

Výzkum sedimentace částic v lapáku písku pomocí experimentálního zařízení

Tomáš Vítěz, Petr Trávníček, Pavel Mach, Jana Ševčíková

Mendelova univerzita v Brně

Abstrakt

Cílem práce byl výzkum sedimentace částic písku v experimentálním zařízení, které bylo pro tento účel zkonstruováno. Experiment probíhal s částicemi o velikosti 0,063 mm, 0,125 mm, 0,16 mm, 0,2 mm, 0,25 mm, 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm. Podle předpokladu byla z měření prokázána závislost mezi velikostí částice a množstvím částic, které byly během experimentu ze zařízení odplaveny. Z měření také vyplynulo, že při sedimentaci směsi částic o velikosti 0,063 mm, 0,125 mm, 0,16 mm, 0,2 mm, 0,25 mm, 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm docházelo k významnému ovlivňování, které se projevilo zvýšenou účinností experimentálního zařízení.

Klíčová slova: odpadní písek, čistírna odpadních vod, sedimentace, mechanické předčištění, experimentální zařízení

Úvod

Pro odstraňování hrubě dispergovaných částic (písek) se na čistírně odpadních vod (ČOV) využívá speciálních zařízení, která jsou souhrnně nazývána lapáky písku. Produkce písku je v závislosti na druhu stokové soustavy nebo velikosti ČOV udávána u jednotné kanalizační soustavy 5–12 dm³ na obyvatele a rok, při srážkách bývá i 30násobně vyšší (Imhoff 1953). Měrná hmotnost písku bývá udávána 2620 kg·m⁻³ (Torgal a Castro-Gomes 2006). Pro správnou funkci lapáku písku je velmi důležité, aby co největší množství anorganického materiálu zůstalo v zařízení. Naproti tomu veškerý biologický materiál musí být ze zařízení vyplaven, aby mohl být zužitkován v biologickém stupni čištění odpadních vod. V praxi není však často tento požadavek splněn a odpadní písek obsahuje poměrně velké množství organického materiálu (Vítěz, Kukla, Trávníček 2010).

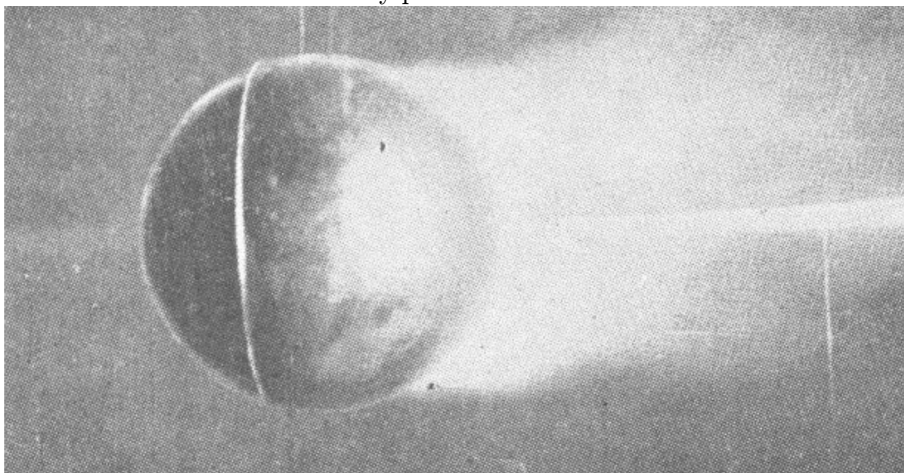
Pro efektivní návrh lapáku písku je velmi důležitý výpočet tzv. vírových struktur, které se při sedimentaci tvoří za jednotlivými neizolovanými částicemi písku. Tento druh výpočtu je však poměrně složitý proces, u kterého existuje velký počet proměnných. Řešení nabízí například numerická simulace procesu sedimentace v lapáku písku. Zde však nastává nutnost verifikovat data na experimentálním zařízení. Stavba experimentálního zařízení se tedy stává důležitou

součástí výzkumu fyzikálních vlastností neizolovaných částic při sedimentaci v lapáku písku.

