



národní  
úložiště  
šedé  
literatury

## **Využití nových poznatků při sanacích betonových konstrukcí vysokorychlostními vodními paprsky**

Sitek, Libor  
2012

Dostupný z <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-113898>

Dílo je chráněno podle autorského zákona č. 121/2000 Sb.

Tento dokument byl stažen z Národního úložiště šedé literatury (NUŠL).

Datum stažení: 19.04.2024

Další dokumenty můžete najít prostřednictvím vyhledávacího rozhraní [nusl.cz](http://nusl.cz) .

e často rozsáhlý  
v tom smyslu, že  
ámý např. u mo-  
soubor.

## VYUŽITÍ NOVÝCH POZNATKŮ PŘI SANACÍCH BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ VYSOKORYCHLOSTNÍMI VODNÍMI PAPERSKY

### USE OF NEW KNOWLEDGE WHEN REMOVING CONCRETE STRUCTURES BY HIGH-SPEED WATER JETS

Ing. Libor Šítek, Ph.D. (1)  
Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D. (2)  
Ing. Josef Foldyna, CSc. (3)  
Ing. Jiří Klich (4)

- (1) Ústav geoniky AV ČR, Studentská 1768, 708 00 Ostrava – Poruba, tel.: 596 979 323, fax: 596 919 452, e-mail: libor.sitek@ugn.cas.cz, www.ugn.cas.cz
- (2) VUT Brno, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veveří 95, 662 37 Brno, tel.: 541 147 511, fax: 549 245 147, e-mail: bodnarova.l@fce.vutbr.cz, www.fce.vutbr.cz
- (3) Ústav geoniky AV ČR, Studentská 1768, 708 00 Ostrava – Poruba, tel.: 596 979 328, fax: 596 919 452, e-mail: josef.foldyna@ugn.cas.cz, www.ugn.cas.cz
- (4) Ústav geoniky AV ČR, Studentská 1768, 708 00 Ostrava – Poruba, tel.: 596 979 312, fax: 596 919 452, e-mail: jiri.klich@ugn.cas.cz, www.ugn.cas.cz

**Klíčová slova:** vysokorychlostní vodní paprsek, kontinuální paprsek, pulzující paprsek, sanace betonu, odstraňování povrchových vrstev

**Key words:** high speed water jet, continuous jet, pulsating jet, concrete repair, removal of surface layers

**Anotace:**

Článek se zabývá aplikací nových poznatků a trendů při generování vysokorychlostních vodních paprsků a jejich uplatnění při sanacích betonových konstrukcí nejen v laboratorních podmínkách ale i během praktického využití in-situ. Příspěvek zkoumá několik typů vodních paprsků s důrazem na snížení ekonomické náročnosti procesu sanace a úpravy sanovaného povrchu pro následnou aplikaci správkových materiálů.

**Annotation:**

The article deals with the application of new knowledge and trends in the generation of high-speed water jets and their utilisation during repair of concrete structures not only in laboratory conditions but also for practical use in-situ. Contribution examines several types of water jets with emphasis on reduction of economical intensity of the process of repair and treatment of rehabilitated surface for subsequent application of repair materials.

#### 1. ÚVOD

Betonové konstrukce jsou v průběhu svého užívání vystaveny působení okolních agresivních vlivů. Působení agresivního prostředí, užívání konstrukce v průběhu času a zatížení konstrukce provozem mohou vést k jejímu poškození. To může nastat také nevhodným užíváním konstrukce, nadměrným zatížením či působením požáru. Dopravní stavby (silnice, tunely, mosty) patří k vysoce exponovaným betonovým konstrukcím (cyklickým zatěžováním, klimatickými podmínkami, užíváním chemických rozmrazovacích látek, působením požárů apod.). Již porušené konstrukce je většinou nutné v co nejkratší době uvést zpět do provozuschopného stavu, což vyžaduje

specifický sanační zásah. Při sanacích betonových konstrukcí je nutné na základě odborného posouzení a návrhu odstranit porušenou vrstvu betonu a provést náhradu porušených částí konstrukce. Odstranění poškozených vrstev tudíž představuje důležitou etapu při sanaci a údržbě betonových staveb. Vedle dnes již tradičních metod jako jsou odřezávání, rozrušování pneumatickým kladivem, suché a mokré otryskávání, čištění plamenem a frézování se k takovému účelu stále častěji používají technologie na bázi vysokorychlostních vodních paprsků. U nás je použití vodních paprsků pro tyto účely doporučeno, v některých zemích (např. v Německu) je vzhledem k unikátním vlastnostem paprsků dokonce vyžadováno.

Je všeobecně známo, že vysokorychlostní vodní paprsky mají schopnost selektivně odstranit pouze poškozenou vrstvu a zachovat tak co nejvyšší únosnost původní konstrukce. Účinnost takového zásahu může být ještě zvýšena zavedením vysokofrekvenčních akustických pulzací do paprsku prostřednictvím akustického generátoru tlakových pulzací. Generování dostatečně velkých a rychlých (20kHz) tlakových pulzací ve vysokotlakém systému ještě před výstupem vody z trysky umožňuje vytváření tzv. pulzujícího vodního paprsku, který sice vystupuje z trysky jako paprsek kontinuální, v určité vzdálenosti od trysky se však vlivem rozpadu kontinuálního proudu na shluky vody mění v pulzující. Výhoda takového paprsku v porovnání s běžným kontinuálním spočívá v tom, že dopad každého shluku vody pulzujícího paprsku vyvolá v místě dopadu impaktní tlak, který několikanásobně převyšuje stagnační tlak, kterým působí na dopadovou plochu klasický kontinuální paprsek za jinak naprosto shodných pracovních podmínek. Tento jev způsobuje vážné poškození jak povrchu, tak i vnitřní struktury dezintegrovaného materiálu. Vlivem pulzů v paprsku dochází k únavovému a smykovému namáhání v materiálu rychlým cyklickým zatěžováním dopadové plochy, případně působením radiálního vysokorychlostního toku kapaliny po povrchu. To dále zvyšuje účinnost pulzujícího kapalínového paprsku v porovnání s kontinuálním. Použití pulzujícího paprsku kromě toho umožňuje podstatné snížení pracovního tlaku vody (na cca 30-70 MPa) při zachování desintegračních účinků srovnatelných se standardními vysokotlakovými zařízeními užívanými k ošetřování a údržbě betonových povrchů (s tlaky 150-200 MPa).

