



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT  
A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS  
AND COMPONENTS

# HABILITAČNÍ PRÁCE

APLIKACE TECHNOLOGIE  
VYSOKORYCHLOSTNÍCH VODNÍCH PAPRSKŮ  
PRO ROZPOJOVÁNÍ BETONU

APPLICATION OF HIGH SPEED WATER JETS TECHNOLOGY FOR DISINTEGRATION  
OF CONCRETE

BRNO 2016



# 1. Obsah

1	ÚVOD.....	6
2	TECHNOLOGIE VYSOKORYCHLOSTNÍHO VODNÍHO PAPERSKU .....	7
2.1	Terminologie .....	7
2.2	Historie vysokorychlostního vodního paprsku.....	7
2.3	Druhy vodních paprsků .....	8
2.3.1	<i>Kontinuální vodní paprsek .....</i>	<i>8</i>
2.3.2	<i>Abrazivní kontinuální vodní paprsek.....</i>	<i>10</i>
2.3.3	<i>Složené (několikanásobné) vodní paprsky.....</i>	<i>12</i>
2.3.4	<i>Plochý paprsek.....</i>	<i>14</i>
2.3.5	<i>Kavitační paprsky.....</i>	<i>14</i>
2.3.6	<i>Pulzující vodní paprsek .....</i>	<i>14</i>
2.4	Působení vysokorychlostního vodního paprsku na beton .....	17
3	BEZPEČNOSTNÍ RIZIKA PŘI UŽITÍ TECHNOLOGIE VYSOKORYCHLOSTNÍHO VODNÍHO PAPERSKU .....	21
3.1.1	<i>Zranění pracovníků při práci s vysokorychlostním vodním paprskem .....</i>	<i>21</i>
3.1.2	<i>Reakční síla vodního paprsku .....</i>	<i>22</i>
3.1.3	<i>Hluk a vibrace generované zařízeními pro technologii vodního paprsku .....</i>	<i>25</i>
3.1.4	<i>Možnosti ochrany pracovníků při práci s vysokorychlostním vodním paprskem .....</i>	<i>26</i>
3.1.5	<i>Normy a bezpečnost technologie vysokorychlostního vodního paprsku .....</i>	<i>26</i>
4	UŽITÍ TECHNOLOGIE VYSOKORYCHLOSTNÍCH VODNÍCH PAPERSKŮ PRO SANACE BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	28
4.1	Metody pro odstranění degradovaného betonu .....	28
4.2	Volba metody pro odstranění degradovaného betonu.....	31
4.3	Užití vodního paprsku pro čištění, zdrsnění a odstranění betonu .....	32
4.3.1	<i>Požadavky na kvalitu předupraveného povrchu betonu .....</i>	<i>33</i>
4.3.2	<i>Vzhled předupravených povrchů betonů po ošetření různými metodami .....</i>	<i>34</i>
5	CÍLE PRÁCE .....	40
6	METODIKA PRÁCE .....	40
7	ROZPOJOVÁNÍ BETONŮ TECHNOLOGIÍ ROTAČNÍHO VYSOKORYCHLOSTNÍHO PAPERSKU .....	41
7.1	Příprava zkušebních vzorků pro rozpojování betonů technologií VVP.....	41
7.1.1	<i>Receptury betonů, výroba a zkoušení čerstvého betonu.....</i>	<i>41</i>
7.1.2	<i>Vlastnosti betonů.....</i>	<i>42</i>
7.2	Technické parametry zařízení pro technologii VVP .....	43
7.3	Hodnocení betonů po rozpojování technologií VVP .....	43
7.3.1	<i>Fotodokumentace povrchů betonů otryskaných technologií VVP.....</i>	<i>44</i>
7.3.2	<i>Vliv pevností betonů na hloubku řezu .....</i>	<i>46</i>
7.3.3	<i>Profil řezů vytvořených vysokorychlostním paprskem.....</i>	<i>48</i>
7.3.4	<i>Pevnost betonu v tahu povrchových vrstev před otryskáním povrchu a po otryskání povrchu betonu vysokorychlostním paprskem.....</i>	<i>50</i>
7.3.5	<i>Stanovení soudržnosti správkových malt k povrchům betonu po otryskání vysokorychlostním vodním paprskem.....</i>	<i>51</i>

7.4	Shrnutí dosažených výsledků .....	52
8	<b>SLEDOVÁNÍ ÚČINKU KONTINUÁLNÍCH A PULZUJÍCÍCH VYSOKORYCHLOSTNÍCH VODNÍCH PAPRSKŮ PŘI ROZPOJOVÁNÍ BETONU .....</b>	<b>54</b>
8.1	Příprava zkušebních vzorků pro rozpojování betonů technologií VVP .....	54
8.1.1	<i>Složení a vlastnosti betonů C 25/30, C 30/37 a C 45/55.....</i>	<i>54</i>
8.1.2	<i>Výroba zkušebních vzorků ze dvou vrstev betonů různé kvality.....</i>	<i>55</i>
8.2	Parametry procesu rozpojování betonů vysokorychlostními vodními paprsky .....	55
8.3	Rozpojování betonů kontinuálními paprsky (kontinuálním a kontinuálním pulzujícím paprskem).....	58
8.3.1	<i>Vliv rychlosti řezání na hloubku drážky v betonu a na rozpojený objem betonu... </i>	<i>58</i>
8.3.2	<i>Vliv pulzací v kontinuálním paprsku na účinnost rozpojování betonů.....</i>	<i>58</i>
8.4	Rozpojování betonů rotačními paprsky (kontinuálním rotačním paprskem a pulzujícím rotačním paprskem) .....	59
8.4.1	<i>Vliv pulzací v rotačním paprsku na účinnost rozpojování betonů .....</i>	<i>60</i>
8.4.2	<i>Účinek rotačního kontinuálního paprsku a rotačního pulzního paprsku na rozpojování vrchní vrstvy betonu různých vlastností .....</i>	<i>60</i>
8.5	Rozpojování betonů plochými paprsky (kontinuálním plochým a pulzujícím plochým paprskem).....	62
8.6	Shrnutí výsledků rozpojování betonů kontinuálními a pulzujícími vysokorychlostními vodními paprsky .....	63
8.7	Ekonomické aspekty aplikace technologie vysokorychlostních kontinuálních a pulzujících vodních paprsků pro rozpojování betonu .....	64
8.7.1	<i>Členění nákladů technologií pro rozpojování materiálů .....</i>	<i>64</i>
8.7.2	<i>Analýza nákladů na technologii vysokorychlostního vodního paprsku .....</i>	<i>65</i>
8.7.3	<i>Experimentální hodnocení nákladů na technologii vysokorychlostního kontinuálního a pulzujícího vodního paprsku .....</i>	<i>67</i>
8.7.4	<i>Zhodnocení výše nákladů na vysokorychlostní kontinuální a pulzující vodní paprsek .....</i>	<i>70</i>
9	<b>SLEDOVÁNÍ ÚČINKŮ VYSOKORYCHLOSTNÍCH VODNÍCH PAPRSKŮ NA BETONECH VYSTAVENÝCH PŮSOBENÍ VYSOKÝCH TEPLŮT .....</b>	<b>71</b>
9.1	Metodika experimentálních prací .....	72
9.2	Použité materiály a jejich vlastnosti .....	73
9.2.1	<i>Cement.....</i>	<i>73</i>
9.2.2	<i>Kamenivo.....</i>	<i>74</i>
9.3	Příprava zkušebních vzorků pro rozpojování betonů technologií VVP .....	81
9.3.1	<i>Receptury betonů.....</i>	<i>81</i>
9.3.2	<i>Vlastnosti čerstvých betonů.....</i>	<i>82</i>
9.3.3	<i>Režim zatěžování vzorků.....</i>	<i>82</i>
9.3.4	<i>Vlastnosti ztvrdlého betonu před a po tepelném zatížení .....</i>	<i>82</i>
9.4	Rozpojování betonů vystavených působení vysokých teplot.....	88
9.4.1	<i>Parametry procesu rozpojování betonů po tepelném zatížení vysokorychlostními vodními paprsky .....</i>	<i>88</i>
9.4.2	<i>Výsledky a diskuse rozpojování betonů po tepelném zatížení vysokorychlostními vodními paprsky .....</i>	<i>89</i>
10	<b>APLIKACE VYSOKORYCHLOSTNÍCH VODNÍCH PAPRSKŮ PRO PLOŠNÉ ROZPOJOVÁNÍ VRSTEV BETONŮ PORUŠENÝCH PŮSOBENÍM VYSOKÝCH TEPLŮT .....</b>	<b>97</b>

10.1	Příprava zkušebních vzorků pro rozpojování betonů technologií VVP .....	97
10.1.1	<i>Použité materiály a jejich vlastnosti</i> .....	97
10.1.2	<i>Receptury betonů</i> .....	98
10.1.3	<i>Vlastnosti čerstvých betonů</i> .....	99
10.1.4	<i>Tepelné zatěžování vzorků</i> .....	99
10.1.5	<i>Vlastnosti betonů před a po tepelném zatížení</i> .....	100
10.1.6	<i>Vizuální hodnocení změn na betonových zkušebních vzorcích po tepelném zatížení</i> .....	102
10.1.7	<i>Příprava zkušebních desek pro plošné odstraňování vrstev betonu vysokorychlostními vodními paprsky</i> .....	104
10.1.8	<i>Chování zkušebních desek v průběhu zahřívání</i> .....	105
10.2	Využití počítačové mikro tomografie (mikro X-ray CT) pro analýzu změn ve struktuře betonů po působení vysokých teplot.....	110
10.2.1	<i>Příprava zkušebních vzorků</i> .....	111
10.2.2	<i>Parametry tomografického systému pro skenování vnitřní struktury betonových vzorků před a po tepelném zatížení</i> .....	111
10.2.3	<i>Metodika experimentu RTG CT analýzy betonů před a po tepelném zatížení</i> .....	112
10.2.4	<i>Vyhodnocení výsledků RTG CT betonů před a po tepelném zatížení</i> .....	112
10.3	Shrnutí a diskuse výsledků vlastností betonů před a po tepelném zatížení.....	117
10.4	Rozpojování betonových desek po tepelném zatížení vysokorychlostními vodními paprsky .....	118
10.4.1	<i>Výsledky a diskuse rozpojování betonových desek po tepelném zatížení vysokorychlostními vodními paprsky</i> .....	118
10.5	Shrnutí dosažených výsledků .....	124
11	ZÁVĚR.....	126
12	LITERATURA .....	129

# 1 ÚVOD

Technologie vysokorychlostního vodního paprsku (VVP) se ve stavebnictví používá zejména pro přípravu povrchu betonu při sanacích betonových konstrukcí, kdy hlavním cílem je selektivně odstranit vrstvu porušeného betonu a zachovat beton zdravý. Pro správné použití technologie vodního paprsku je důležité definovat míru porušení betonu a požadovanou hloubku odstranění porušené vrstvy. Při sanacích jsou nejčastěji pomocí technologie VVP odstraňovány vrstvy betonů porušené vlivem působení atmosférických vlivů, vlivem působení agresivních prostředí, vlivem užívání či při změně užití stavebního díla. Jsou odstraňovány betony různých fyzikálně-mechanických vlastností. Správná aplikace této technologie vyžaduje znalosti jak problematiky technologie vysokorychlostního vodního paprsku, tak znalosti o rozpojovaném materiálu – betonu. Při použití technologie VVP pro porušování betonu je třeba nastavit parametry paprsku podle vlastností daného betonu. Problematika použití vysokorychlostních vodních paprsků pro odstraňování porušeného betonu je specifická zejména vzhledem k variabilitě betonu jako stavebního materiálu (skladba tohoto kompozitního materiálu, různé hodnoty pevnostních charakteristik, rozdílné vlivy, které působí na beton v konstrukci během jeho užívání a další). Vlastnosti betonu hrají velmi výraznou roli na výsledný efekt interakce VVP a betonu. Pro rozpojování betonu byly použity různé typy vysokorychlostního vodního paprsku – od kontinuálního, rotačního, až po paprsky ploché a nově vyvíjené paprsky pulzní.

Výzkumné práce byly prováděny ve spolupráci s pracovištěm AV ČR, v.v.i., Ústav geoniky, Ostrava - Poruba a dokumentují úzkou spolupráci s tímto pracovištěm od roku 1995. Výzkumné práce byly dále prováděny ve spolupráci s Vysokou školou báňskou – Technickou univerzitou Ostrava, firmou Net spol. s.r.o. a firmou Hammelmann - servis.cz, s.r.o.

## 2 TECHNOLOGIE VYSOKORYCHLOSTNÍHO VODNÍHO PAPRSKU

### 2.1 TERMINOLOGIE

V normách a v odborných publikacích se můžeme setkat s různými termíny pro technologii vysokorychlostního vodního paprsku. Například ČSN EN 1504-10 [1] uvádí termín „Tryskání vodou (water blasting)“ a „hydrodemolice“. V publikaci TP SSBK III [2] je používán termín „technologie vysokotlakého vodního paprsku“ nebo „VVP“. V normě ASTM E1575 - 12 Standard Practice for Pressure Water Cleaning and Cutting je používán termín vysokotlaký paprsek, a to pro všechny vodní paprsky, jejichž tlak je vyšší než 0,69 MPa [3]. Podle ACI 555 je použití vodního paprsku pro odstraňování betonu definováno jako „hydrodemolice“: „Hydrodemoliton (concrete removal and cleaning)“, český překlad Hydrodemolice (odstraňování a čištění betonu), nebo jako „water-jet blasting“ (tryskání vodním paprskem), nebo „power washing“ (tlakové mytí) [4]. V práci je vzhledem k zaměření práce na oblast aplikace pro odstraňování betonu užíván termín technologie vysokorychlostního vodního paprsku.

### 2.2 HISTORIE VYSOKORYCHLOSTNÍHO VODNÍHO PAPRSKU

Velký rozvoj systémů pro řezání vysokorychlostním vodním paprskem nastal koncem šedesátých let 20. století v souvislosti s potřebou efektivně dělit stávající i nově vyvíjené materiály. První společnost, která komerčně rozvinula systémy na řezání vysokorychlostním vodním paprskem byla firma McCartney Manufacturing Company z Baxter Springs v Kansasu, pobočka společnosti Ingersoll Rand. Řezání bylo prováděno při tlacích 200 až 400 MPa. Firma upravila čerpadlo používané pro výzkum, které dodávalo 95 l/hod při tlaku 100 MPa. V roce 1971 byla ve firmě Alton Box Board Company instalována první komerční jednotka, která dodávala 6,3 l/min při tlaku 275 MPa. Toto zařízení bylo využíváno pro řezání lepenkových trubíc pro nábytkářský průmysl. S rozvojem technologie řezání vysokorychlostním vodním paprskem vzrůstaly požadavky uživatelů na kvalitu řezné plochy, která je značně ovlivněna kvalitou řezného paprsku. Proto firma McCartney začala používat přísady molekulárních polymerů s dlouhými řetězci, které pomáhaly udržet kohezní paprsek do větší vzdálenosti od trysky a snížily také zvlhčování povrchu. Ostatní výrobci (především firma Flow Industries), kteří počátkem sedmdesátých let 20. století začali konkurovat firmě McCartney, hledali odlišné řešení spočívající ve zdokonalování konstrukce trysky s vhodnější výkonovou charakteristikou. Počátek osmdesátých let 20. století přinesl rozšíření uplatnitelnosti vysokorychlostních vodních paprsků zavedením abrazivních vodních paprsků. V současné době jsou kontinuální vysokorychlostní vodní paprsky generované tlakem až 400 MPa a abrazivní vodní paprsky používány k řezání nejrůznějších materiálů (kovů, skla, keramiky, keramických kompozitů, kompozitů s kovovou maticí, laminátů, papíru, pryže, plastů, atd.) a také k čištění a sanování betonových konstrukcí. Další perspektivní směr výzkumu zahrnuje oblast paprsků odlišných od kontinuálního vodního paprsku - jedná se zejména o paprsky kavitační a pulzující, které dosahují značné snížení energie potřebné k porušování materiálů. Pozitivní je univerzální použití technologie vodního paprsku - vodním paprskem lze obrábět většinu materiálů v rozsahu 0,1 až 300 mm tloušťky. Průchodem obráběným materiálem se paprsek zahřívá na přibližně 70°C při tlaku vody 350 MPa, nedochází k tepelnému vlivu na obráběný materiál [5].

## 2.3 DRUHY VODNÍCH PAPRSKŮ

### 2.3.1 Kontinuální vodní paprsek

Kontinuální vodní paprsek je nejběžnějším typem vodního paprsku. Jedná se o kontinuální proud kapaliny pohybující se rychlostí až  $1200 \text{ m.s}^{-1}$ . Porušení materiálů při použití tohoto typu paprsku nastává prostřednictvím změny kinetické energie proudu kapaliny na energii tlakovou při dopadu paprsku na povrch materiálu.

Při nárazu kapaliny pohybující se velkou rychlostí na pevný povrch vznikne krátkodobý přechodový jev, který je provázený intenzivním nárůstem tlaku v místě dopadu kapaliny na povrch. Tento jev může způsobit vážné poškození jak povrchu, tak i vnitřní struktury desintegrovaného materiálu.

Dopad paprsku kapaliny se děje ve dvou hlavních fázích. Během první fáze se kapalina po dopadu stlačuje a vytváří tzv. hydrodynamický ráz (water-hammer pressure). Hydrodynamický ráz způsobuje většinu poškození materiálu při srážce kapaliny s dopadovou plochou. Tzv. impaktní (nárazový) tlak  $p_i$  v ose paprsku je dán vztahem

$$p_i = \frac{v\rho_1c_1\rho_2c_2}{\rho_1c_1 + \rho_2c_2} \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

kde:  $v$  - impaktní rychlost [ $\text{m.s}^{-1}$ ]  
 $\rho_1, \rho_2$  - hustota kapaliny a hustota materiálu [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]  
 $c_1, c_2$  - rychlost šíření rázové vlny v kapalině a v materiálu [ $\text{m.s}^{-1}$ ] [5], [14].

Při kalkulaci tlaků pro vysokorychlostní dopad kapaliny je nutné počítat s odpovídajícími rychlostmi šíření rázové vlny  $c_1$  a  $c_2$ . Rychlost šíření rázové vlny  $c$  je vázána s akustickou rychlostí  $v_s$  vztahem

$$c = v_s + kv \quad [\text{m.s}^{-1}] \quad (2)$$

kde:  $c$  - rychlost šíření rázové vlny [ $\text{m.s}^{-1}$ ]  
 $v_s$  - akustická rychlost [ $\text{m.s}^{-1}$ ]  
 $k$  - konstanta,  $k = 2$  pro vodu při rychlostech  $v$  do  $1000 \text{ m.s}^{-1}$  [6] a  $k = 1,58$  pro jemnozrnné betony a  $1,57$  pro hrubozrnné betony [7].

Akustická rychlost  $v_s$  dosahuje hodnot zhruba  $1480 \text{ m.s}^{-1}$  pro vodu, pro betony hodnot v rozsahu od  $4200 \text{ m.s}^{-1}$  (jemnozrnné betony) po  $4311 \text{ m.s}^{-1}$  (hrubozrnné betony).

Velikost impaktního tlaku  $p_i$  je nezávislá na geometrii kapky [9], doba působení tlaku je však velikostí a tvarem kapky ovlivněna. Pro kouli nebo válec je odpovídající poloměr  $R$  (či poloviční šířka) kontaktní plochy vystavené tomuto tlaku dán vztahem

$$R = \frac{rv}{c_1} \quad [m] \quad (3)$$

kde:  $R$  - poloměr  $R$  (poloviční šířka) kontaktní plochy [m]  
 $r$  - poloměr zakřivení kapky nebo válce (kapalinového media) v místě kontaktu [m]  
 $v$  - impaktní rychlost [ $\text{m.s}^{-1}$ ]  
 $c_1$  - rychlost šíření rázové vlny v kapalině [ $\text{m.s}^{-1}$ ].



Impaktní tlak působí jen krátkou dobu,  $\Delta\tau$ , během níž se vytvoří vlna poklesu tlaku. Šíří se z místa vnějšího kontaktu paprsku a dopadové plochy směrem do středu paprsku. Tato doba může být vyjádřena jako

$$\Delta\tau = \frac{3rv}{2c_1^2} \quad [s] \quad (4)$$

kde:  $\Delta\tau$  – doba působení impaktního tlaku [s]  
 $r$  – poloměr zakřivení kapky nebo válce (kapalinového media) v místě kontaktu [m]  
 $v$  – impaktní rychlost [m.s<sup>-1</sup>]  
 $c_1$  – rychlost šíření rázové vlny v kapalině [m.s<sup>-1</sup>].

Po opadnutí impaktního tlaku začíná druhá fáze, která je charakterizovaná radiálním tokem kapaliny, orientovaným kolmo k ose paprsku směrem ven podél dopadové plochy. Tlak v centrální ose paprsku poklesne na mnohem nižší tzv. Bernoulliho stagnační tlak  $p_s$ , který pak trvá relativně dlouhou dobu. Stagnační tlak je dán výrazem

$$p_s = \frac{1}{2}\rho_1 v^2 \quad [Pa] \quad (5)$$

kde:  $p_s$  – stagnační tlak [Pa]  
 $\rho_1$  – hustota kapaliny [kg.m<sup>-3</sup>]  
 $v$  – rychlost kapaliny [m.s<sup>-1</sup>].

Radiální tok kapaliny nastává při překročení limitu tlakové deformace kapaliny. Limitní hodnotu tlakové deformace kapaliny lze vyjádřit jako

$$\frac{v}{c_1} = \sin\theta \quad [-] \quad (6)$$

kde:  $\theta$  – úhel, který svírá povrch kapky s povrchem materiálu [8] .

Rychlost radiálního toku kapaliny po povrchu materiálu může být až pětinašobně vyšší než je dopadová rychlost paprsku a je ovlivněna tvarem čela paprsku [9]. V důsledku radiálního toku kapaliny je tedy povrch rozpojovaného materiálu zatěžován nejen normálovými silami od dopadu paprsku, ale také silami smykovými. Je-li povrch materiálu nerovný či jakkoliv narušený (což je případ betonového povrchu), tyto vysoké smykové síly působí na výčnělky na povrchu. Např. dopadové rychlosti paprsku kolem 90 m.s<sup>-1</sup> vytvoří na drsném povrchu i vysoce pevných materiálů lokální smykové trhliny [8].

Rozložení sil při dopadu kapalinového paprsku na pevný betonový povrch lze tedy sumarizovat následovně: nejprve je malá centrální plocha při prvním kontaktu paprsku s materiálem stlačena impaktním tlakem  $p_i$ . Velikost tlaku je dána vztahem (1), poloměr (či polovina šířky) kontaktní plochy vztahem (3). Původní plocha dotyku se v průběhu dopadu paprsku postupně zvětšuje až do okamžiku, kdy nastane radiální tok kapaliny ven z místa dopadu, tj. až je dosaženo kritické hodnoty úhlu mezi vnějším povrchem kapaliny a dopadovou plochou (6). V této fázi prudce poklesne tlak podél vnějšího kontaktu paprsku s dopadovou plochou. S rozvíjejícím se radiálním tokem kapaliny dojde k opadnutí rázového tlaku v centrální části dopadu a maximální tlak na dopadovou plochu se pak rovná centrálnímu stagnačnímu tlaku pro nestlačitelnou kapalinu (5). Vlivem radiálního toku kapaliny směrem ze středu místa dopadu se mohou na drsném povrchu dopadové plochy objevit vysoké smykové síly [9].

### 2.3.2 Abrazivní kontinuální vodní paprsek

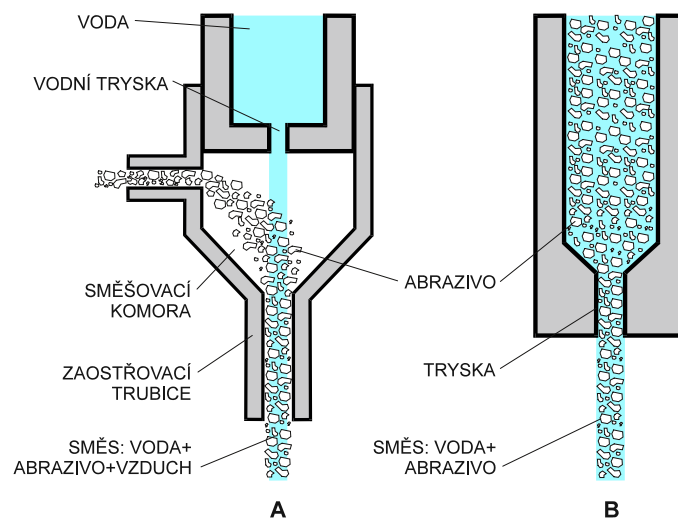
Abrazivní vodní paprsek využívá k dělení materiálů hydroabrazivní účinek směsi kapaliny a abrazivního materiálu. Pokud přidáme do paprsku abrazivní částice, řezné schopnosti paprsku se výrazně zvýší. Porušování materiálů působením abrazivního paprsku je podobné vysokorychlostní erozi zjištěné při dopadu pevných částic na materiál. Voda slouží nejen k urychlování částic abraziva, ale také jako prostředek pro neustálé vyplavování spotřebovaného abraziva a zbytků řezaného materiálu, takže dopadající paprsek působí přímo na nově vznikající povrch. U čistého kontinuálního VVP se při rozpojování materiálů uplatňuje především tlak vznikající v důsledku změny hybnosti pohybujícího se kapalinového proudu při dopadu na překážku, pronikání kapaliny o vysokém tlaku póry, kavitační jevy apod. Naproti tomu u abrazivního paprsku je vliv kapaliny podružný, kapalina způsobuje především vyplavování materiálu z řezu. Vlastní úběr materiálu je dán zrnem abrazivního materiálu, které je díky své pevnosti schopné při dopadu rozrušovat řezaný materiál. Úběr materiálu je obdobný jako u mechanických nástrojů, tj. jedná se o třískové obrábění a broušení. Rozdíl ve výsledcích řezání klasickým mechanickým řezným nástrojem a abrazivním vodním paprskem je v tom, že mechanický nástroj má trajektorii řezu vzhledem k řezanému předmětu pevně určenou upínacími prvky. Pracovní nástroj abrazivního paprsku - zrna abraziva - má díky relativně volnému zastoupení v proudu kapaliny možnost snadno měnit dráhu proti původnímu směru. Tím je zajištěno, že relativně pevnější oblasti v řezaném materiálu mohou abrazivní paprsek vychýlit a tím dojde k selektivnímu odběru méně pevného materiálu [10].

Existují dva systémy pro generování abrazivního paprsku – systém s přísáváním abraziva (tzv. injection jet) a systém suspenzní (tzv. suspension jet) [11], [12], [13].

U systému s přísáváním abraziva (injection jet) proudí tlaková voda z čerpadla do trysky, za kterou je umístěná speciální směřovací komora. Touto komorou prochází kapalinový paprsek rychlostí až  $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a tím vytváří v prostoru směřovací komory podtlak, kterým jsou přísávány abrazivní částice. Částice jsou strhávány proudem vody a na výstupu z komory je směs vody a abrazivních částic usměrněna abrazivní tryskou. Na řezaný materiál dopadá takto vytvořený abrazivní paprsek rychlostí až  $750 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Nevýhodou tohoto způsobu generování abrazivního paprsku je ztráta energie proudu vody v procesu urychlování abrazivních částic. Spotřeba abraziva je 0,2 až 0,4 kg/min.

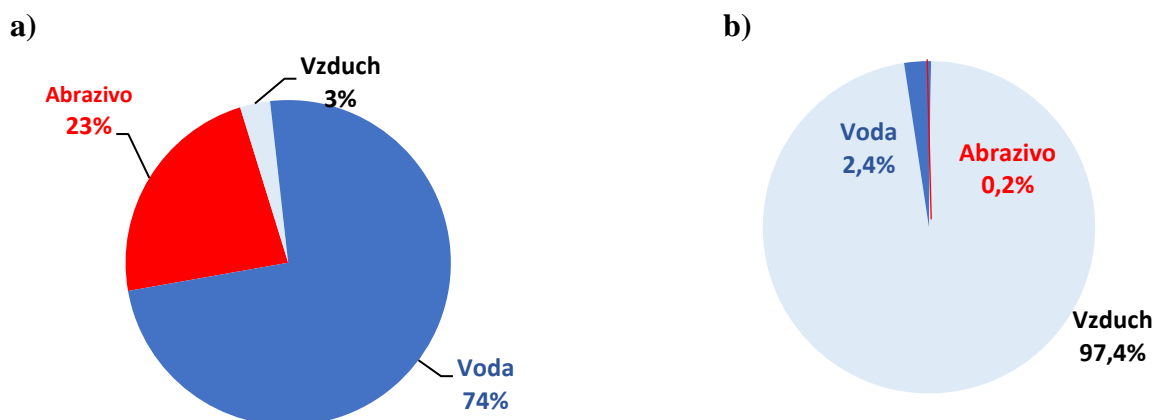
U suspenzního systému (suspension jet) se vytváří směs vody a abraziva ještě před tryskou a takto vzniklá suspenze je vytlačovaná přes speciální trysku. Výhodou tohoto způsobu generování abrazivního paprsku je to, že nedochází ke ztrátě energie paprsku v procesu urychlování abrazivních částic, nevýhodou je silné opotřebení těch součástí systému, které jsou ve styku s abrazivní suspenzí. Spotřeba abraziva u suspenzního vodního paprsku je více než 1 kg/min.

Schématické znázornění systému s přísáváním abraziva a suspenzního systému pro řezání abrazivním VVP je zobrazeno na následujícím obrázku.



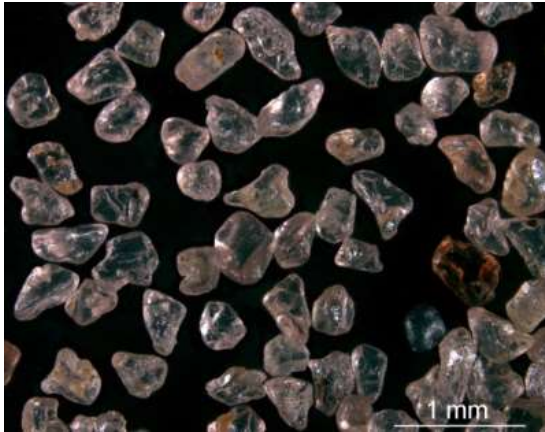
**Obr. 2-1** Schéma systému s přísávaní abraziva (injection jet) A a suspenzního systému (suspension jet) B pro řezání abrazivním VVP (Autor obrázku: Ing. Libor Šitek, Ph.D.) [14]

Řezný nástroj, který vystupuje z abrazivní trysky, je tvořený abrazivem, vodou a vzduchem. Zastoupení jednotlivých složek je zobrazeno na následujícím obrázku.



**Obr. 2-2** Zastoupení jednotlivých fází v kapalinovém abrazivním paprsku a) hmotnostní zastoupení, b) objemové zastoupení (překresleno podle [15])

Jako abrazivo se pro aplikace ve stavebnictví nejčastěji používá granát (alamandin) nebo oxid křemičitý  $\text{SiO}_2$ , je možné používat také další typy granátů (andradity a grossulary), olivín a průmyslově vyrobená abraziva (např. Fe- a Cu-strusky) [16], [17]. Velikost zrn abraziva je obvykle do 0,2 mm.



**Obr. 2-3 Granátový písek**



**Obr. 2-4 Olivínový písek**

Vzhledem k jinému mechanismu porušování (než u paprsku bez abraziva) dochází k výraznému rozpojování betonu řezáním do velkých hloubek. V praxi slouží abrazivní vodní paprsek, k řezání betonových dílců a částí konstrukcí případně k vytváření hlubokých zářezů do konstrukce. Hloubka řezu závisí výrazně na struktuře betonu (velikost a pevnost kameniva, přítomnost pórů, armování apod.) a parametrech paprsku. Boční plochy řezu mají ve větších hloubkách typický „drážkovaný“ vzhled (podobné u všech paprskových technologií – laser, plasma apod.) [14].

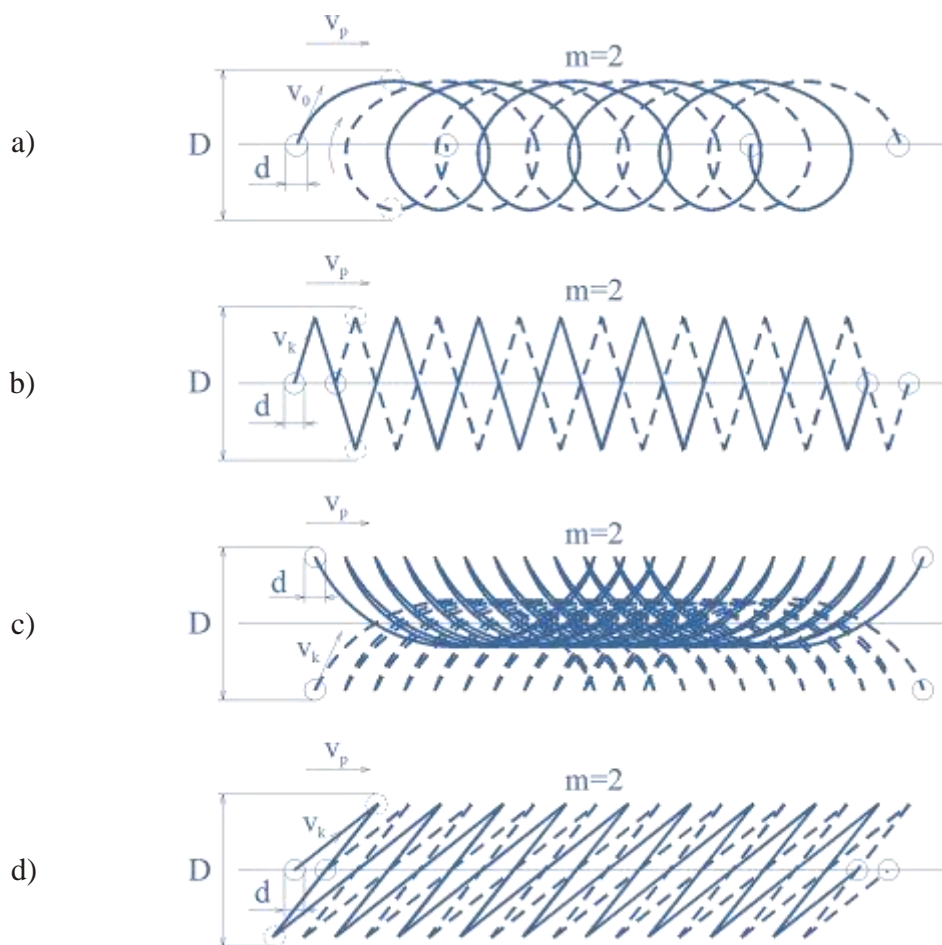


**Obr. 2-5 Kvalita řezu provedeného abrazivním vodním paprskem  
(Autor obrázku: Ing. Libor Sitek, Ph.D.)**

### **2.3.3 Složené (několikanásobné) vodní paprsky**

Při sanacích betonových konstrukcí se pro odstraňování porušeného betonu nejčastěji používají hlavice s více tryskami, které vytvářejí několikanásobné paprsky. Cílem použití těchto vícenásobných paprsků je pokrytí větší plochy při jednom průchodu a rovnoměrnější rozložení energie po ošetřované ploše. Zvýšený účinek vodního paprsku je dosahován zvýšením tlaku vody nebo snížením rychlosti pohybu rotační hlavice nad materiálem a tím zajištění delší doby působení paprsku na plochu. Optimalizací umístění a pohybu trysek pro zajištění ideálního „pokrytí“ odstraňované plochy se zabýval např. Momber [12], [18], [19].

Hlavice konají nejčastěji rotační, kmitavé nebo vibrační pohyby. Stopy, které zanechávají paprsky na povrchu porušovaného materiálu, jsou pak většinou složeny z několika jednoduchých pohybů. Složení pohybů při vícenásobném průchodu paprsku umožňuje, aby jedním místem prošel paprsek vícekrát, nebo aby procházel v dostatečné blízkosti. Přitom je díky bočním tlakům při dané pevnosti materiálu dosaženo rozrušení a vylomení materiálu do určité hloubky. Při opakovaných průchodech rotačního paprsku toutéž stopou na povrchu materiálu dochází k překrývání drah paprsků - viz. Obr. č. 2-6. Při teoretických výpočtech vztahy zahrnují především vzájemné vazby postupové rychlosti, obvodové rychlosti, průměru trysky, potřebného počtu průchodů paprsku tímtož bodem na povrchu materiálu a počtu otáček hlavice nástroje [18].



**Obr. 2-6 Čtyři základní typy kmitajících vysokorychlostních vodních paprsků, schématické znázornění stop průchodů paprsku po povrchu materiálu:**

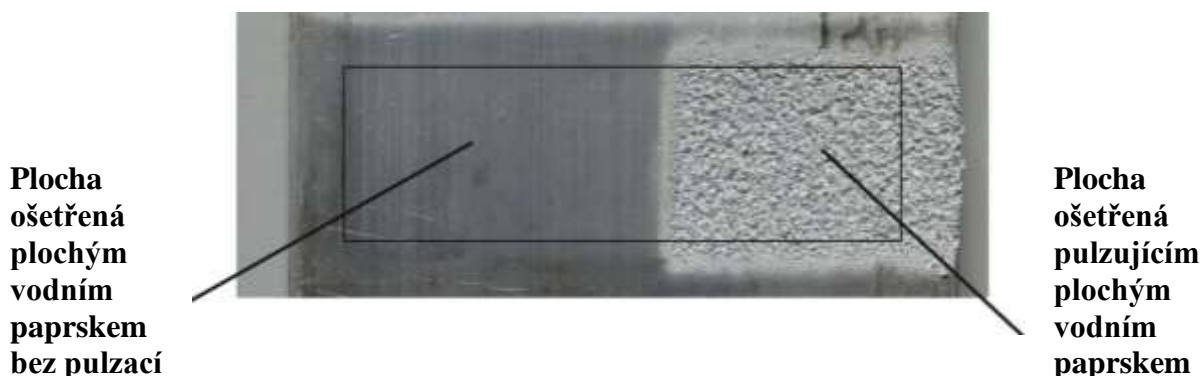
**a) Rotační b) Kolmo kmitající paprsek c) Paprsek s kývavým pohybem d) Šikmo kmitající paprsek**

**D – šířka drážky, d – průměr stopy paprsku na povrchu vzorku,  $v_0$  – obvodová rychlost,  $v_k$  – efektivní rychlost oscilačního nebo kývavého pohybu,  $v_p$  – rychlost pohybu řezacího nástroje, m – počet trysek v řezacím nástroji.**

**(Autor obrázku: Ing. Josef Foldyna, Ph.D.) [14]**

### 2.3.4 Plochý paprsek

Dalším typem paprsku, který umožňuje rozložit energii paprsku na větší plochu, je tzv. plochý (vějířovitý) paprsek. Tento typ paprsku se v současné době při sanacích betonových konstrukcí používá pouze ojediněle, a to z důvodu nízké účinnosti. Plochý paprsek je generovaný pouze jednou tryskou. Protože se jeho energie rozloží do poměrně velké šířky, není plochý paprsek při běžně užívaných parametrech schopen povrch betonu dostatečně otryskat. Plochý paprsek byl vyvinut pro speciální aplikace jako je čištění, odstraňování okují z povrchů apod. Pokud do plochého paprsku prostřednictvím akustického generátoru zavedeme vysokofrekvenční pulzace, získáme výrazně větší účinnost tohoto paprsku [20], [5], [5], [12], [21]. Pulzující plochý paprsek je pak schopen i při použití běžných vysokotlakých zařízení užívaných k sanacím porušit beton [22], [23]. Efekt účinku pulzů v plochem vodním paprsku je znázorněn na následujícím obrázku.



**Obr. 2-7** Efekt účinku pulzujícího plochého vodního paprsku v porovnání s plochým vodním paprskem bez pulzací, tlak vody 30 MPa, rychlost posuvu trysky 1 m. min<sup>-1</sup>. Testováno na hliníkovém vzorku (Autor obrázku: Ing. Libor Sitek, Ph.D.)

### 2.3.5 Kavitační paprsky

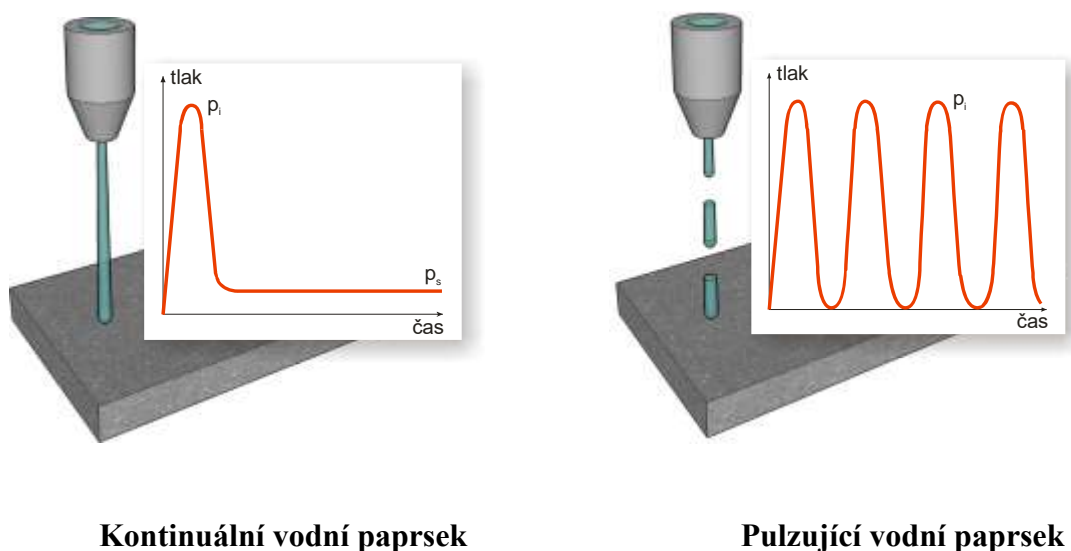
Kavitační paprsek je forma kontinuálního paprsku, ve kterém se různými metodami (vlození válcového tělesa do osy trysky, vytvoření víru v trysce, přerušování toku kapaliny clonami apod.) záměrně vyvolává vznik a růst kavitačních bublin. Změnami proudění v kapalině dochází podle Bernoulliho rovnice k místním změnám tlaku. Dojde-li při dané teplotě k poklesu tlaku pod tlak nasycených par, dochází k místnímu odpařování, které v kapalině vytváří bubliny par. Jestliže tlak opět stoupne, bublina zaniká formou rázu. Doba rázu je velmi krátká, řádově v  $\mu\text{s}$ . Bublinám v kavitačním paprsku je dovoleno růst, pokud jsou nesené proudem. Po dopadu na povrch řezaného nebo čištěného materiálu pak vlivem stagnačního tlaku zanikají. Při zániku každé bubliny vzniká mikropaprsek, který na povrchu materiálu vyvolá napětí několikanásobně převyšující pevnost materiálu. Porušení materiálu způsobené zánikem jedné individuální bubliny je nepatrné, ovšem kumulativní efekt může způsobit rozsáhlé porušení [24]. Je-li paprsek vnořen do vody, porušování materiálů kavitačními efekty je nesrovnatelně výraznější [5], [25]. Kavitační paprsky jsou v současnosti komerčně využívány zejména při čištění povrchů.

### 2.3.6 Pulzující vodní paprsek

Generování adekvátních vysokofrekvenčních pulzů v proudu tlakové vody ještě před tryskou umožňuje vytvořit pulzující kapalinový paprsek, který opouští trysku jako paprsek kontinuální a teprve v určité vzdálenosti od trysky se formuje do jednotlivých shluků vody.



Výhoda tohoto paprsku před kontinuálním je založena na skutečnosti, že dopadem jednotlivých shluků vody pulzujícího paprsku se na dopadové ploše cyklicky generuje impaktní tlak  $p_i$  (1), který několikanásobně převyšuje stagnační tlak  $p_s$  (5) vznikající působením kontinuálního paprsku za jinak stejných pracovních podmínek. Vlivem účinků pulzujícího paprsku navíc dochází k únavovému a smykovému namáhání v materiálu cyklickým zatěžováním dopadové plochy, případně působením radiálního vysokorychlostního toku kapaliny po povrchu. To dále zvyšuje účinnost pulzujícího kapalinového paprsku v porovnání s kontinuálním [26], [27], [27], [21], [28].

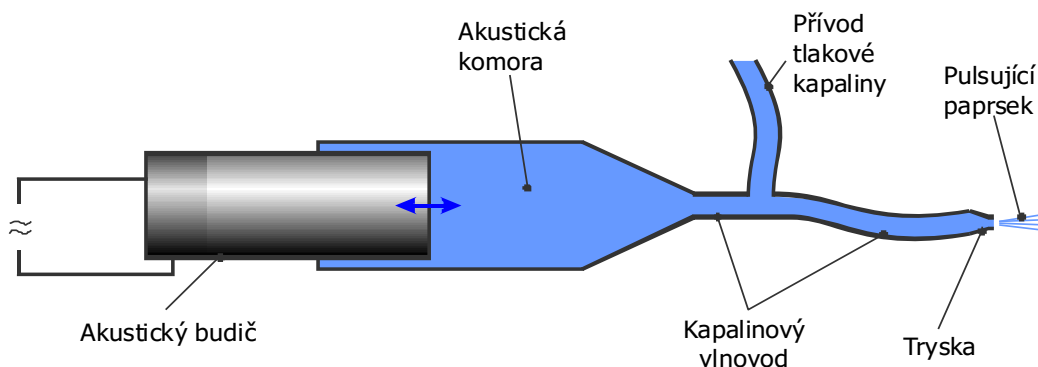


**Kontinuální vodní paprsek**

**Pulzující vodní paprsek**

**Obr. 2-8 Porovnání účinku kontinuálního a pulzujícího vodního paprsku,  $p_i$  – impaktní tlak,  $p_s$  – stagnační tlak (Autor obrázku: Ing. Libor Sitek, Ph.D.)**

Doposud bylo testováno několik typů zařízení ke generování vysokofrekvenčních pulzujících kapalinových paprsků, např. vnitřní mechanické modulátory proudu [29], Helmholtzovy oscilátory [30], samorezonanční trysky [31] a ultrazvukové trysky [32], [33]. Hlavními nedostatky těchto zařízení jsou však většinou malá životnost, případně nízká úroveň modulace.



**Obr. 2-9 Schéma vysokotlakého systému s integrovaným akustickým generátorem tlakových pulzací (Autor obrázku: Ing. Josef Foldyna, CSc.) [9]**

Vysokotlaký systém s integrovaným akustickým generátorem tlakových pulzací je tvořený z válcové akustické komory připojené ke kapalinovému vlnovodu. Ten je na jednom konci připojen ke zdroji tlakové kapaliny, na druhém k trysce. Akustický budič sestává z piezoelektrického měniče a válcového vlnovodu (viz Obr. 2-9) umístěného v akustické komoře. Tlakové pulzace se generují v akustickém budiči, v akustické komoře naplněné tlakovou kapalinou jsou pak zesilovány mechanickým zesilovačem pulzací a přivedeny kapalinovým vlnovodem do trysky. Stlačitelnost kapaliny spolu s naladěním akustického systému jsou využity k efektivnímu přenosu energie pulzů z generátoru do trysky případně systému trysek, kde se tlakové pulzace mění na rychlostní. Takovéto zařízení může být použito ke generování jednoduchých i několikanásobných pulzujících paprsků (např. rotačních) [9].

Technologie pulzujících paprsků je poměrně nová a není běžně užívána v praktických aplikacích. Unikátní metoda generování pulzujícího vodního paprsku byla vyvinuta na Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i. v Ostravě. Tato metoda je založena na vytváření akustických vln působením akustického budiče na tlakovou kapalinu a jejich přenosu vysokotlakým systémem k trysce. Při řešení problematiky vysokorychlostních vodních paprsků výzkumný tým Ústavu geoniky AV ČR realizoval tyto patenty:

- Foldyna, J. a Švehla, B.: Method of generation of pressure pulsations and apparatus for implementation of this method. US patent No. 07740188, 2010 [34]
- Foldyna, J.; Švehla, B.: Způsob generování tlakových pulzací a zařízení pro provádění tohoto způsobu. CZ patent No. 299412, 2005 [35]
- Foldyna, J. a Švehla, B.: Method of generation of pressure pulsations and apparatus for implementation of this method. EU patent EP1863601, 2006 [36]
- Bortolussi, A., Ciccu, R., Foldyna, J., Sitek, L. Procedimento di trattamento di materiali, in particolare materiali lapidei, mediante getti di fluido pulsanti ed apparato per l'esecuzione di tale procedimento. Treatment process of materials, in particular stones, using pulsating jet technology and apparatus to obtain that process, 2011, číslo patentu: IT0001388844 [37].

Na Obr. 2.10 je fotografie pulzujícího vodního paprsku vysokorychlostní kamerou. Je patrné zřetelné shlukování kapaliny v důsledku různé rychlosti toku částic v důsledku tlakových pulzů. Jednotlivé shluky kapaliny způsobují krátkodobé zvýšení tlaku v místě nárazu na povrch materiálu až na tzv. impaktní tlak (1), který je několikanásobně vyšší než stagnační tlak (5) způsobený kontinuálním proudem kapaliny.

Cyklické vysokofrekvenční (20 kHz) zatěžování povrchu porušovaného materiálu změnami tlaku způsobí jeho porušení při několikanásobně nižších tlacích vody (30 MPa), než jsou tlaky v současnosti běžně užívané (150 – 200 MPa).



**Obr. 2-10 Pulzující vodní paprsek – fotografováno digitální kamerou, osvětlení pulzujícím laserem (Autor fotografie Ing. Josef Foldyna, CSc.) [38]**



## 2.4 PŮSOBENÍ VYSOKORYCHLOSTNÍHO VODNÍHO PAPERKU NA BETON

Vysokorychlostní vodní paprsek je schopný rozrušit pevné materiály přenosem energie na extrémně malou plochu. Mechanismus porušování betonu působením vodního paprsku je komplikovaný. Základním destrukčním činitelem je stagnační tlak: dopadne-li vodní paprsek na pevný povrch, na povrchu materiálu se vytváří impaktní tlak (1) a po určité době stagnační tlak  $p_s$  (5). Rozborem působení vodního paprsku se zabývala řada autorů [7], [6], [39], [8], [5].

Rozdíl mezi stagnačním tlakem  $p_s$  na povrchu a tlakem uvnitř materiálu nutí určitý objem vody proniknout do struktury materiálu. Pokud část vody do materiálu pronikne, mohou nastat tři případy:

1) Voda vteče do trhliny a na jejím čele vytvoří odpovídající napětí. Porušení začíná v oblasti mezi cementovou matricí a kamenivem, která je nejslabším článkem běžného betonu. Další šíření trhliny je pak ovlivněno zejména velikostí kameniva a jeho distribucí.

2) Voda vteče do uzavřené kapiláry, kde způsobí zesílení tlaku. Paprsek, který narazí na vstupní otvor kapiláry, pak do této kapiláry přepravuje vodu a vytěsňuje vzduch.

3) Voda teče přes otevřený systém pórů a vytváří třecí sílu na strukturní elementy (např. zrna kameniva). Pokud třecí síla působící na konkrétní zrna překročí jeho kohezní síly k sousedním zrnům, dojde k odstranění tohoto zrna [20], [12].

Hlavní destrukční mechanismy vodního paprsku na beton popisuje také Medeot [40]:

Přímé působení

- Přetlakování trhlín
- Kavitace.

Základní parametry pro hodnocení povrchu betonu po otryskání vodním paprskem jsou dle Mombera [12]:

- Hloubka odstraňované vrstvy  $h_M$  [mm]
- Odstraněný objem  $V_M$  [m<sup>3</sup>]
- Objemová rychlost odstraňování  $V_M'$  [m<sup>3</sup>/hod]
- Šířka odstraněné vrstvy  $w_M$  [mm].

Pro kontinuální vodní paprsek platí vztah pro odstraněný objem  $V_M$  [m<sup>3</sup>]

$$V_M = \frac{\pi \times w_M^2 \times h_M}{4} \quad (7)$$

kde:  $h_M$  - hloubka odstraňované vrstvy v mm  
 $w_M$  - šířka odstraněné vrstvy v mm.

Objemová rychlost odstraňování betonu  $V_M'$  [m<sup>3</sup>/hod] je objem odstraněný za daný čas.

$$V_M' = \frac{V_M}{t_\varepsilon} \quad (8)$$

kde:  $t_\varepsilon$  je doba provádění operace [hod].

Objemová rychlost odstraňování musí být co nejvyšší.

Energetická náročnost hydrodemolice je dána specifickou energií  $E_s$  [kJ/m<sup>3</sup>]. Je vhodné, aby parametr energetická náročnost byl co nejmenší.

$$E_s = \frac{E_j}{V_M} \quad (9)$$

kde:  $E_j$  je kinetická energie vodního paprsku v kJ.  
 $V_M$  je odstraněný objem v m<sup>3</sup> [12].

Dalším cílovým parametrem je kvalita ošetřeného povrchu. Kvalita povrchu betonu je hodnocena různými způsoby v souvislosti s důvodem použití technologie vodního paprsku pro ošetření betonu. Při užití vodního paprsku pro přípravu povrchu při sanacích je vhodným kritériem pevnost betonu povrchových vrstev v tahu (min. 1,5 MPa) [2].

Při teoretických výpočtech je základním kritériem účinnosti vysokorychlostního vodního paprsku hloubka porušení materiálu. Fyzikální vztahy zahrnují především vztah postupové rychlosti, obvodové rychlosti, průměru trysky, potřebného počtu průchodů paprsku tímtož bodem na povrchu materiálu a počtu otáček (kmitů) hlavičky nástroje [18], [41]. Při rozboru změn, které nastávají během porušování křehkých nehomogenních materiálů (horniny, betony) několikanásobným průchodem paprsku toutéž stopou se ukázalo, že vliv na vývoj hloubky porušení mají při opakovaných průchodech paprsku tyto faktory:

- útlum paprsku v prostředí mezi tryskou a materiálem
- prostředí vzniklé v drážce.

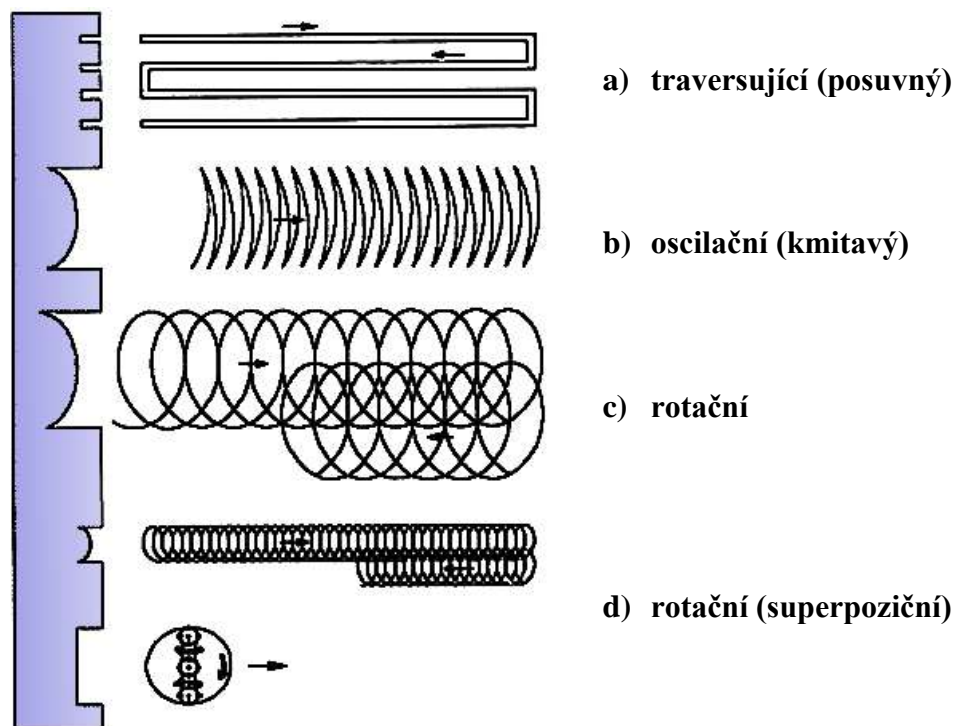
Vliv prostředí v drážce je významný zejména proto, že rozrušený materiál i kapalina se nestačí dostatečně rychle odplavovat. Proto je třeba do teoretických vztahů pro hloubku porušení zahrnout útlumový součinitel respektující změněné podmínky pro ohyb kapalinového paprsku v drážce proti „volnému“ prostředí mezi tryskou a materiálem. Na základě výzkumů prováděných na Ústavu Geoniky AV ČR, v. v. i., na Vysoké škole báňské – Technické universitě Ostrava a na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě stavební, byly získány experimentální výsledky a odvozen teoretický fyzikální vztah pro výpočet hloubky porušení materiálu v závislosti na různých parametrech kapalinového paprsku [41], [18]. Z provedených výzkumů vyplývá, že hloubka porušení materiálu při jednom průchodu paprsku závisí kromě tlaku, průtoku, vzdálenosti a úhlu především na rychlosti pohybu stopy paprsku po povrchu materiálu a tato rychlost je dána rychlostí rotace, resp. parametry kmitavého či kývavého pohybu. Celková hloubka porušení materiálu je pak dána součtem hloubek při všech průchodech [14].

