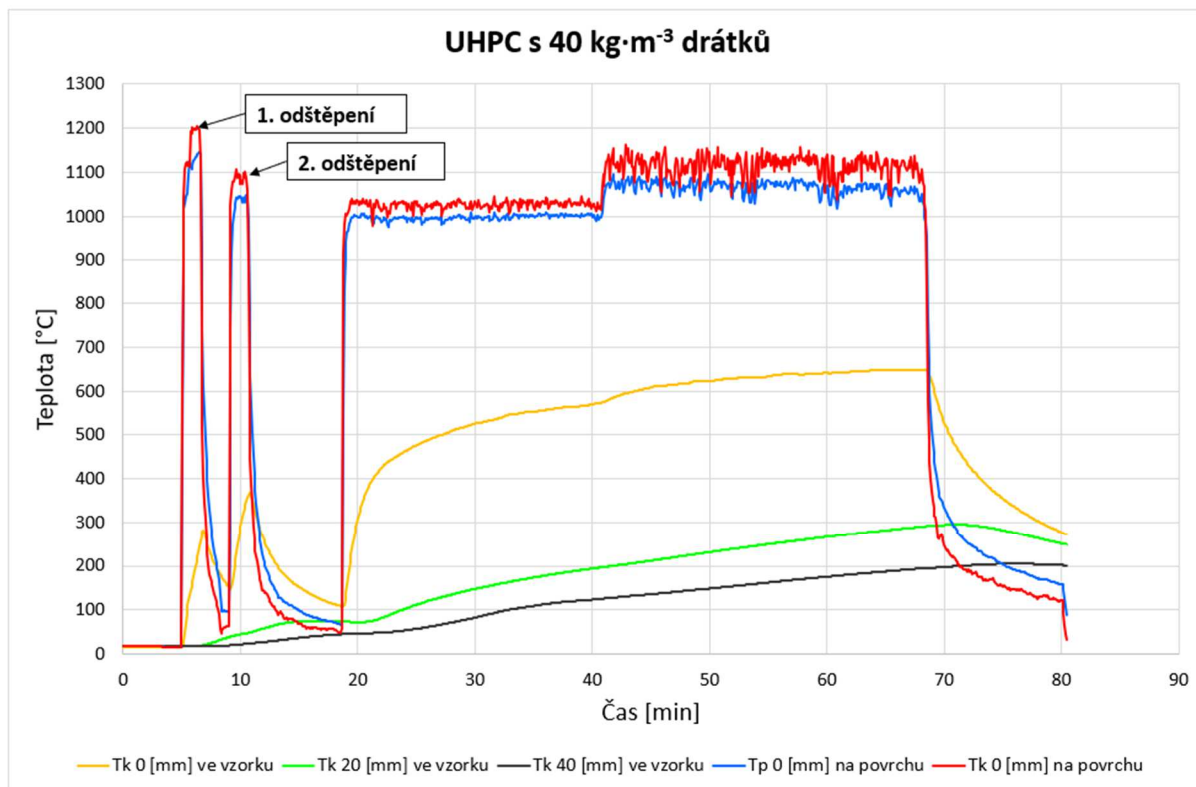
Obrázek 7 – 42 Panel 1 z UHPC s drátky

Na Obr. 7 – 42 je zobrazena hloubková trhlina. Lze vidět charakter porušení panelu, tj. že nedošlo k povrchovému explozivnímu odštěpení, ale právě k hloubkovému oddělení velké části panelu.

Stejně tak jako při předchozí receptuře byl druhý panel den před zkouškou ponořen do vody. Důvodem opět bylo saturovat vrchní vrstvu panelu a následně sledovat, zda se průběh a výsledky zkoušky liší oproti panelu prvnímu. Předpoklad byl takový, že neprodleně po



vystavení panelu vysoké teplotě dojde k odštěpení povrchové vrstvy panelu z důvodu pórových tlaků. Vzhledem k absenci polypropylenových vláken je předpoklad takový, že odštěpování bude intenzivnější oproti předchozí receptuře, tj. UHPC s drátky a PPF.



Obrázek 7 – 43 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích v čase u panelu 2 z UHPC s drátky;

T_k – termočlánek kabelový a T_p – termočlánek plášťový

Z Obr. 7 – 43 je patrné, že k odštěpování skutečně došlo ihned po vystavení panelu vysokým teplotám. Po prvním odštěpení byl hořák vypnut a byly zpracovány videozáznamy odštěpení. Po opětovném zahájení zahřívání došlo znovu k odštěpení a následnému přerušení zahřívání. Potřetí už k odštěpování nedošlo, a to z několika důvodů.

Prvním důvodem je porušení hladkého (téměř bezpórovitého) povrchu panelu. Po odštěpení totiž plamen ohříval již poškozený povrch, kterým již mohla pára unikat, tj. lokálně se zvýšila permeabilita materiálu. Druhým důvodem je to, že odštěpil vrchní saturovaný beton a následně byl zahříván již beton s podstatně nižší vlhkostí. Třetím důvodem je pravděpodobný vznik mikrotrhlin a trhlin z důvodu předchozích odštěpení. Tím se opět zvýšila permeabilita materiálu.



a) Panel před zkouškou



b) Panel během zkoušky

Obrázek 7 – 44 Panel 2 z UHPC s drátky

Na Obr. 7 – 44a je možné opět vidět rozdílnou barvu panelu oproti panelu na Obr. 7 – 38a. Důvodem je rozdílná vlhkost na povrchu, neboť panel na Obr. 7 – 44a byl den před zkouškou ponořen do vody.



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 45 Panel 2 z UHPC s drátky

Obr. 7 – 45 zobrazuje charakter a rozsah odštěpení a vznik trhlin v místě teplotního namáhání.



a) Panel po zkoušce



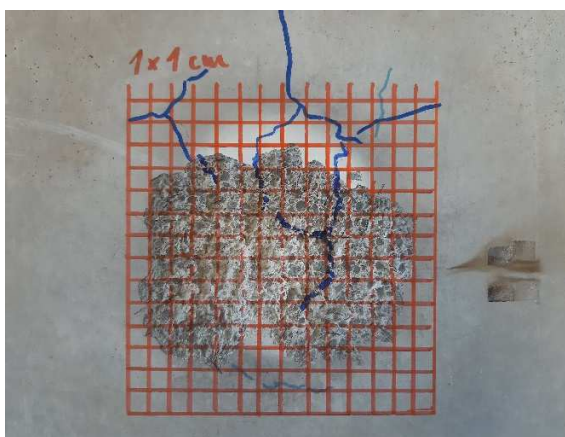
b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 46 Panel 2 z UHPC s drátky

Na Obr. 7 – 46a je možné opět vidět vznik příčné trhliny a na Obr. 7 – 46b vznik podélné trhliny z důvodu teplotní roztažnosti.



