

# NÁVRH A VÝROBA SMĚSI BENTONITOVÝCH PELET II

## - závěrečná zpráva

Autoři: Ing. Jiří Štástka, Ph.D.,  
Ing. Radek Vašíček, Ph.D.,  
Ing. Kateřina Černochová

Praha, 2020



**NÁZEV ZPRÁVY:** Návrh a výroba směsi bentonitových pelet II - závěrečná zpráva

**NÁZEV PROJEKTU:** Návrh a výroba směsi bentonitových pelet II

**IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU:**

Závěrečná zpráva

**ČÍSLO SMLOUVY:** SO 2019 - 013

**BIBLIOGRAFICKÝ ZÁPIS:**

ŠTÁSTKA J., VAŠÍČEK R., ČERNOCHOVÁ K. (2020). Návrh a výroba směsi bentonitových pelet II – závěrečná zpráva, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky, MS SÚRAO TZ 489/2020, 45 str.

**ŘEŠITELÉ:**

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, veřejná vysoká škola<sup>1</sup>,

**AUTORSKÝ KOLEKTIV:** Štástka J., Vašíček R., Černochová K.,

**Ing. Lucie Hausmannová, Ph.D.**

Manažer projektu (SÚRAO)

22.4. 2020

**Ing. Jiří Štástka, Ph.D.**

Manažer projektu (ČVUT v Praze)

17. 4. 2020

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Technologie lisování</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Testování výroby pelet v poloprovozním měřítku</b> .....	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Průmyslová výroba pelet</b> .....	<b>9</b>
4.1	Cyklus č. 1 .....	10
4.2	Cyklus č. 2 .....	11
4.3	Cyklus č. 3 .....	12
4.4	Cyklus č. 4 .....	13
4.5	Cyklus č. 5 .....	15
4.6	Cyklus č. 6 .....	16
4.7	Cyklus č. 7 .....	17
<b>5</b>	<b>Zkoušky zhutnění vrstvy</b> .....	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>Vyhodnocení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku</b> .....	<b>22</b>
<b>7</b>	<b>Vyhodnocení projektu</b> .....	<b>24</b>
7.1	Shrnutí postupu výroby a výsledky objemových hmotností sušiny .....	24
7.2	Zrnitosti .....	28
7.2.1	Průměrné zrnitosti .....	28
7.2.2	Změna zrnitosti po hutnění .....	30
7.3	Zkoušky zhutnění .....	31
7.4	Hydraulické vodivosti a bobtnací tlaky .....	32
<b>8</b>	<b>Doporučení pro další výzkum</b> .....	<b>33</b>
<b>9</b>	<b>Závěr</b> .....	<b>34</b>
<b>10</b>	<b>Reference</b> .....	<b>35</b>
<b>11</b>	<b>Přílohy</b> .....	<b>36</b>
11.1	Katalogový materiálový list pro M182 0-8 (BCV_PM_2020 0-8) .....	36
11.2	Katalogový materiálový list pro M182 0-50 (BCV_PM_2020 0-50) .....	37
11.3	Způsoby vyhodnocení vzorků .....	38
11.3.1	Hydraulické vodivosti a bobtnací tlaky .....	38
11.3.2	Objemová hmotnost sušiny .....	39
11.3.3	Objemová hmotnost .....	40
11.3.4	Vlhkost (hmotnostní vlhkost) .....	40
11.3.5	Zrnitostní složení .....	41
11.3.6	Objemová hmotnost bentonitové vrstvy .....	41



## Seznam použitých zkratk:

BCV	neaktivovaný vápenato-hořečnatý bentonit z ložiska Černý vrch
CEG	Centrum experimentální geotechniky – experimentální pracoviště Fakulty stavební ČVUT v Praze;
SoD	Smlouva o dílo
M181	peletizovaný bentonit vyrobený kompaktořem („čočka“)
M182 0-50	peletizovaný bentonit vyrobený kompaktořem a podrcený v kladivovém drtiči (drť), orientační zrnitost 0-50, protože může ojediněle obsahovat i větší zrna
M182 1,6-8	peletizovaný bentonit vyrobený kompaktořem a podrcený v kladivovém drtiči (drť) v zrnitosti 1,6 až 8 mm (materiál propadlý sítem 9 mm; podíl frakce 8-9 mm zanedbatelný)
M182 0-8	peletizovaný bentonit vyrobený kompaktořem a podrcený v kladivovém drtiči (drť) v zrnitosti 0 až 8 mm (materiál propadlý sítem 9 mm; podíl frakce 8-9 mm zanedbatelný)

## Vysvětlení pojmů:

### Fullerova studie (výpočet):

práce, jejímž výsledkem je početní vztah pro nalezení plynulé zrnitosti sypkých materiálů, tzn., že se jedná o ideální čáru zrnitosti, která řeší zaplnění mezizrnných prostorů stále menšími zrny, čímž je zaručena co nejmenší možná mezerovitost směsi.

## Abstrakt

Projekt navazuje na předešlé práce s peletizovaným vápenato-hořečnatým bentonitem z ložiska Černý vrch. Hlavním cílem bylo dosáhnout objemové hmotnosti sušiny pelet z tohoto bentonitu nad  $2000 \text{ kg/m}^3$ . Tato závěrečná zpráva shrnuje řešení projektu, který byl zadáním rozdělen do čtyř dílčích plnění – Testování pelet v poloprovozním měřítku; Průmyslová výroba pelet; Zkoušky zhutnění vrstvy z vyvinutého materiálu a Vyhodnocení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku včetně Vyhodnocení projektu. Poloprovozní a výrobní zkoušky byly realizovány u poddodavatele projektu – firmy Keramost a. s. V průběhu řešení projektu se podařilo hlavní cíl splnit – zhutnění pelety nad  $2000 \text{ kg/m}^3$ , což bylo ověřeno laboratorními zkouškami. Dále bylo provedeno ověření vlastností vrstev tvořených zhutněnými peletami. Vrstva z peletizovaného bentonitu o zrnitosti 0-8 mm vykazovala zhutnění (objemovou hmotnost sušiny) nad  $1,20 \text{ g/cm}^3$  při volném sypání bentonitu. Při použití hutnicího pěchu bylo dosaženo maximálního zhutnění  $1,55 \text{ g/cm}^3$ . Pro peletizovaný bentonit se zrnitostí 0-50 mm byly objemové hmotnosti sušiny vyšší než pro zrnitost 0-8 mm. Pro materiál 0-50 mm byla objemová hmotnost sušiny po volném sypání  $1,26 \text{ g/cm}^3$  u maloobjemových vzorků ( $5 \text{ dm}^3$ ) a  $1,41 \text{ g/cm}^3$  pro zkoušky o vyšším objemu cca  $80 \text{ dm}^3$ . Vysokých objemových hmotností (nad  $1,64 \text{ g/cm}^3$ ) bylo dosaženo při hutnění pěchem při zkoušce o větším objemu. Dle zadání projektu byly také stanoveny zrnitosti vyrobeného peletizovaného bentonitu a byly určeny křivky závislosti hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku na objemové hmotnosti sušiny.