Pracoviště Oddělení desintegrace materiálů Ústavu geoniky AV ČR, v.v.i. v Ostravě studuje fenomén pulzujícího vodního paprsku a jeho desintegrační účinky na materiálech již téměř 20 let. V oblastech stavebních hmot, zejména betonů, zde byly prováděny laboratorní experimenty, které zkoumaly účinnost desintegrace pulzujícího paprsku v porovnání s kontinuálním paprskem při odstraňování povrchových vrstev pevných betonů [1], [2], betonů s odlišnými fyzikálně-mechanickými vlastnostmi či betonů narušených technologickou nekázní [3] i betonů, které byly vystaveny působení agresivních prostředí a/nebo mrazu [4]. Tento příspěvek stručně shrnuje výsledky, kterých bylo v dané oblasti dosaženo, a zkušenosti, které byly získány při rozpojování betonů za použití nových metod generování paprsků nejen v laboratorních podmínkách, ale i během praktického využití in-situ [5].

## 2. LABORATORNÍ ZKOUŠKY PŮSOBNÍ VODNÍCH PAPERKŮ NA BETONY

V této části jsou stručně uvedeny výsledky dosažené při laboratorních testech odstraňování povrchových vrstev betonových vzorků pomocí několika typů vysokorychlostních vodních paprsků v sanační praxi běžně užívaných či paprsků progresivních s předpokládaným využitím v blízké budoucnosti (viz obr. 1). Všechny zmíněné typy paprsků mohou být generovány jako kontinuální nebo pulzující (při využití akustického generátoru pulzací). Účinky pulzujících paprsků byly vždy porovnány s klasickými kontinuálními paprsky za stejných nebo podobných pracovních podmínek.

### 2.1 Pevné betony

Jedním z prvních experimentů bylo porovnání účinnosti klasického kontinuálního vodního paprsku s kruhovým průřezem a pulzujícího paprsku s kruhovým průřezem. Pro tyto zkoušky byly vybrány dvě třídy pevných neporušených betonů, které se lišily typem kameniva. Betonové vzorky byly rozřezány diamantovým kotoučem a na řezné straně pak byly pomocí kontinuálního a pulzujícího paprsku vytvořeny drážky rychlostmi 2 a 5 ms<sup>-1</sup>. Tlak vody pro generování paprsků byl ve všech případech 40 MPa, průměr vodní trysky pak 1,98 mm. Z podstaty testovaného pulzujícího paprsku

vyplývá, že jel  
vzdálenosti oc  
trysky od povr  
ci 140 mm). T  
a také erozní  
na hloubka př

V obou tříd  
jsou drážky v  
rychlostech. V  
kameniva. Ve  
betonu při pou

Ukázalo se,  
ňování nános  
sanacích naru  
sch je však n  
zkoumány něk  
případně oscil

Další experi  
plochým pulzu  
ho a rotačním  
v současnosti  
velké šířky, ne  
Byl vyvinut pro  
však nastane,  
plochý paprsek  
porušit i pevný

Na zkušebn  
nerování ploč  
15° a ekvival  
hlavice Barrac

na základě odborného porušených částí konpu při sanaci a údržbě, rozrušování pneumatické se k takovému účelu prsků. U nás je použití Německu) je vzhledem

ost selektivně odstranit konstrukce. Účinnost ch akustických pulzací generování dostatečně tě před výstupem vody vystupuje z trysky jako i kontinuálního proudu ; běžným kontinuálním v místě dopadu impakt-dopadovou plochu klak. Tento jev způsobuje materiálu. Vlivem pulzů chým cyklickým zatě- trního toku kapaliny po ovnnání s kontinuálním. ovního tlaku vody (na andardními vysokotla- aký 150-200 MPa).

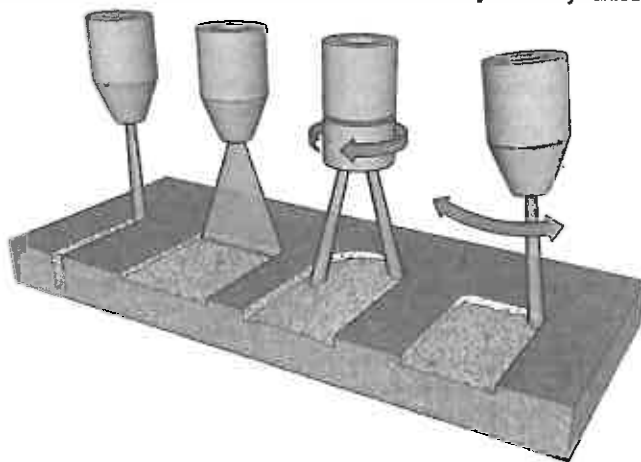
.v.i. v Ostravě studuje riálech již téměř 20 let. mí experimenty, které nuálním paprskem při ými fyzikálně-mecha- tonů, které byly vysta- ičně shrnuje výsledky, rozpojování betonů za ich, ale i během prak-

## TONY

tech odstraňování po- nich vodních paprsků ým využitím v blízké vány jako kontinuální ch paprsků byly vždy racovních podmínek.

nuálního vodního pa- Pro tyto zkoušky byly riva. Betonové vzorky ontinuálního a pulzují- í paprsků byl ve všech io pulzujícího paprsku

vyplývá, že jeho nejvyšší účinnosti je na rozdíl od kontinuálního paprsku dosahováno až v určité vzdálenosti od trysky, kdy se v proudu nacházejí dobře vyvinuté shluky vody. Proto se vzdálenost trysky od povrchu rozpojovaného betonu u jednotlivých paprsků lišila (kontinuální 20 mm, pulzující 140 mm). Tato vzdálenost byla zjištěna experimentálně pomocí měření dopadové síly paprsku a také erozními zkouškami na měkkých kovových materiálech (nejčastěji na hliníku). Byla zjišťována hloubka průniku paprsků do betonu v několika místech drážky a celkový vzhled drážky.



