

WWTPs was mixed with additives in the form of organic additives or catalysts and subsequently pelletized. The pelletized SS was determined to the calorific value tests with and without the additive. The second research way was based on the material transformation of pelletized SS by microwave torrefaction, focusing on the production and characterization of solid carbon product, biochar. The comparison of the energy utilization and material transformation of the SS will lead to the definition of the concept of the sludge management in the Czech Republic.

#### Key words

sludge management – pyrolysis – torrefaction – sewage sludge – solid carbonaceous product – biochar

Tento článek byl recenzován a je otevřen k diskusi do 29. února 2020. Rozsah diskusního příspěvku je omezen na 2 normostrany A4, a to včetně tabulek a obrázků. Příspěvky posílejte na e-mail stransky@vodnihospodarstvi.cz.

# Využití bentonitu pro těsnění hrází prostřednictvím stříkané technologie

Václav David, Kateřina Černochová, Jiří Štáška

## Souhrn

V tomto článku je prezentováno testování vyvíjené bentonitové vrstvy určené pro těsnění hrází historických rybníků. Těsnicí vrstva je nanášena stříkanou technologií na návodní líc hráze, k čemuž byla vyvinuta jak speciální nová tryska, tak nová bentonitová směs. Nově vyvinutá bentonitová směs nese název B75 REC MIX I. Technologie i nový materiál byly testovány na modelu hráze v reálném měřítku. Tento model byl postaven s výškou 2,5 m jako 2,5 m široká sekce se sklony svahů 1:1. Model byl umístěn v prostoru ohraničeném ze tří stran zdmi. Pro stavbu hráze byl použit relativně propustný materiál, díky čemuž bylo možné těsnicí vlastnosti vrstvy lépe demonstrovat. Testování spočívalo v napuštění prostoru zdrže za hrází a následném prázdnění prouděním skrz těleso hráze při měření průsaku a hladiny vody ve zdrži. Výsledky prezentovaného experimentu ukazují, že aplikovaná těsnicí vrstva významně snížila průsak tělesem hráze.

## Klíčová slova

bentonit – stříkaná technologie – rybník – hráz – průsak

## Úvod

Rybníky jsou jedním z charakteristických prvků krajiny na řadě míst České republiky, jejich množství a hustota nás řadí mezi rybníkářské velmoci. Rybníky krajinu spoluutváří již po staletí, přičemž jejich existence je doložena již v jedenáctém století. Míka v knize Naše rybníky a přehradní jezera dokonce odhaduje existenci prvních rybníků do období před osmým či devátým stoletím [1]. Věk těchto staveb značně zvyšuje riziko poruch hned z několika důvodů. Tím prvním je technologie použitá při jejich výstavbě. Historicky totiž byly hráze budovány s prudšími sklony obou líců a měly tak mnohem kratší šířku. Například Dubravius ve svém spisu *O rybnících* (v lat. originále *De Piscinis*) [2] uvádí pokyny pro stavbu hráze, z nichž vyplývá sklon obou líců 1:1, oproti minimálním hodnotám 1:3 na návodním a 1:2 na vzdušném líci doporučeným pro homogenní hráze normou ČSN 75 2410 Malé vodní nádrže [3]. Dalším důvodem, který lze zmínit, je právě dlouhá existence a s ní spojené dlouhé trvání procesů v hrázi se odehrávajících. Jedná se zejména o proudění vody tělesem hráze, které může být příčinou vnitřní eroze.

Na území České republiky došlo v posledních desetiletích k řadě havárií malých vodních nádrží, které upoutaly pozornost veřejnosti odborné i laické a přispěly k rozproudění diskuse o bezpečnosti těchto vodních děl. Nejčastější příčinou havárie je porucha hráze související s přelitím koruny. Takto například došlo k protžení devíti z deseti hrází na Blatensku při povodni v roce 2002 [4]. Neméně závažným problémem, který často vede k poruchám hráze, je ovšem vnitřní eroze jejího tělesa spojená s nadměrným průsakem. Nadměrný průsak může u hrází historických rybníků souviset s kratší délkou průsakové dráhy vyplývající z tvaru příčného profilu s prudšími sklony a ze skutečnosti, že voda hrázemi prosakuje po velmi dlouhou dobu. U řady hrází je tak nutno omezit průsak dodatečným těsněním.