## Klíčová slova

Hlubinné úložiště, peletizovaný bentonit, zhutnění, objemová hmotnost, hydraulická vodivost, bobtnací tlak, kompaktor

## Abstract

The research work was closely linked to previous research conducted on pelletised calcium-magnesium bentonite extracted from the Černý vrch deposit. The main objective of the project was to attain a dry density for Černý vrch bentonite pellets of in excess of 2000 kg/m<sup>3</sup>. The report contains a detailed description of the project, which was divided into four main partial projects as specified in the Project Contract, namely the Testing of Pellets at the Pilot Scale, the Industrial Production of Pellets, the Compaction Testing of a Layer of the Developed Material and the Assessment of Hydraulic Conductivity and Swelling Pressure including the Project Assessment. The pilot and production testing were performed at the premises of the Keramost a.s. project subcontractor. The main objective of the project was attained, i.e. a bentonite pellet dry density of over 2000 kg/m<sup>3</sup> (2 g/cm<sup>3</sup>). The result was verified by means of laboratory testing. Compaction tests were also conducted on an experimental layer: a layer of pelletised bentonite with a grain size of 0-8 mm exhibited compaction (dry density) of over 1.2 g/cm<sup>3</sup> via the bentonite free fall method, whereas the use of a compaction piston resulted in the highest level of compaction for the 0-8 mm material, i.e. 1.55 g/cm<sup>3</sup>. The dry density value of the 0-50 mm pelletised bentonite was higher than that determined for the 0-8 mm grain size. With respect to the 0-50 mm material, the dry density following free fall compaction was determined at 1.26 g/cm<sup>3</sup> for small volume samples (5 dm<sup>3</sup>) and 1.41 g/cm<sup>3</sup> for larger volume samples of around 80 dm<sup>3</sup>. Relatively high dry densities of above 1.64 g/cm<sup>3</sup> were attained via piston compaction for the larger samples. In accordance with the project specifications, the granularity of the produced pelletised bentonite was determined, as were the hydraulic conductivity and swelling pressure curves.

## Keywords

Deep geological repository, peletized bentonite, bentonite compaction, hydraulic conductivity, swelling pressure, compaction machine



# 1 Úvod

Projekt byl zaměřen na vývoj a ověření postupu výroby bentonitových pelet (peletizovaného bentonitu) z neaktivovaného vápenato-hořečnatého bentonitu z ložiska Černý vrch (BCV) s cílem dosáhnout objemové hmotnosti sušiny pelet přes  $2000 \text{ kg/m}^3$  ( $2 \text{ g/cm}^3$ ).

Náplň projektu byla definována ve Smlouvě o dílo, projekt byl rozdělen na čtyři dílčí plnění: *Předmětem smlouvy je na jedné straně závazek zhotovitele poskytnout součinnost nutnou pro zhotovení díla, jehož účelem je vyvinutí směsi a výroby pelet z bentonitu české provenience, která by měla zajistit požadovanou objemovou hmotnost bentonitové těsnicí vrstvy.*

Dílčí plnění:

## 1 Testování výroby pelet v poloprovozním měřítku

*Testování bude probíhat za účasti poddodavatele technologie. Přičemž musí být splněno zhuštění pelety nad  $2000 \text{ kg/m}^3$  (tzn. nad  $2 \text{ g/cm}^3$ ).*

## 2 Průmyslová výroba pelet

*Výroba směsi v průmyslovém měřítku k ověření, zda bylo dosaženo stejných výsledků. Hlavním cílem bude udržení hodnot zhuštění pelety nad  $2000 \text{ kg/m}^3$  a zrnitosti směsi okolo čáry ideální zrnitosti dle Fullerova výpočtu.*

## 3 Zkoušky zhuštění vrstvy z vyvinutého materiálu

## 4 Vyhodnocení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku a Vyhodnocení projektu

Tato zpráva je členěna podle dílčích plnění, na závěr je provedeno zhodnocení výsledků a jsou doporučeny případné další práce.

## 2 Technologie lisování

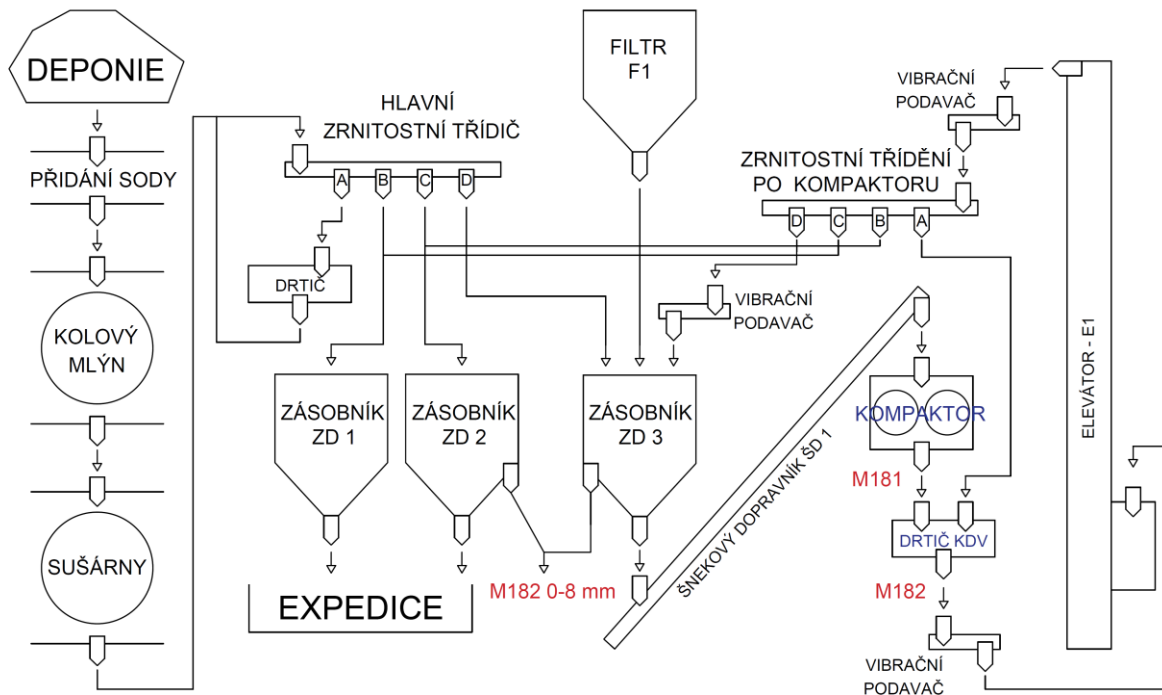
Pro výrobu pelet byl použit tzv. „kompaktor“. Poddodavateli výzkumu (firma Keramost a.s.) tento stroj dodala firma Köppern GmbH & Co v roce 2008. V souladu se SoD byli zástupci Köppern GmbH & Co pozváni k pilotnímu testu a při tomto testu byli seznámeni s výstupy a průběhem lisování bentonitových pelet. Po této schůzce zástupci dodavatele stroje specifikovali možné úpravy pro dosažení co nejvyšší objemové hmotnosti sušiny pelet, viz kapitola 3.

Při běžném výrobním provozu je kompaktor používán pro zpracování peletizovaného bentonitu podle požadavků na finální produkt výroby. Tzn., že se do kompaktoru vrací materiál, který je tzv. nadsítné i podsítné z předchozí fáze výroby. Oba tyto „odpady výroby“ jsou ještě před lisováním v kompaktoru drceny v kladivovém drtiči. V kompaktoru je tedy lisován materiál se zrnitostí, kterou nelze využít (není využíván) jako finální produkt výroby.

Na Obr. 1 je schéma kompaktoru. Ze schématu je patrné, že bentonit je lisován mezi dvěma protiběžnými válci. Bentonit je k válcům přiváděn shora svislým šnekovým dopravníkem. Kompaktor lisuje bentonitové pelety ve tvaru destiček s tloušťkou do cca 2 cm a o hraně až několik cm (viz Obr. 3). Tyto destičky jsou ve výrobě označovány jako čočky a pro potřeby výzkumných prací bylo použito označení M181. Pod kompaktorem se nachází kladivový drtič, který destičky (čočky) drtí (drť byla označena M182). Drť lze následně vytřídit podle požadovaných zrnitostních frakcí, např. 0-8 mm. Tento granulovaný bentonit po lisování, drcení a zrnitostním třídění byl označen jako M182 0-8, viz schéma linky na Obr. 2.



Obr. 1 Schéma lisovacích válců s perforací umístěnou v kompaktoru (zdroj Keramost – Köppern).



