

Technologie sanace sypaných hrází optimální injektážní směsí

Ing. Magdaléna Kociánová¹, Ing. Vít Černý, Ph.D.¹, prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA¹
Ing. Renata Zárubová, Ph.D.²

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Centrum AdMaS; kocianova.m@fce.vutbr.cz

²Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s., Most

Přijato: 7. 9. 2016, recenzováno: 3. 11. 2016 a 24. 1. 2017

Abstrakt

Sypané hráze patří mezi nejrozšířenější typy vodních děl v ČR. Kombinací stáří a nevhodného provedení u nich často dochází k průsakům či k úplným ztrátám stability. Pro zajištění bezpečnosti v jejich okolí je potřeba jim věnovat vysokou pozornost. Existuje řada technologií provádění oprav hrází, z nichž pro malá vodní díla nejvhodnější je klasická injektáž. Pro danou technologii se používá řada injektážních směsí od jílových, jílocementových až po chemické. Při injektování dochází k velké spotřebě směsi, proto je snahou snížení ekonomického hlediska technologie. Toho může být dosaženo použitím například vysokoteplotního, ale také fluidního popílku jako vhodné alternativy tradičních surovin. Příměs popílků neslouží pouze ke snížení nákladů na výslednou technologii, ale přináší také zlepšení reologických vlastností směsi, především zpracovatelnosti a čerpatelnosti. Popílků mají zároveň pozitivní vliv na objemovou stálost směsi a výsledné pevnosti. Článek se zabývá představením a vzorovým ověřením technologie sanace sypaných hrází injektážní směsí s příměsí úletových popílků v reálných podmínkách „in situ“.

Technology of the earthen dam rehabilitations using optimal injection mixtures

Earth-filled dams belong among the most widespread types of water dam works in the Czech Republic. Due to a combination of an old age and unsuitable design they suffer often from leakages or complete loss of stability. To ensure the safety of their neighbourhood it is necessary to pay high attention to them. There are a number of technologies to make dam corrections of which for small water works the best is a classical injection method. Number of grout injection mixtures of clay, clay-cement or even chemical is used for this purpose. Application of the large injections requires the huge amount of mixture, therefore, it is desirable to reduce the economic aspects of this technology. This can be achieved by using, for example, high-temperature, but also the fluid fly-ash as suitable alternatives to traditional components. The addition of ashes does not serve only for reduction of the costs of the resulting technology, but also brings the improvement of rheological properties of the mixture, especially the workability and properties for mixture pumping. Ashes also have a positive effect on dimensional stability of the mixture and the resulting strength. The article deals with the introduction and experimental validation of remediation technologies of earth-filled embankments by injection of mixtures containing fly ash in real field conditions „in situ“.

Das Sanierungsverfahren geschütteter Dämme mit einem optimalen Injektionsgemisch

Die geschütteten Dämme zählt man zu den verbreitetsten Wasserbauwerken in der Tschechischen Republik. Infolge der Kombination des Alters und der ungeeigneten Ausführungsart kommt oft zur Versickerung oder zu vollen Verlusten an Stabilität. Für die Sicherstellung der Sicherheit in ihrer Umgebung ist es notwendig, ihnen hohe Aufmerksamkeit zu widmen. Es gibt eine Menge von Verfahren für Reparaturen der Dämme, wovon für kleine Wasserbauwerke die klassische Injektion die günstigste Methode ist. Für das gegebene Verfahren nutzt man eine Menge von Injektionsgemischen, beginnend von den lehmigen, über lehm-zement- bis zu chemischen Gemischen. Bei der Injektion wird eine große Menge des Gemisches verbraucht, deshalb bestehen Bemühungen den Verbrauch zu reduzieren. Es kann erreicht werden zum Beispiel mit dem Einsatz der Hochtemperaturasche, oder/aber auch mit dem Einsatz von Wirbelschichtasche als eine taugliche Alternative der traditionellen Rohstoffe. Die Aschebeimischung dient nicht nur zu der Kostensenkung des Endverfahrens, sie bringt mich sich auch eine Verbesserung der rheologischen Eigenschaften der Gemische, vor allem die Verarbeitungsfähigkeit und die Pumpfähigkeit. Die Aschen wirken positiv auf die Volumenkonstanz des Gemisches und auf die resultierende Festigkeit. Der Artikel befasst sich mit der Vorstellung und der modellhaften Überprüfung des Sanierungsverfahrens von geschütteten Dämmen mit Injektionsgemischen und mit der Beimischung von Flugaschen unter realen Bedingungen „in situ“.