Z hlediska technologie vodního paprsku ovlivňují účinnost vysokorychlostního vodního paprsku parametry procesní a hydraulické [12].

Procesní parametry hydrodemolice:

- vzdálenost trysky od povrchu rozpojovaného materiálu  $x$  [m]
- rychlost posunu  $v_r$  [m.s<sup>-1</sup>] (rychlost posuvu trysky zahrnuje další parametry, jako je počet průchodů trysky  $n_s$  a doba provádění operace  $t_e$  [hod])
- velikost posunu paprsku  $y$  [m]
- úhel dopadu paprsku  $\varphi$  [°]
- způsob vedení trysky.

Trysky jsou umístěny v hlavici, která je vedena a umožňuje pohyb trysky různými způsoby a směry. Různé trajektorie paprsku jsou znázorněny na Obr. 2-11.



**Obr. 2-11** Příklady trajektorií pohybu trysek. (Traverzující (posuvný), oscilační (kmitavý), rotační, rotační (superpoziční) paprsek. Překresleno podle [42])

Nejčastější trajektorie pohybu trysek jsou prostý průchod, kmitání a rotace. Porovnání různých způsobů pohybů trysky provedli například [43], [42], [18], [21]. Kauw a Werner prokázali, že oscilační a rotační pohyb trysky jsou účinnější než jednoduchý posun. Při použití obvyklého tlaku čerpadla 125 MPa při hydrodemolici může být rychlost odstranění při použití kmitajícího (oscilujícího) paprsku až dvojnásobná oproti prostému pojezdu trysky. Tím může být dosaženo větší šířky řezu při zachování dosažené hloubky řezu.

Hydraulické parametry hydrodemolice charakterizují systém pumpa – tryska:

- operační tlak  $p$  [MPa]
- objemový průtok  $Q'_A$  [l/min]
- průměr trysky  $d_N$  [mm].

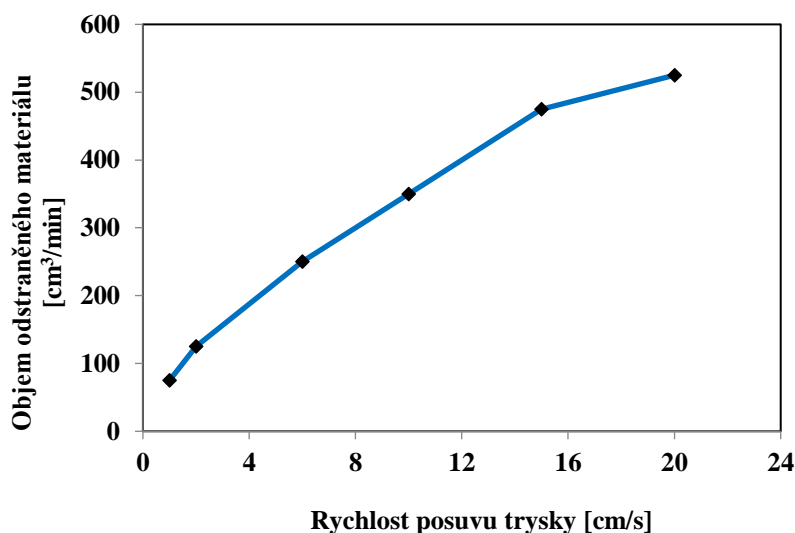
Podle ACI 555 Removal and Reuse of Hardened Concrete [4] závisí účinnost systému VVP zejména na:

- typu trysky (tvar, konfigurace)
- vzdálenosti trysky od povrchu
- tlaku vody
- době kontaktu vodního paprsku s povrchem betonu.

Vliv vzdálenosti trysky od povrchu betonu na účinnost systému VVP závisí na typu použitého paprsku. Pro kontinuální paprsek platí, že optimální hodnota vzdálenosti trysky od povrchu betonu je ovlivněna velikostí použitého tlaku. Při tlacích vyšších než 200 MPa se

doporučuje vzdálenost trysky od povrchu co nejnižší, zejména pro trysky malých průměrů. Podle Wernera pokud vzroste vzdálenost trysky od povrchu na 200 % pro průměr trysky 0,3 mm, účinnost poklesne na 70%, pokud zvětšíme vzdálenost na 500 %, účinnost poklesne na 50 %. Optimální relativní vzdálenost  $x_0/d_N$  je pro tlaky typicky používané pro hydrodemolici (90 až 140 MPa) rovna 20 [12].

Objem odstraněného materiálu roste se zvyšující se rychlostí posuvu trysky, ale zároveň platí, že při extrémně vysoké rychlosti posuvu trysky se množství odstraněného materiálu blíží nule. Příklad vlivu rychlosti posuvu trysky na množství odstraněného betonu je znázorněn na Obr. 2-12.



**Obr. 2-12 Vliv rychlosti posuvu trysky na objem odstraněného betonu. Beton B 35, kamenivo štěrk z řeky Rýn, provozní tlak vodního paprsku 100 MPa, průměr trysky 1,0 mm. Překresleno podle [44]**

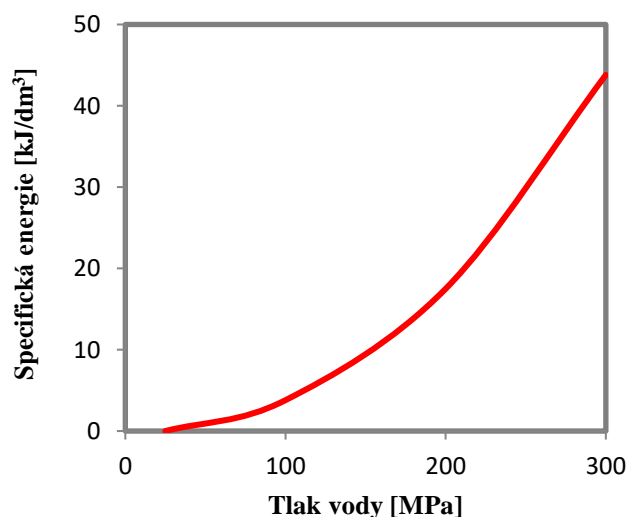
### 3 BEZPEČNOSTNÍ RIZIKA PŘI UŽITÍ TECHNOLOGIE VYSOKORYCHLOSTNÍHO VODNÍHO PAPRSKU

Z hlediska bezpečnostních parametrů jsou technická zařízení pro technologii vysokorychlostního vodního paprsku stále zdokonalována. Na druhou stranu se zvyšuje rozsah pracovních tlaků a technologie vodního paprsku je užívána v širokém spektru aplikací a v interakci s různými typy materiálů. Významnou roli hrají také nároky zadavatelů prací na rychlost provedení výkonu. Tyto skutečnosti kladou zvýšené nároky na obsluhu zařízení pro technologii vysokorychlostních vodních paprsků.

Nejčastějším způsobem použití vysokorychlostního vodního paprsku ve stavebnictví je pracoviště s vysokotlakým agregátem a hadicovým vedením, na jehož konci je pracovník s vysokotlakou pistolí opatřenou nástavcem s pevnou nebo rotační tryskou. Obsluha vysokotlaké pistole zpravidla ošetřuje betonové nebo ocelové povrchy nebo části zařízení znečištěná různými technologiemi. Tyto práce probíhají často na lešení, na lávkách nebo na plošinách. Pro obsluhu vodního paprsku zde nastávají zejména tato rizika:

- riziko prací ve výškách
- zatížení hlukem
- riziko práce s vysokotlakým zařízením [44].

Razance vodního paprsku u vysokotlakých agregátů je velmi vysoká, protože stroje a příslušenství jsou konstruovány k odstraňování betonových vrstev, bourání a odstraňování nátěrů a nánosů. Vodní paprsek představuje velký zdroj energie. Na obr. 3-1 je znázorněna specifická energie paprsku v souvislosti s tlakem proudu vody.



Obr. 3-1 Specifická energie uložená ve vysokorychlostním vodním paprsku [45]

#### 3.1.1 Zranění pracovníků při práci s vysokorychlostním vodním paprskem

U ručních nástrojů drží obsluha v ruce výstup vysokotlakého agregátu o výkonu okolo 100 kW pouze prostřednictvím vysokotlaké pistole. Volný konec pistole tak představuje ohrožení okolí. Nejvíce jsou ohroženy nechráněné tkáně pracovníka obsluhy.

Ve stavebnictví jsou používané pracovní tlaky až 280 MPa. Tyto tlaky zajišťují rychlý průnik materiálem a prosycení materiálu velkým objemem vody v krátkém časovém intervalu. Pokud ale paprsek přímo zasáhne lidskou tkáň, dochází k těžkým poraněním. Léčení vyžaduje často zásah plastického chirurga a poranění ponechávají zpravidla už nenapravitelné změny. I malá poranění vodním paprskem jsou velmi nebezpečná z důvodu nasycení tkáně vodou s bakteriálním znečištěním a často se po krátkém čase vystupňují do těžkých zánětlivých onemocnění vyžadujících následné chirurgické zákroky. Vyskytují se i závažné úrazy, kdy paprsek způsobil těžké krvácení a následné poškození tkání.

Při poranění pracovníka vodním paprskem výrazně ovlivňují závažnost zranění zejména tyto faktory:

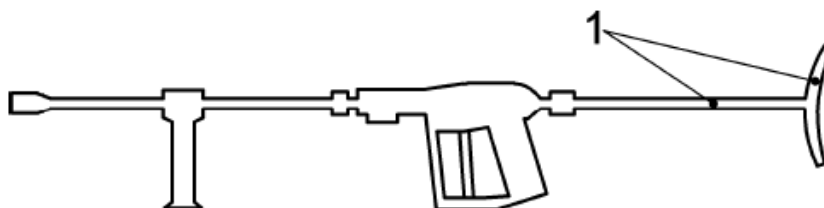
- Při kontaktu s lidskou tkání dochází k fyzickému poškození tkání, které je způsobeno vysokou energií paprsku. Zranění je podobné poškození tkáně projektilem. Dochází k přímé penetraci kapalinového paprsku do tkáně, rozřezání tkání a šíření tlakové vlny uvnitř tkání.
- Je třeba definovat chemické vlastnosti řezné kapaliny - jedná se často o znečištěnou vodu, jsou přítomny abrazivní částice, při čištění povrchů se používají např. ředidla.
- Dalším negativním aspektem jsou biologické podmínky v místě zranění – v poškozených tkáních vznikají záněty, do těla se dostávají bakterie pod vysokým tlakem.

Jsou vypracovány bezpečnostní zásady užití vodního paprsku. Snahou je minimalizovat kontakt vodního paprsku s obsluhou. Důležitým sledovaným limitem je reakční síla vodního paprsku.

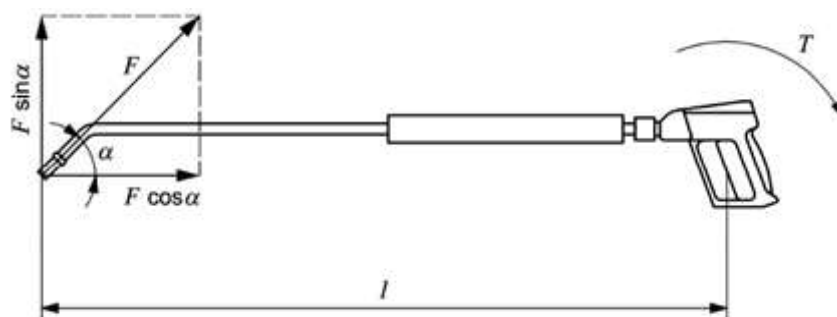
### 3.1.2 Reakční síla vodního paprsku

Hranice mezi ručními a robotizovanými nástroji je dána maximální přípustnou reakční silou  $F$  pro ruční nástroje. Reakční síla je generována vysokorychlostním vodním paprskem. Norma ČSN EN 1829-1 Vysokotlaké vodní proudové čističky - Bezpečnostní požadavky - Část 1: Čističky [46] zakazuje používání ručních stříkacích zařízení, pokud axiální složka zpětné (reakční) síly  $F$  překročí kritickou hodnotu  $F_R = 250$  N (odpovídající hmotnosti 25 kg).

Pokud je zpětná síla v podélném směru větší než 150 N ( $F \cos \alpha$  viz Obr. 3-3), musí být stříkací zařízení vybaveno podpěrou, na kterou se částečně nebo zcela přenáší zpětné síly.



Obr. 3-2 Stříkací zařízení s podpěrou, 1- podpěra, překresleno podle [46]



**Obr. 3-3 Stříkací zařízení – Zpětná síla a generování točivého momentu.**  
**Legenda: F-reakční síla,  $\alpha$ -úhel, l-délka, T-točivý moment, překresleno podle [46]**

Radiální zpětné síly vyplývající z trysky pod úhlem  $\alpha$  a vzdálenost  $l$  mezi tryskou a poziční držení vytvářejí točivý moment  $T$  a musí být kompenzovány například kompenzační tryskou.

$$T = F \times \sin \alpha \times l \quad (10)$$

kde:  $F$  - reakční síla [N]  
 $\alpha$  - úhel [°]  
 $l$  - délka [m].

Složka reakční síly hubice ve směru stříkací pistole  $F_r$  musí být omezena na 150 N.  $F_r$  se vypočítá dle následujících vzorců:

$$F_r = F \times \cos(\alpha) \quad (11)$$

kde:  $\alpha$  - úhel mezi hubicí a rozstříkovacím nástavcem, viz obrázek 2  
 $F$  - je reakční síla ve směru hubice [N].

$$F = \frac{W \times Q}{60} \quad (12)$$

kde:  $Q$  - jmenovitý průtok [l/min]  
 $W$  - rychlost výtoku vody [m/s].

$$W = \sqrt{200 \times \Delta p} \quad (13)$$

kde:  $\Delta p$  - jmenovitý tlak [bar].

Jestliže reakční síla ve směru rukojeti překročí 150 N, musí být spouštěcí zařízení vybaveno podpěrkou, která úplně nebo částečně přenese reakční sílu do těla uživatele. Místo podpěrky může být spouštěcí zařízení vybaveno dvouručním spouštěcím mechanismem, který může pracovat jen tehdy, jsou-li oba obslužné prvky aktivovány současně.

Považujeme-li za bod otáčení střed pažbičky, moment zpětné síly  $T$  na rukojeť nesmí být větší než 20 Nm v jakémkoli směru.  $T$  se vypočítá takto:

$$T = F \times l \times \sin(\alpha) \quad (14)$$

kde:  $l$  - vzdálenost mezi hubicí a spouští [m], viz. Obr. 3-2.

Splnění požadavku se kontroluje výpočtem a prohlídkou [48]. Obrázek 3-4 znázorňuje kritické kombinace provozních tlaků a průtoků.

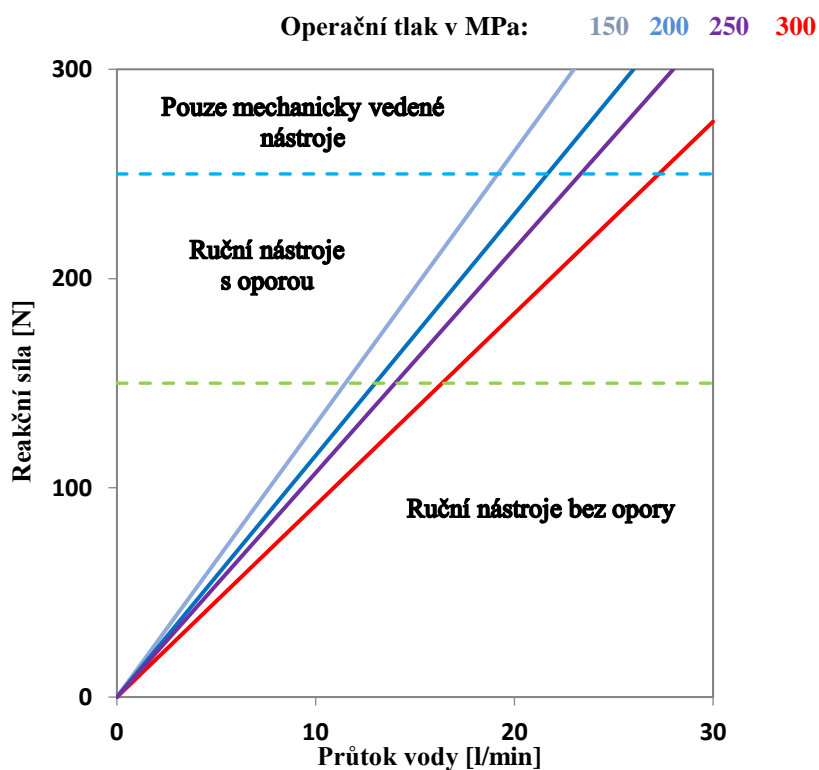
Obecné pravidlo říká, že operátor ručního nástroje je schopen pojmout reakční sílu odpovídající asi jedné třetině své tělesné hmotnosti. Například operátor s tělesnou hmotností 75 kg by mohl odolat reakční síle  $F_R = 250$  N.

Reakční sílu vodního paprsku lze odhadnout pomocí následující rovnice [12]:

$$\dot{I} = \dot{m}_W \times V_j = 0,743 \times \dot{Q}_N \times p^{1/2} = F_R \quad (15)$$

kde:  $I$  - impulsní průtok paprsku,  
 $m_w$  - hmotnostní průtok vody [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]  
 $v$  - rychlost paprsku [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]  
 $p$  - tlak [MPa]  
 $O_N$  - průtok vody [1/min]  
 $F_R$  - reakční síla paprsku [N].

Reakční síla kriticky souvisí s objemovým průtokem (a tedy s velikostí průměru trysky). Například pokud robot pracuje za provozního tlaku  $p = 130$  MPa a objemovém průtoku  $Q_N = 180$  1/min, generuje reakční sílu  $F_R = 1\,510$  N. Hodnota této reakční síly je příliš vysoká pro jakýkoliv ruční nástroj. Z tohoto důvodu je možné efektivní hydrodemolici ve většině případů realizovat pouze s použitím robotické jednotky.



Obr. 3-4 Kritické podmínky pro použití ručních nástrojů pro vodní paprsek [12]



### 3.1.3 Hluk a vibrace generované zařízeními pro technologii vodního paprsku

Dalším rizikem práce s vodním paprskem je hluk způsobený zejména čerpadly a pohony vysokorychlostního paprsku. Hluk může být snížen použitím komponentů s co nejnižší emisí hluku, izolováním hluku (používání krytů, uzávěr, tlumičů, zástěn) a instalací kabin, které poskytují zvukovou izolaci. Emisní hladina akustického tlaku se určuje podle ČSN EN ISO 11203, měřící vzdálenost je v m [47].

Rizikem jsou také vibrace generované zařízeními pro vysokorychlostní paprsek. Vibrace generované nástrojem jsou přenášeny přes ruku obsluhy. Při dlouhodobém vystavení působení vibrací dochází ke vzniku tzv. „bílých prstů“, přesněji dochází k sekundárnímu Raynaudovu syndromu. Sekundární Raynaudův syndrom z vibrací je způsoben dlouhodobou expozicí vibracím lokálně přenášených na ruce z ručně ovládaného pneumatického nářadí nebo při práci s vibrujícími nástroji a zařízeními. Potřebná délka expozice je uváděna v rozmezí od několika měsíců do 20 let. Expozice vibracím je ovlivněna fyzikálními faktory (pracovní kmitočet stroje, časový průběh a směr působení vibrací, denní a celková doba expozice, zařazení, četnost a délka přestávek v práci s vibrujícími nástroji a zařízeními aj.), biodynamickými (tělesná konstituce, hmotnost, poloha těla a končetin, obsah styčné plochy s vibrujícím nástrojem, velikost vyvozovaných sil aj.) a individuálními faktory (predispozice k rychlému vzniku onemocnění z vibrací, kouření, užívání léků), údržbou nářadí [48]. Jednotlivé pracovní nástroje se vzájemně liší svou nebezpečností. Frekvence vibrací nižší než 2 Hz a vyšší než 1 510 Hz Raynaudův syndrom nezpůsobí.

Přípustný expoziční limit vibrací a stanovení expozice vibracím za pracovní týden je řešen v Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Část čtvrtá. Vibrace na pracovištích [49].

Expoziční limity vibrací podle Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací jsou následující:

Přípustný expoziční limit vibrací přenášených na ruce je vyjádřen průměrnou souhrnnou váženou

- a) hladinou zrychlení  $L_{ahv,8h} = 128$  dB, nebo
- b) hodnotou zrychlení  $a_{hv,8h} = 2,5$  m.s<sup>-2</sup>.

U vibrací přenášených na ruce se přípustný expoziční limit vztahuje k souhrnné hodnotě translačních vibrací stanovených z vážených hodnot zrychlení ve třech navzájem kolmých směrech podle souřadné soustavy ruky.

Přípustný expoziční limit vibrací přenášených zvláštním způsobem na zaměstnance způsobující intenzivní kmitání v horní části páteře a hlavy vyjádřený průměrnou váženou

- a) hladinou zrychlení vibrací  $L_{ahw,8h} = 100$  dB, nebo
- b) hodnotou zrychlení vibrací  $a_{ew,8h} = 0,1$  m.s<sup>-2</sup>.

Přípustný expoziční limit celkových vertikálních a horizontálních vibrací přenášených na zaměstnance vyjádřených průměrnou váženou

- a) hladinou zrychlení vibrací  $L_{aw,8h} = 114$  dB, nebo
- b) hodnotou zrychlení  $a_{ew,8h} = 0,5$  m.s<sup>-2</sup>.

Přípustný expoziční limit celkových vibrací se vztahuje na ustálené i proměnné vibrace a otřesy nebo rázy, pokud hlavní část jejich energie je obsažena ve sledovaném kmitočtovém pásmu. Celkové vibrace rovnoběžné s podélnou osou těla se posuzují způsobem platným pro vertikální vibrace a vibrace ve směrech kolmých na podélnou osu těla způsobem platným pro horizontální vibrace [49].

Z hlediska prevence je nutné využívat technických a technologických opatření k zabránění přenosu a působení vibrací na pracovníka nebo alespoň omezit jejich působení na míru přípustnou podle hygienických limitů. Biologicky významné vibrace přenášené na ruce z ručně ovládaného pneumatického nářadí nebo vibrujících nástrojů mohou současně nebo samostatně poškodit kromě cév také periferní nervy, nebo kosti a klouby. Jako souhrnné označení se používá termín Hand-Arm-Vibration Syndrome [48].

### **3.1.4 Možnosti ochrany pracovníků při práci s vysokorychlostním vodním paprskem**

Pro operátory vodního paprsku jsou vyvinuty systémy osobních ochranných pomůcek, např. ochranné bezpečnostní obleky Water Armour, TurtleSkin. Obleky jsou odolné proti působení chemických látek, poskytují ochranu proti pořezání vodním paprskem, zabraňují oděrkám vznikajících například z volně odletujících betonových částic.

Velkým rizikem je také vymrštění hadice a vysmeknutí hadice z rukou obsluhy. Při určité setrvačnosti vysokotlakého systému a zpožděné reakci obsluhy tryska během zlomku sekundy může zasáhnout části těla pracovníka a způsobit obdobná zranění jako u ruční pistole. Jednou z cest snížení rizikovosti je mechanicky zamezit možnosti vymrštění trysky pomocí mechanických prostředků, tzv. zachytávačů [44].

Mezi vhodná opatření pro ochranu zdraví při práci s vysokorychlostním vodním paprskem patří možná úprava pracovní doby, nastavení režimu práce a odpočinku, střídání pracovníků při práci s vibračními nástroji, ochrana před chladem a vlhkem.

### **3.1.5 Normy a bezpečnost technologie vysokorychlostního vodního paprsku**

Požadavky související s bezpečností pro vysokotlaké vodní proudové čističky s různými pohony (např. elektromotor, spalovací motor, vzduchové a hydraulické) vymezuje norma ČSN EN 1829-1 Vysokotlaké vodní proudové čističky - Bezpečnostní požadavky - Část 1: Čističky [46]. Norma se vztahuje na mobilní a pevné vysokotlaké vodní proudové čističky, ve kterých je tlak vody vytvářený tlakem generátoru/čerpadla a kde je maximální přípustný pracovní tlak vyšší než 35 MPa a zabývá se všemi situacemi, které mohou nastat při montáži, instalaci, provozu a servisu vysokotlakých vodních proudových čističek při těchto aplikacích:

- čištění
- příprava povrchu
- odebírání materiálu
- nová úprava betonu
- řezání.

Souhrnně jsou nebezpečí v souvislosti s vodním paprskem definována normou ČSN EN 1829-1 [46] takto:

- Nebezpečí od předpokládaného výstupu vody pod vysokým tlakem - proud vody opouštějící trysku představuje nebezpečí, které spočívá v efektu abrazivního řezání, v proniknutí do předmětů nebo ve vychýlení vysokotlaké trysky a hadice.

- Mechanická nebezpečí – v důsledku nekontrolovatelného úniku tlakové vody, neúmyslná aktivace ručního stříkacího zařízení, zpětný ráz proudu vody
- Nebezpečí vyplývající z přepravování – překlopení, pád
- Elektrická nebezpečí – kontakt vodního paprsku s elektrickými zařízeními
- Tepelná nebezpečí – riziko popálení v důsledku kontaktu s horkými povrchy
- Nebezpečí způsobená hlukem – riziko ztráty sluchu, hučení v uších
- Nebezpečí způsobená programově řízenými vysokotlakými vodními proudovými čističkami – neúmyslný (nebo úmyslný) výstup proudové vody nebo pohyb zařízení
- Nebezpečí od náhlého spuštění
- Nebezpečí způsobená vibracemi – zejména u ručního stříkacího zařízení.

Bezpečnostní rizika technologie vysokorychlostního vodního paprsku jsou řešena zejména v těchto českých normách:

- ČSN EN 1829-1 Vysokotlaké vodní proudové čističky - Bezpečnostní požadavky - Část 1: Čističky
- ČSN EN 1829-2 Stroje pro obrábění vysokotlakým vodním paprskem – Požadavky na bezpečnost – Část 2: Hadice, hadicová vedení a přípojky
- ČSN EN 809 Kapalinová čerpadla a čerpací soustrojí – Všeobecné bezpečnostní požadavky
- ČSN EN 953+A1 Bezpečnost strojních zařízení – Ochranné kryty – Všeobecné požadavky pro konstrukci a výrobu pevných a pohyblivých ochranných krytů
- ČSN EN 981+A1 Bezpečnost strojních zařízení – Systém akustických a vizuálních signálů nebezpečí a informačních signálů
- ČSN EN ISO 11203 Akustika – Hluk vyzařovaný stroji a zařízeními – Určení emisních hladin akustického tlaku na stanovišti obsluhy a dalších stanovených místech z hladiny akustického výkonu (ISO 11203:1995)
- ČSN EN ISO 12100-2 Bezpečnost strojních zařízení – Základní pojmy, všeobecné zásady pro konstrukci – Část 2: Technické zásady
- ČSN EN ISO 13732-1 Ergonomie tepelného prostředí – Metody posuzování odezvy člověka na kontakt s povrchy – Část 1: Horké povrchy (ISO 13732-1:2006)
- ČSN EN ISO 13849-1 Bezpečnost strojních zařízení – Bezpečnostní části ovládacích systémů – Část 1: Všeobecné zásady pro konstrukci (ISO 13849-1:2006)
- ČSN EN ISO 13857 Bezpečnost strojních zařízení – Bezpečné vzdálenosti k zamezení dosahu k nebezpečným místům horními a dolními končetinami (ISO 13857:2008).

Uvedené české normy se odkazují a jsou ve vztahu k evropským normám. V USA jsou rizika řešena např. v ASTM E1575-12 Standard Practice for Pressure Water Cleaning and Cutting [50], v ACI RAP Bulletin 14, Concrete Removal Using Hydrodemolition [51].

## **4 UŽITÍ TECHNOLOGIE VYSOKORYCHLOSTNÍCH VODNÍCH PAPRSKŮ PRO SANACE BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ**

Jednou z prvních aplikací vodního paprsku ve stavebnictví bylo použití pro čištění potrubních systémů a kanalizace, pro odstraňování nátěrů a pro hydrodemolice. První odborný popis použití vodního paprsku pro odstraňování betonu provedl patrně McCurich and Browse v roce 1972 [52]. Po deseti letech byl dokončen vývoj a bylo představeno první komerční zařízení pro provádění hydrodemolice. Již v roce 1980 kolem 10 % procent firem, které se zabývaly sanací betonu v Rakousku, používalo technologii vysokorychlostního vodního paprsku [12]. Od 80. let 20. století je vysokorychlostní vodní paprsek progresivní technologií pro odstraňování porušeného betonu. Technologie VVP stále prochází změnami a inovacemi. Rozšiřuje se oblast použití této technologie, od čištění povrchů konstrukcí až po lokální odstranění částí betonových konstrukcí a zejména pro sanace betonů.

Požadavky na sanaci betonové konstrukce vychází z aktuálního stavu konstrukce. Beton je při svém použití v konstrukci vystaven působení vnějšího prostředí. Na konstrukci působí řada vnějších vlivů (fyzikálních, chemických a mechanických), v důsledku toho se mění hlavní fyzikální a chemické vlastnosti betonu, beton ztrácí své původní vlastnosti a dochází k jeho poškození a následně k poškození konstrukce. Tento stav je nutné řešit opravou konstrukce - sanací. Sanace betonu je komplexní proces ochrany a opravy betonové konstrukce [2]. Problematika sanací betonových konstrukcí je souhrnně zpracována v publikaci Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí (TP SSBK III, 2012) [2]. Autorský kolektiv zde uvádí poznatky získané při provádění sanací v České republice za předchozích dvacet let a lze zde také nalézt podrobný výčet norem týkajících se problematiky sanací betonových konstrukcí. Podle Technických podmínek pro sanace betonových konstrukcí zahrnuje komplexní proces ochrany a opravy betonové konstrukce tyto etapy [2]:

- definice vlastností výrobků a systémů
- diagnostika konstrukcí a materiálů
- stanovení cílů a strategií sanace betonu
- výběr vhodných zásad a metod
- výběr vhodných technologií
- výběr vhodných materiálů
- kontroly v průběhu provádění ochrany a opravy, předání a převzetí díla.

Technologie vysokorychlostního vodního paprsku je často používanou a kvalitní metodou pro předúpravu povrchu betonu a výztuže při sanacích betonových konstrukcí. Je ale třeba zdůraznit, že v České republice není tato technologie ve stavebnictví tak masivně používána, jako v zemích západní Evropy, USA, Kanadě a Austrálii.

### **4.1 METODY PRO ODSTRANĚNÍ DEGRADOVANÉHO BETONU**

Důležitými operacemi při sanacích betonových konstrukcí jsou odstranění degradovaného povrchu betonu a příprava povrchu betonu pro následnou aplikaci správkových hmot. Pro odstranění degradovaného povrchu betonu je možné použít různé technologie. V souvislosti s požadavkem snižovat náklady na odstranění vrstvy betonu, snižovat míru zatížení okolního prostředí a nutnost zohlednění ekologických aspektů jsou vyvíjeny stále pokročilejší technologie.

ACI 555R-01 Removal and Reuse of Hardened Concrete [4] uvádí tyto základní metody pro odstranění ztvrdlého betonu:

- mechanické a pneumatické rozrušování
- řezání
- frézování
- tryskání
- broušení
- pemrlování
- vrtání
- trhání pomocí výbušnin
- tepelné rozrušování
- hydrodemolice (water-jet blasting).

Podle ACI 555R-01 [4] je při opravách preferováno částečné odstranění kriticky narušených konstrukčních dílů před celkovým nahrazením, jsou zohledňována specifika zajištění přístupu k odstraňovaným částem porušené betonové konstrukce a je zdůrazněna eliminace ohrožení stability opravované konstrukce. Výběr metod a zařízení pro odstraňování betonu nutně zohledňuje také předpisy v oblasti životního prostředí, pracovního prostředí a bezpečnost při práci.

ACI 555R-01 [4] uvádí tyto výhody technologie vysokorychlostního vodního paprsku: Technologie VVP je schopna rozrušit pevné materiály přenosem energie na extrémně malou plochu, vodní paprsek nepředstavuje mechanický kontakt s rozpojovaným materiálem. Destrukce je prováděna pomocí eroze. Paprsek odplavuje porušené části materiálu z ošetřovaného povrchu a nezpůsobuje dodatečný vznik trhlin (na rozdíl od použití pneumatických kladiv, frézování a tryskání).

Tryskání vodou (water blasting) je jako nástroj pro předúpravu povrchu uvedeno také v ČSN EN 1504-10 [53].

Podle TP SSBK III [2] je technologie vysokorychlostního vodního paprsku jednou z metod pro předúpravu povrchu betonu a výztuže. Předúprava betonu je rozčleněna do etap čištění, zdrsňení, odstranění betonu. Předúprava povrchu je technologická operace, odstraňující degradované povrchové vrstvy betonu se sníženou hutností, zkarbonatované, prosycené nežádoucími médii (např. chloridy), eventuálně narušené trhlinami. [2]

Cíle předúpravy povrchu betonu:

- vytvoření únosných soudržných povrchů pro aplikaci a řádné zakotvení správkových hmot, izolačních nebo spojovacích vrstev, popř. ochranných nátěrů,
- změna průřezů, vytvoření prostupů a rozměrové přizpůsobení konstrukce plánovanému využití,
- prevence dalšího oslabování a degradace konstrukce, které mohou být vyvolány zejména pokračující korozí výztuže.

Předúprava povrchu má poskytnout soudržný podklad s dostatečnou tahovou pevností, dostatečně suchý a přiměřeně drsný povrch při vynaložení minimálních nákladů. Pro předúpravu betonu lze použít různé metody. Přehled metod je popsán např. v ČSN EN 1504-10 [53], TP SSBK III [2], ACI 555R-01 [4].

**Tabulka 4-1 Technologické postupy pro předúpravu povrchu podle ČSN EN 1504-10 [54]**

Předúprava povrchu	Postup
Čištění	Mechanicky, působením úderů, broušením, pískováním, tryskání vodou s nízkým tlakem do cca 18 MPa, při nízkém průtoku je nutný tlak až do 60 MPa
Zdrsnění	Mechanicky, působením úderů, broušením, pískováním, tryskání vodou s vysokým tlakem až do cca 60 MPa
Odstranění	Mechanicky, působením úderů, tryskání vodou s vysokým tlakem až 60 MPa a velmi vysokým tlakem až do 110 MPa

Rozdíl mezi čištěním, zdrsněním a odstraňováním povrchu betonu je zobrazen na následujících obrázcích.



A



B



C

**Obr. 4-1 Ukázka předupraveného povrchu betonu pomocí technologie VVP. A – čištění, B - zdrsnění, C – odstraňování. Rotační kontinuální vodní paprsek. Parametry VVP voleny dle kvality betonu.**



**Obr. 4-2 Přejít mezi neošetřeným povrchem betonu (vlevo) a předupraveným povrchem betonu (vpravo). Čištění. Rotační paprsek, tlak 130 MPa, beton C45/55.**



**Obr. 4-3 Přejít mezi neošetřeným povrchem betonu (vlevo) a předupraveným povrchem betonu (vpravo). Zdrsnění. Rotační paprsek, tlak 130 MPa, beton C20/25.**



**Obr. 4-4 Přechod mezi neošetřeným povrchem betonu (vlevo) a předupraveným povrchem betonu (vpravo). Odstraňování. Rotační paprsek, tlak 210 MPa, beton C20/25.**

## **4.2 VOLBA METODY PRO ODSTRANĚNÍ DEGRADOVANÉHO BETONU**

Co se týká volby způsobu odstranění degradovaného betonu, podle TP SSBK III [2] by se měl odvíjet výběr technických prostředků a postup předúpravy povrchu od těchto obecných kritérií:

- cíl a charakter opravy,
- zjištěný (nebo alespoň předpokládaný) rozsah poškození konstrukce, hloubka kontaminace nežádoucími složkami,
- stav konstrukce z hlediska statiky,
- přístupnost konstrukce,
- délka odstávky,
- vliv nebo možný vliv na zdravý (neodstraňovaný) beton,
- bezpečnost práce a hygienické aspekty,
- vliv na okolí opravované konstrukce (prašnost, hlučnost, vibrace aj.),
- cena.

Jako další informace, které vymezují vhodnost užití technologie vodního paprsku pro odstranění degradovaného betonu a pro předúpravu povrchu betonu, lze uvést tato doporučení:

„Přístupnost konstrukce, nebo lépe řečeno přístupnost sanovaných ploch, mnohdy vylučuje využití těch prostředků, které byly např. vyvinuty pro nasazení na rozsáhlých horizontálních plochách (frézy, brokovací zařízení apod.).“ [2]

„Negativní vliv na konstrukci a zdravý beton musí být v každém ohledu co nejmenší, rovněž účinky na instalovanou a provozovanou technologii, kterou buď nelze odstavit, nebo demontovat, je potřeba minimalizovat. Zvláštní opatrnost je na místě tehdy, hrozí-li vznícení kapalin nebo výparů. Do této kategorie hledisek náleží i případné dynamické účinky demoličního zásahu jak na konstrukci samotnou, tak na objekty sousedící.“ [2]

„Zcela zvláštní skupinu tvoří aspekty hygienické, které obvykle vedou k vyloučení např. těch technik, při nichž je produkován křemičitý prach způsobující silikózu. Nezanedbatelným hygienickým hlediskem je krom prašnosti i hluk, při použití sbíjecích kladiv navíc i vibrace.“ [2]

„Při výběru vhodných technických prostředků je nezbytné zohlednit i časový harmonogram sanačního zásahu, dobu povolené odstávky technologie a zvolit takové



prostředky, resp. tak výkonné aparatury, aby mohla být předúprava konstrukce provedena náležitě bez nežádoucích termínových tlaků.“ [2]

Technologie vodního paprsku splňuje výše uvedené požadavky pro předúpravu povrchů.

#### 4.3 UŽITÍ VODNÍHO PAPERU PRO ČIŠTĚNÍ, ZDRSNĚNÍ A ODSTRANĚNÍ BETONU

„Hydrodemolice je rychlá a účinná metoda odstranění betonu, při které se odstranění nepoškozeného betonu omezuje na nejnižší míru. Nedochozí ke vzniku mikrotrhlin a zdravý beton je odlišen od nezdravého. K selekci dochází do střední hloubky odstranění. Tuto metodu je možno použít, když je známý výkon použitých zařízení. Při dodržení požadavků se dosáhne selektivní demolice mezi nepoškozeným a poškozeným betonem. Vzniká pouze malý počet plochých rýh pod výztuží bez vzniku vadných míst na povrchu. Odstranění betonu je určeno minimální stanovenou hloubkou, ale v místech s lokálně nižší kvalitou betonu dojde k jeho odstranění do větší hloubky.“ [53]

„Hydrodemolice je selektivní metoda pro odstranění nesoudržného betonu nebo betonu s nižší pevností. Zbylé vystupující kamenivo zvyšuje soudržnost se správkovými materiály“. [4]

Podle ČSN EN 1504-10 [53] se pro selektivní demolice používají zařízení s tlakem od 60 do 110 MPa. Rozdělení tlaků a užití hydrodemolice podle tlaku vody měřeném na čerpadle podle ČSN EN 1504-10 uvádí následující tabulka.

**Tabulka 4-2 Rozdělení tlaků a užití hydrodemolice podle tlaku vody měřeném na čerpadle podle ČSN EN 1504-10 [53]**

<b>Tlak vody na čerpadle</b>	<b>Použití vysokorychlostního vodního paprsku</b>
<b>Nízký tlak</b>	Do 18 MPa – pro čištění betonu
<b>Vysoký tlak</b>	18 až 60 MPa – pro odstranění betonu
<b>Velmi vysoký tlak</b>	60 až 110 MPa – pro odstranění betonu

Podle ACI 555 R-01 [4] pouhé rozdělení podle tlaku nestačí, neboť různé systémy pracují s různými tlaky a průtoky vody. Účinnost se potom značně liší. Podle ACI 555 [4] je nyní v USA užívána hydrodemolice pro odstranění betonu častěji, než mechanické metody a abrazivní otryskávání.

Technologie vodního paprsku je zmiňována pro přípravu povrchu také v zahraničních normách. Například v ASTM D4259 – 88 (2012) Standard Practice for Abrading Concrete [54] a v normě ASTM: D4258 Practice for Surface Cleaning Concrete for Coating [50]. Tato norma řeší přípravu povrchu betonu před aplikací správkových hmot a uznává tři obecné typy pro povrchové odstranění betonu - mechanické, tryskání vodním paprskem a abrazivní otryskávání. Ošetřený povrch betonu je pak hodnocen vizuálním posouzením a volitelně pull-off testem (podle ASTM D 4541 Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers [55]).

Použití technologie VVP nabízí řadu výhod:

- Vzhledem k vysoké koncentraci energie na velmi malé ploše je vodní paprsek schopen porušit i velmi tvrdé materiály.



- Nedochozí k mechanické interakci paprsku s materiálem.
- Nedochozí ke vzniku mikrotrhlin v okolí odstraňovaného betonu.
- Paprsek je schopen selektivně odstranit pouze porušené či degradované vrstvy, v betonu přítomná ocelová výztuž nebývá po aplikaci paprsku nijak poškozena.
- Minimální tepelné ovlivnění povrchu ošetřeného vodním paprskem.
- Metoda je bezprašná a nevytváří vibrace; na rozdíl od mechanických způsobů odstraňování porušeného betonu tak v konstrukci nevznikají druhotné trhliny nebo praskliny. Potřebná zařízení ke generování vodního paprsku jsou lehká (kromě vysokotlakého čerpadla) a celý proces hydrodemolice může být snadno automatizován.
- Pracovní médium (voda) je snadno dostupné, odpadní produkty minimálně zatěžují životní prostředí.
- Nehrozí nebezpečí exploze.
- Podle ACI 555 [4] je užití technologie vodního paprsku používáno typicky pro aplikace, kde je třeba zachovat a ochránit ocelovou výztuž v betonu, například při opravách mostních konstrukcí, desek garážových stání apod.

Na druhou stranu k nevýhodám technologie VVP patří relativně vysoká pořizovací cena zařízení, vysoká hlučnost a vysoké požadavky na kvalitu vody.

#### **4.3.1 Požadavky na kvalitu předupraveného povrchu betonu**

Požadavky na předupravený povrch betonu jsou obecně definovány takto:

- Povrch musí být bez volných a degradovaných částí (např. oblastí s nízkou pevností)
- Povrch musí být bez trhlin
- Povrch by měl mít drsnost podle požadavků pro nanášení dalších vrstev materiálů
- Povrch musí být bez cizích látek (kontaminované vrstvy, staré nátěry, olej apod.)

Hodnocení kvality ošetřeného povrchu betonu řeší ČSN EN 1504-10 [53]:

Všechny zdegradované vrstvy betonu musí být odstraněny, povrch musí být bez výraznějších trhlin, dutin, nezhatných oblastí a oblastí s dutým ozvukem (akustické trasování). Podklad musí splňovat minimální tahové pevnosti. Průměrná hodnota pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu by měla být minimálně 1,4 MPa, dílčí hodnoty by neměly být nižší než 0,8 MPa. V případě dynamicky namáhaných konstrukcí a/nebo konstrukcí v prostředí se zvýšenou agresivitou je vhodné uvažovat jako minimální hodnoty 1,6 MPa (průměrná hodnota) a 1,1 MPa (jednotlivá minimální hodnota). Pokud beton nevykazuje tyto hodnoty v celém svém průřezu a větší hloubka předúpravy tedy neumožní dosažení dostatečně únosného podkladu, je třeba provést vhodná opatření pro zajištění soudržnosti správkové malty, například přikotvení KARI síť na povrch stávající konstrukce a následná aplikace stříkané malty. [53], [2].

Cílem předúpravy povrchu je zajistit takovou kvalitu povrchu, aby bylo dosaženo dobré soudržnosti mezi starým podkladním betonem a nově nanášenými materiály [4]. Soudržnost (přidrženost správkových malt) je hodnocena jako hodnota pevnosti v prostém tahu souvrství namáhaného kolmo k ideální styčné spáře mezi podkladním betonem (maltou) a zkoušeným materiálem. Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou se provádí dle ČSN EN 1542 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody –

Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou [56]. Výsledek zkoušky se uvádí jako odtrhová pevnost  $\sigma$  [MPa], která je dána vzorcem

$$\sigma = F/A \quad [\text{MPa}] \quad (16)$$

kde:  $F$  - odtrhová síla [N]

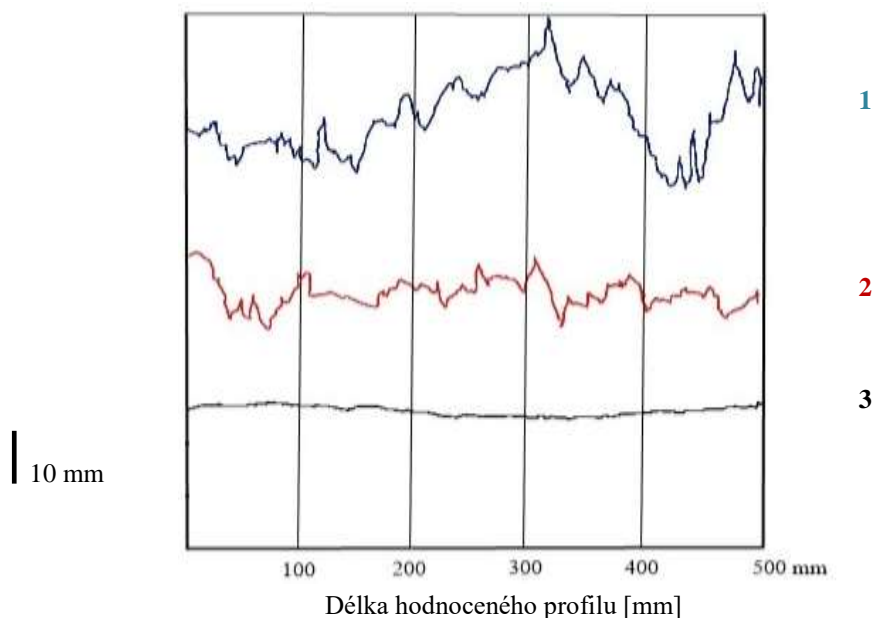
$A$  - plocha odtrhového terče [mm<sup>2</sup>].

Norma ČSN EN 1504-3 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody – Část 3: Opravy se statickou funkcí a bez statické funkce [69] požaduje pro třídy výrobků pro opravy se statickou funkcí a bez statické funkce hodnotu soudržnosti pro třídu R1 a R2  $\geq 0,8$  MPa, pro třídu R3  $\geq 1,5$  MPa, pro třídu R4  $\geq 2,0$  MPa.

#### 4.3.2 Vzhled předupravených povrchů betonů po ošetření různými metodami

Podle ACI RAP-14 Concrete Removal Using Hydrodemolition, Field Guide to Concrete Repair Application Procedures [58], je kontrola povrchu ošetřeného technologií VVP prováděna vizuálně – povrch musí být bez znečištění, prachu, úlomků. Povrch může být hodnocen také akusticky (pomocí řetězů a kladívek, obdoba akustického trasování). Hodnotí se pevnost povrchových vrstev v tahu pull-off testem [58].

Při použití různých způsobů předúpravy povrchu dosahujeme různé profily ošetřeného povrchu betonu. Typické profily povrchu betonu při použití různých způsobů předúpravy povrchu betonu jsou zobrazeny na následujícím obrázku.



**Obr. 4-5 Profil povrchu betonu, předúprava provedena různými metodami:  
1) pomocí technologie VVP, 2) pneumatickým kladivem, 3) suchým pískováním.  
Upraveno podle Silfwerband [15].**

Pro zvýšení drsnosti a následně dosažení vyšší soudržnosti nově aplikovaných materiálů je doporučováno ošetřit pomocí technologie vysokorychlostního vodního paprsku také povrch betonu, kde už byla vrstva degradovaného betonu odstraněna použitím pneumatického kladiva [57].



*Profil povrchu  
betonu ošetřeného  
pneumatickým  
kladivem*



*Profil povrchu  
betonu ošetřeného  
pneumatickým  
kladivem a  
následně  
otryskaný  
abrazivním  
vysokorychlostním  
paprskem*

**Obr. 4-6 Efekt otryskání abrazivním vodním paprskem na povrchu betonu ošetřeném pneumatickým kladivem – zvýšení drsnosti povrchu při otryskání abrazivním vodním paprskem. Upraveno podle [57].**

Dle ČSN EN 1504-10 [1] a dle TP SSBK III [2] se kontrola drsnosti pro hodnocení stavu podkladu před a/nebo po předúpravě provádí vizuálně, pískovým testem nebo měřením textury (dle ČSN EN ISO 3274 [58] [59], ČSN EN ISO 4288 [60]) a nebo metodou, která vychází z postupu uvedeného v ČSN 73 6177 Měření a hodnocení protismykových vlastností povrchu vozovek [61]. Princip zkoušky spočívá ve vyplnění povrchu betonu stanoveným množstvím písku určité zrnitosti. Na suchý a čistý povrch se vysype 25 cm<sup>3</sup> suchého křemenného písku frakce 0,125 - 0,250 mm. Stěrkou s pryžovou třecí plochou se písek krouživým pohybem roztírá od středu, postupně se zaplní všechny prohlubně až po úroveň vrcholu zrn kameniva tak, aby výsledná plocha měla přibližně tvar kruhu. Písek nesmí vytvářet vlnky, ani nesmí být z prohlubně vytlačován. U takto získaného kruhu písku se změří ve dvou kolmých směrech jeho průměr. Hloubka makronerovností  $h_p$  se vypočte ze vzorce:

$$h_p = \frac{10^5}{\pi \cdot d^2} \quad [\text{mm}] \quad (17)$$

kde:  $d$  - aritmetický průměr kruhu [mm].

Vzhled povrchů betonů ošetřených různými technikami je deklarován v dokumentu ICRI (International Concrete Repair Institute, Committee 310 – Surface Preparation Committee) [62].

Pro hodnocení profilu povrchu betonu (Concrete Surface Profile SP) je podle doporučení ICRI používána tabulka, která vizuálně reprezentuje požadované struktury povrchu, drsnost a celkový vzhled na betonu nebo asfaltu. Každý profil je klasifikován číslem, od CSP1 (téměř rovný) a CSP10 (velmi drsný povrch). Profil povrchu (Surface profile SP) je definován

měření průměrné vzdálenosti vrcholů povrchu a nejnižších míst povrchu v průřezu ošetřeného podkladu. Struktura a vzhled profilu získaného ošetřením povrchu se liší v závislosti na pevnosti betonu, na složení, typu kameniva a použité povrchové úpravě. Na soudržných plochách, kde je požadováno odstranění malé vrstvy, může být hloubka odstranění dosažena tak, jak představuje tato tabulka, ale s tím, jak se bude hloubka odstranění zvyšovat, bude profil ošetřeného podkladu stále více charakteristický podle typu a velikosti hrubého kameniva.

Po ošetření povrchu se hodnotí, zda bylo dosaženo požadovaného profilu povrchu. Hodnocení se provádí dle normy ASTM D7682-12 [63] vizuálním hodnocením, porovnáním se vzorníkem reliéfů a měřením profilu povrchu.



**Obr. 4-7 Vzorník povrchů profilů betonu – repliky povrchů betonů [62]**

Vytvoření požadovaného povrchu profilu je prováděno pomocí různých technik a s využitím různých nástrojů pro úpravu povrchu. Je definovaný požadovaný profil povrchu v závislosti na způsobu opravy a na tloušťce materiálu použitého pro opravu.

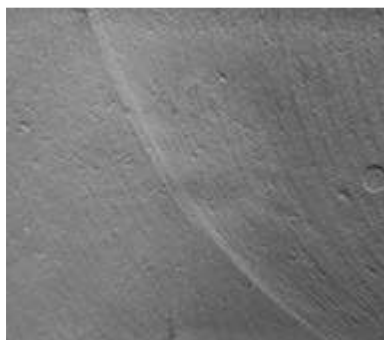
Vzhled profilů povrchu betonu CSP1 až CSP10 jsou patrné z následujícího obrázku Obr. 4-8. Na Obr. 4-9 jsou zobrazeny vybrané metody pro dosažení požadovaných profilů povrchů betonů. Tabulka 4-3 uvádí metody pro přípravu povrchu a předpokládané dosažené stupně profilů povrchu betonu.

**Tabulka 4-3 Metody pro přípravu povrchu a odpovídající klasifikace profilu povrchu betonu, upraveno podle [67]**

Metoda pro přípravu povrchu	Klasifikace profilu povrchu
Chemické čištění	1
Čištění s užitím nízkého tlaku vody	1
Leptání kyselinami	1-3
Broušení	1-3
Abrazivní tryskání (pískem)	2-5
Brokování	3-8
Broušení, drážkování	4-9
Otryskání jehlami (pemrlování)	5-8
Hydrodemolice	6-9
Frézování	7-9
Tryskání plamenem	8-9
Frézování	9



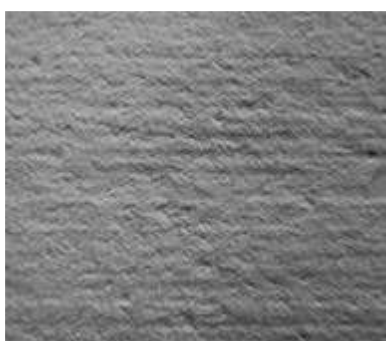
**CSP1 – leptání kyselinou (acid-etched)**



**CSP2 – broušení (grinding)**



**CSP3 – otryskávání (light shotblast)**



**CSP4 – kartáčování, drážkování, jehlování (light scarification)**



**CSP5 – otryskávání (medium shotblast)**



**CSP6 – drážkování (medium scarification)**



**CSP7 – otryskávání (heavy abrasive blast)**



**CSP8 – rýhování (scabbled)**



**CSP9 – drážkování rotačními nástroji (heavy scarification – rotomilled)**



**CSP10 – odstraňování ručními nástroji – pneumatická kladiva, odsekávání a následné otryskávání (handheld concrete breaker followed by abrasive blasting)**

**Obr. 4-8 Klasifikace profilů povrchů betonu (CSP1 až CSP10) a typické metody pro dosažení těchto profilů. Upraveno podle [62]**





**CSP1 – leptání kyselinou (acid-etched)**

**CSP2 – broušení (grinding)**

**CSP3, CSP5, CSP7 – otryskávání (shotblasting)**

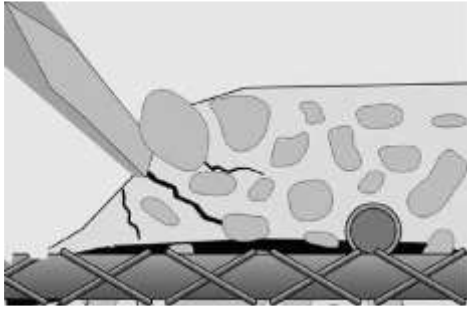


**CSP4 – kartáčování, drážkování, otryskávání jehlami (light scarification)**

**CSP8 – rýhování (scabbling)**

**CSP6, CSP9 – drážkování (scarification)**

**Obr. 4-9a Metody pro dosažení profilů povrchů betonu (CSP1 až CSP10).  
Upraveno podle [62]**



CSP10 - odstraňování ručními nástroji – pneumatická kladiva, odsekávání.      CSP3 – brokování (shotblasting)

**Obr. 4-9b Metody pro dosažení profilů povrchů betonu (CSP1 až CSP10).  
Upraveno podle [62]**

## 5 CÍLE PRÁCE

Cílem habilitační práce byl výzkum v oblasti aplikace vysokorychlostních vodních paprsků pro rozpojování betonu. Byl sledován vliv vlastností betonů s hutnými kamenivými a s lehkým kamenivem Liapor. Byl zkoumán účinek vysokorychlostních vodních paprsků na betony neporušené a na betony vystavené působení vysokých teplot. Pro rozpojování byly použity různé typy vysokorychlostního vodního paprsku – od kontinuálního, rotačního, až po paprsky ploché a nově vyvíjené paprsky pulzní. Byl sledován vliv parametrů vysokorychlostních vodních paprsků na výsledek rozpojování betonů.