a) Rastr 1 x 1 cm



b) Rastr 1 x 1 cm

Obrázek 7 – 47 Panel 2 z UHPC s drátky

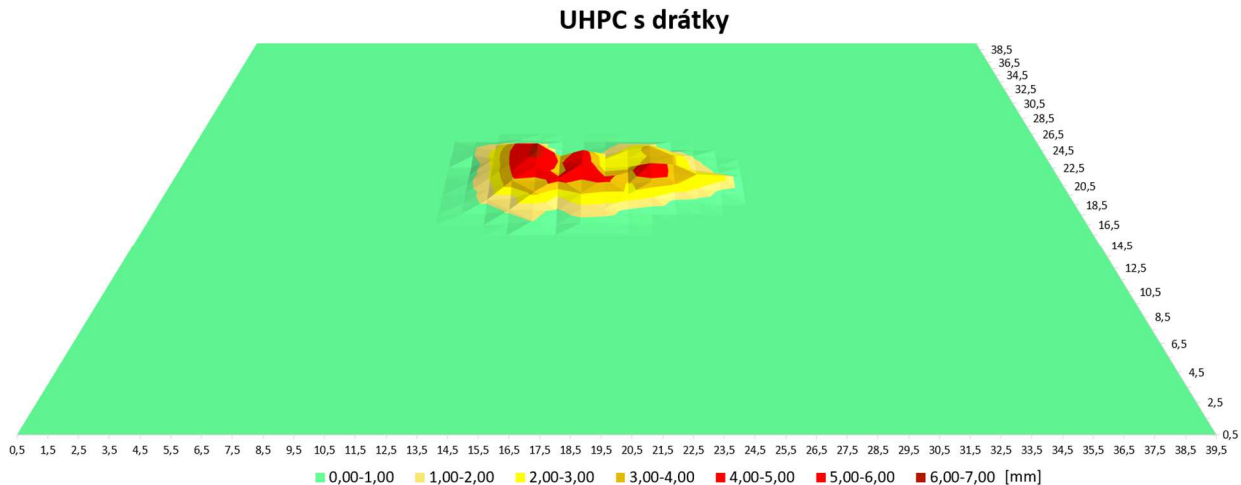
Na Obr. 7 – 47 je možné vidět rastr 1 x 1 cm. Rastr slouží k určení přibližné plochy, na které došlo k odštěpování. Na Obr. 7 – 48 je zobrazen rastr s hodnotami hloubky odštěpení v milimetrech. Dále jsou na Obr. 7 – 47 barevně zobrazeny trhliny.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,20	1,04	0,00	0,61	0,52	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,23	0,21	1,24	1,29	0,76	1,71	1,57	0,64	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,50	1,30	1,50	3,38	1,80	3,10	2,73	2,69	2,06	0,70	0,50	0,00	0,00
5	0,00	0,50	1,51	3,86	3,57	4,46	3,96	4,39	2,85	3,61	3,16	2,12	0,67	0,00
6	0,00	0,68	2,11	4,23	5,16	3,25	5,80	3,30	3,52	5,95	3,37	3,01	2,69	0,00
7	0,00	0,37	2,09	4,52	6,71	3,78	5,02	2,37	2,53	3,43	3,23	1,57	0,85	0,00
8	0,00	0,03	2,39	4,57	6,49	3,08	4,73	2,31	2,39	3,11	3,21	1,34	0,29	0,00
9	0,00	0,91	2,25	4,18	3,46	0,12	0,24	1,26	2,36	3,39	1,67	0,77	0,00	0,00
10	0,00	0,89	1,39	1,33	1,53	0,00	0,00	0,74	1,53	1,46	0,10	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,51	0,21	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Obrázek 7 – 48 Hloubka odštěpení u panelu 2 z UHPC s drátky v milimetrech

Z důvodu větší přehlednosti je na Obr. 7 – 49 zobrazen 3D model celého panelu s hloubkami odštěpení.



Obrázek 7 – 49 Hloubka odštěpení u panelu 2 z UHPC s drátky na 3D modelu

Tabulka 7 – 10 Vyhodnocení výsledků odštěpení u panelu 2 z UHPC s drátky

Druh betonu	Předpoklad	Skutečnost	Čas [min]	Max. hloubka [mm]	Plocha [mm ²]	Objem odštěpení [mm ³]
UHPC s drátky	ano	ano	1	6,71	9500	20914



V Tabulce 7 – 10 jsou uvedeny výsledky odštěpení panelu z UHPC s drátky. Plocha odštěpení a celkový objem odštěpené části panelu je podstatně vyšší než u panelu z UHPC.

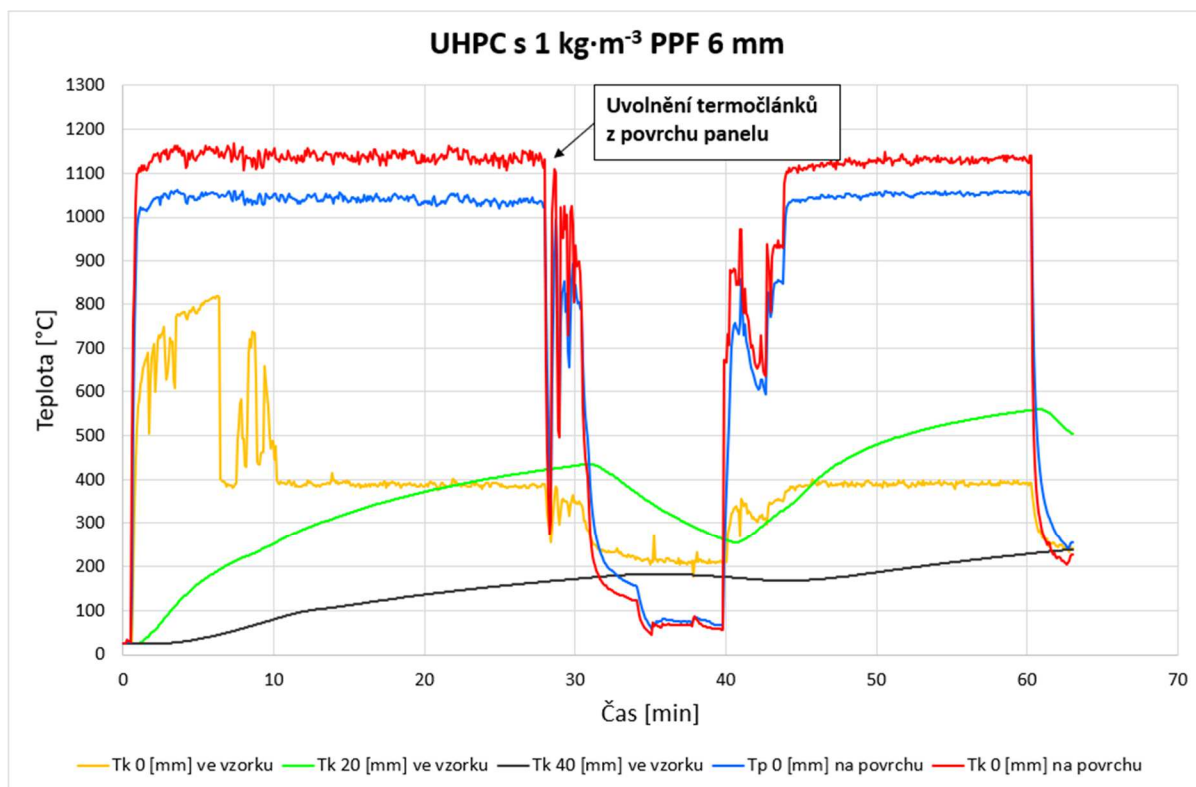
7.3.6 UHPC s polypropylenovými vlákny (PPF)

V Tabulce 7 – 11 je uvedena receptura betonové směsi, z které byly vyrobeny 2 panely z UHPC s polypropylenovými vlákny. Z důvodu zpracovatelnosti betonové směsi bylo opět přidáno 10 kg·m⁻³ vody, tj. původně 190 kg·m⁻³ a nyní 200 kg·m⁻³.

Tabulka 7 – 11 Receptura panelu z UHPC s PPF

UHPC s PPF			
			kg·m ⁻³
	Cement	42,5 R	650
	Voda	Voda	200
	v/c	0,27	-
Kamenivo	Jemné	0 – 4	1645
	Střední	4 – 8	0
	Hrubé	8 – 16	0
	Plastifikátor	Stachement 787 0,75 %	26
	Mikrosilika	Stachesil S	80
	PP vlákna	PP 6 mm	1
			2 602

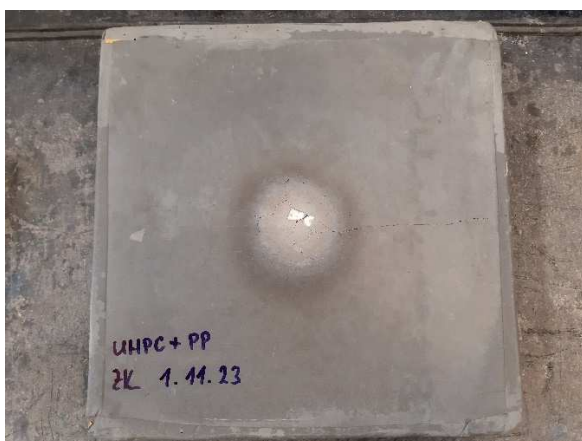
Předpoklad byl takový, že k odštěpování nedojde. Důvodem je přítomnost polypropylenových vláken.



Obrázek 7 – 50 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích v čase u panelu 1 z UHPC s PPF;

T_k – termočlánek kabelový a T_p – termočlánek plášťový

Na Obr. 7 – 50 lze vidět, že v cca 30. minutě došlo k uvolnění obou povrchových termočlánků a zahřívání bylo na cca 10 minut přerušeno.



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 51 Panel 1 z UHPC s PPF

Z Obr. 7 – 51 je patrné, že k odštěpování skutečně nedošlo. Na Obr. 7 – 51b lze vidět velké množství trhlin v místě teplotního namáhání.