Pro dodatečné těsnění hrází existuje řada technologií zahrnující přísyp, těsnící rohože, těsnící stěny, injektáže a podobně. Uvedené technologie jsou v případě hrází historických rybníků často nepoužitelné, neboť mohou významně ovlivnit vnější tvar či se technicky neslučují s vlastnostmi hráze a charakterem rybníka. Na pracovišti Fakulty stavební ČVUT v Praze je v rámci řešení výzkumného projektu NAKI II DG16P02M036 „Údržba, opravy a monitoring hrází historických rybníků jako našeho kulturního dědictví“ vyvíjena technologie stříkaného bentonitu, která by měla nedostatky technologií výše uvedených odstranit.

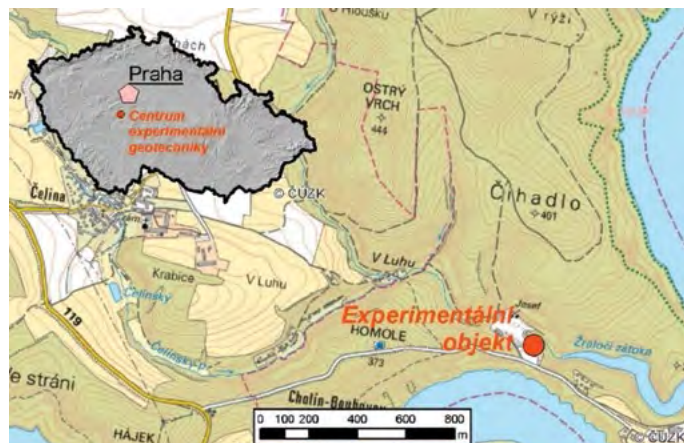
Technologie stříkaného bentonitu principiálně vychází z technologie stříkaného betonu, která je hojně využívána pro řadu účelů [5, 6, 7]. Využití technologie nástřiku je však v případě bentonitu zcela nové. Výzkum prováděný v minulých letech byl zaměřen jak na vývoj nové bentonitové směsi vhodné k danému účelu, tak na úpravy nástřikové technologie a testování vlastností nástřiku. V rámci výzkumu již byly realizovány první experimentální testy, jejichž výsledky jsou prezentovány v tomto článku. Experimentální ověření vlastností vyvinuté technologie bylo provedeno na fyzikálním modelu hráze v reálném měřítku tak, že byly porovnány hodnoty průsaků modelem hráze bez bentonitové těsnicí vrstvy a s ní.

## Experimentální objekt

Objekt pro experimentální testování hrází byl vystavěn na pracovišti Centra experimentální geotechniky (FSv ČVUT) v areálu štol Josefa v blízkosti Slapské vodní nádrže (viz obr. 1). Jedná se o železobetonovou stavbu ze ztraceného bednění na armované základové desce s tloušťkou 20 cm. Objekt se skládá ze dvou sekcí, z nichž každá je ze tří stran obestavěna zdmi o tloušťce 30 cm opatřenými hydroizolací stejně jako dno. První sekce má délku 8,9 m, druhá pak 14,8 m. Výška stěn činí 2,5 m a umožňuje tak experimenty na hrázích do této výšky. Obvodové zdi jsou pro zajištění stability v koruně svázané ocelovými profily I120 umístěnými kolmo na podélnou osu každé sekce. Z vnější strany je u vstupu do každé sekce vytvořen prostor pro umístění jímky sloužící k měření odtoku vody z hráze patním drénem. Objekt je znázorněn na obr. 2.