Při sedimentaci částic v lapáku písku je elementární částice obtékána tekutinou. Na obtékané částici je vytvořena mezní vrstva, která má sklon se odtrhnout tehdy, jestliže tekutina proudí do oblasti s vyšším tlakem. Odtržením proudu od obtékané stěny vzniká prostor naplněný víry (tzv. úplav) a dochází ke značnému rozptylu energie (Maštovský 1964). Mezní vrstva a vírový prostor za sférickou částicí je zobrazen na obrázku č. 1.

Lze předpokládat, že tyto vírové struktury při sedimentaci částic větších rozměrů ovlivňují částice menších rozměrů, které jsou poté strhávány. O velikosti úplavu rozhoduje mimo jiné také chování mezní vrstvy, které závisí jednak na čísle Re , jednak na stupni zneklidnění proudu nebo prostředí a na drsnosti povrchu tělesa. Obvykle se udává odpor celkový, tedy včetně tření, který vzniká na té části povrchu, kde ještě nedošlo k odtržení mezní vrstvy (Maštovský 1964). Rovnice pro výpočet celkového odporu je uvedena v rovnici (4).

Obrázek 1: Mezní vrstva a vírový prostor za sférickou částicí



Zdroj: Prandtl, Tietjens (1931)

Částice je z experimentálního zařízení odplavena tehdy, pokud součet vztlakové a odporové síly je větší než síla gravitační, tedy:

$$F_{vz} + F_{od} > F_G \quad (1)$$

V případě kulovité částice je gravitační síla dána:

$$F_G = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \rho_t \cdot g \text{ [N]} \quad (2)$$

kde ρ_f měrná hmotnost tělesa [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 d ekvivalentní průměr částice [m],
 g tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$].

Příčemž vztlaková síla je dána vztahem:

$$F_{VZ} = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \rho_f \cdot g \text{ [N]} \quad (3)$$

kde ρ_f hustota kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 d ekvivalentní průměr částice [m],
 g tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$].

Odporová síla se potom vypočítá podle vztahu (Hazzab, Terfous, Ghenaim 2008):

$$F_{od} = C_D \cdot \rho_f \left(\frac{W_s^2}{2} \right) \cdot S \text{ [N]} \quad (4)$$

kde C_d odporový součinitel [-],
 ρ_f hustota kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 W_s rychlost sedimentace [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
 S plocha částice [m^2].

Hodnota odporového součinitele C_d pro odpor koule za plíživého pohybu je obecně vyjádřena vztahem (Maštovský 1964):

$$C_d = \frac{24}{Re} [-] \quad (5)$$

Jak je z rovnice (5) patrné, odporový součinitel je závislý na Reynoldsově čísle. Jelikož částice nejsou ve většině případu sférického tvaru, je často nutné určit odporový součinitel C_d experimentálně. Experimentální metody určení odporového součinitele C_d jsou uvedeny v odborných pracích (Morsi, Alexander 1972). Na základě experimentálních dat může být pro výpočet odporového součinitele C_d například určen vztah (Morsi, Alexander 1972):

$$C_d = A_1 + \frac{A_2}{Re} + \frac{A_3}{Re^2} + \frac{A_4}{Re^{0,1}} + \frac{A_5}{Re^{0,2}} [-] \quad (6)$$

kde Re Reynoldsovo číslo [-].

a kde konstanty A_n nabývají hodnot:

$$A_1 = 2,68897$$

$$A_2 = 21,68267$$

$$A_3 = 0,13112$$

$$A_4 = 10,61626$$

$$A_5 = 12,21582$$

Sedimentace v gravitačním poli může být charakterizována rychlostí sedimentace, která je dána následujícími podobnostními vztahy:

Pro laminární režim

Podle Stokesa

$$v_{sed} = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_{materiál} - \rho_{kapalina})}{\eta_{kapalina}} \cdot r_i^2 \cdot g \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7)$$

kde	$\rho_{materiál}$	hustota sedimentujícího materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
	$\rho_{kapalina}$	hustota kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
	$\eta_{kapalina}$	dynamická viskozita kapaliny [$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$],
	r_i	poloměr částice [m],
	g	tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$].