Obr. 1: Typy paprsků vhodné k odstraňování povrchových vrstev betonu (klasický s kruhovým průřezem, plochý, rotační a oscilující)

V obou třídách betonu vytvářejí oba paprsky drážky nepravidelného tvaru a hloubky, přesto jsou drážky vytvořené pulzujícím paprskem o poznání pravidelnější, zejména pak při vyšších rychlostech. Drážky jsou vytvářeny zejména vytrháváním cementových úlomků kolem větších zrn kameniva. Ve všech případech bylo dosaženo zhruba 1,5 krát větší hloubky průniku paprsku do betonu při použití pulzujícího paprsku v porovnání s paprskem kontinuálním.

Ukázalo se, že potenciál pulzujícího paprsku při jeho působení na beton by mohl být při odstraňování nánosů a vrstev z betonového povrchu, při čištění či úpravě povrchu, zejména však při sanacích narušených konstrukcí selektivním odstraněním poškozených vrstev. Při těchto procesech je však nezbytné, aby paprsek rozšířil své působení na větší plochu povrchu. Dále tedy byly zkoumány některé způsoby rozptylu energie paprsku, jako jsou rotační paprsek, plochý paprsek, případně oscilující paprsek (obr. 1).

Další experimenty byly zaměřeny na porušování pevného betonu třídy B55 - C45/55 - XF4 plochým pulzujícím paprskem. Výsledky byly porovnány s účinky paprsku plochého kontinuálního a rotačního kontinuálního i pulzujícího na stejném typu betonu. Plochý (vějířovitý) paprsek je v současnosti mimo okruh zájmu sanačních firem. Jelikož se jeho energie rozloží do poměrně velké šířky, není při běžně užívaných parametrech paprsků schopen beton dostatečně poškodit. Byl vyvinut pro určité speciální aplikace (čištění, odstraňování okují z povrchů apod.). Jiná situace však nastane, pokud jsou do plochého paprsku zavedeny vysokofrekvenční pulzace. Pulzující plochý paprsek je pak schopen při použití běžných vysokotlakých zařízení užívaných k sanacím porušit i pevný beton.

Na zkušebních betonových trámcih byly vytvářeny drážky jednotlivými typy paprsků. Pro generování plochých paprsků byla použita plochá tryska Lechler typ 602 571 s úhlem rozstříhu 15° a ekvivalentním průměrem 2,05 mm. Pro generování rotačních paprsků byla využita rotační hlavice Barracuda osazená dvojicí trysek o průměru 1,19 mm. Tlak vody byl při všech zkouškách

30 MPa. 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 pak 40 mm z důvodu vyšší účinnosti ve větší vzdálenosti od trysky. Ultrazvukový výkon při řezání pulzujícími paprsky byl 630 W, akustický budič vytvářel akustické vlny o frekvenci 20 kHz. Rychlost řezání byla ve všech případech 0,2 m.min<sup>-1</sup>. U každé drážky byl změřen rozpojený objem, u vybraných drážek byla provedena makroskopická analýza nově vzniklého povrchu po řezání paprskem.

Z celkového souboru drážek zkoumaných vzorků se prokázalo, že pulzující paprsek za stejných podmínek vždy rozpojí větší objem betonu, než paprsek kontinuální. Z výsledků dále vyplynulo, že plochý pulzující paprsek rozpojí cca 7,2krát větší objem betonu než plochý kontinuální paprsek za stejných podmínek. Při použití rotačního pulzujícího paprsku je tento poměr zhruba 2,9 vzhledem k rotačnímu kontinuálnímu paprsku. Zajímavé je porovnání účinnosti plochého pulzujícího paprsku s paprskem rotačním kontinuálním, který se běžně při sanacích používá. Ukázalo se, že plochý pulzující paprsek je schopen rozpojit zhruba dvojnásobný objem při jinak stejné energetické náročnosti. Jelikož akustická energie nutná k vytvoření pulzů v pulzujícím paprsku představuje zanedbatelnou část z celkové energie potřebné na generování paprsku (asi 1-2%), pulzující plochý paprsek se může v budoucnu stát vážným konkurentem rotačních hlavice. Z makroskopické analýzy nově vzniklého povrchu po řezání jednotlivými typy paprsku vyplynulo, že zatímco kontinuální paprsky odstraní za daných zkušebních podmínek pouze povrchovou část cementového kamene, případně (u rotačního kontinuálního paprsku) jen částečně odkryjí kamenivo uvnitř betonu, pulzující paprsky odstraní cementový kámen až na kamenivo, které pak reliéfně vystupuje z nově vytvořeného povrchu.

## 2.2 Betony s vrstvami odlišných fyzikálně-mechanických vlastností či betony narušené technologickou nekázní

Experimentální výzkum byl prováděn na speciálních betonových vzorcích záměrně vyrobených ze dvou vrstev betonů s odlišnými parametry. Vrstvy betonu měly rozdílné výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti (zejména pevnosti), byla měněna skladba kameniva, druh cementu a vodní součinitel. Pro vizuální kontrolu byly vrstvy betonu výrazně barevně odlišeny použitím barevného pigmentu. Cílem zkoumání bylo zejména ověřit, zda je technologie pulzujícího rotačního vysokorychlostního vodního paprsku skutečně 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 simulovalo reálné použití technologie vodního paprsku při sanacích betonových konstrukcí, kdy odstraňujeme povrchovou vrstvu betonu určitým způsobem narušenou, s horšími fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, a vrstvu betonu vyšší kvality se snažíme v co nejvyšší míře zachovat a dále nenarušovat.

