

Trubní reometr pro inline měření reologických vlastností kalů

Krupička J.*, Pícek T., Matoušek V.

České vysoké učení technické učení v Praze, Katedra hydrauliky a hydrologie, Thákurova 7, 166 29 Praha 6

*autor pro korespondenci, email: jan.krupicka@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Reologické vlastnosti souvisí s chováním čistírenských kalů při jejich dopravě a zpracování, jejich znalost je tedy podstatná z hlediska návrhu nových provozů i optimalizace stávajících. V příspěvku je prezentován nový inline trubní reometr vyvinutý s cílem umožnit kontinuální měření reologických parametrů v rámci technologické linky s potenciálem uplatnění, mimo jiné, při operativním řízení procesních proměnných. Uveden je technický popis reometru a výsledky jeho laboratorního testování. Na příkladu prvních výsledků použití reometru v provozních podmínkách je demonstrována časová variabilita reologie vyhnílého a zahuštěného přebytečného kalu a možnosti reometru při jejím měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Čistírenské kaly; inline měření; neneutonská reologie; reologické parametry; trubní reometr

1. ÚVOD

Při čištění odpadní vody vzniká několik druhů kalů, se kterými je potřeba v rámci čistírny odpadních dále pracovat. Tyto kaly mohou vykazovat v závislosti na druhu kalu a obsahu sušiny výrazně neneutonskou reologii, která ovlivňuje chování kalů v navazujících technologických procesech, konkrétně například čerpatelnost a tlakové ztráty při dopravě kalů potrubím (Svitavská a kol., 2019). Reologické parametry obecně s obsahem sušiny korelují, jejich rozptyl při konstantní sušině však může být značný (Haldenwang a kol., 2017). Znalost reologických vlastností kalů je přitom důležitým podkladem pro návrh nové technologické linky, potenciál uplatnění však má i při optimalizaci procesů nebo při návrhu operativního řízení procesních proměnných na již existující technologii. Možnost operativního řízení proměnných, jako jsou otáčky čerpadel nebo dávkování činidel, nabývá na významu se zvyšující se časovou variabilitou vlastností kalu, která však současně vede k vysokým nárokům na frekvenci, rychlost a v důsledku i bezobslužnost měření. Zároveň je potřeba uvážit charakter pevné složky kalu, která může být vláknitá, může vytvářet agregáty a může mít tendenci sedimentovat, což dále zvyšuje nároky na robustnost měřící metody. V neposlední řadě je třeba zohlednit hygienická rizika spojená s manipulací s čistírenskými kaly.

Jedním z našich úkolů v rámci projektu „Řízení a optimalizace vybraných čistírenských zařízení na základě inline měření reologických vlastností vsádky se zaměřením na vývoj inovovaného zahušťovacího a odvodňovacího zařízení“ bylo navrhnout zařízení pro měření reologických vlastností kalů, které by výše uvedené nároky splňovalo. V první fázi bylo cílem sestavit univerzální zařízení, které sice nebude bezobslužné, ale bude mobilní, možnosti jeho použití budou co nejširší a umožní získat potřebná data a zkušenosti pro fázi druhou. Ta spočívala v následném návrhu zjednodušeného bezobslužného zařízení, které by sloužilo k řízení technologické jednotky (šnekolisu, lamelového usazováku) v daných provozních podmínkách. Cílem tohoto příspěvku je představení univerzálního trubního reometru a výsledků jeho testování na modelových směsích i čistírenských kalech v reálném provozu.