Pro turbulentní režim

Podle Newtona

$$v_{sed} = 1,73 \cdot \sqrt{\frac{(\rho_{materiál} - \rho_{kapalina})}{\rho_{kapalina}} \cdot d \cdot g} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8)$$

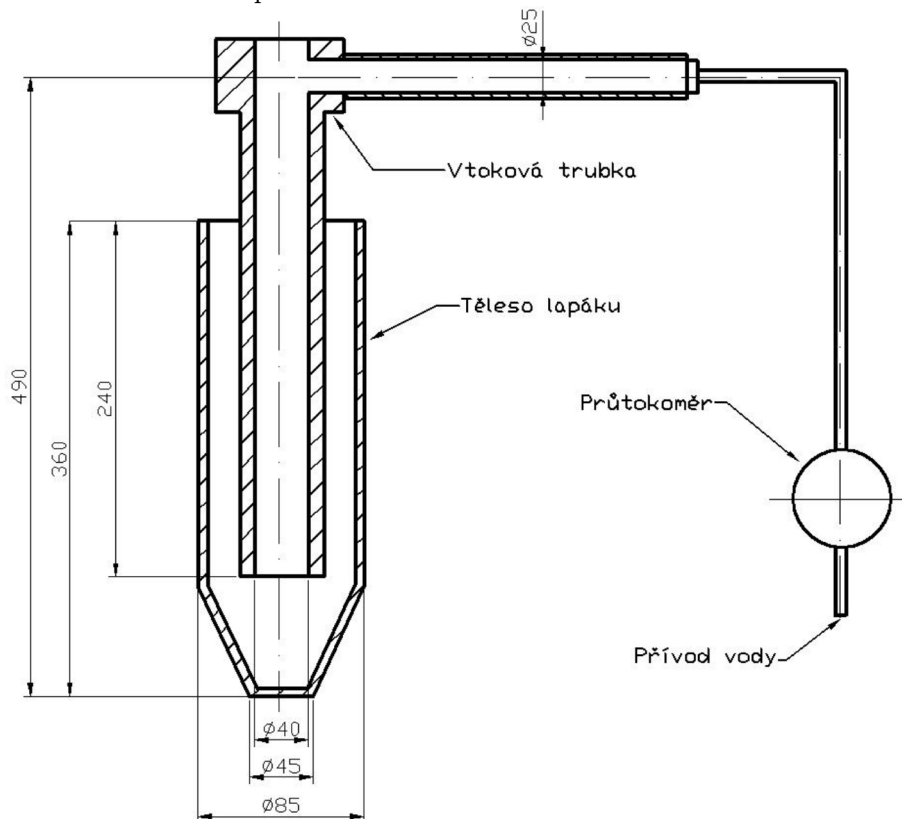
kde	$\rho_{materiál}$	hustota sedimentujícího materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
	$\rho_{kapalina}$	hustota kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
	d	průměr částice [m],
	g	tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$].

Materiál a metodika

Vzorek materiálu pro účel testování byl odebrán z lapáku šterku umístěného na ČOV Tišnov. Lapák šterku je ve většině případů předřazen lapáku písku. Tím se získá reprezentativní vzorek materiálu, který je splavován do lapáku písku. Odběr vzorků byl proveden v souladu s normou ČSN ISO 10381-6:1998 Kvalita půdy - Odběr vzorků - Část 6. V den odběru byl vzorek transportován do laboratoře, zbaven případných organických příměsí a vysušen při 105 °C v elektrické peci. Obsah sušiny byl určen v elektrické muflové peci LHM 07/12. Vážení bylo provedeno analytickými váhami Radwag AS 220/X s přesností 0,0001 g.

Po úpravě vzorku byla provedena síťová analýza pomocí soustavy sít o rozměrech ok 0,063 mm, 0,125 mm, 0,16 mm, 0,2 mm, 0,25 mm, 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm a 4 mm. Navážka odpadního písku o hmotnosti $437 \pm 0,5$ g byla vložena na horní síť. Jednotlivé frakce odpadního písku byly separovány síťovým rozbořem, resp. setřásáním písku pomocí kmitání stolice, na které byla sada sít o vnitřním průměru 200 mm umístěna. Počet kmitů byl nastaven na hodnotu 150 za minutu, doba trvání zkoušky byla zvolena na 15 minut.