Pro experiment byl zvolen běžně užívaný rotační pulzující paprsek a opět porovnán s běžně užívaným paprskem rotačním kontinuálním. Na betonových vzorcích byly vytvářeny drážky oběma typy paprsku. Rotační hlavice Barracuda byla osazena dvojicí trysek o průměru 1,47 mm, tlak vody byl udržován na hodnotě 30 MPa. Vzdálenost rozpojovaného betonu od trysek byla u kontinuálního paprsku 20 mm, u pulzujícího 40 mm kvůli vyšší účinnosti. Ultrazvukový výkon při řezání pulzujícím paprskem byl 630 W a frekvence generování akustických vln 20 kHz. Proměnným parametrem, kterým se regulovala hloubka drážky, byla rychlost řezání (0,1 až 0,5 m.min<sup>-1</sup>). Ta byla postupně snižována, dokud nebylo dosaženo tvrdší probarvené spodní vrstvy betonu. Za stejných podmínek byly vyřezány drážky také kontinuálním paprskem. U každé drážky byl zjišťován rozpojený objem.

Opět se prokázala vyšší účinnost pulzujícího paprsku v porovnání s kontinuálním. Pulzující paprsek rozpojí cca 2,3 až 6,3krát větší objem betonu za stejných podmínek. Vyšších poměrů je dosaženo zejména při vyšších rychlostech řezání, tedy při krátkém časovém působení paprsku na plochu. Zatímco energie kontinuálního paprsku v takovém případě k rozpojení povrchové vrstvy betonu nestačí, pulzující paprsek je schopen již velice slušně beton rozpojovat. Při nižších rychlostech řezání se pak rozdíl mezi oběma typy paprsků snižují. Podobných výsledků je možno dosáhnout také při konstantní rychlosti rozpojování a proměnném tlaku vody. Pulzující

paprsek dříve (teč rozpojovat. Účink:

Rovněž se profl nu. Po poměrně s desintegraci pevn tonových vrstev p nenarušeného be betonu nedostate pevný beton (tříd:

## 2.3 Betony vysta

Tento výzkum t ranů pomocí plocl krychle o průměn podrobena někter nasyceném stavu staveny 100 cyklů mickým rozmrazc 3% NaCl tak, aby zmrazování a roz 731326), působer a působení straní vzorků byla ulože drážky pomocí v byla provedena r

K vytváření drá 2,05 mm a s úhler tické vlny o frekv Vzdálenost rozpo cím paprskem by m.min<sup>-1</sup>, 0,4 m.mil

Na základě stu jíci paprsek je úči pulzujícím a konti ně podle rychlosti proti mrazu a ch rychlosti 1 m.min ků referenčních n zaznamenan u v z v roztoku Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Po zkoušce odk nu již natolik rozp ně drobného kam vého kamene a di na hrubé kamení

Naopak u vzorl jíci a kontinuál kontinuální plochc naopak díky vyc straňuje cemento při vyšších rychl prospěch pulzujíc

rsku pulzujícího i konku byla vzdálenost od vzdálenosti od trysky. idič vytvářel akustické  $\text{min}^{-1}$ . U každé drážky kopická analýza nově

zující paprsek za stejZ výsledků dále vyplývá plochý kontinuální je tento poměr zhrubní účinnosti plochého při sanacích používá. isobný objem při jinak pulzů v pulzujícím paterování paprsku (asi ntem rotačních hlavic. rpy paprsku vplynulo, ek pouze povrchovou ) jen částečně odkryjí a kamenivo, které pak

#### i betony narušené

záměrně vyrobených výsledné fyzikálně-medruh cementu a vodní y použitím barevného ího rotačního vysokoljde ke snížení výkossek pronikne k betonu y paprsku při sanacích m způsobem naruševality se snažíme v co

pět porovná s běžně vytvářeny drážky oběc o průměru 1,47 mm, betonu od trysek byla ltrazvukový výkon při n vln 20 kHz. Promění (0,1 až 0,5  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ). odní vrstvy betonu. Za áždé drážky byl zjišťo-

kontinuálním. Pulzující ek. Vyšších poměrů je ém působení paprsku : rozpojení povrchové on rozpojovat. Při nižodobných výsledků je n tlaku vody. Pulzující

paprsek dřive (tedy při nižším tlaku vody) překoná prahovou hranici, kdy již bude schopen beton rozpojovat. Účinky kontinuálního paprsku se projeví teprve při vyšších tlacích.

Rovněž se prokázala schopnost obou paprsků selektivně odstraňovat narušenou vrstvu betonu. Po poměrně snadném odstranění porušené vrstvy bylo nutno vynaložit zvýšenou energii na desintegraci pevné, neporušené spodní vrstvy. Při hodnocení odolnosti speciálně vyrobených betonových vrstev proti působení vodních paprsků vyšlo najevo, že nejlépe odolává paprsku vrstva nenarušeného betonu (třída C20/25, bez technologické nekázně). O něco hůře dopadla vrstva betonu nedostatečně zhutněná a pak vrstva s vysokým podílem písku. Nejméně vydržely málo pevný beton (třída C12/15) a beton s vysokou dávkou záměsové vody.

#### 2.3 Betony vystavené působení agresivních prostředí a/nebo mrazu

Tento výzkum byl zaměřen na dezintegraci betonů vystavených působení mrazu, chloridů a síranů pomocí plochého pulzujícího i kontinuálního vysokorychlostního vodního paprsku. Betonové krychle o průměrné pevnosti 40 MPa byly rozděleny do několika skupin a každá skupina byla podrobena některé z korozivních zkoušek: zkoušce mrazuvzdornosti (schopnost vzorků ve vodou nasyceném stavu odolávat opakovanému zmrazování a rozmrazování, betonové krychle byly vystaveny 100 cyklům zmrazování dle ČSN 731322), zkoušce odolnosti betonu proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám (vzorky vodou nasáklého betonu se uloží do misky s roztokem 3% NaCl tak, aby byly ponořeny na výšku  $5 \pm 1$  mm, ve zkušebním prostoru se podrobí střídavému zmrazování a rozmrazování; betonové krychle byly vystaveny 100 cyklům zmrazování dle ČSN 731326), působení chloridů (betonové vzorky byly na 6 měsíců zcela ponořeny do roztoku NaCl) a působení síranů (betonové vzorky byly na 6 měsíců zcela ponořeny do roztoku  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Část vzorků byla uložena jako referenční. Na betonových krychlích všech skupin pak byly vytvářeny drážky pomocí vodních paprsků, u každé drážky byl zjištěn rozpojený objem, u vybraných drážek byla provedena makroskopická analýza nově vzniklého povrchu po řezání paprskem.