Klíčová slova: popílek, sanace, sypaná hráz, klasická injektáž, injektážní směs.

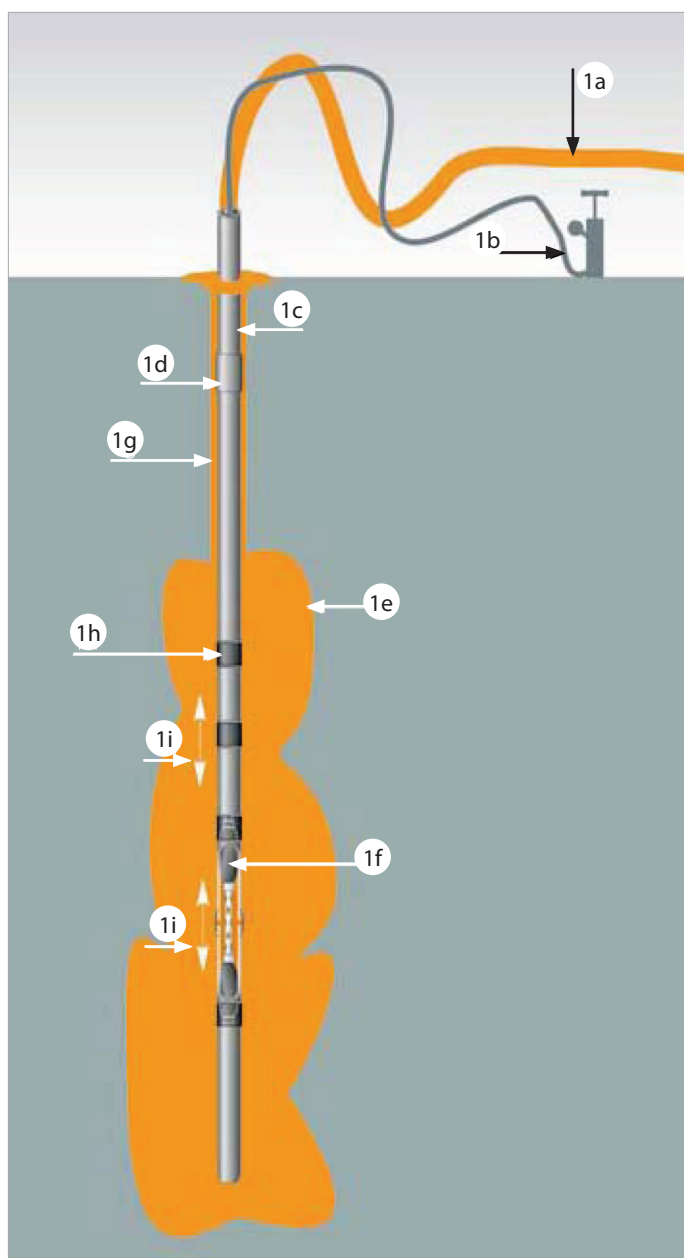
Keywords: fly ash, remediation, earth-filled dam, classical injection, injection mixture.

1 Technologie sanace sypaných hrází

Technologie sanace sypaných hrází je vždy založena na konkrétním stavu hráze. Obecně lze říci, že z technologicky a ekonomicky nejvhodnějších způsobů provádění oprav hrází je využití právě technologie klasické injektáže. [1] Využití metody klasické injektáže (obrázek č. 1) je velice rozšířené, a to především z hlediska jednoduchosti a účinnosti této

technologie, která se používá např. při provádění těsnících stěn, mikropilot, horninových kotev apod. [2] Tím jsou zlepšovány vlastnosti základových půd a především sníženy průsaky.

Při provádění technologií klasickou injektáží je směs vhnána do hráze pod tlakem. Tím jsou vyplněny veškeré nespojitosti v násypu, jež jsou příčinou průsaků. Zaplněním prázdného prostoru u proinjektované horniny se zlepšují její fyzikálně-



Obr. 1: Charakteristický řez klasickou injektáží [3].