Obrázek 2: Náčrten experimentálního zařízení



Zdroj: vlastní

Pro účely experimentu byl zvolen vertikální lapák písku, zejména proto, že bývá používán na čistírnách odpadních vod do 5 000 ekvivalentních obyvatel, jejichž počet je v naší zemi zastoupen v nejvyšší četnosti. Sestavené experimentální zařízení lapáku písku je oproti reálnému zařízení zmenšeno v poměru 1 : 5. Náčrten zařízení je uveden na obrázku 2. Při samotném experimentu byl průtok vody nastaven na hodnotu 0,12 litrů za sekundu. Rychlost kapaliny tedy činila přibližně 0,7 m.s⁻¹—1, což je reálná průtoková rychlost zařízení tohoto typu v letních měsících. Vtoková trubka umožňuje snadné přidávání testovaného vzorku do experimentálního zařízení. Rozměry vtokové trubky byly zvoleny tak, aby byl vnitřní průměr nejméně pětkrát větší než nejvyšší testovaný průměr zrna písku, tak jak uvádí odborná literatura (Vanoni 1975).

Nejdříve jsou jednotlivé frakce získané ze síťového rozboru zváženy pomocí analytických vah Radwag AS 220/X a poté postupně přidávány do experimentálního zařízení. Po každém experimentu je daná frakce písku z lapáku vytěžena, vysušena a znovu zvážena na analytických vahách. Rozdíl hmotností značí množství frakce, které bylo z lapáku odplaveno. Pro experiment byly vybrány frakce 0,063 mm, 0,125 mm, 0,16 mm, 0,2 mm, 0,25 mm, 0,3 mm,

0,4 mm, 0,5 mm. Stejný postup je proveden i pro směsný vzorek odpadního písku z frakcí 0,063 mm, 0,125 mm, 0,16 mm, 0,2 mm, 0,25 mm, 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm. Rozměry částic byly voleny s ohledem na zachování poměru k velikosti experimentálního zařízení. Celkem byla provedena 3 měření pro jednotlivé frakce a z výsledných hodnot byl vytvořen aritmetický průměr. Hodnoty aritmetického průměru byly vyneseny do grafu a proloženy křivkou.

Výsledky a diskuze

Sušina zkoušeného vzorku z ČOV Tišnov činila 83,63 %. Pro srovnání jsou v tabulce 1 uvedeny hodnoty sušin odpadního písku z různých čistíren odpadních vod na území jižní Moravy. Z tabulky je patrné, že u třech čistíren bylo ve vzorku obsaženo více jak 50 % organického materiálu, což svědčí o neefektivnosti lapáků písků na daných čistírnách odpadních vod.

Tabulka 1: Obsah sušiny u vzorků odpadního písku

Vzorek	Sušina [%]
Blansko	76,1
Boskovice A	72
Boskovice B	85,34
Jedovnice	20,03
Letovice	20,59
Náměšť nad Oslavou	48,1
Ořechov	77,19
Střelice	86,53
Tetčice	95,4
Zbraslav	91,81

Zdroj: Vítěz, Kukla, Trávníček (2010)

V tabulce 2 je uveden síťový rozbor pro celkovou navážku o hmotnosti $437 \pm 0,5$ g. Přičemž m_1 je hmotnost dané frakce před sedimentací a m_2 je hmotnost dané frakce po sedimentaci. Hmotnost m_3 je rozdíl hmotností m_1 a m_2 . Sedimentace v experimentálním zařízení byla provedena jen pro částice o velikosti v rozmezí od 0,063 mm až 0,5 mm, přičemž největší úbytek částic (tj. částice, které nesedimentovaly v zařízení) byl podle předpokladu u částic o nejmenším rozměru, tedy 0,063 mm. Jedná se o ekvivalent k částicím o velikosti přibližně 0,3 mm u reálných zařízení.

Zde úbytek činil 88,37 %. Naproti tomu nejmenší úbytek činil u částic o velikosti 0,5 mm (ekvivalent 2,5 mm), kde hodnota dosahovala pouhých 0,38 %. V případě směsi z částic o velikosti 0,063 mm až 0,5 mm činil úbytek 0,60 %.