K vytváření drážek byla použita plochá tryska Lechler typ 602 571 s ekvivalentním průměrem 2,05 mm a s úhlem rozstříku  $15^\circ$ . U pulzujícího paprsku vytvářel předřazený akustický budič akustické vlny o frekvenci 20 kHz. Tlak vody byl při všech zkouškách udržován na hodnotě 30 MPa. Vzdálenost rozpojovaného betonu od trysky byla 40 mm, ultrazvukový výkon při řezání pulzujícím paprskem byl nastaven na 630 W. Rychlosti řezání vzorků paprskem byly  $0,1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $0,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $0,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , pokud to stav konkrétního vzorku umožňoval.

Na základě studia všech drážek vytvořených v betonových vzorcích se opět ukázalo, že pulzující paprsek je účinnější než paprsek kontinuální. Poměr mezi objemem odstraněným ze vzorku pulzujícím a kontinuálním paprskem se však liší podle druhu a stupně degradace vzorku, případně podle rychlosti rozpojování. Nejmenší poměr byl zjištěn u vzorků po zkoušce odolnosti betonu proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám (cca 1,1) při rychlosti řezání  $0,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; při rychlosti  $1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  se pak poměr zvyšuje na 2,8. Naopak nejvyšší poměr byl zaznamenán u vzorků referenčních neporušených korozí při rychlosti  $1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  (cca 6,7). Poměr mezi 2,9 a 3,9 byl zaznamenán u vzorků uložených v roztoku NaCl, poměr od 2,8 do 4,5 pak u vzorků uložených v roztoku  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . U vzorků vystavených působení mrazu byl poměr zhruba 1,9.

Po zkoušce odolnosti betonu proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám byl povrch betonu již natolik rozpadlý, že hrubé kamenivo bylo v horní části obnaženo a cementový kámen včetně drobného kameniva byl ze vzorku částečně vydrolen. Zbývající narušená struktura cementového kamene a drobného kameniva byla pulzujícím či kontinuálním paprskem lehce odstraněna až na hrubé kamenivo, které již nebylo při daných parametrech zkoušky z drážky odstraněno.

Naopak u vzorků nenarušených korozí je obecně dosahováno nejlepších poměrů mezi pulzujícím a kontinuálním paprskem, neboť neporušenou a dostatečně pevnou strukturu betonu není kontinuální plochý paprsek při daných parametrech schopen výrazněji narušit. Pulzující paprsek naopak díky vysokofrekvenčnímu cyklickému zatěžování povrchu vzorku bez větších potíží odstraňuje cementový kámen, případně drobné kamenivo. Tato vlastnost se pak nejvýrazněji projeví při vyšších rychlostech řezání. U pevných betonů je zjištěný poměr (cca 7,2) ještě výhodnější ve prospěch pulzujícího paprsku.

Určité nesnáze nastaly při řezání vzorků vystavených 100 cyklům zmrazování: při nižších rychlostech se zcela rozpadaly z důvodu narušení struktury vzorku trhlinami bez ohledu na typ použitého paprsku. I když po zkoušce zmrazování nevykazovaly betony vizuálně žádné porušení, ukázalo se, že odolnost vůči průniku paprsku je zcela zanedbatelná. Lze tedy usuzovat na vnitřní porušení betonu, které vzniklo při zmrazování. Na základě této skutečnosti doporučujeme u vzorků betonu provádět další typy zkoušek, které by měly narušenou strukturu odhalit (pevnost povrchových vrstev betonu, zkoumání skutečné pórové struktury, nasákavost povrchových vrstev apod.).

Makroskopická analýza potvrdila dřívější zjištění, že zatímco kontinuální paprsky odstraní za daných zkušebních podmínek pouze povrchovou část cementového kamene, případně u korodovaných vzorků částečně odkryjí kamenivo uvnitř betonu, pulzující paprsky odstraní cementový kámen až na kamenivo, které pak obnažené vystupuje z nově vytvořeného povrchu. Skutečná plocha povrchu vytvořeného pulzujícím paprskem je tak větší než u povrchu vytvořeného kontinuálním paprskem.

### 3. PŮSOBENÍ VODNÍCH PAPERKŮ NA BETON IN-SITU

Vzhledem k slibným výsledkům z laboratorních testů jsme přistoupili také k praktickým zkouškám odstraňování povrchových vrstev betonů v reálném prostředí. Ve spolupráci s firmou NET s.r.o., Staré Město pod Sněžníkem, která se zaměřuje na sanace betonových konstrukcí technologií vodního paprsku, byly realizovány zkoušky na silničním betonovém panelu pomocí běžného mobilního strojního zařízení používaného zmíněnou firmou při odstraňování poškozených vrstev při sanačních pracích.

Polní zkoušky odstraňování povrchových vrstev standardního betonového panelu (pevnost v tlaku zhruba 40 MPa) uloženého v normálním venkovním prostředí (vliv mrazu a atmosférických par, bez chemických látek) po dobu 18 let proběhly in-situ (tedy na místě, v původním prostředí) pomocí kontinuálního a pulzujícího oscilujícího vodního paprsku. Experimentální zařízení sestávalo ze zdroje vysokotlaké vody, systému ke generování vysokofrekvenčních tlakových pulzací ve vysokotlakém systému a pásového manipulátoru, který umožňoval oscilační (kmitavý) pohyb trysky a zároveň posuvný pohyb kmitající trysky nad testovaným panelem. Vysokotlaká voda byla do trysky dodávána vždy jedním ze dvou plunžrových čerpadel podle typu použité trysky. Tlakové pulzace byly vytvářeny akustickým generátorem pulzů s frekvencí 20 kHz a maximálním akustickým výkonem 630 W. Ke generování vodních paprsků byly použity standardní průmyslové trysky různých průměrů s různou vnitřní geometrií. Použitý pásový manipulátor Aqua Cutter HVD-6000 pro plošné odstraňování povrchových vrstev vodním paprskem umožňoval programovatelný pohyb trysky nad povrchem.