## Model hráze

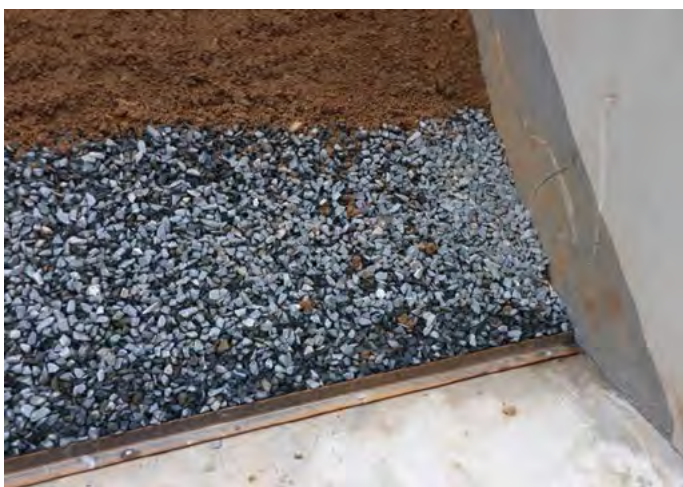
První pokusný model hráze byl vystavěn v kratší sekci s tím, že pro tento model byla zvolena geometrie hráze vycházející z Dubraviových doporučení. Konkrétně se jedná o šířku v patě, odpovídající trojnásobku šířky v koruně a sklon svahů 1:1. Vzhledem k tomu, že experiment byl prováděn s cílem ověřit těsnicí schopnosti stříkané bentonitové



Obr. 1. Experimentální objekt se nachází na pracovišti Centra experimentální geotechniky v blízkosti Slapské vodní nádrže ve Středočeském kraji



**Obr. 2. Objekt pro experimentální testování modelů hrází v reálném měřítku. Na zdi sekce v popředí je patrná hydroizolace, v pravé části snímku lze vidět prostor pro instalaci nádrže k jímání vody prosakující tělesem hráze**



**Obr. 3. Drén instalovaný u paty vzdušného líce pro potřeby odvedení vody prosakující tělesem hráze**

vrstvy, byl model hráze postaven z materiálu s vysokou propustností. Konkrétně se jedná o písek hlinitý (SM), který by s ohledem na vysokou propustnost tohoto konkrétního materiálu nebyl vhodný pro stavbu homogenní hráze, byť písek hlinitý norma ČSN 75 2410 jako vhodný uvádí. Konkrétně byla propustnost materiálu stanovena zpětně na základě měřených průsaků metodou dle Kudina [8] v rozmezí  $5 \cdot 10^{-5}$  až  $5 \cdot 10^{-4}$  m.s<sup>-1</sup>. Další důvod k tomu, že použitý konkrétní materiál by nebyl vhodný pro stavbu hráze, spočívá ve skutečnosti, že je nesoudržný a značně rozbředající při nasycení vodou. Pro potřeby odvádění prosakující vody z tělesa hráze byl u paty vzdušného líce instalován patní drén. Těleso drénu bylo provedeno ze šterku o frakci 32–64 (viz obr. 3), voda je z něj odváděna drážkou v základové desce a následně plastovou trubicou skrz zeď do prostoru jímky umístěné z vnější strany zdi.

### Instrumentace experimentu

S ohledem na cíl experimentu bylo nutno měřit dvě základní veličiny – úroveň hladiny vody ve zdrži, definující hydraulickou výšku, a odtok vody patním drénem. Úroveň hladiny vody ve zdrži byla přímo sledována pomocí ultrazvukového čidla TURCK T30UXIC s měřicím rozsahem 30–300 cm umístěného na koruně obvodové zdi. V případě měření množství prosakující vody bylo sledování zajištěno tak, že prosakující voda byla shromažďována v jímce, kde byla hladina měřena ultrazvukovým čidlem TURCK T30UXIA s měřicím rozsahem 10–100 cm. Pravoúhlá plastová jímka má půdorys 30 x 40 cm a výšku 32 cm. Vzestup hladiny o 1 mm tak představuje objem odtoku patním drénem 12 l. Vzhledem k tomu, že experimenty byly realizovány dlouhodobě, bylo nutno zajistit automatické prázdnění jímky po jejím naplnění. V první fázi bylo prázdnění zajišťováno prostřednictvím čerpadla a hladinového spínače. Po dosažení hladiny 30 cm bylo zapnuto čerpadlo, jehož chod byl nastaven na 30 s, což stačilo k vyprázdnění