Závislost velikosti jednotlivých frakcí je vyjádřena v grafu 1. Naměřené hodnoty byly proloženy polynommickou funkcí čtvrtého řádu ve tvaru: $y = -1885,2x^4 + 1497,7x^3 + 425,78x^2 - 600x + 124,6$. U této funkce byla v porovnání s ostatními druhy funkcí zjištěna nejvyšší hodnota koeficientu determinace. Koeficient determinace daného trendu činí $R^2 = 0,988$. Za předpokladu, že křivka bude mít vývoj daný funkcí, je hranice, kdy se stává experimentální

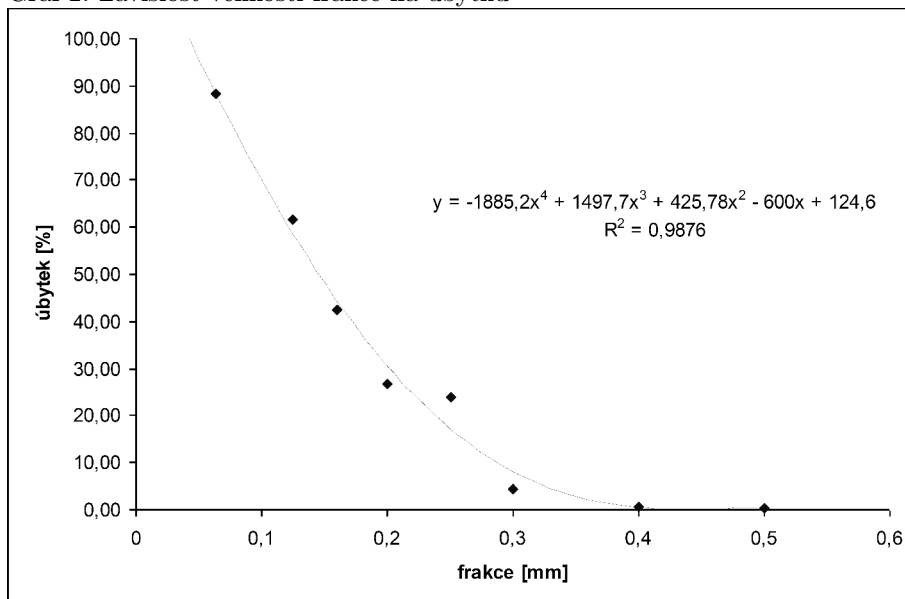
zařízení neefektivní (tzn. nastává 100% úbytek), u částic o velikosti menší než 0,05 mm (viz graf 1).

Tabulka 2: Hmotnost částic jednotlivých frakcí, které nesedimentovaly v experimentálním zařízení

Frakce [mm]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	Úbytek [%]
4	25,4048	-	-	-
2	154,7797	-	-	-
1	113,2959	-	-	-
0,5	127,8692	127,3839	0,4853	0,38
0,4	10,5831	10,5003	0,0828	0,78
0,3	2,4534	2,3422	0,1112	4,53
0,25	1,5833	1,2029	0,3804	24,03
0,2	0,5674	0,4161	0,1513	26,67
0,16	0,0796	0,0459	0,0337	42,34
0,125	0,1445	0,0556	0,0889	61,52
0,063	0,2915	0,0339	0,2576	88,37
směs	141,8954	141,05	0,8454	0,60

Zdroj: vlastní

Graf 2: Závislost velikosti frakce na úbytku



Zdroj: vlastní

I přes poměrně vysoký koeficient determinace je nutné podotknout, že datová řada, u níž byla provedena regresní analýza, je poměrně úzká. Zvolenou regresní funkci je tedy ještě nutné potvrdit dalšími měřeními, a to při různých objemových průtocích.

Změřené hodnoty úbytku na uvedeném experimentálním zařízení jsou ojedinelé a z odborných prací je patrné, že doposud se tímto druhem měření na takovém druhu lapáku nikdo nezabýval, proto změřené hodnoty nemohou být srovnány s hodnotami uvedenými v jiných odborných pracích. Avšak sedimentace sférických i nesférických částic byla již v odborných pracích popsána. Jedná se například o práce A. Haidera (Haider, Levenspiel 1989), Dietricha (1982) nebo Chiena (1994).