Povrchové vrstvy byly postupně odstraňovány z vrchní strany panelu kontinuálním oscilujícím a pulzujícím oscilujícím paprskem. Manipulátor posunul řeznou hlavici k dalšímu kroku (o cca 50 mm) po čtyřnásobném průchodu oscilujícího paprsku po stejné ploše. Takto byly postupně ošetřeny plochy o rozměrech přibližně 470 mm x 130 - 250 mm. Poté byly změřeny hloubky penetrace vzhledem k původnímu povrchu na 5 nezávislých místech. Následně byl ze známých rozměrů ošetřené plochy a průměrné hloubky vypočítán rozpojený objem betonu. Ten pak sloužil jako měřítko účinnosti paprsku. Zkoušky proběhly při různých tlacích vody (30 až 200 MPa). Vzdálenost trysky od rozpojovaného povrchu byla zvolena 45, 50 respektive 60 mm podle optimální vzdálenosti konkrétního pulzujícího paprsku určené erozními zkouškami na hliníku. U zkoušek uskutečněných s pulzujícím paprskem byla budící amplituda akustického generátoru nastavena na 7  $\mu$ m. Plošná rychlost desintegrace byla vzhledem k naprogramovanému oscilujícímu pohybu trysky přibližně 12 cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>. Tato rychlost byla stejná pro všechny zkoušky. Experimenty se uskutečnily s následujícími průměry trysek: 0,81; 0,97; 1,07; 1,2; 1,4; 1,5; 1,7; 1,8 a 2,26 mm. Vzhledem k různým průměrům trysek, různým použitým tlakům a tudíž obtížnému porovnání účinnosti jednotlivých paprsků byl u každého paprsku vypočítán hydraulický výkon. Ten pak sloužil k porovnání ploch ošetřených různými způsoby (trysky s různou vnitřní geometrií od různých výrobců, paprsky generované při různých tlacích apod.), tedy pul-

sujícím paprskem  
vodním paprskem

V případě, že  
ných pracovních  
účinnosti obou  
kontinuální papr  
částečně vymyt  
no odstraňuje v  
aplikaci sanační  
je nejméně 3,8 l  
podmínek.

Ovšem v běž  
tinálních vodn  
tlacích je beton  
kontinuální pap  
kolikanásobně  
ným rozpojený  
pulzujícím papr  
dvojnásobný hy  
musí být takový  
pulzující osciluj  
nerovaný vysok  
a drobného kan

### 4. POROVNÁNÍ

Pro porovnání  
povrchových v  
kového objemu  
kontinuálního  
účinnější opl  
ré byly proved  
výrazně ovlivn  
Ukázalo se, že  
(plochý, oscilu  
vytváření záře:  
oproti kontinuá

lům zmrazování; při nižších tlacích i trhlinami bez ohledu na typ tržiny vizuálně žádné porušení není. Lze tedy usuzovat na skutečnou doporučenou strukturu odhalit (pevnost sákvost povrchových vrstev

kontinuální paprsky odstraní za kamene, případně u korozivních paprsky odstraní cementový vrstev. Skutečná povrchu vytvořeného konti-

upili také k praktickým zkouškám. Ve spolupráci s firmou NET stonových konstrukcí technickým panelu pomocí běžného raňování poškozených vrstev

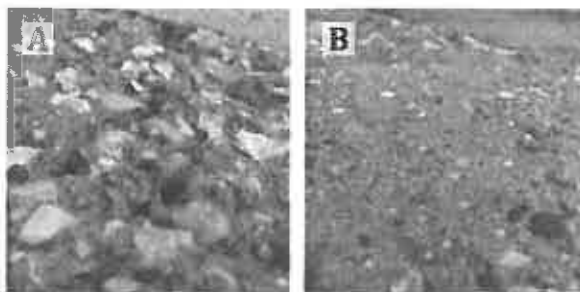
betonového panelu (pevnost vliv mrazu a atmosférických místech, v původním prostředí) experimentální zařízení sestává z kmitavých tlakových pulzací val oscilační (kmitavý) pohyb teplem. Vysokotlaká voda byla z typu použité trysky. Tlakové 0 kHz a maximálním akustickým standardní průmyslové trysky látator Aqua Cutter HVD-6000 zřizoval programovatelný po-

panelu kontinuálním oscilující hlavici k dalšímu kroku po stejné ploše. Takto byly 250 mm. Poté byly změněny ch místech. Následně byl ze rozpojený objem betonu. Ten různých tlacích vody (30 až ana 45, 50 respektive 60 mm ené erozními zkouškami na udící amplituda akustického la vzhledem k naprogramo- lost byla stejná pro všechny ak: 0,84; 0,97; 1,07; 1,2; 1,4; ným použitým tlakům a tudíž o paprsku vypočítán hydraul- ní způsoby (trysky s různou ých tlacích apod.), tedy pul-

sující paprskem generovaným při nižším tlaku vody a tradičně vysokotlakým kontinuálním vodním paprskem.

V případě, že byly oba povrchy ošetřeny jak kontinuálním, tak pulzujícím paprskem za stejných pracovních podmínek a povrchy se nacházely zhruba na stejném místě panelu, porovnání účinnosti obou paprsků nečiní žádné potíže (obr. 2). Rozdíl je patrný na první pohled: zatímco kontinuální paprsek není schopen vrchní vrstvu betonu dostatečně rozpojit a je patrné pouze částečné vymytí poškozeného cementového kamene z povrchu panelu, pulzující paprsek snadno odstraňuje vrstvu betonu do požadované hloubky a vytváří vhodný substrát pro případnou aplikaci sanačních malt či ochranných vrstev. Objem betonu odstraněného pulzujícím paprskem je nejméně 3,8 krát větší, než objem odstraněný paprskem kontinuálním za stejných pracovních podmínek.

