



Těsnění hrází malých vodních nádrží stříkaným bentonitem

certifikovaná metodika pro praxi

Václav David a kolektiv

Václav David a kolektiv

Těsnění hrází malých vodních nádrží stříkaným bentonitem

certifikovaná metodika pro praxi

Metodika byla zpracována na pracovišti Fakulty stavební ČVUT v Praze v rámci řešení výzkumného projektu NAKI II DG16P02M036 “Údržba, opravy a monitoring hrází historických rybníků jako našeho kulturního dědictví“.



Vydalo ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2020

ISBN 978-80-01-06805-2

Kolektiv autorů:

Ing. Václav David, Ph.D. ¹⁾

Ing. Kateřina Černochová ^{1), 2)}

Ing. Jiří Štástka, Ph.D. ²⁾

¹⁾ České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

²⁾ České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky

Odborní oponenti:

Ing. Stanislav Žatecký, Vodní díla – TBD, a.s.

Ing. František Pavlík, Ph.D., Státní pozemkový úřad

Metodika byla uznána osvědčením Odboru státní správy ve vodním hospodářství a správy povodí Ministerstva zemědělství České republiky pod č. j. 02/2021.

Obsah

1	Úvod	5
1.1	Cíl metodiky	5
1.2	Stručný popis metodiky a novost postupů	6
1.3	Uplatnění metodiky	6
1.4	Přínosy metodiky a ekonomické aspekty	7
2	Bentonit jako materiál	9
2.1	Granulát	10
2.2	Směs	11
3	Technologie nástřiku	15
3.1	Příprava podkladu	15
3.2	Vybavení pro aplikaci	15
4	Provádění těsnění pomocí nástřiku	19
4.1	Příprava nástřiku	19
4.2	Aplikace bentonitu	20
4.3	Kontrola provedení	20
4.4	Ochrana bentonitové těsnicí vrstvy	21
5	Účinnost technologie	25
5.1	Experimentální objekt	25
5.2	Postup ověření	26
5.3	Výsledky experimentu	27
6	Závěr	31
7	Použitá literatura a zdroje	33
7.1	Literatura	33
7.2	Normy a předpisy (použité a související)	34
8	Seznamy	35
8.1	Použité zkratky	35
8.2	Obrázky	37

1 Úvod

Tato metodika vznikla jako výstup výzkumného projektu NAKI II DG16P02M036 “Údržba, opravy a monitoring hrází historických rybníků jako našeho kulturního dědictví“. Představuje novou technologii těsnění zemních hrází malých vodních nádrží pomocí stříkaného bentonitu. Důvodem k vývoji této metody byla potřeba rozšíření možností v rámci omezování zvýšených průsaků hrázemi rybníků a malých vodních nádrží. Rybníky se na území České republiky nachází již po staletí, první byly zakládány již před více než tisíciletím (Míka, 1963). Největší množství rybníků pak bylo postaveno v tzv. zlaté éře rybníkářství, která je obvykle vymezována jako šestnácté století, případně je zahrnována i druhá polovina století patnáctého. Rybníční hráze jsou tedy mnohdy velmi starými konstrukcemi, které byly realizovány manuálně s využitím pouze ručních nástrojů. Dovednost tehdejších stavitelů rybníků je bezesporu obdivuhodná, ovšem ve srovnání se současností byly tehdejší možnosti omezené. Stejně tak nebylo možné provádět exaktní analýzy používaných materiálů nebo provádět kontrolu provedené práce pomocí technických zkoušek.

Jelikož se jedná o zemní tělesa, je prosakování vody zcela přirozeným jevem, který není sám o sobě nežádoucí. Problém nastává ve chvíli, kdy začne docházet k růstu intenzity průsaku či kdy vzniká průsak lokalizovaný. Pokud taková situace nastane, je zapotřebí provést zatěsnění tělesa hráze, aby nedošlo k většímu narušení, případně havárii. Naopak zatěsňování z důvodu přílišného úniku vody z nádrže je výjimečné.

V případě historických rybníků je často žádoucí zachovat jejich původní ráz a neměnit tvar jejich hráze i zachovat vzrostlé stromy, které jsou někdy i vyhlášeny a chráněny jako památné.

1.1 Cíl metodiky

Cílem metodiky je představit zcela novou metodu pro těsnění zemních hrází malých vodních nádrží. Tato metoda vznikla jako součást řešení projektu NAKI II DG16P02M036 „Údržba, opravy a monitoring hrází historických rybníků jako našeho kulturního dědictví“. V rámci metodiky je metoda podrobně představena včetně popisu postupu její aplikace. Zahrnuta je i kapitola prezentující účinnost metody ověřenou na experimentálních hrázových tělesech v podobě 2.5 m širokých sekcí v reálném měřítku. Možností těsnění zemních hrází s narušenou filtrační stabilitou existuje celá řada. V mnoha případech se však jejich aplikace nevyhne výraznému zásahu do tvaru tělesa hráze. S ohledem na historický charakter hrází velkého množství rybníků na území současné České republiky je v mnoha případech velmi žádoucí zachovat jejich současný ráz a nenarušovat jej

zásahy do jejich tvaru. Dalším důležitým aspektem je skutečnost, že na mnoha hrázích se nachází cenné stromy, které by bylo nutné v případě použití některých konvenčních metod těsnění nutné odstranit. Cílem nově vyvinuté metody je tak nabídnutí alternativního řešení pro dodatečně těsnění zemních hrází, které navíc je založeno na využití čistě přírodního materiálu, kterým je bentonit.

1.2 Stručný popis metodiky a novost postupů

Tato metodika obsahuje především popis aplikace nově vyvinuté metody stříkaného bentonitu pro potřeby těsnění zemních hrází. Tato nově vyvinutá metoda vychází z metody stříkaného betonu (suchá varianta) s tím, že metoda stříkaného betonu byla upravena pro použití bentonitu, což znamená mimo jiné i technický vývoj zcela nové aplikační trysky. Výhodou metody je, že zajišťuje utěsnění zemního tělesa dvěma způsoby. Zprv je na návodním líci vytvořena vrstva materiálu s velmi nízkou propustností. Zadruhé pak částice bentonitu utěsňují samotné zemní těleso poté, co jsou do něj vpraveny vodou, která proudí ze zdrže tělesem hráze. Díky bobtnavosti bentonitu dochází k vyplnění pórů v zemině hráze a snižování její propustnosti.

Mimo samotný popis postupu provádění těsnění stříkaným bentonitem je v metodice zahrnuto i představení bentonitu jako materiálu, popis jeho základních vlastností a konkrétních charakteristik bentonitů dostupných z ložisek nacházejících se v České republice.

V neposlední řadě zahrnuje metodika i výsledky ověření funkčnosti nové technologie na sekčním modelu zemní hráze v reálném měřítku. Model byl vytvořen právě pro potřeby ověření technologie ve víceméně reálných podmínkách na pracovišti Centra experimentální geotechniky Fakulty stavební ČVUT u štoly Josef v blízkosti Slapské přehrady.