## 6 METODIKA PRÁCE

Práce byla rozdělena do několika etap, které sledovaly vývoj v oblasti vysokorychlostních paprsků a možností jejich použití pro rozpojování betonů:

Rozpojování betonů technologií rotačního vysokorychlostního paprsku

Sledování účinku různých typů kontinuálních a pulzujících vysokorychlostních vodních paprsků při rozpojování betonu

Sledování účinku vysokorychlostních vodních paprsků na betonech vystavených působení vysokých teplot

Aplikace vysokorychlostních vodních paprsků pro plošné odstraňování vrstev betonů porušených působením vysokých teplot.

V rámci experimentů byly provedeny tyto zkoušky a stanovení:

- Konzistence čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-2 [64], ČSN EN 12350-5 [65], ČSN EN 12350-8 [66]
- Objemová hmotnost čerstvého betonu  $D$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] dle ČSN EN 12350-6 [67]
- Pevnost betonu v tlaku  $f_{cc}$  [MPa] dle ČSN EN 12390-3 [68]
- Pevnost v tahu ohybem  $f_{cf}$  [MPa] dle ČSN EN 12390-5 [69]
- Pevnost betonu v tahu povrchových vrstev  $R_t$  [MPa] dle ČSN 73 1318 [70]
- Pevnost betonu v příčném tahu  $f_{ct}$  [MPa] dle ČSN EN 12 390-6 [71]
- Objemová hmotnost ztvrdlého betonu  $D$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] dle ČSN EN 12390-7 [72]
- Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou  $f_h$  [MPa] dle ČSN EN 1542 [56]
- Stanovení mrazuvzdornosti betonu dle ČSN 73 1322 [73]
- Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12390-8 [74]
- RTG difrakční analýza
- Měření hloubky řezu v betonu
- Stanovení rozpojeného objemu betonu
- Skenování povrchu betonu
- Rentgenová počítačová tomografie (RTG CT).



## 7 ROZPOJOVÁNÍ BETONŮ TECHNOLOGIÍ ROTAČNÍHO VYSOKORYCHLOSTNÍHO PAPERSKU

V laboratorních podmínkách jsou často prováděny experimentální práce s užitím kontinuálních vysokorychlostních vodních paprsků. Při sanacích betonových konstrukcí je pro odstraňování degradovaného betonu používán rotační vysokorychlostní paprsek. Pro přiblížení reálným aplikacím vysokorychlostního vodního paprsku byl pro experimenty použit rotační vysokorychlostní paprsek.

Experimentální práce sledovaly tento rámeček:

- Byla vyrobena zkušební tělesa a byly popsány vlastnosti betonů v čerstvém a ve ztvrdlém stavu (po 28 dnech normálního zrání betonu a v době provedení zkoušek rozpojování betonu VVP).
- Otryskání zkušebních vzorků rotačním vysokorychlostním vodním paprskem, tlak vody 130 MPa a 210 MPa.
- Měření hloubky řezu.
- Zhodnocení vlastností povrchů betonů otryskaných technologií VVP – pevnost betonu v tahu povrchových vrstev, sledování ovlivnění okolí řezu, sledování přítomnosti trhlinek, vzhled ošetřeného povrchu. Hodnoty jsou uvedeny ve vztahu k definovaným vlastnostem betonů a k použitým parametrům VVP – použitý tlak a průtok vody, typ vodního paprsku.
- Bylo provedeno hodnocení soudržnosti správkové malty k povrchům betonu po ošetření technologií VVP – na povrch betonu otryskaný technologií VVP byla aplikována správková malta, byla hodnocena soudržnost odtrhovou zkouškou k otryskanému a k původnímu (neotryskanému) povrchu betonu.

### 7.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ PRO ROZPOJOVÁNÍ BETONŮ TECHNOLOGIÍ VVP

#### 7.1.1 Receptury betonů, výroba a zkoušení čerstvého betonu

Složení betonu je uvedeno v tabulce 7-1. Byly navrženy a vyrobeny 4 receptury betonů:

- Beton třídy C 40/50, označení zkušebních vzorků C 40/50
- Beton třídy C 50/60, označení zkušebních vzorků C 50/60
- Samozhutnitelný beton SCC třídy C 50/60, označení zkušebních vzorků SCC
- Beton s nevhodným dávkováním složek, označení zkušebních vzorků C 50/60 B.

Byla vyrobena tělesa pro zjištění pevnostních charakteristik a objemových hmotností betonů po 28 dnech a v době rozpojování betonů technologií VVP (krychle 150x150x150 mm a trámce 100x100x400 mm), byla vyrobena tělesa pro zkoušky rozpojování VVP (trámce 100x100x400 mm). Zhutňování bylo provedeno na vibračním stole s elektromagnetickým upínáním forem. Doba zhutňování byla cca 2 minuty dle charakteru betonové směsi, průměrné zrychlení  $a = 20 \text{ m.s}^{-2}$ , amplituda  $A = 0,35 \text{ mm}$ , frekvence  $f = 50 \text{ Hz}$ . Po zhutnění těles byla provedena zkouška stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu. Po 24 hodinách byla tělesa odformována a uložena v normovém prostředí při průměrné teplotě  $T = 18,3^\circ\text{C}$  a průměrné relativní vlhkosti vzduchu 92%. Byly zjišťovány vlastnosti ztvrdlého betonu po 28 dnech a v době provedení zkoušek rozpojování betonu technologií VVP.

**Tabulka 7-1 Složení betonů na 1 m<sup>3</sup>**

<b>Beton C 40/50</b>	
Cement CEM I 42,5 R Mokrý	330 kg
Voda	170 kg
Plastifikátor CHRYSO®Plast 760	2,6 kg
Kamenivo 0/4 mm Žabčice (těžené)	860 kg
Kamenivo 8/16 mm Olbramovice (drcené)	990 kg
Vodní součinitel - w	0,47
<b>Beton C 50/60</b>	
Cement CEM I 42,5 R Mokrý	420 kg
Voda-	165 kg
Plastifikátor CHRYSO®Fluid Optima 208	3,65 kg
Kamenivo 0/4 mm Žabčice (těžené)	790 kg
Kamenivo 8-16 mm Olbramovice (drcené)	980 kg
Vodní součinitel - w	0,39
<b>Beton SCC</b>	
Cement CEM I 42,5 R Mokrý	360 kg
Voda	174 kg
Plastifikátor CHRYSO®Fluid Premia 320	5,5 kg
Kamenivo 0/4 mm Žabčice (těžené)	930 kg
Kamenivo 4/8 mm Žabčice (těžené)	200 kg
Kamenivo 8/16 mm Olbramovice (drcené)	510 kg
Popílek Dětmarovice	90 kg
Vodní součinitel - w	0,48
<b>Beton C 50/60 B</b>	
Cement CEM I 42,5 R Mokrý	420 kg
Voda	175 kg
Plastifikátor CHRYSO®Fluid Optima 208	3,65 kg
Kamenivo 0/4 mm Žabčice (těžené)	760 kg
Kamenivo 8/16 mm Olbramovice (drcené)	980 kg
Vodní součinitel - w	0,42

### 7.1.2 Vlastnosti betonů

**Tabulka 7-2 Vlastnosti betonů po 28 dnech normového zrání**

Beton	Vlastnosti čerstvého betonu		Vlastnosti betonů po 28 dnech normálního zrání			
	Konzistence	Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]	Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]	Pevnost v příčném tahu [MPa]
C 40/50	S3	2390	2340	52,5	7,3	2,70
C 50/60	S3	2470	2350	71,3	9,1	3,50
SCC	SF1, VS2	2360	2340	56,6	9,1	3,70
C 50/60 B	F4	2370	2350	53,6	7,1	3,65

**Tabulka 7-3 Vlastnosti betonů v době rozpojování technologií VVP**

Beton	Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]	Pevnost v příčném tahu [MPa]
C 40/50	2340	52,9	7,5	2,70
C 50/60	2350	71,5	9,0	3,60
SCC	2350	57,0	9,3	3,70
C 50/60 B	2330	54,5	7,3	3,65

## 7.2 TECHNICKÉ PARAMETRY ZAŘÍZENÍ PRO TECHNOLOGII VVP

Betonové vzorky byly rozpojovány rotačním vodním paprskem při použití tlaků 130 MPa a 210 MPa. Otryskání betonů provedla firma NET spol. s.r.o. Byla použita rotační hlava Barracuda s tryskou OS7, kdy v rotační hlavici Barracuda byly osazeny 4 trysky OS7. Bylo použito zařízení URACA KD716, výkon 100 kw, maximální tlak 2800 barů, max. průtok 17 l.min<sup>-1</sup>.



**Obr. 7-1 Rotační hlavice Barracuda. Foto: Libor Sitek**

## 7.3 HODNOCENÍ BETONŮ PO ROZPOJOVÁNÍ TECHNOLOGIÍ VVP

Na betonech otryskaných technologií VVP byly hodnoceny tyto parametry:

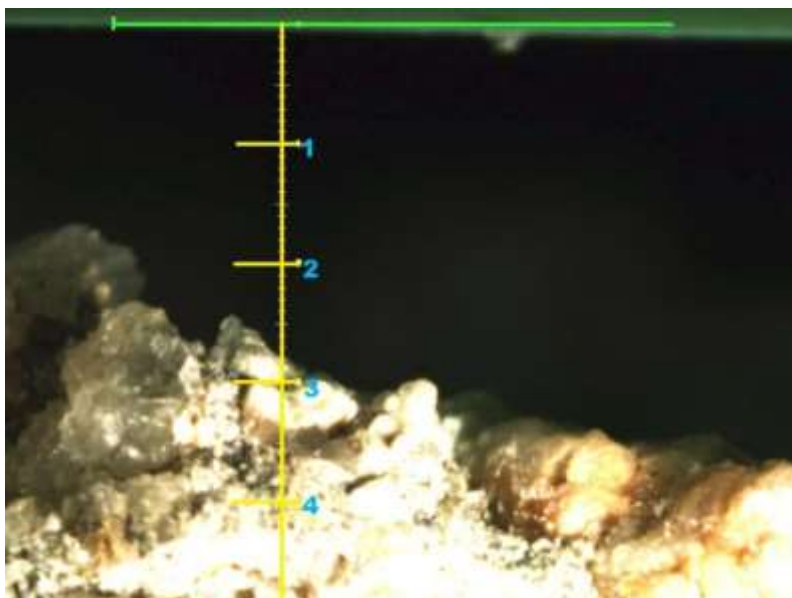
- Měření hloubky řezu (hrotem posuvného měřítka a pomocí optického mikroskopu).
- Sledování profilů povrchu betonu po rozpojování
- Hodnocení vlastností povrchů betonů otryskaných vysokorychlostním vodním paprskem: pevnost betonu v tahu povrchových vrstev před otryskáním a po otryskání vodním paprskem, sledování ovlivnění okolí řezu, sledování přítomnosti trhlinek, vzhled otryskaného povrchu betonu – vizuálně, včetně fotodokumentace.
- Hodnocení soudržnosti správkové malty k povrchům betonu – na povrch betonu byla aplikována správková malta, byla hodnocena soudržnost správkové malty k otryskanému a k původnímu (neotryskanému) povrchu betonu.

### 7.3.1 Fotodokumentace povrchů betonů otryskaných technologií VVP

Byl zkoumán vzhled drážek vytvořených rotačním vysokorychlostním vodním paprskem a případné ovlivnění okolí vytvořených drážek. Sledování bylo provedeno makroskopicky s fotografickým záznamem. Detaily řezu byly sledovány pomocí optického mikroskopu Nikon s TV kamerou Sony. Obraz byl přenášěn do PC s využitím softwaru LIM Elements (LUCIA).



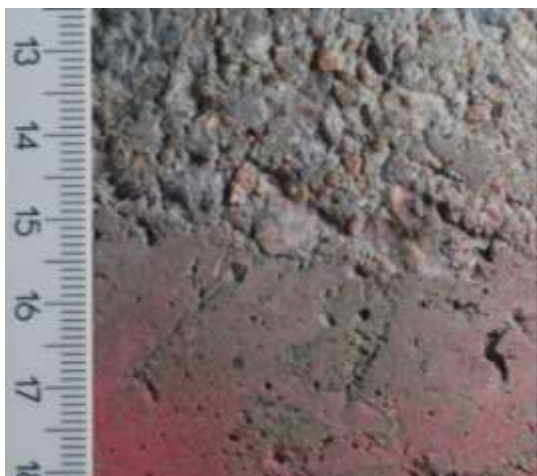
**Obr. 7-2** Detail drážky v betonu C40/50, tlak 130 MPa, průměrná hloubka řezu 1,21 mm



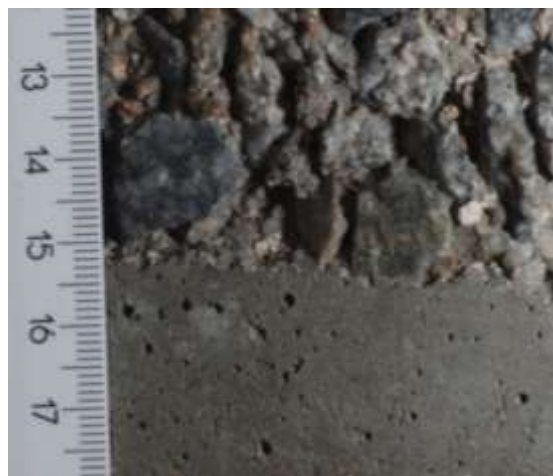
**Obr. 7-3** Detail drážky v betonu C40/50, tlak 210 MPa, průměrná hloubka řezu 2,26 mm

Nebyly zaznamenány trhliny v okolí provedených drážek. Beton v místě vytvořených drážek byl bez nesoudržných míst, rozpojené části betonu byly odstraněny proudem vody při působení vodního paprsku.

Ukázky otryskaných povrchů betonů jsou uvedeny na následujících obrázcích.



**Obr. 7-4 Beton C 40/50, přechod mezi neotryskaným povrchem betonu (dole) a otryskaným povrchem betonu (nahore), tlak 130 MPa, měřítko v cm**



**Obr. 7-5 Beton C 40/50, přechod mezi neotryskaným povrchem betonu (dole) a otryskaným povrchem betonu (nahore), tlak 210 MPa, měřítko v cm**

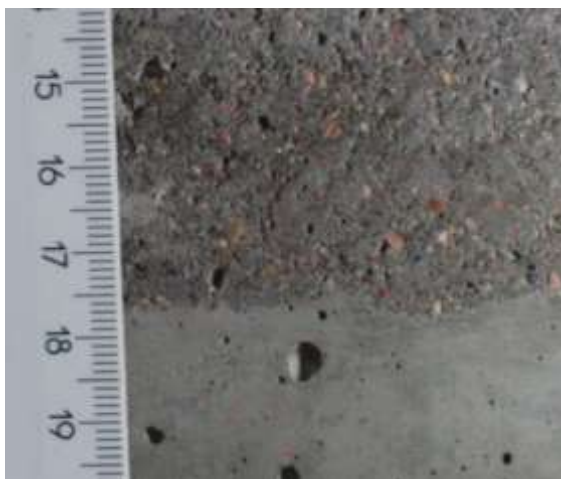


**Obr. 7-6 Beton C 40/50, otryskaný povrch betonu, tlak 130 MPa, měřítko v cm**



**Obr. 7-7 Beton C 40/50, otryskaný povrch betonu, tlak 210 MPa, měřítko v cm**





**Obr. 7-8 Beton C 50/60, přechod mezi neotryskaným povrchem betonu (dole) a otryskaným povrchem betonu (nahore), tlak 130 MPa, měřítko v cm**



**Obr. 7-9 Beton C 50/60, přechod mezi neošetřeným povrchem betonu (dole) a otryskaným povrchem betonu (nahore), tlak 20 MPa, měřítko v cm**



**Obr. 7-10 Beton C 50/60, otryskaný povrch betonu, tlak 130 MPa, měřítko v cm**



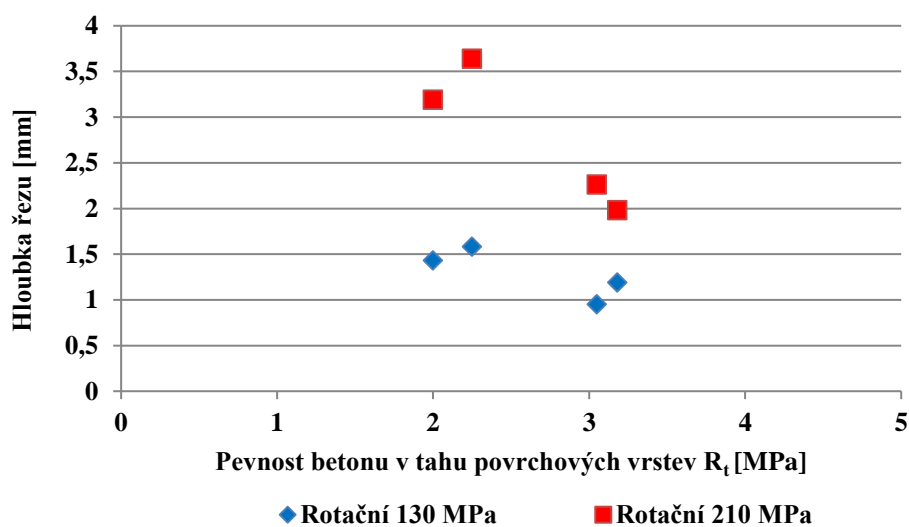
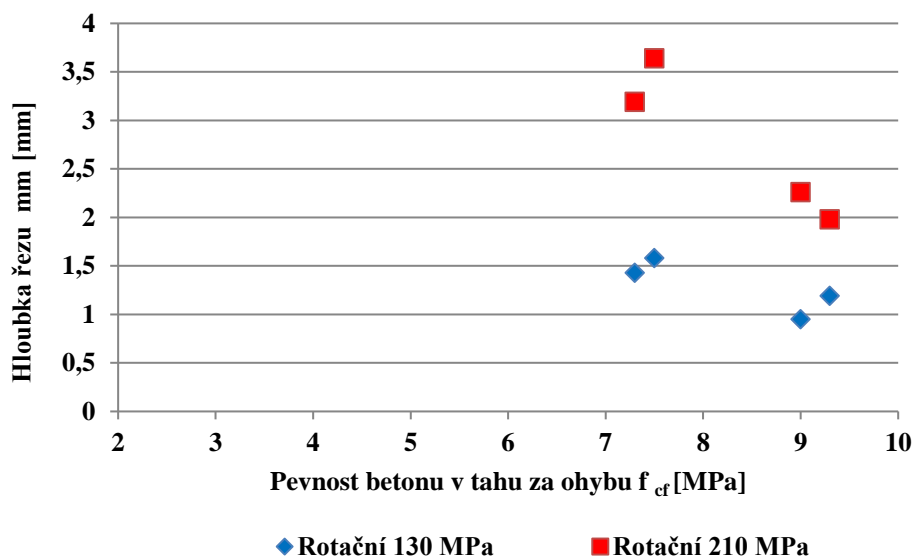
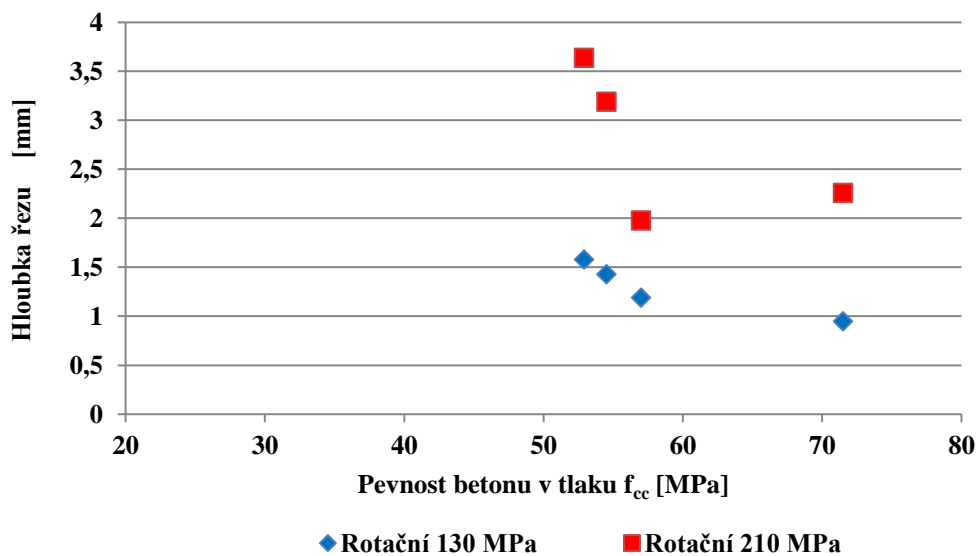
**Obr. 7-11 Beton C50/60, otryskaný povrch betonu, tlak 210 MPa, měřítko v cm**

### 7.3.2 Vliv pevností betonů na hloubku řezu

Měření hloubky řezu bylo provedeno digitálním posuvným měřítkem s hrotem, s přesností 0,01 mm. Měření bylo prováděno na otryskaných površích betonových vzorků po délce vytvořené drážky, s vyloučením okrajů vzorků, kde může dojít k ovlivnění hloubky řezu (vyložením vzorku, nájezdem vodního paprsku).

**Tabulka 7-4 Průměrné hloubky řezu v betonu po ošetření technologií VVP**

Beton	Hloubka řezu tlak VVP 130 MPa [mm]	Hloubka řezu tlak VVP 210 MPa [mm]
C 40/50	1,58	3,64
C 45/55	0,95	2,26
SCC	1,19	1,98
C 45/55 B	1,43	3,19



Obr. 7-12 Vliv pevností betonu na hloubku řezu, rotační vodní paprsek, tlak 130 MPa a 210 MPa

Při hodnocení vlivu pevností zkoumaných betonů na hloubku řezu (viz. Obr. 7-12) bylo zjištěno, že lze sledovat souvislost mezi pevností betonu a hloubkami řezu vytvořenými rotačním vysokorychlostním vodním paprskem:

- Mezi pevností betonu v tlaku a hloubkou řezu vytvořenou rotačním vodním paprskem při tlaku 130 MPa byl koeficient korelace  $\rho_{xy} = -0,91$ . Pro tlak 210 MPa došlo ke snížení koeficientu korelace na  $\rho_{xy} -0,62$ .
- Mezi pevností betonu v tahu za ohybu a hloubkou řezu byl určen koeficient korelace  $\rho_{xy} = -0,88$  pro tlak 130 MPa a  $\rho_{xy} = -0,95$  pro tlak paprsku 210 MPa.
- Mezi pevností betonu v tahu povrchových vrstev a hloubkou řezu byl určen koeficient korelace  $\rho_{xy} = -0,82$  pro tlak 130 MPa a  $\rho_{xy} = -0,91$  pro tlak paprsku 210 MPa.
- Koeficient korelace mezi pevností v příčném tahu a hloubkou řezu byl  $\rho_{xy} = -0,67$  pro tlak 130 MPa a  $\rho_{xy} = -0,75$  pro tlak paprsku 210 MPa.

Je třeba zdůraznit, že uvedené souvislosti platí pro sledované betony, kde byl použit shodný druh kameniva a tyto betony nebyly vystaveny koroznímu působení. Při užití různých vstupních surovin a při sledování rozpojování betonů degradovaných je proces hodnocení vlivu parametrů betonu na dosaženou hloubku řezu (nebo na rozpojený objem betonu) značně komplikovaný.

### 7.3.3 Profil řezů vytvořených vysokorychlostním paprskem

Pro zajištění soudržnosti správkových materiálů s betonem je důležité dosáhnout členitého povrchu betonu. Proto bylo provedeno sledování reliéfů betonů otryskaných rotačním kontinuálním vodním paprskem.

Pro získání reliéfů hloubky otryskání byly použity betonové trámce 100x100x400 mm, které byly otryskány rotačním vysokorychlostním paprskem tlakem 210 MPa a tlakem 130 MPa. Trámce byly rozřezány pomocí diamantové pily na pláty o tloušťce cca 20 mm. Na řezech byly pomocí černé lihové fixy vyznačeny reliéfy reprezentující hloubky otryskání na jednotlivých plochách. Řezy s černě vyznačeným reliéfem byly vyfotografovány digitální zrcadlovkou při rozlišení 10 Mpx. Pro snímání byl použit teleobjektiv s ohniskovou vzdáleností 450 mm (při přepočtu na full-frame), aby nedošlo k optickému zkreslení proporcí reliéfu. Pořízené snímky byly dále zpracovány v grafickém editoru. Byl proveden výběr černé plochy reliéfu pro každý jednotlivý řez (viz. Obr. 7-13). Následně byly pomocí vrstev tyto reliéfy reprezentující hloubku otryskání tlakem 210 MPa a 130 MPa překryty přes sebe a byla doplněna čára představující původní neotryskaný povrch betonového trámce (viz. Obr. ). Čára byla získána jako spojnice mezi zbytky původních povrchů na koncích trámů.



A



B



C



D



E



E



G



H



**Obr. 7-13 Reliéfy vytvořené v betonu rotačním vysokorychlostním vodním paprskem.**

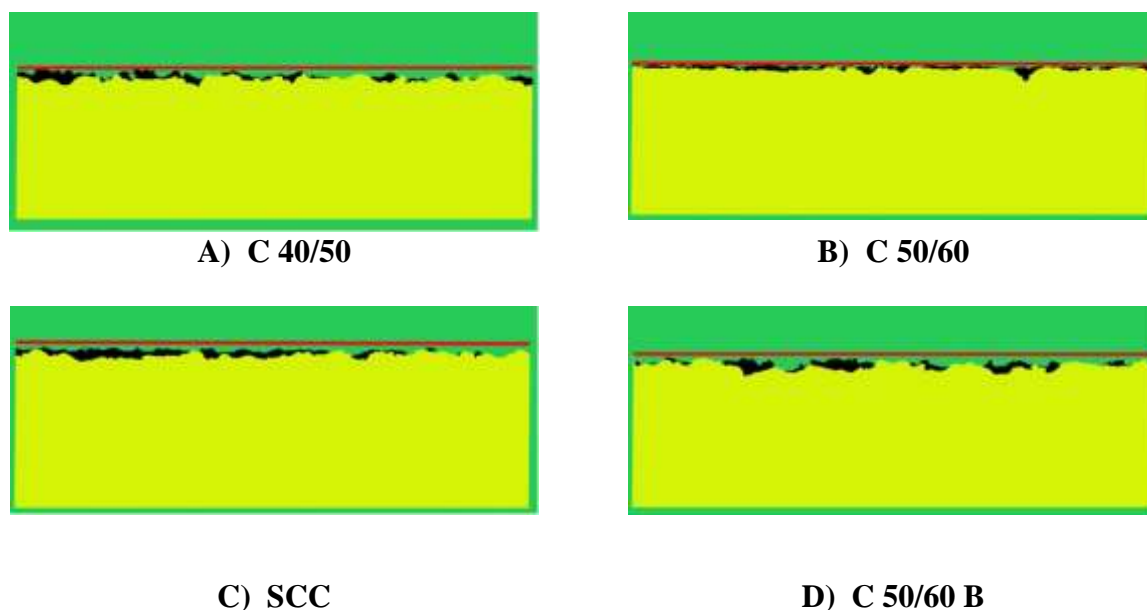
**A-beton C 40/50 tlak 210 MPa, B- beton C 40/50 tlak 130 MPa**

**C- beton C 50/60 tlak 210 MPa, D- beton C 50/60 tlak 130 MPa**

**E- beton SCC tlak 210 MPa, F- beton SCC tlak 130 MPa**

**G- beton C 50/60B tlak 210 MPa, H- beton C 50/60B tlak 130 MPa.**

Profily otryskaných povrchů betonů sestavené pomocí reliéfů jsou uvedeny na následujících obrázcích.



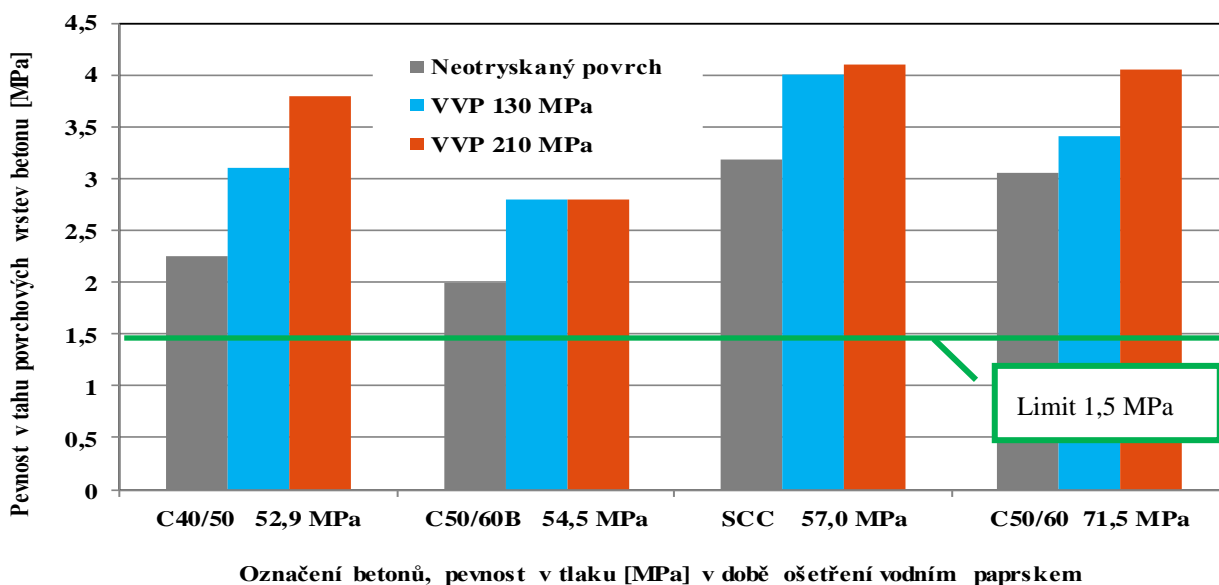
Obr. 7-14 Výsledné srovnání reliéfů otryskaných povrchů betonu. Žlutá barva – tlak 210 MPa, černá barva - tlak 130 MPa.

#### 7.3.4 Pevnost betonu v tahu povrchových vrstev před otryskáním povrchu a po otryskání povrchu betonu vysokorychlostním paprskem

Tabulka 7-5 Pevnost betonu v tahu povrchových vrstev (neotrysaný a otryskaný povrch betonu)

Beton	Pevnost betonu v tahu povrchových vrstev $R_t$ [MPa]		
	neotrysaný povrch	VVP 130 MPa	VVP 210 MPa
C 40/50	2,25	3,10	3,80
C 50/60	3,05	3,40	4,05
SCC	3,18	4,00	4,10
C 50/60 B	2,00	2,80	2,90

Pro hodnocení kvality přípravy povrchu otryskaného vysokorychlostním vodním paprskem bylo provedeno hodnocení pevnosti betonu v tahu povrchových vrstev, a to před otryskáním a po otryskání povrchu betonu. Po otryskání povrchu betonu rotačním vysokorychlostním vodním paprskem byla u všech 4 sledovaných betonů zjištěna vyšší hodnota pevnosti betonu v tahu povrchových vrstev oproti hodnotě pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu stanovené na stejných betonech bez otryskání. Dosažené výsledky pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu po otryskání vodním paprskem korespondují se záznamem reliéfů vytvořených vysokorychlostním paprskem (Obr. ). U betonů C 40/50, SCC a C 50/60 B byly vytvořeny členitější povrchy po otryskání vodním paprskem než u betonu C 50/60. S tím korespondují také vyšší přírůstky pevnosti v tahu povrchových vrstev. Porovnání pevnosti betonu v tahu povrchových vrstev je uvedeno na následujícím grafu.



**Obr. 7-15 Pevnost betonu v tahu povrchových vrstev v závislosti na způsobu ošetření povrchu betonu**

### 7.3.5 Stanovení soudržnosti správkových malt k povrchům betonu po otryskání vysokorychlostním vodním paprskem

V dalších experimentech byl ověřován vliv úpravy povrchu betonu na soudržnost správkové malty k otryskanému betonu. Na povrch betonových zkušebních vzorků otryskaných technologií VVP byla aplikována správková malta. Jako referenční byly použity povrchy betonu bez otryskání technologií VVP.

Pro reprofilaci povrchu betonu otryskaného technologií VVP byla použita správková malta Planitop 100 (MAPEI). Správková malta byla připravena dle technologického postupu udaného výrobcem a byla na betonové vzorky nanášena ručně pomocí ocelového hladítka. Na každém betonovém vzorku byly správkovou maltou ošetřeny tři plochy vzorku (povrch bez otryskání, úprava povrchu tlakem 130 MPa, úprava povrchu tlakem 210 MPa). Před započítáním aplikace správkových materiálů byly plochy betonových vzorků důkladně navlhčeny. Materiál byl nanášen tak, aby aplikovaná vrstva správkové malty dokázala vyrovnat a zakrýt nerovnosti betonového povrchu vzniklé ošetřováním povrchu uvedenými tlaky vodního paprsku. Tloušťka aplikované vrstvy byla minimálně 3 mm a to i v případě neošetřovaného povrchu. Po ztvrnutí byly betonové vzorky se správkovou maltou zakryty folií na 24 hod, po 24 hod zabaleny do folie na 48 hodin, pak vybaleny a uloženy v laboratorním prostředí s relativní vlhkostí vzduchu  $60 \pm 5 \%$  a teplotou  $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Po 28 dnech zrání bylo provedeno Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou dle ČSN EN 1542 [68]. Na každou plochu se správkovou maltou byly lepidlem Sikadur nalepeny zkušební terče. Po vytvrzení lepidla byly zkušební terče oříznuty jádrovým vrtákem až na betonový podklad skrz celou vrstvu sanační malty tak, aby byla exaktně definována zatěžovaná plocha. Pro stanovení soudržnosti sanační malty s betonovým podkladem byl použit přístroj DYNA Z 16, s rozsahem 0,0 až 7,5 MPa.

Z naměřených hodnot vyplývá, že soudržnost správkových malt s betonovým podkladem dosahuje výrazně vyšších hodnot u povrchů otryskaných technologií VVP. U ploch se správkovou maltou nanesenou na neotryskaný povrch došlo při zkoušce stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou vždy k porušení ve styku sanačního materiálu a neupraveného betonového podkladu. Z této skutečnosti lze vyvodit závěr, že správková malta se nedokázala dostatečně spojit s neupraveným betonovým podkladem tak, aby dohromady tvořily vyhovující systém. U povrchů, které byly otryskány technologií VVP, došlo při zkoušce stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou většinou k porušení v samotné vrstvě správkového materiálu. Při tomto způsobu porušení tedy získané hodnoty korespondují s pevností v tahu samotného sanačního materiálu. Pokud došlo k porušení ve styku správkového materiálu s betonovým podkladem, dosahovaly zjištěné hodnoty soudržnosti výrazně vyšších a tedy vyhovujících parametrů.

**Tabulka 7-6 Stanovení soudržnosti správkové malty odtrhovou zkouškou**

Beton	Úprava povrchu	Soudržnost správkové malty s podkladem [MPa]	Poměr soudržnosti správkové malty na otryskaném a neotryskaném podkladu
C 40/50	130 MPa	2,05	2,7
	210 MPa	1,65	2,2
	neotryskaný	0,75	--
C 50/60	130 MPa	1,50	1,3
	210 MPa	2,15	1,8
	neotryskaný	1,20	--
C 50/60 B	130 MPa	1,25	2,1
	210 MPa	1,65	2,8
	neotryskaný	0,60	--
SCC	130 MPa	1,35	1,2
	210 MPa	1,45	1,3
	neotryskaný	1,15	--

#### 7.4 SHRUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Předmětem experimentu bylo ověření účinků technologie vysokorychlostního vodního paprsku na betony různých tříd a kvality. Byly vyrobeny zkušební vzorky čtyř různých betonů C 40/50, C 50/60, SCC a C 50/60 B s nevhodným dávkováním složek. Na referenčních vzorcích byla ověřena navržená pevnostní třída a další mechanické vlastnosti.

Na betonových vzorcích otryskaných rotačním paprskem při použití tlaků 130 MPa a 210 MPa bylo provedeno hodnocení otryskaných povrchů prostřednictvím měření hloubky vytvořené drážky, stanovení pevnosti betonu v tahu povrchových vrstev, sledování ovlivnění okolí řezu, sledování přítomnosti trhlinek a fotodokumentace.

- Pro jednotlivé receptury betonů a použité tlaky VVP byla stanovena průměrná hloubka odstraněného materiálu. Pro tlak 130 MPa se průměrná hloubka odstraněného

materiálu pohybovala v rozmezí 1,19 – 1,43 mm a pro tlak 210 MPa v rozmezí 1,98 – 3,64 mm pro všechny receptury.

- Nebyly zaznamenány trhliny v okolí provedených drážek, beton byl v místě vytvořených drážek bez nesoudržných míst, rozpojené části betonu byly odstraněny proudem vody.
- Po otryskání povrchu byla u všech 4 sledovaných betonů zjištěna vyšší hodnota pevnosti betonu v tahu povrchových vrstev oproti hodnotě pevnosti v tahu betonu povrchových vrstev stanovené na stejných betonech, bez otryskání technologií VVP.
- Při hodnocení adheze aplikovaných malt na povrch ošetřený vodním paprskem bylo zjištěno, že betony otryskané vodním paprskem poskytují vyšší soudržnost než beton neupravený.
- Dosažené hodnoty soudržnosti a dosažené hodnoty pevnosti betonu v tahu povrchových vrstev korespondují se záznamem reliéfů řezů (viz. Obr. 7-13 a 7-15). Při použití vyššího tlaku vodního paprsku (210 MPa oproti 130 MPa) bylo dosaženo členitějšího povrchu betonu a vyšších hloubek řezu.
- Technologie rotačního vodního paprsku je používána při provádění sanací betonových konstrukcí. Rozpojování betonů bylo provedeno zařízením firmy NET s.r.o., tímto nastavením parametrů experimentu jsme se přiblížili reálným aplikacím.

## 8 SLEDOVÁNÍ ÚČINKU KONTINUÁLNÍCH A PULZUJÍCÍCH VYSOKORYCHLOSTNÍCH VODNÍCH PAPERSKŮ PŘI ROZPOJOVÁNÍ BETONU

Cílem experimentů bylo ověřit účinek různých typů vysokorychlostních vodních paprsků na proces rozpojování betonu. V kapitole 1 jsou popsány základní typy vysokorychlostních vodních paprsků. Nejstarším typem paprsku je paprsek kontinuální, který je generován jednou tryskou a sleduje jednoduchou nepřekrývající se trajektorii. Při experimentech byly kromě kontinuálního vodního paprsku použity také rotační paprsky generované více tryskami a paprsky ploché. Zajímavé poznatky přináší sledování účinků plochých a pulzujících paprsků. Aplikace plochého a plochého pulzujícího paprsku pro rozpojování betonu je nová, tento typ paprsků není pro rozpojování betonu v praxi používán. Pulzující paprsky představují progresivní směr vývoje vysokorychlostních paprsků, pro rozpojování materiálů nejsou běžně používány.

### 8.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ PRO ROZPOJOVÁNÍ BETONŮ TECHNOLOGIÍ VVP

#### 8.1.1 Složení a vlastnosti betonů C 25/30, C 30/37 a C 45/55

Zkušební vzorky vyrobeny z betonů třídy C 25/30, C 30/37 a C 45/55.

Tabulka 8-1 Složení betonů C25/30, C 30/37 na 1 m<sup>3</sup>

Složka	C 25/30	C 30/37
	Množství	Množství
Cement CEM I 42,5 R Mokrý	380 kg	480 kg
Písek 0/4 mm Žabčice	860 kg	820 kg
Kamenivo 8/16 mm Želešice (amfibolit)	970 kg	926 kg
Voda	209 kg	208 kg
Vodní součinitel w	0,55	0,43

Tabulka 8-2 Složení betonu C 45/55 na 1 m<sup>3</sup>

Složka	Množství
Cement CEM I 42,5 R Mokrý	440 kg
Písek 0/4 mm Dolany (písek těžný z vody, složení křemen s příměsí živců a slíd)	732 kg
Kamenivo 4/8 mm Litice (granodiorit a biotitické až granitizované ruly)	183 kg
Kamenivo 8/16 mm Litice	914 kg
Voda	166 kg
Plastifikátor ACE Glemium 40	3,8 kg

Tabulka 8-3 Vlastnosti betonů

Beton	Vlastnosti čerstvého betonu		Vlastnosti betonu po 28 dnech			
	Konzistence	Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]	Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]	Pevnost v příčném tahu [MPa]
C 25/30	S3	2390	2340	28,1	7,3	2,80
C 30/37	S3	2470	2350	39,2	9,1	3,50
C 45/55	S3	2440	2350	59,1	9,1	3,50

**Tabulka 8-4 Vlastnosti betonů v době tryskání technologií VVP**

Beton	Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]	Pevnost v příčném tahu [MPa]
C 25/30	2340	52,9	7,5	2,80
C 30/37	2350	71,5	9,1	3,60
C 45/55	2440	71,5	9,1	3,60

### 8.1.2 Výroba zkušebních vzorků ze dvou vrstev betonů různé kvality

Kromě vzorků výše uvedených složení byla rozpojována speciálně vyrobená zkušební tělesa ze dvou vrstev betonů různé kvality. Vrstvy betonu měly rozdílné výsledné vlastnosti (zejména pevnosti), byla měněna skladba kameniva a vodní součinitel. Pro vizuální kontrolu byly vrstvy betonu výrazně barevně odlišeny použitím barevného pigmentu. Cílem bylo ověřit, zda je technologie vysokorychlostního vodního paprsku selektivní a zda při rozpojování dojde ke snížení výkonu (snížení množství odebíraného materiálu) v okamžiku, kdy vodní paprsek pronikne k betonu vyšší kvality. Toto částečně simuluje reálné použití technologie vodního paprsku při sanacích betonových konstrukcí, kdy odstraňujeme povrchovou vrstvu betonu určitým způsobem narušenou a vrstvu betonu nedegradovaného se snažíme v co nejvyšší míře zachovat a dále nenarušovat.

Spodní probarvená vrstva betonových vzorků byla vyrobena vždy z hutného šterkopískového betonu třídy C 40/45 z portlandského cementu. Byly použity dvě frakce kameniva – písek Bratčice frakce 0/4 mm (těžený písek) a kamenivo Želešice frakce 8/16 mm (amfibolit zelenošedé barvy, drcené kamenivo). Cement CEM I – 42,5 R, Cementárna Mokrá. Beton byl ukládán do ocelové formy 100x100x400 mm. Po vyplnění části formy (cca 2/3) betonem byly vzorky ztuhněny a do této čerstvé vrstvy byla uložena druhá vrstva betonu odlišného složení. Složení vrchní vrstvy betonu uvádí Tabulka 8-5.

**Tabulka 8-5 Složení vrchní vrstvy zkušebních betonových vzorků**

Označení	Složení vrchní vrstvy zkušebních betonových vzorků
1	písek Bratčice frakce 0/4 mm, kamenivo Želešice frakce 8/16 mm, cement CEM II/B – 32,5 R, Cementárna Mokrá. Beton třídy C20/25.
2	písek Bratčice frakce 0/4 mm, kamenivo Želešice frakce 8/16 mm, cement CEM II/B – 32,5 R, Cementárna Mokrá. Beton třídy C20/25. Záměrně byla použita vysoká dávka záměsové vody.
3	písek Bratčice frakce 0/4 mm, kamenivo Želešice frakce 8/16 mm, cement CEM II/B – 32,5 R, Cementárna Mokrá. Beton třídy C12/15.
4	písek Bratčice frakce 0/ 4 mm, kamenivo Želešice frakce 8/16 mm, cement CEM II/B – 32,5 R, Cementárna Mokrá. V betonu byl záměrně obsažen vyšší podíl písku – bylo použito 70 % jemného kameniva, 30 % hrubého kameniva).

## 8.2 PARAMETRY PROCESU ROZPOJOVÁNÍ BETONŮ VYSOKORYCHLOSTNÍMI VODNÍMI PAPERKY

Rozpojování bylo provedeno kontinuálním vodním paprskem, rotačním vodním paprskem a plochým vodním paprskem. Byly použity paprsky kontinuální a paprsky s pulzací. Pro rozpojování betonů bylo použito experimentální zařízení Ústavu Geoniky AV ČR, v.v.i.

v Ostravě. Bylo použito vysokotlaké plunžrové čerpadlo KUNZ Hranice. Zařízení je schopné přivádět do trysky až 43 l vody za minutu při tlaku až 120 MPa.

Byly použity různé typy trysek:

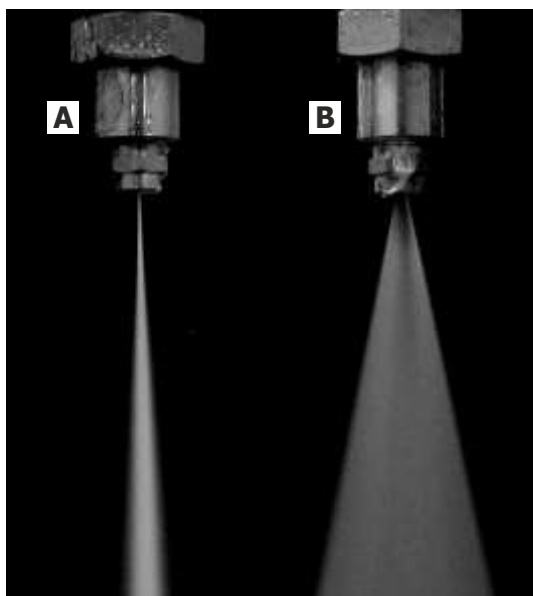
- Kontinuální paprsek byl generován standardními vodními tryskami.
- K vytvoření plochých paprsků byly použity ploché trysky Lechler typ 1508 s úhlem rozstříku 15° (Obr. 8-1 až 8-3).
- Pro rotační paprsek byla použita rotační řezná hlavice Barracuda (StoneAge) osazená dvojicí vodních trysek odkloněných od svislé osy (obr. 8-4).



Obr. 8-1 Plochá tryska Lechler, typ 1508



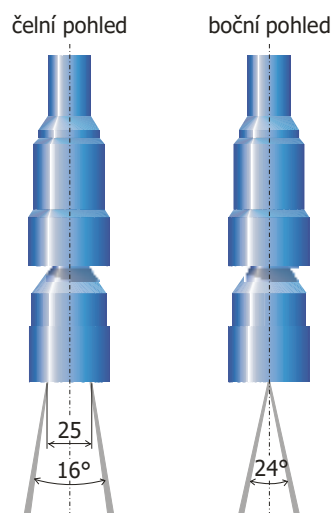
Obr. 8-2 Upevnění ploché trysky firmy Lechler 1508 k ramenu robota ABB



Obr. 8-3 Plochý vodní paprsek použitý během experimentu (A – boční pohled, B – čelní pohled), ekvivalentní průměr 2,05 mm, úhel rozstříku 15° [75].

Autor fotografie: Ing. Libor Sitek, Ph.D.





**Obr. 8-4 Rotační paprsek - řezná hlavice Barracuda™ s dvěma vodními tryskami, směry působení paprsků. Autor obrázku Ing. Libor Sitek, Ph.D. [14]**

U všech typů trysek byl alternativně předřazen akustický budič vytvářející akustické vlny o frekvenci 20 kHz. Pohyb paprsku nad rozpojovanými vzorky byl veden pomocí X-Y stolu.

**Tabulka 8-6 Parametry kontinuálního vodního paprsku**

Tlak kapaliny [MPa]	Průměr vodní trysky [mm]
40	1,98

**Tabulka 8-7 Parametry vysokorychlostního vodního paprsku rotačního (kontinuálního i pulzujícího)**

Tlak kapaliny [MPa]	Hlavice Barracuda, 2 trysky, průměr [mm]	Otáčky [ot/min]
30	1,19	1020

**Tabulka 8-8 Parametry vysokorychlostního vodního paprsku plochého (kontinuálního i pulzujícího)**

Tlak kapaliny [MPa]	Plochá tryska Lechler, průměr [mm]
30	2,05

Vzdálenost rozpojovaného betonu od trysky byla u plochého paprsku pulzujícího i kontinuálního udržována na 40 mm. Při použití rotačního kontinuálního paprsku byla vzdálenost od trysky 20 mm, u pulzujícího 40 mm z důvodu vyšší účinnosti paprsku ve větší vzdálenosti od trysky kvůli rozpadu paprsku na shluky vody. Ultrazvukový výkon při řezání pulzujícími paprsky byl nastaven na maximum.

Rychlost řezání byla  $0,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Při řezání vzorků vytvořených ze dvou vrstev betonů odlišných vlastností byla rychlost řezání měněna v intervalu ( $0,1$  až  $0,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Tímto se regulovala hloubka drážky. Rychlost řezání byla postupně snižována, dokud nebylo dosaženo tvrdší probarvené spodní vrstvy betonu.

Na betonových vzorcích byly vytvořeny drážky těmito typy paprsků:

- kontinuálním vodním paprskem

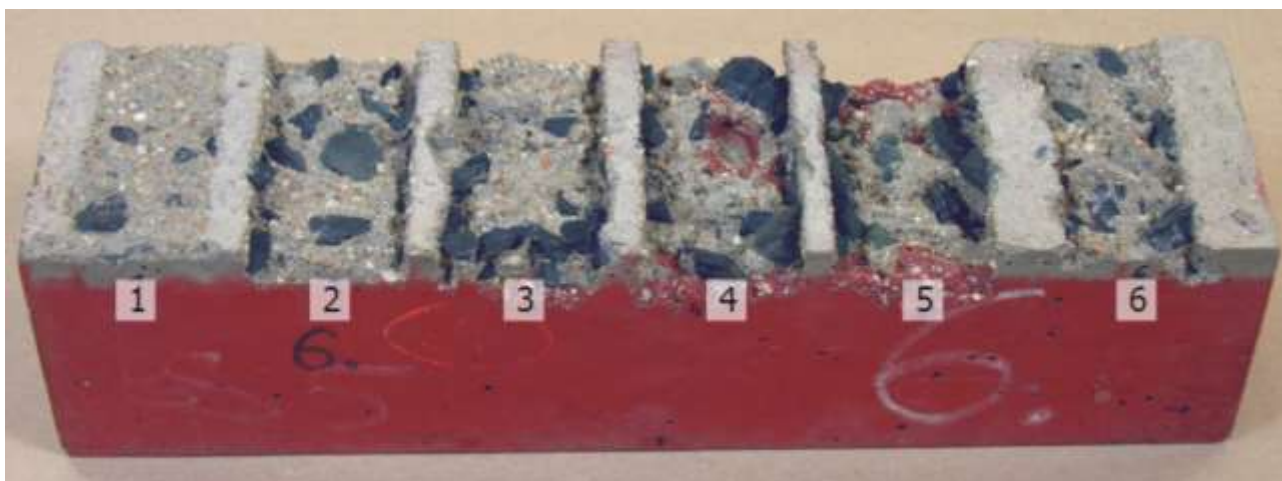
- kontinuálním pulzujícím paprskem
- rotačním kontinuálním
- rotačním pulzujícím paprskem
- plochým kontinuálním
- plochým pulzujícím paprskem.

Byla provedena fotodokumentace drážek. Kromě vizuálního zhodnocení (i s použitím snímání porušeného povrchu mikroskopem s různým zvětšením) byl hodnocen objem rozpojeného materiálu, případně hloubka vytvořené drážky v betonu a přítomnost/absence trhlin v okolí provedené drážky.

### 8.3 ROZPOJOVÁNÍ BETONŮ KONTINUÁLNÍMI PAPERSKY (KONTINUÁLNÍM A KONTINUÁLNÍM PULZUJÍCÍM PAPERSKEM)

#### 8.3.1 Vliv rychlosti řezání na hloubku drážky v betonu a na rozpojený objem betonu

Při vyšších rychlostech řezání ( $0,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) energie kontinuálního paprsku nestačí k rozpojení povrchové vrstvy betonu. Naopak pulzující paprsek je schopen beton při vyšších rychlostech rozpojovat. Při nižších rychlostech řezání ( $0,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) se pak rozdíl mezi oběma typy paprsků snižují. Vliv rychlosti řezání na hloubku řezu a tedy i rozpojený objem narušené vrstvy betonu názorně demonstruje následující obrázek.



**Obr. 8-5** Vliv rychlosti řezání na hloubku drážky a rozpojený objem. Beton – spodní část C40/45, vrchní vrstva C20/25 s vysokou dávkou záměsové vody. (1 – kontinuální paprsek, rychlost řezání  $0,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , 2 – pulzující, rychlost řezání  $0,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , 3 – pulzující, rychlost řezání  $0,3 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , 4 - pulzující, rychlost řezání  $0,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , 5 - pulzující, rychlost řezání  $0,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , 6 - kontinuální, rychlost řezání  $0,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ )

#### 8.3.2 Vliv pulzací v kontinuálním paprsku na účinnost rozpojování betonů

Pokud zavedeme do kontinuálního vysokorychlostního paprsku pulzy, pulzující kontinuální paprsek má v porovnání s kontinuálním vždy vyšší účinnost. Experimenty prokázaly, že hloubka drážky vytvořená ve sledovaných betonech pulzujícím vysokorychlostním vodním paprskem (v závislosti na typu a pevnosti betonu a parametrech paprsku) je zhruba 1,5 až 2x větší.

Kontinuální paprsek vylamuje kusy betonu, drážky po řezání pulzujícím paprskem jsou pravidelnější bez výraznějších odštěpků.



**Obr. 8-6 Drážka po rozpojování betonu třídy C25/30. Vysokorychlostní vodní paprsek kontinuální. Tlak vody 40 MPa, průměr vodní trysky 1,98 mm, rychlost řezání 5 m.min<sup>-1</sup>. Průměrná hloubka řezu 6,3 mm. [14]**

U pulzujícího kontinuálního paprsku je spodní plocha drážky drsnější než u paprsku kontinuálního.



Toho lze využít v aplikacích, kde je nutná dobrá přilnavost nanášených vrstev k otryskanému povrchu.



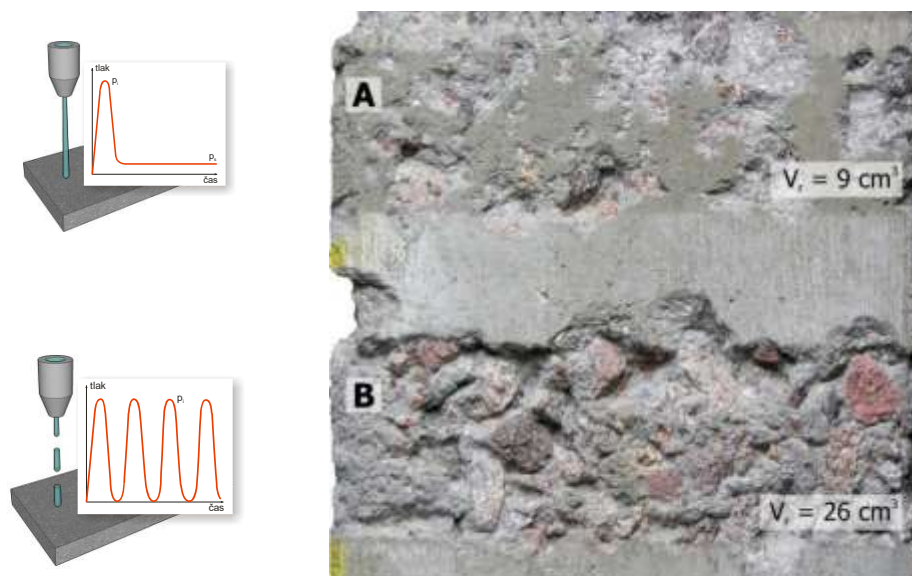
**Obr. 8-7 Drážka po rozpojování betonu třídy C25/30. Vysokorychlostní vodní paprsek kontinuální pulzující. Tlak vody 40 MPa, průměr vodní trysky 1,98 mm, rychlost řezání 5 m.min<sup>-1</sup>. Průměrná hloubka řezu 9,6 mm. [14]**

#### **8.4 ROZPOJOVÁNÍ BETONŮ ROTAČNÍMI PAPRSKY (KONTINUÁLNÍM ROTAČNÍM PAPRSKEM A PULZUJÍCÍM ROTAČNÍM PAPRSKEM)**

Rotační paprsky jsou používány pro ošetření větších ploch betonu – pro čištění, pro odstraňování povrchových vrstev apod. Nejjednodušší jsou rotační hlavice osazené dvěma tryskami, existují však nástroje i s několika desítkami trysek. Zde pak nastává problém s vhodným umístěním trysek v hlavici tak, aby byla energie paprsků po ploše rozložena co nejpravidelněji v závislosti na pohybu hlavice.