Ovšem v běžné sanační praxi se při odstraňování betonových vrstev pomocí klasických kontinuálních vodních paprsků používají mnohem vyšší tlaky vody (až 200 MPa). Při takovýchto tlacích je beton snadno porušován i kontinuálními paprsky. Proto jsme se rozhodli porovnat kontinuální paprsky generované při vysokých tlacích s pulzujícími paprsky generovanými několikanásobně nižším tlakem. Bylo porovnáno několik dvojic ošetřených ploch se zhruba stejným rozpojeným objemem materiálu, z nichž jedna plocha byla ošetřena kontinuálním a druhá pulzujícím paprskem. Z výsledků testů bylo zjištěno, že kontinuální paprsek by měl mít alespoň dvojnásobný hydraulický výkon, aby odstranil stejný objem betonu jako pulzující paprsek. Navíc musí být takový kontinuální paprsek generován při zhruba trojnásobném tlaku vody. Zatímco pulzující oscilující paprsek vytváří relativně pravidelný drsný povrch, kontinuální paprsek generovaný vysokým tlakem produkuje povrch tvořený převážně vytrháním cementových úlomků a drobného kameniva.

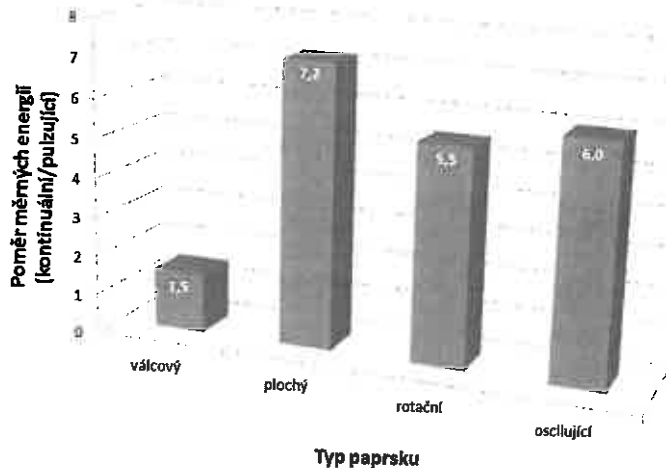


Obr. 2: Betonové povrchy ošetřené pulzujícím oscilujícím paprskem (A) a kontinuálním oscilujícím paprskem (B)

#### 4. POROVNÁNÍ ÚČINNOSTI JEDNOTLIVÝCH TYPŮ PAPERKŮ

Pro porovnání účinnosti jednotlivých typů trysek v konkrétních podmínkách při odstraňování povrchových vrstev betonu byly stanoveny měrné energie potřebné pro odstranění jednotkového objemu betonu [kJ.cm<sup>-3</sup>] pro kontinuální i pulzující paprsek. Poměr měrných energií kontinuálního a pulzujícího paprsku pak udává, kolikrát je technologie pulzujícího paprsku účinnější oproti klasickému paprsku kontinuálnímu (obr. 3). Do grafu byly vybrány řezy, které byly provedeny všemi tryskami za zhruba stejných pracovních podmínek. Účinnost je však výrazně ovlivněna vlastnostmi odstraňované betonové vrstvy, typem a parametry paprsku. Ukázalo se, že nejvýhodnější je použití pulzujících paprsků pro plošné odstraňování vrstev (plochý, oscilující a rotační paprsek). Nejméně výhodné je použití pulzujícího paprsku pro vytváření zářezů, i v tomto případě je ovšem pulzující technologie zhruba o polovinu účinnější oproti kontinuální.





Obr. 3: Poměr měrných energií potřebných k odstranění jednotkového množství betonu [ $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-3}$ ] pro příslušný kontinuální a pulzující paprsek

## 5. PŘÍDRŽNOST SANAČNÍCH MALT NA POVRCHU OŠETŘENÉM VODNÍMI PAPSKY

Předchozí výzkum prokázal (viz kapitolu 2), že povrchy ošetřené pulzujícím paprskem mají větší skutečnou plochu než povrchy ošetřené paprskem kontinuálním. Tuto skutečnost bude možné využít v aplikacích, kde se u takto připraveného substrátu požaduje dobrá přilnavost nové nanášených vrstev v tahu i ve smyku. Schopnost nových vrstev přilnout k substrátu po požadované dobu životnosti konstrukce je jeden ze základních požadavků na ochranné vrstvy či sanační systémy pro beton. Adekvátní makroskopická drsnost substrátu poskytuje dobré mechanické ukořtení a velkou povrchovou plochu pro stmelení. Svrchní vrstva je pak mechanicky spojena s podkladem. Několik studií (např. [6], [7], [8] a [9]) potvrzuje fakt, že adhezní pevnost vrstev aplikovaných na povrchu ošetřeném technologií vodního paprsku bezpečně splňuje požadavky kladené v příslušných normách na betonové povrchy před sanací a zároveň překračuje hodnoty adhezní pevnosti získané při aplikaci dalších metod ošetření betonových povrchů, jako jsou pneumatická kladiva, suché a mokré otryskávání, čištění plamenem apod. Jelikož při aplikaci pulzujícího vodního paprsku vykazují povrchy větší drsnost a členitost než u kontinuálního paprsku [10], lze u povrchů upravených pulzujícím paprskem očekávat ještě lepší přídržnost správkové malty k podkladu než je tomu u povrchů vytvořených kontinuálním paprskem. To nakonec potvrzují i výsledky studie Mazáčové a kol. [11]: při standardních laboratorních odtrhových zkouškách prováděných pomocí zařízení Coming OP 3 bylo zjištěno, že průměrná přídržnost v případě odtrhů na kontaktu malty s betonem byla o cca 38 % vyšší u povrchů ošetřených rotačním pulzujícím paprskem než u povrchů ošetřených rotačním kontinuálním paprskem. Povrch upravený pulzujícím paprskem vykazoval vyšší stupeň narušení cementového tmele s částečným reliéfním odkrytím kameniva. Cementový tmel byl zřetelně odstraněn v okolí zrn kameniva, což umožnilo lepší přilnavost malty k substrátu.