1.3 Uplatnění metodiky

Metodika najde uplatnění především v případech oprav a rekonstrukcí zemních hrází malých vodních nádrží s poruchami filtrační stability. Je určena především pro plošnou aplikaci na návodní líce hrází, uplatnit ji lze ovšem i v případě lokalizovaných průsaků, pakliže je známo, kde se nachází začátky preferenčních průsakových drah. V takovém případě lze metodu stříkaného bentonitu použít tak, že v místě nadměrného vnikání vody do tělesa hráze na návodním líci je odstraněna část materiálu hráze, výkop je upraven a zhutněn a na toto místo je pak nástřikem aplikován bentonit. Bentonit je pak vhodné přesypat běžným materiálem a případně opevnit. Jedná se v podstatě o obdobu mělké podpovrchové injektáže s tím, že není nutné provádět vrty, což může být u historických rybníků komplikované.

1.4 Přínosy metodiky a ekonomické aspekty

Hlavní přínos nově vyvinuté metody spočívá ve skutečnosti, že je ji možné využít i v situacích, kde dosud běžně používané technologie použitelné nejsou. Jedná se především o situace, kdy není žádoucí významným způsobem zasahovat do tělesa hráze nebo dokonce měnit její tvar. Na rozdíl od většiny ostatních technologií navíc nevyžaduje kompletní očištění tělesa hráze a odstranění stromů. Stříkaný bentonit lze totiž úspěšně aplikovat i kolem vzrostlých stromů (pokud jsou v dobrém zdravotním stavu), a to bez omezení funkčnosti těsnící vrstvy.

Metoda je mimo to založena na čistě přírodním materiálu (bentonit), což je výhodné především z toho důvodu, že umělé materiály jsou u staveb rybníků a malých vodních nádrží, které jsou zpravidla více či méně přírodním prvkem v krajině, poměrně nevhodné. Využití bentonitu není zcela výjimečné, používají se například bentonitové rohože či matrace. U těch je však omezena možnost aplikace na neurovnané povrchy či svahy se stromy. Oproti stříkané technologii je pak náročnější i provádění spojů mezi jednotlivými pásy.

Z hlediska nákladů není navržená technologie dražší než ostatní metody. Vyčíslení obecně náklady na zatěsnění hrází jednotlivými dostupnými technikami není možné, protože výsledná cena je závislá na řadě faktorů (doprava, použitá technika, materiál, rozsah prací apod.). Finanční náklady na použití technologie stříkaného bentonitu se orientačně pohybují kolem cca 500 Kč/m² (materiál, technika, pracovní síla apod.). V případě bentonitových rohoží se cena pohybuje od 250 do 500 Kč/m² i výše jenom za materiál, Celková cena tohoto typu opatření tak je srovnatelná nebo vyšší než v případě stříkaného bentonitu.

2 Bentonit jako materiál

Bentonit je přírodní materiál patřící mezi bobtnavé jíly. Jíly jsou obecně materiály složené převážně z jemnozrnných minerálů a vyznačují se tím, že jsou velmi plastické při odpovídajícím zvlhčení a tvrdnou při vysušení (Guggenheim a Martin, 1995). Jíly patří mezi fylosilikáty a jsou složené z více než poloviny z jílových minerálů, dále pak mohou obsahovat doprovodné minerály, oxidy a hydroxidy. Doprovodné minerály mohou významně ovlivňovat plasticitu.

Bobtnavé jíly se vyznačují specifickým poměrem jednotlivých jílových minerálů, díky němuž mohou absorbovat vodu a tím měnit objem, tedy tzv. bobtnat. Rozlišuje se několik skupin jílových minerálů. Z pohledu potřebných geotechnických vlastností pro těsnění je zajímavá skupina smektitů, do které náleží minerál montmorillonit. Právě tento minerál stojí za výraznou bobtnací schopností bentonitu. To je dáno formací struktury smektitů a výraznou schopností výměny kationtů. Mechanismus bobtnání bentonitu je založen na adsorbci výměnných kationtů na záporné nabitých vrstvách smektitů. Po styku s vodou jsou tyto kationty hydratovány a tím se jednotlivé vrstvy od sebe oddalují. Míra oddálení závisí na typu formace struktury, typu výměnného kationtu a množství dostupné vody. Tím, jak se od sebe jednotlivé vrstvy oddalují, nabývá materiál na objemu. Na bobtnací schopnost a propustnost bentonitu mají vliv dva aspekty. Těmi jsou procentuální podíl smektitu a to, jaký dominantní prvek se v materiálu vyskytuje. V závislosti na dominantním prvku se rozlišují sodné a vápenaté bentonity. Při stejném i nižším procentuálním zastoupení smektitu, sodné bentonity vykazují výrazně nižší hodnoty hydraulické vodivosti než bentonity vápenaté (Danaj, Frankovská a Janotka, 2005). Sodné bentonity se v České republice nevyskytují. Na našem území se nachází ložiska vápenatého a vápeno-hořečnatého bentonitu. V případě všech typů bentonitu platí, že se vzrůstajícím podílem montmorillonitu klesá jejich propustnost.

Nejdůležitějšími geotechnickými vlastnostmi pro těsnění hrází je bobtnací tlak, který je spojen s bobtnáním a propustnost, která charakterizuje schopnost materiálu propouštět vodu. Bobtnací tlak udává míru schopnosti utěsnit volný prostor a vytvořit velmi málo propustnou souvislou vrstvu. V laboratorních podmínkách se bobtnací tlak stanovuje ve speciálních komorách, při zamezení deformace vzorku. Pomocí senzorů se poté měří tlak, kterým působí nasycený materiál na stěny válečku, ve kterém je vzorek umístěn. V případě stříkaného bentonitu nedochází k zamezení deformace a materiál má neomezený prostor pro změnu objemu. Současně s utěsněním případného volného prostoru mezi materiálem hráze a nastríkaného bentonitu dochází k nabývání objemu a bentonitová vrstva se stává kompaktní. V závislosti na typu bentonitu a objemové

hmotnosti sušiny je tento materiál schopný vyvinout bobtnací tlak až 30 MPa. Těchto hodnot může nabývat bentonit zhuťněn na objemovou hmotnost $1,7 \text{ g.m}^{-3}$ a více. V případě českého bentonitu B75 byly měřeny hodnoty bobtnacího tlaku kolem 11 MPa (Hausmannová a Vašíček, 2014) pro objemovou hmotnost $1,7 \text{ g.m}^{-3}$. Pro potřeby těsnění hrází bentonitem není nutné klást na bobtnací tlak tak vysoké nároky. Dostatečný bobtnací tlak za účelem vytvoření souvislé velmi málo propustné vrstvy vyvíjí již volně sypaný bentonit o objemové hmotnosti sušiny 1 g.m^{-3} . Objemová hmotnost sušiny bentonitu, naneseného na povrch stříkanou technologií je ze své podstaty vyšší než tato hodnota a pohybuje se kolem hodnoty $1,2 \text{ g.m}^{-3}$. Této objemové hmotnosti odpovídá bobtnací tlak více než 1 MPa. Požadovaná hodnota bobtnacího tlaku pro účely těsnění je alespoň 0,5 MPa (Štástka, David a Černochová, 2018).