Obr. 2 Schéma linky u poddodavatele v Obrnicích. Zkratky M181, M182 a M182 0-8 mm označují materiál pro tento projekt a místa, kde byl tento peletizovaný materiál odebrán.

Linka v Obrnicích umožňuje výrobu materiálu o zrnitostním složení dle požadavku odběratele, je např. možné získat materiál se zrnitostí v intervalu 1,6 až 8 mm.



Obr. 3 Foto materiálu vylišaného kompaktořem, tzv. čočka označená M181; vlevo při odběru vzorku v úpravně a vpravo v laboratoři CEG.



Obr. 4 Vlevo je zobrazen peletizovaný materiál označený M182 0-50 (drť odebraná pod kladivovým drtičem) a vpravo materiál M 182 1,6-8 (materiál po drcení zrnitostně vytříděný spodním sítím 1,6 mm a vrchním sítím 9 mm).

V průběhu projektu byl mj. upraven postup přípravy materiálu tím způsobem, že nově byl materiál před zrnitostním tříděním několikrát lisován a to z toho důvodu, aby vždy byla lisovaná i jemná frakce, která by se při běžné výrobě materiálu v zrnitosti např. 0-8 již nevracela na lisování ke kompaktoru. Předpokládá se, že bylo provedeno 3 opakovaných lisování, protože linka má výrobní kapacitu zhruba 1 t/hodinu a opakované lisování cca 2 tun bentonitu probíhalo 6 hodin. Tento materiál se zrnitostí 0 až 8 mm (vše pod sítím s okem 9 mm<sup>1</sup>) M182 0-8 mm (viz Obr. 5) byl vyráběn od čtvrtého průmyslového cyklu výroby.



Obr. 5 Peletizovaný bentonit s označením M182 0-8 mm.

<sup>1</sup> Laboratorní zkoušky prokázaly, že vyráběný materiál za použití síta 9 mm větší zrna než 8 mm téměř neobsahuje, a proto je uváděna zrnitost např. 0-8 mm. Toto označení je vhodnější než 0-9 mm.

### 3 Testování výroby pelet v poloprovozním měřítku

Před poloprovozní výrobou v Keramostu a.s. proběhlo první testování výroby s účastí poddodavatele technologie z firmy Köppern GmbH & Co s těmito hlavními doporučeními pro další práce:

1. *Oprava opotřebených boků lisovací hlavy.* V průběhu provozování kompaktoru došlo k opotřebení bočních plátů u lisovacích válců. V bočních plátech byly vydřené drážky od lisovacích válců, viz Obr. 6 vlevo. Bočnice byly opraveny v průběhu června 2019.
2. *Srovnání lisovacích válců.* V průběhu lisování dochází k opotřebení válců a ty pak nejsou rovné (lisovací hrana je zakřivená), což způsobuje různou tloušťku lisovaného materiálu. V průběhu června 2019 byla závada odstraněna přebroušením hran válců. Nerovnost plochy válce je znázorněna na Obr. 6 vpravo.
3. *Možnost snížení rychlosti otáčení válců.* V říjnu 2019 byl upraven řídicí systém kompaktoru a systém řízení byl více variabilní. V systému se hlavně sleduje lisovací tlak, a i rychlostí válců se lisovací tlak upravuje. Nově bylo možné snížit otáčky válců ze 6 za minutu na 4 za minutu.
4. *Sledovat protitlak dusíku, udržovat cca 80 %.* Tlak dusíku způsobuje oddalování lisovacích válců od sebe. Tlak byl zvýšen na doporučených 80 % provozního tlaku.



Obr. 6 Vlevo je ocelový plát, který tvoří svislou bočnici lisovacích válců. Na obrázku je zřejmé opotřebení – drážky (označeny šipkou). Vpravo je patrné, že byly také opotřebené válce, a to uprostřed plochy. Hrany válce vystupovaly oproti středu válce zhruba o 5 mm (foto Köppern GmbH & Co 2019, poskytl Keramost a.s.).

Postupně byly v r. 2019 zohledněny či vyřešeny výše uvedené připomínky a bylo provedeno poloprovozní lisování. Při tom byly odebrány vzorky materiálu (čočky – M181) a následně, v laboratořích zhotovitele, stanovena objemová hmotnost sušiny, která u odebraných vzorků neklesla pod  $2,000 \text{ g/cm}^3$ . Průměrné hodnoty objemové hmotnosti sušiny z poloprovozu byly  $2,023 \text{ g/cm}^3$  při průměrné vlhkosti 2,3 % a  $2,038 \text{ g/cm}^3$  při průměrné vlhkosti 1,8 %. Tyto výsledky a provedené práce byly diskutovány s objednatelem při kontrolním dnu k 1. dílčímu plnění v září 2019.

## 4 Průmyslová výroba pelet

Poloprovozní výroba byla zaměřena na výrobu drtě (M182) při běžném provozu linky bez specifikace na požadovanou velikost ok „spodního a horního“ síta. Rozdíl mezi poloprovozní a průmyslovou výrobou spočívá v tom, že u průmyslové výroby je peletizovaný bentonit vyráběn v granulometrii dle instalovaných sít v zrnitostním třídíči (např. 1,6 až 9 mm) při výkonu zhruba 1 tuna za hodinu.

Z předchozích poloprovozních zkoušek bylo zřejmé, že objemové hmotnosti sušiny nad  $2 \text{ g/cm}^3$  lze dosáhnout. Protože však objemová hmotnost sušiny byla při poloprovozním testování těsně nad  $2 \text{ g/cm}^3$ , bylo zřejmé, že udržet tuto hodnotu slisovaného bentonitu při průmyslové výrobě bude obtížné dosáhnout bez dalších úprav technologie.

Realizovanou průmyslovou výrobu pelet lze rozdělit do dvou etap. První etapa obsahuje čtyři výrobní cykly, které byly provedeny v průběhu října a listopadu 2019:

- Cyklus 1 – lisování M182 1,6-8 mm; objemová hmotnost sušiny nad  $2 \text{ g/cm}^3$ ; méně vhodná zrnitost – nízký podíl jemné frakce
- Cyklus 2 – lisování M182 0-8 mm – tedy bez definované spodní zrnitosti; objemová hmotnost sušiny pod  $2 \text{ g/cm}^3$ ; nízké zhutnění vysvětleno tím, že se nevrací jemnozrný bentonit na lisování do kompaktoru
- Cyklus 3 – lisován M182 1,6-8 mm; objemová hmotnost sušiny opět nad  $2 \text{ g/cm}^3$
- Cyklus 4 – lisován M182 0,8-8 mm; s cílem zvýšit podíl jemného materiálu v konečném výrobku (nepodařilo se – téměř stejná zrnitost jako u materiálu M182 1,6-8 mm, objemová hmotnost sušiny se vrátila nad  $2 \text{ g/cm}^3$ , odzkoušena úprava procesu lisování tzv. opakované lisování; také vyroben materiál M182 0-50 mm, který má křivku zrnitosti blížící se křivce podle Fullera

Na základě dosažených výsledků bylo na kontrolním dnu v lednu 2020 domluveno, že v druhé etapě budou provedeny další tři cykly průmyslové výroby, přičemž cílem pro tuto etapu bylo přiblížit se teoretické čáře ideální zrnitosti podle Fullera a ověřit výrobu pelet s objemovou hmotností sušiny bentonitu nad  $2 \text{ g/cm}^3$ . U všech cyklů průmyslových výrob ve druhé etapě bylo využito opětovné lisování před produkcí peletizovaného bentonitu, a to umožnilo i při produkci M182 0-8 udržet objemovou hmotnost sušiny nad  $2 \text{ g/cm}^3$ :