### 8.4.1 Vliv pulzací v rotačním paprsku na účinnost rozpojování betonů

Obdobně jako při užití kontinuálního vodního paprsku se prokázal pozitivní vliv pulzací na účinnost rotačního paprsku. Při experimentech bylo zjištěno, že rotační pulzující paprsek za stejných podmínek (tlak paprsku, rychlost řezání) vždy rozpojí větší objem betonu, než paprsek rotační kontinuální, a to zhruba 2,3 až 6,3krát v závislosti na druhu betonu a parametrech paprsku.

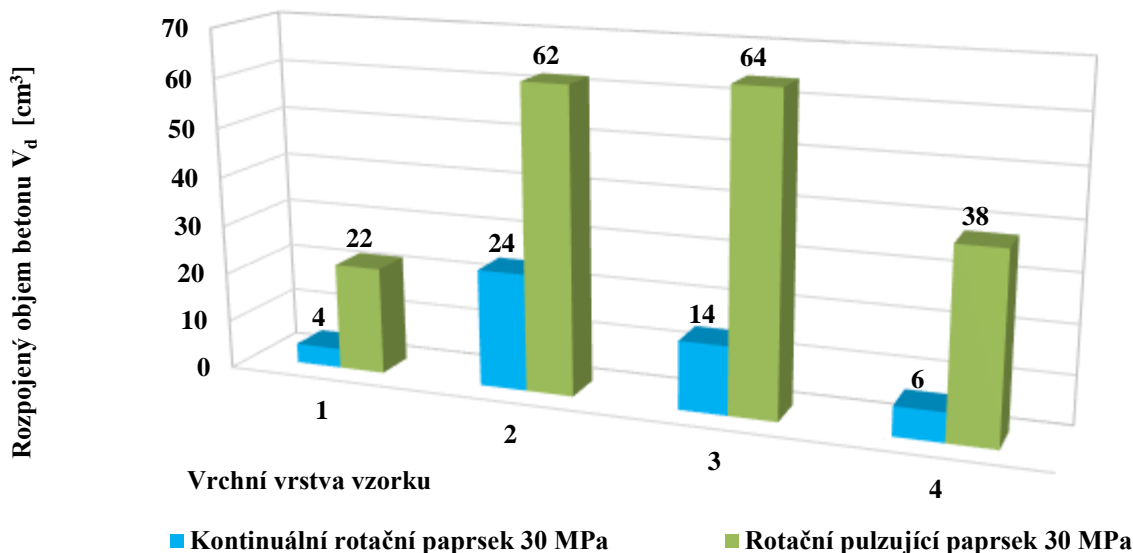


**Obr. 8-8 Ukázka drážek vytvořených rotačním kontinuálním (A) a rotačním pulzujícím paprskem (B) ve vzorku betonu (V<sub>r</sub> – rozpojený objem, tlak vody 30 MPa, průměr trysek 2x1,19 mm, vzdálenost vzorku od trysky 20 mm u kontinuálního a 40 mm u pulzujícího paprsku, rychlost řezání 0,2 m.min<sup>-1</sup>), beton C 45/55.**

### 8.4.2 Účinek rotačního kontinuálního paprsku a rotačního pulzního paprsku na rozpojování vrchní vrstvy betonu různých vlastností

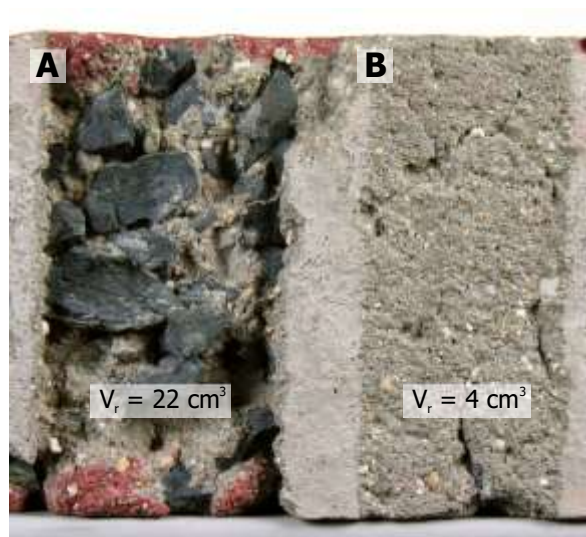
Kvalita betonu má vliv na množství rozpojeného betonu a na rychlost rozpojování. Vliv kvality horní vrstvy betonu na rozpojený objem betonu při stejných podmínkách rozpojování (typ paprsku, rychlost posuvu, vzdálenost od povrchu vzorku) demonstruje následující graf. Pro experiment byly použity vzorky vyrobené ze dvou vrstev betonu (viz. 8.1.2).

Pokud jde o hodnocení schopnosti vysokorychlostního rotačního vodního paprsku porušovat vrstvu betonu, ukázalo se, že nejlépe odolává paprsku vrstva betonu 1 (beton třídy C20/25, bez narušení). Nižší odolnosti vykazovala vrstva betonu 2 (beton třídy C20/25 s vysokou dávkou záměsové vody) a betonu 3 (beton třídy C12/15).



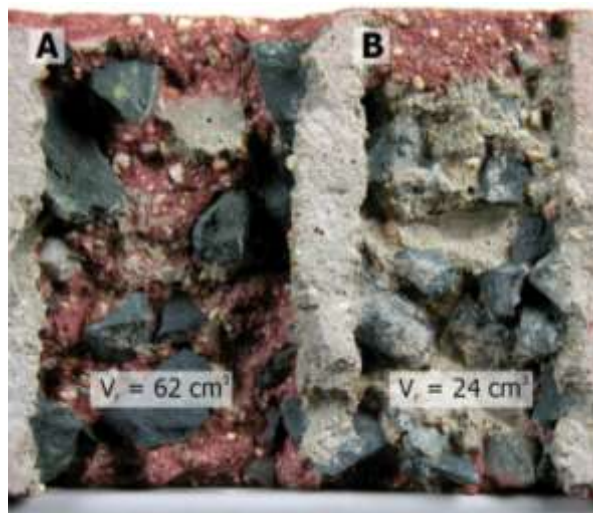
Obr. 8-9 Účinek rotačního paprsku na rozpojování vrchní vrstvy betonu různých vlastností. 1 – C20/25, 2 - C20/25 – beton s vyšší dávkou záměsové vody, 3 – C12/15, 4 - písek Bratčice 0/ 4 mm, kamenivo Želešice 8/16 mm, cement CEM II/B – 32,5 R, Mokrý, 70 % frakce 0/4 mm, 30 % frakce 8/16 mm. Tlak vody 30 MPa, vzdálenost vzorku od trysky 20 mm u kontinuálního a 40 mm u pulzujícího paprsku, rychlost řezání 0,5 m.min<sup>-1</sup>

Příklady vzhledu drážek po řezání kontinuálním rotačním a pulzujícím rotačním vodním paprskem u jednotlivých vzorků včetně rozpojených objemů  $V_d$  u zobrazených drážek jsou uvedeny na následujících obrázcích.

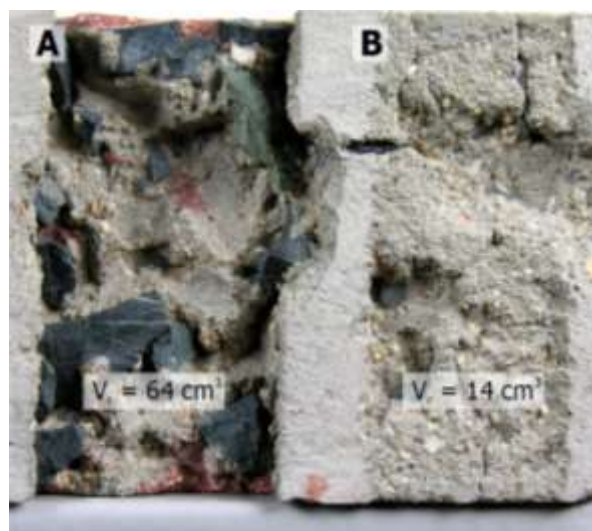


Obr. 8-10 Ukázka drážek vytvořených rotačním pulzujícím (A) a rotačním kontinuálním paprskem (B) v betonu č. 1 - Beton C20/25, písek Bratčice 0/4 mm, kamenivo Želešice 8/16 mm, cement CEM II/B – 32,5 R, Mokrý. ( $V_r$  – rozpojený objem, tlak vody 30 MPa, průměr trysky 2x1,47 mm, vzdálenost vzorku od trysky 40 mm u pulzujícího a 20 mm u kontinuálního paprsku, rychlost řezání 0,5 m.min<sup>-1</sup>)





Obr. 8-11 Ukázka drážek vytvořených rotačním pulzujícím (A) a rotačním kontinuálním paprskem (B) ve vzorku betonu č. 2 - Beton C20/25, písek Bratčice 0/4 mm, kamenivo Želešice 8/16 mm, cement CEM II/B – 32,5 R, Mokrý, vysoká dávka záměsové vody. ( $V_r$  – rozpojený objem, tlak vody 30 MPa, průměr trysek 2x1,47 mm, vzdálenost vzorku od trysky 40 mm u pulzujícího a 20 mm u kontinuálního paprsku, rychlost řezání 0,5 m.min<sup>-1</sup>)



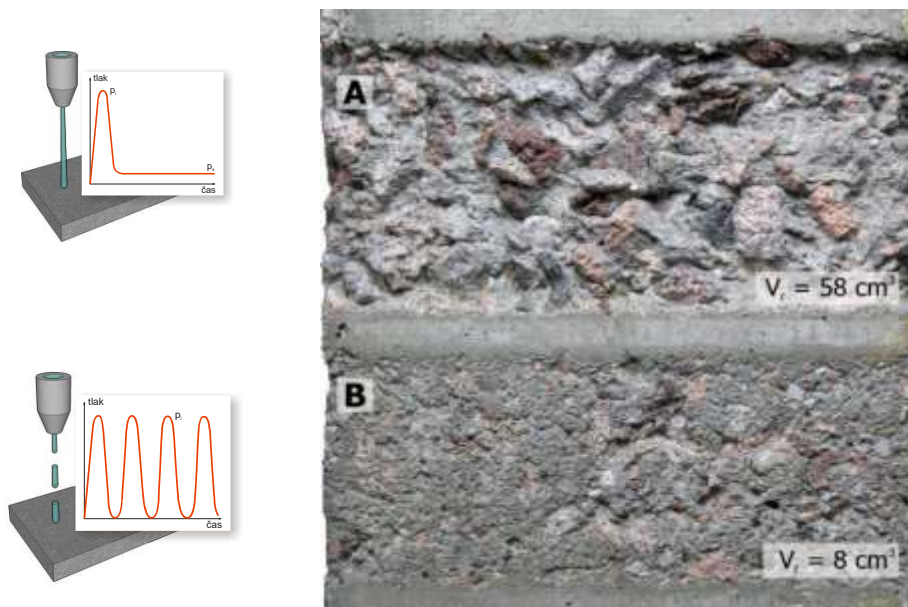
Obr. 8-12 Ukázka drážek vytvořených rotačním pulzujícím (A) a rotačním kontinuálním paprskem (B) ve vzorku betonu č. 3 - Beton C12/15, písek Bratčice 0/4 mm, kamenivo Želešice 8/16 mm, cement CEM II/B – 32,5 R, Mokrý. ( $V_r$  – rozpojený objem, tlak vody 30 MPa, průměr trysek 2x1,47 mm, vzdálenost vzorku od trysky 40 mm u pulzujícího a 20 mm u kontinuálního paprsku, rychlost řezání 0,5 m.min<sup>-1</sup>)

## 8.5 ROZPOJOVÁNÍ BETONŮ PLOCHÝMI PAPRSKY (KONTINUÁLNÍM PLOCHÝM A PULZUJÍCÍM PLOCHÝM PAPRSKEM)

Plochý kontinuální paprsek se zatím při otryskávání betonu nepoužívá vzhledem k jeho nízké účinnosti. Pokud ale do plochého kontinuálního paprsku zavedeme pulzace, pak plochý pulzující paprsek rozpojí cca 7,2 krát větší objem zkoumaného betonu za stejných podmínek než paprsek plochý kontinuální (bez pulzací).



**Obr. 8-13** Drážky vytvořené plochým pulzujícím (A) a plochým kontinuálním paprskem (B) ve vzorku betonu C 45/55 XF4. Jeden průchod. ( $V_r$  – rozpojený objem, tlak vody 30 MPa, ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost vzorku od trysky 40 mm, rychlost řezání 0,2 m.min<sup>-1</sup>)



**Obr. 8-14** Plocha vytvořená třemi průchody plochého pulzujícího (A) a plochého kontinuálního paprsku (B) vedle sebe na vzorku betonu C 45/55 ( $V_r$  – rozpojený objem, tlak vody 30 MPa, ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost vzorku od trysky 40 mm, rychlost řezání 0,2 m.min<sup>-1</sup>)

## 8.6 SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ ROZPOJOVÁNÍ BETONŮ KONTINUÁLNÍMI A PULZUJÍCÍMI VYSOKORYCHLOSTNÍMI VODNÍMI PAPRSKY

Byly použity různé typy vysokorychlostních vodních paprsků – kontinuální, kontinuální pulzující, rotační, rotační pulzující, plochý, plochý pulzující. Poznatky lze stručně shrnout do následujících bodů:

- Na všech zkoumaných betonech dosáhl pulzující paprsek vyšší účinnosti v porovnání s paprskem kontinuálním. Při použití rotačního vodního paprsku byl objem betonu rozpojený pulzujícím paprskem oproti kontinuálnímu zhruba 2,3 až 6,3krát větší, při

použití plochého paprsku byl objem rozpojeného betonu při zavedení pulzací až 7 krát větší.

- Podobně jako u kontinuálního paprsku také u paprsku pulzujícího se vzrůstající rychlostí řezání klesá účinnost rozpojování u všech zkoumaných typů betonů.

Výsledky dosažené plochým pulzujícím paprskem jsou velmi pozitivní. Pokud chceme dosáhnout rozložení energie paprsku na větší plochu, můžeme kromě použití vícenásobných soustav trysek použít plochý paprsek. Tento typ paprsku není při sanačních zásazích v současné době používán z důvodu nedostatečné energie paprsku. Plochý paprsek je generován jedinou tryskou. Protože se jeho energie rozloží do poměrně velké šířky, není při běžně užívaných parametrech paprsků (tlak vody, průtok vody) schopen beton dostatečně porušit. Plochý vodní paprsek se používá pro speciální aplikace jako je čištění, odstraňování starých nátěrů, odstraňování okují z povrchů apod. Pro odstraňování betonu je třeba plochý vodní paprsek vhodně upravit a zvýšit jeho účinek. Tento problém je řešen na Ústavu Geoniky AV ČR, v.v.i. v Ostravě. Při zavedení vysokofrekvenčních pulzací prostřednictvím akustického generátoru do běžného vodního paprsku je pulzující vodní paprsek schopný i při použití běžných vysokotlakých zařízení užívaných k sanacím beton porušit [9], [14].

Zajímavé je také porovnání účinnosti plochého pulzujícího paprsku s paprskem rotačním kontinuálním, který se běžně při sanacích používá. Plochý pulzující paprsek je schopen rozpojit zhruba dvojnásobný objem při jinak stejné energetické náročnosti. Protože akustická energie nutná k vytvoření pulzů v pulzujícím paprsku představuje zanedbatelnou část z celkové energie potřebné na generování paprsku (asi 1-2%), ukazuje se, že pulzující plochý paprsek se může v budoucnu stát vážným konkurentem rotačních hlavíc [9], [14]. Spojení vodních paprsků s akustickým generátorem pulzů umožňuje nové možnosti použití plochých paprsků (viz např. [26], [76], [77]). Takto modifikovanými paprsky lze dosáhnout velmi zajímavých výsledků i při rozpojování pevných betonů, a to při relativně nízké energetické náročnosti.

## **8.7 EKONOMICKÉ ASPEKTY APLIKACE TECHNOLOGIE VYSOKORYCHLOSTNÍCH KONTINUÁLNÍCH A PULZUJÍCÍCH VODNÍCH PAPERSKŮ PRO ROZPOJOVÁNÍ BETONU**

### **8.7.1 Členění nákladů technologií pro rozpojování materiálů**

Tématu ekonomického porovnání nových a tradičních technologií pro dělení betonu je věnována v odborné literatuře poměrně malá pozornost. Většina dostupných příspěvků se týká ekonomických analýz tradičních technologií pro řezání a rozpojování materiálů. Ekonomickou analýzou technologií pro obrábění se zabýval například Manetsch a Huber [78]. Náklady na řezání materiálů abrazivním vodním paprskem jsou hodnoceny například v [79], [80]. Porovnání nákladů netradičních technik obrábění provedla Vidová [81] – sestavila analýzu nákladů založenou na měření ekonomické efektivity řezacích strojů.

Co se týká vodního paprsku, Zeng a Kim [82] prezentovali v ekonomické analýze metodu pro predikci nákladů na řezání abrazivním vodním paprskem. Vyvinuli metodu pro predikci nákladů na řezání abrazivním vodním paprskem na základě použití předpokládané řezné rychlosti. Jejich analýzu použili ve své práci Singh a Munoz [83]. Určili, že pomocí vodního paprsku lze oproti jiným konvenčně používaným technologiím uspořit od 10% do 30% celkových provozních nákladů. Zdůraznili, že ekonomická analýza procesu řezání vodním paprskem je obtížná vzhledem ke třem faktorům:



- stejné řezné výsledky lze dosáhnout mnoha různými kombinacemi parametrů vodního paprsku
- vysoká flexibilita procesu, schopnost řezat technologií vodního paprsku různé profily bez změny nástrojů
- různí zákazníci mají různé požadavky a mohou vyhodnotit výsledky řezání různě.

Ve stavebnictví je vodní paprsek používán primárně ne pro řezání, ale pro odstraňování betonu (pro předúpravu betonu) při sanacích betonových konstrukcí.

Podle ACI 555R-01 [4] mohou být celkové náklady na odstraňování betonu sumarizovány jako:

- náklady na použité zařízení pro odstraňování betonu
- náklady na odstranění betonu
- náklady na transport a na uložení odstraněného materiálu
- náklady na hodnocení stavu konstrukce po odstranění betonu.

Při členění nákladů na použití technologie vysokorychlostního vodního paprsku lze vycházet z práce Mombera [12], který rozděluje tyto náklady do následujících kategorií:

- náklady na vysokotlakou jednotku
- náklady na vysokotlaké nástroje
- náklady na systém pro vedené trysky
- náklady na systém čištění vody pro vysokotlakou jednotku
- opotřebení trysky
- energie (nafta, elektřina)
- voda (čistá a odpadní)
- mzda operátorů.

Konkrétní číselné údaje týkající se nákladů při použití technologie vysokorychlostního vodního paprsku pro odstraňování povrchu betonu můžeme nalézt v práci Yan a kol. [84], kde provedli porovnání nákladů na odstraňování betonu při použití klasických technologií a technologie vodního paprsku. Vodní paprsek byl použitý pro odstraňování porušeného betonu ze stropů v podzemních garážích v náročných podmínkách (přítomnost vedení plynu, potrubí vzduchotechniky). Použití technologie vysokorychlostního vodního paprsku umožnilo úsporu 200 \$/m<sup>2</sup> v porovnání s technologiemi odstraňování betonu pneumatickým kladivem a tryskání pískem.

Ekonomický efekt technologie vysokorychlostního paprsku pro rozpojování betonu lze také posuzovat podle parametrů procesu rozpojování, jako je např. generovaný impaktní tlak [85] nebo měrná energie nutná pro desintegraci betonu při použití různých typů paprsku [38]. Výsledky ukázaly, že progresivní typy paprsků – pulzující vodní paprsky - dosahují vyšší efektivity v porovnání s běžně používaným kontinuálním vodním paprskem. Impaktní tlak generovaný proudy vody je vyšší než stagnační tlak generovaný kontinuálním vodním paprskem při srovnatelných provozních podmínkách.

### **8.7.2 Analýza nákladů na technologii vysokorychlostního vodního paprsku**

Vidová [81] provedla porovnání nákladů na různé tradiční i netradiční technologie pro obrábění materiálů, včetně vysokorychlostního vodního paprsku. Na základě jejího modelu bylo provedeno porovnání nákladů pro různé typy technologie vysokorychlostního paprsku pro odstraňování vrstvy degradovaného betonu.

Celkové technologické náklady  $C_{total}$  pro odstraňování vrstvy betonu jsou specifikovány jako suma celkových fixních nákladů  $C_{fixed}$  a celkových variabilních nákladů  $C_{variable}$ .

Pokud budeme sledovat hodinové náklady na odstranění vrstvy betonu, můžeme vyjádřit celkové náklady spojené s pracovními hodinami jako

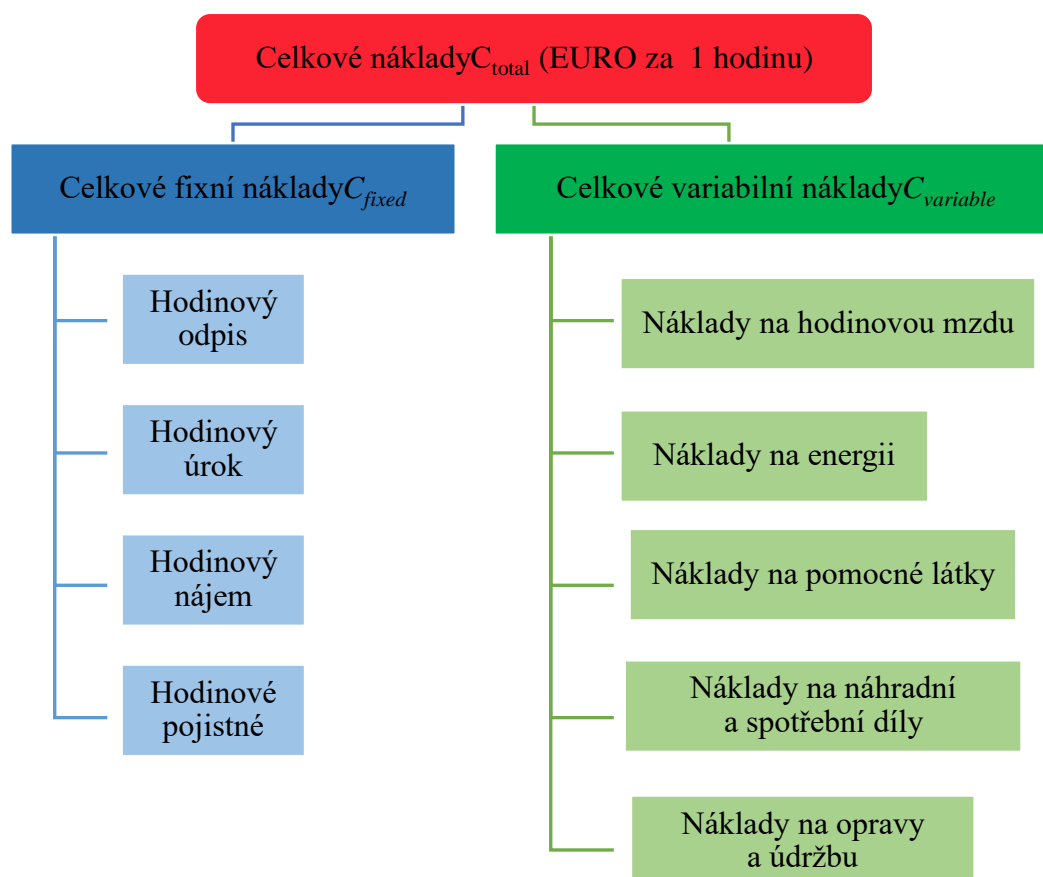
$$C_{total} = C_{fixed} + C_{variable} \quad (18)$$

Fixní náklady  $C_{fixed}$  zahrnují náklady na odpisy výrobního zařízení  $C_{depr}$ , úroky související se zabezpečením finančních prostředků na nákup zařízení  $C_{int}$ , nájem za výrobní prostory  $C_{rent}$  a pojistné za výrobní zařízení  $C_{prem}$ :

$$C_{fixed} = C_{depr} + C_{int} + C_{rent} + C_{prem} \quad (19)$$

Variabilní náklady  $C_{variable}$  zahrnují náklady na materiál  $C_{mat}$ , náklady na mzdu pracovníků  $C_{wage}$ , náklady na spotřebovanou energii  $C_{energy}$ , náklady na spotřebované pomocné látky  $C_{exc}$ , náklady na spotřebované náhradní a spotřební díly  $C_{spare}$  a náklady na údržbu a opravy  $C_{main}$ .

$$C_{variable} = C_{mat} + C_{wage} + C_{energy} + C_{exc} + C_{spare} + C_{main} \quad (20)$$



**Obr. 8-15** Nákladové položky pro výpočtový model pro různé typy vysokorychlostního paprsku pro odstraňování vrstvy degradovaného betonu [86]

Členění položek pro výpočet celkových fixních nákladů a celkových variabilních nákladů pro výpočtový model pro různé typy vysokorychlostního paprsku pro odstraňování vrstvy degradovaného betonu je uvedeno v následující tabulce.

**Tabulka 8-9 Příklad položek pro výpočtový model pro různé typy vysokorychlostního paprsku pro rozpojování betonu [87]**

	<b>Položka</b>	<b>Jednotka</b>
1	Vstupní cena zařízení	[EURO]
2	Vstupní cena čerpadla	[EURO]
3	Vstupní cena pulzujícího zařízení	[EURO]
4	Cena manipulátoru pro pohyb trysky	[EURO]
5	Doba odpisu	[roky]
6	Efektivní časový fond	[hod]
7	Úroková sazba	[%]
8	Náklady na plochu	[EURO]
9	Pojistné	[%]
10	Hodinová mzda	[EURO]
11	Mzdový koeficient	[-]
12	Měsíční paušál energie	[EURO]
13	Hodin práce měsíčně	[hod]
14	Hodinová spotřeba energie	[kWh]
15	Cena energie	[EURO/kWh]
16	Cena pomocné látky (voda)	[EURO/l]
17	Hodinová spotřeba pomocné látky (voda)	[l]
18	Koeficient náhradních dílů (%)	[%]
19	Koeficient oprav a údržby (%)	[%]
20	Hodinová cena hadice + trysek	[EURO]
21	Hodinová cena trysek	[EURO]

### **8.7.3 Experimentální hodnocení nákladů na technologii vysokorychlostního kontinuálního a pulzujícího vodního paprsku**

Na základě modelu prezentovaného Vidovou [81] byl proveden experiment s cílem určit náklady na odstraňování povrchové vrstvy betonu technologií vysokorychlostního paprsku.

Kalkulace byla provedena pomocí modelu pro hodnocení výrobních technologií [81] doplněného specifickými parametry pro hodnocení ekonomických nároků technologie vysokorychlostního vodního paprsku, jak je formulovali Zeng and Kim [82] a Singh and Munoz [83]. Model vychází z předpokladu, že celkové technologické náklady jsou nejdůležitějším technicko-ekonomickým indikátorem provozu strojů a zařízení a také vhodným kritériem k porovnání variantních řešení. Celkové technologické náklady se počítají jako suma celkových fixních a celkových variabilních nákladů. Jsou to náklady vynaložené na celkový objem výroby.

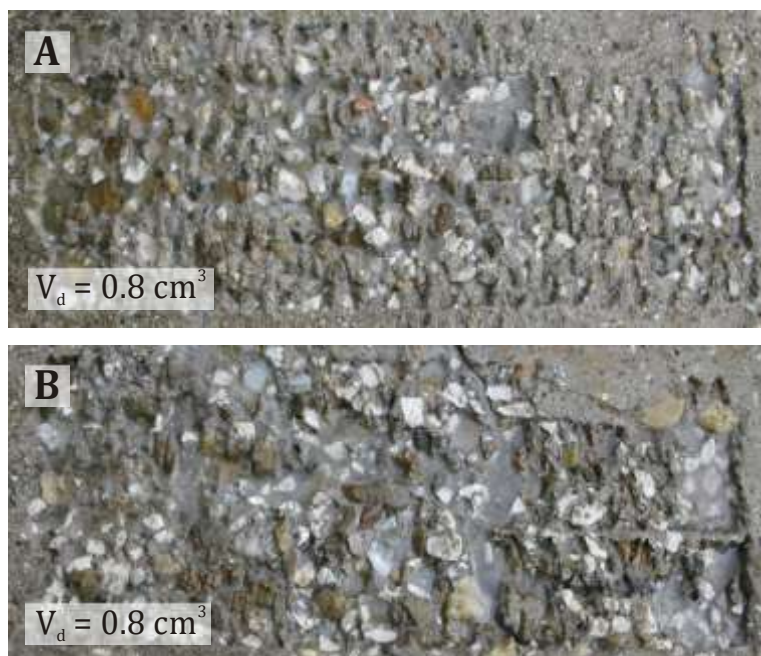
Bylo provedeno porovnání nákladů na odstranění degradované vrstvy betonu silničního panelu pomocí kontinuálního oscilujícího paprsku a pulzujícího oscilujícího paprsku. Experiment byl proveden na betonovém panelu vyrobeném z betonu třídy C30/37 XF3, max. zrna kameniva 16 mm.

Povrchové vrstvy betonu byly odstraňovány postupně od horní plochy betonového panelu pomocí kontinuálního oscilujícího paprsku a pomocí pulzujícího oscilujícího paprsku. Míra výkonu paprsku byla hodnocena pomocí rozpojeného objemu betonu.

Testy byly provedeny při různých tlacích vody a při použití trysek různého průměru. Pro testy byla použita různá vysokotlaká čerpadla. Parametry použitých vodních paprsků uvádí Tabulka 8-10.

Vzhledem k tomu, že pulzující vodní paprsek může být generován zhruba 3krát nižším tlakem vody než kontinuální paprsek při dosažení stejného rozpojeného objemu betonu, může být pro generování pulzujícího paprsku použito mnohem levnější zařízení [85]. Pro generování pulzujícího vodního paprsku bylo při experimentu skutečně použito levnější zařízení (až 2,4 krát) ve srovnání se zařízením pro generování kontinuálního vodního paprsku při dosažení stejného desintegračního efektu.

Ukázka ošetřených povrchů je znázorněna na následujícím obrázku.



**Obr. 8-16 Porovnání povrchů silničního panelu (C30/37 XF3) ošetřených pulzujícím oscilujícím paprskem (A) a kontinuálním oscilujícím paprskem (B)**

**V<sub>a</sub> – rozpojený objem, tlak vody: 70 MPa (A), 200 MPa (B),  
průměr trysky: 1,2 mm (A), 0,81 mm (B),  
vzdálenost od povrchu: 50 mm (A), 45 mm (B),  
rychlost posuvu trysky - rychlost ošetření povrchu: 12 cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>. [86]**

Na základě rovnic (18) až (20) byly vypočítány celkové hodinové náklady na provoz čtyř různých vysokotlakých čerpadel (Uraca KD716, Pratisolli HF 18, Uraca KD724, AQP AQH50). Pro nízké tlaky vody byla v experimentu použita čerpadla Pratisolli HF18 a AQP AQH50, pro vysoké tlaky vody čerpadla Uraca KD716 a Uraca KD724.

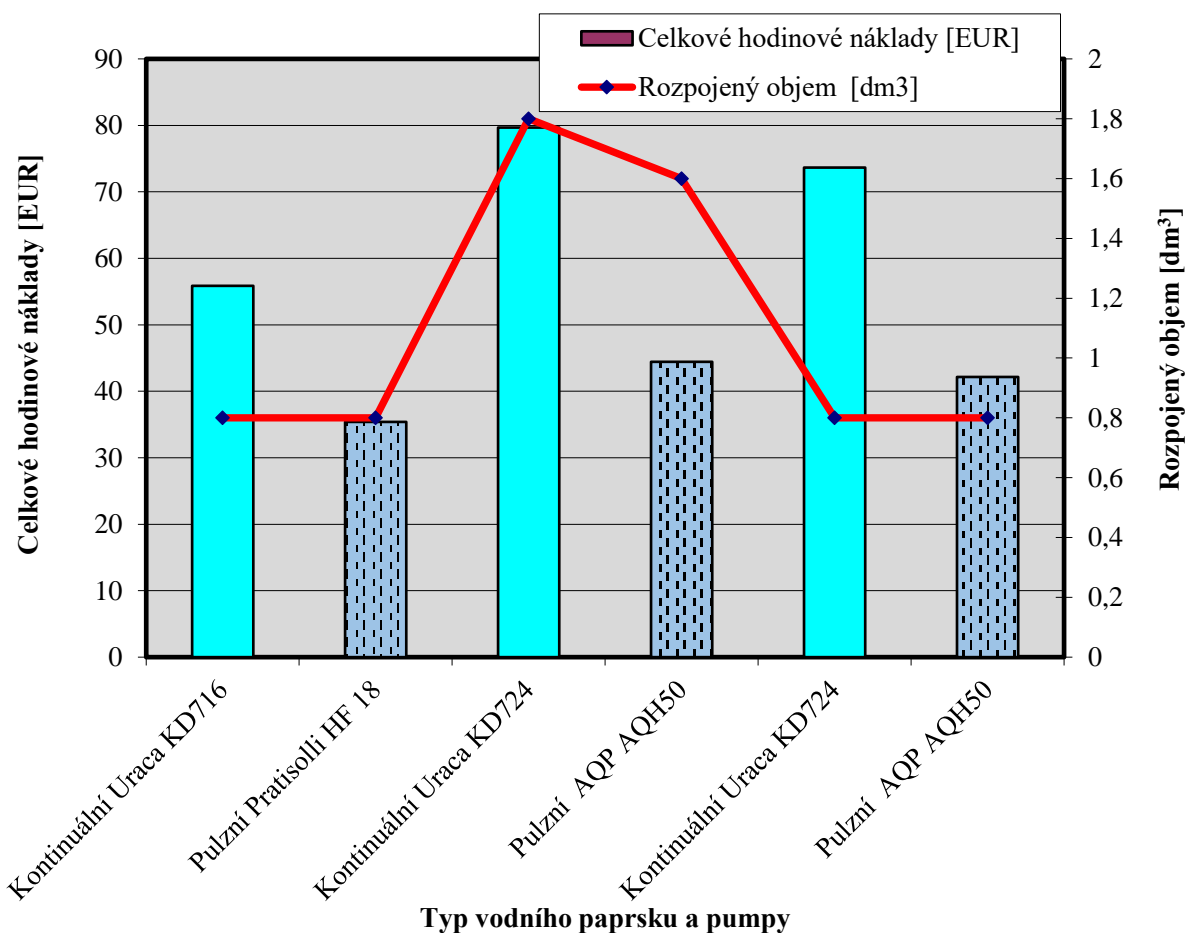
Konkrétní hodnoty dosazované do jednotlivých částí výpočtového modelu pro celkem 6 variant vodního paprsku byly kalkulovány ve spolupráci s firmou Net s.r.o. s užitím interních informací firmy Net s.r.o. [87]. Experimentální zkoušky rozpojování silničních panelů byly

provedeny s využitím zařízení firmy Net s.r.o. Porovnání výsledků ošetření povrchů silničního panelu pomocí kontinuálního oscilujícího paprsku generovaného vyšším tlakem a pomocí pulzujícího oscilujícího vodního paprsku generovaného nižším tlakem a celkové náklady pro odstranění objemu betonu při použití specifikované pumpy pro generování vodního paprsku jsou uvedeny v následující tabulce.

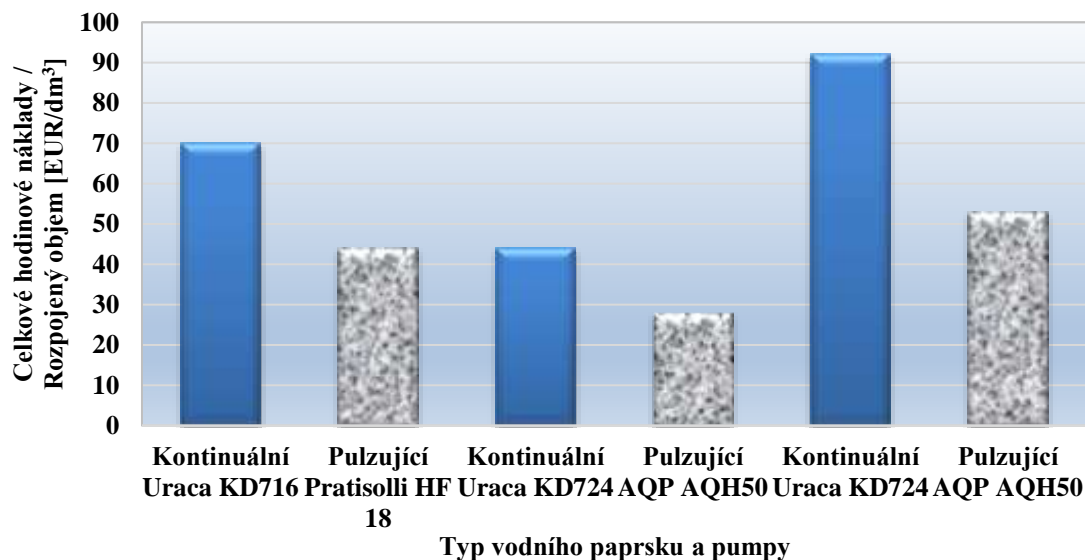
**Tabulka 8-10 Výsledky rozpojování betonu kontinuálním oscilujícím a pulzujícím oscilujícím vodním paprskem a celkové náklady pro odstranění objemu betonu**

Typ paprsku	Průměr trysky [mm]	Tlak vody [MPa]	Rozpojený objem [cm <sup>3</sup> ]	Použitá vysokotlaká pumpa	Celkové hodinové náklady [EUR]
Kontinuální	0,81	180	0,8	Uraca KD716	55,86
Pulzující	1,50	50	0,8	Pratisolli HF 18	35,39
Kontinuální	0,97	200	1,8	Uraca KD724	79,67
Pulzující	1,40	70	1,6	AQP AQH50	44,43
Kontinuální	0,81	200	0,8	Uraca KD724	73,65
Pulzující	1,20	70	0,8	AQP AQH50	42,15

Poznámka: Celkové náklady jsou kalkulovány podle interních materiálů firmy Net s.r.o [87].



**Obr. 8-17 Celkové hodinové náklady pro kontinuální a pulzující vodní paprsek**



**Obr. 8-18 Celkové hodinové náklady pro kontinuální a pulzující vodní paprsek, vztaheno na rozpojený objem**

#### 8.7.4 Zhodnocení výše nákladů na vysokorychlostní kontinuální a pulzující vodní paprsek

Pro výběr vhodné metody pro odstranění porušených vrstev betonu při splnění technických požadavků na kvalitu odstraněného betonu a při efektivním vynaložení nákladů je třeba specifikovat náklady na možné varianty použitých technologií pro odstraňování degradovaného betonu. Výsledky výpočtů ukazují, že použití moderní technologie pulzujícího vodního paprsku ve srovnání s tradiční metodou kontinuálního vysokorychlostního vodního paprsku umožňuje výrazně snížit náklady na odstraňování vrstev poškozeného betonu. Při odstranění stejného objemu betonu byly celkové hodinové náklady při použití pulzujícího vodního paprsku 1,6 krát nižší.

Při vyšších tlacích a vyšších průtocích vody (tím je dosaženo i vyšší množství rozpojeného betonu za jednotku času) vykazuje použití pulzujícího vodního paprsku ještě nižší náklady. V našich testech bylo dosaženo 1,8 krát nižších nákladů při použití pulzujícího paprsku. Protože obě technologie (kontinuální a pulzující paprsek) jsou založeny na stejných principech, používání pulzujících trysek přináší největší úspory ve srovnání s kontinuálními tryskami v odpisových položkách, které zahrnují celkové ceny zařízení a související náklady na opravy, údržbu a náhradní díly. Také náklady na energii jsou nižší při použití pulzujícího vodního paprsku [86].

Je třeba zdůraznit, že tento konkrétní příklad dosažených nákladů nelze použít obecně. Vzhledem k širokému spektru aplikací, kde lze použít vodní paprsek, nelze tvrdit, že pulzující vodní paprsek je vždy úspornější než jiné technologie. Při dosažení konkrétních údajů z experimentálního měření rozpojeného objemu betonu na vzorové ploše a při dosažení údajů konkrétního zařízení je tento postup možno použít pro hodnocení nákladů konkrétních typů technologie vodního paprsku. Vždy je třeba vyhodnotit konkrétní případ a na základě výsledků provést výběr vhodné technologie. Na základě vývoje aplikací je ale možné konstatovat, že pulzující vodní paprsek se v mnoha oblastech stává vážným konkurentem poměrně rozšířené technologie kontinuálního vodního paprsku.

## 9 SLEDOVÁNÍ ÚČINKŮ VYSOKORYCHLOSTNÍCH VODNÍCH PAPERŮ NA BETONECH VYSTAVENÝCH PŮSOBENÍ VYSOKÝCH TEPLOT

Výzkum byl zaměřen na použití technologie vysokorychlostních vodních paprsků pro odstraňování vrstev betonu poškozených tepelným zatížením. Interakce technologie vysokorychlostního paprsku pro odstraňování betonů vystavených působení vysokých teplot není dosud detailně popsána. Poznatky získané ze sledování účinků vysokorychlostního paprsku na betonech ovlivněných tepelným namáháním mohou přispět ke správné aplikaci této technologie pro odstraňování poškozených vrstev betonu například v důsledku požáru konstrukce.

Otázky působení vysokých teplot na beton zahrnují komplexní identifikaci změn, k nimž dochází v cementové matici, a dále studium transportních jevů. Analýza je komplikovaná i z důvodu, že beton je kompozit složený z podstatně odlišných složek: cementové matrice a kameniva. Různé druhy kameniva se liší svým mineralogickým složením, při zahřívání betonu dochází v kamenivu k přeměnám, které jsou typické a rozdílné pro každý minerál a nastává degradace cementové matrice. Působení vysokých teplot na beton má za následek zhoršení jeho kvality a ztrátu pevností. Směrodatná je rychlost zahřívání betonu, dosažené maximální teploty a doba jejich působení. Změny a jejich intenzita jsou rozdílné podle složení cementu a kameniva. Při zahřívání cementové matrice dochází k rozkladu hydratačních produktů cementu, krystalického  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a amorfních CSH a CAH sloučenin, dochází k uvolnění chemicky vázané vody. Tento rozklad způsobuje smrštění těchto složek pojiva, což se projeví zvětšením velikosti pórů a celkovým nárůstem objemu pórů. Výsledným efektem mnoha probíhajících změn, ke kterým dochází v zahříváném betonu, jsou změny fyzikálních, tepelných a mechanických vlastností betonu [88].

Obecně lze popsat chování betonu při působení vysokých teplot takto:

100 °C – 300 °C uvolnění volné vody ve struktuře betonu, mírné snížení pevnosti v tahu a modulu pružnosti, mohou se vyskytovat mikrotrhlínky na povrchu betonu.

300 °C – 1 200 °C explozivní odprýskávání povrchových vrstev betonu, výrazné snížení pevností a narušení struktury betonu ve formě trhlin, výrazné snížení modulu pružnosti, nárůst dotvarování betonu.

Nad 1 200 °C totální pokles pevností a rozpad struktury betonu, tavení betonové struktury.

Určité řešení pro zvýšení odolnosti betonu vůči působení vysokých teplot představuje použití vhodných složek betonu (druh cementu, kameniva, užití rozptýlené výztuže apod.), které jsou ve vzájemné součinnosti schopny eliminovat nežádoucí účinky tepelného namáhání. Závažným problémem zejména vysokopevnostních betonů vystavených ohni je tzv. spalling (odštěpování, odprýskávání). Jedna z teorií teorie vysvětluje odprýskávání betonu v zabránění tepelné dilatace v blízkosti tepelného zatížení, které vede ke vzrůstu napětí až na samotnou mez pevnosti. Druhá teorie sleduje přesun vlhkosti ve formě kapalné vody a páry. Když se teplota povrchu betonu zvyšuje, obsah vlhkosti betonu se mění s hloubkou od povrchu. V důsledku toho je tlak ve vlhké zóně větší než v suché a mokré oblasti. Kolem vrcholu tlaku par se od vysokého tlaku páry v betonu vyvíjí tahové namáhání, což způsobuje explozivní odprýsknutí betonu. Tento defekt je tím výraznější, čím je rychlost tepelného zatížení vyšší. Spalling je závislý na řadě faktorů, jako je vlhkost betonu, pevnosti betonu, pórová struktura betonu, podmínky zatížení a nárůst teploty. Snížení rizika odštěpování



betonu lze dosáhnout přidáním polypropylenových vláken, v poslední době jsou zkoumána i vlákna přírodní.

**Tabulka 9-1 Změny v mikrostruktuře betonu při zahřívání [88]**

Interval teploty	Změny v betonu
20 – 200 °C	Pomalá ztráta kapilární vody a snížení soudržných sil v důsledku expanze vlhkosti. 80 °C – 150 °C dehydratace ettringitu 150 °C – 170 °C rozklad sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Počátek dehydratace CSH gelu. Ztráta fyzikálně vázané vody.
300 – 400 °C	Praskání křemičitého kameniva (350 °C).
400 – 500 °C	Rozklad portlanditu – $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
500 – 600 °C	Přeměna křemene z fáze $\beta$ na $\alpha$ (573 °C) v kamenivu a písku.
600 – 800 °C	Druhá fáze rozkladu CSH gelů, tvorba $\beta\text{-C}_2\text{S}$ .
800 – 1 000 °C	840 °C – rozklad dolomitického vápence 930 °C – 960 °C – rozklad kalcitu – $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ Začátek vzniku keramické vazby, která nahrazuje hydraulické vazby, doprovázeno uvolňováním oxidu uhličitého.
1 000 – 1 200 °C	Tvorba Wollastonitu $\beta$ ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ). 1 050 °C – tavení čediče
1 300 °C	Celkový rozklad betonu, tavení některých složek.

## 9.1 METODIKA EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

Bylo provedeno sledování chování betonů při působení vysokých teplot. Problematika chování betonů byla řešena především v rámci výzkumného grantu GA P104/12/1988 „Studium interakce složek cementových kompozitů při působení vysokých teplot“, řešitel Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D. [89]. Na základě poznatků získaných z řešení projektu byly pro rozpojování vysokorychlostními vodními paprsky vybrány betony s rozdílnými druhy kameniva, které významným způsobem ovlivňují odolnost betonu při působení vysokých teplot. Pro rozpojování vodními paprsky byly připraveny betony s kamenivem granodiorit (lokalita Olbramovice), kamenivem čedič (lokalita Bílčice) a lehkým kamenivem Liapor (vyrobena z expandovaného jílu). Betony byly zatěžované na teplotní stupně 200 °C, 400 °C, 600 °C a 800 °C. Byly popsány změny vlastností betonů, kromě změn pevností a změn objemových hmotností betonů byly sledovány také změny pomocí RTG analýzy a pomocí počítačové tomografie. Teplotně zatěžované betony byly rozpojovány vodními paprsky. V první etapě byly zkušební vzorky zahřívány s teplotním nárůstem 10 °C/min, s výdrží 60 minut a následně postupně chladly na laboratorní teplotu. V navazující etapě bylo provedeno zatěžování betonů podle teplotní křivky ISO 834 a bylo provedeno rozpojování betonů na deskách rozměrů 1150x300x100 mm. Toto uspořádání experimentu sledovalo praktické využití vysokorychlostních vodních paprsků pro odstraňování porušené vrstvy betonu při sanacích betonových konstrukcí.



## 9.2 POUŽITÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI

Pro chování betonů při působení vysokých teplot hrají významnou roli použité vstupní materiály. Proto jsou v následujícím textu uvedeny podrobné informace o jednotlivých vstupních složkách betonu.

### Cement:

Cement CEM I 42,5 R Českomoravský cement, a.s., závod Mokrá.

Cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R Českomoravský cement, a.s., závod Mokrá.

### Kamenivo:

Těžené kamenivo lokalita Náklo, frakce 0/4 mm, šterkopísek.

Těžené kamenivo lokalita Žabčice, frakce 0/4 mm, živcový šterkopísek.

Drcené kamenivo lokalita Olbramovice, frakce 4/8 mm a 8/16 mm, granodiorit.

Drcené kamenivo lokalita Bílčice, frakce 0/4 mm, 4/8 a 8/16 mm, čedič.

Superplastifikátor Chryso Fluid Optima 208 na bázi modifikovaných polykarboxylátů.

### Vlákna:

Polypropylenová monofilamentní vlákna (PP1), Fibrin 3/15, průměr vlákna 5  $\mu\text{m}$ , délka 3 mm, pevnost v tahu 370 N/mm<sup>2</sup>. Bod tání 160 °C. Výrobce KrampeHarex.

Polypropylenová monofilamentní vlákna (PP2), Chryso Fibre Systec 12, průměr vlákna 28  $\mu\text{m}$ , délka 12 mm, pevnost v tahu 320-400 N/mm<sup>2</sup>. Bod tání více jak 160 °C. Výrobce Chryso.

Polypropylenová monofilamentní PB Eurofiber HPR, průměr vlákna 15,4  $\mu\text{m}$ , délka 6 mm. Výrobce Baumhueter extrusion GmbH. Bod tání vláken PB Eurofiber HPR (melting point) 147 - 150 °C [90].

### 9.2.1 Cement

Byl použit cement CEM I 42,5 R - čistý portlandský cement a CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R portlandský směsný cement.

Tabulka 9-2 Vlastnosti CEM I 42,5 R a CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R – Mokrá [91]

Vlastnost	CEM I 42,5 R	CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R
Měrný povrch [m <sup>2</sup> /kg]	377	560
Měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	3 110	3 050
Objemová stálost [mm]	1,0	1,0
Normální konzistence [%]	28,3	30,0
Pevnost v tlaku - 28 dní [N/mm <sup>2</sup> ]	61	47
Pevnost v tahu za ohybu - 28 dní [N/mm <sup>2</sup> ]	9	8
Ztráta žíháním [% hm.]	3,0	-
Cao [% hm.]	65	61
Sio <sub>2</sub> [% hm.]	20	19
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [% hm.]	3	3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [% hm.]	4	4
Mgo [% hm.]	1	2
SO <sub>3</sub> [% hm.]	2,9	2,6
Cl <sup>-</sup> [% hm.]	0,057	0,064
K <sub>2</sub> O [% hm.]	0,75	0,72
Na <sub>2</sub> O [% hm.]	0,17	0,17

## 9.2.2 Kamenivo

### *Kamenivo Náklo 0/4 mm*

Kamenivo frakce 0/4 mm z lokality Náklo je přírodní těžené kamenivo. Kamenivo má snížený obsah slídy a oxidů křemene, proto je doporučováno do teplotně odolných betonů.

**Tabulka 9-3 Petrografické složení kameniva frakce 0/4 mm Náklo [92]**

Složka	Hodnota [% hm.]
Křemen monokrystalický	28
Křemen polykrystalický	28
Živec	3
Granitoid	5
Sediment	12
Metamorfit	23
Černá zrna	1
Procento jemných částic	0,8 – 1,8 %

### *Kamenivo Žabčice 0/4 mm*

Kamenivo frakce 0/4 mm z lokality Žabčice je přírodní těžené drobné kamenivo do betonu, neprané, nerost je živcový šterkopísek.

**Tabulka 9-4 Vlastnosti kameniva z lokality Žabčice, živcový šterkopísek [93]**

Vlastnost	Hodnota
Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	2 560
Nasákavost WA <sub>24</sub> [% hm.]	1,2
Alkalicko křemičitá reakce [ $\Delta$ l %]	0,035
Obsah chloridů [% hm.]	< 0,005
Obsah celkové síry [% hm.]	0,01

### *Kamenivo Olbramovice*

Kamenivo z lokality Olbramovice je přírodní drcené kamenivo z nerostu granodiorit - biotitický granodiorit. Obsah SiO<sub>2</sub> je u granodioritové horniny v rozmezí 52 – 65 % [94].

**Tabulka 9-5 Vlastnosti kameniva Olbramovice frakce 4/8 mm a 8/16 mm [95] [96]**

Vlastnost	Hodnota
Otlukovost [% hm.]	15-30
Nasákavost [% hm.]	0,4 - 1,2
Mrazuvzdornost [% hm.]	0,3 - 1,3
Obsah veškeré síry (SO) [% hm.]	0,12
Reaktivnost s alkáliemi [-]	0,02
Pevnost kamene v tlaku [N/mm <sup>2</sup> ]	170
Objemová hmotnost kamene [kg/m <sup>3</sup> ]	2 640
Držitelnost [-]	0,80
Obsah přírodních radionuklidů [Bq/kg]	28
Součinitel ohladitelnosti [-]	0,501

**Tabulka 9-6 Petrografické složení kameniva Olbramovice frakce 4/8 mm a 8/16 mm [95]**

Složka	Hodnota [% hm.]
Plagioklasy (živce)	42
Draselné živce	15
Křemen (sio <sub>2</sub> )	34
Biotit (tmavá slída, K(Fe,Mg) <sub>3</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub> )	8
Ostatní	1

**Kamenivo**

**Bílčice**

Kamenivo z lokality Bílčice je přírodní drcené kamenivo z čedičové horniny (bazalt). Obsah SiO<sub>2</sub> je u čedičové horniny v rozmezí 44 – 52 % [94].

**Tabulka 9-7 Vlastnosti čedičového kameniva z lokality Bílčice [97] [98]**

Vlastnost	Hodnota pro frakci	
	0/4 mm	4/8 mm
Obsah jemných částic [% hm.]	7,5	0,6
Obsah celkové síry [% hm.]	0,048	0,048
Obsah chloridových solí [% hm.]	0,0004	0,0004
Nasákavost [% hm.]	0,9	0,9
Objemová hmotnost kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	2 945	2 978
Tvar zrn – tvarový index > 3 [% hm.]	-	6,4
Sypná hmotnost setřeseného kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	1 985	1 690
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	1 626	1 520
Mezerovitost volně sypaného kameniva [% hm.]	44,8	48,9
Mezerovitost setřeseného kameniva [% hm.]	32,6	43,2
Petrografické složení	nepravidelně omezené hnědavé pyroxeny lištovité, polysyntetické zdvojitěné plagioklasy rudní minerály (magnetit, ilmenit) jílové minerály oxihydroxidy Fe	

**Tabulka 9-8 Silikátová analýza bazaltů z lomu Bílčice [98]**

Prvek	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	CaO	MgO
Hm. [%]	41,3	2,5	12,7	7,5	5,0	0,2	11,2	10,6
Prvek	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	S	CO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	
Hm. [%]	0,5	1,7	0,0	0,0	1,2	2,1	3,0	

**Kamenivo Liapor**

Lehké kamenivo Liapor, výrobce Lias Vintířov, LSM, k.s.. Liapor je vyráběn z třetihorních cypřišových jílu. Z jílu jsou vyrobeny granule, které se vypalují při teplotě 1 150 °C.