Se schopností bentonitu bobtnat, vyvíjet vysoký bobtnací tlak a utěsnit volný prostor přímo souvisí velmi nízká propustnost tohoto materiálu. Nasycená hydraulická vodivost bentonitu závisí opět na objemové hmotnosti sušiny. Platí zde nepřímá úměra, kdy se zvyšující se objemovou hmotností sušiny klesá propustnost materiálu. Hodnoty propustnosti bentonitu zhuťněného na objemovou hmotnost sušiny kolem $1,7 \text{ g.m}^{-3}$ se pohybují v řádu až $10^{-14} \text{ m.s}^{-1}$ v závislosti na typu bentonitu. Hodnoty propustnosti českého bentonitu B75 zhuťněného na objemovou hmotnost sušiny kolem $1,7 \text{ g.m}^{-3}$ se pohybují v řádu až $10^{-13} \text{ m.s}^{-1}$ (Hausmannová a Vašíček, 2014). Pro potřeby těsnění hrází se požadované hodnoty propustnosti pohybují v řádu $10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$ (Štástka, David a Černochová, 2018). Pro objemovou hmotnost sušiny $1,2 \text{ g.m}^{-3}$, která odpovídá objemové hmotnosti materiálu aplikovaného na povrch technologií stříkaného bentonitu, byla laboratorně stanovena hodnota propustnosti v řádu $10^{-12} \text{ m.s}^{-1}$.

2.1 Granulát

Pro aplikaci těsnicí vrstvy technologií stříkaného bentonitu se využívá bentonit ve formě různě zrnitého granulátu. Pro účely praktického testování byl využit český bentonit z ložiska Černý vrch s označením B75. Jedná se o vápeno-hořečnatý bentonit s obsahem montmorillonitu kolem 75 % (Štástka a David, 2018).

Podstatou výroby různě zrnité granulované směsi je homogenizace zbytkového materiálu z předchozí výroby, jeho zhuťnění pomocí válců, čímž se vytvoří pláty, které jsou poté vysušeny a rozrušeny za účelem vytvoření menších částí, tzv. čoček. Granule jednotlivých velikostních tříd se poté vyrábí na speciálních mlýnech, kde je možné nastavit velikost frakce. Technologie výroby granulované směsi je podrobně popsána v (Štástka, 2018).

2.2 Směs

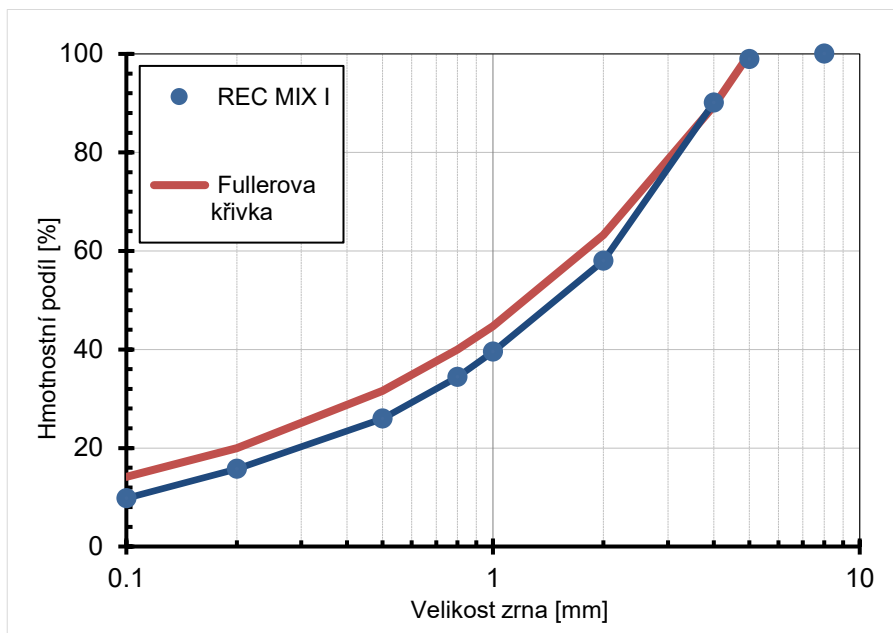
Za účelem využití technologie stříkaného bentonitu byla vyvinuta směs granulátu o určitém procentuální zastoupení jednotlivých velikostí zrn s ohledem na nároky použité technologie. Hlavními požadavky na směs byla maximální velikost zrna a tvar zrnitostní křivky. Maximální velikost zrna i zrnitostní složení směsi bylo zvoleno s ohledem na nároky na těsnicí vrstvu a na technické možnosti a efektivitu fungování technologie. Podstatou technologie je vhánění materiálu pomocí stlačeného vzduchu do trysky, kde je pomocí ventilu dodávána ke směsi voda. Množství vody vstupující do trysky je možné redukovat. Na míře zvlhčení závisí nejen výsledná objemová hmotnost aplikované vrstvy, ale také technická proveditelnost. Ta spočívá v požadavku na co nejmenší prašnost v průběhu aplikace vrstvy, to znamená, že je nutné dodat do směsi dostatečné množství vody za účelem snížení prašnosti. Naopak se zvyšující se vlhkostí aplikované těsnicí vrstvy se snižuje její objemová hmotnost, na které závisí propustnost, která se tím zvyšuje. Cílem bylo nalézt směs o takovém procentuálním zastoupení velikosti jednotlivých zrn, která při daném zvlhčení vykazuje nejvyšší objemovou hmotnost a co nejmenší prašnost při aplikaci. Spolehlivé fungování vrstvy je zajištěno jen v případě, kdy má směs takové zrnitostní složení, že se dostane optimální množství vody ke každému zrně směsi. To znamená, že je zachována velmi nízká propustnost vrstvy při nízké prašnosti v průběhu aplikace.

Dalším požadavkem na směs bylo co nejvíce se křivkou zrnitosti přiblížit Fullerově křivce. Bylo testováno několik směsí a nejlépe všechny tyto požadavky splňuje směs nazvaná B75 REC MIX I o zrnitosti 0 – 9 mm. Vhodnost této směsi pro využití technologie stříkaného bentonitu byla experimentálně ověřena. Na Obr. 1 je zobrazena směs B75 REC MIX I.