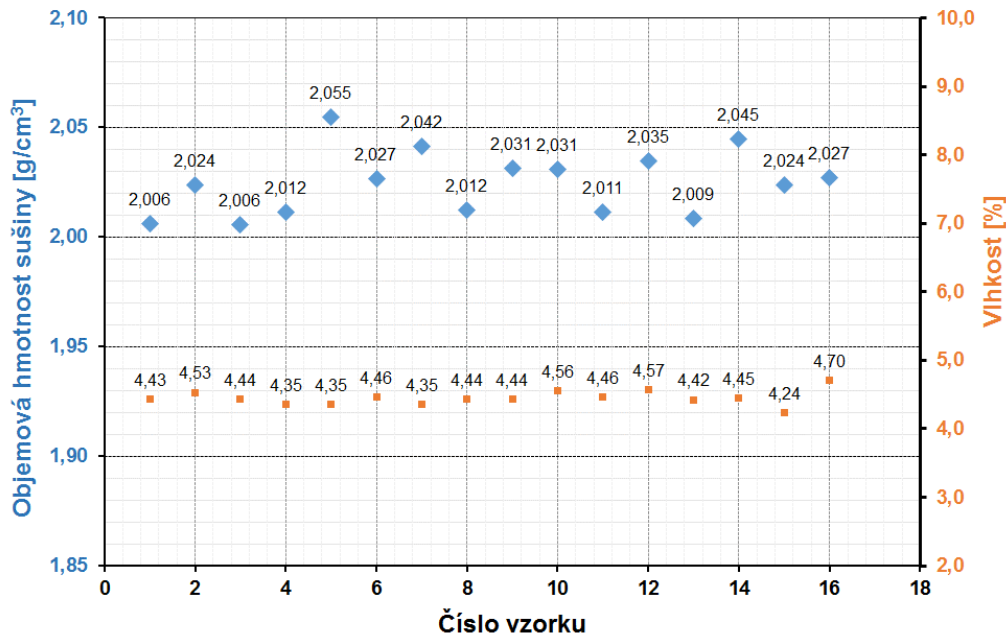
- Cyklus 5 – lisován M182 0-8 mm; před výrobou s definovanou zrnitostí byl objemová hmotnost sušiny nad  $2 \text{ g/cm}^3$ ,
- Cyklus 6 – lisován materiál M182 0-8 mm; objemová hmotnost sušiny nad  $2 \text{ g/cm}^3$ ,
- Cyklus 7 – lisovány materiály M182 0-8 mm a M182 0-50 mm; objemová hmotnost sušiny nad  $2 \text{ g/cm}^3$ , byly připraveny dvě tuny pro další dílčí plnění projektu, tj. pro zkoušky hutnění a laboratorní zkoušky hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku

Ve druhé etapě vyrobený granulát tedy obsahoval všechna zrna pod sítem 9 mm (označen jako M182 0-8 mm; podíl frakce 8-9 mm je zanedbatelný). Tento materiál má vhodnější zrnitost (oproti M 182 1,6-8 mm) při porovnání s Fullerovou křivkou.

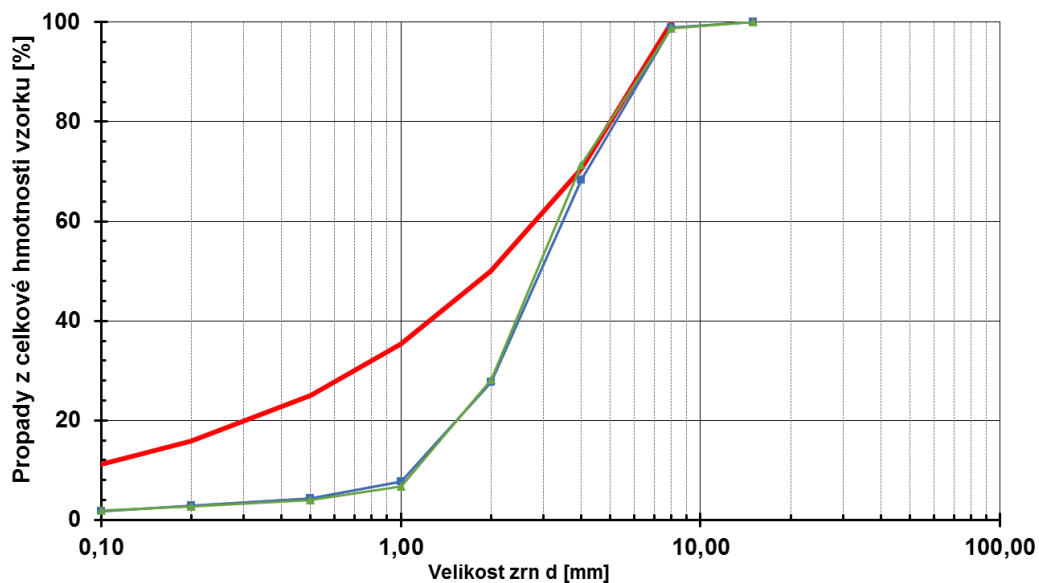
Při laboratorním testování objemové hmotnosti sušiny bentonitu byly vzorky vyhodnoceny metodou používanou v zahraničí (např. Garrite et.al. (2015)). Při této metodě je objem vzorku určen ponořením do odměrného válce s olivovým olejem a následně je stanovena objemová hmotnost. Zástupce zhotovitele seznámil objednatele s použitím této metody.

## 4.1 Cyklus č. 1

Tento 1. cyklus byl realizován 10. 10. 2019 a vyroben byl peletizovaný bentonit v rozmezí 1,6 až 9 mm (průměry ok v sítích ve výrobě, materiál je označen 1,6-8). Na Obr. 7 jsou vykresleny hodnoty vlhkostí a objemových hmotností sušiny pro peletizovaný materiál (M182 1,6-8) z této průmyslové výroby. Dle výsledků je zřejmé, že bylo splněno slisování bentonitu nad 2 g/cm<sup>3</sup>. Zrnitostní složení je vykresleno na Obr. 8.



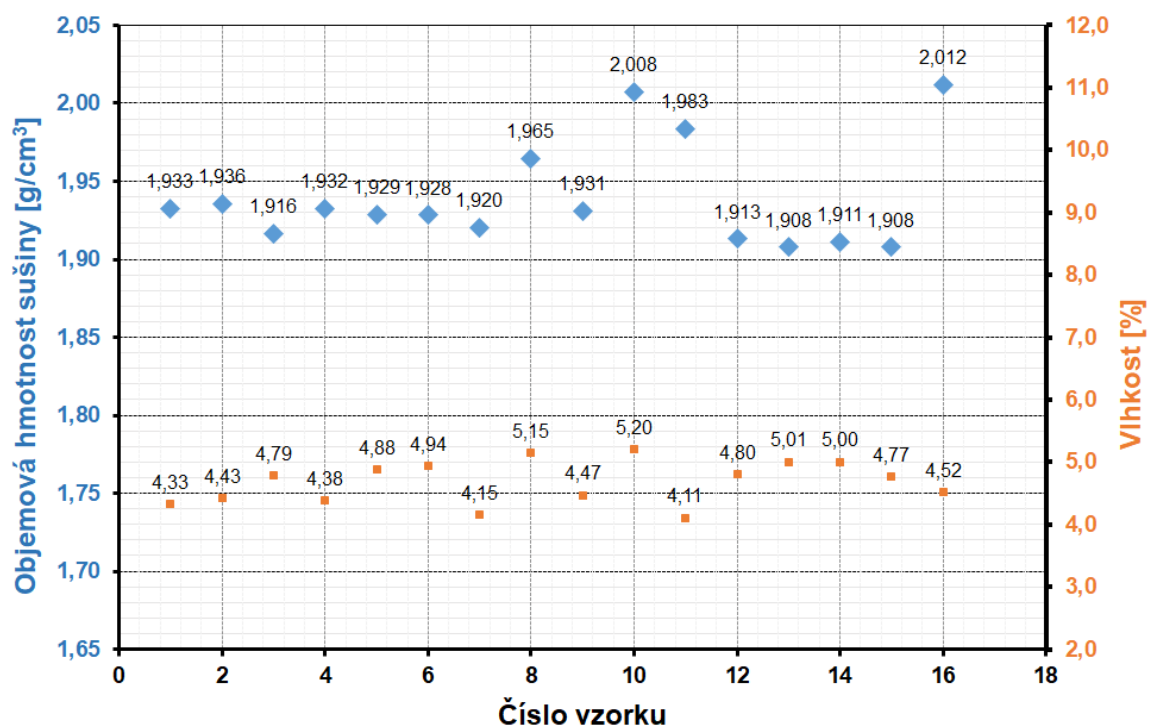
Obr. 7 Výsledky objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti z první průmyslové výroby.