(1a - přívod injekční směsi, 1b - ovládání obturátoru, 1c - perforovaná injekční trubka, 1d - spojník, 1e - vytvrzená injekční směs, 1f - dvojitý obturátor, 1g - zálivka, 1h - gumová manžeta, 1i - etáž)

-mechanické parametry. Mezi ně patří především pevnost v tlaku, modul deformace, ale především se snižuje její propustnost. Při injektování nesoudržných hornin vyplňuje směs póry mezi zrny horniny, čímž se vytváří tzv. umělý horninový geokompozit. [3]

2 Vstupní suroviny a vlastnosti injektážní směsi

Existuje celá řada injektážních směsí, které se v běžné praxi používají. Jedná se o samotné jílové zálivky, stabilizované cementové směsi atd. Jílocementové materiály se používají především pro zvýšení pevnosti směsi. Pro snížení či zamezení propustnosti se používají jílové směsi. Má-li těsnění sypaných hrází dobře plnit svoji funkci, musí být dle [4] přizpůsobena injekční směs zvolenému typu hráze a vyhovovat místním

podmínkám. Vždy je nutné navrhnout směs tak, aby byla vhodná pro dané přírodní podmínky. Toho může být dosaženo např. volbou staviva, úpravami technologických postupů a dále volbou poloh těsnicí konstrukce v hrázi. Těsnění hráze se dle [4] navrhuje na návodním svahu nebo uvnitř hráze.

Pro vzorové ověření technologie bylo zvoleno těsnění uvnitř hráze pomocí směsi na jílové bázi s příměsí popílku a cementu. Pro návrh injekční směsi byl, jako optimální základní surovina, vybrán jíl Ge (Grün Erde – zelená hlína). Jedná se o kaoliniticko-montmorilloniticko-illitický jíl s velmi výhodným podílem jílových minerálů (viz tab. 1). Přítomnost montmorillonitu dává jílu Ge bobtnavost a schopnost na sebe vázat vodu. Illit je nositelem plasticity. Přítomnost a zastoupení jednotlivých minerálů umožňuje použití tohoto materiálu jako základní suroviny při návrhu injekční směsi.

Při provádění injektování dochází k velké spotřebě materiálu, proto je při návrhu injekčních směsí vhodné nahradit primární surovinu (jíl) surovinou alternativní. Druhotné suroviny se vyznačují nejen nízkými pořizovacími náklady, ale v mnoha případech jsou plnohodnotnou náhradou klasických stavebních látek. Vhodnou alternativou, kterou lze využít jako příměs do injektážních směsí pro opravy sypaných hrází, jsou úletové popílky. Možné je použití produktů jak z vysokoteplotních, tak fluidních kotlů.

Popíky se do směsi přidávají pro zlepšení reologických vlastností, především se jedná o zpracovatelnost a čerpatelnost. Vlastnosti popílků obecně nejvíce ovlivňuje typ spalování v energetickém zařízení a samozřejmě použité palivo. Chování vysokoteplotních a fluidních popílků je pak v injektážních směsích odlišné. Konkrétně s přibývajícím množstvím vysokoteplotního popílku dochází ke zlepšení zpracovatelnosti a snížení potřebného množství záměsové vody oproti směsi bez popílků nebo směsi s popínkem fluidním. U směsí s vysokoteplotním popínkem dále častěji dochází ke zvýšení dekantace (neboli odstoji vody), což je v nadměrné míře nežádoucí. Proto je účelné volit množství vysokoteplotního popílku maximálně do 30 % (z hmotnosti jílovo-popílkové směsi). U fluidních popílků je dekantace menší, ovšem s přibývajícím množstvím popílku se vlivem odlišné morfologie snižuje zpracovatelnost. Tento jev je způsoben zvýšeným množstvím CaO a dalších produktů odsíření v popínku, který má tendenci při styku s vodou okamžitě reagovat. To znesnadňuje zpracovatelnost čerstvé směsi. Směsi s vysokoteplotním popínkem mají také ve srovnání s použitím fluidního popílku menší pevnosti. Obsahují minimální množství CaO a spolu s jílem tvoří méně pevné vazby. Přítomnost fluidního popílku ve směsi, kromě zvýšení pevnosti, dále snižuje smrštění, kdy volné CaO směs stabilizuje a snižuje objemové změny jílu. Tím však mírně zvyšuje koeficient filtrace, který je pro těsnicí injektáže zásadním parametrem. Při návrhu směsi s použitím popílků je vždy nutné zvážit výsledné vlastnosti směsi, kterých má být dosaženo, a jakou roli bude popílek ve směsi plnit. Na základě toho se zvolí množství a druh použitého popílku.