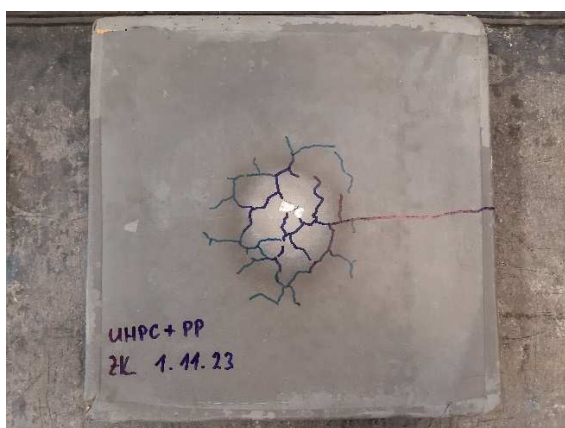
a) Panel po zkoušce



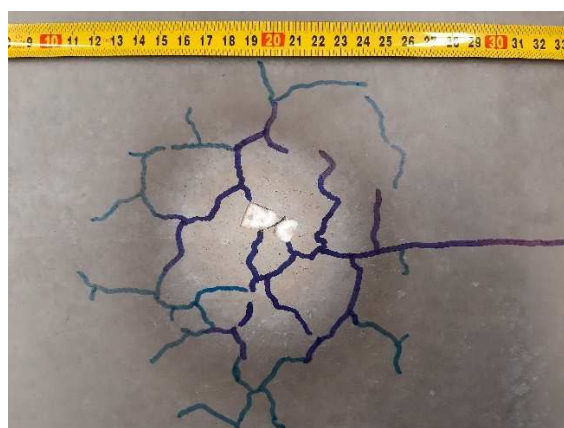
b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 52 Panel 1 z UHPC s PPF

Z Obr. 7 – 52 je patrné, že opět došlo ke vzniku podélné trhliny, která je zapříčiněna teplotní roztažností betonu.



a) Panel po zkoušce



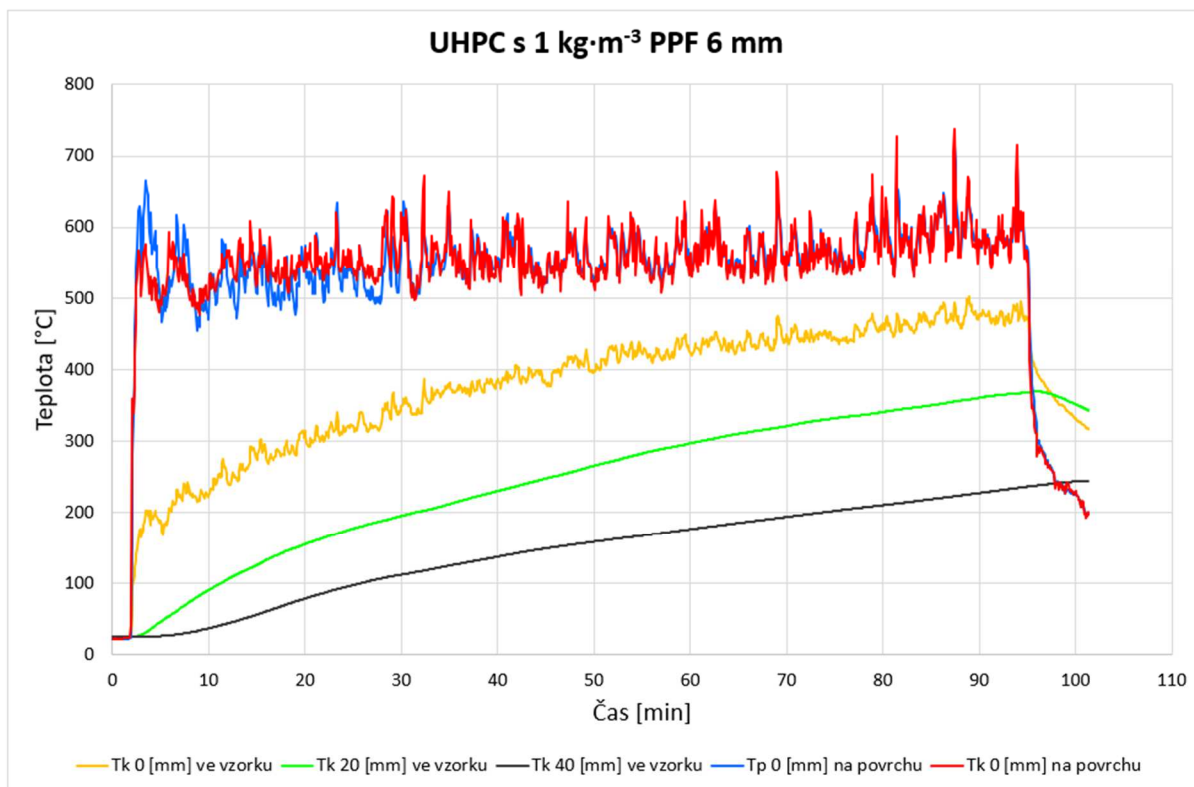
b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 53 Panel 1 z UHPC s PPF

Na Obr. 7 – 53 jsou opět barevně zvýrazněny trhliny.

Druhý panel této receptury se od všech doposud zkoušených panelů liší ve způsobu nahřívání, respektive teplotního namáhání. Zatímco doposud byly panely namáhány lokálně hořákem a jednalo se čistě o 3D vedení tepla v panelu, tak následující panel byl namáhán více plošně a nebylo dosahováno tak vysokých teplot na povrchu panelu. Došlo k odklonění od tunelové teplotní křivky.

Snahou bylo zahřívát panel rovnoměrně po celém ohřivaném povrchu, a tudíž docílit 1D vedení tepla v panelu. V důsledku tohoto zahřívání byl předpoklad, že vliv teplotní roztažnosti na povrchu panelu bude působit všude stejně, a tudíž se panel bude moci volně roztahovat. Bude tak omezen vliv teplotní roztažnosti ve smyslu 3D vedení tepla v panelu. Motivací bylo, aby nedošlo ke vzniku podélných nebo příčných trhlin a tím k uvolnění vzniklého napětí.



Obrázek 7 – 54 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích v čase u panelu 2 z UHPC s PPF;

T_k – termočlánek kabelový a T_p – termočlánek plášťový

Na Obr. 7 – 54 lze vidět, že při tomto teplotním namáhání nebylo dosahováno tak vysokých teplot, jako u panelů předchozích. Zatímco u předchozích panelů se povrchová teplota pohybovala mezi 1000 °C – 1200 °C , tak nyní se pohybuje okolo 600 °C .



a) Panel před zkouškou



b) Panel před zkouškou

Obrázek 7 – 55 Panel 2 z UHPC s PPF

Na Obr. 7 – 55 je možné vidět způsob namáhání panelu teplotou. Hořák, který má podstatně větší plochu oproti hořáku předchozímu, se nachází pod panelem.



a) Panel během zkoušky



b) Panel během zkoušky

Obrázek 7 – 56 Panel 2 z UHPC s PPF

Na Obr. 7 – 56b si lze všimnout vlhkého povrchu panelu během zahřívání. Tato vlhkost je způsobena transportem vlhkosti v panelu během zahřívání a následnou kondenzací vlhkosti na mnohem chladnějším povrchu panelu. Během zahřívání došlo k ohřátí celého panelu na tak vysokou teplotu, že vlhkost na povrchu už nekondenzovala, ale vypařovala se. Proto tato na obrázku viditelná vlhkost postupem času zmizela.



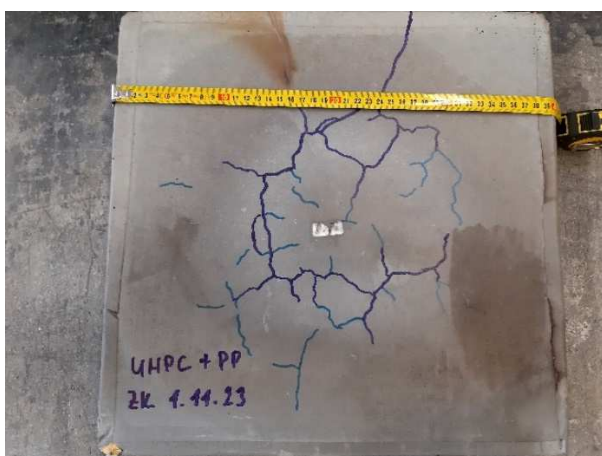
a) Panel během zkoušky



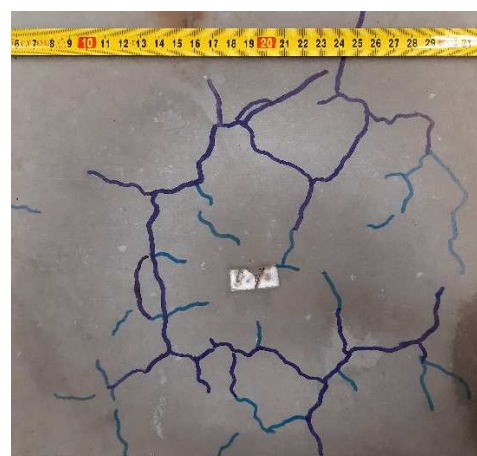
b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 57 Panel 2 z UHPC s PPF

Na Obr. 7 – 57a si lze také na povrchu panelu všimnout vlhkosti. Důvod je podobný jako u Obr. 7 – 56b. Rozdílem je akorát to, že vlhkost na Obr. 7 – 57a nekondenzuje na povrchu jako takovém, ale vytéká v místě zavedení termočláneků do panelu. Okolí termočláneků totiž není dokonale utěsněné betonem, a tudíž tam je opět výrazně chladnější prostředí z důvodu ochlazování vzduchem.