Obr. 8 Zrnitostní složení peletizovaného bentonitu při první průmyslové výrobě, v grafu jsou vykresleny 3 zkoušky a červeně je znázorněna křivka zrnitosti podle Fullera.

## 4.2 Cyklus č. 2

Při druhém cyklu průmyslové výroby uskutečněném 25. 10. 2019 byl vyroben materiál se zrnitostí 0 až 8 mm (M182 0-8). Po vyhodnocení výsledků v laboratoři (viz Obr. 10) bylo zjištěno slisování bentonitu pod  $2 \text{ g/cm}^3$  (u většiny vzorků), tzn. nižší než v předchozím cyklu výroby materiálu se zrnitostí 1,6 až 8 mm, který podmínku ( $2,0 \text{ g/cm}^3$ ) splnil. Pro další výrobu bylo domluveno, že se ověří opakovatelnost výsledků pro zrnitost 1,6 až 8 mm a poté se rozhodne o dalším postupu. Stanovení zrnitosti nebylo v tomto cyklu provedeno, protože slisovaný materiál nesplnil podmínku objemové hmotnosti sušiny nad  $2 \text{ g/cm}^3$ .

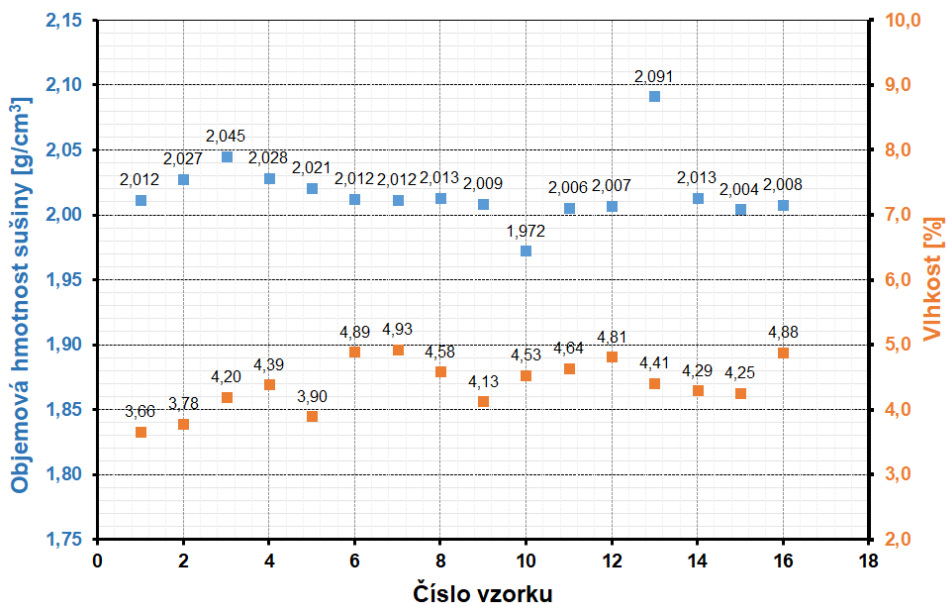


Obr. 9 Výsledky objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti z druhé průmyslové výroby.

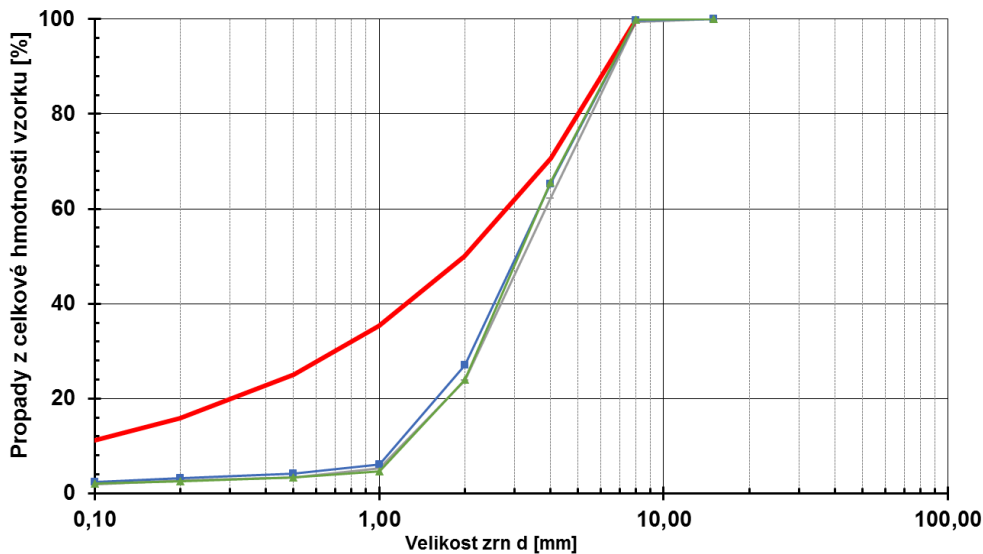


### 4.3 Cyklus č. 3

Třetí cyklus průmyslové výroby byl proveden 14. 11. 2019. Při této zkoušce byl vyráběn granulovaný bentonit o stejné zrnitosti, jako v prvním cyklu tzn. M182 1,6-8. Znovu využití spodního síta mělo případně potvrdit, že pokud je vyráběn materiál bez spodního síta, nevrací se ke kompaktoru jemnozrný materiál (0-1,6) a bentonit není proto slisován. Z výsledků ze třetí průmyslové výroby (viz Obr. 10) je zřejmé, že pro dosažení objemové hmotnosti nad 2 g/cm<sup>3</sup> je nutný vyšší podíl jemné frakce v materiálu, který je lisován v kompaktoru. Podsítiné bylo lisováno i při poloprovozní zkoušce (kapitola 3), protože ta byla realizována při běžném provozu linky se síty 2 až 5 mm. U poloprovozních zkoušek byla objemová hmotnost sušiny také nad 2 g/cm<sup>3</sup>.



Obr. 10 Výsledky objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti ze třetího cyklu průmyslové výroby.



Obr. 11 Zrnitostní složení peletizovaného bentonitu při třetím cyklu průmyslové výroby, v grafu jsou vykresleny výsledky 3 zkoušek zrnitosti a červeně je znázorněna křivka zrnitosti podle Fullerova výpočtu.