2. TRUBNÍ REOMETR

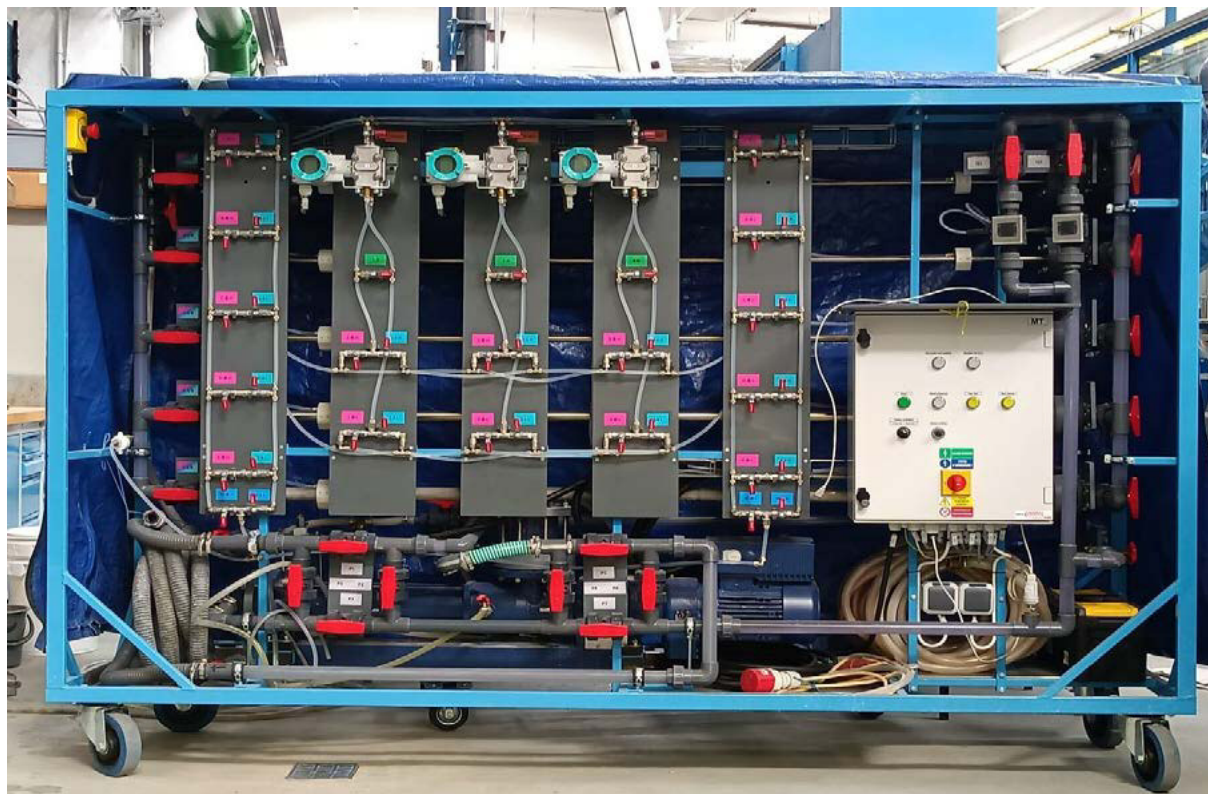
Princip měření

Trubní reometr umožňuje vyhodnotit reogram testované kapaliny na základě měření závislosti tlakového spádu na průtoku při laminárním proudění vzorku trubicí o známém průměru. Zvolený princip nejlépe vyhovuje hlavním požadavkům zmíněným v úvodu: testovaný vzorek po odběru z technologické linky putuje uzavřeným trubním systémem a po testování je do technologické linky vrácen (hygienické hledisko), v zařízení se nevyskytují žádné tenké kapiláry, štěrbinové sondy zasahující do proudu (nízké riziko ucpávání vlákniny nebo agregáty) a jeho provoz lze automatizovat.

Konstrukce reometru

Komerčně vyráběný inline reometr pro měření vlastností kalů není dostupný, v různých variacích však byly vyvinuty prototypy pro měření vlastností kalů hlavně v těžebním průmyslu (Slatter a kol., 1998; Chryst a kol., 2019; Haldenwang a kol., 2010), ale použity byly i pro testování kalů čistírenských (Haldenwang a kol., 2017). Jednotlivé verze se od sebe liší zejména způsobem odebírání kalu, jeho protlačováním měrnými trubicemi a způsobem měření jeho průtoku.