**Tabulka 9-9 Vlastnosti lehkého kameniva Liapor [99]**

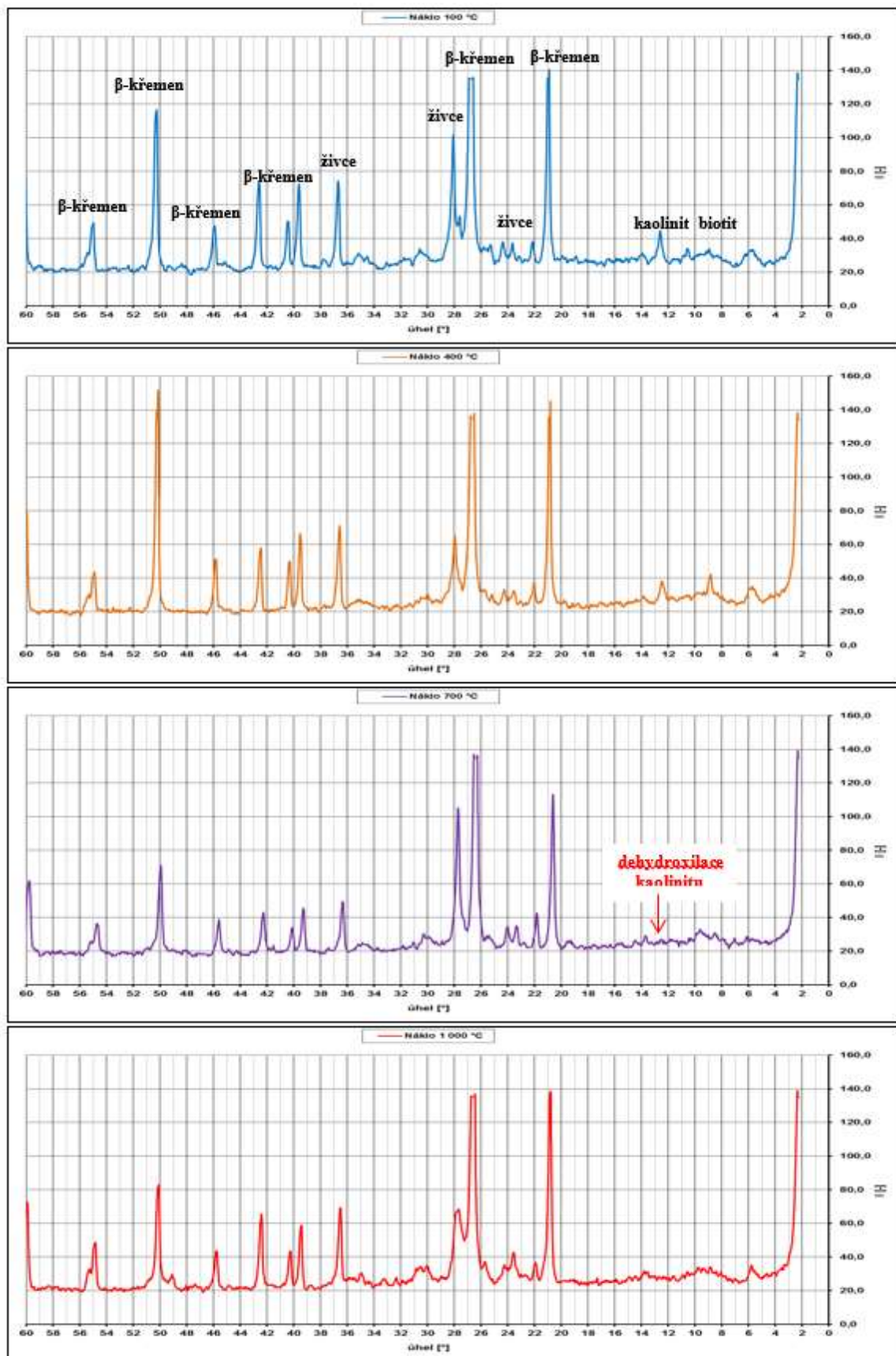
Vlastnost	Hodnota pro druh kameniva liapor	
	Liapor 1–4/500	Liapor 4 – 8/600
Sypná hmotnost [ $\text{kg/m}^3$ ]	500	600
Tolerance sypné hmotnosti [%]	$\pm 15$	
Objemová hmotnost zrna	925	1150
Tolerance objemové hmotnosti zrna [%]	$\pm 15$	
Nasákavost $w_5$ [% hm., max]	2	
Nasákavost $w_{30}$ [% hm., max]	4	
Nasákavost $w_{60}$ [% hm., max]	5	
Nasákavost $w_{120}$ [% hm., max]	6	
Odolnost proti drcení [mpa, min]	3,0	4,2
Odolnost vůči zmrazování a rozmrazování [% ztráty hm.]	2	
Chloridy [% hm.]	< 0,02	
Sírany rozpustné v kyselině [% hm.]	< 0,8	
Celková síra [% hm.]	< 1,0	
Součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	0,11	0,14
Třída hořlavosti	A1 (din 4102)	
Procentuální podíl drcených zrn [% hm.]	< 5,0	
Jemné částice (< 0,063 mm)	< 1,0	

**Tabulka 9-10 Chemické složení lehkého kameniva Liapor [99]**

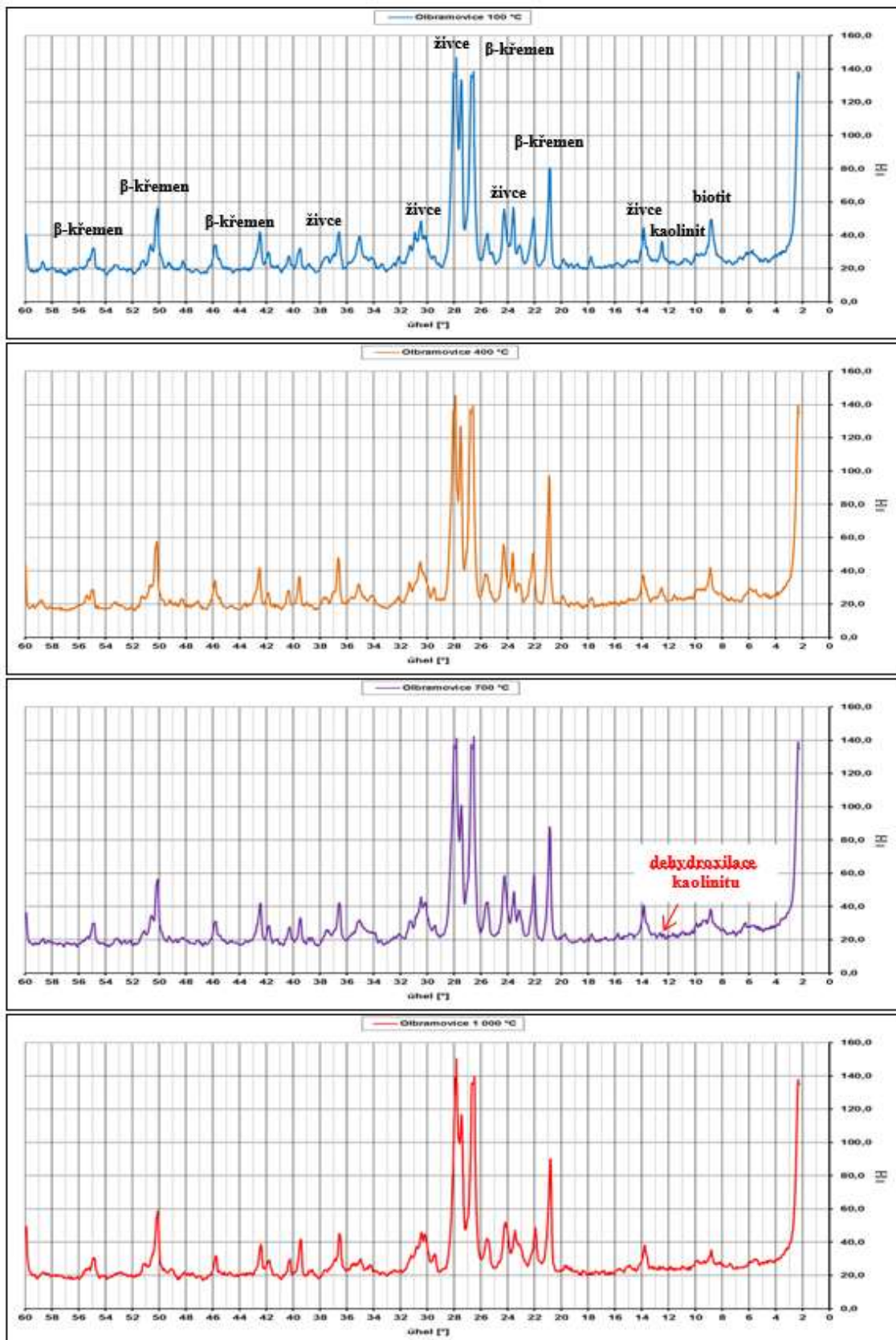
Chemické složení	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	stopové prvky
% hm.	55 ± 5	24 ± 5	14 ± 5	5 ± 5	2 ± 2

Byla provedena RTG analýza kameniv Žabčice, Náklo, Olbramovice, Bílčice a Liapor [89], [100]. Před provedením RTG analýzy byly vzorky kameniva zahřáty na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C. Nárůst teploty byl 10 °C/min, po dosažení požadované teploty byly vzorky vystaveny působení této teploty po dobu 60 minut a následovalo pozvolné chlazení vzorků. RTG analýza byla provedena na přístroji Empyrean (Panalytical).

U kameniva Náklo byly identifikovány  $\beta$ -křemen, živcové minerály a stopové množství kaolinitu a biotitu. Po zahřátí vzorku na 700 °C byl identifikován rozklad kaolinitu. U kameniva Olbramovice byly identifikovány  $\beta$ -křemen, živcové minerály, stopové množství kaolinitu a biotitu. Po zahřátí vzorku na 700 °C byl identifikován rozklad kaolinitu. K rozkladu kaolinitu (odstranění strukturní chemicky vázané vody – dehydroxilace) dochází při teplotě okolo 560 °C, když přechází na metakaolinit. Metakaolinit je rentgenoamorfni rekrystalická fáze a proto již není v difraktogramech po 700 °C a 1 000 °C detekován. To je v souladu s poznatky zjištěnými Sokolářem [101]. U kameniva Bílčice byly identifikovány andezit, augit, titanaugit a nefelin. Po jednotlivých stupních tepelného zatížení nebyly zjištěny žádné výrazné změny [89] [100]. Rentgenogramy lehkého kameniva Liapor byly po všech stupních tepelného zahřívání totožné, nebyly sledovány změny, byl identifikován pouze  $\beta$ -křemen.

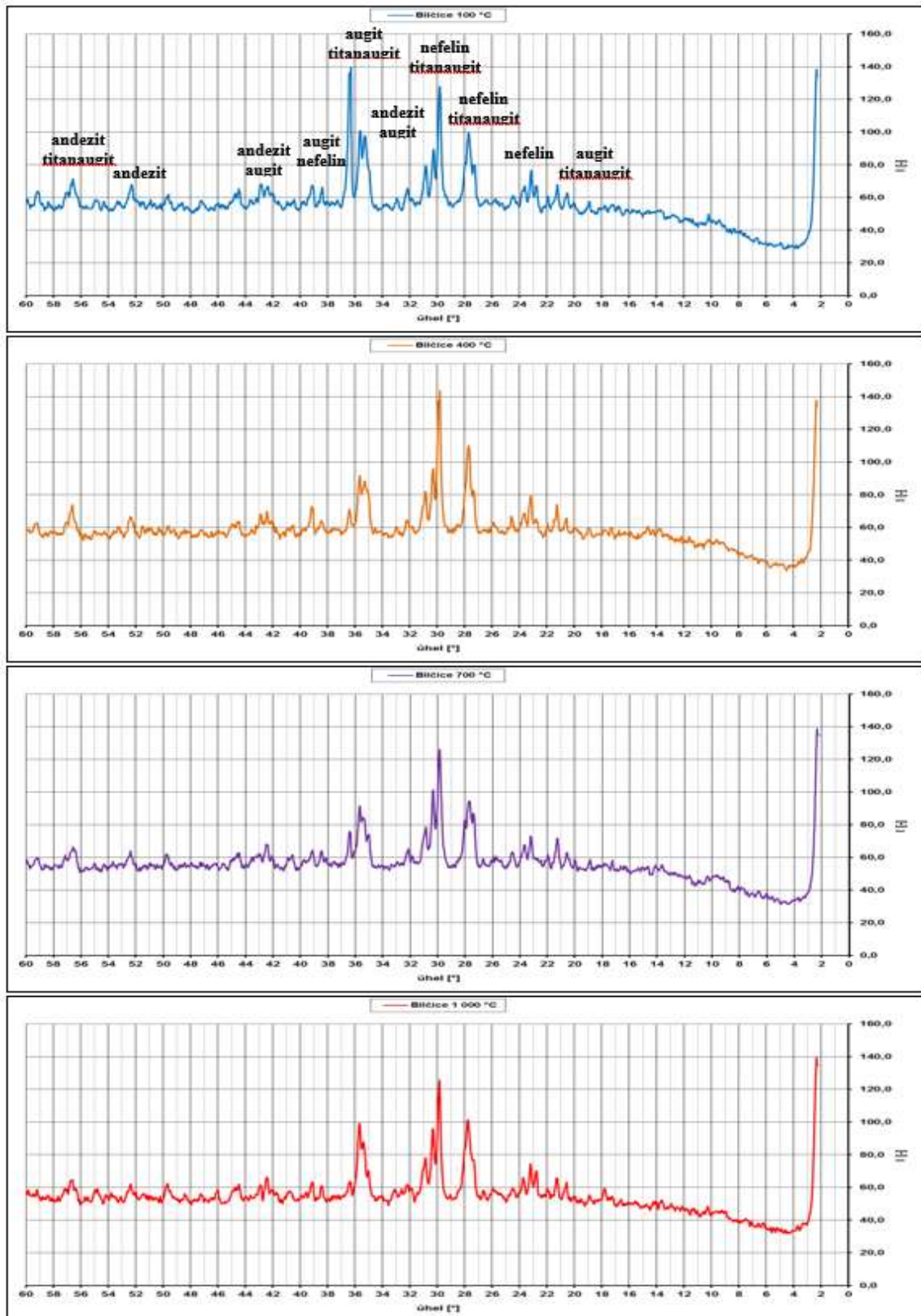


Obr. 9-1 Rentgenogramy kameniva Náкло po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C [89] [100]

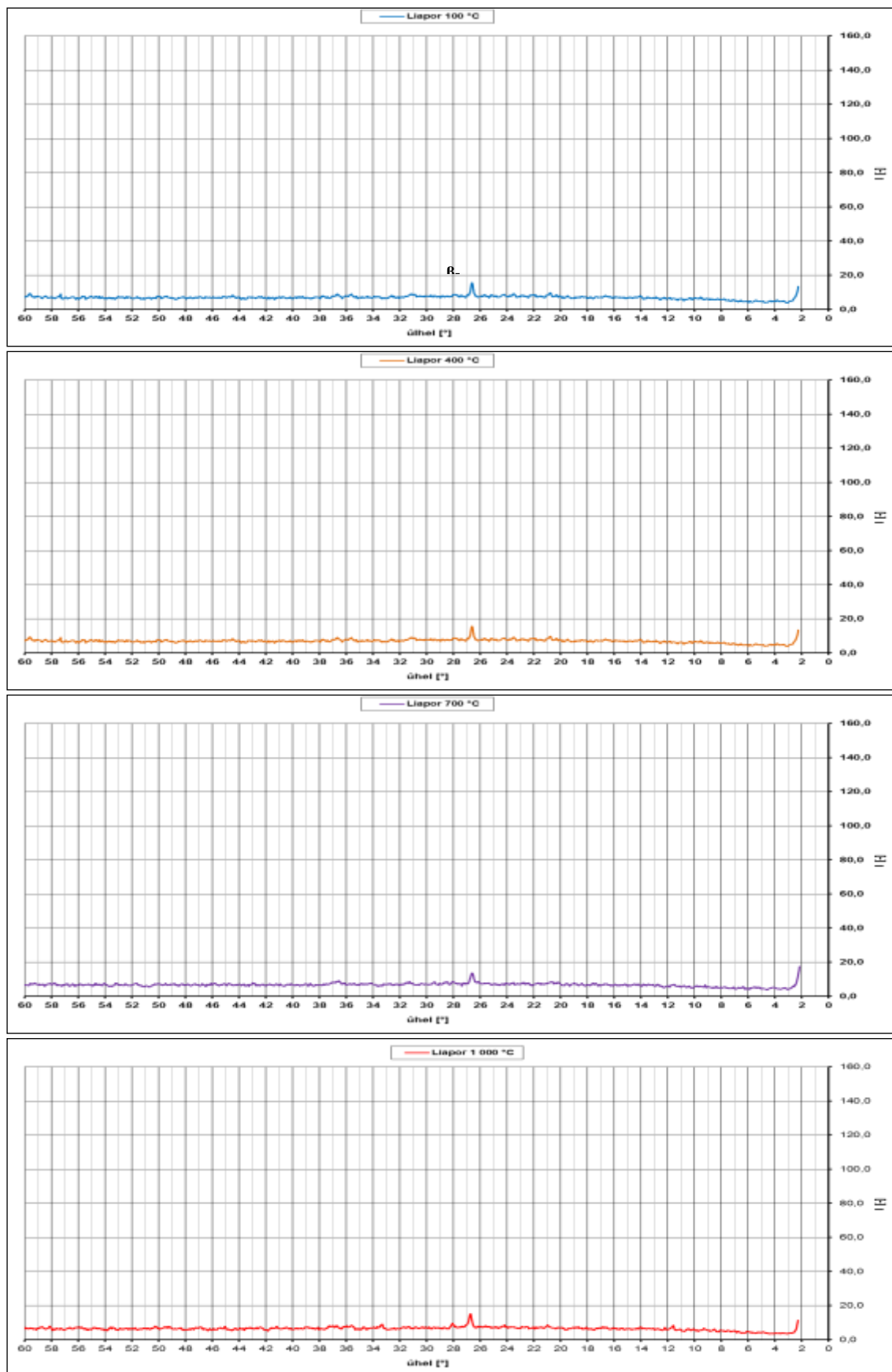


Obr. 9-2 Rentgenogramy kameniva Olbramovice po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C [89] [100]





Obr. 9-3 Rentgenogramy kameniva Bilčice po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C [89] [100]



Obr. 9-4 Rentgenogramy kameniva Liapor po zahřátí na 100 °C, 400 °C, 700 °C a 1 000 °C [89]



## Plastifikátor

Tabulka 9-11 Vlastnosti superplastifikátoru CHRYSO Fluid Optima 208 [102]

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Barva	-	hnědozelená
Hustota při 20 °C	kg/dm <sup>3</sup>	1,05 ± 0,015
Obsah chloridů	%	≤ 0,1
pH	-	7,0 ± 2,0
Obsah alkálií (ekv. Na <sub>2</sub> O)	%	1,4
Obsah sušiny (EN 480-8)	%	21,8 ± 1,0

### 9.3 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ PRO ROZPOJOVÁNÍ BETONŮ TECHNOLOGIÍ VVP

#### 9.3.1 Receptury betonů

Tabulka 9-12 Složení betonů OL, BL, BL PP1, BL PP2 na 1 m<sup>3</sup>

Složka	OL	BL	BL PP1	BL PP2
	Množství [kg]			
Cement Cem II/B-M (S-LL) 32,5 R Českomoravský cement, a.s. - Mokrá	320	300	300	300
Kamenivo 0/4 mm pískovec (psamit) Náklo	953	--	--	--
Kamenivo 4/8 mm granodiorit Olbramovice	363	--	--	--
Kamenivo 8/16 mm granodiorit Olbramovice	531	--	--	--
Kamenivo 0/4 mm čedič Bílčice	--	1162	1162	1162
Kamenivo 4/8 mm čedič Bílčice	--	340	340	340
Kamenivo 8/16 mm čedič Bílčice	--	497	497	497
Polypropylenová vlákna I (Fibrin 3/15)	--	--	1,0	--
Polypropylenová vlákna II (Chryso Fibre Syntec 12)	--	--	--	0,6
Voda	174	163	163	163
Plastifikátor Chryso Fluid Optima 208 1,8 % z mc	5,76	5,4	5,4	5,4
Vodní součinitel w	0,54	0,54	0,54	0,54

Byly popsány vlastnosti zkoušených betonů v čerstvém stavu (konzistence čerstvého betonu, objemová hmotnost čerstvého betonu) a ve ztvrdlém stavu (pevnost betonu v tlaku, pevnost betonu v tahu za ohybu, pevnost v tahu povrchových vrstev betonu, objemová hmotnost ztvrdlého betonu).

Část zkušebních vzorků byla vystavena zatěžování na 200 °C a 600 °C. Zatěžování bylo provedeno v peci s elektrickým vytápěním. Výsledek rozpojování betonů teplotně nezatížených a zatížených teplotou 200 °C a 600 °C byl hodnocen pomocí odstraněného objemu betonu v cm<sup>3</sup> na 10 cm délky otryskaného povrchu.

### 9.3.2 Vlastnosti čerstvých betonů

Beton byl plněn do forem. Zhutňování betonů bylo provedeno na vibračním stole s elektromagnetickým upínáním forem. Doba zhutňování byla cca 2 minuty dle charakteru betonové směsi, průměrné zrychlení  $a = 20 \text{ m.s}^{-2}$ , amplituda  $A = 0,35 \text{ mm}$ , frekvence  $f = 50 \text{ Hz}$ . Po 24 hodinách byla tělesa odformována a uložena v normovém prostředí při průměrné teplotě  $T = 18,3 \text{ °C}$  a průměrné relativní vlhkosti vzduchu 92 %.

**Tabulka 9-13 Vlastnosti čerstvého betonu**

Beton	Sednutí [mm]	Konzistence třída	Objemová hmotnost ČB [kg/m <sup>3</sup> ]
OL	180	S4	2350
BL	170	S4	2440
BL PP1	160	S4	2450
BL PP2	190	S4	2450

### 9.3.3 Režim zatěžování vzorků

Po 28 dnech byly vzorky vyjmuty z normového prostředí a uloženy v normálním laboratorním prostředí s teplotou vzduchu 23 °C a relativní vlhkosti vzduchu 60%. Po 60ti dnech bylo provedeno zatěžování vzorků na teplotu 200 °C a 600 °C. Nárůst teploty byl 10 °C/min, po dosažení požadované teploty byly vzorky vystaveny působení této teploty po dobu 1 hodiny a následovalo pozvolné chlazení vzorků v peci.

### 9.3.4 Vlastnosti ztvrdlého betonu před a po tepelném zatížení

Vlhkost vzorků v době provedení zkoušky byla v intervalu 2,7 - 2,9 %. Vliv teploty 200 °C a 600 °C na vlastnosti betonů je dokumentován změnou vlastností betonů, viz Tabulka 9-14 až 9-17.

**Tabulka 9-14 Objemová hmotnost betonu D betonů před a po tepelném zatížení**

Beton	$D_{20 \text{ °C}}$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$D_{200 \text{ °C}}$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$D_{200 \text{ °C}} / D_{20 \text{ °C}}$ [%]	$D_{600 \text{ °C}}$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$D_{600 \text{ °C}} / D_{20 \text{ °C}}$ [%]
OL	2350	2260	96,2	2210	94,0
BL	2470	2410	97,6	2320	93,9
BL PP1	2510	2450	97,6	2380	94,8
BL PP2	2470	2410	97,6	2360	95,5

**Tabulka 9-15 Pevnost betonu v tlaku  $f_{cc}$  před a po tepelném zatížení**

Beton	$f_{cc \ 20 \text{ °C}}$ [MPa]	$f_{cc \ 200 \text{ °C}}$ [MPa]	$f_{cc \ 200 \text{ °C}} / f_{cc \ 20 \text{ °C}}$ [%]	$f_{cc \ 600 \text{ °C}}$ [MPa]	$f_{cc \ 600 \text{ °C}} / f_{cc \ 20 \text{ °C}}$ [%]
OL	41,8	40,2	96,2%	35,6	85,2%
BL	34,3	33,4	97,4%	24,4	71,1%
BL PP1	38,0	35,4	93,2%	31,7	83,4%
BL PP2	36,4	32,9	90,4%	28,9	79,4%

**Tabulka 9-16 Pevnost betonu v tahu ohybem  $f_{cf}$  před a po tepelném zatížení**

Beton	$f_{cf} 20\text{ °C}$ [MPa]	$f_{cf} 200\text{ °C}$ [MPa]	$f_{cf} 200\text{ °C} / f_{cf} 20\text{ °C}$ [%]	$f_{cf} 600\text{ °C}$ [MPa]	$f_{cf} 600\text{ °C} / f_{cf} 20\text{ °C}$ [%]
OL	5,5	5,3	96,4%	2,3	41,8%
BL	5,5	5,2	94,5%	2,8	50,9%
BL PP1	5,9	5,6	94,9%	3,4	57,6%
BL PP2	5,9	5,8	98,3%	3,4	57,6%

**Tabulka 9-17 Pevnost betonu v tahu povrchových vrstev  $R_t$  před a po tepelném zatížení**

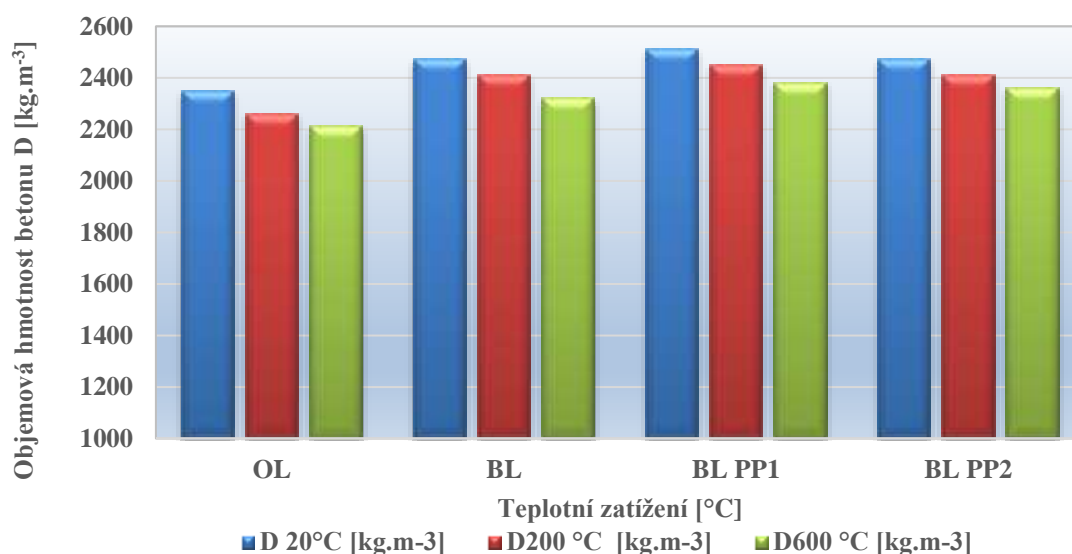
Beton	$R_t 20\text{ °C}$ [MPa]	$R_t 200\text{ °C}$ [MPa]	$R_t 200\text{ °C} / R_t 20\text{ °C}$ [%]	$R_t 600\text{ °C}$ [MPa]	$R_t 600\text{ °C} / R_t 20\text{ °C}$ [%]
OL	2,7	1,8	66,7%	0,9	33,3%
BL	3,6	3,2	88,9%	2,7	75,0%
BL PP1	3,2	3,1	96,9%	2,5	78,1%
BL PP2	2,9	2,8	96,6%	2,0	69,0%

Při tepelném zatěžování došlo u zkušebního vzorku beton BL s kamenivem čedič Bílice a betonu OL s kamenivem granodiorit Olbramovice k odštěpování betonu (Obr. 9-10).

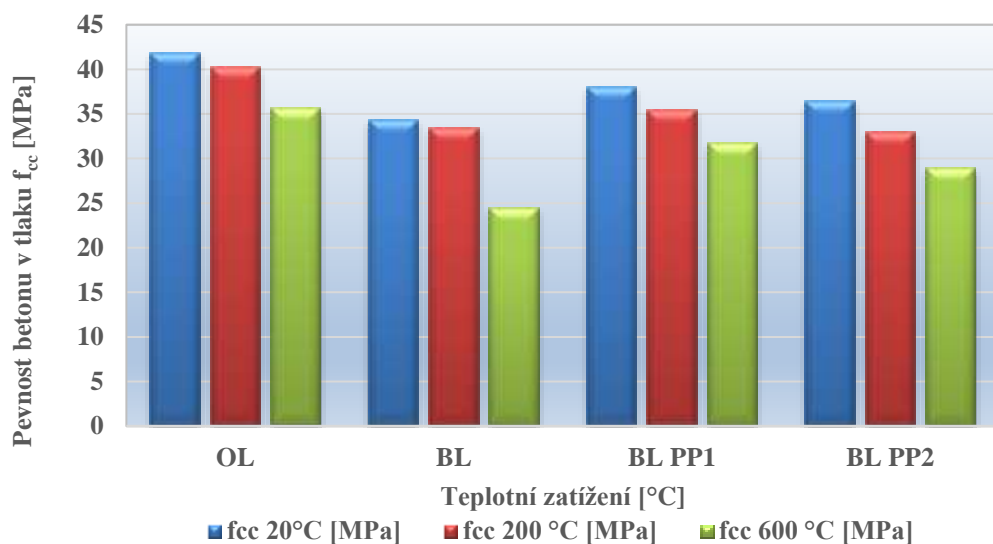
Termín odštěpování uvádí norma dle ČSN EN 1992-1-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru [103], často se v praxi můžeme setkat s termínem odprýskávání (dle překladu z anglického spalling, nebo explosivní odprýskávání – explosive spalling, dle ČSN EN 1992-1-2 explosivní odštěpování). Spalling je závislý na řadě faktorů, jako jsou pevnosti betonu, obsah vlhkosti, pórová struktura betonu, podmínky zatížení a nárůst teploty. ČSN EN 1992-1-2 řeší pro riziko explosivního odštěpování hodnotu  $k$ :

„Při vlhkosti betonu menší než  $k$  % hmotnosti nelze předpokládat, že dojde k explosivnímu odštěpování. Při vlhkosti betonu vyšší než  $k$  % hmotnosti se má se přesněji posoudit množství vlhkosti, typ kameniva, propustnost betonu a rychlost zahřívání.“

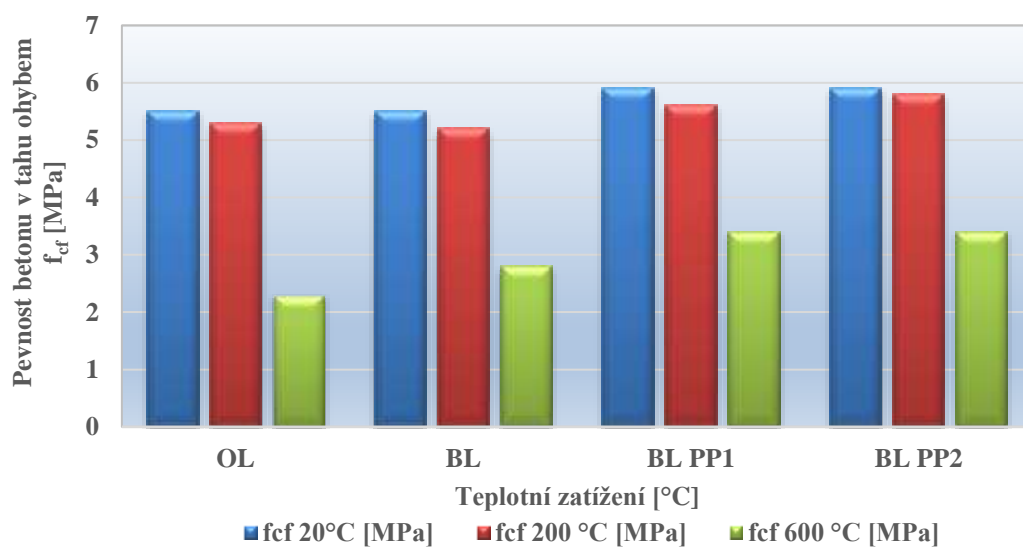
„Hodnotu  $k$ , která se použije v příslušném státě, lze nalézt v národní příloze. Doporučená hodnota je 3. Doporučená hodnota  $k$  se pro ČR nemění.“ [103]



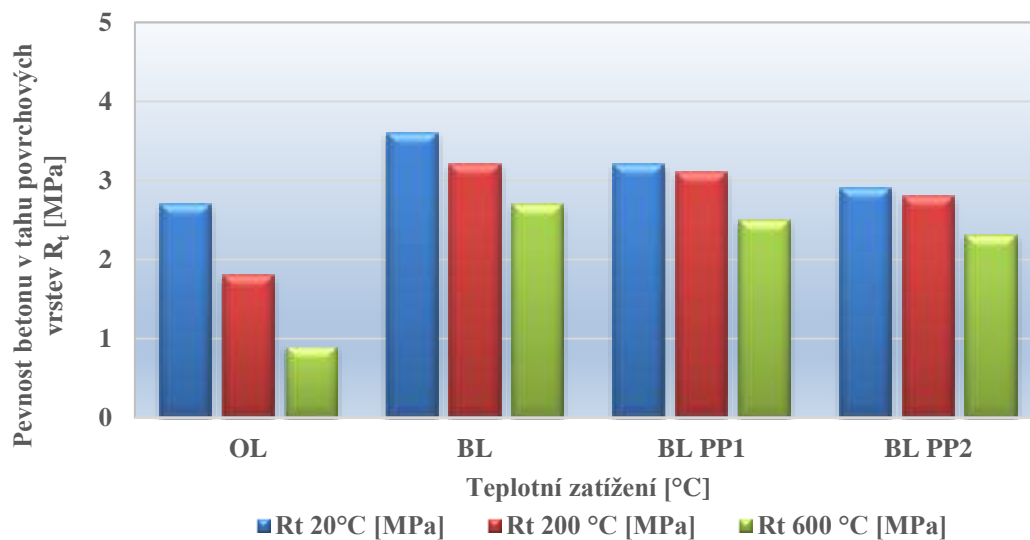
**Obr. 9-1 Objemová hmotnost betonu D před a po tepelném zatížení**



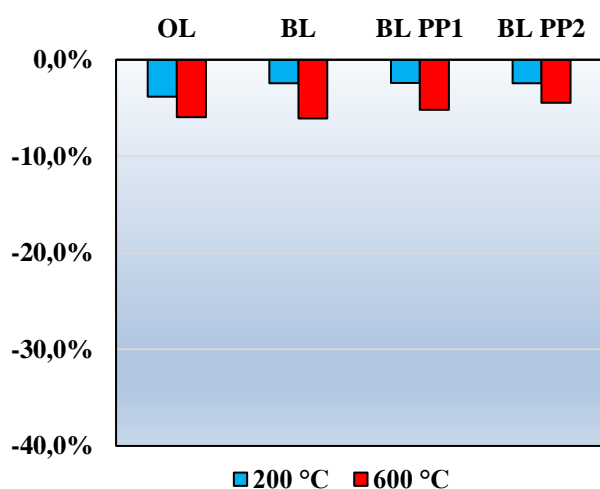
**Obr. 9-2 Pevnost betonu v tlaku  $f_{cc}$  před a po tepelném zatížení**



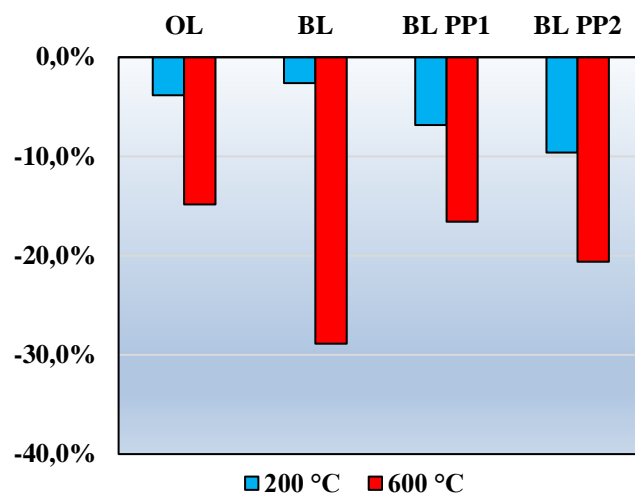
**Obr. 9-3 Pevnost betonu v tahu ohybem  $f_{ct}$  před a po tepelném zatížení**



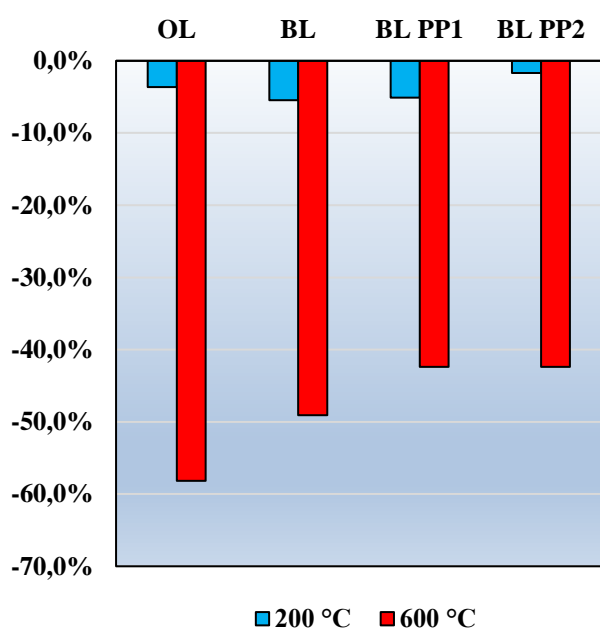
**Obr. 9-4 Pevnost betonu v tahu povrchových vrstev  $R_t$  před a po tepelném zatížení**



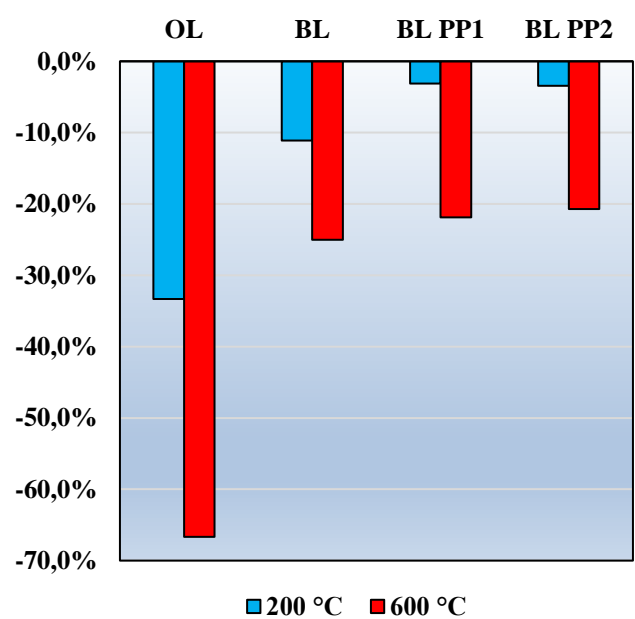
Změna objemové hmotnosti D [ % ]



Změna pevnosti betonu v tlaku  $f_{cc}$  [ % ]



Změna pevnosti betonu v tahu ohybem  $f_{ct}$  [ % ]

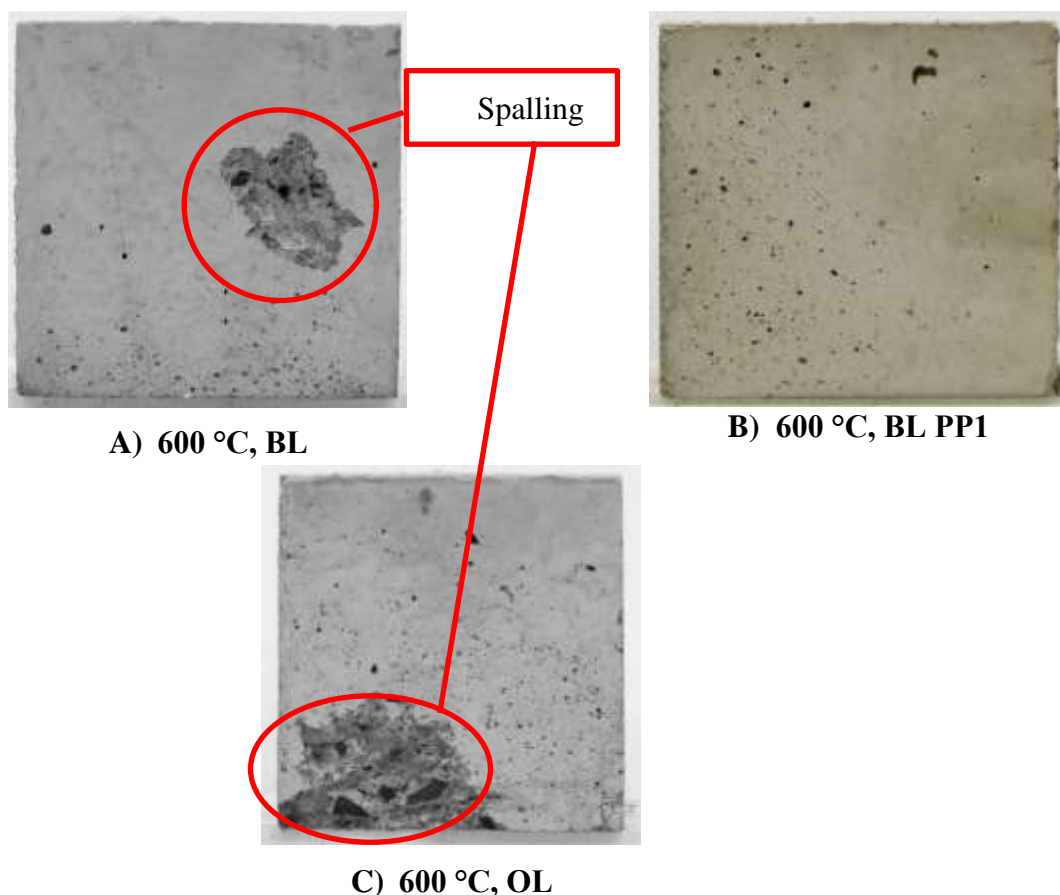


Změna pevnosti povrchových vrstev betonu v tahu  $R_t$  [ % ]

Obr. 9-5 Změny vlastností betonů po tepelném zatížení

Na obrázku Obr. 9-6 A) beton BL, kamenivo čedič, bez přídavku PP vláken a 9-6 C) beton OL, kamenivo granodiorit, bez přídavku PP vláken je patrné odštěpování betonu (spalling). Odštěpování bylo zaznamenáno při vlhkosti vzorků 2,7 % a 2,9 %, norma ČSN EN 1991-2-1 [103] uvádí hodnotu vlhkosti, kdy není předpokládáno odštěpování betonu, 3 %.

Riziko vzniku odštěpování betonu lze snížit přidáním polypropylenových vláken. Doporučené množství PP vláken se pohybuje od 0,6 do 2 kg/m<sup>3</sup>. U betonu BL PP 1, s přídavkem PP vláken, nedošlo k odštěpování betonu (viz. Obr. 9-6 B).



**Obr. 9-6 Fotografie povrchu betonu po působení vysokých teplot.**  
**A) beton BL, kamenivo čedič, 600 °C, červeně zvýrazněný spalling**  
**B) beton BL PP 1, s přidavkem polypropylenových vláken, 600 °C, bez výrazného porušení povrchu**  
**C) beton OL, kamenivo granodiorit, 600 °C, červeně zvýrazněný spalling.**

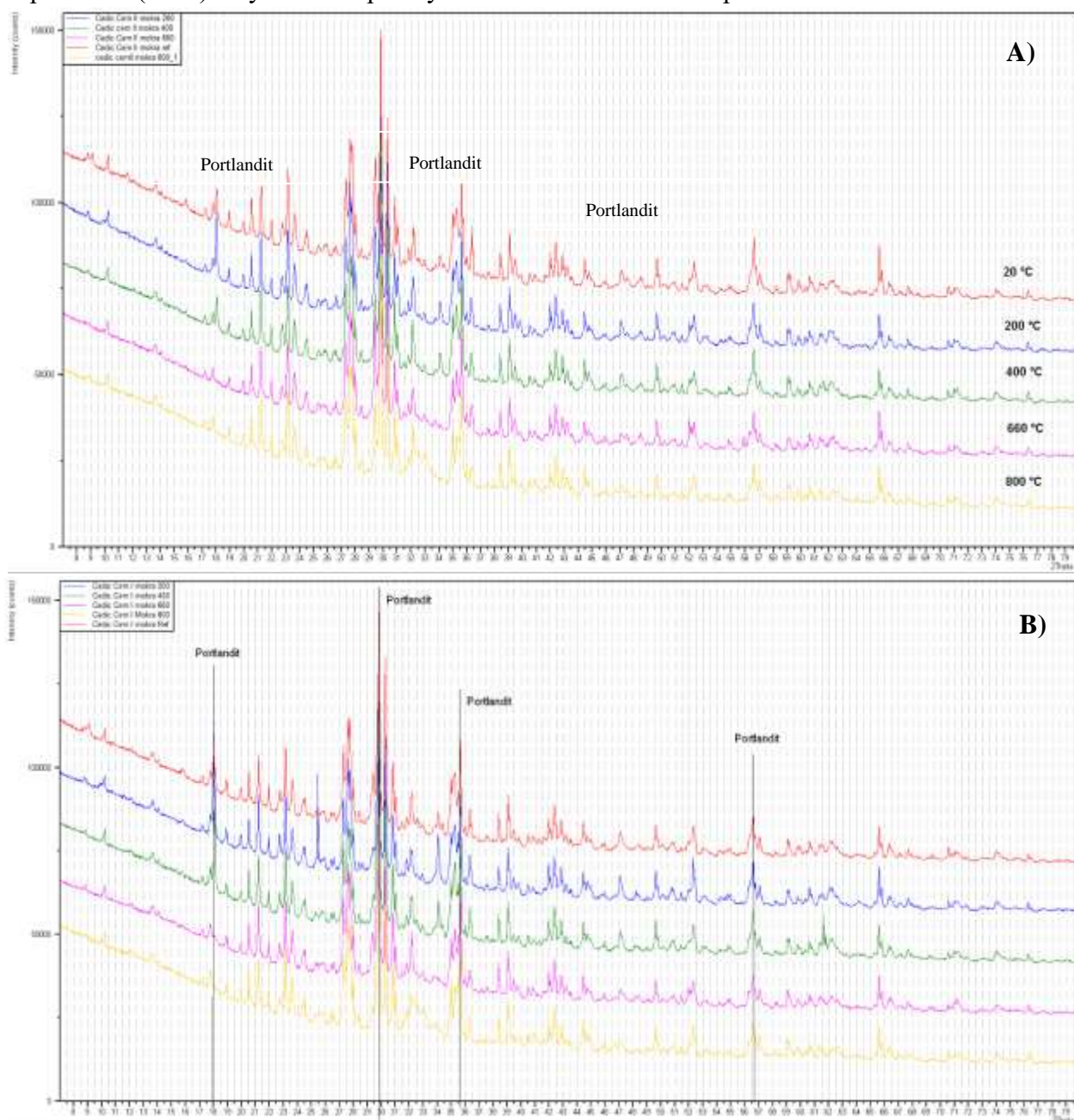
Kromě pevností a objemových hmotností betonů zatěžovaných na určené teploty byly sledovány změny pomocí RTG analýzy. Před provedením RTG analýzy byly vzorky vystaveny teplotám 20 °C, 200 °C, 400 °C, 660 °C a 800 °C. Nárůst teploty byl 10 °C/min, po dosažení požadované teploty byly vzorky vystaveny působení této teploty po dobu 60 minut a následovalo pozvolné chlazení vzorků. RTG analýza byla provedena na přístroji Empyrean (Panalytical).

Na Obr. 9-7 A) je souhrnný difraktogram z RTG analýzy betonů s cementem CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, Mokrý, a kamenivem čedič Bílčice, na Obr. 9-7 B) je souhrnný difraktogram z RTG analýzy betonů s cementem CEM I 42,5 R, Mokrý, a kamenivem čedič Bílčice. Vyšší odolnost betonů s kamenivem čedič (BL, BL PP1, BL PP2) je dána také dobrou stabilitou kameniva čedič při působení vysokých teplot. Z RTG difraktogramu kameniva čedič (Obr. 9-3) je patrné, že kamenivo čedič zůstává stabilní až do teplot 1000 °C, kde nedochází k úbytku na intenzitě jeho základních minerálů, které jsou augit, titanový augit, nefelín, andezit a olivín. Čedič je výlevná vyvřelá hornina, jeho teplota tavení pohybuje v rozmezí 1250 °C až 1350 °C a tudíž jeho stabilita vůči vysokým teplotám je velmi dobrá.

Změny zaznamenané na difraktogramech korespondují se změnami pevností betonů.



Na difraktogramu vzorků betonů vystavených laboratorní teplotě 20 °C je dobře patrný nejvýraznější pik odpovídající hydroxidu vápenatému (portlanditu). Difraktogram betonu vystaveného působení teploty 200 °C nevykazuje výrazné odlišnosti od difraktogramu betonu vystaveného teplotě 20 °C, je zde vidět velmi malé snížení obsahu hydroxidu vápenatého. Změny ve fázovém složení se začínají projevovat při teplotách betonu zahřátého na 400 °C, kde dochází k rozkladu hydroxidu vápenatého a jeho úbytek na difraktogramu je viditelný. Významné změny ve fázovém složení betonu nastávají při teplotách do 660 °C. Píky, které odpovídaly hydroxidu vápenatému, z grafu úplně vymizely. Zatížení teplotami nad 660 °C vedlo k rozkládání C-S-H struktury a k úplnému rozkladu hydroxidu vápenatého. Vzorky betonu, které byly vystaveny teplotám 800 °C, ukázaly kompletní rozklad hydrosilikátu vápenatého (CSH) a hydroxid vápenatý ve vzorku už není vůbec přítomen.



**Obr. 9-7 A)** RTG betonu s kamenivem čedič a cementem CEM II/B-M 32,5 (S-LL) 32,5 R, Mokrý, **B)** RTG betonu s kamenivem čedič a cementem CEM I 42,5 R, Mokrý. Před provedením RTG analýzy byly vzorky vystaveny teplotám 20 °C, 200 °C, 400 °C, 660 °C a 800 °C. Nárůst teploty 10 °C/min, po dosažení teploty působení této teploty 1 hod. a pozvolné chlazení vzorků. [89] [104]



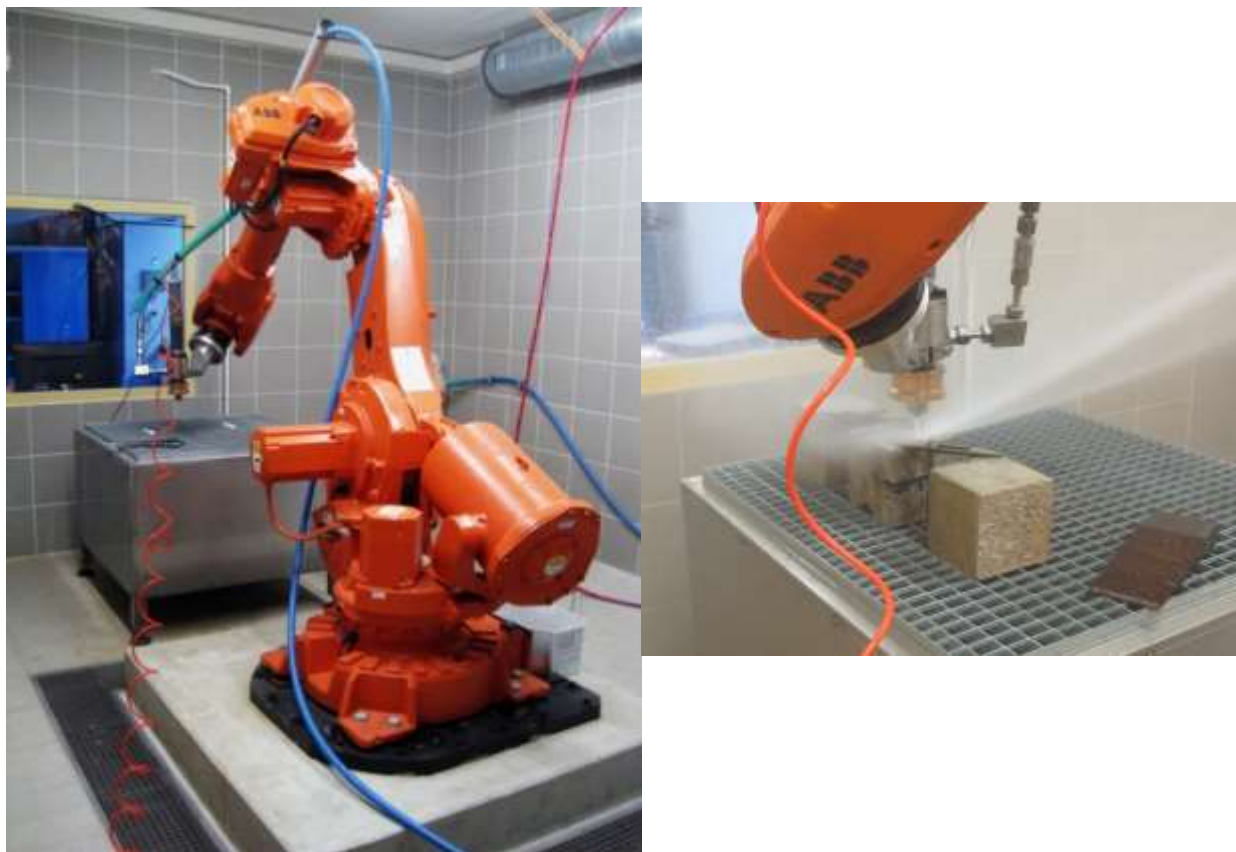
## 9.4 ROZPOJOVÁNÍ BETONŮ VYSTAVENÝCH PŮSOBENÍ VYSOKÝCH TEPLOT

### 9.4.1 Parametry procesu rozpojování betonů po tepelném zatížení vysokorychlostními vodními paprsky

Rozpojování vzorků betonů po tepelném zatěžování bylo provedeno na pracovišti AV ČR, v.v.i., Ústav geoniky, Ostrava. Experimentální zařízení bylo tvořeno zdrojem vysokotlaké vody a robotem, který zajišťoval pohyb vodní trysky nad testovanými betonovými vzorky. Vysokotlaká voda byla dodávána do trysky prostřednictvím plunžrového čerpadla schopného dodat až 67 litrů vody za minutu při tlaku vody až 160 MPa. Ke generování plochého paprsku byla použita plochá tryska s ekvivalentním průměrem 2,05 mm a úhlem rozstříku 15°.

Kromě kontinuálního plochého paprsku byl použit pulzující plochý vodní paprsek. Pulzující plochý vodní paprsek při dopadu způsobuje cyklické namáhání porušovaného materiálu tlakovými rázy. Při řezání pulzujícím vodním paprskem ultrazvukový výkon generátoru pulzací dosahoval maximálně 800 W a předřazený akustický budič vytvářel ultrazvukové vlny o frekvenci 20 kHz.

Vzdálenost povrchu betonového vzorku od trysky byla 40 mm. Rychlost pohybu paprsku nad zkušebními vzorky byla  $0,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a  $1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Do všech betonových vzorků byly pomocí plochého vysokorychlostního kontinuálního vodního paprsku vyřezány drážky. Výkonnost paprsku byla posuzována prostřednictvím objemu betonu odstraněného z jednotlivých drážek. Řezy byly provedeny při tlacích 30 a 70 MPa.