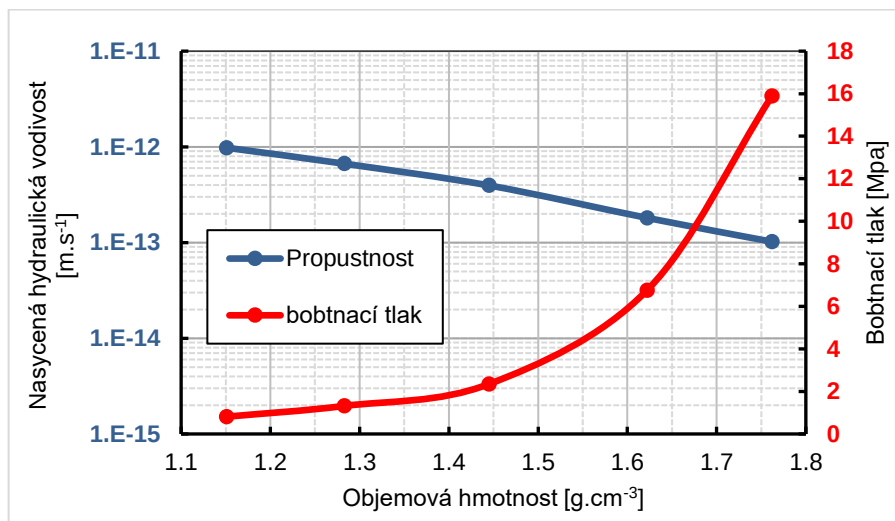
Obr. 1 Směs B75 REC MIX I, vyvinuta pro technologii stříkaného bentonitu

Na Obr. 2 je porovnání křivky zrnitosti výsledné směsi B75 REC MIX I a ideální křivky zrnitosti podle Fullera. Tato křivka je popsána v (Fuller, W. B., Thompson, S. E., 1907)



Obr. 2 Porovnání křivky zrnitosti směsi B75 REC MIX I a křivky podle Fullera

Pro vyvinutou směs B75 REC MIX I byly také laboratorně stanovené křivky závislosti hodnot geotechnických parametrů na objemové hmotnosti sušiny. Z těchto parametrů byla věnována pozornost zejména bobtnacímu tlaku a propustnosti. Po odběru vzorku z aplikované těsnicí vrstvy a stanovení objemové hmotnosti sušiny je možné na základě těchto křivek stanovit propustnost nanesené vrstvy. Laboratorně stanovené křivky závislosti jsou zobrazeny na Obr. 3.



Obr. 3 závislost nasycené hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti B75 REC MIX I

3 Technologie nástřiku

Technologie aplikace bentonitu pomocí nástřiku vychází z technologie pro tzv. suchý způsobu nástřiku betonové směsi, která je známá a běžně využívána, popisuje ji např. (Thomas, A., 2008). V principu je technologie založena na přívodu směsi vzduchu s bentonitem do trysky, ve které je k této směsi přidávána voda. Výsledná směs bentonitu se vzduchem a vodou je pak tryskou stříkána na povrch, který má být utěsněn.

3.1 Příprava podkladu

Podklad je nutné očistit od vegetace a odstranit uvolněné rozrušené kusy půdy, které by neumožnily spojení bentonitové vrstvy s pevným podkladem. Také je vhodné, aby se na povrchu nevyskytovaly větší kameny. Lepšího přilnutí bentonitové vrstvy k podkladu je možné dosáhnout zvlhčením podkladu vodou, to je možné provést běžným postřikovačem. Navlhčením povrchu je možné také dosáhnout snížení prašnosti v průběhu aplikace

3.2 Vybavení pro aplikaci

Nástřiková aparatura se skládá především, mimo dopravních hadic různého druhu, z těchto součástí:

- kompresor
- vzdušník
- torkretovací stroj (dávkovač bentonitu)
- přívod vody s průtokoměrem
- tryska

3.2.1 Kompresor se vzdušníkem

Lze využít elektrický nebo naftový kompresor. Požadavky na kompresor jsou dány požadavky stroje na stříkání materiálu tzv. torketovacího stroje. Sledovanými parametry kompresoru jsou výkon v m³/hod (minimálně 0,5) a tlak vzduchu (0,5 až 0,6 MPa). Při testování technologie byl používán vzdušník o objemu 1 m³, který se prokázal jako dostatečný. Hlavním úkolem vzdušníku je omezit vzduchové rázy způsobené zapínáním a vypínáním kompresoru.

3.2.2 Torkretovací stroj

Torkretovací stroj slouží pro potřeby dodávky suché směsi k trysce. Ke stroji je připojen přívod tlakového vzduchu, do kterého je přidávána aplikovaná směs. Ta je přidávána do násypky, ze které propadává do kapes dávkovacího bubnu umístěného pod ním. Z dávkovacího bubnu je pak směs unášena k vyfukovači

a dále do výstupní dopravní hadice připojené k trysce. Stroj je zpravidla vybaven vibračním zařízením pro usnadnění dodávky směsi do dávkovacího bubnu. Výkon (dopravované množství) lze dle typu stroje případně regulovat různými způsoby (změna otáček, variátorová řemenice, frekvenční měnič, ventil na vzduchovém pohonu). Směs je do torkretovacího stroje doplňována buď manuálně, nebo s pomocí mechanizace (např. pásový dopravník).

3.2.3 Přívod vody s průtokoměrem

Další důležitou součástí nástřikové aparatury je přívodní hadice pro vodu osazená průtokoměrem, který umožňuje kontrolu dodávaného množství vody k trysce. Při aplikacích bylo odzkoušeno, že je nutné pravidelně přítok trysce kontrolovat a případně kohoutem u průtokoměru regulovat.



Obr. 4 Průtokoměr s regulačním kohoutem a manometrem.

3.2.4 Tryska

Pro aplikace na hráze malých vodních nádrží byl vyvinut funkční vzorek „Tryska pro aplikaci jílových směsí pro potřeby sanace poruch historických rybníků“ (viz Obr. 5). Funkční vzorek trysky tvoří pět hlavních částí, a to:

- hubice trysky,
- těleso trysky,
- vodní kroužek,
- přívod bentonitu a vzduchu
- přívod vzduchu a vody.

Nová tryska se od trysek používaných pro stříkání betonu liší především ve tvaru vodního kroužku, a to tím, že je zúžený a následně opět rozšířený. To způsobuje uvolnění tlaku v proudě vzduchu a bentonitu v rozšíření vodního kroužku a v rozšíření pak vzniká podtlak. Je to vhodnější místo, oproti běžně dostupným tryškám pro dávkování vody se vzduchem. Nová tryska je též doplněna přívodem tlakového vzduchu od kompresoru a vody současně.

Není známo, že by kombinace těchto dvou úprav trysek pro nástřik betonové směsi byly dosud zkoušeny, tyto inovace jsou tedy i předmětem vyvinutého funkčního vzorku.



Obr. 5 Funkční vzorek „Tryska pro aplikaci jílových směsí pro potřeby sanace poruch historických rybníků“ v laboratořích Fakulty stavební

4 Provádění těsnění pomocí nástřiku

4.1 Příprava nástřiku

4.1.1 Podklad

Pro potřeby nástřiku bentonitové těsnicí vrstvy je zapotřebí, aby podklad byl očištěn od vegetace, vhodné je i odstranit nakypřenou či narušenou zeminu na povrchu, případně kamenné opevnění. V případě zeminy se jedná zejména o zeminu se zbytky kořenů či zeminu, do které je možné rukou zatlačit geodetický kolík – zašpičatělý dřevěný hranol 3x3 cm. Detailně může potřebnou míru očištění posoudit geotechnik s přihlédnutím k vlastnostem materiálu hráze. Nástřik je prováděn proudem směsi bentonitu s vodou a vzduchem, která je do trysky přiváděna pod tlakem a je z ní tedy vypouštěna velkou rychlostí. Díky tomu může docházet k narušování podkladu a uvolňování značného množství částic, což vede k vysoké prašnosti. Tomu se dá do značné míry zabránit zvlhčením povrchu, na který je bentonit aplikován. Ke zvlhčení je možno použít běžné postřikovače. Zvlhčení navíc přispívá k lepšímu provázání aplikovaného bentonitu s podkladem.