jímky do úrovně hladiny cca 10 cm nade dnem. Tento způsob prázdnění se bohužel v průběhu experimentů ukázal jako nevhodný, protože se malé čerpadlo zajišťující prázdnění jímky zadřelo a spálilo díky jemným částicím materiálu transportovaným vodou. Takto došlo ke zničení dvou čerpadel v krátkém časovém rozmezí, a bylo tak nutno aplikovat jiné řešení. S ohledem na to byl změněn způsob prázdnění v tom smyslu, že voda je v současnosti odváděna pomocí násosky opatřené na horním konci v jímce sacím košem a na spodním konci elektromagnetickým ventilem MP116 - 2020 ¾. Tento ventil je ovládan automaticky prostřednictvím nastavení alarmu na dataloggeru měřicím úroveň hladiny vody v jímce při dosažení hladiny 30 cm nade dnem. Opětovné zavření je nastaveno tak, aby vypouštění ustalo po poklesu hladiny na úroveň 15 cm nade dnem. Výtok z násosky je umístěn ve spodní části svahu, nacházejícího se v těsné blízkosti objektu, přičemž výškový rozdíl jímky a výtoku z násosky činí cca 2,5 m. Aparatura pro sledování průtoku vody prosakující tělesem hráze je zobrazena na obr. 4, celkové schéma hlavních komponent experimentu pak na obr. 5. Doplnkově je experiment osazen měřením srážek a teploty a vlhkosti vzduchu za účelem případného dopočtu výparu vody z hladiny ve zdrži.

### Použitá technologie a materiál

Pro potřeby experimentu realizovaného s cílem ověření možností technologie stříkaného bentonitu byl použit materiál B75 REC MIX. Jedná se granulát vyrobený z bentonitu B75 se 75% obsahem montmorillonitu těženého v depozitu Černý Vrch (okr. Most). Materiál vykazuje velmi dobré vlastnosti s ohledem na granulometrické složení, jelikož toto složení je velmi blízké Fullerově křivce [9] popisující ideální rozložení velikostí zrn či granulí s ohledem na vyplnění prostoru. Zrnitostní složení použitého materiálu a jeho porovnání s Fullerovou křivkou a dalšími dostupnými materiály je znázorněno na obr. 6.

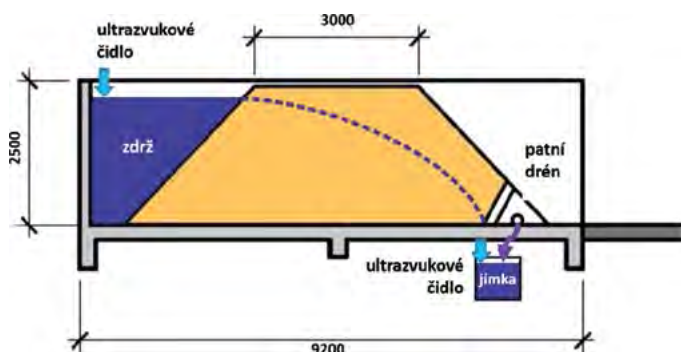
Technologie aplikace bentonitu stříkáním vychází z technologie stříkaného betonu. Pro potřeby aplikace bentonitu bylo nutno vyvinout novou trysku a otestovat ji pro daný účel. Nově vyvinutá tryska, která slouží pro mísení bentonitu hnaného přívodní hadicí stlačeným vzduchem s vodou, je zobrazena na obr. 7. Tryska umožňuje regulaci množství přidávané vody a další nastavení tak, aby bylo možné dosáhnout optimální vlhkosti aplikované směsi. Testování aparatury a parametrů nástřiku bylo publikováno v předchozích letech [10, 11].

### Průběh experimentu

Experiment zaměřený na ověření efektivity bentonitové těsnicí vrstvy byl realizován v měsících srpnu až říjnu. Nejprve bylo provedeno zkušební napuštění zdrže pro potřeby ověření stability hráze a konsolidace průsaku během měření bez aplikované bento-

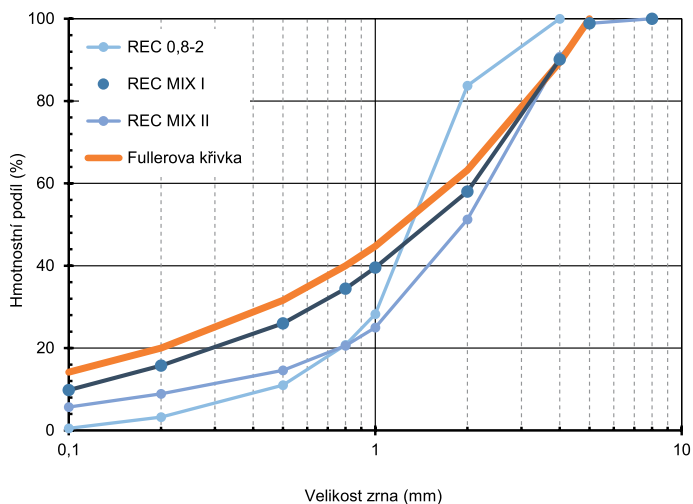


**Obr. 4. Jímka pro sběr průsakové vody vybavená ultrazvukovým senzorem pro sledování hladiny vody a vypouštěcí hadicí se sacím košem**