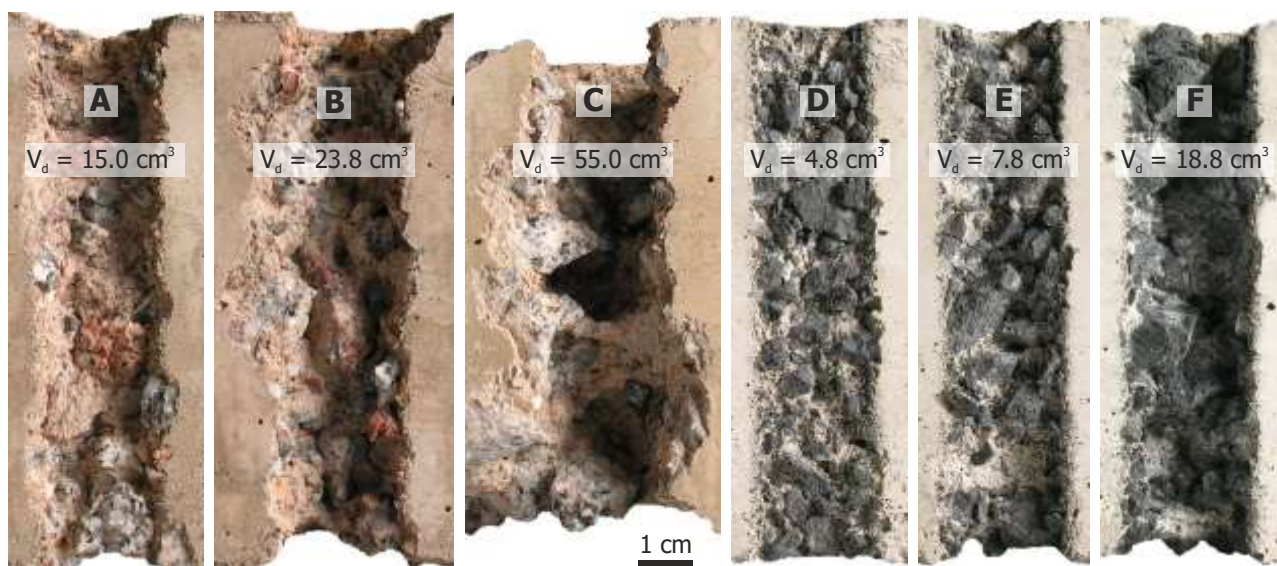
**Obr. 9-8 Robot zajišťující pohyb vysokorychlostního vodního paprsku nad otryskávaným zkušebním vzorkem (vlevo), upevnění betonových vzorků při otryskávání vodním paprskem (vpravo)**

#### 9.4.2 Výsledky a diskuse rozpojování betonů po tepelném zatížení vysokorychlostními vodními paprsky

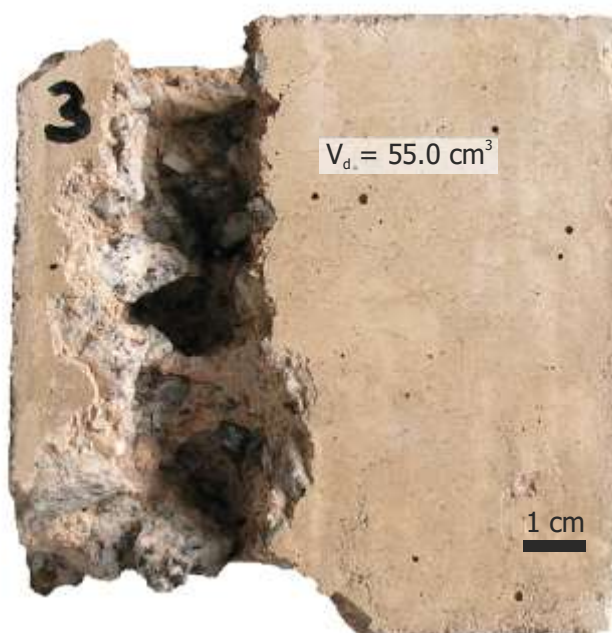
Ukázky vytvořených drážek s údajem o objemu odstraněného (desintegrovaného) betonu  $V_d$  ukazují fotografie na Obr. 9-9, 9-10 a 9-16. Objemy odstraněného betonu pro jednotlivé betony a porovnání účinnosti plochých paprsků na vzorcích betonů vystavených vysokým teplotám a na referenčních vzorcích (nezatížených působení vysoké teploty) při různých rezných rychlostech a tlacích vody jsou zobrazeny na Obr. 9-13 až Obr. 9-15 a Obr. 9-17.

**Tabulka 9-18 Odstraněný objem betonu  $V_d$  [ $\text{cm}^3$ ] (na 100 mm délky drážky) při použití různých typů vysokorychlostních vodních paprsků**

Beton	Referenční	200 °C	600 °C
Typ paprsku: Kontinuální plochý vodní paprsek, rychlost řezání $0,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost od trysky 40 mm, tlak vody 30 MPa			
OL	13,75	19,38	55,00
BL	9,38	16,25	18,75
BL PP1	12,5	16,63	25,00
BL PP2	13,75	15,00	18,75
Typ paprsku: Kontinuální plochý vodní paprsek, rychlost řezání $1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost od trysky 40 mm, tlak vody 70 MPa			
OL	6,25	9,38	23,75
BL	5,63	9,00	9,88
BL PP1	5,00	7,00	11,13
BL PP2	3,75	6,50	7,75
Typ paprsku: Pulzující plochý vodní paprsek, rychlost řezání $1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost od trysky 40 mm, tlak vody 30 MPa			
OL	10,25	13,75	24,88
BL	10,25	13,00	15,25
BL PP1	12,88	11,25	19,38
BL PP2	11,00	16,86	14,38
Typ paprsku: Pulzující plochý vodní paprsek, rychlost řezání $1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost od trysky 40 mm, tlak vody 70 MPa			
OL	26,00	31,33	57,00
BL	13,00	23,75	27,60
BL PP1	22,86	23,00	33,33
BL PP2	26,25	25,13	28,00



**Obr. 9-9 Vybrané drážky vytvořené kontinuálním plochým vodním paprskem v betonech OL s kamenivem granodiorit (drážky A-C) a v betonech BL PP 2 s kamenivem čedič (drážky D-F) po tepelném zatížení na 600°C.  $V_d$  – odstraněný objem v  $\text{cm}^3$ , ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost povrchu betonu od trysky 40 mm, tlak vody 30 MPa (drážky A, B, D, E) a 70 MPa (drážky C, F), rychlost řezání: 0,2  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  (drážky B, E) a 1  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  (drážky A, C, D, F). Autor fotografie: Ing. Libor Sitek, Ph.D.**



**Obr. 9-10 Detail - řez provedený kontinuálním plochým paprskem v betonu OL, kamenivo granodiorit, po tepelném zatížení 600 °C.  $V_d$  – odstraněný objem v  $\text{cm}^3$ , ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost povrchu betonu od trysky 40 mm, tlak vody 70 MPa, rychlost řezání 1  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Autor fotografie: Ing. Libor Sitek, Ph.D.**

Beton OL (beton s pískem Náklo a s kamenivem granodiorit Olbramovice) odolával vysokorychlostním vodním paprskům nejméně ze všech zkoumaných betonů. Tento rozdíl byl markantní zejména na vzorcích zahřátých na 600 °C (viz. Obr. 9-9 drážka C).

Při působení vysoké teploty (600 °C) dochází ke snížení zejména tahových pevností všech betonů (tabulka 9-4 a 9-5). Dochází také k rozvoji trhlin na povrchu vzorků (viz. Obr. 9-11).

Beton s kamenivem granodiorit OL vykazoval po tepelném zatížení na 600 °C vyšší procentuální poklesy pevností v tahu ohybem a v tahu povrchových vrstev betonu v porovnání s betony s kamenivem čedič (viz. Tabulka 9-16 a 9-17). Kamenivo granodiorit z lokality Olbramovice obsahuje 34 % křemene a 57 % živců, viz. Tabulka Tabulka 9-6 Petrografické složení kameniva Olbramovice frakce 4/8 mm a 8/16 mm . Fázová přeměna křemene z triklinické krystalové soustavy do hexagonální při 574 °C vyvolává objemový nárůst přibližně o 0,84 %. Při ohřátí betonu na 600 °C kamenivo granodiorit expanduje (transformace  $\alpha$ -křemene na  $\beta$ -křemen, kterou provází rozvoj štěpnosti v živcích) a ve struktuře betonu došlo ke vzniku trhlin. Vodní paprsek pak snadno do těchto trhlin proniká a způsobuje destrukci betonu v povrchových vrstvách. K tomu přispívá i snižující se pevnost betonu po zahřátí, kdy v cementovém kameni dochází k rozkladu hydratačních produktů (např. v intervalu 400 °C až 500 °C rozklad portlanditu) [88].

Většímu poklesu pevností u betonu s kamenivem granodiorit OL odpovídá větší rozdíl v odolnosti proti průniku paprsku u nezahřívajícího betonu a po zahřátí na 600°C (až 4 x větší rozpojený objem po zahřátí na 600 °C v porovnání s nezatíženým vzorkem – viz. Tabulka 9-19.) Tento rozdíl se projevuje výrazněji při použití nižší rychlosti řezání ( $0,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ), kdy paprsek působí na plochu povrchu delší dobu, nebo naopak při vyšším tlaku vody (70 MPa), kdy má paprsek větší průraznost (viz. Tabulka 9-17 a Obr. 9-18 – 9-18).

Betony s kamenivem čedič vykazovaly po zahřátí menší změny pevností než beton s kamenivem granodiorit. Čedičové kamenivo jako vyvřelá hornina je stabilní, při zahřátí na 600 °C nebyly na difraktogramech zaznamenány změny (viz. Obr. 9-3).

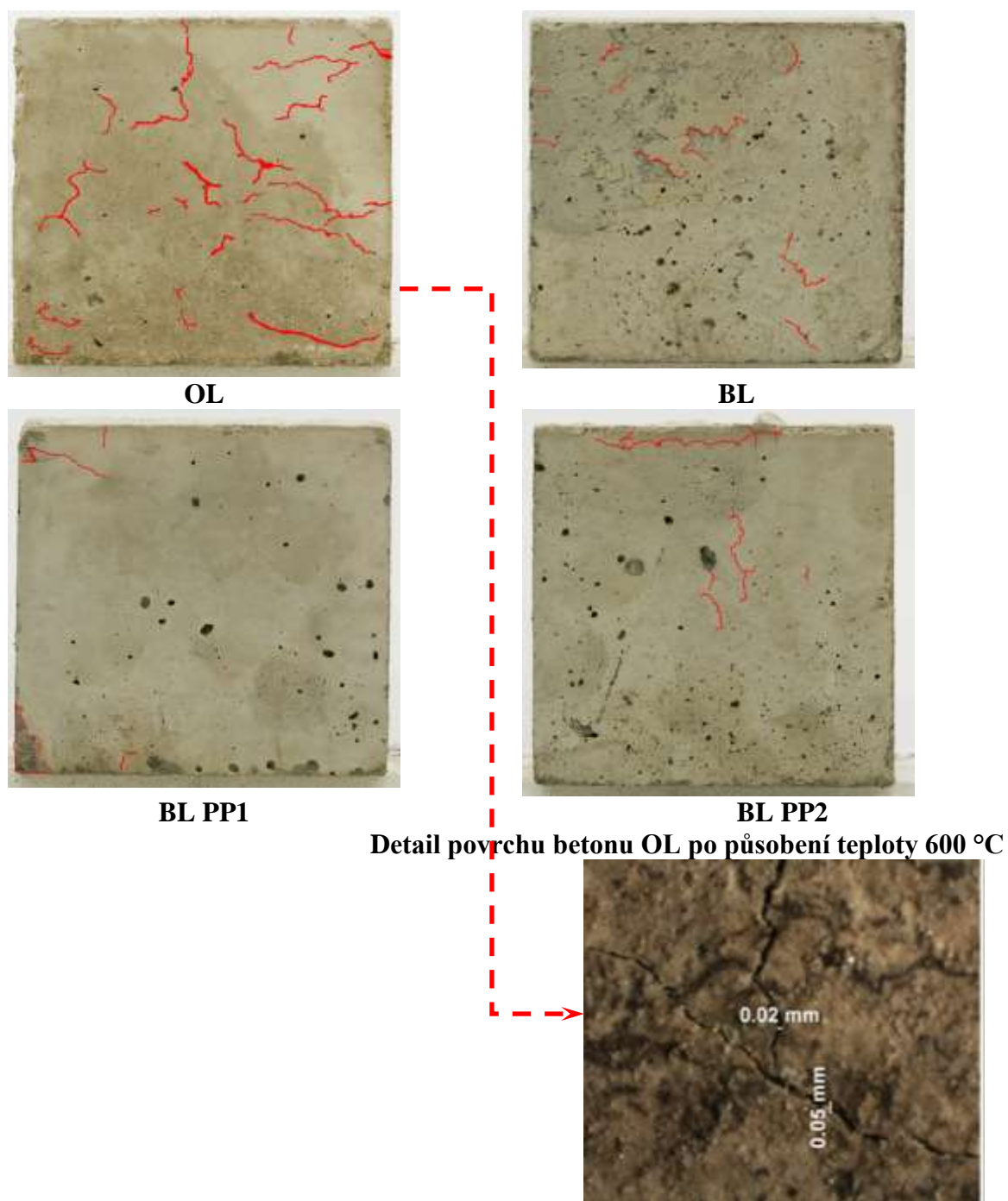
Trhlinky na povrchu betonů a odštěpování byly zaznamenány na fotografiích viz. Obr. 9-11. Vznik a rozvoj trhlinek ve vnitřní struktuře betonu při působení vysokých teplot byl pozorován rentgenovou počítačovou tomografií (X-ray CT, viz. Kapitola 10.2).

Potvrdil se pozitivní účinek polypropylenových vláken na chování betonů při působení vysokých teplot. Pevnost betonů s PP vlákny se po zahřátí na 600°C nesnížila v takové míře, jako u receptur bez polypropylenových vláken (Obr. 9-5). Betony s přídavkem PP vláken vykazovaly také menší počet vizuálně pozorovatelných trhlin na povrchu vzorku (viz. Obr. 9-11). To je v souladu s výsledky experimentů zaměřených na sledování vlivu přídavku polypropylenových vláken na odolnost betonů při působení vysokých teplot [105] [22] [106]. Teplota tání polypropylenu se pohybuje v rozmezí ( $160 \div 170$ ) °C. Při těchto teplotách se vlákna postupně taví (vyhořívají) a tím dojde ke zvětšení pórové struktury cementové matrice, v betonu se vytvoří malé dutinky. Vznikne pórová struktura betonu, kudy může expandovaná vodní pára unikat bez toho, aby výrazně poškodila mikrostrukturu betonu. Aplikací polypropylenových vláken do betonu lze destruktivní účinky expandované vodní páry zmírnit [89].

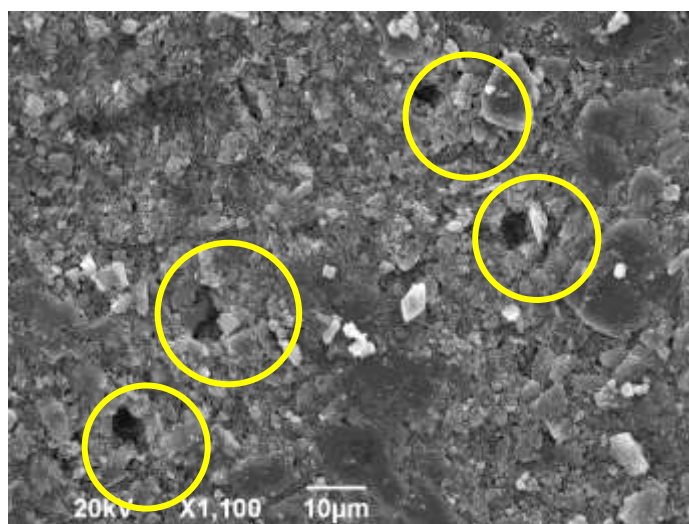
U vzorků nevystavených tepelnému zatížení bylo pozorováno, že vzorky betonů BL s čedičovým kamenivem bez polypropylenových vláken odolávají působení vodního paprsku



mírně lépe než vzorky receptur BL PP1 a BL PP2 s přidavkem polypropylenových vláken. Je to možné vysvětlit tím, že přidavek polypropylenových vláken zvyšuje obsah vzduchu v čerstvém a ve ztvrdlém betonu. Vodní paprsek proniká do trhlin a nastává rychlejší porušení betonu. Tato skutečnost je patrná hlavně při vyšší rychlosti řezání.



**Obr. 9-11 Ukázka povrchu betonových zkušebních vzorků vystavených působení teploty 600 °C, beton OL - kamenivo granodiorit, beton BL - kamenivo čedič, beton BL PP 1 - kamenivo granodiorit a PP vlákna, beton BL PP 2 - kamenivo granodiorit a PP vlákna**



**Obr. 9-12 Detail dutin vzniklých po vyhoření PP vláken po tepelném zatížení betonu na 250 °C [89] [100]**

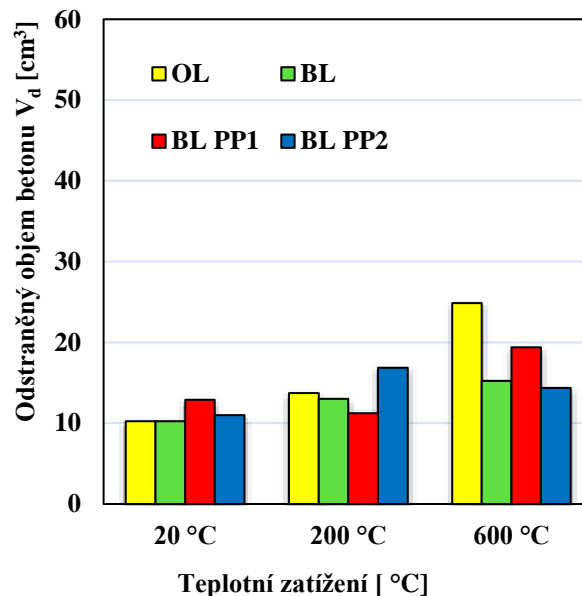
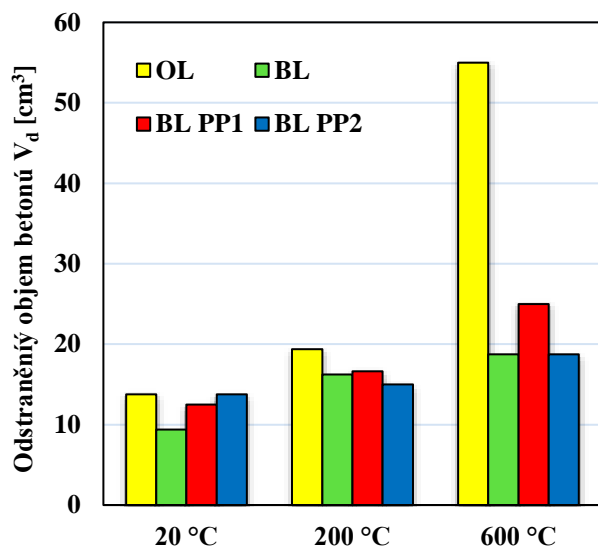
Při sledování vlivu parametrů vysokorychlostních vodních paprsků je z výsledků testů zřejmé, že tlak vody i rychlost řezání mají podstatný vliv na množství odstraněného betonu při jeho interakci s vysokorychlostním vodním paprskem. Při vyšší rychlosti řezání ( $1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) se v porovnání s nižší rychlostí ( $0,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) množství odstraněného betonu snižuje (až 2,3 krát u betonu BL tepelně neovlivněného až po 2,5 krát u betonu BL PP1 po zahřátí na  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Při vyšším tlaku vody (70 MPa) v porovnání s tlakem 30 MPa se zvyšuje množství odstraněného betonu, a to až 6,1 krát u betonu nevystavenému působení vyšších teplot (BL PP2) a až 5,7 krát u betonu tepelně ovlivněného (BL PP1).

Co se týká účinnosti jednotlivých typů paprsků, můžeme konstatovat, že přídavek pulzací zvyšuje účinnost vodního paprsku. Výhody akustických pulzací ve vysokotlakém hydraulickém systému, které umožňují vytváření pulzujícího vodního paprsku, ukazují grafy na Obr. 9-15 a Obr. 9-16. Z Obr. 9-18 je patrné, že pulzující plochý paprsek dokáže rozpojit srovnatelný objem betonu než kontinuální plochý paprsek, a to i při 5x vyšší rychlosti posunu. Je tedy možné výrazně zkrátit operační čas při dosažení srovnatelných výkonů.

**Tabulka 9-19 Poměr rozpojeného objemu betonů po tepelném zatížení na 200 °C a 600 °C a betonů referenčních**

Označení betonu	Poměr rozpojeného objemu betonů po tepelném zatížení a betonů referenčních							
	Kontinuální plochý paprsek				Pulzující kontinuální paprsek			
	rychlost řezání $0,2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , tlak vody 30 MPa		rychlost řezání $1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , tlak vody 70 MPa		rychlost řezání $1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , tlak vody 30 MPa		rychlost řezání $1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , tlak vody 70 MPa	
	$V_d 200^\circ\text{C}/V_d 20^\circ\text{C}$	$V_d 600^\circ\text{C}/V_d 20^\circ\text{C}$	$V_d 200^\circ\text{C}/V_d 20^\circ\text{C}$	$V_d 600^\circ\text{C}/V_d 20^\circ\text{C}$	$V_d 200^\circ\text{C}/V_d 20^\circ\text{C}$	$V_d 600^\circ\text{C}/V_d 20^\circ\text{C}$	$V_d 200^\circ\text{C}/V_d 20^\circ\text{C}$	$V_d 600^\circ\text{C}/V_d 20^\circ\text{C}$
OL	1,4	4,0	1,5	3,8	1,3	2,4	1,2	2,2
BL	1,7	2,0	1,6	1,8	1,3	1,5	1,8	2,1
BL PP1	1,3	2,0	1,4	2,2	0,9	1,5	1,0	1,5
BL PP2	1,1	1,4	1,7	2,1	1,5	1,3	1,0	1,1

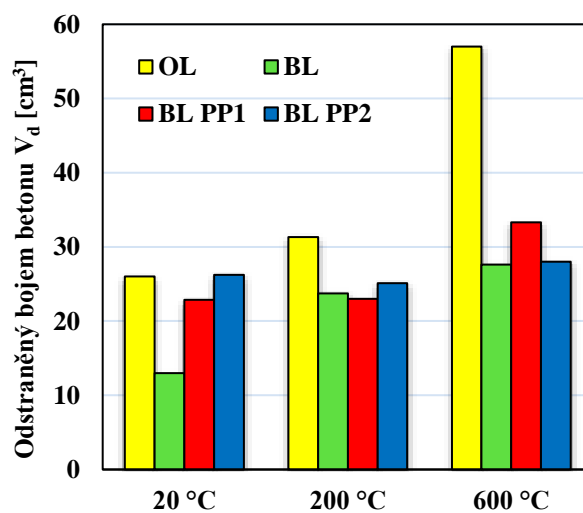
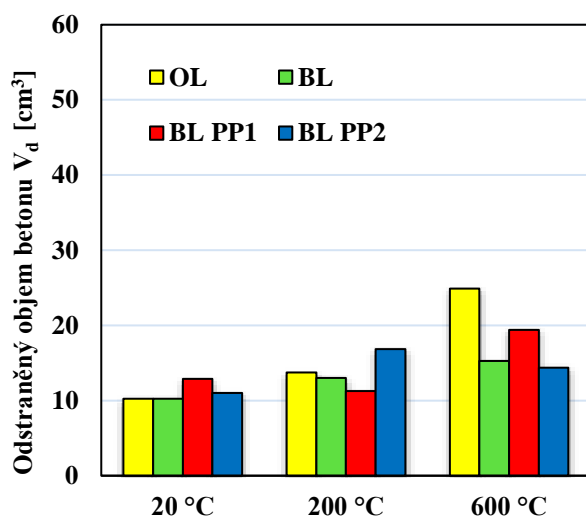
Odstraněný objem betonu  $V_d$  [ $\text{cm}^3$ ] (na 10 cm délky drážky) při použití různých typů vysokorychlostních vodních paprsků pro betony tepelně nezatížené ( $20\text{ }^\circ\text{C}$ ), po působení teploty  $200\text{ }^\circ\text{C}$  a  $600\text{ }^\circ\text{C}$  zobrazují následující obrázky.



A) Kontinuální plochý vodní paprsek, rychlost řezání  $0,2\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , ekvivalentní průměr trysky  $2,05\text{ mm}$ , vzdálenost od trysky  $40\text{ mm}$ , tlak vody  $30\text{ MPa}$

B) Pulzující plochý vodní paprsek, rychlost řezání  $1\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , ekvivalentní průměr trysky  $2,05\text{ mm}$ , vzdálenost od trysky  $40\text{ mm}$ , tlak vody  $30\text{ MPa}$

Obr. 9-13 Porovnání účinnosti kontinuálního plochého A) a pulzujícího plochého paprsku B), při 5x větší rychlosti posunu pulzujícího vodního paprsku.

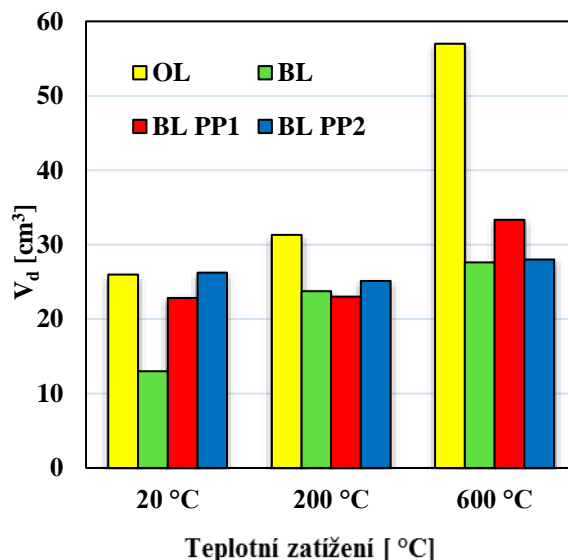
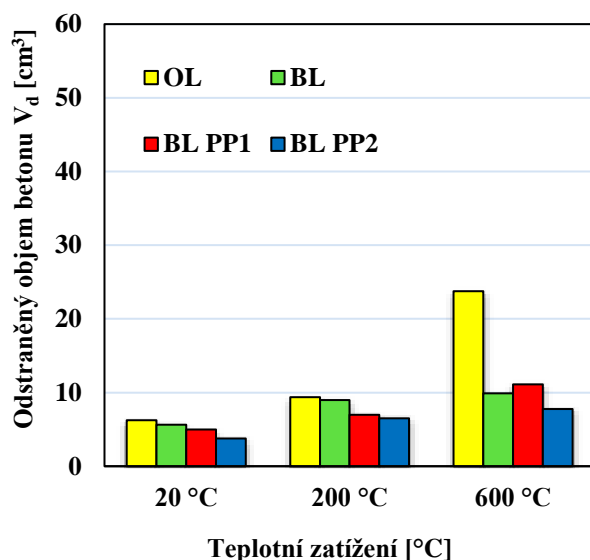


Pulzující plochý vodní paprsek, rychlost řezání  $1\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , ekvivalentní průměr trysky  $2,05\text{ mm}$ , vzdálenost od trysky  $40\text{ mm}$ , tlak vody  $30\text{ MPa}$

Pulzující plochý vodní paprsek, rychlost řezání  $1\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , ekvivalentní průměr trysky  $2,05\text{ mm}$ , vzdálenost od trysky  $40\text{ mm}$ , tlak vody  $70\text{ MPa}$

Obr. 9-14 Vliv použitého tlaku na účinnost pulzujícího plochého vodního paprsku





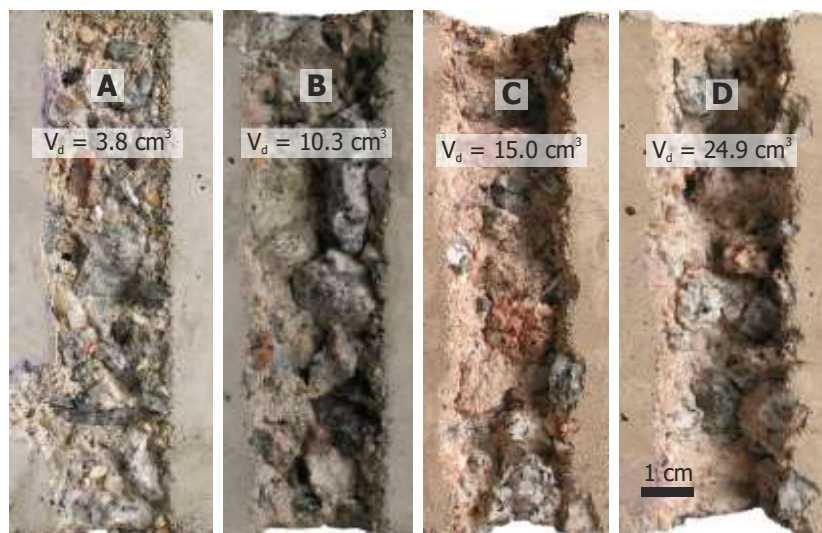
**Kontinuální plochý vodní paprsek, rychlost řezání 1 m.min<sup>-1</sup>, ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost od trysky 40 mm, tlak vody 70 MPa**

**Pulzující plochý vodní paprsek, rychlost řezání 1 m.min<sup>-1</sup>, ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost od trysky 40 mm, tlak vody 70 MPa**

**Obr. 9-15 Vliv pulzací na účinnost vodního paprsku**

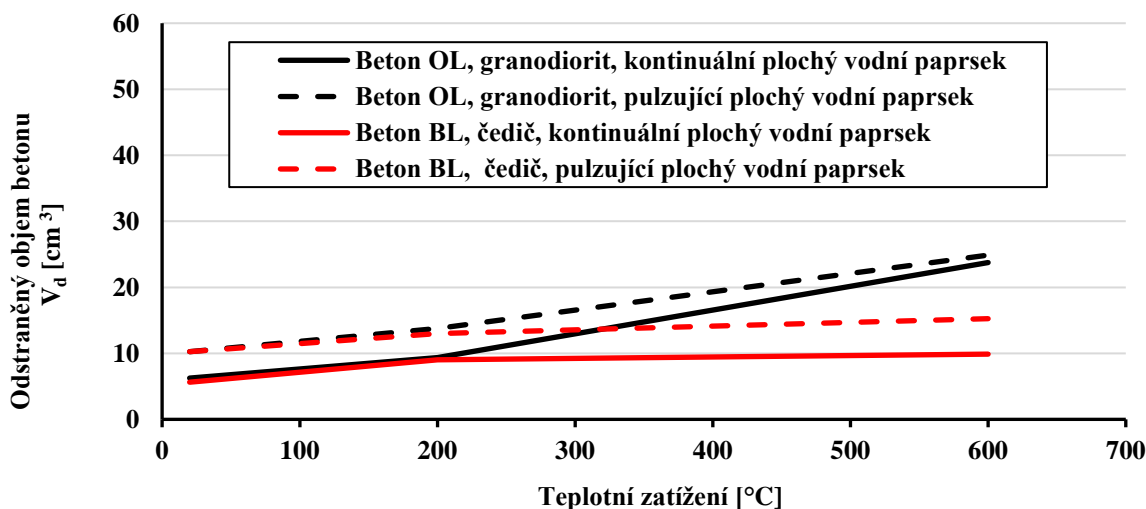
Názorně lze vidět efekt pulzací na fotografii na 9-16. Je patrný rozdíl v množství odstraněného betonu u drážek vytvořených kontinuálním a pulzujícím paprskem za identických podmínek (stejný tlak paprsku, rychlost posunu paprsku). Větších rozdílů v účinnosti obou paprsků je dosahováno u betonů bez tepelné expozice (Obr. 9-17, drážky A a B). Poměr mezi množstvím betonu odstraněného oběma typy paprsků vyznívá ve prospěch pulzujícího paprsku (2,7x účinnější). U betonů, které byly zahřívány na 600 °C (Obr. 9-16, drážky C a D) se pak tento poměr snižuje na 1,7. Snížení poměru lze vysvětlit dostatečným narušením struktury betonu tepelným zatížením, kdy i kontinuální paprsek (bez pulzací) je schopen proniknout do větších hloubek.

Na obrázku 9-16 je také dobře patrná změna barvy betonu po tepelném zatížení, která je způsobena rozkladem kameniva biotický granodiorit Olbramovice. To koresponduje se změnami zaznamenanými na rtg difraktogramu kameniva Olbramovice (viz. Obr. 9-2) a také s pozorováním barevných změn betonů při tepelném zatížení, které publikovali např. Yuzer [107] a Carré [108]. Při teplotách v intervalu 250 °C až 300 °C se křemenné kamenivo se zbarvuje do růžova až červena v důsledku oxidace sloučenin železa okolo 300 °C, v intervalu 450 °C až 500 °C se červené zbarvení křemenného kameniva zvyrazňuje Yuzer [107].



**Obr. 9-16 Rozpojování betonu OL s kamenivem granodiorit. Porovnání drážek vytvořených kontinuálním plochým vodním paprskem (drážky A, C) a pulzujícím (drážky B, D) před tepelným zatížením (drážky A, B) a po tepelném zatížení na 600 °C (drážky C, D).  $V_d$  – odstraněný objem, ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost od trysky 40 mm, tlak vody 30 MPa, rychlost řezání 1 m.min<sup>-1</sup>. Autor fotografie: Ing. Libor Sítek, Ph.D.**

Z obrázku Obr. 9-17 lze pozorovat rozdíl v odolnosti betonů s různým kamenivem proti průniku paprsků (beton OL a beton BL) především po zahřátí na 600 °C. Vliv rozdílné pevnosti a stability kameniva granodiorit a čedič při teplotách 20 °C a 200 °C není na množství rozpojeného objemu výrazný, zásadní je až degradace kameniva granodiorit při teplotě 600 °C. Kamenivo čedič Bílčice vykazuje výrazně lepší tepelnou stabilitu než kamenivo granodiorit Olbramovice. Při teplotě 600 °C se projevuje vliv rozkladu kameniva granodiorit. Beton s kamenivem granodiorit vykazuje vyšší pokles pevnosti v tahu ohybem a pevnosti betonu v tahu povrchových vrstev a tomu odpovídá i nižší odolnost vůči pronikání vodních paprsků (větší rozpojený objem než u betonů s kamenivem čedič) (viz. Tabulka 9-4, 9-5, Obr. 9-17).



**Obr. 9-17 Porovnání účinků plochého vodního paprsku kontinuálního a pulzujícího na betonech OL s kamenivem granodiorit a BL s kamenivem čedič po rozdílné tepelné expozici. Ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost od trysky 40 mm, tlak vody 30 MPa, rychlost řezání 1 m.min<sup>-1</sup>**

## 10 APLIKACE VYSOKORYCHLOSTNÍCH VODNÍCH PAPERŮ PRO PLOŠNÉ ROZPOJOVÁNÍ VRSTEV BETONŮ PORUŠENÝCH PŮSOBENÍM VYSOKÝCH TEPLŮT

Zkoušky vysokorychlostními vodními paprsky realizované na betonových vzorcích rozměrů 150x150x150 mm poskytly vstupní podklady pro odstraňování porušených povrchových vrstev na betonových deskách rozměrů 1150x300x100 mm. Plocha betonového vzorku 1150x300 mm umožňuje lepší přiblížení reálným podmínkám použití technologie vysokorychlostních vodních paprsků pro sanace povrchových vrstev betonů.

Pro testování bylo vybráno 5 receptur betonů:

**R1-BL-I** .....CEM I 42,5 R Českomoravský cement, a.s., závod Mokrý, referenční, kamenivo čedič Bílčice.

**R2-BL-F**..... CEM I 42,5 R Českomoravský cement, a.s., závod Mokrý, 1 kg/m<sup>3</sup> PP, kamenivo čedič Bílčice.

**R7-OL-I** .....CEM I 42,5 R Českomoravský cement, a.s., závod Mokrý, referenční, kamenivo biotický granodiorit Olbramovice.

**R11-OL-I-F**....CEM I 42,5 R Českomoravský cement, a.s., závod Mokrý, závod Mokrý, 1 kg/m<sup>3</sup> PP, kamenivo biotický granodiorit Olbramovice.

**L-II**.....CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R Českomoravský cement, a.s., závod Mokrý, lehké kamenivo Liapor.

### 10.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ PRO ROZPOJOVÁNÍ BETONŮ TECHNOLOGIÍ VVP

#### 10.1.1 Použité materiály a jejich vlastnosti

##### Cement:

Cement CEM I 42,5 R Českomoravský cement, a.s., závod Mokrý.

Cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R Českomoravský cement, a.s., závod Mokrý.

##### Kamenivo:

Těžné kamenivo lokalita Žabčice, frakce 0/4 mm.

Drcené kamenivo lokalita Olbramovice, frakce 4/8 mm a 8/16 mm, biotický granodiorit.

Drcené kamenivo lokalita Bílčice, frakce 0/4 mm, 4/8 a 8/16 mm, čedič.

Lehké kamenivo Liapor: Liapor 0-4(33)/500, Liapor 4-8/600.

Superplastifikátor Chryso Fluid Optima 208 na bázi modifikovaných polykarboxylátů.

##### Vlákna:

Polypropylenová monofilamentní PB Eurofiber HPR, průměr vlákna 15,4 μm, délka 6 mm. Výrobce Baumhueter extrusion GmbH. Bod tání vláken PB Eurofiber HPR (melting point) 147 -150 °C. [90].

### 10.1.2 Receptury betonů

**Tabulka 10-1 Složení betonů s kamenivem čedič Bílčice na 1 m<sup>3</sup>**

Složka	Označení receptury Množství [kg/m <sup>3</sup> ]	
	R1-BL-I	R2-BL-I-F
Cement CEM I 42,5 R (Mokrá)	450	450
Kamenivo 0/4 mm - čedič Bílčice	836	836
Kamenivo 4/8 mm - čedič Bílčice	241	241
Kamenivo 8/16 mm - čedič Bílčice	780	780
Voda	157	157
Superplastifikátor Chryso Fluid Optima 208 (1,5% z m <sub>c</sub> )	6,75	6,75
PP vlákna - PB Eurofiber HPR	-	1

**Tabulka 10-2 Složení betonů s kamenivem biotitický granodiorit Olbramovice na 1 m<sup>3</sup>**

Složka	Označení receptury Množství [kg/m <sup>3</sup> ]	
	R7-OL-I	R11-OL-I-F
Cement CEM I 42,5 R (Mokrá)	450	450
Kamenivo 0/4 mm - Žabčice	853	853
Kamenivo 4/8 mm - Olbramovice	204	204
Kamenivo 8/16 mm - Olbramovice	800	800
Voda	157	157
Superplastifikátor Chryso Fluid Optima 208 (1,5% z m <sub>c</sub> )	6,75	6,75
PP vlákna - PB Eurofiber HPR	-	1

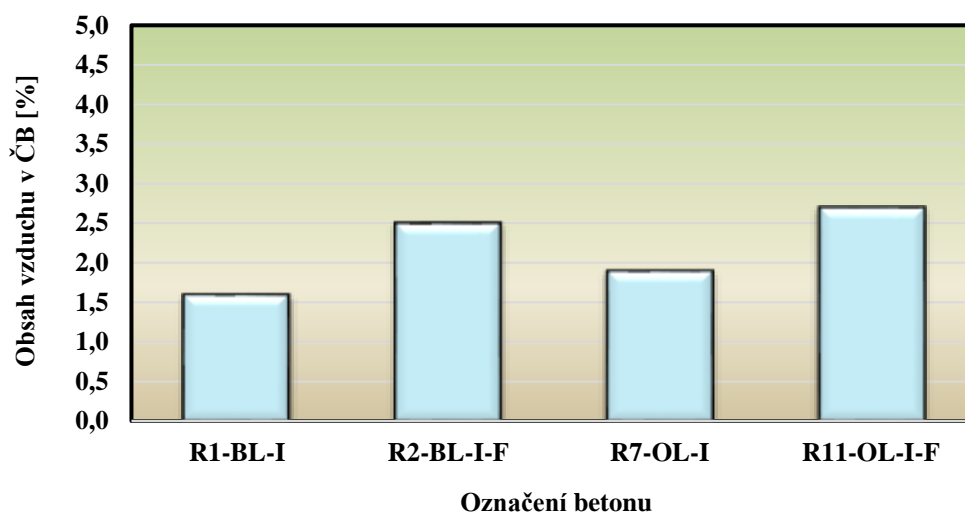
**Tabulka 10-3 Složení betonu s lehkým kamenivem Liapor na 1 m<sup>3</sup>**

Složka	Označení receptury
	L-II
Cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R (Mokrá) [kg]	375
Kamenivo 0-4 mm čedič Bílčice [kg]	500
Kamenivo Liapor 0-4(33)/500 [m <sup>3</sup> ]	0,024
Kamenivo Liapor 4-8/600 [m <sup>3</sup> ]	0,4
Voda [kg]	79
Superplastifikátor Chryso Fluid Optima 208 (0,8% z m <sub>c</sub> ) [l]	3,0
Vodní součinitel v/c	0,21

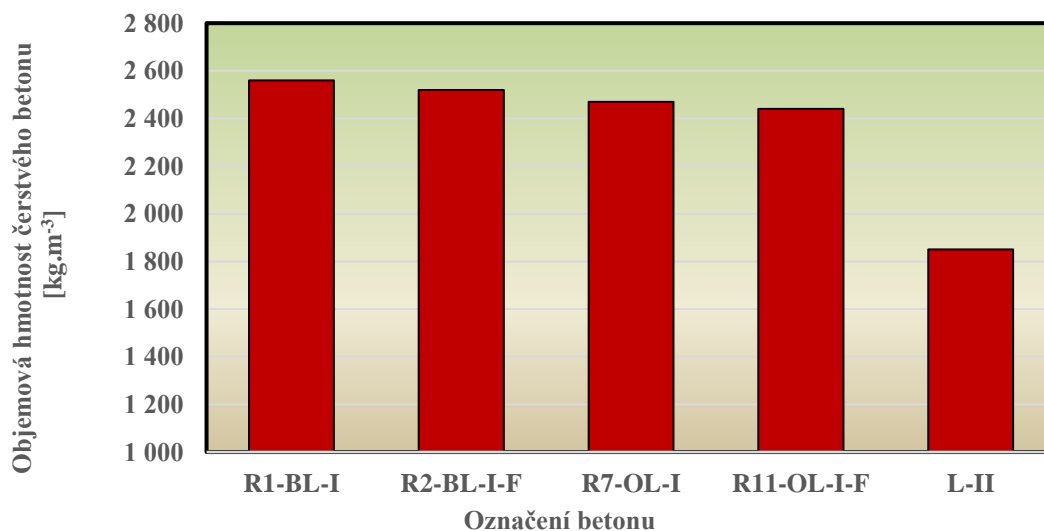
### 10.1.3 Vlastnosti čerstvých betonů

Tabulka 10-4 Vlastnosti čerstvého betonu

Beton	Sednutí [mm]	Konzistence třída	Rozlítí [mm]	Konzistence třída	Obsah vzduchu v ČB [%]	Objemová hmotnost ČB [kg/m <sup>3</sup> ]
R1-BL-I	180	S4	410	F2	1,6	2560
R2-BL-I-F	160	S4	390	F2	2,5	2520
R7-OL-I	170	S4	410	F2	1,9	2470
R11-OL-I-F	160	S4	400	F2	2,7	2460
L-II	60	S2	--	--	--	1850



Obr. 10-1 Obsah vzduchu v čerstvém betonu



Obr. 10-2 Objemová hmotnost čerstvého betonu

### 10.1.4 Tepelné zatěžování vzorků

Tepelné zatížení zkušebních vzorků bylo realizováno v peci s plynovým vytápěním. Vnitřní rozměry pece byly 800x800x800 mm. Teplota v peci byla snímána čtyřmi termočlánky. Zatěžování betonových desek vycházelo z normové teplotní křivky ISO 834 po

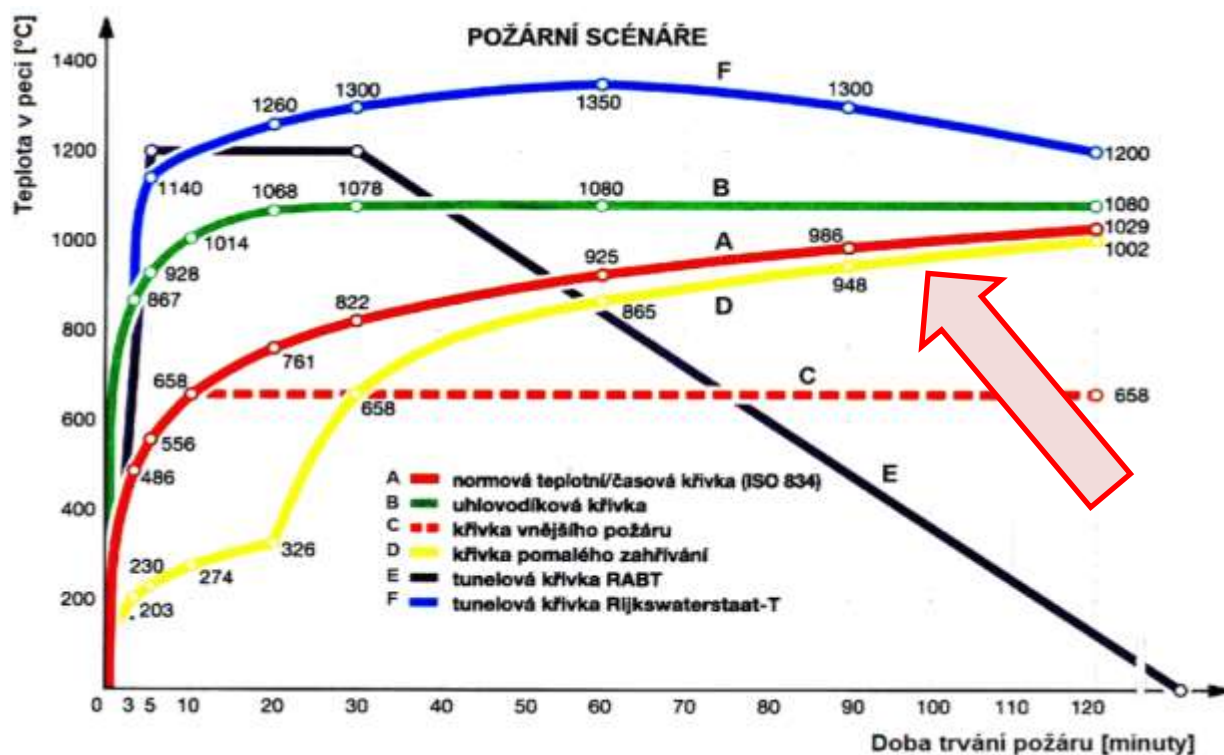
dobu 60 minut. Vzhledem k parametrům zkušebního zařízení byla dosažená teplota v peci po 60 minutách 850 °C.

Normová teplotní křivka (označována jako křivka ISO nebo ISO 834), která je dána rovnicí:

$$\theta_g = T_0 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (18)$$

kde:  $\theta_g$  - teplota plynů v požárním úseku [°C]  
 $T_0$  - teplota v požárním úseku před vznikem požáru [°C]  
 $T$  - čas trvání požáru [min].

Tato křivka odpovídá tzv. celulóзовému hoření (hoření dřeva, papíru, oděvů apod.) a její použití je velmi časté. Vztahuje se k ní většina dostupných výsledků zkoušek a výpočtů. [14]



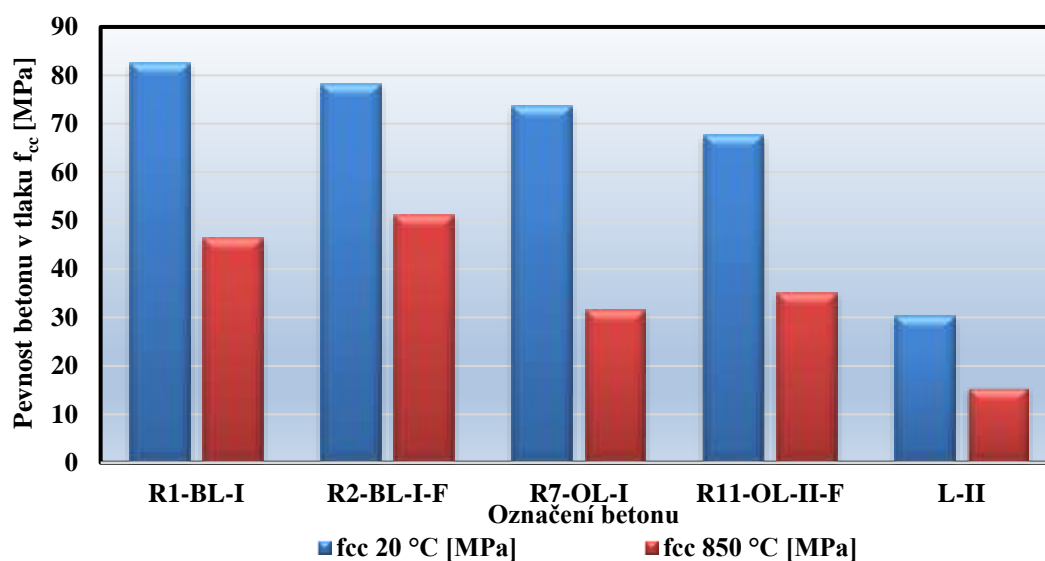
Obr. 10-3 Teplotní křivky – požární scénáře [109]. Šipkou zvýrazněna normová teplotní křivka ISO 834

### 10.1.5 Vlastnosti betonů před a po tepelném zatížení

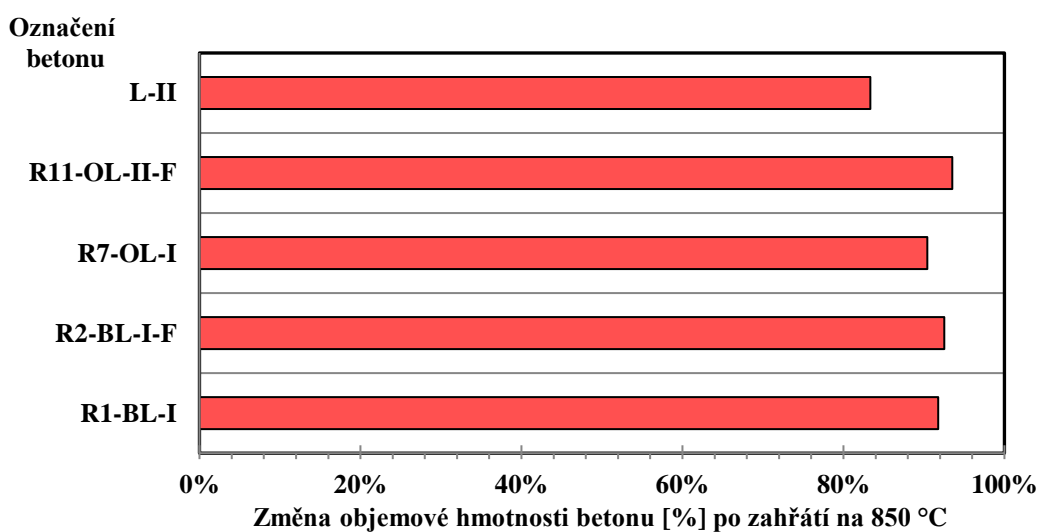
Před provedením tepelného zatížení byly vzorky (krychle rozměru 150x150x150 mm, desky rozměru 1150x300x100 mm) uloženy v laboratorních podmínkách. Režim tepelného zatěžování vycházel z normové teplotní křivky ISO 834 po dobu 60 minut. Vzhledem k parametrům zkušebního zařízení byla dosažená teplota v peci po 60 minutách 850 °C. Po tepelném zatížení byly vzorky ponechány 30 minut v peci a postupně chladly. Po částečném zchladnutí byly vzorky umístěny v laboratorním prostředí. Vlastnosti vzorků byly zjišťovány pro vychladnutí vzorků.

**Tabulka 10-5: Pevnost v tlaku  $f_{cc}$  a objemová hmotnost D betonů s kamenivem čedič Bílčice, s kamenivem biotitický granodiorit Olbramovice a s lehkým kamenivem Liapor před a po tepelném zatížení**

Beton	$D_{20^{\circ}\text{C}}$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$D_{850^{\circ}\text{C}}$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$D_{850^{\circ}\text{C}} / D_{20^{\circ}\text{C}}$ [%]	$f_{cc\ 20^{\circ}\text{C}}$ [MPa]	$f_{cc\ 850^{\circ}\text{C}}$ [MPa]	$f_{cc\ 850^{\circ}\text{C}} / f_{cc\ 20^{\circ}\text{C}}$ [%]
R1-BL-I	2584	2371	91,8%	82,4	46,4	56,3%
R2-BL-I-F	2543	2353	92,5%	78,1	51,1	65,4%
R7-OL-I	2379	2151	90,4%	73,7	31,6	42,9%
R11-OL-I-F	2329	2178	93,5%	67,6	35,1	51,9%
L-II	1740	1450	83,3%	30,2	15,4	51,0%

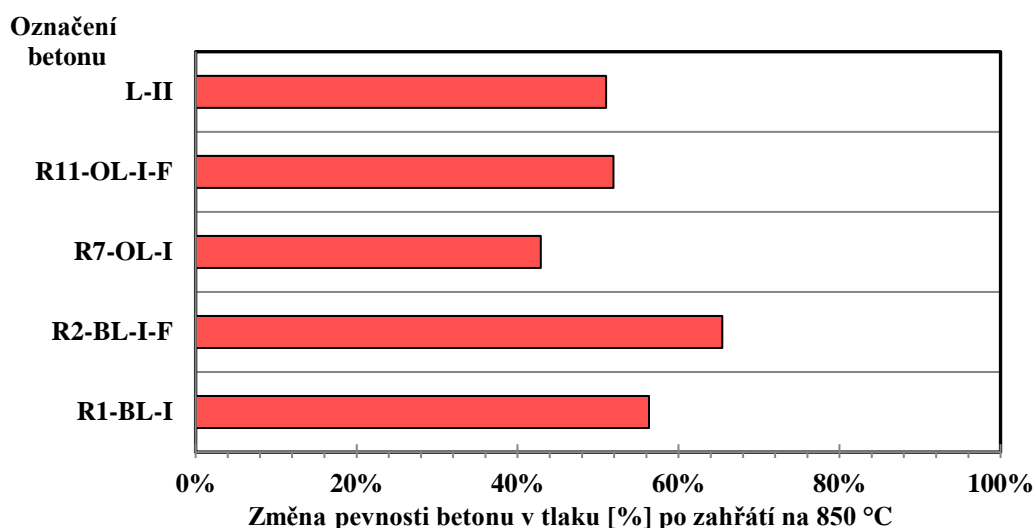


**Obr. 10-4 Pevnost betonu v tlaku před a po tepelném zatížení**



**Obr. 10-5 Změna objemové hmotnosti betonů po působení teploty 850 °C v %. 100 % = objemová hmotnost při 20 °C.**





**Obr. 10-6 Změna pevnosti v tlaku betonů po působení teploty 850 °C v %.  
100 % = pevnost betonu v tlaku při 20 °C.**

U betonu s lehkým kamenivem Liapor došlo po působení teploty 850 °C k většímu poklesu objemové hmotnosti, než u betonů s kamenivem čedič Bílčice a s kamenivem biotický granodiorit Olbramovice. Důvodem je vyšší vlhkost betonu s lehkým kamenivem před zahříváním ( $w=9,5$  %, viz. Tabulka 10-6).

#### 10.1.6 Vizuální hodnocení změn na betonových zkušebních vzorcích po tepelném zatížení

Vzhled vzorků po tepelném zatížení je dokumentován na následujících obrázcích.