V námi zvolené koncepci se reometr připojuje flexibilními hadicemi paralelně k úseku technologické linky. Změna průtoku reometrem tedy neovlivňuje průtok kalu za místem návratu vzorku do linky. Reometr je vestavěn do ocelového rámu s pojezdovými kolečky (Obr. 1). K dopravě kalu je použito vřetenové čerpadlo Seepex BN 5-12 poháněné elektromotorem s frekvenčním měničem. V základním uspořádání je čerpadlo osazeno před měrné trubice reometru. Systém ventilů však umožňuje jeho přepojení za měrné trubice a tím eliminaci případného vlivu degradace vzorku v komorách čerpadla. Podmínkou je pak ovšem dostatečný tlak v odběrném místě na protlačení vzorku trubicemi. Čerpadlo je vysazeno na silentbloky a na vstupní i výstupní straně čerpadla jsou připojeny malé expanzní nádoby se stlačeným vzduchem pro eliminaci tlakových a objemových pulzů generovaných čerpadlem při otevírání jednotlivých komor labyrintu vřeten. Propojovací potrubí je provedeno z PVC DN32. Osazeno je pět měrných trubic z nerezové oceli, jejichž průměry D tvoří přibližně geometrickou řadu v rozmezí cca 8 až 32 mm. Délka trubic je 2,5 m, přičemž 1,5 m z toho tvoří měrný úsek mezi tlakovými odběry. Systém ventilů umožňuje zapojit vždy dvě trubice do série. Pro měření tlaků jsou osazeny tři diferenční tlakoměry SIEMENS SITRANS P420 s rozsahy do 0,6, do 2,5 a do 6 m v. sl. Systém ventilů umožňuje připojit kterýkoliv tlakoměr ke kterékoli trubicí přímo při provozu a operativně tak reagovat na předem neznámou reologii testovaného kalu. Systém tlakových odběrů je vyplněn a dle potřeby proplachován čistou vodou. Vzhledem k dobrým zkušenostem s měřením průtoku čistírenských kalů indukčními průtokoměry byly tyto použity i v trubním reometru – paralelně osazeny jsou dva průtokoměry KOBOLD MIM s rozsahem do 160 a do 830 ml/s. Analogové výstupy měřidel jsou svedeny do A/D převodníku NI USB-6002 a v reálném čase zpracovávány v připojeném notebooku. Pro regulaci průtoku pod dolní mezí rozsahu nastavitelných otáček čerpadla jsou měrné sekce včetně průtokoměrů opatřeny bypassem, který umožňuje část čerpaného průtoku přepouštět rovnou na odtok z reometru.



Obr. 1. Trubní reometr při testování ve vodohospodářské laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze. V popředí panely rozvodů tlakových odběrů, horizontální měrné trubice prochází za panely

Popsané uspořádání umožňuje pokrýt smykové rychlosti $dv/dy = 100-500$ 1/s u kalů s mezí toku $\tau_y = 17$ Pa, součinitelem konzistence K až 22 a indexem toku $n = 0,36$ až 1 při použití modelu Herschel – Bulkley:

$$\tau = \tau_y + K(dv/dy)^n \quad (1)$$

Přesnost měřidel a kalibrace

Vnitřní průměr měrných trubic byl vypočten z objemu vody napuštěné do na jednom konci zaslepené trubice laboratorním odměrným válcem. Při porovnání s průměrem změřeným na několika místech posuvným měřítkem byla zjištěna maximální odchylka menší než 0,1 mm. Kalibrace měření a přenosu signálu diferenčních tlaků byla provedena s použitím kapalinového diferenčního manometru s přesností čtení 1 mm vodního sloupce. Před každým měřením se provádí kontrola stability měření pro nulovou diferenci a případná korekce. Přesnost měření průtoku byla ověřena objemovou metodou na vodě, a to s relativní chybou menší než 10^{-3} .

Způsob měření a vyhodnocení dat

Pro zpracování a vizualizaci dat v reálném čase byl vytvořen specializovaný vyhodnocovací software. Při měření se cyklicky probíhá řada průtoků a měří se k nim tlakové difference v trubici známého průměru a délky. Pro každou dvojici průtok – tlaková difference lze přímo vypočítat střední průřezovou rychlost V a tečné napětí působící na stěně τ_0 . Další vyhodnocení spočívá v převedení pseudoreogramu (tj. závislosti τ_0 na poměru $8V/D$) na výsledný standardní reogram (tj. závislosti τ na smykové rychlosti dv/dy) pomocí Rabinowitch-Mooneyho transformace (viz například Visintainer a kol., 2023), která vyžaduje vynesení pseudoreogramu v logaritmických souřadnicích a jeho následnou derivaci. V našem softwaru je logaritmovaný

pseudoreogram prokládán kubickým splinem, kterým je vyhlazen rozptyl dat způsobený náhodnými chybami. Derivace je pak z tohoto prokladu vypočtena analyticky. Posledním krokem je proklad reogramu zvoleným reologickým modelem s použitím metody nejmenších čtverců. Implementován je model Herschel–Bulkley (rovnice 1) s možností zjednodušení na model Oswald de Waele ($\tau_y = 0$) nebo Binghamův ($n = 1$). Při současném měření na dvou trubicích různého průměru lze jednak postihnout širší oblast reogramu v kratším čase, jednak odhalit chybná měření či komplikující jevy (např. skluz na stěně) – data z jednotlivých trubic se pak neřadí do jedné křivky. Dále probíhá kontrola laminarity proudění na základě Reynoldsova čísla modifikovaného pro neneutonskou kapalinu dle Slattera (2000).