**Obr. 5. Schéma experimentální hráze a umístění senzorů pro sledování hladiny vody ve zdrži a množství průsakové vody**





Obr. 6. Granulometrické složení použitého materiálu a jeho srovnání s dalšími dostupnými materiály a Fullerovou křivkou



Obr. 7. Tryska pro aplikaci bentonitu technologií stříkání

nitové vrstvy. Následně byla voda ponechána samovolnému odtoku tělesem hráze. V další fázi byl prostor zdrže napuštěn vodou a poté byl sledován průsak tělesem hráze při drénování bez bentonitové těsnicí vrstvy pro různé úrovně hladiny vody ve zdrži.

V další fázi experimentu byl proveden nástřik bentonitové vrstvy na návodní líc experimentální hráze v celé jeho délce. S ohledem na technologii aplikace nemá výsledná těsnicí vrstva konstantní mocnost. Aby bylo tuto mocnost možné zjistit pro další hodnocení, bylo před aplikací a po ní provedeno nasnímkování celého modelu hráze pomocí bezpilotní kvadrokoptéry Phantom 4 Pro a následně byly pořízené snímky zpracovány v prostředí Agisoft Photoscan do podoby podrobných 3D modelů. Jejich porovnáním bylo zjištěno, že se mocnost aplikované vrstvy pohybovala v rozmezí cca 1 až 3 cm. Po

aplikaci bentonitu byla zdrž napuštěna vodou a následně probíhalo prázdnění zdrže průsakem tělesem experimentální hráze při měření úrovně hladiny vody ve zdrži a ve sběrné jínce.

### Výsledky

Výstupem experimentu byl soubor dvojic hodnot představujících úroveň hladiny vody ve zdrži a jí odpovídající hodnotu hladiny vody v jínce. Do následného vyhodnocení nebyly zahrnuty údaje z měření při plnění zdrže, jelikož hodnota průsaku při plnění je ovlivněna sycením zemního tělesa. V průběhu obou částí experimentu došlo k problémům s měřením, které spočívaly zejména ve výpadcích napájení měřicí soustavy a ve výpadcích prázdnění jímkou pro sběr drenážní vody, což způsobilo neúplnost měření



Centrum AdMaS je moderní výzkumné centrum a multidisciplinární vědecká instituce Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

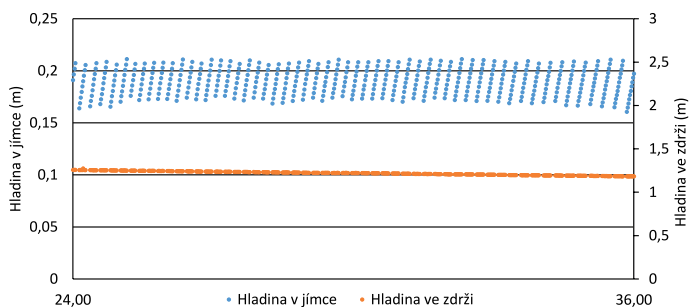
Výzkumná skupina EGAR, která je jeho součástí, se zabývá aplikovaným výzkumem v oblastech technologií životního prostředí, geotechniky a geodzie. V oblasti městského inženýrství jsou předmětem zájmu výzkumné činnosti a smluvního výzkumu technologie nakládání s odpadními vodami, pitnou vodou, nakládání s odpady, navrhování, měření, diagnostika a vyhodnocování technického stavu inženýrských sítí, chemie pitné a odpadní vody, apod. Více viz [www.admas.eu](http://www.admas.eu)