Závěr

Podle předpokladu bylo potvrzeno, že hodnoty úbytku u částic o velikosti 0,063 mm budou největší. Na základě tendenčního vývoje exponenciální křivky závislosti velikosti frakce na velikosti úbytku vzniká předpoklad, že u částic o velikosti 0,05 mm dosáhne úbytek 100 %, tzn. žádné částice nebudou v zařízení sedimentovat. Velikost částice 0,05 mm sedimentující v experimentálním zařízení je však ekvivalent k částici o velikosti přibližně 0,25 mm, která sedimentuje v reálném zařízení. V praxi však v lapáku písku sedimentují částice i o velikosti 0,063 mm a menší (Vítěz, Kukla, Trávníček 2010). Pakliže ale byl proveden experiment, kdy v experimentálním zařízení sedimentovala směs částic o velikosti 0,063 mm, 0,125 mm, 0,16 mm, 0,2 mm, 0,25 mm, 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm, úbytek činil pouze 0,60 %. Z toho plyne, že různě velké částice se při sedimentaci velmi významně ovlivňují. V současné době je připravován numerický model, jenž napomůže k pochopení vazeb mezi sedimentujícími částicemi o různých velikostech v experimentálním zařízení. Následně budou tyto výsledky aplikovány do reálného zařízení.

Reference

- VÍTĚZ, T., R. KUKLA a P. TRÁVNÍČEK, 2010. Physical properties of sand from the waste water treatment plants. *Acta universitatis agriculturae et silviculturae Mendeliana Brunensis*. **58**(4), 233–238. ISSN 1211-8516.
- CHIEN, S., 1994. Settling velocity of irregularly shaped particles. *SPE Drilling & Completion*. **9**(4), 281–289. ISSN 1064-6671.
- ČSN ISO 10381-6, 1998. *půdy - Odběr vzorků - Část 6: Pokyny pro odběr, manipulaci a uchovávání půdních vzorků určených pro studium aerobních mikrobiálních procesů v laboratoři*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Třídící znak 83 6151.
- DIETRICH, W., 1982. Settling velocity of natural particles. *Water Resources Research*. **18**(6), 1615–1626. ISSN 0043-1397.
- HAIDER, A. a O. LEVENSPIEL, 1989. Drag coefficient and Terminal velocity of spherical and non-spherical particles. *Powder Technology*. **58**(1), 63–70. ISSN 0032-5910.

- HAZZAB, A., A. TERFOUS a A. GHENAIM, 2008. Measurement and modeling of the settling velocity of isometric particles. *Powder Technology*. **184**(1), 105–113. ISSN 0032-5910.
- IMHOFF, K., 1953. *Taschenbuch der Stadtentwässerung*. Berlin: Verlag Technik.
- MAŠTOVSKÝ, O., 1964. *Hydromechanika*. Praha: SNTL.
- MORSI, S. A. a J. A. ALEXANDER, 1972. An investigation of particle trajectories in two phase flow systems. *Journal of Fluid Mechanics*. **55**(2), 188–207. ISSN 0022-1120.
- PRANDTL, L. a O. G. TIETJENS, 1931. *Hydro- und Aeromechanik*. Berlin: Springer.
- TORGAL, F. P. a J. P. CASTRO-GOMES, 2006. Influence of physical and geometrical properties of granite and limestone aggregates on the durability of a C20/25 strength class concrete. *Construction and Building Materials*. **20**(10), 1079–1088. ISSN 0950-0618.
- VANONI V. A. 1975 *Sedimentation Engineering*. Manual 54. New York: ASCE

The research of particle sedimentation in a sand trap with use of an experimental device

Our objective was to do research on the sedimentation of sand particles in a sand trap. A model of the sand trap was constructed for this purpose. The measurement of grain loss of individual fractions shows that particles of different sizes have a very significant impact on sedimentation and therefore have a significant effect on the function of the sand trap.

Keywords: sand, wastewater treatment plant, sedimentation, primary treatment, experimental device

Kontaktní adresa:

Ing. Tomáš Vítěz, Ph.D., Ústav zemědělské, potravinářské a environmentální techniky, Mendlova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika, e-mail: vitez@mendelu.cz

VÍTĚZ, T. et al. Výzkum sedimentace částic v lapáku písku pomocí experimentálního zařízení. *Littera Scripta*. 2011, **4**(2), 271–279. ISSN 1802-503X.