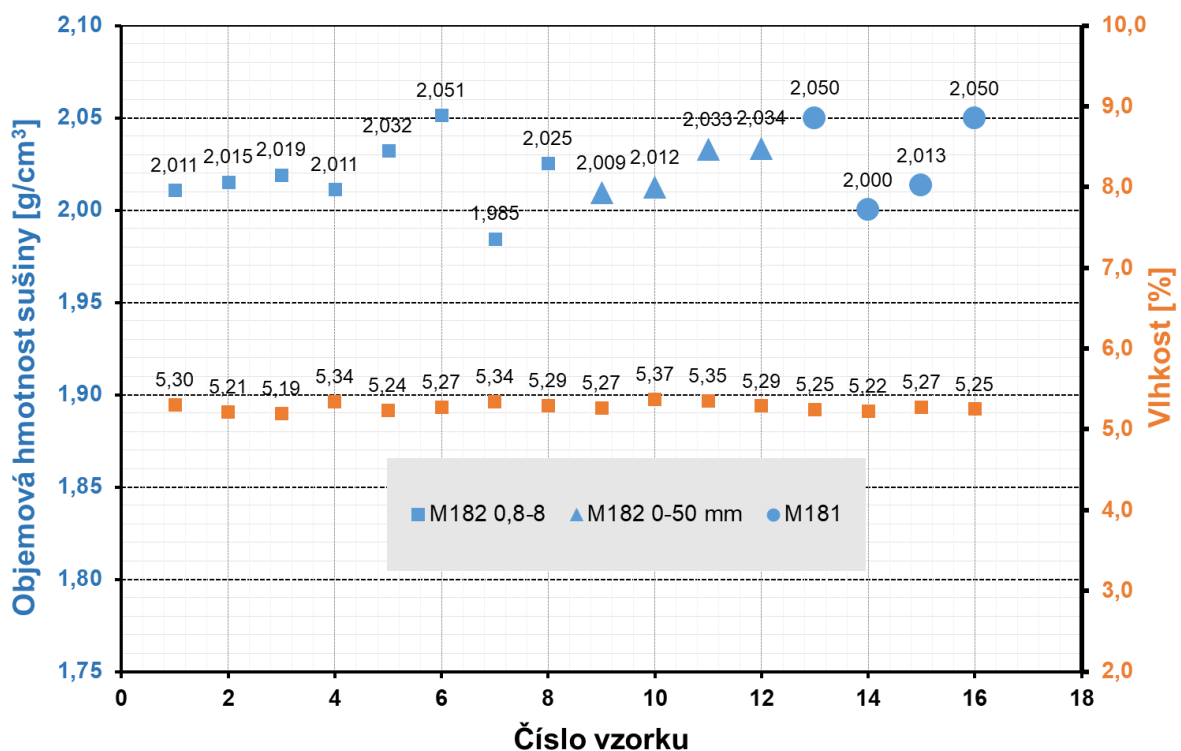
## 4.4 Cyklus č. 4

Tento cyklus byl proveden 26. 11. 2019. Pro třídění materiálu bylo využito síto s menším průměrem ok (0,8 mm oproti 1,6 mm). Důvodem bylo, aby výsledný materiál obsahoval vyšší podíl jemné frakce („podsítné“ odchází zpět do lisovacího procesu). Předpokládalo se, že se při použití jemnějšího síta zvýší podíl jemnozrného materiálu ve vyrobeném granulovaném materiálu a bude snadněji udrženo slisování bentonitu nad 2 g/cm<sup>3</sup>. Požadavek na objemovou hmotnost byl sice splněn, ale výsledný materiál 0,8 - 8 mm (vrchní síto 9 mm) má téměř identickou křivku zrnitosti jako materiál 1,6 - 8 mm.

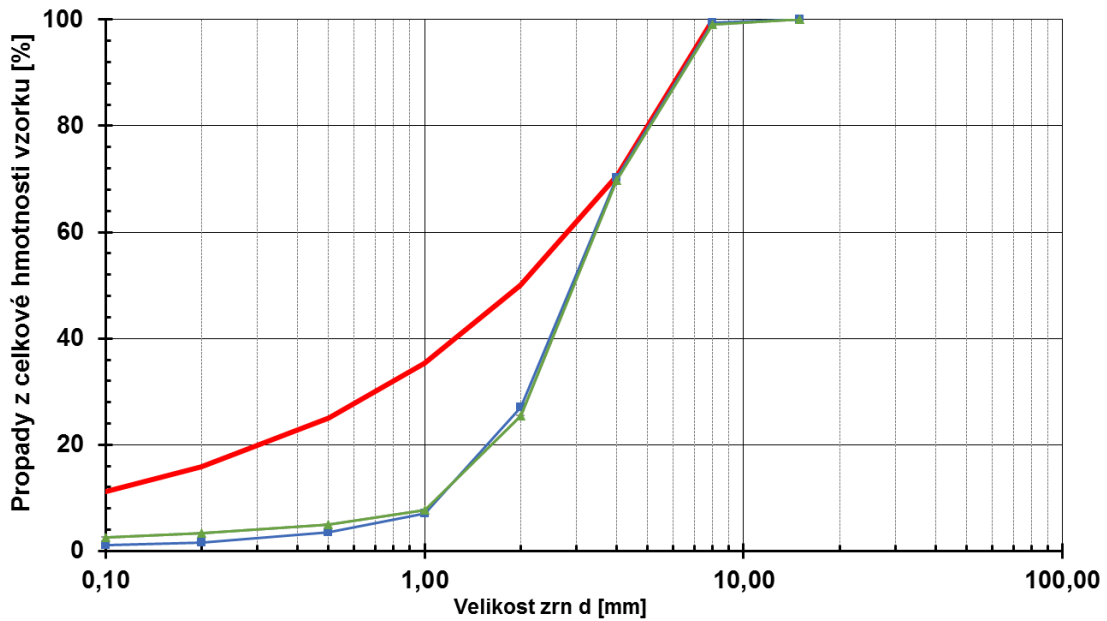
Při výrobě bylo také odzkoušeno opakované lisování bentonitu v kompaktoru, což bylo zajištěno odebráním všech sít ze zrnitostního třídíče. Opakované lisování bylo zavedeno jako možnost dosažení většího slisování bentonitu. Po opakovaném lisování byla linka vypnuta, nainstalována síta s průměry ok 0,8 a 9 mm a po zapnutí linky vyroben další materiál s označením 0,8 - 8 mm.

V tomto cyklu byla sledována objemová hmotnost v různých fázích výroby – tedy nejen výsledného granulátu (v zrnitosti 0,8 až 8 mm), ale také čocky (u kompaktoru M181) a drtě M 182 pod kladivovým drtičem. Z Obr. 12 je zřejmé, že objemové hmotnosti se v různých fázích výroby (M181 (čocka), M182 0-50 mm (drt'), M182 0,8-8 mm) neliší.

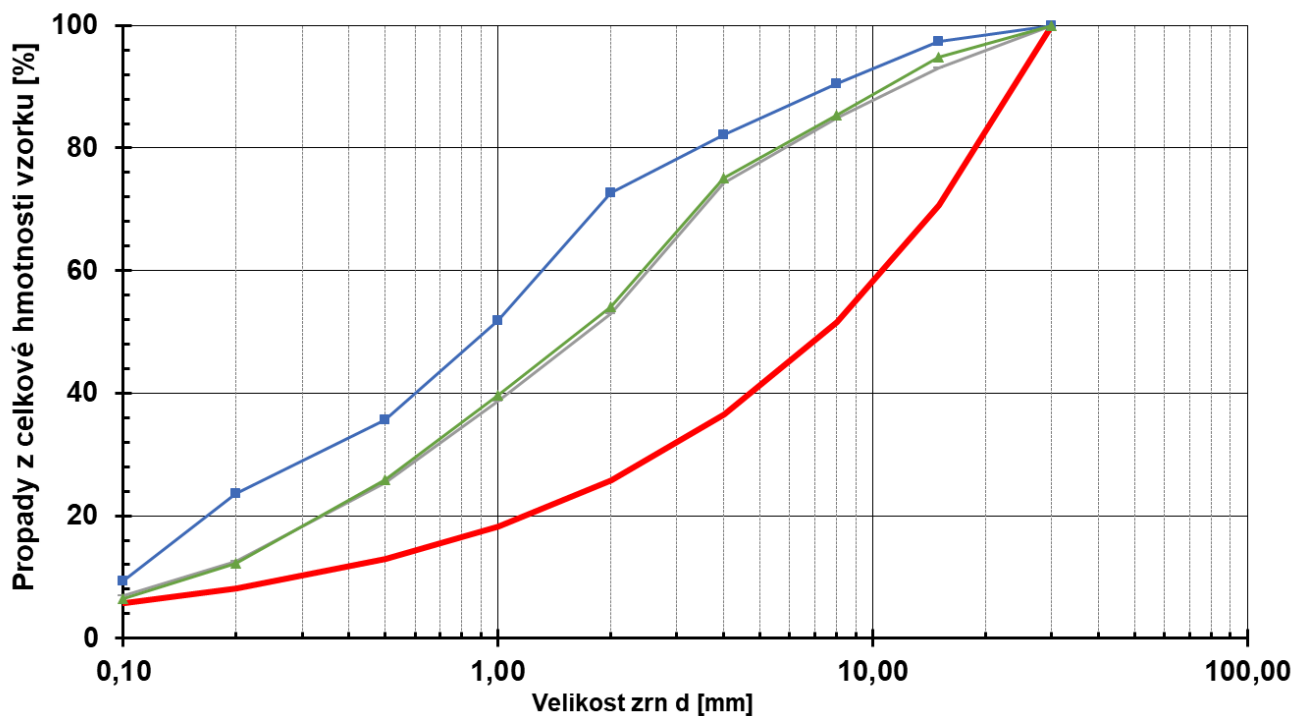
Mimo výroby 0,8 až 8 mm byl také vyroben materiál M182 (drt', orientační zrnitost 0-50 mm). Tedy materiál z kompaktoru, který neprošel zrnitostním tříděním. Tento materiál má identické zhuštění pelet (na Obr. 12 M182 0-50 mm), ale obsahuje vyšší podíl jemnozrného a hrubozrného materiálu a jeho zrnitost se blíží ideální zrnitosti podle Fullerova výpočtu, viz Obr. 14.