4.1.2 Zdroje

Pro potřeby nástřiku je předně nutno zajistit zdroj vody. Tu je možné odebírat z vodovodního řadu, pokud je dostupný. Tuto možnost je možno primárně doporučit, protože zaručuje vodu bez nežádoucích příměsí či látek. V případě, že není možné odebírat vodu z vodovodního řadu, je možno použít vodu z jiného zdroje, předem je však nutno posoudit její kvalitu. Tyto zdroje představují především vodoteče, případně dovezené nádrže. Jelikož se tato metodika zabývá aplikací bentonitu na hráze rybníků, lze předpokládat, že se v blízkosti vodní tok nachází. Dovážení vody v nádržích tak připadá v úvahu pouze v případě, že je voda v toku nevyhovující či jí není dostatek.

V případě vody přidávané v trysce k bentonitu je nutné zajistit její dostatečné množství. Konkrétně je zapotřebí zajistit přítok vody v množství cca 100 l·hod⁻¹. Mimo to je velmi žádoucí, aby přítok vody do trysky byl vyrovnaný. V tomto ohledu může být použito čerpadlo s tlakovou nádobou poskytující tlak na výstupu alespoň 2 bar. Čerpadlo s tlakovou nádobou je víceméně nezbytné v případě odběru vody z vodního toku i v případě dodávky vody dovezené v nádrži. Vhodné je i v případě využití vody z vodovodního řadu s dostatečným tlakem.

Technologie dále vyžaduje zdroj energie. Samotný nástřik nevyžaduje přímo zdroj elektrické energie, energie je však zapotřebí k pohonu kompresoru a

torkretovacího stroje. Je-li k dispozici připojení k elektrické síti, je možné využít elektrický kompresor. Pokud síť není k dispozici, lze použít kompresor poháněný spalovacím motorem nebo elektrický kompresor v kombinaci s elektrocentrálou. Zdroj elektrické energie pak může být potřebný i k pohonu torkretovacího stroje, pokud není použit torkretovací stroj se vzduchovým motorem. V případě využití stroje se vzduchovým motorem však je nutno počítat s navýšením spotřeby vzduchu dodávaného kompresorem se vzdušníkem.

4.2 Aplikace bentonitu

Bentonit lze objednat u dodavatele bentonitů v pytlovaném množství např. po 25 kg nebo ve velkých vacích (tzv. big bagy) po cca 1 tuně. Podle provedených experimentálních testů lze říci, že pytlovaný bentonit je vhodnější pro manipulaci (např. přesun materiálu, dávkování do torketovacího stroje) než big bagy.

Příprava stroje se provádí na místě aplikace. Nejdříve se ověří nutné zdroje, tzn. elektrická energie a voda. Dále pak se sestaví nástřiková sestava a ověří se funkčnost jednotlivých částí. Po dozkoušení jednotlivých částí lze provést poslední testování, a to je nástřik bez dávkování bentonitu. Při tom lze nastavit přítok k trysce ($100 \text{ l } \text{hod}^{-1}$). Po ustálení přítoku k trysce lze zapnout torketovací stroj, který začne dávkovat bentonit do proudu stlačeného vzduchu. V tu dobu je již obsluha trysky, tzv. nástřikávač, v místě aplikace a trysku je nutné držet kolmo k místu aplikace a zhruba 0,5 až 1 m od povrchu, na který je bentonit stříkán. Bentonit je aplikován ve vrstvě cca 3 cm, přičemž tato průměrná tloušťka zajistí funkčnost i při nevyrovnanosti mocnosti v celé ploše, které se nelze zcela vyvarovat. Komplexní testování prokázalo, že postačuje i vrstva, která zakryje lokálně povrch tak, aby nebyl viditelný, tj. vrstva o mocnosti nad cca 1 cm.

4.3 Kontrola provedení

V průběhu nástřiku je žádoucí odebírat vzorky pro stanovení vlhkosti a objemové hmotnosti aplikovaného bentonitu. Tyto vzorky je pak následně nutno laboratorně analyzovat pro ověření vlastností aplikované vrstvy. Pro kontrolu tloušťky vrstvy lze umístit na plochu tzv. terčíky (viz Obr. 6), které lze nastavit ve potřebné vzdálenosti od povrchu, tak by byla splněna podmínka minimální tloušťky vrstvy. Terčíky je po aplikaci bentonitové těsnicí vrstvy nutno vyjmout a místo lokálně utěsnit bentonitem. Postačující je zmáčknutí okolního materiálu do otvoru po trnu terčíku.



Obr. 6 Terčík umístěný v ploše, na niž má být aplikována těsnící vrstva

4.4 Ochrana bentonitové těsnící vrstvy

Bentonitová vrstva je po aplikaci vystavena působení různých vnějších faktorů, které mají vliv na její budoucí funkčnost. Bezprostředně po nanesení začnou na vrstvu působit klimatické vlivy. Ty mohou způsobovat splavování materiálu z povrchu v případě, že je vrstva vystavena dešťovým srážkám, nebo jeho vysychání a smršťování, když těsnění není ve styku s vodou. Vysychání materiálu má za následek tvorbu trhlin a oddělení vrstvy od podkladu. Tím je porušena kompaktnost těsnění a jednotlivé kousky vrstvy se vlivem snížené adheze sesouvají níž po svahu. V obou případech, ať už vrstva je či není ve styku s vodou, může docházet k přemístování materiálu po povrchu, zpravidla do nižších částí hráze a jeho nerovnoměrné distribuci. K nežádoucímu ztenčení vrstvy zpravidla dochází ve vyšších částech hráze. Cílem ochrany těsnící vrstvy je zabezpečit její kompaktnost a stálou mocnost bezprostředně po aplikaci, v průběhu napouštění nádrže a poté v běžném provozu. Po dosažení požadované výšky hladiny vody

v nádrži je bentonitová vrstva vystavena klimatickým vlivům nad hladinou a hydrodynamickému působení vody v úrovni hladiny i pod ní. V úrovni hladiny je nutné ochránit vrstvu před jejím splavováním vlivem působení vln. Pod hladinou je vrstva vystavena hydrodynamickému tlaku ve formě filtrace vody tělesem hráze. Tento jev, pokud není extrémní má pozitivní účinky, jelikož dochází ke kolmataci tělesa hráze a tím ke snižování jeho propustnosti. Je však nutné zajistit, aby se nabobtnalý materiál nepřemísťoval do nižších částí hráze. Míra splavování a přemísťování materiálu po svahu hráze záleží přímo na sklonu návodního líce, kde je vrstva aplikována a na podmínkách, jakým je těsnění vystaveno.