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 58 Panel 2 z UHPC s PPF

Na Obr. 7 – 58 jsou barevně vyznačeny trhliny. Oproti lokálnímu zahřívání si lze všimnout rozdílu v umístění trhlín. Pozice trhlín kopírují místa, kde působil největší tepelný tok. Lze si všimnout světlého kruhu okolo středu, což odpovídá tvaru hořáku.

7.3.7 C 30/37

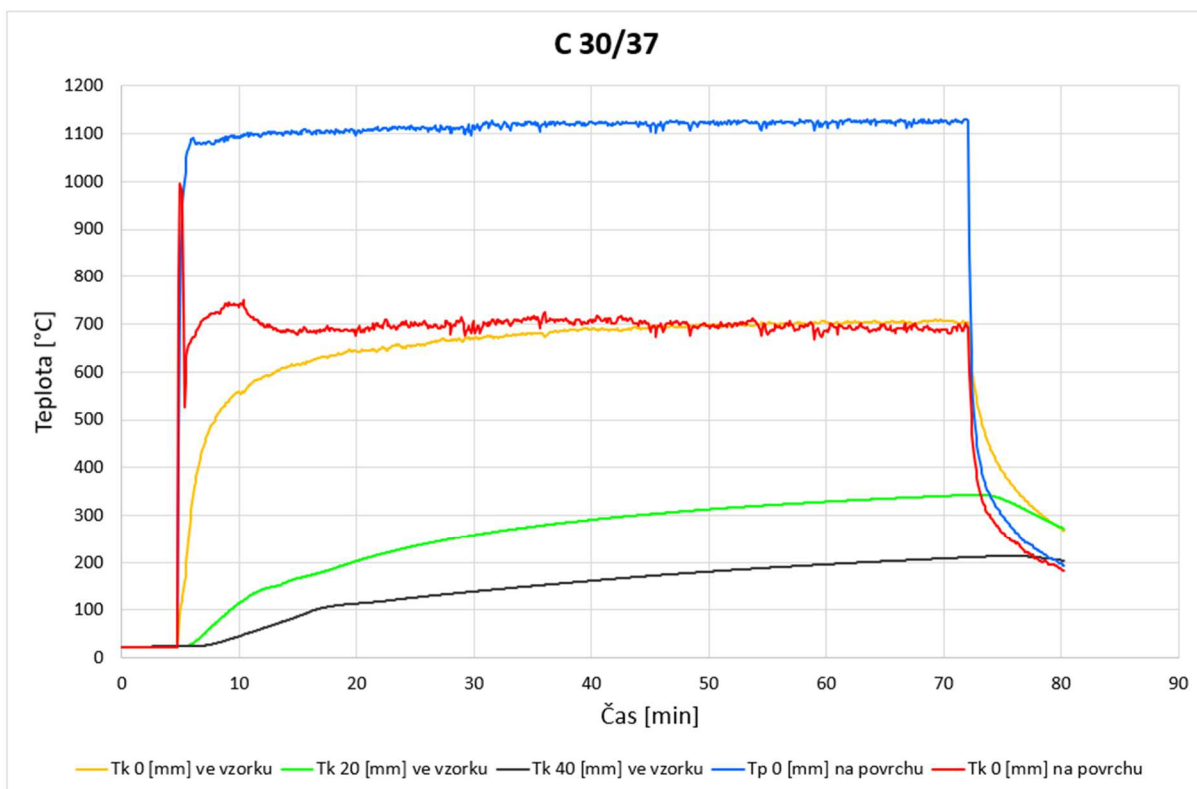
V Tabulce 7 – 12 je uvedena receptura betonové směsi, z které byly vyrobeny 2 panely z C 30/37.

Tabulka 7 – 12 Receptura panelu z C 30/37

C 30/37			kg·m ⁻³
	Cement	42,5 R	400
	Voda	Voda	175
	v/c	0,44	-
Kamenivo	Jemné	0 – 4	750
	Střední	4 – 8	400
	Hrubé	8 – 16	605
	Plastifikátor	Stachement 787 0 %	0
	Mikrosilika	Stachesil S	0
	PP vlákna	PP 6 mm	0
	vzduch	Mikroporan 2 0,25 %	1
			2 331



I přes to, že se v této receptuře nevyskytují polypropylenová vlákna, tak byl předpoklad takový, že k odštěpování nedojde. Prvním důvodem je poměrně vysoká permeabilita a druhým důvodem je možnost panelu se roztahovat, respektive není zabráněno vzniku trhlin z důvodu teplotní roztažnosti a tím uvolnění napětí.



Obrázek 7 – 59 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích v čase u panelu 1 z C 30/37;

T_k – termočlánek kabelový a T_p – termočlánek plášťový

Z Obr. 7 – 59 je patrné, že došlo k chybě na povrchovém kabelovém termočlánci, neboť zaznamenával zcela jiné hodnoty, než povrchový plášťový termočlánek.



a) Panel během zkoušky



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 60 Panel 1 z C 30/37

Na Obr. 7 – 60b si lze jednak všimnout, že k odštěpování skutečně nedošlo, a také příčné trhliny, která vznikla právě z důvodu teplotní roztažnosti. V důsledku vzniku trhliny se jednak uvolnilo napětí vzniklé teplotní roztažností, ale také došlo k vzniku možnosti uvolnění pórových tlaků.