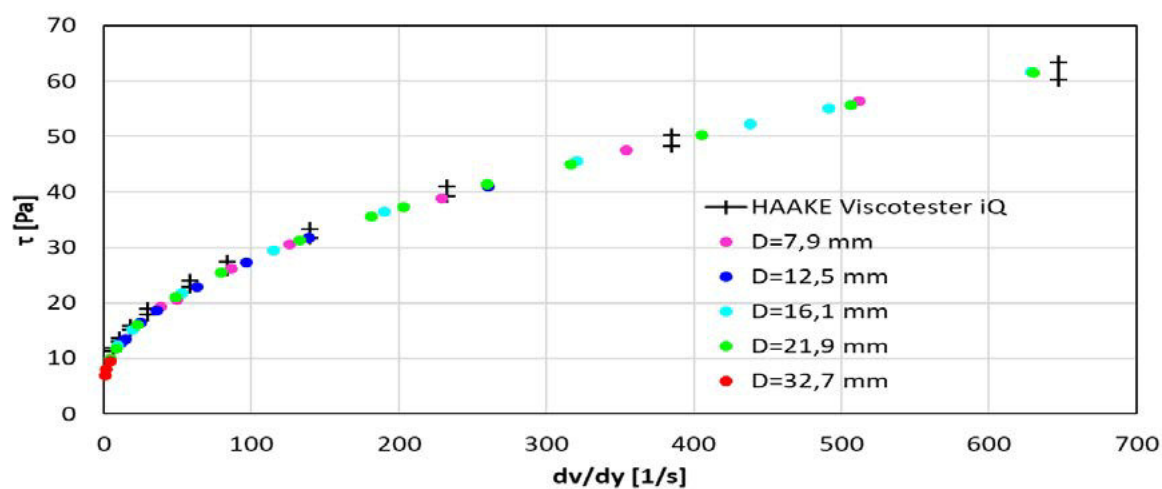
3. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Testování reometru v laboratorních podmínkách

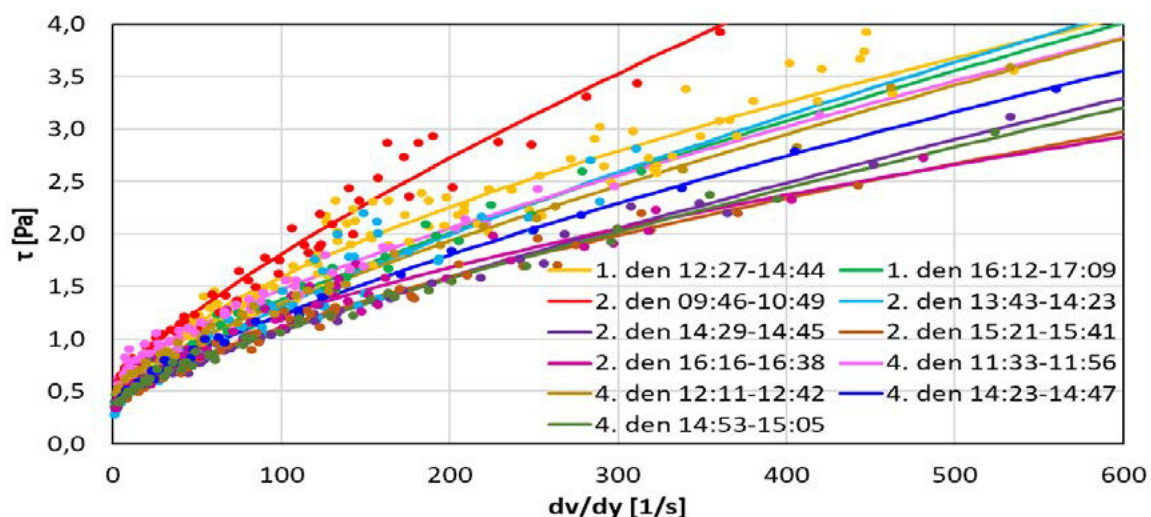
Základní testování proběhlo s čistou vodou. Viskozita vody byla vyhodnocena s chybou 7 %, což je skvělý výsledek vzhledem k tomu, že na měření takto málo viskózních kapalin nebyl reometr navrhován. Dalším krokem bylo testování reometru na modelové směsi vody a polymeru CARBOPOL™. Vzhledem k absenci makroskopických pevných částic lze tuto směs snadno testovat i v konvenčním rotačním viskozimetru. Shoda obou metod měření je patrná z Obr. 2 a dokládá spolehlivost použití trubního reometru i v oblasti neneutonských kapalin.