Vzhledem k potřebě dosažení co nejvyšší těsnicí schopnosti injektáže byl pro experimentální ověření technologie sanace zvolen popílek vysokoteplotní. Chemické složení popílku (viz tab. 2) splňuje předpoklad pro jeho možné použití ve směsi.

Tab. 1: Mineralogické složení jílu Ge.

Montmorillonit	Illit	Kaolinit	Křemen	Živec	Ostatní
29 %	27 %	11 %	20 %	1 %	12 %

Tab. 2: Chemické složení popílku FA.

	Zastoupení složek (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Popílek	52,22	28,01	3,09	1,38	2,37	9,66	0,6	0,51	1,59
									Ztráta žíháním
									5,9

Tab. 3: Výsledné vlastnosti směsi složené z jílu Ge, FA a CEM.

Složení jílovo-popílkové směsi	Příměs	Konzistence [s]	Pevnost v tlaku [MPa]	Smrštění [mm]	Koeficient filtrace k [m·s ⁻¹]
75 % jíl Ge, 25 % FA	4 % CEM	80,0	1,1	23,7	$2,6 \cdot 10^{-9}$

Směs jílu a popílku bylo vhodné dále stabilizovat. To se provádí pro zlepšení chemických, fyzikálních nebo mechanických vlastností. Jílové stabilizátory fungují prostřednictvím iontové výměny, kdy jíl poskytuje kationty, které jsou nahrazeny nativními rozpustnými kationty, jako je sodík. Jako stabilizační činidlo byl ve směsi použit cement CEM II/B-S 32,5 R. Množství cementu je účelné volit tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností směsi při zachování příznivého ekonomického hlediska. Vzhledem k parametrům směsi tak byla zvolena optimální hodnota množství cementu 4 % hmotnosti směsi. Při tomto množství nedocházelo k nepříznivému ovlivnění reologických vlastností, respektive ke zhoršení zpracovatelnosti směsi, zároveň bylo dosaženo minimální dekantace při zachování přijatelné pevnosti.

U jílovo-popílkové směsi složené ze 75 % jílu Ge, 25 % vysokoteplotního popílku (FA) se 4% příměsí cementu CEM II/B-S 32,5 R (dále jen CEM) bylo dosaženo konzistence směsi (metoda Marsh kužel) 80,0 s, pevnosti v tlaku 1,1 MPa, smrštění 23,7 mm a koeficientu filtrace $2,6 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (viz tab. 3).

3 Postup injektáže při sanaci sypaných hrází

Injektáž byla provedena na sypané hrázi rybníku. Před samotným zahájením sanačních prací bylo nezbytné provést

geofyzikální měření homogenity tělesa hráze (georadar a odporová tomografie) pro jasnou charakterizaci místa nespojitostí, které způsobují průsaky. Na první části obrázku č. 6 je uveden výsledek měření odporovou tomografií.

Na základě kombinace vyhodnocení výsledků geofyzikálního měření oběma metodami byla navržena jednořadá injekční clona se vzdálenostmi mezi vrty 400 mm. Vzhledem k přítomnosti jemnějších náplavů byla pro vyhloubení vrtů zvolena metoda rotačního vrtání při současném pažení (viz obrázek č. 2 a 3). Souprava, která byla pro hloubení použita, je univerzální. Je možné od ní oddělit věž s vrtnou hlavou a řídicím panelem, což je vhodné při hloubení vrtů v těsných prostorech.

Průměr vrtu, který byl pomocí vrtné soupravy vyhlouben, měřil 80 mm. Hloubka vrtu činila 4 m. Konec vrtu tedy zasahoval do paty hráze, kterou bylo potřeba zainjektovat. Do takto vyvrtaného otvoru bylo nutné zavést polymerní injektážní trubky o průměru 40 mm. Spodní část trubek byla perforovaná a horní část byla opatřena závitem pro osazení ventilu (viz obrázek č. 4 a 5). Pro zajištění stability a umožnění postupu injekční směsi do vyšších částí hráze bylo potřeba trubky ve spodní části obsypat hrubší frakcí štěrku a písku. Se vzrůstající výškou se pro obsyp použil pouze písek. Aby bylo dosaženo utěsnění



Obr. 2: Vrtná souprava.