**Obr. 10-7 Beton R1-BL-I (CEM I 42,5 R, kamenivo čedič Bílčice) po zatížení na 850 °C, červená šipka ukazuje odštěpování betonu**



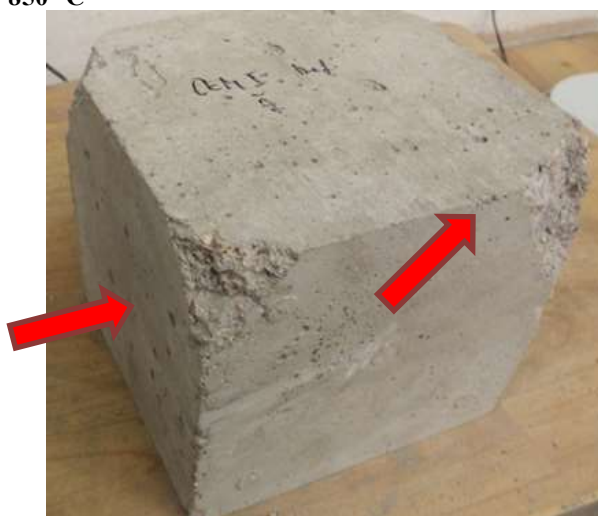
**Obr. 10-8 Beton R1-BL-I (CEM I 42,5R, kamenivo čedič Bílčice) po zatížení na 850 °C, trhliny na povrchu vzorku jsou zvýrazněné červeně**



Obr. 10-9 Beton R2-BL-I-F (CEM I 42,5 R, 1kg/m<sup>3</sup> PP, kamenivo čedič Bílčice) po zatížení na 850 °C



Obr. 10-10 Beton R2-BL-I-F (CEM I 42,5 R, 1kg/m<sup>3</sup> PP, čedič Bílčice) po zatížení na 850 °C, trhlinky na povrchu vzorku jsou zvýrazněny červeně, šířka trhlin 0,1-0,2 mm



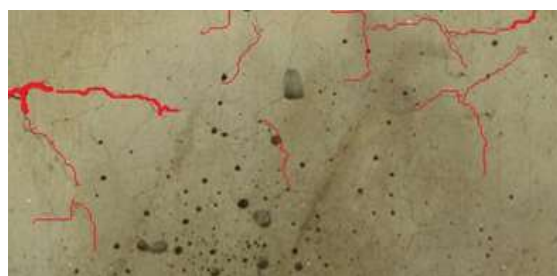
Obr. 10-11 Beton R7-OL-I (CEM I 42,5 R, kamenivo biotický granodiorit Olbramovice) po zatížení na 850 °C, červená šipka ukazuje odprásknutí betonu



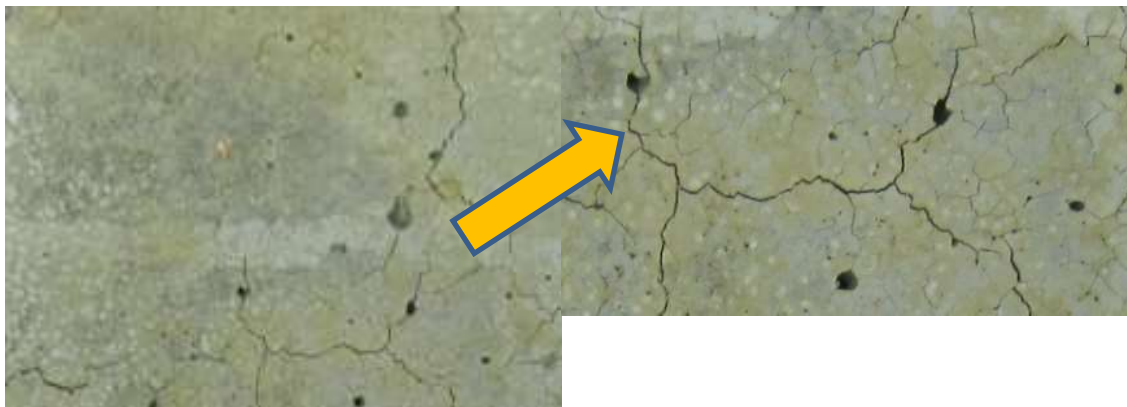
Obr. 10-12 Beton R7-OL-I (CEM I 42,5 R, kamenivo biotický granodiorit Olbramovice) po zatížení na 850 °C, trhlinky na povrchu vzorku jsou zvýrazněny červeně, šířka trhlin 0,1-0,5 mm



Obr. 10-13 Beton R11-OL-I-F (CEM I 42,5 R, kamenivo biotický granodiorit Olbramovice, 1kg/m<sup>3</sup> PP) po zatížení na 850 °C



Obr. 10-14 Beton R11-OL-I-F (CEM I 42,5 R Mokrá, kamenivo biotický granodiorit Olbramovice, 1kg/m<sup>3</sup> PP) po zatížení na 850 °C, trhlinky jsou zvýrazněny červeně, šířka trhlin 0,1-0,5 mm



**Obr. 10-15 Beton L-II (CEM II/B-S 32,5 R Prachovice, lehké kamenivo Liapor) po zatížení na 850 °C, šířka trhlin 0,1-0,8 mm, detail vlevo**

### **10.1.7 Příprava zkušebních desek pro plošné odstraňování vrstev betonu vysokorychlostními vodními paprsky**

Pro zkoušky otryskávání povrchu betonu technologií vysokorychlostních vodních paprsků byly vyrobeny betonové desky. Povrch betonových desek 1150x300x100 mm byl jednostranně zahříván v peci s plynovým vytápěním. Režim tepelného zatěžování vycházel z normové teplotní křivky ISO 834 po dobu 60 minut. Vzhledem k parametrům zkušebního zařízení byla dosažená teplota v peci po 60 minutách 850 °C. Po tepelném zatížení byly vzorky ponechány 30 minut v peci a postupně chladly. Po částečném zchladnutí byly vzorky umístěny v laboratorním prostředí. Vlastnosti vzorků byly zjišťovány pro vychladnutí vzorků. V betonových deskách o rozměrech 1150x100x300 mm byly zabetonovány termočlánky v hloubce 25 mm, 50 mm a 75 mm od povrchu vzorku. Termočlánky umožnily snímání aktuální teploty ve zkušebních deskách v průběhu zahřívání.

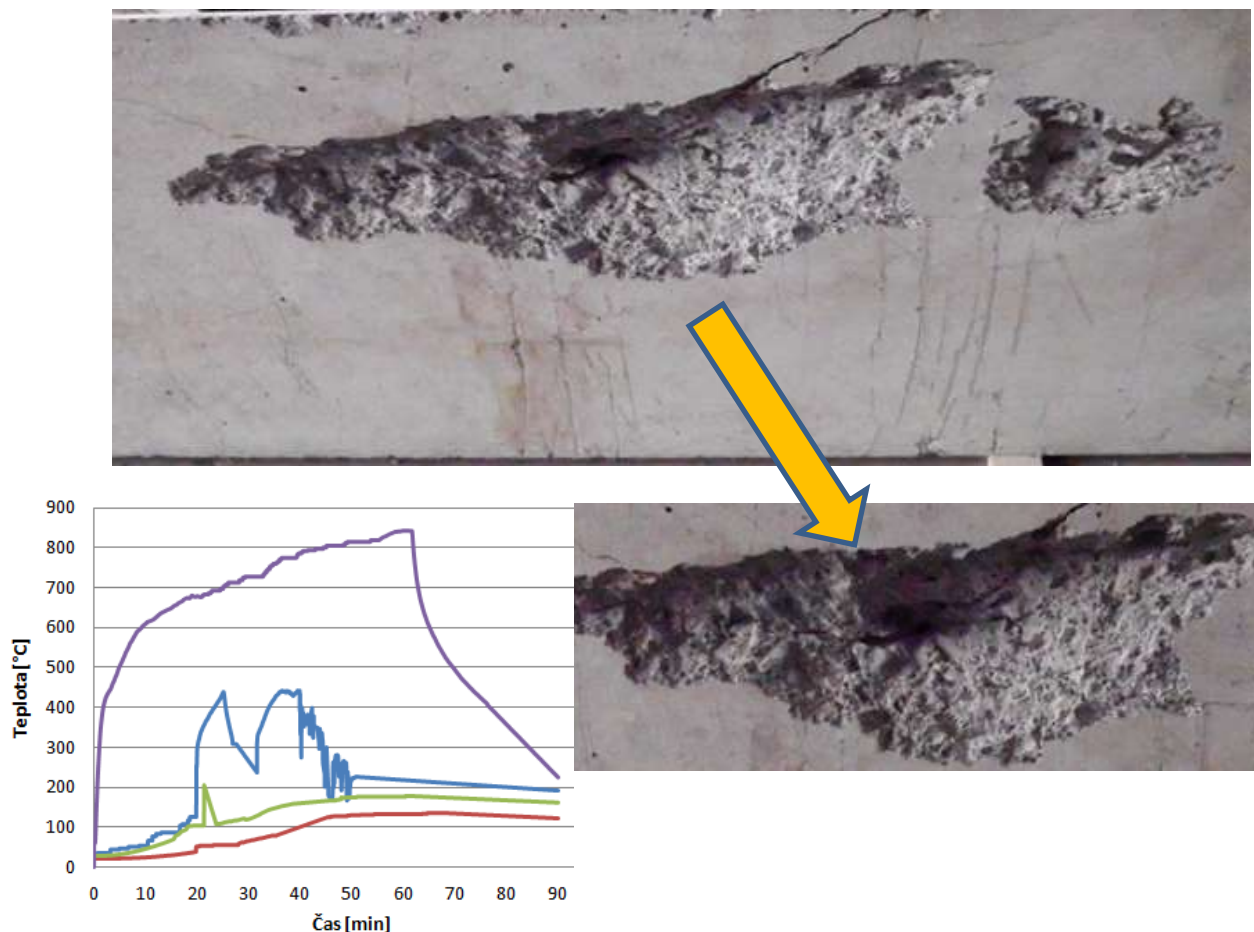
Desky byly před tepelným zatěžováním uloženy v laboratorních podmínkách po dobu 90ti dnů. Před zahájením zkoušky byla změřena u každé desky vlhkost. Po ukončení zkoušky byly desky vizuálně posouzeny, byly zaznamenány změny, zejména trhlinky a explosivní odštěpování betonu.

**Tabulka 10-6 Vlhkost betonových desek před tepelným zatěžováním**

Označení betonu	vlhkost w [%]
R1-BL-I - CEM I 42,5 R (Mokrý), kamenivo čedič	4,2
R2-BL-I-F - CEM I 42,5 R (Mokrý), 1kg PP vláken, kamenivo čedič	4,8
R7-OL-I - CEM I 42,5 R (Mokrý), kamenivo biotický granodiorit Olbramovice	3,4
R11-OL-I-F-CEM 42,5 R (Mokrý), 1 kg PP vláken, kamenivo biotický granodiorit Olbramovice	3,8
L-II CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, lehké kamenivo Liapor	9,5

## 10.1.8 Chování zkušebních desek v průběhu zahřívání

*Beton R1-BL-I (CEM I 42,5 R, kamenivo čedič)*

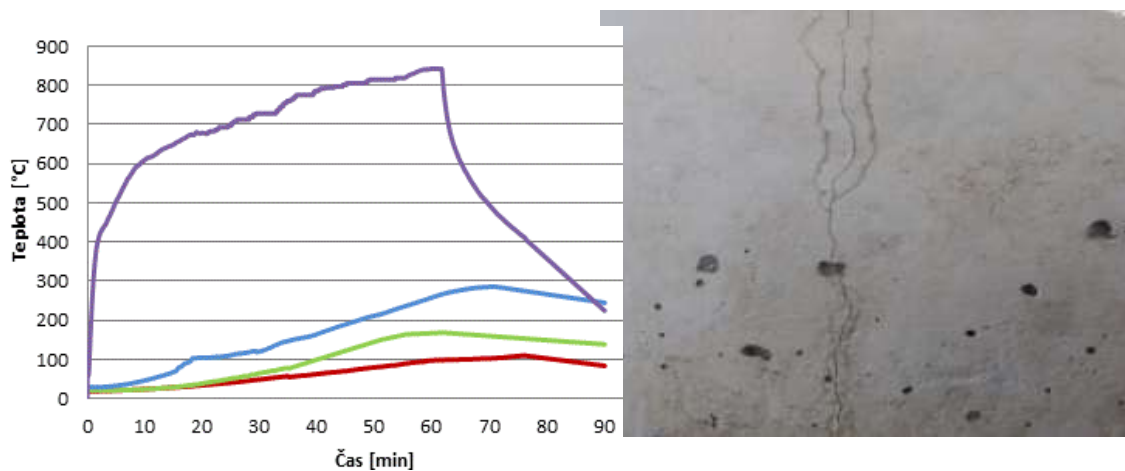


**Obr. 10-16** Vzhled betonu R1-BL-I (CEM I 42,5 R, kamenivo čedič Bílčice) po zatížení na 850 °C, odštěpování betonu na boku desky

Po 20 minutě zahřívání vzorku bylo zaznamenáno explozivní odprýskávání betonu, bylo zřetelně slyšet odprýsknutí betonu. Odprýsknutý beton odhalil termočlánek v hloubce 25 mm od zahřívajícího povrchu vzorku, to odpovídá záznamu intenzivního vzestupu snímané teploty do cca 25 minut, teplota kolísala do 50 minut. Po celou dobu zahřívání se z desky odpařovala voda, ve formě páry stoupala z povrchu. Po zkoušce byla zaznamenána dvě odprýsknutá místa (6 cm<sup>2</sup> a 25 cm<sup>2</sup>). Na desce se vytvořily vlasové trhlinky. Trhlina šířky 1,2 mm procházela přes celou tloušťku desky 100 mm.



**Beton R2-BL-F (CEM I 42,5 R, 1 kg/m<sup>3</sup> PP, kamenivo čedič)**



**Obr. 10-17 Vzhled betonu R2-BL-F (CEM I 42,5 R, 1kg/m<sup>3</sup> PP, kamenivo čedič Bílčice) po zatížení na 850 °C, odprýsknutí betonu na boku desky**

Ve 25 minutě zahřívání odprýskl na boku desky beton o ploše cca 7 cm<sup>2</sup>. Po celou dobu zahřívání se odpařovala voda. Postupně vznikaly vlasové trhlinky šířky 0,1-0,2 mm. Teplotní maximum v desce bylo dosaženo až po ukončení zahřívání desky.

**Beton R7-OL-I (cement CEM I 42,5 R, kamenivo biotický granodiorit)**



**Obr. 10-18 Odprýsknutí betonu na spodní zahřívání straně desky, beton R7-OL-I (cement CEM I 42,5 R, kamenivo biotický granodiorit)**



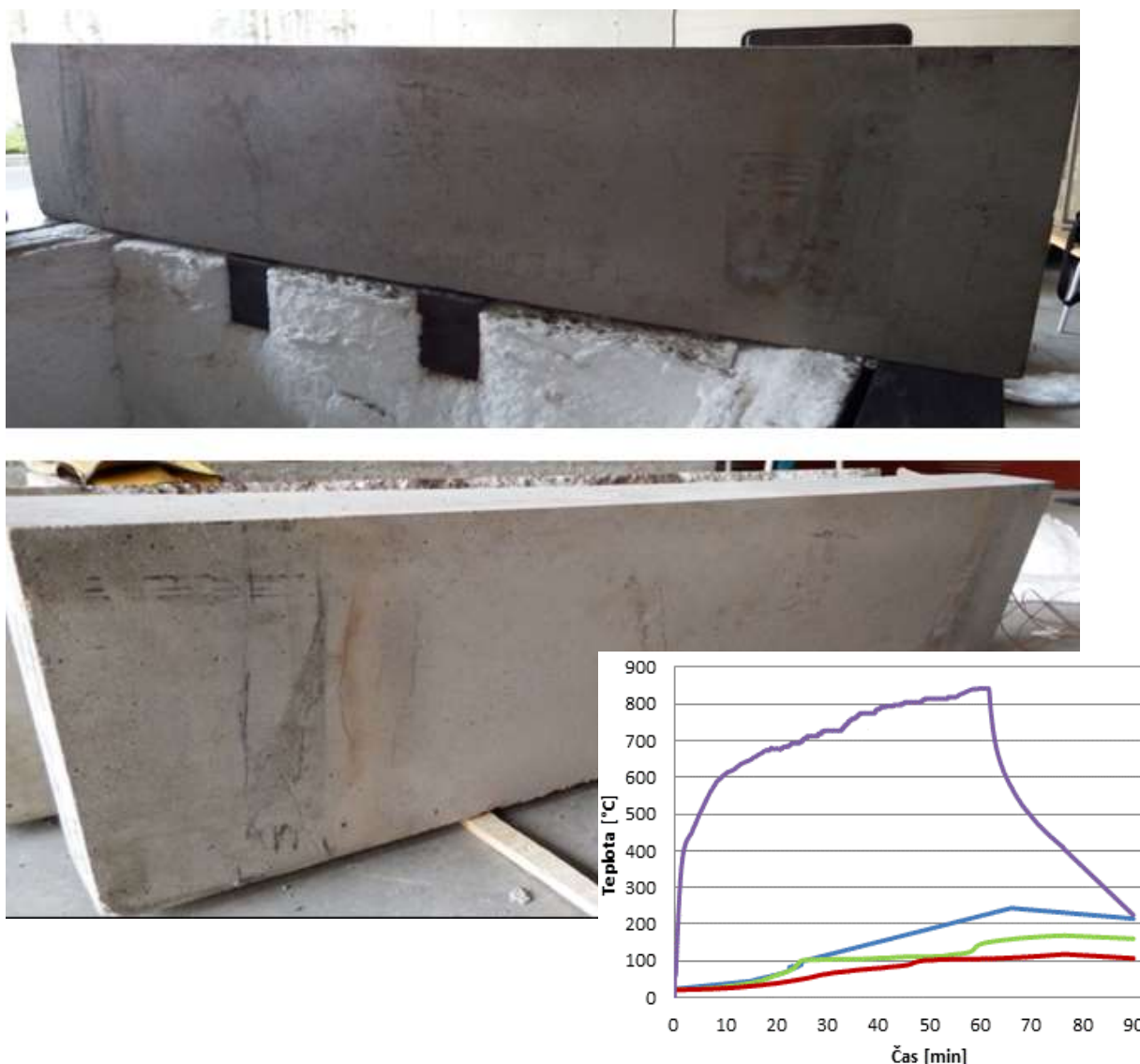
**Obr. 10-19 Odprýsknutí betonu na spodní zahřívání straně desky, beton R7-OL-I (cement CEM I 42,5 R Mokrý, kamenivo biotický granodiorit)**



**Obr. 10-20 Trhlina před celou tloušťku desky, beton R7-OL-I (cement CEM I 42,5 R, kamenivo biotický granodiorit)**

Záznam teploty byl v průběhu zkoušky přerušen, protože došlo k masivnímu odprýsknutí betonu a k odhalení termočlánků. Po 15 minutách od počátku zahřívání bylo zřetelně slyšet praskání betonu. Po 30 minutách zahřívání byl zaznamenán znatelný úbytek tloušťky betonové desky ve směru zahřívání povrchu. Byl viditelný únik vodní páry z betonu, na povrchu betonu vznikaly trhlinky. Po ukončení zkoušky byla celá spodní zahřívání plocha extrémně odprýskaná. Tloušťka (průřez desky) se ze 100 mm zmenšila na 50 až 25 mm. Došlo k odkrytí termočlánků zabetonovaných v betonu.

**R11-OL-I-F (cement CEM I 42,5 R, 1 kg PP vláken, kamenivo biotický granodiorit)**

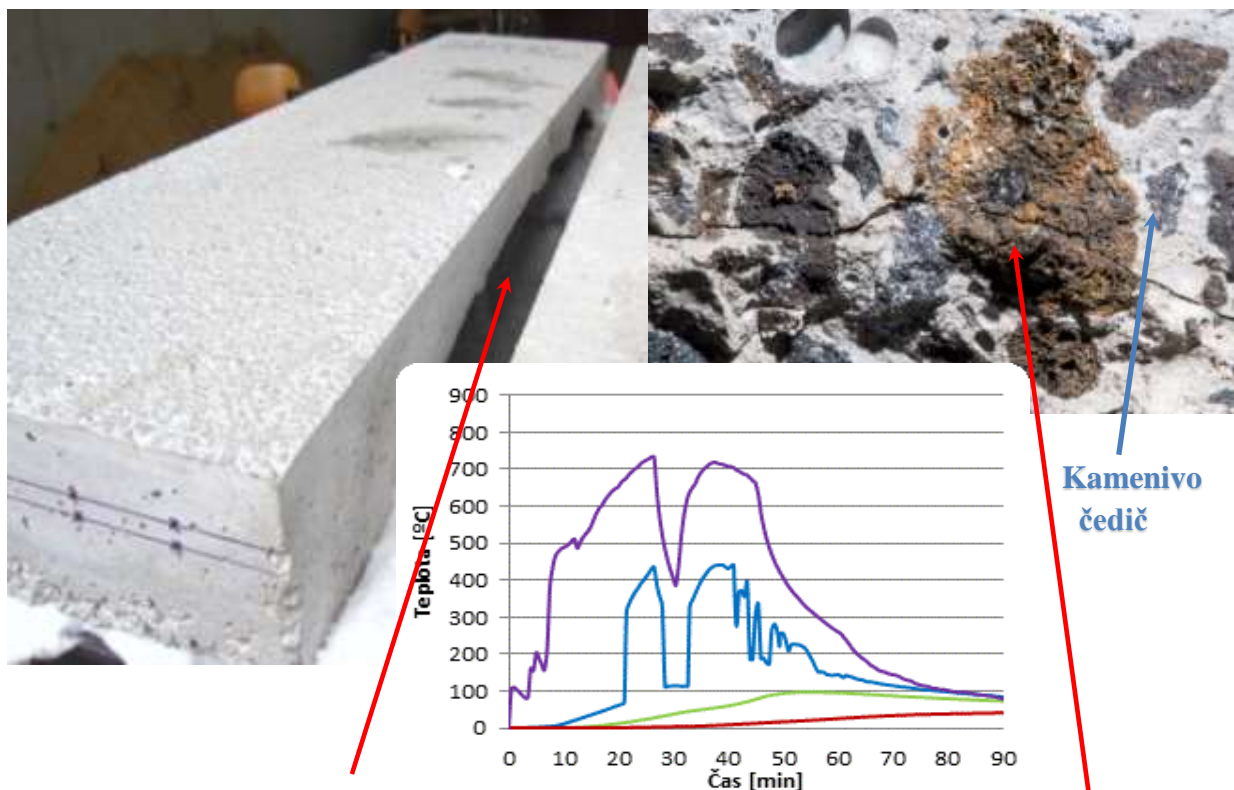


**Obr. 10-21 Neporušená deska z betonu R11-OL--F (CEM I 42,5 R, 1 kg PP vláken, kamenivo biotický granodiorit) po zatížení na 850 °C**

Deska z betonu R11-OL-I (cement CEM I 42,5 R, 1 kg PP vláken, kamenivo biotický granodiorit) odolávala bez porušení po celou dobu zatížení. V průběhu zahřívání se z desky odpařovala voda a vznikaly menší trhlinky na bocích desky a jejím povrchu. Po celou dobu zahřívání nebylo pozorováno odštěpování betonu. Po ukončení zkoušky byly na povrchu vzorku pouze vlasové trhlinky, bez odprýsknutí betonu. Přídavek 1kg/m<sup>3</sup> polypropylenových vláken pozitivně ovlivnil chování betonu při zvýšené teplotě (oproti betonu stejné receptury bez vláken nedošlo k porušení vzorku).



**Beton L-II (cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, lehké kamenivo Liapor)**



**Obr. 10-22 Úbytek průřezu desky beton L-II, odprýsknutí betonu na spodní zahříváné straně desky**

**Obr. 10-23 Trhlina v betonu L-II přes zrno lehkého kameniva Liapor**



**Obr. 10-24 Vzhled desky z betonu L-II (cement CEM II/B-S 32,5 R Prachovice, lehké kamenivo Liapor) po zatížení na 850 °C. Detail odprýsknutí betonu na zahříváné straně desky. Viditelná deformace desky – průhyb desky.**

Po 20 minutách od počátku zahřívání odprýskl ze spodní zahříváné strany desky kus betonu a došlo k odkrytí termočláčku zabetonovaného v hloubce 25 mm. Tomu odpovídá zaznamenaný nárůst teploty o cca 230 °C. Postupně se odštěpovaly menší části betonu po celou dobu zahřívání. Odprýskávání a uvolňování lehkého kameniva Liapor bylo doprovázeno charakteristickým hlasitým pukáním (pop-corn noise). Zvýšená vlhkost desky (9,5 %) zapříčinila porušení betonu. Při zahřívání a po ukončení zahřívání teploty na termočláncích v hloubce 25 mm, 50 mm a 75 mm narůstaly i klesaly pozvolně, a oproti

betonům s kamenivem biotický granodiorit a čedič byly v desce zaznamenány nižší teploty (do 200 °C). To koresponduje s nižší tepelnou vodivostí betonu L-II s lehkým kamenivem Liapor. Pro součinitel tepelné vodivosti pro kamenivo Liapor lze uvažovat  $\lambda = 0,12 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $\lambda$  pro kamenivo čedič je  $2,9 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ .

V průběhu zahřívání se tvořily vlasové trhlinky do šířky 0,12 mm. Trhlinkami v průběhu zahřívání unikala vodní pára. I po ukončení zkoušky byl dále pozorován odpar vody z povrchu betonu a začala se odlupovat cementová matrice na horní nezahřívané straně desky. Deska byla rozpraskaná na bočních stranách a trhliny se během chladnutí zvětšovaly až do šířky cca 0,15 mm. Trhliny se na porušené zahřívané spodní straně šířily jak v cementové matrici, tak v kamenivu. Lehké kamenivo Liapor změnilo na spodní zahřívané straně desky barvu na cihlově oranžovou. Celkový objem odprýsknutého betonu ze zkušební desky L-II byl  $3,5 \text{ dm}^3$  ( $3\,500 \text{ cm}^3$ ).

Kamenivo Liapor bylo pro výrobu zkušebních těles zvoleno z důvodu dobré stability při působení vysokých teplot (viz. provedené difraktogramy kameniva). Výsledky destrukce desek vyrobených z kameniva Liapor vedly k další analýze chování betonů s lehkým kamenivem Liapor a s kamenivem čedič s cílem sledovat změny ve struktuře betonů po působení vysokých teplot.

Pokud chceme sledovat ovlivnění vnitřní struktury betonu běžnými metodami, je možné připravit jádrové vývrty nebo řezy ze zkoumaného materiálu v různých vrstvách. Při přípravě vzorků může dojít k ovlivnění materiálu. Navíc s použitím tradičních metod je nemožné hodnotit změny u stejného vzorku v nezatíženém stavu a ve stavu po tepelné expozici. Proto byla pro kvantitativní a kvalitativní analýzu vnitřní struktury betonu použita rentgenová počítačová tomografie (v literatuře se užívá označení RTG CT nebo X-ray CT).

## **10.2 VYUŽITÍ POČÍTAČOVÉ MIKRO TOMOGRAFIE (MIKRO X-RAY CT) PRO ANALÝZU ZMĚN VE STRUKTUŘE BETONŮ PO PŮSOBENÍ VYSOKÝCH TEPLŮT**

Rentgenová výpočtová tomografie (RTG CT) je zobrazovací metoda pracující na principu prostupnosti rentgenového záření analyzovanými materiály s různými koeficienty útlumu rentgenového záření. Používá se radiografická technika skenování, při které se použije řada CT-projekcí (radiografický snímek) při různých úhlech s cílem umožnit výpočet CT-obrazu.

Hlavní výhodou této metody je především její nedestruktivnost v oblasti 3D vizualizace a prováděných analýz u studovaných materiálů. Kromě vizualizace vnitřní stavby materiálů je možné RTG CT využít pro provádění nedestruktivních kvalitativních i kvantitativních materiálových analýz 3D vnitřní stavby materiálů (jak v původním stavu, bez ovlivnění okolním prostředím, tak i po působení vnějších faktorů, např. teplota, mechanické zatěžování, časový faktor, působení kapalin apod.). S využitím RTG CR může být tedy prováděna např.:

- analýza pórového prostoru (určení vnitřní pórovitosti, distribuce a rozložení velikosti pórů),
- analýza a vizualizace porušení materiálů v závislosti na jejich vnitřní stavbě, i v souvislosti s definovaným působením vnějších sil, například při jejich zatěžování,
- analýza velikosti a distribuce jednotlivých složek analyzovaných materiálů,
- analýza defektů v materiálech apod.

### 10.2.1 Příprava zkušebních vzorků

Vzhledem k parametrům použitého RTG CT tomografu bylo pro získání optimálních výsledků třeba připravit vzorky betonů s menším maximálním zrnem kameniva, než bylo použito přímo při výrobě zkušebních desek. Sledování vnitřní struktury betonů pomocí rentgenové mikro počítačové tomografie (micro RTG CT) bylo provedeno na betonech s kamenivem čedič Bílčice a betonech s lehkým kamenivem Liapor (expandovaný jííl). Pro výrobu zkušebních vzorků byl použit cement CEM II/B-M 32,5 (S-LL) 32,5 R Českomoravský cement, a.s. – Mokrý a cement CEM I 42.54 R Českomoravský cement, a.s. – Mokrý.

Složení betonů je uvedeno v následující tabulce.

**Tabulka 10-7 Složení betonů s kamenivem čedič Bílčice na 1 m<sup>3</sup>**

Složka	BL-A	BL-B
Cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R Mokrý [kg]	350	--
Cement CEM I 42,5 R Českomoravský cement, a.s. – Mokrý [kg]	350	350
Kamenivo 0/4 mm čedič Bílčice [kg]	1070	1070
Kamenivo 4/8 mm čedič Bílčice [kg]	1050	1050
Voda [kg]	175	175
Plastifikátor Mapefluid N200 [l]	6,3	6,3

**Tabulka 10-8 Složení betonů s kamenivem čedič Bílčice a lehkým kamenivem Liapor na 1 m<sup>3</sup>**

Složka	L-A	L-B
Cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R Mokrý [kg]	375	--
Cement CEM I 42,5 R Mokrý [kg]	375	375
Kamenivo 0/4 mm čedič Bílčice [kg]	500	500
Kamenivo 0-4 mm /500 Liapor Lias Vintířov [m <sup>3</sup> ]	0,24	0,24
Kamenivo 4-8 mm /600 Liapor Lias Vintířov [m <sup>3</sup> ]	0,4	0,4
Voda [kg]	125	125
Plastifikátor Mapefluid N200 [l]	4,5	4,5

Byly vyrobeny trávce o rozměrech 400x100x100 mm, z těchto trávců byly vyřezány válečky průměru 22 mm a délky 400 mm pro RTG CT analýzu.

### 10.2.2 Parametry tomografického systému pro skenování vnitřní struktury betonových vzorků před a po tepelném zatížení

Pro studium změn ve struktuře vzorků vystavených tepelnému zatížení byl použit RTG CT tomograf Nikon Metrology XT H 225 s rotačním systémem skenování vybavený mikrofokálním zdrojem rentgenového záření, který generuje paprsky kónického tvaru. Parametry tomografického systému jsou uvedeny v následující tabulce.

**Tabulka 10-9 Parametry zařízení RTG CT tomograf XT H 225**

Maximální urychlovací napětí a výkon RTG zdroje (reflexní mód)	225kV / 225W
Maximální urychlovací napětí a výkon RTG zdroje (transmisní mód)	180kV / 20W
Minimální velikost RTG ohniska (reflexní / transmisní mód)	<3 $\mu\text{m}$ / <1 $\mu\text{m}$
Maximální hmotnost, průměr a výška skenovaných objektů	50 kg / approx. 0.5 m / 0.5 m
Maximální prozařitelná tloušťka analyzovaných materiálů	237 kg.m <sup>-2</sup>
Snímač RTG záření (16 bitová hloubka rozlišení)	Plošný detector (200 $\mu\text{m}$ na pixel, počet Px - 2000 x 2000)

Byl použit Software Inspect X pro skenování vzorků, software pro rekonstrukci tomografických objemů společnosti Nikon Metrology NV a společnosti Volume Graphic (VGStudio MAX s přídatnými moduly pro vlastní analýzu obrazu).

### 10.2.3 Metodika experimentu RTG CT analýzy betonů před a po tepelném zatížení

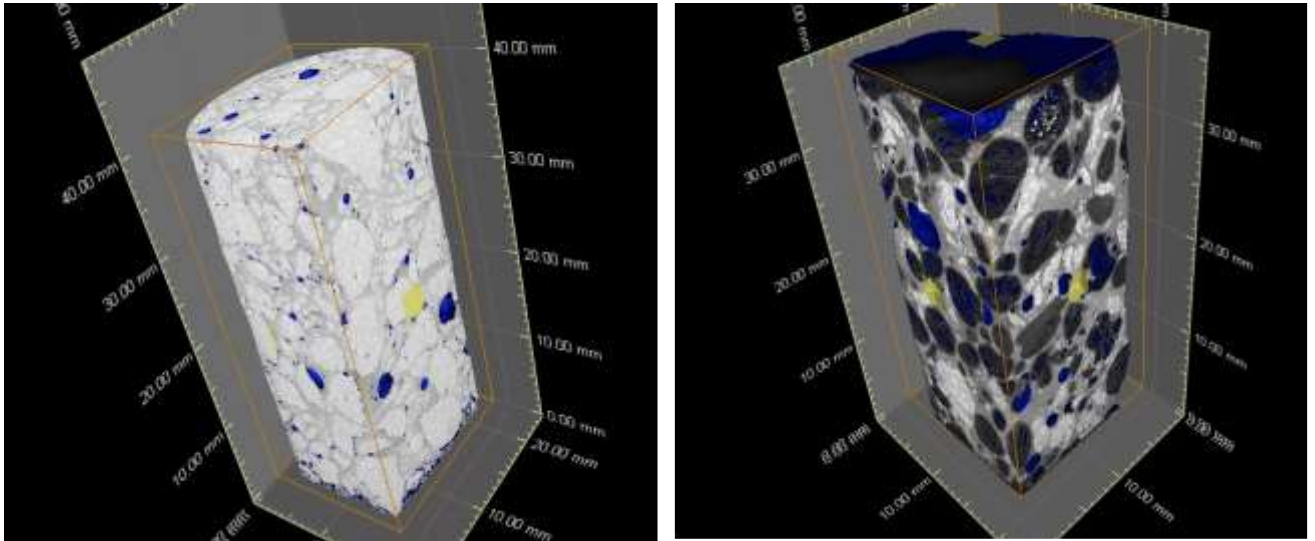
Před vystavením působení vysokých teplot byla skenována vnitřní struktura betonových válcových vzorků (22 mm průměr, 40 mm délka). Následně byly zkušební vzorky zahřívány na 600 °C a na 900 °C. Vzorky byly zahřívány v režimu 10 °C/min, na stanovené cílové teplotě (600 °C nebo 900 °C) byly udržovány po dobu 60 min. Poté byly vzorky pozvolna ochlazeny na teplotu 20 °C. Po ochlazení bylo provedeno skenování vzorků CT tomografií pro hodnocení vlivu působení vysoké teploty na celistvost vzorků a na změny ve vnitřní struktuře vzorků. S použitím softwaru VGStudio Max (Volume Graphics) byly jednotlivé rekonstruované CT objemy vizualizovány.

Velmi důležitým krokem pro získání relevantních dat pomocí RTG CT je nastavení parametrů počítačového tomografu. Pro dosažení maximální dostupné kvality zobrazení vzorků betonu byla provedena optimalizace nastavení rentgenového počítačového tomografu RTG CT. Vzhledem k velikosti analyzovaných vzorků byla velikost Voxelu (Vx) (základní jednotka pro zobrazení tomografického objemu) stanovena na 0,025 m.

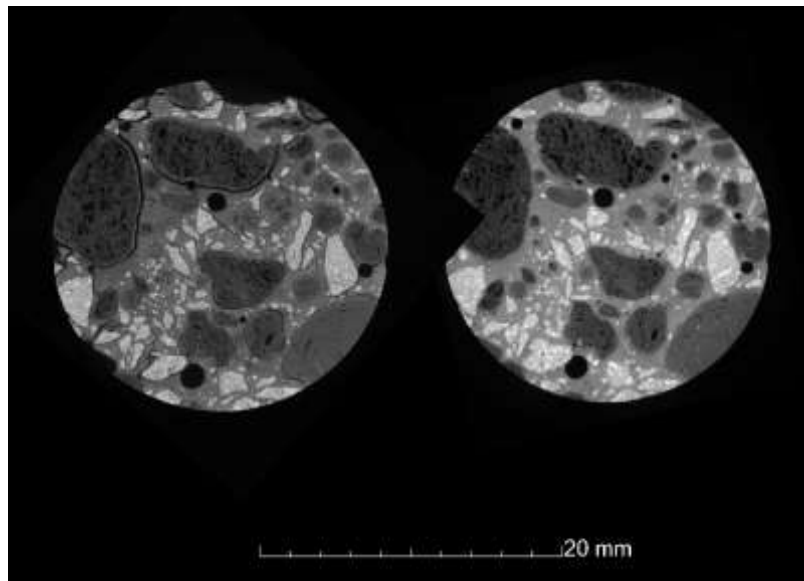
### 10.2.4 Vyhodnocení výsledků RTG CT betonů před a po tepelném zatížení

Zásadní bylo nastavení stejných pozic zkušebních vzorků před a po tepelném zatížení na 600 °C a 900 °C. Byly porovnány CT objemy zkušebních vzorků skenované před a po tepelné expozici v identických pozicích vzorků. Tímto bylo možné sledovat efekt působení vysokých teplot na stejných místech zkušebních vzorků.

Snímky z RTG CT jsou uvedeny na následujících obrázcích.



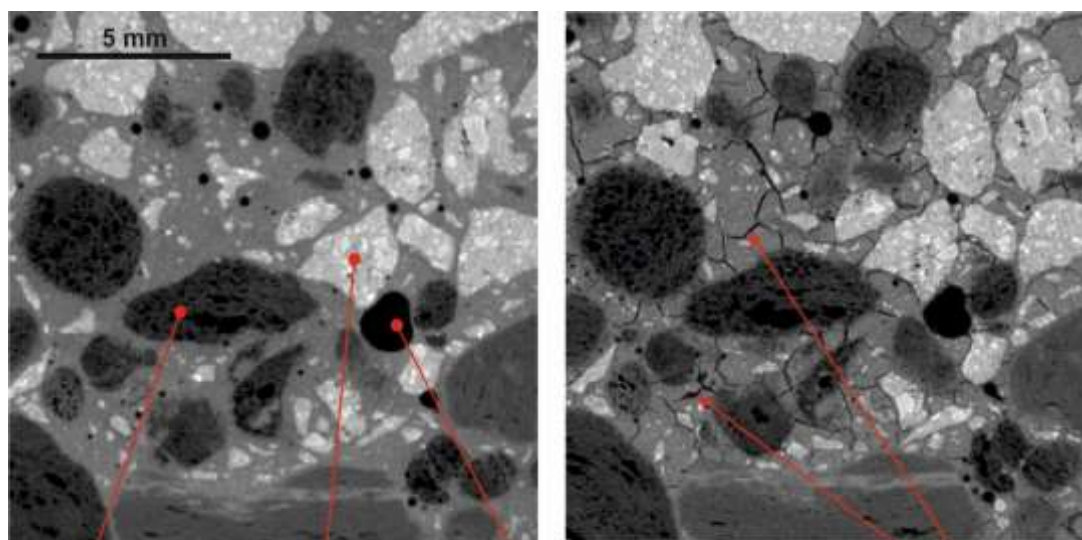
**Obr. 10-25 3D vizualizace vzorků s využitím RTG CT. Vzorky betonu s různým složením – jsou patrné rozdíly ve velikosti pórů (modré plochy) a různé kamenivo (bílá barva – kamenivo čedič, tmavá barva – lehké kamenivo Liapor z expandovaného jílu) [110]**



**Obr. 10-26 Vizualizace vzorků betonu pomocí RTG CT. Porovnání vzorku před tepelným zatížením (vpravo) a po působení teploty 900 °C (vlevo) [110]**

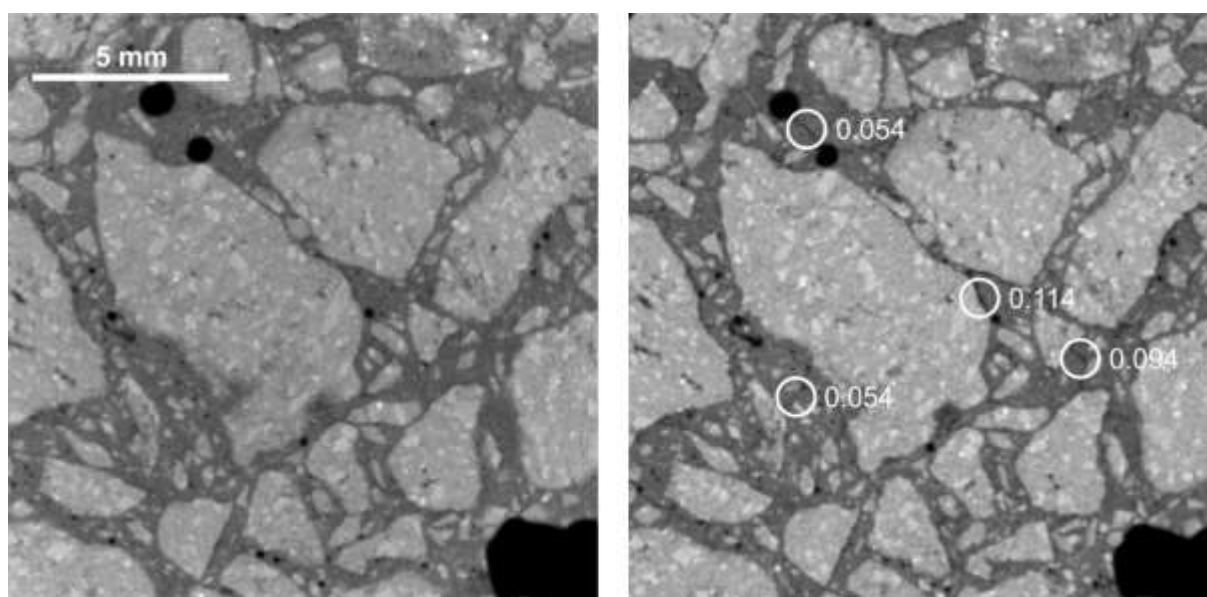
Odpovídající si CT objemy pořízené před a po tepelném zatížení byly vzájemně prostorově zorientovány vůči sobě tak, aby bylo možné současně porovnávat pozičně identické tomografické řezy. Na takto zorientovaných a vizualizovaných řezech bylo provedeno zhodnocení účinku tepelného zatížení. Příklad dvou shodných tomografických řezů vzorku před a po zahřátí na teplotu 900 °C ukazuje Obr. 10-26.



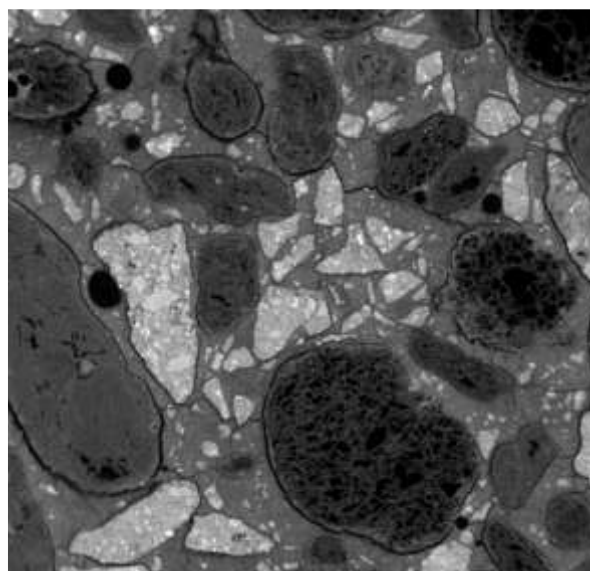
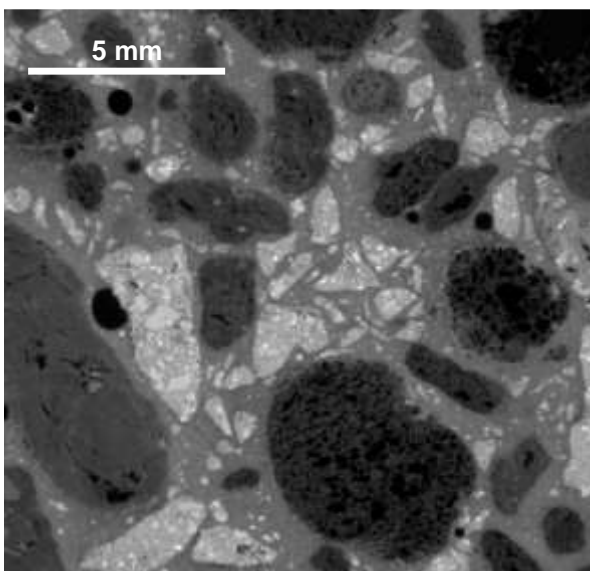


lehké kamenivo z expandovaného jílu      čedičové kamenivo      pór      trhliny v cementové matrici

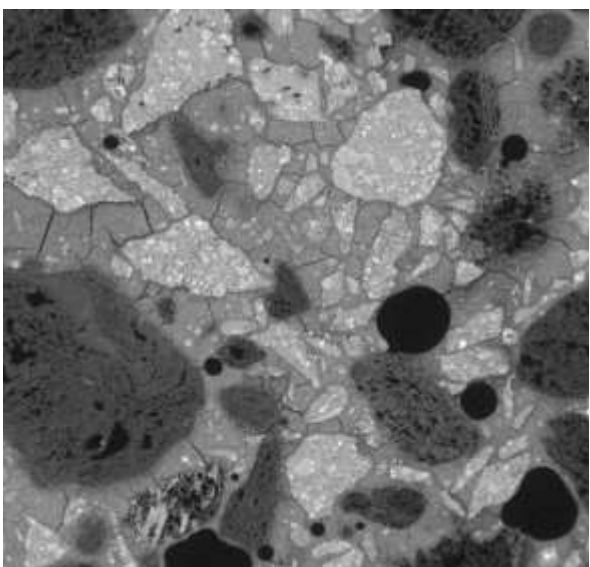
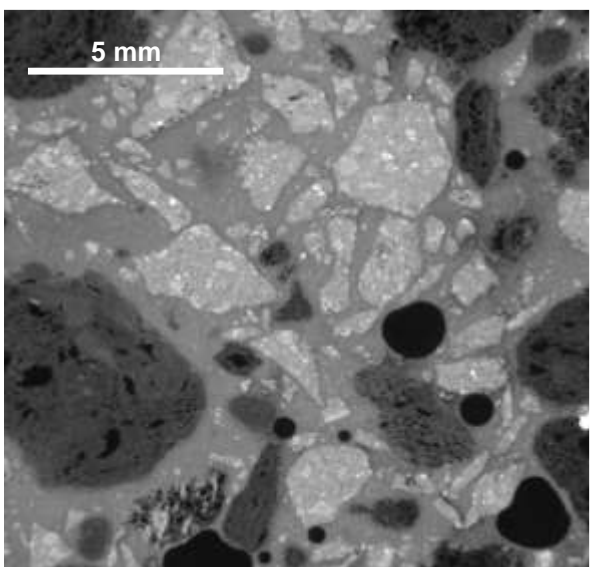
**Obr. 10-27** Změny ve vnitřní struktuře betonu před a po tepelném zatížení (vlevo – beton před tepelným zatížením, vpravo – beton po tepelném zatížení na 900 °C) [110]



**Obr. 10-28** Beton s Portlandským směsným cementem s vápencem CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R a s čedičovým kamenivem před (vlevo) a po tepelném zatížení na 900 °C (obr. vpravo). Rozměry označených trhlin jsou v milimetrech. [110]

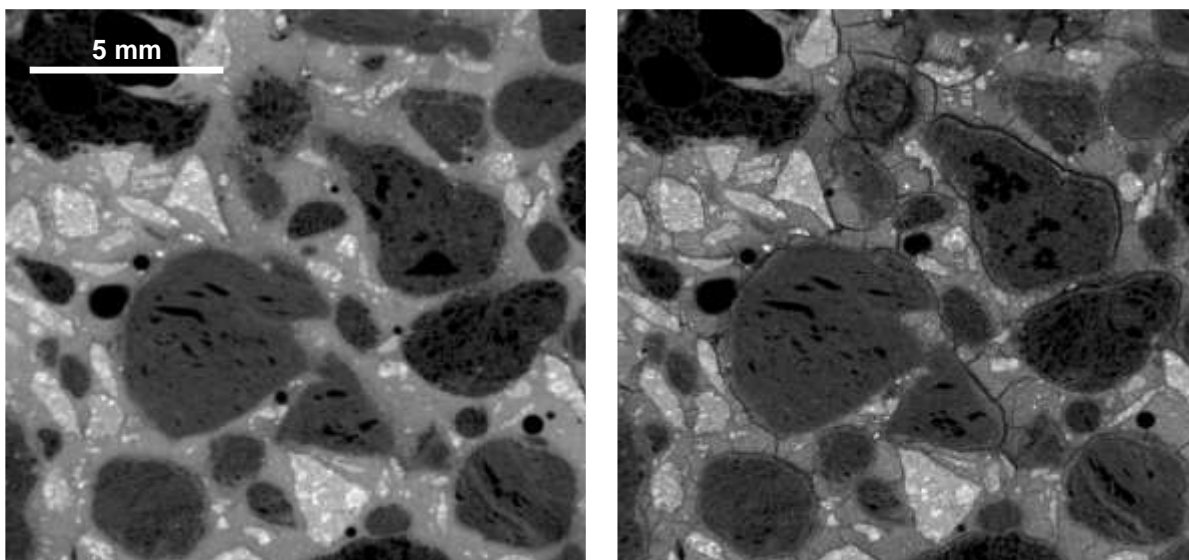


**Obr. 10-29 Beton s Portlandským směsným cementem s vápencem CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, čedičovým kamenivem a lehkým kamenivem z expandovaného jílu před (vlevo) a po tepelném zatížení na 900 °C (vpravo). [110]**



**Obr. 10-30 Beton s Portlandským cementem CEM I 42,5 R, čedičovým kamenivem a lehkým kamenivem z expandovaného jílu před (vlevo) a po tepelném zatížení na 600 °C (vpravo). [110]**





**Obr. 10-31 Beton s Portlandským cementem CEM I 42,5 R, čedičovým kamenivem a lehkým kamenivem z expandovaného jílu před (vlevo) a po tepelném zatížení na 900 °C (vpravo). [110]**

Výsledky hodnocení změn vnitřní struktury pomocí rentgenové počítačové tomografie (RTG CT) lze shrnout do následujících bodů:

- Podle předpokladu vyšší teplota zatěžování vzorků (900 °C) způsobila větší poškození vnitřní struktury než nižší zkoumaná teplota (600 °C). Došlo k většímu rozpraskání cementové matrice a vzniklé trhliny byly širší.
- Separáčnické trhliny kolem lehkého kameniva Liapor z expandovaného jílu se objevovaly až při teplotě 900 °C. Při teplotě 600 °C žádný ze vzorků nevykazoval trhliny podél kameniva (viz. Obr. 10-30).
- Betony s Portlandským směsným cementem s vápencem a s čedičovým kamenivem vykazovaly nejlepší odolnost vůči vysokým teplotám. Vzorky vystavené působení 900 °C vykazovaly pouze málo separáčnických trhlin podél zrn kameniva (viz. Obr. 10-28), zejména vzhledem k dobré tepelné stabilitě kameniva čedič.

Vzorky betonu s čedičem a s kamenivem z expandovaného jílu byly po tepelném zatěžování mnohem více porušeny než vzorky betonů, které obsahovaly pouze čedičové kamenivo. Větší porušení vnitřní struktury betonů s lehkým kamenivem z expandovaného jílu bylo způsobeno vodní párou unikající z lehkého kameniva při zahřátí betonu. Před použitím do betonu bylo lehké kamenivo nasycené vodou, aby neodjímalo vodu při výrobě betonu. Voda se následně při zahřátí betonu uvolňovala z kameniva ve formě vodní páry. Tímto procesem byla degradována vysoká tepelná stabilita samotného lehkého kameniva Liapor, které bylo při výrobě vypáleno na teplotu 1 150°C. Snížit obsah vody v lehkém pórovitém kamenivu a tím následně zamezit porušení cementové matrice betonu lze vhodně zvoleným způsobem výroby betonu, například ovlhčením kameniva, zamícháním složek betonu a rychlým uložením do forem.

Pokud studujeme odolnost betonu vůči působení vysokých teplot, je třeba sledovat celou finální strukturu betonu. Přesto, že jednotlivé složky betonu jsou odolné vůči působení vysokých teplot a vykazují minimální změny při tepelném zatížení, je nutné zohlednit jejich vzájemnou interakci.

### 10.3 SHRUTÍ A DISKUSE VÝSLEDKŮ VLASTNOSTÍ BETONŮ PŘED A PO TEPELNÉM ZATÍŽENÍ

Pro rozpojování vysokorychlostními vodními paprsky byly připraveny betony s hutným kamenivem a s lehkým kamenivem z expandovaného jílu Liapor. Třída konzistence pro betony s hutným kamenivem byla S4, pro beton s kamenivem Liapor třída konzistence S2. Byly hodnoceny změny objemových hmotností, změny pevnosti v tlaku, výskyt trhlin a explosivního odštěpování betonu po vystavení teplotám do 850 °C. Nejvyšší hodnota pevnosti v tlaku (82,4 MPa) byla dosažena u receptury R1 (CEM I 42,5 R, kamenivo čedič). Nejmenší pevnost v tlaku byla u betonu L-II s lehkým kamenivem Liapor (30,2 MPa). Nejvyšší pokles pevnosti v tlaku po tepelném zatížení byl zjištěn u receptury R7-OL-I s cementem CEM I 42,5 R, referenční (pokles o 57,1 %). Nejmenší pokles pevnosti v tlaku byl zaznamenán u betonu R2-BL-I-F - CEM I 42,5 R – 1kg PP vláken, kamenivo čedič, pokles pevnosti v tlaku na 65,4 %. Největší pokles objemové hmotnosti byl u betonu s lehkým kamenivem Liapor, na 83,3 %.

Při zahřívání desek bylo zaznamenáno explosivní odštěpování betonu doprovázené hlasitým praskáním. Explosivní odštěpování bylo zaznamenáno cca od 15 minuty zahřívání desek (dosažená teplota v peci 650 °C). Odprýsknutí povrchu betonu bylo zaznamenáno u desek s kamenivem biotický granodiorit a s lehkým kamenivem Liapor. Menší odprýsknutí bylo zaznamenáno i u desek s kamenivem čedič. Při zahřívání zkušebních teles menších rozměrů (krychlí 150x150x150 mm) nebylo odštěpování betonu s kamenivem čedič zaznamenáno.

Desky bez přídavku polypropylenových vláken vykazovaly větší explosivní odštěpování než desky s 1 kg polypropylenových vláken. U betonu bez přídavku PP vláken, beton R7-OL-I CEM I 42,5 R Mokrý, kamenivo biotický granodiorit Olbramovice, došlo k masivnímu odprýsknutí betonu. U betonu R11-OL-I-F CEM I 42,5 R Mokrý, kamenivo biotický granodiorit Olbramovice, přídavek 1 kg PP vláken zcela zamezil odštěpování betonu. Pára odcházela vytvořenými póry a kanálky vzniklými roztavením PP vláken. Pozitivní efekt přídavku PP vláken byl zaznamenán i u betonu R2-BL-I-F s kamenivem čedič, který vykazoval menší porušení povrchu betonu trhlinkami oproti betonu R1-BL-L bez vláken.

Přídavek polypropylenových vláken ovlivnil vlastnosti betonů (pevnost tlaku, objemovou hmotnost) a ovlivnil chování betonů vůči zvýšené teplotě. Betony bez přídavku PP vláken vykazovaly výrazně odlišné chování při tepelném zatížení oproti betonům s vlákny. Při dávce 1 kg/m<sup>3</sup> PP vláken došlo k menším poklesům pevností a objemových hmotností, menšímu porušení povrchu a menšímu explosivní odštěpování. Tento efekt se projevil jak u betonů s kamenivem čedič, tak u betonů s kamenivem granodiorit. Polypropylenová vlákna se při působení teploty taví (melting point vláken PB EUROFIBER HPR je v rozmezí 147 – 150 °C [90]). Vlákna při zahřívání betonu ve struktuře betonu vytvoří póry, tím dojde ke zvýšení propustnosti betonu pro únik vodní páry a beton je více odolný vůči explosivnímu odprýskávání.

RTG difrakční analýzou byly sledovány mineralogické změny před a po tepelném zatížení betonů, cementů a kameniv. Kamenivo čedič Bílčice a lehké kamenivo Liapor z expandovaného jílu odolává vysokým teplotám. RTG difrakční analýzou bylo zjištěno stabilní chování bez úbytku základních minerálů. Kamenivo biotický granodiorit Olbramovice vykazovalo změny již při teplotách přesahujících 500 °C (viz. Kapitola 9.2).

Změny ve struktuře betonu byly sledovány pomocí počítačové tomografie. U betonů s lehkým kamenivem Liapor bylo zaznamenáno větší množství trhlinek v cementové matici a vyskytovaly se separační trhliny kolem zrn kameniva. Nebylo ale zaznamenáno výrazné porušení vzorků nebo destrukce. Vzorky zkoumané pomocí počítačového tomografu byly malých rozměrů (válečky průměru 22 mm a délky 400 mm), proto se neprojevil výrazně destrukční účinek vodní páry unikající z betonu při zahřívání těles.

Hlavní příčinou explozivního odprýskávání u desek s lehkým kamenivem Liapor byla vysoká vlhkost betonu při provádění zkoušky (9,5 %). Před výrobou betonu byla zrna lehkého kameniva Liapor nasáknutá vodou, aby neodjímala vodu při míchání betonu. Zrna lehkého kameniva Liapor v sobě zadržovala velké množství vody i v době tepelného zatěžování betonu (po 90 dnech uložení v laboratorním prostředí). Odpařování vody a přeměna vody z kapalného skupenství ve vodní páru způsobily explozivní odprýskávání betonu. Výsledky získané při tepelném zatěžování betonu s kamenivem Liapor jsou velmi důležité. Prokázalo se, že technologie výroby betonu s lehkým kamenivem má rozhodující vliv na odolnost betonu vůči působení vysokých teplot. Při zkouškách realizovaných na betonových zkušebních tělesech, kdy při výrobě betonu bylo použito ovlhčené kamenivo Liapor (ne po nasáknutí vodou), bylo dosaženo dobré odolnosti betonu při zatěžování dle teplotní křivky ISO 864 [111], [112].