### Nabídka činností:

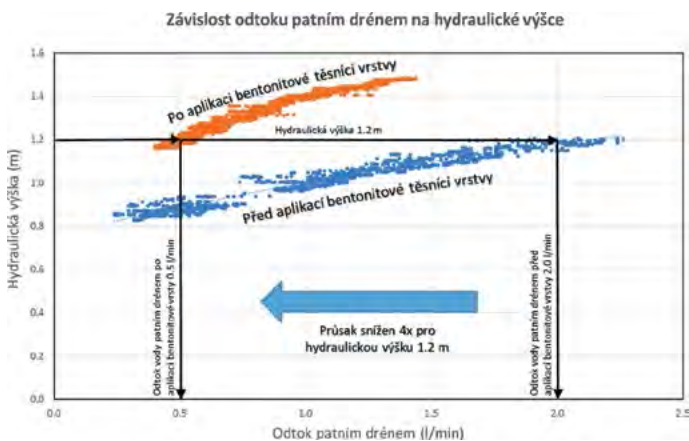
- studie odkanalizování
- znalecká činnost
- monitoring kanalizací a ČOV
- energetické audity
- mikropolutanty (AOP technologie)
- stanovení ceny VH majetku, ceny za provozování
- modelování v rámci SW WEST a MIKE URBAN pro kanalizaci a vodovod
- atd.



Centrum AdMaS / Fakulta stavební VUT v Brně / Purkyňova 139/651 / 612 00 / Brno / IČ: 00216305, DIČ: CZ00216305 / [www.admas.eu](http://www.admas.eu) / prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc. MBA / T: +420 602 721 273 / E: [hlavinek.p@fce.vutbr.cz](mailto:hlavinek.p@fce.vutbr.cz)



Obr. 8. Část záznamu měření hladin ve zdrži a v jímce po odfiltrování hodnot měřených v průběhu prázdnění jímky



Obr. 9. Srovnání průsaku experimentální hráze před aplikací těsnicí bentonitové vrstvy a po ní

s ohledem na rozsah hladin ve zdrži. Měřená data bylo dále nutno očistit od hodnot naměřených v průběhu prázdnění jímky, což bylo provedeno odfiltrováním záznamů, pro které platilo, že předchozí hodnota hladiny vody v jímce byla vyšší. Stejně tak byly odfiltrovány záznamy, které s hodnotami odpovídajícími poklesu vody v jímce sousedily, jelikož již ty mohly být naměřeny v průběhu prázdnění, i když nepředstavovaly pokles. Na obr. 8 je znázorněna část záznamu průběhu obou sledovaných veličin očištěná od hodnot naměřených během prázdnění jímky.

Průsak tělesem hráze byl v každém měřeném časovém okamžiku stanoven na základě přírůstku hladiny v rozmezí předchozí a následující naměřené hodnoty. Při půdorysném rozměru jímky 30 x 40 cm představuje přírůstek hladiny 1 mm odtok vody drénem 0,12 l. Průtok tak byl stanovován jako podíl objemu odtoku mezi dvěma sousedními měřeními a časového kroku. Pro potřeby porovnání průsaku hráze bez bentonitové těsnicí vrstvy a s ní byl graficky znázorněn vztah mezi úrovní hladiny ve zdrži (hydraulickou výškou) a odtokem patním drénem (viz obr. 9).

S ohledem na technické problémy nepokrývá ani jedna z řad celý rozsah hloubek vody ve zdrži. Překryv se vyskytuje pro hydraulickou výšku kolem 1,2 m. Při porovnání průsaků odpovídajících této hodnotě je patrné, že díky bentonitové těsnicí vrstvě došlo ke snížení průsaku hráze na čtvrtinu.

## Závěr

V tomto příspěvku jsou prezentovány první výsledky výzkumu zaměřeného na vývoj bentonitového těsnění aplikovaného stříkanou technologií. Dosavadní poznatky lze rozdělit na dvě části. První skupina poznatků souvisí s provozem experimentů na modelech hráze v reálném měřítku. Během prvních experimentů došlo k technickým komplikacím, které zapříčinily ztrátu části měřených dat či znemožnily jejich využití tím, že tato data byla zkrácena (výpadky napájení, ohřívání ultrazvukových čidel slunečním zářením a s ním související zkrácení dat v důsledku teplotní kompenzace čidla apod.). Na základě těchto poznatků bylo možno všechny chyby odstranit, což bylo ověřeno pokusným napuštěním a vypuštěním dalšího modelu hráze, při kterém se nevyskytl žádný problém. Hlavním poznatkem samozřejmě je ověření funkčnosti bentonitové těsnicí vrstvy, která i při malé mocnosti vykazuje velmi dobré těsnicí vlastnosti. V rámci dal-

šího výzkumu bude funkčnost těsnicí vrstvy ověřována i na modelu hráze s mírnějšími sklony svahů. Mimo to budou testovány i způsoby ochrany těsnicí vrstvy před jejím porušením.