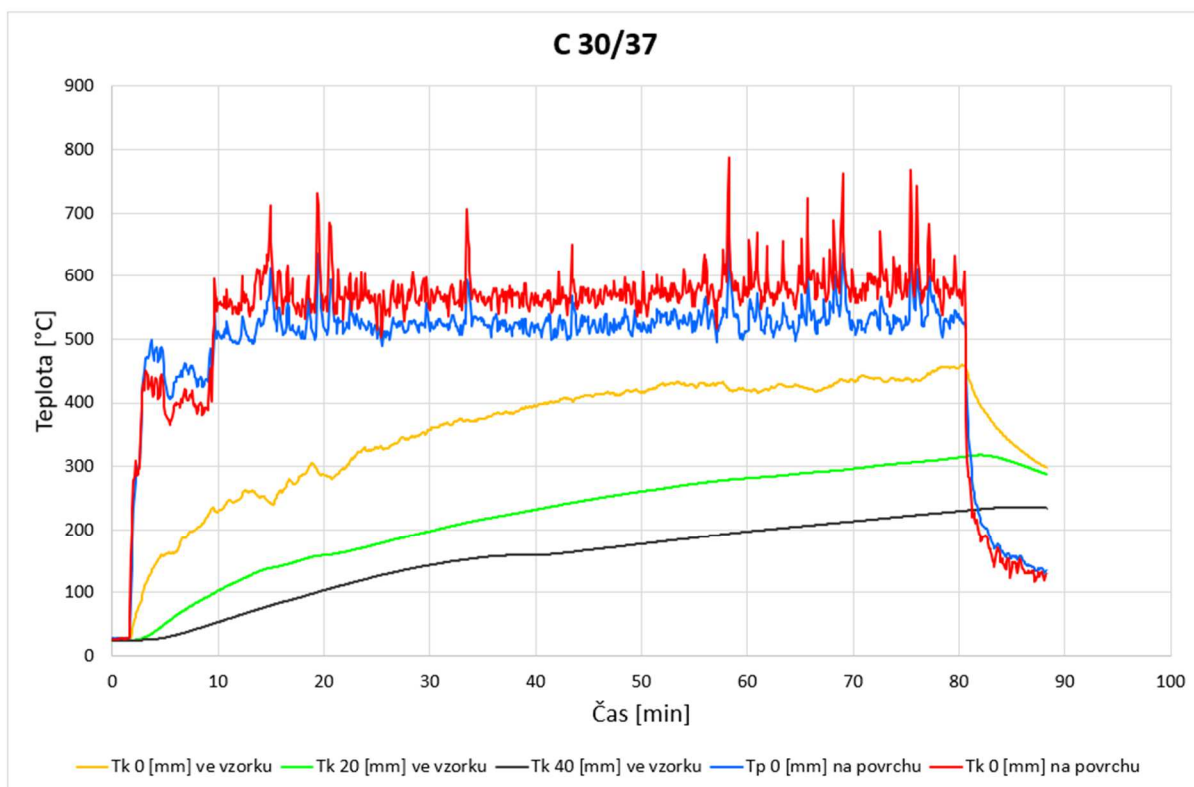


Obrázek 7 – 61 Panel 1 z C 30/37 po zkoušce



Panel byl po zkoušce rozbit z důvodu analýzy panelu po průřezu. Na Obr. 7 – 61 si lze v levé části panelu všimnout rozdílné barvy oproti zbytku průřezu. Jedná se místo, ve kterém při teplotním namáhání vznikla příčná trhлина a panel zde byl tedy výrazně chladnější. Tmavý panel je z důvodu zvýšené vlhkosti, která zde, v místě trhliny, zkonzenzovala.

Druhý panel této receptury byl teplotně namáhán stejným způsobem, jako druhý panel z UHPC s $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ PPF, tj. snahou bylo docílit 1D vedení tepla po průřezu panelu.



Obrázek 7 – 62 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích v čase u panelu 2 z C 30/37;

T_k – termočlánek kabelový a T_p – termočlánek plášťový

Na Obr. 7 – 62 si lze všimnout, že stejně tak, jako u panelu z UHPC s $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ PPF, nebylo při zahřívání dosahováno tak vysokých teplot jako při zahřívání hořákem lokálně. Snahou bylo docílit pomalejšího prohřívání panelu, a tudíž zamezit vzniku trhlin v důsledku teplotní roztažnosti.



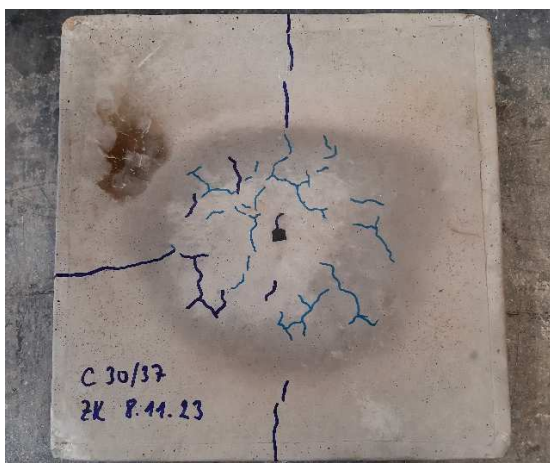
a) Panel před zkouškou



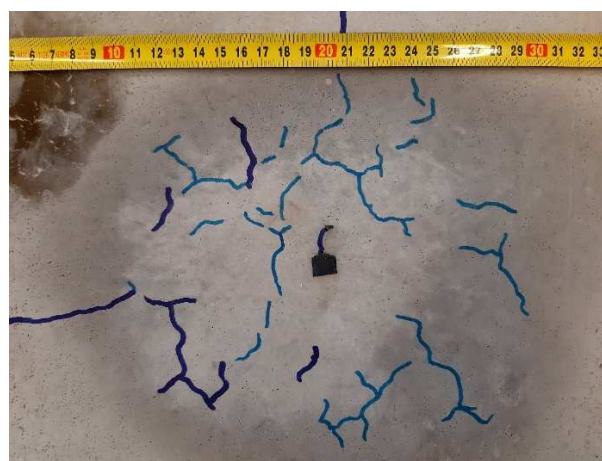
b) Panel během zkoušky

Obrázek 7 – 63 Panel 2 z C 30/37

Na Obr. 7 – 63b si lze opět všimnout vody, která zde vytékala z malé trhliny. Důvodem byl opět transport vlhkosti v panelu a zkondenzování vlhkosti na povrchu panelu, tj. v chladném prostředí.



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 64 Panel 2 z C 30/37

Z Obr. 7 – 64a je patrné, že k zabránění vzniku příčných a podélných trhlin z důvodu teplotní roztažnosti nedošlo. Trhliny opět vznikly. Z Obr. 7 – 64b je patrný charakter trhlin v místě teplotního namáhání. Trhliny jsou oproti lokálnímu namáhání více rozptýlené.



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 65 Panel 2 z C 30/37

Na Obr. 7 – 65 jsou barevně zvýrazněny příčné trhliny, které opět vznikly z důvodu teplotní roztažnosti.

7.4 Zkoušky v lisu

Ve zkouškách uvedených v kapitole 7.3 si lze všimnout tendenčního chování panelů při zkouškách, respektive opakující se ho charakteru porušení. Jedná se o vznik příčných a podélných trhlin při vystavení panelů vysokým teplotám. Trhliny jsou způsobeny snahou o teplotní roztažnost zahřívaného jádra. Vznikem trhliny se uvolní napětí způsobené právě vlivem teplotní roztažnosti betonu a omezí se tak vznik odštěpování. Toto napětí v reálných konstrukcích totiž výraznou měrou přispívá k odštěpování betonu. Vznikem trhlin se rovněž může uvolnit pórový tlak.

Z výše uvedených důvodů byly v následujících zkouškách panely vloženy do lisu, aby byl omezen vznik příčných a podélných trhlin. Snahou bylo optimalizovat zkoušku tak, aby se panel choval jako reálná konstrukce. Vzniku trhlin bylo zabráněno jednak lisem (ve vertikálním směru), ale také závitovými tyčemi (v horizontálním směru).

Dále je uvedeno přesné složení receptur betonu, z kterého byly vyrobeny zkoušené panely. Tyto panely byly zkoušeny výše uvedeným způsobem. Jedná se o panely z betonu pevnostních tříd C 25/30 a C 30/37.

Přestože byly panely při zkoušení v lisu, tak byl předpoklad takový, že k odštěpování nedojde. Důvodem bylo to, že se jednalo o panely nižších pevnostních tříd a také, kromě referenčních panelů, obsahovaly v různém množství polypropylenová vlákna.



Tabulka 7 – 13 Receptury betonu pevnostní třídy C 25/30

SLOŽENÍ RECEPTUR BETONU C 25/30						
Názvy panelů		C 25/30	C 25/30	C 25/30	C 25/30	
		ref.	s 0,5 kg·m ⁻³ PPF	s 0,75 kg·m ⁻³ PPF	s 1,0 kg·m ⁻³ PPF	
		kg·m ⁻³	kg·m ⁻³	kg·m ⁻³	kg·m ⁻³	
	Cement	42,5 R	340	340	340	340
	Voda	Voda	150	146,5	146,5	146,5
	v/c	-	0,44*	0,43*	0,43*	0,43*
Kamenivo	Jemné	0 – 4	750	750	750	750
	Střední	4 – 8	350	350	350	350
	Hrubé	8 – 16	680	680	680	680
	Plastifikátor	Stachement 787	2	2,465	2,89	3,4
	Vzduch	Mikroporan 2 0,25 %	0,85	0,85	0,85	0,85
	PP vlákna	PP 6 mm	0	0,5	0,75	1
			2 273	2 270	2 271	2 272

*Pozn.: Nejedná se o množství (kg·m⁻³), nýbrž o vodní součinitel (-)