V rámci experimentálního ověření účinnosti technologie na modelech hrází v reálném měřítku byly testovány také různé způsoby ochrany těsnící vrstvy. Cílem bylo využít pokud možno přírodních materiálů. Tyto materiály degradují sice rychleji než ty umělé, ale v okamžiku, kdy přírodní materiál již nebude schopný plnit svou funkci, se předpokládá, že těsnící vrstva bude již stabilizovaná a nebude potřeba její ochrana.

Jako ochrana těsnící vrstvy byly testovány dva rozdílné druhy kokosových rohoží o různých velikostech ok. Byla zvolena jedna rohož o velké velikosti oka a to 4cm a druhá rohož byla kobercového typu s jemným tkaním bez výrazných ok. Efektivita ochrany byla hodnocena vizuálně a manuálním měřením mocnosti vrstvy. Dobrou ochrannou funkci při vysychání bentonitu prokázaly prakticky obě zkoušené rohože. Funkce rohoží spočívá ve spojení jednotlivých vláken s vlhkým bentonitem, které vrstvu zabezpečí na svém místě. Když bentonit začne vysychat a smršťovat se, vlákna ho udrží na místě. Tento jev je možné vidět na obrázku Obr. 7.

V případě, kdy je těsnící vrstva vystavena dešťovým srážkám o vysoké intenzitě plní dobrou ochrannou funkci rohož kobercového typu, která nemá oka a pokrývá rovnoměrně celou plochu svahu. Tato rohož tlumí kinetickou energii dopadajících kapek a tím nedochází k rozrušování vrstvy. Za předpokladu déle trvajících srážek již tento způsob ochrany nemusí být dostatečný z důvodu vytvoření koncentrovaného odtoku pod rohoží. Nejvhodnějším způsobem ochrany bentonitové vrstvy proti extrémním podmínkám je její stabilizace vybraným druhem kokosové rohože a následným překrytím zeminou. Kokosová rohož v tomto případě plní stabilizační funkci jak pro bentonitovou vrstvu, tak pro zeminu. Poté je doporučeno návodní líc opatřit konvenčním druhem opevnění svahů jako například kamennou rovnatinou, nebo kamenným pohozením. Tímto způsobem je eliminováno několik možných negativních vlivů, které by působily na těsnění bez žádného způsobu ochrany, jako hydrodynamické působení vln

nebo rozrušování těsnění dopadajícími kapkami deště. Překrytím vrstvy zeminou je dosaženo významného snížení vysychání bentonitu a tím je zajištěna objemová stálost těsnicí vrstvy po nabobtnání.



Obr. 7 Kokosová rohož jako ochrana bentonitové těsnicí vrstvy. Vlevo detail spojení rohože a těsnícího materiálu. Vpravo vyobrazen celek rohože a těsnicí vrstvy

5 Účinnost technologie

5.1 Experimentální objekt

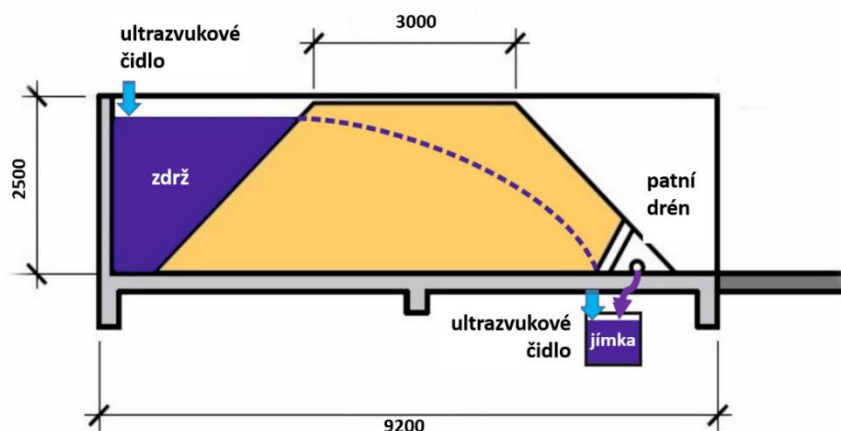
Účinnost technologie byla experimentálně ověřena na dvou fyzikálních modelech hrází umístěných v areálu Podzemní laboratoře Josef, který provozuje Centrum experimentální geotechniky (Fakulta stavební ČVUT v Praze). Jedná se o sekční modely homogenních hrází vybudovaných v reálném měřítku. Hráze jsou umístěny ve dvou sektorech vybudovaných z armovaného ztraceného bednění s uzavřenou zadní částí. Dolní část sektorů tvoří železobetonová základová deska. Výška stěn sekci je 2,5 m a světlá šířka je 2,55 m. Jedna sekce má délku 9,2 m a druhá 17 m. Každý ze dvou modelů hrází je vybudován v samostatné sekci. Tělesa hrází jsou vybudována z poměrně propustného materiálu, který je klasifikován jako písek hlinitý (SM). Hodnota propustnosti materiálu tělesa hrází byla stanovena v řádu 10^{-5} m.s^{-1} . Obě hráze jsou opatřeny patním šterkovým drénem. Voda je z drénu odváděna drážkou v základové desce, která navazuje na plastovou trubku, která odvádí vodu skrz stěnu sektoru do sběrné jímky. Modely hrází se liší svou geometrií. Jeden model simuluje svým tvarem historické hráze, druhý model představuje svou geometrií hráze moderní tak jak se konstruují dnes dle platných norem. V delším sektoru byla vybudována hráze se současnými nároky na geometrii. Sklony svahů této hráze jsou 1:2 na vzdušném líci a 1:3 na návodním líci. Šířka koruny hráze činí 3 m délka tohoto modelu je 14,8 m. Historická hráze byla vybudována o sklonu obou svahů 1:1 a se šířkou koruny hráze také 3 m. Její délka je 8,9 m. Na Obr. 8 jsou zobrazeny oba modely hrází umístěných v jednotlivých sektorech.



Obr. 8 Sekční modely hrází použité pro experimentální ověření účinnosti těsnění

Za účelem ověření účinnosti těsnění je každá z hrází je opatřena instrumentací pro měření hladiny ve zdrži, která definuje hydraulickou výšku, a pro měření

odtoku patním drénem. Výška vody ve zdrži byla sledována za pomoci ultrazvukového čidla TURCK T30UXIC s rozsahem měření 30-300 cm. Čidlo bylo umístěno v zadní části sekce na koruně stěny sektoru. Průsakové množství vody bylo měřeno formou sledování změn výšky hladiny vody ve sběrné plastové jímkce, kam ústila plastová trubka, která odváděla vodu z patního drénu. Toto sledování bylo zajištěno pomocí ultrazvukového čidla TURCK T30UXIA s rozsahem měření 10-100 cm. Výška hladiny ve sběrné jímkce byla měřena každou 1 min. Při známé půdorysné ploše sběrné jímkky a měřeném rozdílu hladin za daný časový interval je možné stanovit průsakové množství formou průtoku. Pro kontinuálnost měření bylo nutné vyřešit automatizaci vyprazdňování sběrné jímkky. To bylo zajištěno pomocí morfologie přilehlého terénu prostřednictvím násosky a elektromagnetického ventilu umístěného v dolní části pod sběrnou jímkou. Podrobně je experimentální objekt a měřicí systém také popsán např. v (David, Černochová a Štástka, 2019). Na Obr. 9 je znázorněno schéma instrumentace.