**Poděkování:** *Prezentovaný nástroj vznikl jako výsledek výzkumu realizovaného v rámci výzkumného projektu NAKI II DG16P02M036 „Údržba, opravy a monitoring hrází historických rybníků jako našeho kulturního dědictví“, který je financován Ministerstvem kultury ČR.*

## Literatura/References

- [1] Míka, A. (1963). *Naše rybníky a přehradní jezera*. Praha: Orbis, 96 s.
- [2] Dubravius, J. (1953) *O rybnících* (překlad A. Schmidtová). Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 77 s.
- [3] ČSN 75 2410 *Malé vodní nádrže*, duben 2011, 48 s.
- [4] Říha, J. (2004) Comments on failures of small dams in the Czech Republic during historical flood events. In *Long-term benefits and performance of dams: Proceedings of the 13th Conference of the British Dam Society and the ICOLD European Club meeting held at the University of Kent, Canterbury, UK from 22 to 26 June 2004*. Thomas Telford Publishing, s. 597–608.
- [5] Allen, R. T. L.; Edwards, S. C.; Shaw, D. N. (Eds.). (1992) *Repair of concrete structures*. CRC Press, 228 s.
- [6] Mindess, S. (Ed.). (2014) *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*. Elsevier, 308 s.
- [7] Thomas, A. (2008) *Sprayed concrete lined tunnels*. CRC Press, 274 s.
- [8] Šálek, J.; Míka, Z.; Tresová, A. (1989) *Rybníky a účelové nádrže*. Praha: SNTL, 267 s.
- [9] Fuller, W. B.; Thompson, S. E. (1907) The laws of proportioning concrete. *Asian Journal of Civil Engineering Transport*, s. 67–143.
- [10] Štáštka, J.; David, V. (2018) The Testing of a Sprayed Bentonite Sealing Layer. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* (Vol. 2, No. 11, p. 666).
- [11] Štáštka, J.; David, V.; Černochová, K. (2018) Preparation for the Final Testing of the Sprayed Bentonite Sealing Layer of a Pond Dam. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 65, p. 02008). EDP Sciences.

Ing. Václav David, Ph.D.<sup>1)</sup>

(autor pro korespondenci)

Ing. Kateřina Černochová<sup>1,2)</sup>

Ing. Jiří Štáštka, Ph.D.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Katedra hydromeliiorací a krajinného inženýrství

<sup>2)</sup>Centrum experimentální geotechniky

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice

vaclav.david@fsv.cvut.cz

224 354 743

*Application of bentonite for sealing fishpond dams using sprayed technology (David, V.; Černochova, K.; Štáštka, J.)*

## Abstract

This paper presents the development of the bentonite sealing layer intended to reduce seepage through the dams of historical fishponds. The sealing layer is applied using spraying technology. For this purpose, a new nozzle was developed as well as new bentonite material named B75 REC MIX I. Both; the technology and material; were tested on a model dam in real scale, which was built as a 2.5 m wide section with a height of 2.5 m having both slopes 1:1. The model dam was built of relatively permeable material, which was expected to emphasize the sealing properties of the applied sealing layer. The experiment consisted in filling the reservoir and letting it drain through the dam before and after the application of the sealing layer. The results of the presented experiment indicate that the applied sealing layer can significantly reduce seepage through the dams.

## Key words

bentonite – sprayed technology – fishpond – dam – seepage

Tento článek byl recenzován a je otevřen k diskusi do 29. února 2020. Rozsah diskusního příspěvku je omezen na 2 normostrany A4, a to včetně tabulek a obrázků. Příspěvky posílejte na e-mail stransky@vodnihospodarstvi.cz.