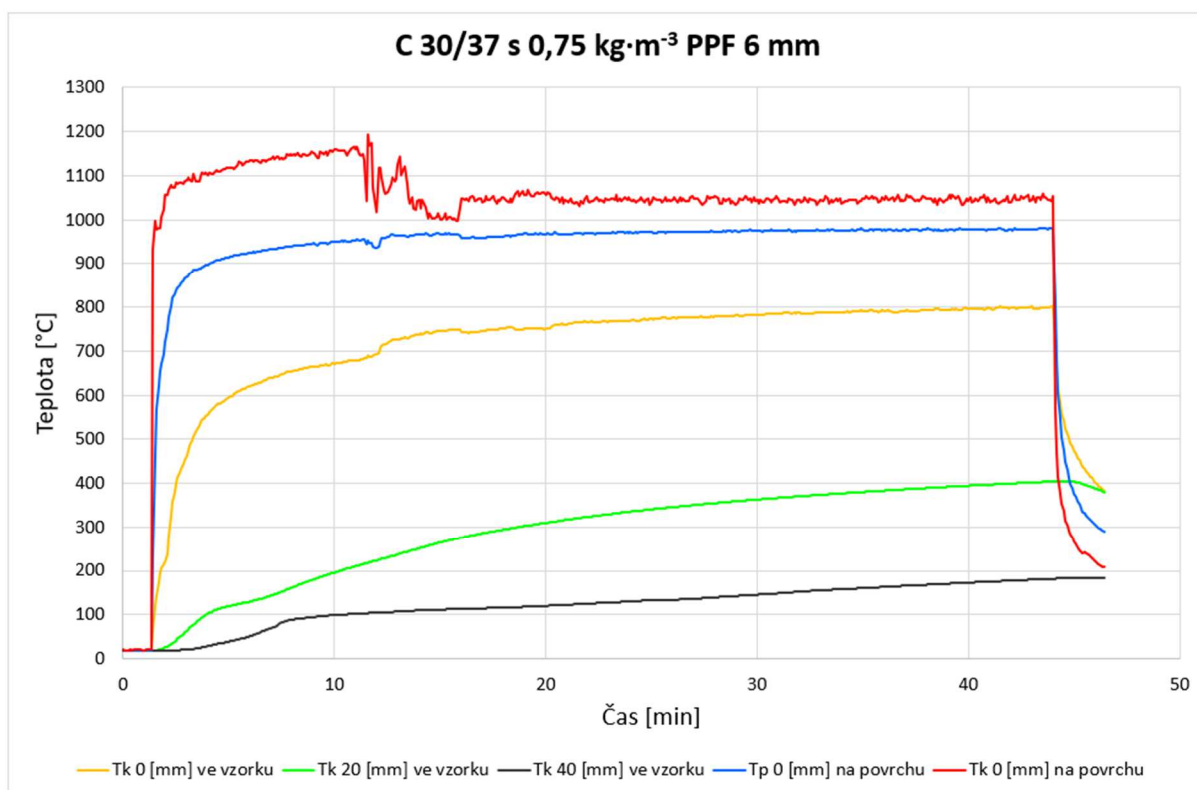


Tabulka 7 – 14 Receptury betonu pevnostní třídy C 30/37

SLOŽENÍ RECEPTUR BETONU C 30/37						
Názvy panelů		C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 30/37	
		ref.	s 0,5 kg·m ⁻³ PPF	s 0,75 kg·m ⁻³ PPF	s 1,0 kg·m ⁻³ PPF	
		kg·m ⁻³	kg·m ⁻³	kg·m ⁻³	kg·m ⁻³	
	Cement	42,5 R	400	400	400	400
	Voda	Voda	175	175	175	175
	v/c	-	0,44*	0,44*	0,44*	0,44*
Kamenivo	Jemné	0 – 4	750	750	750	750
	Střední	4 – 8	400	400	400	400
	Hrubé	8 – 16	605	605	605	605
	Plastifikátor	Stachement 787	0	1,5	2,7	3
	Vzduch	Mikroporan 2 0,25 %	1	1	1	1
	PP vlákna	PP 6 mm	0	0,5	0,75	1
			2 331	2 333	2 334	2 335

* Pozn.: Nejedná se o množství (kg·m⁻³), nýbrž o vodní součinitel (-)

Zatímco doposud byl každý panel každé receptury podrobně rozebrán, okomentován a vyhodnocen, tak zkoušení panelů z betonu C 25/30 a C 30/37 bude rozebráno zkráceně, respektive obecně pro všechny panely. Důvodem je předpoklad, že k odštěpování nedojde a všechny panely se při namáhání teplotou budou chovat přibližně stejně. Dále pak všechny panely těchto pevnostních tříd byly teplotně namáhány po stejnou dobu.



Obrázek 7 – 66 Průběh teplot na jednotlivých termočláncích v čase u panelu z C 30/37 s 0,75 kg·m⁻³ PPF;

T_k – termočlánek kabelový a T_p – termočlánek plášťový

Jak lze vidět na Obr. 7 – 66, tak všechny zkoušky v lisu se od předešlých zkoušek také lišily v době trvání zahřívání. Zatímco předešlé zkoušení trvalo cca 70 až 90 minut, tak v lisu byly panely namáhány vždy pouze cca 40 minut. Důvodem zkrácené doby teplotního namáhání byl předpoklad, že u těchto panelů k odštěpování stejně nedojde. Pokud však by k odštěpování mělo dojít, tak doba trvání cca 40 minut je dostačující.

Dále je na obrázcích blíže specifikován a zobrazen průběh zkoušek v lisu. Do panelu bylo vneseno tlakové napětí cca 10 MPa.



a) Pohled zezadu



b) Pohled zředu

Obrázek 7 – 67 Panel v lisu

Na Obr. 7 – 67 je panel v hydraulickém lisu, pomocí kterého bylo vyvozeno svislé normálové napětí 10 MPa. Vodorovné normálové napětí bylo vyvozeno pomocí závitových tyčí.



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 68 Panel v lisu



Na Obr. 7 – 68a je detailní zadní pohled na závitové tyče a trubky, které spínají panel v horizontálním směru. Na Obr. 7 – 68b je panel v lisu při zkoušce. Závitové tyče zde jsou chráněny izolací před vysokými teplotami jednak z důvodu ochrany tyčí před tepelným poškozením, ale také z důvodu uvolnění sepnutí vlivem teplotní roztažnosti ohřáté tyče.



a) Panel po zkoušce



b) Panel po zkoušce

Obrázek 7 – 69 Panel v lisu

Na Obr. 7 – 69a si lze všimnout opět podélných trhlin. Trhliny vznikly až po ukončení zkoušky po uvolnění normálového napětí, které bylo vyvozeno lisem. Na Obr. 7 – 69b si lze všimnout, že došlo k nahrazení izolace taktéž kovovými chráničkami. Na obou Obr. 7 – 69 je patrné drobné povrchové odštěpení, nicméně se nejedná o odštěpení, které by mělo být více vyhodnocováno.

Cíl tohoto způsobu namáhání v lisu byl splněn. Zdařilo se zabránit vzniku podélných a příčných trhlin vlivem teplotní roztažnosti v průběhu zkoušky. Respektive v některých případech mikrotrhliny vznikly, ale vlivem sepnutí se dále neotvíraly. Plně se otevřely nebo vznikly až po ukončení zkoušky po uvolnění sepnutí od lisu a závitových tyčí.

Nicméně dle předpokladu nedošlo v žádném případě k výraznému odštěpování betonu z panelu. Důvodem byl zejména výskyt polypropylenových vláken a nižší pevnostní třída betonu.



7.5 Shrnutí a celkové vyhodnocení experimentální části

V Tabulce 7 – 15 jsou uvedeny výsledky všech zkoušek v experimentální části. Pro každou recepturu betonu jsou uvedeny oba panely. V poznámkách jsou uvedena bližší specifika příslušné zkoušky nebo panelu.

Tabulka 7 – 15 Přehled výsledků všech zkoušených panelů

Specifikace betonu (panelu)	Předpoklad	Skutečnost	Čas [min]	Max. hloubka [mm]	Plocha [mm ²]	Objem [mm ³]	Pozn.
UHPC s drátky	ano	ano	11	9,90	Nebylo měřeno	Nebylo měřeno	Zkušební vzorek
C 30/37 s 1 kg·m ⁻³ PPF	ne	ne	-	-	-	-	Zkušební vzorek
UHPC ref. 1	ano	ano	1	-	-	-	* mokré byl rozbit
UHPC ref. 2	ano	ano	4	4,58	2300	3671	* mokré
UHPC AKU 1	ne	ne	-	-	-	-	* mokré
UHPC AKU 2	ne	ne	-	-	-	-	* mokré
UHPC s drátky 1	ano	ano	K povrchovému odštěpení nedošlo, nicméně po ukončení zkoušky po cca 70 minutách došlo k hloubkovému oddělení značné části panelu.				
UHPC s drátky 2	ano	ano	1	6,71	9500	20914	* mokré
UHPC s 1 kg·m ⁻³ PPF 1	ne	ne	-	-	-	-	
UHPC s 1 kg·m ⁻³ PPF 2	ne	ne	-	-	-	-	1D vedení tepla
UHPC s drátky a 1 kg·m ⁻³ PPF 1	ne	ano	-	Odštěpování nebylo více vyhodnocováno z důvodu jeho malého rozsahu.			