Obr. 9 Schéma modelu hráze a umístění čidel pro měření výšky vody ve zdrži a průsakového množství

5.2 Postup ověření

Ověření efektivity bentonitového těsnění aplikovaného technologií stříkaného bentonitu probíhalo na obou modelech hrází. Ověření mělo dvě fáze. V první fázi byly měřeny průsaky hrází bez těsnění, poté bylo aplikováno těsnění a ve druhé fázi byly měřeny průsaky hrází opatřené těsněním. Průběh experimentu byl

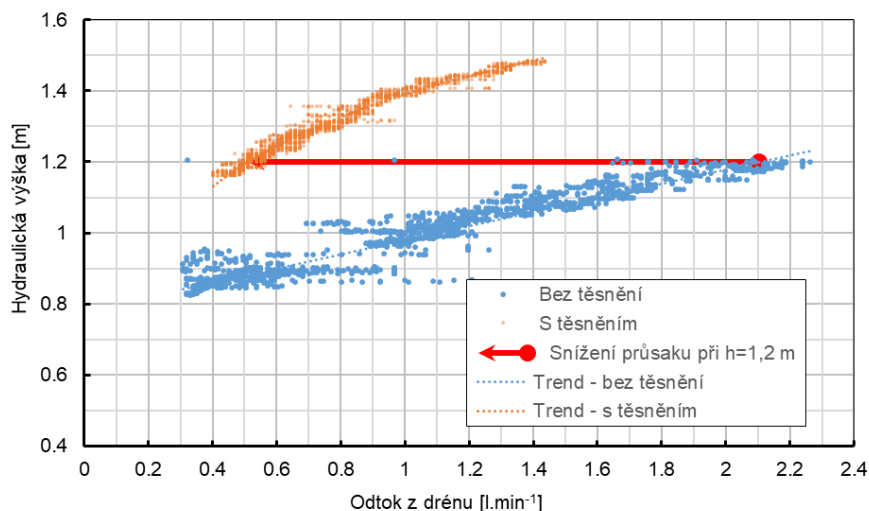
takový, že byla napuštěna zdrž až na maximální úroveň hladiny, tzn 2,2 m a za kontinuálního měření hladiny vody ve zdrži a v jímce se zdrž nechala samovolně vyprázdnit. Prázdnění probíhalo formou proudění vody tělesem hráze ze zdrže do patního drénu a dále do jímky, kde byla měřena úroveň hladiny. Tímto způsobem bylo stanoveno průsakové množství vody hrází bez těsnění.

Poté bylo na návodní líc hráze aplikováno těsnění metodou stříkaného bentonitu. Opět byla zdrž naplněna až na nejvyšší možnou úroveň hladiny a tím samým způsobem, jako v případě hráze bez těsnění, se nechala vyprázdnit za současného sledování hladiny vody ve zdrži a ve sběrné jímce.

Po vyhodnocení dat byly získány křivky závislosti výšky hladiny vody ve zdrži a k ní příslušné průsakové množství. Křivky byly stanoveny jak pro hráz bez těsnění, tak pro hráz opatřenou těsněním. Ověření účinnosti poté spočívalo v porovnání průsakového množství vody před aplikací těsnění a po aplikaci těsnicí vrstvy pro určitou úroveň hladiny vody ve zdrži.

5.3 Výsledky experimentu

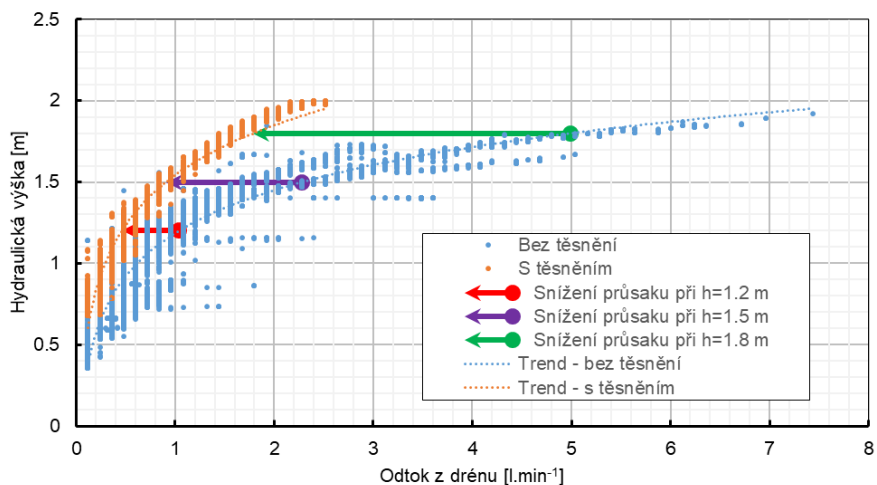
Cílem experimentu bylo ověřit účinnost bentonitového těsnění aplikovaného na návodní líc hrází technologií stříkaného bentonitu. Účinnost tohoto těsnění byla experimentálně potvrzena na obou fyzikálních modelech hrází. V případě malé hráze s prudkými sklony svahů došlo vlivem aplikace těsnění ke snížení průsakového množství 4x pro hydraulickou výšku 1,2m. Před aplikací těsnění byl zaznamenán průtok patním drénem $2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ po nanesení těsnění se průtok drénem snížil na $0,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Obě hodnoty se vztahují k hydraulické výšce 1,2 m. Vzhledem k technickým problémům došlo ke ztrátě dat pro některé úrovně hladiny ve zdrži. Měření z malé hráze, která jsou k dispozici, se potkávají kolem hodnoty hydraulické výšky 1,2 m nicméně z grafu na Obr. 10 je patrná velmi dobrá účinnost těsnění i pro ostatní úrovně hladiny ve zdrži.



Obr. 10 Křivka závislosti odtoku patním drénem na hydraulické výšce – malá hráz

Pro vyhodnocení účinnosti těsnění aplikovaného na hráz s pozvolnějšími sklony jsou již k dispozici průsaková data pro větší rozsah hydraulických výšek. Průsaky před aplikací těsnění a po něm je možné porovnávat pro úroveň hladiny vody ve zdrži 0,6 m až 2 m. Při výšce hladiny 1,8 m se průsakové množství snížilo z 5 l.min⁻¹ na 1,8 min⁻¹. V grafu na Obr. 11 úroveň hladiny vody ve zdrži 1,8 m indikuje zelená šipka.