Obr. 3: Provádění vrtání vrtnou soupravou.



Obr. 4: Polymerní trubky s plnicími ventily.



Obr. 5: Osazení jednoho z vrtů gumovou hadicí.

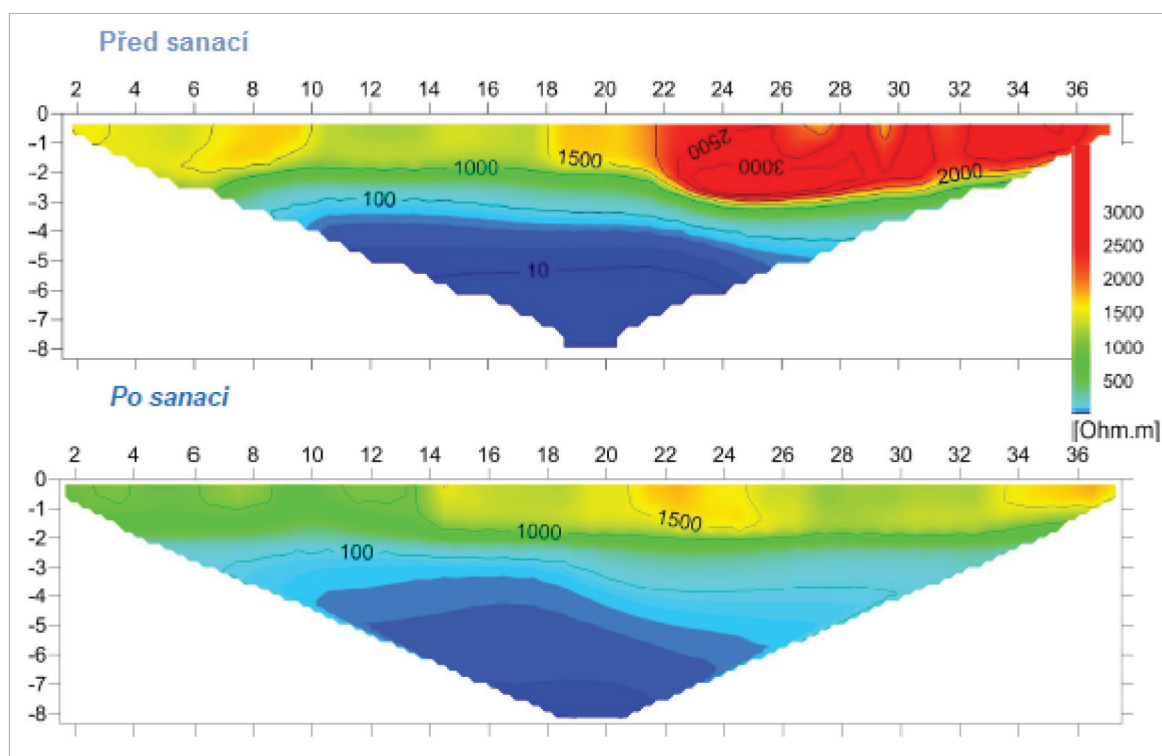
a zajištění trubek proti vytlačení, zabezpečily se trubky v horní části betonovým potěrem.

Pro míchání směsi na staveništi byla použita injekční stanice Hány. V tomto dezintegračním zařízení byly jednotlivé suroviny míchány společně s vodou. Dávkování složek probíhalo hmotnostně. Proces míchání trval cca 5 min. Z míchačky byla směs čerpána pomocí čerpadla do připravených vrtů. Převedení směsi od míchačky k vrtu bylo provedeno pomocí gumových hadic. Konce hadic byly opatřeny převlečnou maticí sloužící ke spojení ventilu, který byl připojen na polymerní trubce osazené ve vyhloubeném vrtu. Ventily sloužily pro uzavření a otevření konkrétního vrtu během provádění injekčních prací. Při čerpání směsi do vrtu se vždy sledoval tlak, který byl známkou kontroly správného procesu injektování.