Obr. 12 Výsledky objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti ze čtvrté průmyslové zkoušky.



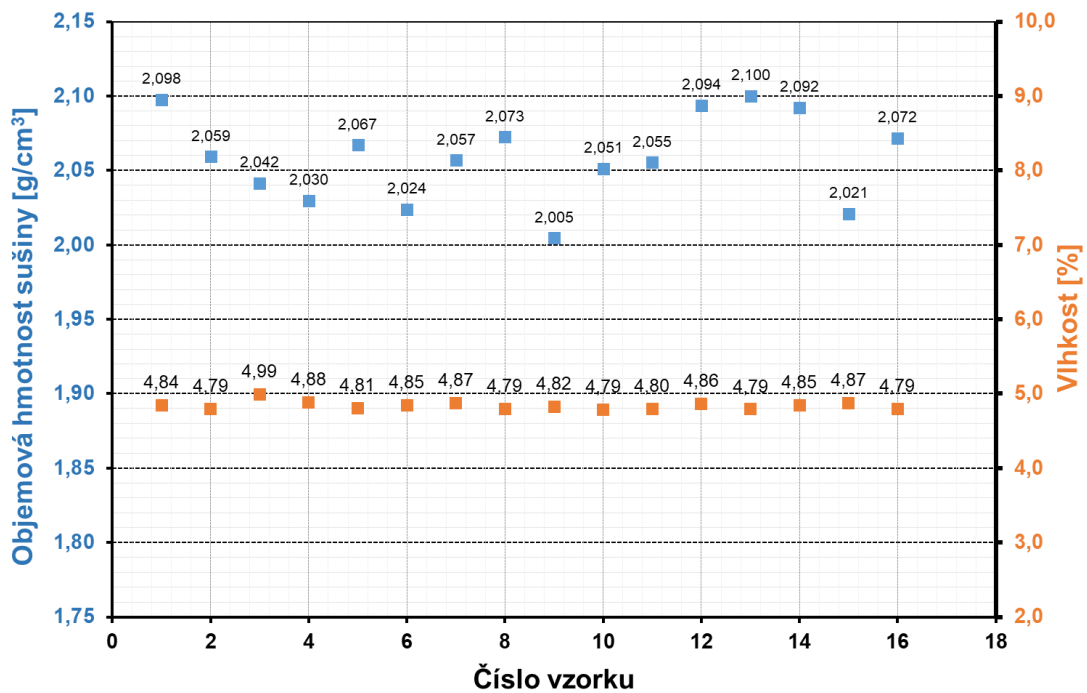
Obr. 13 Zrnitostní složení peletizovaného bentonitu M182 0-8 při čtvrté průmyslové výrobě, v grafu jsou vykresleny výsledky 3 zkoušek zrnitosti a červeně je znázorněna křivka zrnitosti podle Fullerova výpočtu.



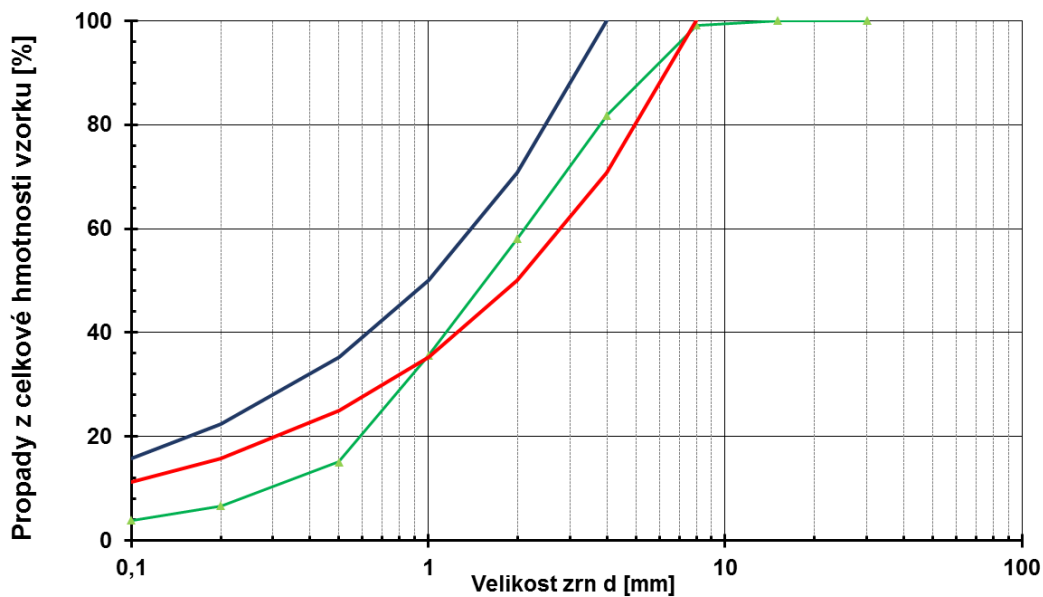
Obr. 14 Zrnitostní složení peletizovaného bentonitu M182 0-50 při čtvrté průmyslové výrobě, v grafu jsou vykresleny výsledky 3 zkoušek zrnitosti a červeně je znázorněna křivka zrnitosti podle Fullerova výpočtu

### 4.5 Cyklus č. 5

Pátý cyklus průmyslové výroby proběhl 10. 1. 2020. Bentonit v množství 3 tun byl opakovaně lisován v kompaktoru, poté bylo do linky doplněno síto 9 mm a byl vyroben bentonit M182 0-8. Výsledky objemových hmotností sušiny jsou vykresleny v grafu na Obr. 15. Také bylo provedeno orientační stanovení zrnitosti M 182 0-8, viz Obr. 16.