Jako v případě malé hráze, tak i v grafickém zobrazení závislosti odtoku patním drénem z velké hráze na Obr. 11 je možné pozorovat výrazné snížení průsakového množství pro dané hydraulické výšky po opatření návodního líce bentonitovým těsněním.



Obr. 11 Křivka závislosti odtoku patním drénem na hydraulické výšce – velká hráz

6 Závěr

Prezentovaná technologie je velmi vhodnou alternativou k dosud používaným metodám zajišťování těsnosti hrází historických rybníků. Její výhody spočívají především ve flexibilitě a možnosti zachování původního tvaru hrází, což je zejména v případě hrází historických rybníků velmi vhodné mimo jiné proto, že není nutno odstraňovat vzrostlou stromovou vegetaci. Bentonit aplikovaný prostřednictvím nově vyvinuté technologie se ukázal jako velmi efektivní způsob těsnění zemních těles. Výhodou je, že materiál těsnost zajišťuje dvěma způsoby. Předně samozřejmě těsní samotná vrstva materiálu aplikovaného na hráz. Druhotný efekt pak spočívá v zanášení částic bentonitu do materiálu hráze, kde po následném nabobtnání vyplňuje póry a prostory, čímž je množství prosakující vody dále snižováno. Pro využití technologie je zapotřebí specifické vybavení a zkušenost obsluhy. Na druhou stranu se nejedná o technologii, která by byla technicky náročná, na základě čehož lze předpokládat její snadné zavedení do praxe.

7 Použitá literatura a zdroje

7.1 Literatura

- Dananaj, I., Frankovská, J. a Janotka, I. (2005) 'The influence of smectite content on microstructure and geotechnical properties of calcium and sodium bentonites', *Applied Clay Science*, 28(1-4 SPEC. ISS.), pp. 223–232. doi: 10.1016/j.clay.2004.02.006.
- *David, V., Černochová, K. a Štáštka, J. (2019) Využití bentonitu pro těsnění hrází prostřednictvím stříkané technologie. *Vodní hospodářství*, 2019, 69 (12), s. 7-10. ISSN 1211-0760
- Fuller, W. B., Thompson, S. E. (1907) The laws of proportioning concrete. *Asian Journal of Civil Engineering Transport*, s. 67-143.
- Guggenheim, S., & Martin, R. T. (1995). Definition of clay and clay mineral: joint report of the AIPEA nomenclature and CMS nomenclature committees. *Clays and clay minerals*, 43(2), 255-256.
- Hausmannova, L. and Vasicek, R. (2014) 'Measuring hydraulic conductivity and swelling pressure under high hydraulic gradients', *Geological Society Special Publication*, 400(1), s. 293–301. doi: 10.1144/SP400.36.
- Štáštka, Jiří (2018). *Řešení problematiky izolování radioaktivních odpadů s využitím fyzikálního modelování (Výzkum zaplnění technologických spár)*. 2018. PhD Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Výpočetní a informační centrum.
- *Štáštka, J. a David, V. (2018). The Testing of a Sprayed Bentonite Sealing Layer. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* (Vol. 2, No. 11, p. 666
- *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
- Thomas, A. (2008) *Sprayed concrete lined tunnels*. CRC Press, 274 s.
- *Vrána, K., & David, V. (2019). Průsaky hrázemi malých vodních nádrží. In: *Rybníky 2019, Praha, 2019-06-13/2019-06-14*. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství, s. 147-157. ISBN : 978-80-01-06595-2

Pozn.: Zdroje označené hvězdičkou () jsou publikacemi vytvořenými v rámci řešení projektu a pro jeho potřeby.*

7.2 Normy a předpisy (použité a související)

-
- ČSN 75 2310 Sypané hráze. 2006.
- ČSN 75 2410 Malé vodní nádrže. 2011. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 48 s. Praha: Hydroprojekt CZ a.s. ve spolupráci s ČVUT v Praze a VODNÍ DÍLA TBD, a.s., 38 s.
- ČSN 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních. 2014. Sweco Hydroprojekt a.s. ve spolupráci se společností VODNÍ DÍLA – TBD, 16 s.
- TNV 75 2415 Suché nádrže. 2013. Praha: Sweco Hydroprojekt a.s. 19 s.
- Metodický pokyn k ošetřování, údržbě a ochraně vegetace na sypaných hrázích malých vodních nádrží při jejich výstavbě, stavebních změnách, opravách a provozu. 2003. Věstník Ministerstva zemědělství České republiky, částka 2, 5 s.
- Metodický pokyn OOV MŽP k zabezpečení technickobezpečnostního dohledu na hrázích malých vodních nádrží IV. Kategorie. 1998. Věstník Ministerstva životního prostředí, částka 5.
- Zákon České národní rady č. 114/1992 Sb. o ochraně přírody a krajiny
- Zákon č. 254/2001 Sb. o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon) ve znění pozdějších předpisů
-

8 Seznamy

8.1 Použité zkratky

B75	Označené českého bentonitu
B75 REC MIX I	Označení bentonitové směsi
BCV	Bentonit z ložiska Černý vrch
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
CEG	Centrum experimentální geotechniky
NAKI	Program aplikovaného výzkumu a vývoje národní a kulturní identity

8.2 Obrázky

Obr. 1 Směs B75 REC MIX I, vyvinuta pro technologii stříkaného bentonitu ...	12
Obr. 2 Porovnání křivky zrnitosti směsi B75 REC MIX I a křivky podle Fullera	13
Obr. 3 závislost nasycené hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti B75 REC MIX I	14
Obr. 4 Průtokoměr s regulačním kohoutem a manometrem.	16
Obr. 5 Funkční vzorek „Tryska pro aplikaci jílových směsí pro potřeby sanace poruch historických rybníků“ v laboratořích Fakulty stavební	17
Obr. 6 Terčík umístěný v ploše, na níž má být aplikována těsnicí vrstva	21
Obr. 7 Kokosová rohož jako ochrana bentonitové těsnicí vrstvy. Vlevo detail spojení rohože a těsnicího materiálu. Vpravo vyobrazen celek rohože a těsnicí vrstvy	23
Obr. 8 Sekční modely hrází použité pro experimentální ověření účinnosti těsnění	25
Obr. 9 Schéma modelu hráze a umístění čidel pro měření výšky vody ve zdrži a průsakového množství	26
Obr. 10 Křivka závislosti odtoku patním drénem na hydraulické výšce – malá hráz.....	28
Obr. 11 Křivka závislosti odtoku patním drénem na hydraulické výšce – velká hráz.....	29

Titul: Těsnění hrází malých vodních nádrží stříkaným bentonitem

Autoři: Ing. Václav David, Ph.D., Ing. Kateřina Černochová, Ing. Jiří Štástka, Ph.D.,

Vydalo: České vysoké učení technické v Praze v roce 2020

Zpracovala: Fakulta stavební ČVUT

Vydání: první

Tisk: Tomáš Brož – AREA reklama

ISBN: 978-80-01-06805-2