Po realizaci všech injekčních prací bylo provedeno ukončení vrtů. V rámci ukončení injekčních prací se nejprve odšroubovaly ventily, části trubek vystupující nad povrch se nechaly vyčnívat po dobu 24 hod. a celý prostor se na zmiňovanou dobu zabezpečil, aby nedošlo k poškození vyčnívajících trubek. Trubky se nechávají vyčnívat z důvodu případného doinjektování při poklesu injektážní směsi. Po 24 hodinách se provede odřezání vyčnívajících trubek a injektáž může být považována za ukončenou.

4 Kontrola injekčních prací

Kontrola injekčních prací se prováděla geofyzikálním měřením pomocí georadaru a odporové tomografie. Účelem měření byla diagnostika vybraného úseku tělesa hráze a kontrola sanace.



Obr. 6: Řezy z odporové tomografie před a po sanaci.

Měření, které se v rámci experimentu provádělo, probíhalo ve dvou etapách. Nejprve byl zjišťován stav hráze před sanací a poté po sanaci (viz obrázek č. 6). Délka proměřeného úseku byla 40 m, šířka činila 4 m.

Při hodnocení výsledků měření především odporovou tomografií je zřejmá změna naměřených hodnot po provedení sanace, což jednoznačně ukazuje na obnovu těsnícího jádra hráze a utěsnění problematických míst. Hladina podzemní vody byla zatlačena k bázi hráze. Úspěšnost sanace byla pozorovatelná i přímo na místě postupným vymizením známek průsaků vody.

5 Kontrola injekčních prací

Jako nejvhodnější pro provádění sanace sypaných hrází byla zvolena technologie klasickou injektáží. Tato technologie je jednoduchá, rychlá a levná. Pro ověření technologie byl vybrán rybník, u kterého se dlouhodobě projevovaly známky průsaků. Navržená injektážní směs pro technologii klasické injektáže byla přizpůsobena konkrétnímu typu hráze a vyhovovala místním podmínkám. Směs byla složena z jílu Ge, vysokoteplotního popílku a cementu CEM II/B-S 32,5 R. Použití vysokoteplotního popílku ve směsi bylo účelné do hodnoty cca 25 % (z hmotnosti jílu). Z ekonomického hlediska bylo vhodné volit množství cementu v hodnotě okolo 4 %.

Před samotnými sanačními pracemi bylo provedeno geofyzikální měření, na základě jehož výsledků bylo rozhodnuto o provedení jednořadé injektáže do 4 m hloubky se 400 mm rozestupy vrtů. Při provádění sanace sypané hráze byla použita univerzální vrtná souprava vhodná pro hráze malých vodních děl. Opětovnými geofyzikálními měřeními byla potvrzena razantní změna struktury hráze. Z příčných řezů byla patrná obnova těsnícího jádra hráze. Funkčnost hráze byla obnovena. Voda z návodní strany hráze dosahuje středu tělesa k nově vytvořené těsnící cloně. Na provedené sanaci zkušební hráze byly již po několika dnech patrné výsledky provedených prací. Postupně vymizely známky průsaků a hráze jsou tak znovu bezpečné.

Poděkování

Príspevek byl vytvořen v rámci řešení projektu č. LO1408 „AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie“, podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“ a projektu FR—TI4/335 s názvem „Nové progresivní technologie sanace sypaných hrází“, podporovaného z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu.

Literatura

- [1] VERFEL, J.: Injektování hornin a výstavba podzemních stěn. Vyd. 2., přeprac. Bratislava: Bradlo, 511 s., 16 s. příl. ISBN 80-712-7043-1, 1992.
- [2] KELLER: Propagační materiály. Dostupné z: <http://www.keller.co.uk>; <http://www.keller-ge.co.uk>; Dostupné z: <http://www.kellergrundbau.cz>.
- [3] MACEKOVÁ, V.: Zakládání staveb. 2., dopl. vyd. Brno: ERA, vi, 130 s. ISBN 80-736-6055-5, 2006.
- [4] HOBST, O., HOBST, L., KLABLENA, P., VERFEL, J.: Technologie sypaných hrází. SNTL Praha, 360 s, 1984.