UHPC s drátky a 1 kg·m ⁻³ PPF 2	ano	ano	1	Odštěpování nebylo více vyhodnocováno z důvodu jeho malého rozsahu.			* mokré
C 30/37 ref. 1	ne	ne	-	-	-	-	byl rozbit
C 30/37 ref. 2	ne	ne	-	-	-	-	1D vedení tepla
C 25/30 ref. 1	ano	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré
C 25/30 ref. 2	ano	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré
C 25/30 s 0,5 kg·m ⁻³ PPF 1	ne	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré
C 25/30 s 0,5 kg·m ⁻³ PPF 2	ne	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré
C 25/30 s 0,75 kg·m ⁻³ PPF 1	ne	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré
C 25/30 s 0,75 kg·m ⁻³ PPF 2	ne	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré
C 25/30 s 1 kg·m ⁻³ PPF 1	ne	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré
C 25/30 s 1 kg·m ⁻³ PPF 2	ne	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré
C 30/37 ref. 1	ano	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré



C 30/37 ref. 2	ano	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré
C 30/37 s 0,5 kg·m ⁻³ PPF 1	ne	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré
C 30/37 s 0,5 kg·m ⁻³ PPF 2	ne	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré
C 30/37 s 0,75 kg·m ⁻³ PPF 1	ne	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré
C 30/37 s 0,75 kg·m ⁻³ PPF 2	ne	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré
C 30/37 s 1 kg·m ⁻³ PPF 1	ne	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré
C 30/37 s 1 kg·m ⁻³ PPF 2	ne	ne	-	-	-	-	** v lisu *** mokré

 Došlo k odštěpování

 Nedošlo k odštěpování

Pozn.: * mokré – panely byly den před zkouškou ponořeny do vody

** v lisu – panel byl zkoušen v lisu dle kapitoly 7.4

*** mokré – panely byly týden před zkouškou ponořeny do vody

Ve výše uvedené tabulce si lze všimnout, že k odštěpování skutečně dle předpokladů došlo pouze u panelů z UHPC, popřípadě z UHPC s drátky nebo polypropylenovými vlákny. Důvodem je zejména nízká permeabilita betonu. K odštěpování docházelo zejména z důvodu pórových tlaků.

Dále jsou uvedeny všechny způsoby namáhání požárem v experimentální části práce. Byly provedeny celkem 3 způsoby namáhání.



a) První způsob namáhání



b) Pokus o 1D vedení tepla

Obrázek 7 – 70 Teplotní namáhání panelu

Na Obr. 7 – 70a je zobrazen první způsob teplotního namáhání. Jednalo se o lokální namáhání, při kterém docházelo k 3D vedení tepla v panelu. Nevýhodou tohoto způsobu namáhání, respektive této zkoušky, je možnost panelu se volně roztahovat vlivem teplotní roztažnosti. Rozpínající se jádro způsobí vznik tahových trhlin. Téměř u všech takto zkoušených panelů totiž došlo během zkoušky ke vzniku podélných nebo příčných tahových trhlin právě vlivem teplotní roztažnosti. Vznikem trhlin se uvolnilo napětí, které přispívá k odštěpování. Dále vznikem trhliny mohlo také dojít k uvolnění pórových tlaků v příslušných místech panelu. Tím došlo k nepřesnosti zkoušky, respektive k odchýlení od chování reálné konstrukce.

Tento způsob zkoušení je relativně funkční pro UHPC, neboť jeho vysoká pevnost v tahu poskytla dostatečný čas pro výskyt odštěpování způsobený pórovými tlaky. Dříve došlo k odštěpování, které bylo způsobeno právě pórovými tlaky, a teprve poté vznikla tahová trhlinka. Pro betony nižších pevnostních tříd je tento způsob teplotního namáhání z výše uvedených důvodů nevhodný, neboť tahové trhlinky vzniknou dříve a tím mají značný vliv na přítomnost odštěpování.

Proto bylo přistoupeno ke zkoušce, která je zobrazena na Obr. 7 – 70b. Zde se jednalo s malou idealizací o plošné teplotní namáhání, tj. o 1D vedení tepla. Předpoklad byl takový, že panel je po celém tepelně namáhaném povrchu namáhan přibližně stejně a rovnoměrně, a proto nedojde ke vzniku podélných nebo příčných tahových trhlin vlivem teplotní roztažnosti a následné deformace. Nicméně ke vzniku podélných nebo příčných trhlin v omezené míře stejně došlo, neboť povrch panelu nebyl rovnoměrně ohříván po celém svém povrchu.



a) Panel před zkouškou



b) Panel během zkoušky

Obrázek 7 – 71 Panel v lisu

Primární motivací tedy bylo zamezit vzniku tahových trhlin vlivem teplotní roztažnosti betonu, proto byl panel sepnut vnějšími silami v lisu. Panel byl sepnut, jak v horizontálním směru pomocí závitových tyčí, tak ve vertikálním směru pomocí lisu. Na Obr. 7 – 71a lze vidět panel právě vsazený v lisu a na Obr. 7 – 71b je panel při zkoušce. Sepnutím v obou směrech bylo zamezeno vzniku jak podélných, tak příčných tahových trhlin. Tato zkouška (způsob teplotního namáhání) se ukázala jako funkční, neboť ke vzniku podélných a příčných trhlin opravdu nedošlo. Respektive v některých případech ke vzniku mikrotrhlin došlo, ale více se nezvětšovaly („neotevíraly“). Trhliny často vznikaly až po ukončení zkoušky po uvolnění lisu a závitových tyčí.



8 Závěr

Tato práce byla zaměřena na požární odolnost betonových tunelových ostění. Pozornost byla primárně upřena na negativní jev betonu při vystavení vysokým a rychle rostoucím teplotám, tj. odštěpování, které má značný vliv právě na požární odolnost konstrukce.

Nejprve byly shrnuty požadavky, které ukládají normy ve vztahu ke konstrukcím v tunelu za požáru. Nikoliv pouze požadavek na požární odolnost, ale také na třídu reakce na oheň. Následně byla stručně shrnuta problematika analýzy požárního úseku tunelu, tj. požární scénáře relevantní k prostředí tunelu.

Následně byly uvedeny vlastnosti betonu a některých jeho složek za zvýšené teploty. Dále byla podrobně rozebrána problematika odštěpování betonu, tj. jeho příčiny a charaktery porušení. Následně bylo shrnuto současné poznání, které betony mají tendenci odštěpovat a opatření eliminující odštěpování.

Dále navazovala experimentální část, respektive řešený příklad této práce. V té byly vyrobeny a následně zkoušeny panely 400 x 400 x 100 mm různých receptur a pevnostních tříd. Byly zkoušeny panely pevnostních tříd C 25/30 a C 30/37 s různým množstvím polypropylenových vláken. Dále pak byly zkoušeny panely z UHPC s $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ polypropylenových vláken a s ocelovými drátky. Vždy byly vyrobeny a zkoušeny 2 panely jedné receptury.

Na základě získaných teoretických poznatků byl nejprve pro každou recepturu stanoven předpoklad, zda k odštěpování u jednotlivých panelů dojde, či nikoliv, a následně byl výsledek zkoušky vyhodnocen a porovnán s předpoklady. V souladu s předpoklady a teoretickými poznatky došlo k odštěpování zejména u panelů z UHPC, popřípadě z UHPC s drátky nebo polypropylenovými vlákny. Důvodem je zejména nízká permeabilita betonu. K odštěpování docházelo zejména z důvodu pórových tlaků. Dále byla potvrzena náročnost zpracování betonové směsi, která obsahovala polypropylenová vlákna. U takové směsi muselo dojít k navýšení předpokládaného množství záměsové vody, aby bylo možné betonovou směs lépe zpracovat. Důvodem potřebného navýšení množství vody je právě výskyt polypropylenových vláken. Vlákna totiž navážou podstatné množství vody na sebe a betonová směs je tudíž sušší. Jedná se o tzv. stěnový efekt.

V jedné z receptur byla rovněž zohledněna akustika. Zkoušený panel byl vyroben ze dvou vrstev. První (horní) vrstvu tvořil mezerovitý beton a druhou (spodní) vrstvu tvořil UHPC. Mezerovitý beton, který je značně provzdušněný a pórovitý, má dobré akustické vlastnosti. To může být v prostředí tunelu velkou výhodou. Navíc výsledkem zkoušek těchto souvrství (panelů) bylo, že k odštěpování nedošlo. Důvodem je právě vysoká permeabilita mezerovitého betonu. Nevýhodou je ovšem cena a technologická náročnost při zpracování a provádění.