#### **10.4 ROZPOJOVÁNÍ BETONOVÝCH DESEK PO TEPELNÉM ZATÍŽENÍ VYSOKORYCHLOSTNÍMI VODNÍMI PAPSKY**

Pro přiblížení reálnému procesu odstraňování degradované vrstvy betonu při sanacích konstrukcí bylo rozpojování betonu provedeno rotačním vysokorychlostním vodním paprskem. Byla použita rotační hlavice Barracuda se dvěma tryskami StoneAge Attack Tip o průměru 0,66 mm. Tlak vody byl od 75 MPa do 150 MPa. Rychlost pohybu paprsku nad zkušebními vzorky byla od 0,6 m.min<sup>-1</sup> do 3 m.min<sup>-1</sup>. Vzdálenost řezné hlavice Barracuda od povrchu vzorku byla 50 mm.

Otryskané plochy betonu byly skenovány pulzním laserovým skenerem Leica ScanStation C10 a byl určen objem rozpojeného betonu. Leica ScanStation C10 je pulzní 3D laserový skener s laserovým paprskem na dlouhé vzdálenosti (až 300 m). Zařízení poskytuje měření s vysokou přesností při vysoké rychlosti skenování (až 50 000 bodů/s). Každá betonová deska byla naskenovaná ve vysokém rozlišení 2 mm/10 m ze vzdálenosti 1 m. Údaje byly zpracovány pomocí softwaru Leica Cyclone a CloudCompare. Výpočet rozpojeného objemu betonu byl proveden pomocí softwaru Surfer (Golden Software). Rozpojený objem  $V$  betonu byl vyjádřen jako množství odstraněného betonu v cm<sup>3</sup> z plochy 1 cm<sup>2</sup> betonu [cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>]. Definování rozpojeného objemu vzhledem k ploše otryskaného betonu je výhodné pro predikci množství správkových materiálů pro následnou sanaci betonové konstrukce. Rozpojování tepelně zatížených vzorků vodními paprsky a stanovení rozpojeného objemu betonu skenováním povrchu bylo provedeno na pracovišti AV ČR, v.v.i., Ústav geoniky, Ostrava.

##### **10.4.1 Výsledky a diskuse rozpojování betonových desek po tepelném zatížení vysokorychlostními vodními paprsky**

Výsledky rozpojování betonů před a po tepelném zatížení jsou uvedeny v Tabulce 10-10.

Provedené experimenty prokázaly, že vrstvy betonu poškozené v důsledku tepelného namáhání jsou méně odolné proti pronikání vysokorychlostního vodního paprsku než vrstvy betonu nedegradované, referenční.

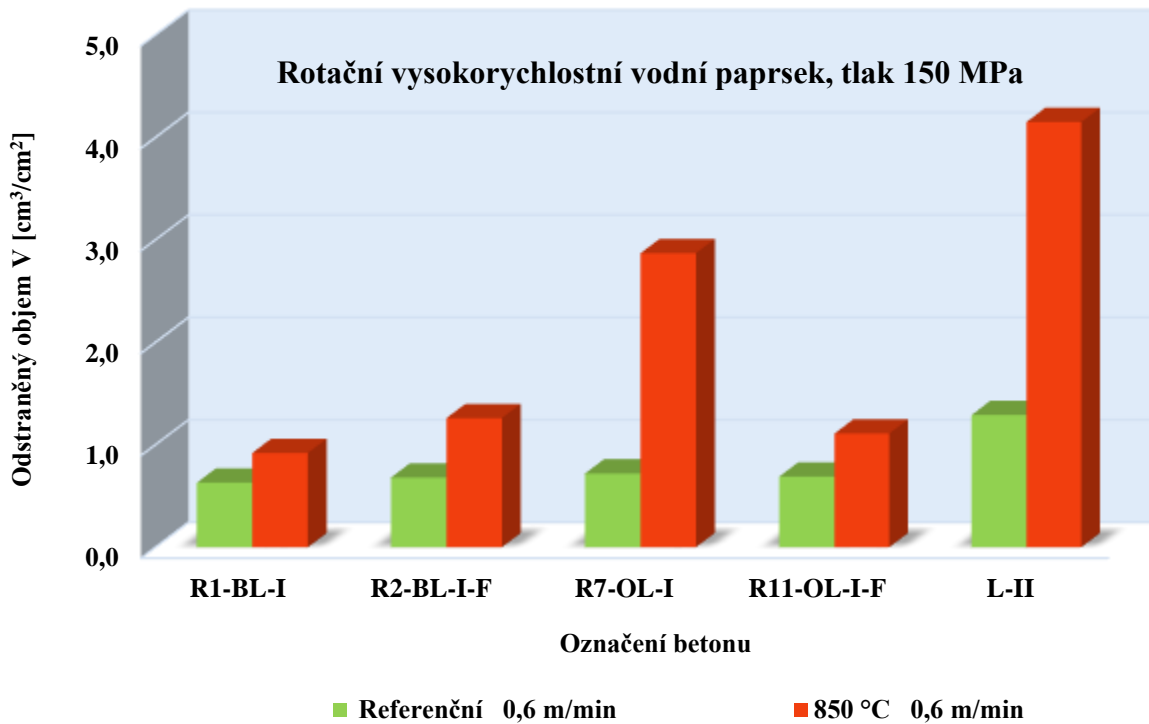
**Tabulka 10-10 Odstraněný objem betonu před a po tepelném zatížení, rotační vysokorychlostní vodní paprsek, tlak 150 MPa**

Beton	Rotační kontinuální vysokorychlostní vodní paprsek, tlak 150 MPa			
	Rychlost řezání 0,6 m/min		Rychlost řezání 1,8 m/min	
	Odstraněný objem $V_d$ [cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> ] referenční	Odstraněný objem $V_d$ [cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> ] 850 °C	Odstraněný objem $V_d$ [cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> ] referenční	Odstraněný objem $V_d$ [cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> ] 850 °C
R1-BL-I	0,63	0,92	0,45	0,58
R2-BL-I-F	0,68	1,26	0,33	0,64
R7-OL-I	0,72	2,87	0,32	2,07
R11-OL-I-F	0,69	1,11	0,41	0,52
L-II	1,29	4,15	0,8	4,17

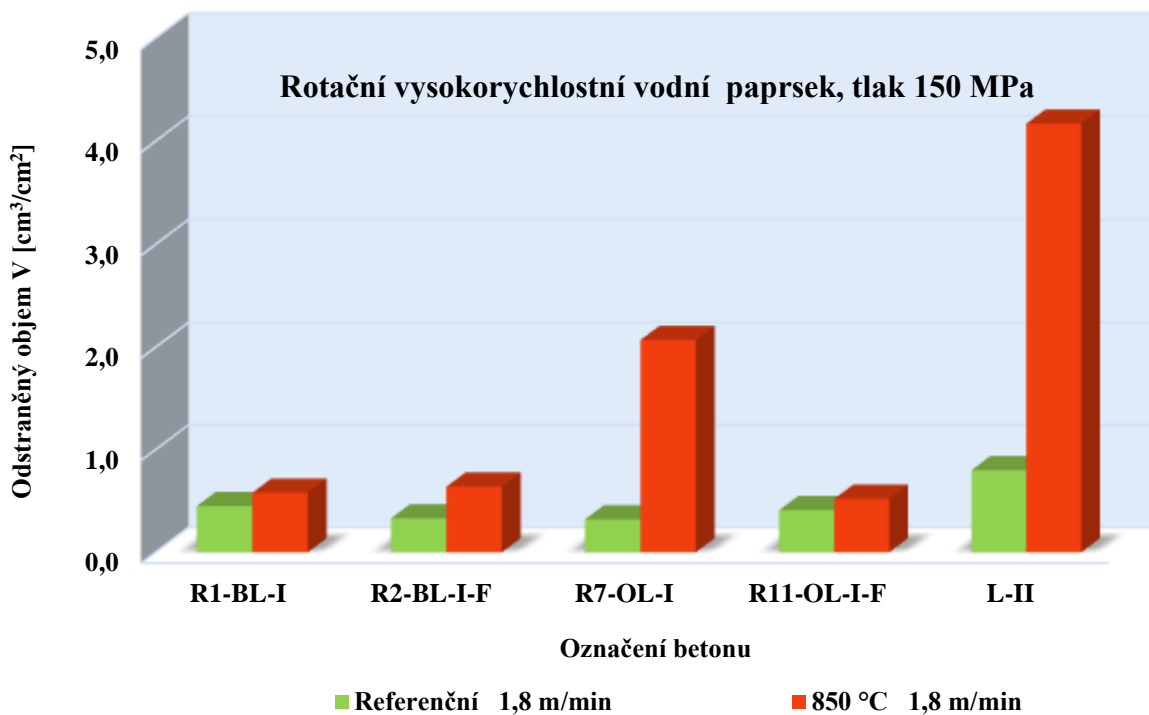
Při rozpojování tepelně nezatížených betonů byl odstraněný objem u betonů s hutným kamenivem (čedič a granodiorit) srovnatelný, betony s kamenivem čedič (R1-BL-I a R2-BL-II), betony s granodiorit (R7-OL-1 a R-11-1-F) viz. Obr. 10-32 a 10-33. Pevnost těchto betonů v tlaku byla v intervalu 67,6 až 82,4 MPa.

U tepelně neovlivněného betonu s lehkým kamenivem Liapor (L- II) bylo vyšší množství odstraněného objemu betonu ovlivněno nižší pevností betonu v tlaku (30,2 MPa před tepelném zatížením, 15,4 MPa po působení teploty 850 °C) a nižší pevností lehkého kameniva Liapor v tlaku (od 0,7 do 10 MPa stlačením ve válci dle sypané hmotnosti kameniva [99]). Pevnost horniny čedič je v intervalu 180- 400 MPa, pevnost horniny granodiorit v intervalu 80 – 240 MPa [113]. Po tepelném zatížení byla struktura betonu s lehkým kamenivem L-II narušena trhlinkami, došlo k odštěpování betonu a byl zaznamenán nejvyšší objem rozpojeného betonu.

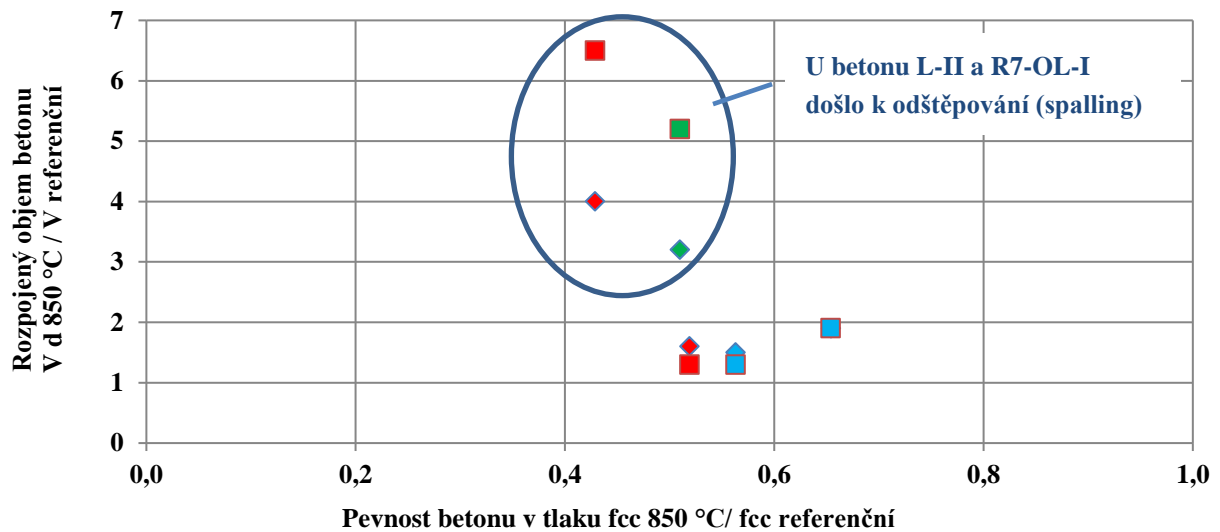
Nebyla prokázána korelace míry změny rozpojeného objemu betonu na pevnostech betonu v tlaku po tepelném zatížení (viz. Obr. 10-34). Lze ale sledovat vliv porušení vnitřní struktury betonu na objem rozpojeného betonu po tepelném zatížení. Betony s hutným kamenivem čedič R1-BL-I a R2-BL-F (v grafu na Obr. 10-34 označeny modře) a beton s kamenivem granodiorit (v grafu na obr. 10-34 označen červeně), u kterých nedošlo k porušení povrchu odštěpováním, dosáhly po tepelném zatížení srovnatelným objemů rozpojeného betonu. Beton R11-OL-I-F s kamenivem granodiorit, bez přídavku PP vláken, u kterého nastalo masivní odštěpování, dosáhl cca dvojnásobného rozpojeného betonu ve srovnání s betony s hutným kamenivem, u kterých nenastalo odštěpování. Beton s lehkým kamenivem Liapor je v grafu na obr. 10-34 označen zeleně.



Obr. 10-32 Vliv tepelného zatížení na objem odstraněného betonu, rotační vysokorychlostní vodní paprsek, tlak 150 MPa, rychlost řezání 0,6 m/min



Obr. 10-33 Vliv tepelného zatížení na objem odstraněného betonu, rotační vysokorychlostní vodní paprsek, tlak 150 MPa, rychlost řezání 1,8 m/min



**Obr. 10-34** Změna rozpojeného objemu a změna pevnosti betonu v tlaku po tepelném zatížení. Červené body – beton s kamenivem granodiorit, zelené body – beton s lehkým kamenivem Liapor, modré body – beton s kamenivem čedič.

Rotační vysokorychlostní vodní paprsek, rychlost řezání □ 0,6 m/min, ◇ 1,8 m/min, tlak 150 MPa.

Z hlediska parametrů technologie vysokorychlostního vodního paprsku výsledky ukazují stejný trend pozorovaný v předchozích experimentech: při použití vyššího tlaku vody a při pomalejším pohybu trysky nad otryskávaným povrchem betonu roste objem odstraněného betonu bez ohledu na to, zda je beton ovlivněn vysokou teplotu nebo se jedná o nedegradovaný beton.

Tabulka 10-11 ukazuje nárůst rozpojeného objemu betonů po tepelném zatížení oproti tepelně neovlivněným betonům. V tabulce jsou uvedeny výsledky pro rychlost řezání 0,6 m/min a 1,8 m/min. Struktura betonů, u kterých došlo k explosivnímu odprýsknutí (R2-OL-I a L-II), byla natolik narušená, že byl zaznamenán výrazný přírůstek odstraněného objemu betonu i při vyšší rychlosti řezání.

Ukázky vytvořených drážek jsou zaznamenány na fotografiích na Obr. 10-35.

Po otryskání povrchů vodním paprskem nebyly zaznamenány trhliny, které by byly způsobeny kontaktem vodního paprsku s betonem. Nesoudržný materiál byl vodním paprskem odstraněn, povrch betonu byl po otryskání kompaktní, bez nesoudržných míst.

Dobře patrná je změna barvy kameniva biotický granodiorit, která je způsobena změnami v kamenivu po tepelném zatížení (deska R7-OL-I). Kamenivo čedič nevykazovalo změny barvy (deska R1-BL-I). Tato pozorování koresponduje se záznamy na RTG difraktogramu kameniv (viz. Kap. 9.2.2, obr. 9-2, 9-3 a 9-4).

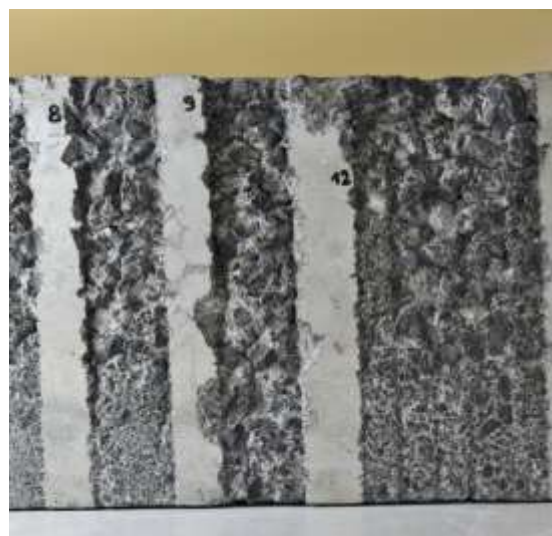


**Tabulka 10-11 Poměr odstraněného objemu u vzorků po tepelném zatížení a nezatížených, při různých rychlostech řezání, rotační vysokorychlostní vodní paprsek, tlak 150 MPa**

Označení betonu	$V_{850^{\circ}\text{C}}/V_{\text{referenční}}$ Rychlost řezání $0,6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	$V_{850^{\circ}\text{C}}/V_{\text{referenční}}$ Rychlost řezání $1,8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
R1-BL-I - CEM I 42,5 R Mokrý, čedič	1,5	1,3
R2-BL-I-F - CEM I 42,5 R Mokrý, 1kg PP, čedič	1,9	1,9
R7-OL-I - CEM I 42,5 R Mokrý, biotický granodiorit Olbramovice	4,0	6,5
R11-OL-I-F-CEM I Mokrý, 1 kg PP, biotický granodiorit Olbramovice	1,6	1,3
L-II CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R Mokrý, Liapor	3,2	5,2



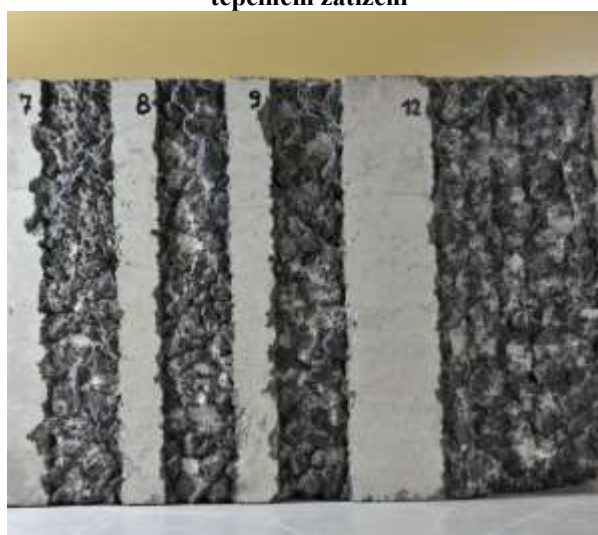
R1-BL-I - CEM I 42,5 R (Mokrý), čedič, referenční



R1-BL-I - CEM I 42,5 R (Mokrý), čedič, po zatížení po tepelném zatížení



R2-BL-I-F - CEM I 42,5 R (Mokrý), 1kg PP, čedič, referenční



R2-BL-I-F - CEM I 42,5 R (Mokrý), 1kg PP, čedič, po tepelném zatížení

**Obr. 10-35 a Drážky v betonech vytvořené rotačním vysokorychlostním paprskem. Výška betonových desek 30 cm.**



**R7-OL-I - CEM I 42,5 R  
(Mokrý), biotický granodiorit,  
referenční**



**R7-OL-I - CEM I 42,5 R (Mokrý), biotický granodiorit,  
po tepelném zatížení**



**R11-OL-I-F-CEM I (Mokrý), 1 kg PP,  
biotický granodiorit, referenční**



**R11-OL-I-F-CEM I (Mokrý), 1 kg PP,  
biotický granodiorit, po tepelném zatížení**

**Obr. 10-35 b Drážky v betonech vytvořené rotačním vysokorychlostním paprskem.  
Výška betonových desek 30 cm.**



L-II CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R (Mokrý),  
lehké kamenivo Liapor, referenční



L-II CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R (Mokrý),  
lehké kamenivo Liapor, po tepelném  
zatížení

**Obr. 10-35 c** Drážky v betonech vytvořené rotačním vysokorychlostním paprskem. Výška betonových desek 30 cm. Identifikace vytvořených drážek:

- 3 - tlak vody 100 MPa, rychlost řezání 10 m.min<sup>-1</sup>
- 4 - tlak vody 125 MPa, rychlost řezání 20 m.min<sup>-1</sup>,
- 5 - tlak vody 150 MPa, rychlost řezání 30 m.min<sup>-1</sup>
- 6 - tlak vody 150 MPa, rychlost řezání 50 m.min<sup>-1</sup>
- 7 - tlak vody 150 MPa, rychlost řezání 50 m.min<sup>-1</sup>
- 8 - tlak vody 150 MPa, rychlost řezání 30 m.min<sup>-1</sup>,
- 9 - tlak vody 150 MPa, rychlost řezání 30 m.min<sup>-1</sup>
- 10 - tlak vody 150 MPa, rychlost řezání 10 m.min<sup>-1</sup>,
- 12 - tlak vody 150 MPa, rychlost řezání 50 m.min<sup>-1</sup>, vícenásobný průchod paprsku
- 14 - tlak vody 150 MPa, rychlost řezání 50 m.min<sup>-1</sup>, vícenásobný průchod paprsku

## 10.5 SHRNU TÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Z výsledků rozpojování tepelně ovlivněných betonů vysokorychlostním vodním paprskem vyplývá, že čím vyšší teplotou je beton ovlivněn, tím lépe vysokorychlostní vodní paprsky rozpojují povrchové vrstvy betonu a pronikají do větších hloubek z důvodu narušené struktury betonu a jeho nižší pevnosti. Při rozpojování betonů po působení vysokých teplot bylo dosaženo vysoké účinnosti i s použitím plochého vodního paprsku bez pulzací, který na betonech nenarušených dosahuje pouze malé účinnosti.

Vyšší pracovní tlak vody a nižší rychlost pohybu trysky nad ošetřovaným povrchem způsobují odstranění většího množství betonu.

Účinnost vysokorychlostních vodních paprsků při odstraňování vrstev betonů narušených vysokou teplotou lze podstatně zvýšit zavedením vysokofrekvenčních pulzací do paprsku. Pulzující paprsek proniká do větších hloubek a při vhodném nastavení parametrů je schopen odstranit větší množství betonu než paprsek kontinuální.

Získané výsledky mohou sloužit pro nastavení parametrů vodního paprsku pro odstraňování poškozených vrstev betonu vlivem působení vysoké teploty, například po požáru konstrukce.

Na základě provedených experimentů se ukázalo, že výrazný vliv na množství rozpuštěného materiálu má porušení betonu. Pokud chceme ovlivnění vnitřní struktury materiálu, musíme vytvořit řezy ve zkoumaném materiálu v různých vrstvách. Při přípravě vzorků může dojít k ovlivnění materiálu. Z tohoto důvodu byla pro pozorování změn ve struktuře betonu ověřována možnost využití rentgenové počítačové tomografie. Ukázalo se, že metodu rentgenové počítačové tomografie lze úspěšně aplikovat při analýze vnitřního poškození betonových vzorků. Unikátní při použití počítačové tomografie je možnost vzájemně porovnat stejný vzorek před a po tepelnou expozici, aniž by došlo k destrukci analyzovaného vzorku, a tak sledovat změny v definovaných oblastech vzorku. Výsledky porušení vnitřní struktury betonů po působení vysokých teplot zjištěné pomocí počítačové tomografie RTG CT korespondují s výsledky změn pevností betonů a odolnosti betonů proti průniku vodního paprsku.



## 11 ZÁVĚR

Při výzkumu účinku vysokorychlostních vodních paprsků na beton a hodnocení jejich efektivity byla vytvořena dlouhodobá spolupráce výzkumných institucí (Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, AV ČR, v. v. i., Ústav geoniky, Ostrava a Vysoká škola báňská – Technická universita Ostrava) a firem, které se zabývají vývojem zařízení pro technologii VVP a použitím této technologie v praxi pro dělení různých typů materiálů a pro rozpojování betonu.

Problematika použití vysokorychlostních vodních paprsků pro odstraňování porušeného betonu je specifická zejména vzhledem k variabilitě betonu jako stavebního materiálu (skladba tohoto kompozitního materiálu, různé hodnoty pevnostních charakteristik, rozdílné vlivy, které působí na beton v konstrukci během jeho užívání a další). Vlastnosti betonu hrají výraznou roli v procesu interakce vysokorychlostních vodních paprsků a betonu. Při použití technologie vysokorychlostních vodních paprsků pro odstranění vrstev betonu je třeba nastavit parametry paprsku podle vlastností daného betonu, proto je důležitým krokem diagnostika betonu. Cílem výzkumných prací bylo postížení základních zákonitostí procesu rozpojování betonů vysokorychlostními vodními paprsky.

Práce sleduje směry vývoje technologie vysokorychlostních vodních paprsků. Byl ověřován účinek různých typů vysokorychlostních vodních paprsků na proces rozpojování betonu. Nejstarším typem paprsku je paprsek kontinuální, který je generován jednou tryskou a sleduje jednoduchou nepřekrývající se trajektorii. Při experimentech byly kromě kontinuálního paprsku použity také rotační paprsky generované více tryskami (rotační paprsky jsou používány zejména při sanačních zásazích na větších plochách) a paprsky ploché. Zajímavé poznatky byly získány při hodnocení účinků plochých paprsku a paprsků pulzujících. Pulzující paprsky představují progresivní směr vývoje vysokorychlostních paprsků, pro rozpojování materiálů nejsou běžně používány. Na všech zkoumaných betonech dosáhl pulzující paprsek vyšší účinnosti v porovnání s paprskem kontinuálním. Při použití rotačního vodního paprsku byl objem betonu rozpojený pulzujícím paprskem oproti kontinuálnímu zhruba 2,3 až 6,3krát větší, při použití plochého paprsku byl objem rozpojeného betonu při zavedení pulzací až 7 krát větší. Výsledky dosažené plochým pulzujícím paprskem jsou velmi pozitivní. Plochý vysokorychlostní vodní paprsek není při sanačních zásazích v současné době používán z důvodu nedostatečné energie paprsku. Tento problém je řešen na Ústavu Geoniky AV ČR, v.v.i. v Ostravě. Při zavedení vysokofrekvenčních pulzací prostřednictvím akustického generátoru do běžného vodního paprsku je pulzující vodní paprsek schopný i při použití běžných vysokotlakých zařízení užívaných k sanacím beton porušit [9], [14]. Takto modifikovanými paprsky lze dosáhnout velmi zajímavých výsledků i při rozpojování pevných betonů, a to při relativně nízké energetické náročnosti.

Pro nalezení vlivu parametrů vysokorychlostních vodních paprsků a vlivu vlastností betonu na proces rozpojování betonu bylo třeba vymezit jednotlivé proměnné, které do procesu porušování betonu vstupují. Byly definovány parametry vodního paprsku (tlak, průtok vody, typ vodního paprsku, typ trysky, rychlost posuvu atd.) a vlastnosti rozpojovaných betonů. Experimenty byly realizovány na betonech s hutnými kamenivými a s lehkým kamenivem Liapor. Účinek vysokorychlostních vodních paprsků byl sledován na betonech neporušených a na betonech vystavených působení vysokých teplot. Byla provedena diagnostika vlastností betonů před a po procesu porušování vodním paprskem. Hodnocení otryskaných povrchů

betonu bylo provedeno měřením hloubky řezu, měřením objemu rozpojeného betonu, stanovením pevnosti betonu v tahu povrchových vrstev, bylo sledováno ovlivnění okolí řezu makroskopicky a optickým mikroskopem. Betony po otryskání vodním paprskem vykazovaly vyšší hodnoty pevnosti betonu v tahu povrchových vrstev oproti hodnotám stanoveným na betonech stejného složení bez otryskání vodním paprskem a byly dosaženy vyšší hodnoty soudržnosti správkové malty k povrchu betonu stanovené odtrhovou zkouškou. Hodnoty soudržnosti a pevnosti betonu v tahu povrchových vrstev korespondují s reliéfem vytvořených řezů. Nebyly zaznamenány trhliny okolí otryskání betonu vysokorychlostními paprsky, beton byl po otryskání bez nesoudržných míst, rozpojené části betonu byly odstraněny proudem vody při působení vodního paprsku.

Nové poznatky byly získány zejména při rozpojování betonů po působení vysokých teplot. Problematika interakce vysokorychlostních vodních paprsků a betonů korodovaných agresivními prostředními byla řešena v disertační práci Bodnárová [114] a v rámci výzkumného projektu GAČR P103/07/1662 Modelování procesu porušování degradované vrstvy stavebních materiálů při jejich úpravě před sanačním zásahem [115]. Problematika rozpojování betonů degradovaných působením vysokých teplot pomocí technologie vysokorychlostních vodních paprsků není dle dostupných literárních rešerší dosud detailně popsána a publikována, kromě autorského kolektivu pracovníků Vysokého učení technického v Brně, Fakulta stavební a Ústavu geoniky, Ostrava, AV ČR, v. v. i.

Poznatky získané ze sledování účinků vysokorychlostního paprsku na betonech ovlivněných vysokou teplotou mohou přispět ke správné aplikaci této technologie pro odstraňování poškozených vrstev betonu v důsledku požáru konstrukce. Provedené experimenty prokázaly, že vrstvy betonu poškozené působením vysoké teploty jsou méně odolné proti pronikání vysokorychlostního vodního paprsku než vrstvy betonu nedegradované. Stupeň poškození povrchu betonu je významně ovlivněn konkrétním složením betonů. Odpor proti průniku vodního paprsku a v důsledku toho množství odstraněného betonu úzce souvisí s odolností konkrétního betonu proti působení vysokých teplot (množství trhlin vytvořených v betonu při tepelném zatížení, složení betonu, přítomnost a velikost pórů, atd.).

Významným přínosem pro rozvoj vědního oboru je ověření vhodnosti využití počítačové tomografie pro sledování vnitřní struktury betonu po působení vysokých teplot. Pokud studujeme tepelnou odolnost materiálu, je třeba sledovat celou finální strukturu betonu. RTG difrakční analýzou byly sledovány mineralogické změny před a po tepelném zatížení betonů, cementů a kameniv. U kameniva biotický granodiorit Olbramovice byly zaznamenány změny již při teplotách přesahujících 500 °C, kameniva čedič Bílčice a lehké kamenivo Liapor dle difraktogramů vykazovala stabilní chování bez úbytku základních minerálů. Přesto, že jednotlivé složky betonu jsou odolné vůči působení vysokých teplot a vykazují minimální změny při tepelném zatížení, výsledná odolnost betonu závisí na jejich vzájemné interakci. Pro sledování narušení vnitřní struktury betonu se ukázalo jako vhodné využití rentgenové počítačové tomografie. Metodu rentgenové počítačové tomografie lze úspěšně aplikovat při analýze vnitřního poškození betonových vzorků. Unikátní je možnost vzájemně porovnat stejný vzorek před a po tepelné expozici, aniž by došlo k destrukci analyzovaného vzorku, a tak sledovat změny v definovaných oblastech vzorku. Výsledky porušení vnitřní struktury betonů po působení vysokých teplot zjištěné pomocí počítačové tomografie RTG CT korespondují s výsledky změn pevností betonů a s odolností betonů proti průniku vodního paprsku. Snímky z RTG CT ukázaly, že vzorky betonu s kamenivem čedičem a s kamenivem lehkým kamenivem vykazovaly po tepelném zatěžování větší vnitřní porušení než vzorky



betonů, které obsahovaly pouze čedičové kamenivo. Větší porušení vnitřní struktury betonů s kamenivem Liapor z expandovaného jílu bylo způsobeno vodní párou unikající z lehkého kameniva při zahřátí betonu. Před použitím do betonu bylo lehké kamenivo nasycené vodou, aby neodjímalu vodu při výrobě betonu. Voda se následně při zahřátí betonu uvolňovala z kameniva ve formě vodní páry. Tímto procesem byla degradována vysoká tepelná stabilita samotného lehkého kameniva, které bylo při výrobě vypáleno na teplotu 1 150°C. Snížit obsah vody v lehkém pórovitém kamenivu a tím následně zamezit porušení cementové matrice betonu lze vhodně zvoleným způsobem výroby betonu, například ovlhčením kameniva, zamícháním složek betonu a rychlým uložením betonu. Prokázalo se, že technologie výroby betonu s lehkým kamenivem má rozhodující vliv na odolnost betonu vůči působení vysokých teplot.

Zásadní roli na odolnost betonů po tepelném zatížení proti průniku paprsku hraje především typ použitého kameniva. Betony s čedičovým kamenivem lépe odolávaly působení paprsku než betony s běžným kamenivem (např. granodiorit, amfibolit) a betony s lehkým kamenivem Liapor. Poznatky z rozpojování betonů s lehkým kamenivem jsou přínosné, popisu interakce vodního paprsku a betonů s různými typy hutných kameniv se věnoval například Momber [12], výsledky rozpojování betonů s lehkým kamenivem jsou nové.

Bylo provedeno hodnocení výše nákladů na použití technologie vysokorychlostního vodního paprsku. Specifikovat náklady na možné varianty použitých technologií pro odstraňování degradovaného betonu je důležité pro výběr vhodné metody pro odstranění betonu při splnění technických požadavků na kvalitu odstraněného betonu. Výsledky výpočtů ukazují, že použití moderní technologie pulzujícího vodního paprsku ve srovnání s tradiční metodou kontinuálního vysokorychlostního vodního paprsku umožňuje výrazně snížit náklady na odstraňování vrstev poškozeného betonu. Pro určení nákladů byl použit výpočtový model založený na modelu Vidové [81] a byl doplněn o specifické parametry použité při hodnocení technologie vysokorychlostního vodního paprsku. Při dosazení konkrétních údajů z experimentálního měření rozpojeného objemu betonu na vzorové ploše a při dosazení údajů konkrétního zařízení je tento postup možno použít pro hodnocení nákladů konkrétních typů technologie vodního paprsku.

Použití vysokorychlostních vodních paprsků ve stavebnictví má své opodstatnění. Jedná se o vysoce variabilní metodu, která umožňuje selektivní odstranění vrstvy betonu dle definovaných požadavků. Výsledky výzkumu jsou přínosem k vhodnému a efektivnímu použití této technologie.

## 12 LITERATURA

- [1] ČSN EN 1504-10. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody - Část 10: Použití výrobků a systémů a kontrola kvality provedení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví, 2005.
- [2] DROCHYTKA, R. *Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí TP SSBK III*. Brno: Sdružení pro sanace betonových konstrukcí, 2012. ISBN 978-80-260-2210-7.
- [3] ASTM E1575 - 12. *Standard Practice for Pressure Water Cleaning and Cutting*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- [4] ACI COMMITTEE 555. *Removal and reuse of hardened concrete*. 1. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2001. ISBN 978-087-0310-614.
- [5] FOLDYNA, J. *Ultrazvuková modulace vysokorychlostních vodních paprsků*. Kandidátská disertační práce. Ostrava: Akademie věd České republiky, Ústav geoniky, 1997.
- [6] HEYMANN, F. High-speed impact between a liquid drop and a solid surface. *Journal of Applied Physics*. 1969, **40**(13). ISSN 00218979. doi: 10.1063/1.1657361.
- [7] MOMBER, A.W. Wear of rocks by water flow. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004, **41**(1), 51-68. doi: 10.1016/S1365-1609(03)00075-3.
- [8] HANCOX, N. a J. BRUNTON. The erosion of solids by the repeated impact of liquid drops. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. London: Royal Society of London, 1966, s. 121-139.
- [9] SITEK, L., J. ŠČUČKA, P. MARTINEC, V. MÁDR, J. FOLDYNA a L. BODNÁROVÁ. Ploché vodní paprsky při porušování betonu. In: *Sborník příspěvků Sanace betonových konstrukcí*. Brno:SSBK Brno, 2008, s. 416-426. ISSN 1211- 3700.
- [10] ZELENÁK, M., J. FOLDYNA, M. LINDE, F. PUDE, T. RENTSCH, J. FERNOLENDT a H.U. POORT. Measurement and analysis of abrasive particles velocities. In: *Procedia Engineering*, 2016, **148**, s. 77-86. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.641.
- [11] FOLDYNA, J., M. ZELENÁK, J. KLICH, P. HLAVACEK, L. SITEK a Z. RIHA. The measurement of the velocity of abrasive particles at the suction part of the cutting head. In: *Tehnicki Vjesnik*. 2015, **22**(6), 1441-1446. doi: 10.17559/TV-20140214152925.
- [12] MOMBER, A. *Hydrodemolition of concrete surfaces and reinforced concrete structures*. Oxford: Elsevier, 2005. ISBN 978-185-6174-602.
- [13] ZELENÁK, M., J. FOLDYNA a Z. ŘÍHA. The measurement of abrasive particles velocities in the process of abrasive water jet generation. In: *AIP Conference Proceedings*. 2014, **1608**, s. 276-280. doi: 10.1063/1.4892749.
- [14] BODNÁROVÁ, L., R. HELA, L. SITEK a J. FOLDYNA. Nové možnosti technologie vysokorychlostních vodních paprsků při sanacích betonových konstrukcí. *Beton TKS*. Praha, 2008, **8**(6), 44-49. ISSN 1213-3116.
- [15] SILFWERBRAND, J. Improving concrete bond in repaired bridge decks. *Concrete Int*. 1990, **12**(9), 61-66.

- [16] MARTINEC, P. Abraziva pro úpravu betonových a kovových povrchů otryskáváním. *Sanace betonových konstrukcí*. Brno: SSBK, 1994, (3), 12-15.
- [17] FOLDYNA, J a P MARTINEC. *Abrasive material in the process of AWJ cutting*. Jet Cutting Technology. Fluid Mechanics and Its Applications. 1992, **13**, s. 135-147.
- [18] HLAVÁČ, L. M., L. SITEK a J. VAŠEK. Using of the physical model to the evaluation of an efficiency of the tools creating multiple-motions of the nozzles. In: *Proc. of the 12th Int. Conf. on Jet Cutting Technology*. London: Mech. Eng. Public. Ltd, 1994, s. 255-264.
- [19] FAIRHURST, M., C. KNIGHT a L. POPE. Efficient surface removal using high speed rotating abrasive water jets. In: *BHR Group - 21st International Conference on Water Jetting: Looking to the Future, Learning from the Past*. 2012, s. 213-224.
- [20] MOMBER, A.W. Fluid jet erosion as a non-linear fracture process: A discussion. *Wear*. 2001, **250-251**(1), s. 100-106. doi: 10.1016/S0043-1648(01)00615-9.
- [21] HLAVÁČ, L.M., L. BODNÁROVÁ, E. JANUROVÁ a L. SITEK. Comparison of continuous and pulsing water jets for repair actions on road and bridge concrete. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2012, **7**(1), s. 53-59. doi: 10.3846/bjrbe.2012.08.
- [22] BODNÁROVÁ, L., L. SITEK, J. FOLDYNA, J. KLICH a P. HLAVÁČEK. *Laboratory experiments on effects of water jet on heat-affected concretes*. Applied Mechanics and Materials. 2014, **459**, s. 650- 657. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.459.650.
- [23] SITEK, L., L. BODNÁROVÁ, J. VÁLEK, M. ZELENÁK, J. KLICH, J. FOLDYNA a M. NOVOTNÝ. Effects of water jet on heat-affected concretes. In: *Procedia Engineering*. 2013, **57**, s. 1036-1044. doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.131.
- [24] SUN, Z., X.Q. KANG a X.H. WANG. Experimental system of cavitation erosion with water-jet. *Materials and Design*. 2005, **26**(1), s. 59-63. doi: 10.1016/j.matdes.2004.04.003.
- [25] HUTLI, E., M.S. NEDELJKOVIC, N.A. RADOVIC a A. BONYÁR. The relation between the high speed submerged cavitating jet behaviour and the cavitation erosion process. *International Journal of Multiphase Flow*. 2016, **83**, s. 27-38. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.03.005.
- [26] FOLDYNA, J., L. SITEK, B. ŠVEHLA a S. ŠVEHLA. Utilization of ultrasound to enhance high-speed water jet effects. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2004, **11**(3-4), s. 131-137. doi: 10.1016/j.ultsonch.2004.01.008.
- [27] SITEK, L., J. FOLDYNA, P. MARTINEC, J. ŠČUČKA, L. BODNÁROVÁ a R. HELA. Use of pulsating water jet technology for removal of concrete in repair of concrete structures. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2011, **6**(4), s. 235-242. doi: 10.3846/bjrbe.2011.30.
- [28] ZELENÁK, M., J. FOLDYNA, J. ŠČUČKA, S. HLOCH a Z. RIHA. Visualisation and measurement of high-speed pulsating and continuous water jets. *Measurement*. 2015, **72**, s. 1-8. doi: 10.1016/j.measurement.2015.04.022. ISSN 02632241.
- [29] NEBEKER, E.B. Percussive jets-state-of-the-art. In: *Proceedings of the Fourth US Water Jet Conference*. Berkeley, CA. USA. Santa Monica: Scientific Associated Inc, Santa Monica, CA, USA, 1987, s. 19-25.
- [30] SHEN, Z. a Z. WANG. Theoretical analysis of a jet-driven Helmholtz resonator and effect of its configuration on the water jet cutting properties. In: *Proceedings of the*

- 9th International Symposium on Jet Cutting Technology*. Cranfield: BHRA, 1988.
- [31] CHAHINE, G., G. FREDERICK, A. CONN a V. JOHNSON. Cleaning and cutting with self-resonating pulsed water jets. In: *Proceedings of the 2nd U.S. Water Jet Symposium*. St. Louis: WJTA, 1983, s. 167-173.
- [32] *Ultrasonically generated cavitating or interrupted jet*. USA. Patent. 5154347. 1992.
- [33] FOLDYNA, J. a M. VIJAY. Potential of ultrasonically modulated pulsed water jets for cutting of metals. *Manufacturing Science and Engineering*. 1994. **1**, s. 397-404. ISBN 0-7918-1435-1
- [34] *Method of generation of pressure pulsations and apparatus for implementation of this method*. USA. Patent. 07740188. 2010.
- [35] *Způsob generování tlakových pulzací a zařízení pro provádění tohoto způsobu*. ČR. Patent. 299412. 2005.
- [36] *Method of generation of pressure pulsations and apparatus for implementation of this method*. EU. Patent. EP1863601. 2006.
- [37] *Procedimento di trattamento di materiali, in particolare materiali lapidei, mediante getti di fluido pulsanti ed apparato per l'esecuzione di tale procedimento. Treatment process of materials, in particular stones, using pulsating jet technology and apparatus to obtain that process*. Patent. Italy. 2011.
- [38] HELA, R., L. BODNÁROVÁ, L. SITEK a J. FOLDYNA. High-speed water jet technology for renovation of concrete structures - new trends and possibilities. *Cement, Wapno, Beton*. 2010, **5**, s. 268-278.
- [39] BOWDEN, F. a J. FIELD. The brittle fracture of solids by liquid impact, by solid impact, and by shock. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. London: Royal Society of London, 1964, s. 331-352.
- [40] MEDEOT, R. History, Theory, and Practice of Hydrodemolition. In: *5th American Water Jet Conference*. Toronto, Canada: U.S. Water Jet Technology Association, 1989.
- [41] HLAVAC, L. *Makroskopický fyzikální popis interakce kapalinového paprsku vysoké energie s materiálem. Profesorské přednášky*. Praha: České vysoké učení technické, 2006. ISBN 80-01-03465-8.
- [42] WERNER, M. *Einflugparameter und Wirkmechanismen beim Abtrag von Mortel und Beton mit dem Hochdruckwasserstrahl*. Dissertation. Aachen: Inst. Ffir Baumaschinen und Baubetrieb, RWTH Aachen, 1991.
- [43] KAÜW, V. *Optimierung des Einsatzes von Hochdruck-Wasserstrahl-Systemen bei der Betonuntergrundvorbereitung*. Dissertation. Aachen: Inst. Ffir Baumaschinen und Baubetrieb, RWTH Aachen, 1996.
- [44] WOLF, I. a D. WOLF. Prevence rizik a nové ochranné prvky pro práce s vodním paprskem. In: *Vodní paprsek 2011 – výzkum, vývoj, aplikace*. Ostrava: Ústav geoniky AV ČR, 2011, s. 305-312. ISBN 9788086407234.
- [45] KRÜNER, D., J. WIEDEMEIER, H. LOUIS, H.S. STEPHENS a E.B. DAVIES. Safety aspects of jet cutting. In: *Proceedings 6th International Symposium Jet Cutting Technology*. Cranfield: BHRA, 1982.
- [46] ČSN EN 1829-1. *Vysokotlaké vodní proudové čističky - Bezpečnostní požadavky - Část 1: Čističky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví, 2010.

- [47] ČSN EN ISO 11203. *Akustika - Hluk vyzařovaný stroji a zařízeními - Určování hladin emisního akustického tlaku na stanovišti obsluhy a dalších stanovených místech z hladin akustického výkonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví, 2010.
- [48] BRHEL, Petr, ed. *Pracovní lékařství: základy primární pracovnělékařské péče*. Brno: Národní centrum ošetrovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2005. ISBN 80-701-3414-3.
- [49] *Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Část čtvrtá. Vibrace na pracovištích*.
- [50] *ASTM D4258-05(2012). Standard Practice for Surface Cleaning Concrete for Coating*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- [51] ACI COMMITTEE E706. *RAP-14: Concrete Removal Using Hydrodemolition: Field Guide to Concrete Repair Application Procedures, Bulletin 1*. American Concrete Institute, 2010.
- [52] MCCURRICH, a BROWSE. Application of water jet cutting technology to cement grouts and concrete. ed.: BROCK, T.E. a A. RICHARDSON. In: *Proc. 1 st Int. Symp. Jet Cutting Technology*. Cranfield: BHRA, G7/69-G7-91, 1972.
- [53] ČSN EN 1504-10. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody - Část 10: Použití výrobků a systémů a kontrola kvality provedení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví, 2005.
- [54] *ASTM D4259-88. Standard Practice for Abrading Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- [55] *ASTM D4541-09. Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009.
- [56] ČSN EN 1542. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví, 2000.
- [57] FONSECA, F. a T. MAJERONI. *Report No. UT-04.22 Evaluation of repair techniques when bonding repair materials to forty-year old concrete substrate*. In: Brigham: Brigham Young University Department of Civil and Environmental Engineering, 2004, s. 1-101.
- [58] ČSN EN ISO 3274. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů*. Praha: Český úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999.
- [59] ČSN EN 1766. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Referenční betony pro zkoušky*. Praha: Český úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000.
- [60] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha: Český úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999.
- [61] ČSN 73 6177. *Měření a hodnocení protismykových vlastností povrchů vozovek*. Praha: Český úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [62] GUIDELINE NO. 310.2R-2013. *Selecting and specifying concrete surface preparation for sealers, coatings, polymer overlays, and concrete repair*. Rosemont, USA: International Concrete Repair Institute, 2013.

- [63] ASTM D7682-12. *Standard test method for replication and measurement of concrete surface profiles using replica putty*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- [64] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [65] ČSN EN 12350-5. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím*. Praha: Český úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [66] ČSN EN 12350-8. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí – rozlitím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [67] ČSN EN 12350-6. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [68] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [69] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [70] ČSN 73 1318. *Stanovení pevnosti betonu v tahu*. Z1 - 1994, Z2 - 2003. Praha: Český úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1987.
- [71] ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [72] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [73] ČSN 73 1322. *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1968.
- [74] ČSN EN 12390-8. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsku tlakovou vodou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [75] SITEK, L., L. BODNÁROVÁ, J. VÁLEK, M. ZELENÁK, J. KLICH, J. FOLDYNA a M. NOVOTNÝ. Effects of Water Jet on Heat-Affected Concretes. *Procedia Engineering*. 2013, **57**, s. 1036-1044. doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.131.
- [76] SITEK, L., J. FOLDYNA, J. ŠČUČKA, P. MARTINEC, L. BODNÁROVÁ a R. HELA. Utilization of potential of pulsating jets for removal of concrete layers. In: *9th Pacific Rim Int. Conf. on Water Jetting Technology*. Koriyama, Japan: IAP, Ltd, 2009, s. 181-187.
- [77] ZELENÁK, M., J. FOLDYNA, J. ŠČUČKA, S. HLOCH a Z. RIHA. Visualisation and measurement of high-speed pulsating and continuous water jets. *MEASUREMENT*. 2015, **72**, s. 1-8. ISSN 02632241. doi: 10.1016/j.measurement.2015.04.022.
- [78] MANETSCH, T.J. a H.A. HUBER. A comparative economic analysis of automated and conventional hardwood lumber processing systems. *Forest products journal*. 1993, **43**(1), s. 35-40. ISSN 00157473.vid



- [79] IQBAL, Asif, Naeem DAR a Ghulam HUSSAIN. Optimization of abrasive water jet cutting of ductile materials. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2011, **26**(1), s. 88-92. ISSN 10002413. doi: 10.1007/s11595-011-0174-8.
- [80] KVIETKOVA, M., S. BARCIK a M. GASPARIK. Optimization of the cutting process of wood-based agglomerated materials by abrasive water-jet. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica.* 2014, **10**(1). doi: 10.2478/aslh-2014-0003.
- [81] VIDOVÁ, J. Model hodnotenia nákladov nekonvenčných technológií. *Transfer inovácií.* 2007, (10), s. 204–209.
- [82] ZENG, J. a KIM. Parameter prediction and cost analysis in abrasive water jet cutting operations. In: *7th American Water Jet Conference.* Seattle, Washington: WJTA, 1993, s. 175–189.
- [83] SINGH, P. a J. MUNOZ. Cost optimization of abrasive water jet cutting systems. In: *7th American Water Jet Conference.* Seattle, Washington: WJTA, 1993, s. 191–204.
- [84] YAN, W., A. TIEU, B. REN, M. VIJAY a G. GURUSWAMI. Removal of delaminated concrete and cleaning the rust off the reinforcing bars using high-frequency forced pulsed waterjet. In: *Proceedings of 17th Int. Conf. Water Jetting – Advances and Future Needs.* Mainz, Germany: BHR Group, Cranfield, 2004, s. 183–195.
- [85] MÁDR, V., L. SITEK, R. HELA, L.M. HLAVÁČ, L. BODNÁROVÁ, J. PUSTELNÍK a E. JANUROVÁ. Comparison of Continuous High-Pressure Generated and Pulsing Low-Pressure Generated Water Jets on Concrete. In: *Water jet.* Ostrava: AV ČR, Ústav geoniky, 2009, s. 126-136.
- [86] HELA, R., L. BODNÁROVÁ, M. NOVOTNÝ, L. SITEK, J. KLICH, I. WOLF a J. FOLDYNA. Comparison of the actual costs during removal of concrete layer by high-speed water jets. *Journal of Business Economics and Management.* 2012, **13**(4), s. 763-775. ISSN 1611-1699. doi: 10.3846/16111699.2011.645866.
- [87] *Interní materiály firmy NET s.r.o.* Staré Město pod Sněžníkem, 2015.
- [88] HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. *Polska Akademia Nauk. Bulletin of the Polish Academy of Sciences.* 2013, **61**(1), 145. doi: 10.2478/bpasts-2013-0013. ISSN 02397528.
- [89] *Dílčí zprávy a závěrečná zpráva výzkumného projektu GAČR P104/12/1988 Studium interakce složek cementových kompozitů při působení vysokých teplot.* Řešitel Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2012-2015.
- [90] *PB EUROFIBER HPR: PP-Fibre additive maximises the fire resistance of concrete.* 1. Lüternweg, Germany: Baumhueter extrusion GmbH, 2010.
- [91] *Interní materiály firmy Českomoravský cement.* Heidelbergcement Group.
- [92] *Interní materiály štěrkovny Náklo, protokoly zkoušek kameniva.*
- [93] *Interní materiály pískovny Žabčice – protokoly zkoušek kameniva.*
- [94] *Informační systém Masarykovy university* Dotupné z [http://is.muni.cz/do/1499/el/estud/pedf/js07/minerality/materialy/horniny/vyvrele\\_hlubinne.html](http://is.muni.cz/do/1499/el/estud/pedf/js07/minerality/materialy/horniny/vyvrele_hlubinne.html). [vid. 2016-02-25].
- [95] *Interní materiály kamenolomu Olbramovice – protokoly zkoušek kameniva.* 2014.
- [96] Olbramovice - Leskoun [online]. Dostupné z: [http://pruvodce.geol.morava.sci.muni.cz/Olbramovice/Olbramovice\\_text.htm](http://pruvodce.geol.morava.sci.muni.cz/Olbramovice/Olbramovice_text.htm). [vid. 2016-02-25].

- [97] ŠČUČKA, J. a P. MARTINEC. *Fyzikální vlastnosti čedičového kameniva z lokality Bílčice: Dílčí zpráva projektu GAČR P104/12/1988 Studium interakce složek cementových kompozitů při působení vysokých teplot*. Ostrava, 2012.
- [98] GREGEROVÁ, M. *PVE Dlouhé Stráně – oprava AB pláště horní nádrže petrograficko - mineralogicko - geochemické posouzení*. MU Brno, 2004.
- [99] *Liapor - keramické kamenivo pro stavební účely: Interní materiály firmy Lias Vintřov, LSM, k.s. Vintřov*.
- [100] VÁLEK, J. *Výzkum a vývoj kompozitních materiálů s vyšší rezistencí vůči působení vyšších teplot*. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. 2014. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
- [101] SOKOLÁŘ, R. *Keramika, modul BJO1\_M01, studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia*. Brno: VUT Brno, 2005.
- [102] *Technický list CHRYSO Fluid Optima 208*. CHRYSO Chemie s.r.o., 2009.
- [103] ČSN EN 1992-1-2. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [104] FIALA, J. *Vlastnosti cementových betonů při působení vysokých teplot*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2013. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
- [105] BODNÁROVÁ, L., R. HELA a J. VÁLEK. Properties of fibre reinforced concrete after various degrees of heatloading. In: *Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading - Proceedings of the 6th International Conference on Concrete under Severe Conditions, CONSEC'10*. 2010, 1, s. 561-567.
- [106] BROZOVSKY, J., L. BODNAROVA, R. HELA, R. DROCHYTKA a V. HELA. *Evaluation of degradation of concrete exposed to high temperature by means of ultrasonic pulse method*. 2013, **1315**, s. 284-287.  
doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.284-287.1315.
- [107] YÜZER, N., F. AKÖZ a L. ÖZTÜRK. Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature. In: *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 2004, **34**(10), s. 1803-1807. ISSN 00088846. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.01.015.
- [108] CARRÉ, H., I. HAGER a C. PERLOT. Contribution to the development of colorimetry as a method for the assessment of fire-damaged concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2014, s. 1-15. ISSN 19648189.  
doi: 10.1080/19648189.2014.883336.
- [109] KUPILÍK, V.. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. Praha: Grada, 2006. Stavitel. ISBN 80-247-1329-2.
- [110] SITEK, L., L. BODNÁROVÁ, K. SOUČEK, L. STAŠ a L. GURKOVÁ Analysis of inner structure changes of concretes exposed to high temperatures using micro X-ray computed tomography. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2015, **12**(1), s. 79-89.  
doi: 10.13168/AGG.2015.0009.
- [111] BODNÁROVÁ, L., R. HELA, M. HUBERTONVÁ a I. NOVÁKOVÁ. Behaviour of lightweight expanded clay aggregate concrete exposed to high temperatures. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2014, (12). ISSN 2010-376X.

- [112] JUNEK, V., J. KOLÍSKO, M. KROC a I. BRADÁČOVÁ. Developing fire resistant construction for tunnel construction using lightweight aggregate concrete. *Advanced Materials Research*. 2015, **1106**, s. 172-176.  
doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1106.172.
- [113] ZEMAN, O. *Petrografie a regionální geologie Českého masívu*. 2. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1994, 147 s. ISBN 800101178X.
- [114] BODNÁROVÁ, L. *Studium procesu rozpojování korodovaných betonů technologií vysokorychlostního vodního paprsku*. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. 2000. Vedoucí práce Prof. Ing. R. Drochytka, CSc., MBA.
- [115] *Dílčí zprávy a závěrečná zpráva výzkumného projektu GAČR P103/07/1662 Modelování procesu porušování degradované vrstvy stavebních materiálů při jejich úpravě před sanačním zásahem*. Řešitel Prof. RNDr. Vilém Mádr, CSc. VŠB – TU Ostrava, VUT Brno, FAST, AV ČR, v.v.i, Ústav geoniky, Ostrava, 2010.