Variabilita parametrů vyhnílého kalu

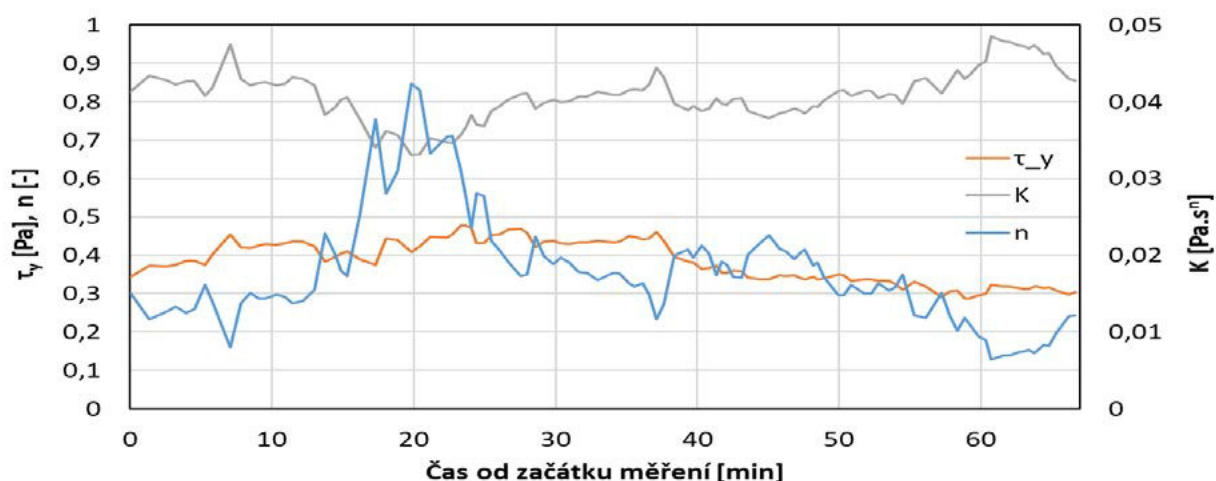
První testování v reálných provozních podmínkách proběhlo na kalové koncovce čistírny pro cca 70 tis. EO. Kal byl odebírán za macerátorem na trubní lince mezi vyhnívací nádrží a odstředivkou. Cílem měření bylo jednak ověření funkce reometru, jednak stanovení časové variability vlastností kalu a tedy i potenciálu uplatnění operativního řízení provozních proměnných při jeho odvodňování. Jak dokládá Obr. 3, reologii vyhnílého kalu je možné popsat modelem Herschel – Bulkley a v daném případě se její časová variabilita jasně prokázala. Časové měřítka a velikost změn reologických parametrů jsou patrné z Obr. 4. Pokud se odhlédne od krátkodobých fluktuací, které mohou souviset s chybami měření a způsobem vyhodnocení dat, činí rychlost změn řádově jednotky až desítky procent za minutu.



Obr. 2. Reogram dle měření na trubním reometru s barevným rozlišením měřných trubic a dle měření na rotačním viskozimetru HAAKE



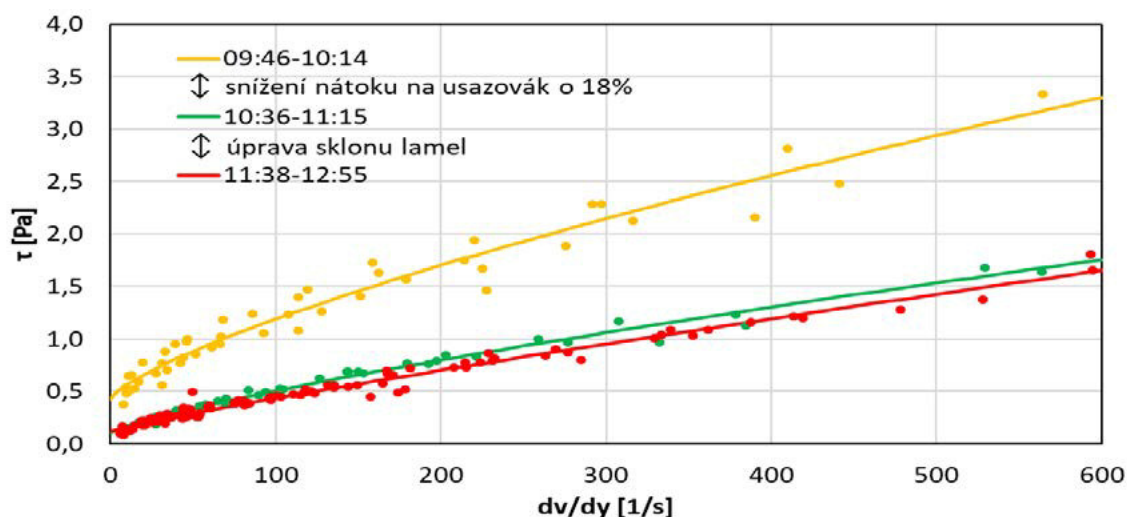
Obr. 3. Reogramy vyhnílého kalu a jejich proklad modelem Herschel – Bulkley. Délka doby sběru dat pro jednotlivé reogramy byla řádově desítky minut (viz legendu)