Pro zamezení odštěpování u vysokohodnotných betonů pevnostních tříd C 80/95 a více norma ČSN EN 1992 – 1 – 2 uvádí přidání polypropylenových vláken do betonové směsi v množství $2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Polypropylenová vlákna byla v rámci této experimentální části práce přidána kromě



vysokohodnotných betonů také do betonů pevnostních tříd C 25/30 a C 30/37 v množství 0,5; 0,75 a $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. To se ukázalo jako zcela zbytečné, neboť ani u panelů bez polypropylenových vláken těchto pevnostních tříd k odštěpování nedošlo. Důvodem byla, kromě polypropylenových vláken, vyšší předpokládaná permeabilita samotného betonu související s vyšším vodním součinitelem. Do betonové směsi UHPC byla přidána polypropylenová vlákna v množství $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Polypropylenová vlákna se ukázala jako účinná, neboť u panelů z UHPC a UHPC s drátky k odštěpování došlo, zatímco u panelů z UHPC s $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ polypropylenových vláken nikoliv. Množství $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ se ukázalo jako dostačující. Nicméně u panelů z UHPC s drátky a $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ polypropylenových vláken k drobnému povrchovému odštěpení došlo. Větší množství polypropylenových vláken do panelů z UHPC v rámci této práce přidáváno nebylo, takže otázkou zůstává, zda by větší množství polypropylenových vláken něco změnilo nebo zda by k tomuto drobnému povrchovému odštěpování přesto docházelo. Předpoklad je takový, že by k drobnému povrchovému odštěpování i přes zvýšené množství polypropylenových vláken stejně docházelo. Prvním důvodem je rozdílná teplotní roztažnost mezi kamenivem a cementovým mlékem. Tím pádem dojde při vystavení vysokým teplotám k nesoudržnosti mezi těmito složkami. Druhým důvodem je nižší permeabilita cementového mléka. Třetím důvodem je, že se jedná o dno formy, ve které byly panely vyrobeny. Panely jsou na této straně dokonale hladké a téměř bez pórů. Dalším důvodem je nedokonalé a nerovnoměrné rozprostření polypropylenových vláken v panelech. To zapříčiní, že vlákna při rychlém nárůstu teploty veškeré tlaky nepohlí. V těchto případech je tedy odštěpení způsobené kombinací teplotní roztažnosti a pórových tlaků. Přidáním polypropylenových vláken by se nezměnil charakter povrchu panelu. Dále by se jednalo o dno formy, kde by se vyskytovalo cementové mléko s nízkou permeabilitou a polypropylenová vlákna by byla nedokonale rozptýlená.

Malorozměrová zkouška požární odolnosti, respektive odštěpování, byla optimalizována tak, aby se panel choval jako reálná konstrukce. Neoptimalnější způsob zkoušení je zkoušení v lisu, neboť lisem a závitovými tyčemi byl podchycen vliv teplotní roztažnosti betonu, tj. vznik příčných a podélných tahových trhlin, které jsou způsobeny nerovnoměrným zahříváním povrchu panelu.



Literatura

- [1] ČSN 73 7507 *Projektování tunelů pozemních komunikací (2013)*
- [2] ČSN 73 0802 *Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty (2023, ed. 2)*
- [3] ČSN EN 1991-1-2 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru (2004), Opr. 1 (2006), Opr. 2 (2010) a Opr. 3 (2013)*
- [4] ČSN EN 1363 - 1 *Zkoušky požární odolnosti - Část 1: Obecné požadavky (2021)*
- [5] ČSN EN 1365 - 1 *Zkoušení požární odolnosti nosných prvků - Část 1: Stěny (2013), Opr. 1 (2013)*
- [6] ČSN 73 0804 *Požární bezpečnost staveb - Výrobní objekty (2023, ed. 2)*
- [7] ČSN 73 0810 *Požární bezpečnost staveb - Společná ustanovení (2016), Opr. 1 (2020)*
- [8] ČSN 73 0873 *Požární bezpečnost staveb - Zásobování požární vodou (2003)*
- [9] ČSN 73 0875 *Požární bezpečnost staveb - Stanovení podmínek pro navrhování elektrické požární signalizace v rámci požárně bezpečnostního řešení (2011)*
- [10] ČSN 73 0848 *Požární bezpečnost staveb - Elektrická zařízení, elektrické instalace a rozvody (2023)*
- [11] POKORNÝ, Marek a Petr HEJTMÁNEK. *Požární bezpečnost staveb: sylabus pro praktickou výuku*. 3. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2021. ISBN 978-80-01-06839-7.
- [12] BENÝŠEK, Martin. *Modelování požáru v požárním inženýrství*. In: . České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. 2022.
- [13] KUPILÍK, Václav, Zbyněk VALDMANN a Stanislav ŠIMÁK. *Vzdělávání v oblasti požární ochrany staveb, bezpečnosti práce a rizik ve stavebnictví*. 2013.
- [14] *Tunel*, Časopis České tunelářské asociace a Slovenskej tunelárskej asociácie ITA-AITES. 2016, **25. ročník**(č. 3/2016). ISSN 1211 - 0728.
- [15] STARÁ, Tereza. *Studium vlastností betonů v extrémních klimatických podmínkách*. B.m., 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [16] HAVLŮJ, Jan. *Metody měření teploty v betonu vystaveném vysokým teplotám*. B.m., 2019. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [17] ČSN EN 1992-1-2 *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1 - 2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru (2006), Opr. 1 (2009), A1 (2020)*



- [18] ONDRYÁŠOVÁ, Veronika. *Studium požární odolnosti betonů pro tunelová ostění*. B.m., 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [19] KHOURY, Gabriel Alexander a Yngve ANDERBERG. Concrete spalling review. 2000.
- [20] LI, Ye, Kang Hai TAN a En-Hua YANG. Influence of aggregate size and inclusion of polypropylene and steel fibers on the hot permeability of ultra-high performance concrete (UHPC) at elevated temperature. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **169**, 629–637. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.105
- [21] ABDELALIM, A, Gamal ABDELAZIZ, M EL-MOHR a G. SALAMA. Effect of aggregate type on the fire resistance of normal and self-compacting concretes. *Engineering Research Journal, Faculty of Engineering, Mataria, Helwan University, Cairo Egypt*. 2009, **122**, 47–62.
- [22] FIGUEIREDO, Fabio P., Asif Hussain SHAH, Shan-Shan HUANG, Harris ANGELAKOPOULOS, Kypros PILAKOUTAS a Ian BURGESS. Fire Protection of Concrete Tunnel Linings with Waste Tyre Fibres. *Procedia Engineering* [online]. 2017, **210**, 472–478. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.11.103
- [23] PICHLER, Christian, Roman LACKNER a Herbert A. MANG. Safety Assessment of Concrete Tunnel Linings under Fire Load. *Journal of Structural Engineering* [online]. 2006, **132**(6), 961–969. ISSN 0733-9445, 1943-541X. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:6(961)



Použitý software

Microsoft 365 Word 2016

Microsoft 365 Excel 2016

TempAnalysis 1.2 (10-04-2016)



Seznam tabulek

Tabulka 7 – 1 Receptura panelu z C 30/37 s PPF 6 mm

Tabulka 7 – 2 Receptura panelu z UHPC s drátky

Tabulka 7 – 3 Vyhodnocení výsledků odštěpování

Tabulka 7 – 4 Receptura panelu z UHPC

Tabulka 7 – 5 Vyhodnocení výsledků odštěpení u panelu 2 z UHPC

Tabulka 7 – 6 Receptura sendvičového mezerovitého panelu AKU + UHPC (část UHPC)

Tabulka 7 – 7 Receptura sendvičového mezerovitého panelu AKU + UHPC (část AKU)

Tabulka 7 – 8 Receptura panelu z UHPC s drátky a PPF

Tabulka 7 – 9 Receptura panelu z UHPC s drátky

Tabulka 7 – 10 Vyhodnocení výsledků odštěpení u panelu 2 z UHPC s drátky

Tabulka 7 – 11 Receptura panelu z UHPC s PPF

Tabulka 7 – 12 Receptura panelu z C 30/37

Tabulka 7 – 13 Receptury betonu pevnostní třídy C 25/30

Tabulka 7 – 14 Receptury betonu pevnostní třídy C 30/37

Tabulka 7 – 15 Přehled výsledků všech zkoušených panelů