## 6. BETONOVÉ KONSTRUKCE VYSTAVENÉ PŮSOBENÍ VYSOKÝCH TEPLOT

Aktuálně řešeným problémem je sanace betonových konstrukcí porušených vysokými teplotami a ohněm. Základní otázky ohledně teplotního vlivu na beton zahrnují nejen komplexní identifikaci změn, k nimž dochází v cementové matici, ale i transportních jevů. Analýza je komplikovaná také

s ohledem na sklady odlišných složek: nerologickým složením, které jsou i změn, ke kterým a mechanické vlivy betonu, jako například působení vysokých teplot a parametrů pracoviště Ústav na řešení projektů cementových konstrukcí betonu při vysokých teplotách technologie vysokých teplot chování technologie vodních paprsků

## 7. ZÁVĚR

Výzkum odstranění vodních paprsků v případech vyšší účinnosti Nejvyšší účinnosti energie paprsků Pulzující paprsky na povrchu. Ta vané sanační hm

Technologie vce vání degradovaní řeny jednak na in paprsků s betony kých rozmrazova vých betonů vůči (především nákla zkoumáním zmín takto zatížených :

## PODĚKOVÁNÍ

Článek byl vyp surovin, reg. č. C. pro Inovace, finan podpořena rovněž slední řadě také M

## SEZNAM POUŽITÍ

- [1] Sitek, L., Fol cutting using Technology, ety of Water
- [2] Sitek, L., Mai vodní paprsek ce 2008. Brn



- [3] Sitek, L., Bodnárová, L., Foldyna, J., Hela, R., Ščučka, J., Jekl, P., Nováková, D. Pulzující rotační vodní paprsek při odstraňování povrchových vrstev. In *Sborník příspěvků mezinárodního symposia Sanace 2007*. Brno: SSBK, 2007, s. 341-348. ISSN 1211-3700.
- [4] Sitek, L., Bodnárová, L., Foldyna, J., Nováková, D., Ščučka, J., Martinec, P., Hela, R., Mádr, V., Hlaváč, L. Odstraňování povrchových vrstev korodovaných betonů vysokorychlostními vodními paprsky. In *Sborník přednášek XIX. mezin. symposia Sanace 2009*. Brno: SSBK, 2009, s. 296 – 307, ISSN 1211-3700.
- [5] Sitek, L., Foldyna, J., Wolf, I., Klich, J., Mazáčová, R. Příprava betonového povrchu před sanací pomocí kontinuálních a pulzujících oscilujících vodních paprsků. *Sborník přednášek XX. mezin. symposia Sanace 2010* (Brno, 19. – 21. května 2010), SSBK 2010, pp. 317 - 326, ISSN 1211-3700.
- [6] Galecki, G., Maerz, N., Nanni, A., Summers, D.A. The need for quantifying waterjetted surface texture for RFP adhesion. In Longman (ed.) *Proceedings of the 18th International Conference on Water Jetting*, Gdaňsk: BHR Group, 2006, s. 347 – 356. ISBN 1 85598 080-0.
- [7] Sakada, S., Adachi, I., Yahiro, T., Mitunobu, Y. Effects of surface treatment on bond strength between new and old concrete using the waterjet method. In Vijay M.M. et al. (eds) *Proc. 5th Pacific Rim Int. Conf. on Water Jet Technology*. New Delhi: Allied Publ. Ltd., 1998, s. 561-566.
- [8] Momber, A. *Hydrodemolition of Concrete Surfaces and Reinforced Concrete*. Elsevier Ltd., Oxford 2005.
- [9] Bodnárová, L., Wolf, I., Hela, R., Válek, J. Užití vysokorychlostního vodního paprsku pro ošetření povrchu betonu – hodnocení vlastností betonů otryskaných vysokorychlostním vodním paprskem. In: Sitek, Zelenáček (eds.) *Sborník přednášek mezinárodní konference Vodní paprsek/Water Jet 2011*, Ostrava: ÚGN, 2011, s. 25-37, ISBN 978-80-86407-23-4.
- [10] Sitek, L., Foldyna, J., Ščučka, J., Mlynarczuk, M., Sobczyk, J. Quality of bottom surface of kerfs produced by modulated jets. In Lake (ed.) *Proceedings of the 16th International Conference on Water Jetting*, Aix-en-Provence: BHR Group, 2002, s. 359–368, ISBN 1 85598 042 8.
- [11] Mazáčová, R., Ščučka, J., Sitek, L., Foldyna, J., Hurta, J. Přidržitelnost sanační malty k povrchu betonu upravenému vodním paprskem. In: Sitek (ed.) *Sborník příspěvků mezin. konf. Vodní paprsek/Water Jet 2009*, Ostrava: ÚGN, 2009, s. 136-145, ISBN 978-80-86407-81-4.

## KVALITA

## WATER QL

Ing. Ladislav  
Odborný por  
Mikulčická 8.

**Anotace:**  
Příspěvek př  
Životnost vys  
mann řešící

**Abstract :**  
The article p  
water which  
technologica  
presented.

### 1. ÚVOD

Provoz ze  
a aby vše dc

Pro určen  
ní podmínky  
rodynamiky,  
neustálý tlak  
řešeními. Je  
vyšší možnc

### 2. PROČ JE

Voda je př  
čerpádlu př  
konstantní v  
Součástí bě  
médiu přes  
voda ze zdr  
mocí podáv  
prostoru vys

Po uzavře  
cích sadách  
vou vysokot  
působí na je  
ky. Proto je  
správně řeš  
vysokotlaký