Obr. 4. Vývoj reologických parametrů vyhnílého kalu v čase při použití modelu Herschel – Bulkley. Délka doby sběru dat použitých pro vyhodnocení jednotlivých datových bodů vynesných v grafu byla cca 5 minut

Variabilita parametrů zahuštěného přebytečného kalu

Měření probíhalo na ČOV pro cca 150 tis. EO, a to na v rámci testování funkce lamelového usazováku s proměnným sklonem lamel. Zatímco měření vlastností nezahuštěného kalu na přítoku do usazováku ukázalo stabilitu jeho reologických parametrů (Binghamův model, v porovnání s vyhnílym kalem malé počáteční napětí okolo 0,08 Pa), měření zahuštěného kalu na odtahu z usazováku vykazovalo značnou variabilitu reologie v souvislosti se zabíháním usazováku a změnami jeho nastavení (Obr. 5).



Obr. 5. Reogramy zahuštěného přebytečného kalu a jejich proklad modelem Herschel – Bulkley.

4. ZÁVĚR

Vyvinutý trubní reometr prokázal svou použitelnost pro měření reologických vlastností čistírenských kalů, u kterých obsah makroskopických pevných částic a agregátů činí měření jinými metodami komplikované. Umožňuje tak získat data důležitá pro správné dimenzování čerpadel a dalších prvků technologie ČOV. Měření v reálném provozu ukázalo, že časová variabilita reologie kalů může být značná. To skýtá potenciál pro použití inline reometru pro operativní řízení procesních parametrů (otáčky, dávkování) a v důsledku i snižování nákladů.

PODĚKOVÁNÍ

Publikace byla vytvořena na základě výstupů projektu MPO TRIO ev. č. FV40210 řešeného ve spolupráci firem KUNST, spol. s r.o., Sweco Hydroprojekt a.s., Fakulty stavební ČVUT v Praze a Fakulty strojní ČVUT v Praze. Poděkování patří MPO i kolegům z ostatních řešitelských týmů.

SEZNAM LITERATURY

- Chryst, A.G., Mönch, A., Constanti-Carey, K. (2019). Online rheology monitoring of a thickener underflow. *Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*, p. 495-504, May 8-10, Cape Town, South Africa.
- Haldenwang, R., Fester, V., Kotzé, R. (2017). Waste water sludge pipeline predictions using conventional viscometry and ultrasound based rheometry. *Proceedings of the 18th International conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles*, p. 89-96, September 11-15, Prague, Czech Republic.
- Haldenwang, R., Fester, V., Sutherland, A. P. N., Holm, R., Du Toit, R. (2010). Design construction, commissioning and testing of a portable tube viscometer and pump rig. *Proceedings of the 18th International conference on Hydrotransport*, p. 287-298, September 22-24, Rio De Janeiro, Brazil.
- Slatter, P. (2000). The Role of Rheology in the Pipelining of Mineral Slurries. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 20(1), p. 281-300.
- Slatter, P. T., Petersen, F.W., Moodie, L. (1998). Rheological characterisation of mineral slurries using balanced beam tube viscometry. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 098(4), p. 165-169.
- Svitavská, K., Havlík, V., Hodáň, V., Matoušek, V. (2019). Vliv nejistoty určení reologických vlastností zahuštěných čistírenských kalů na výpočet ztráty třením při jejich proudění potrubím. *Sborník přednášek 13. bienální konference VODA 2019*, p. 370-377, 18.-20. září, Poděbrady, Česká Republika.
- Visintainer, R., Matoušek, V., Pullum, L., Sellgren, A. (2023). *Slurry Transport Using Centrifugal Pumps*. Springer, Cham.