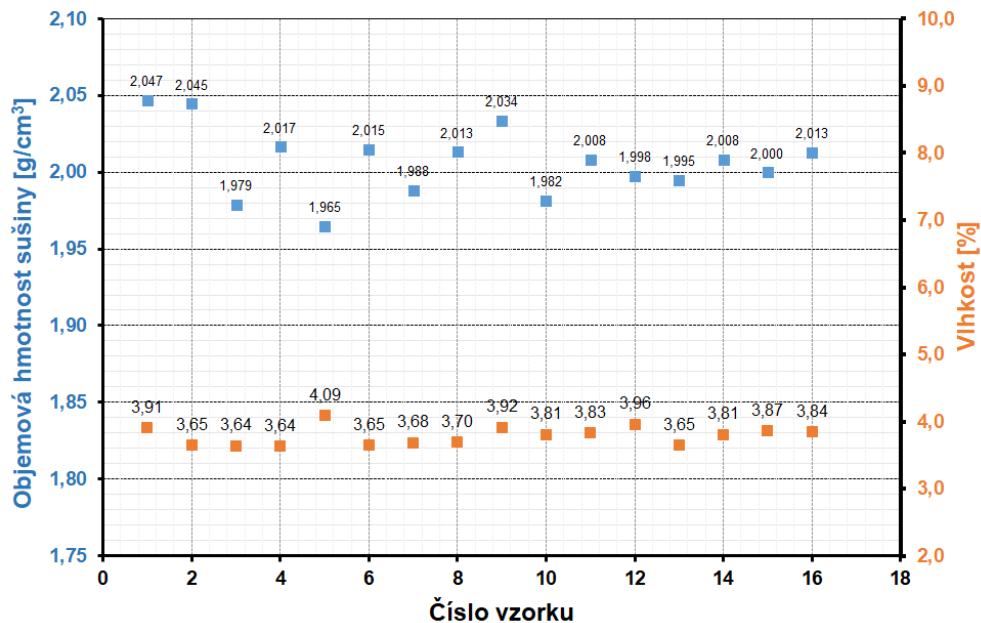
Obr. 15 Výsledky objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti z páté průmyslové zkoušky.



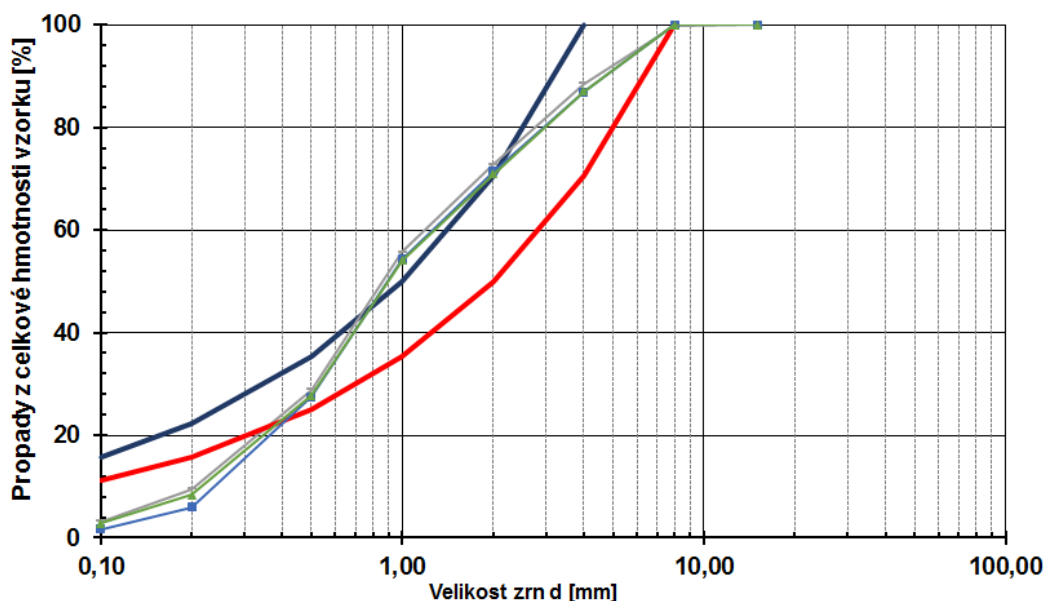
Obr. 16 Zrnitostní složení peletizovaného bentonitu při páté průmyslové výrobě, v grafu je vykreslen 1 výsledek zkoušky a červeně a modře jsou znázorněny křivky zrnitosti podle Fullerova výpočtu pro maximální zrna 8 mm (červeně) a 4 mm (modře).

### 4.6 Cyklus č. 6

Tento cyklus výroby byl realizován dne 17. 1. 2020. Při laboratorním vyhodnocení bylo zjištěno více vzorků s objemovou hmotností pod 2 g/cm<sup>3</sup>. Nižší zhutnění některých vzorků bylo, způsobenou technickou poruchou na zařízení. Po odstranění poruchy byly provedeny další práce na údržbě kompaktoru a linky. Další, sedmý a poslední, cyklus výroby mohl tak být proveden 21. 2. 2020 (kap. 4.7). Na Obr. 17 jsou uvedeny výsledky ze zkoušek objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti 6. cyklu. Na Obr. 18 je zrnitostní složení vyrobeného materiálu M182 0-8 mm.



Obr. 17 Výsledky objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti ze šestého cyklu průmyslové výroby.

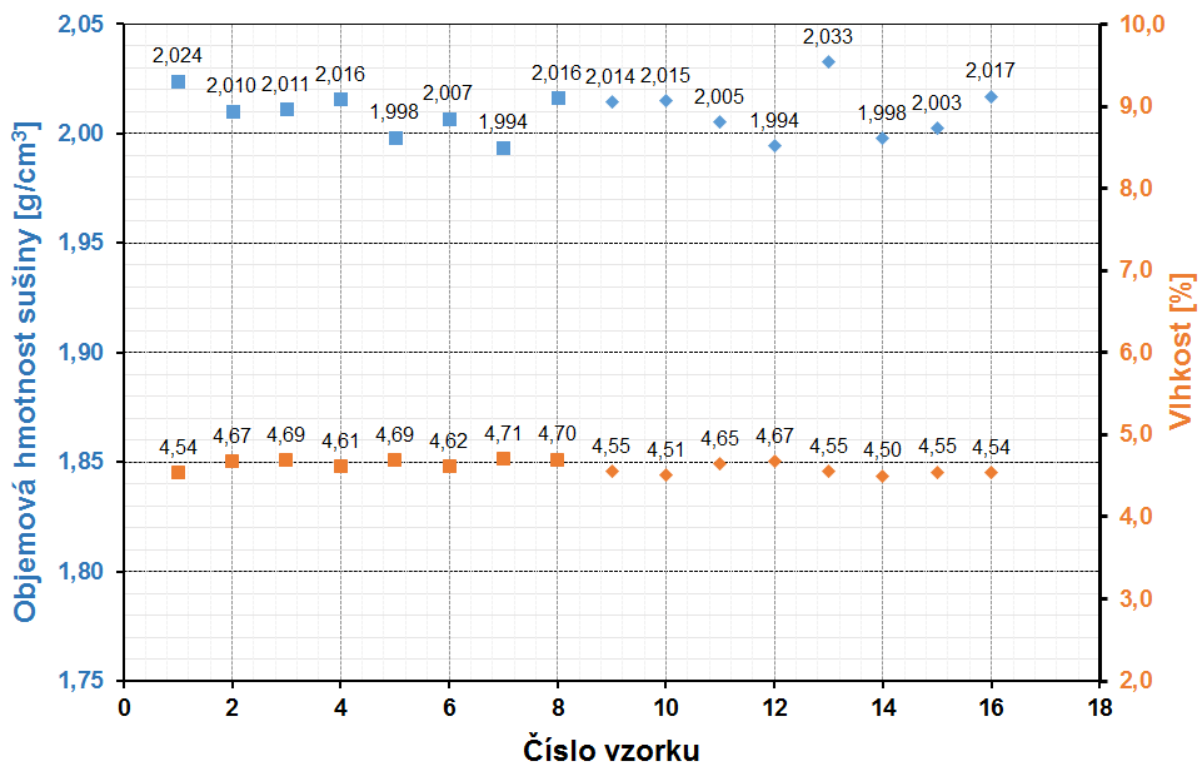


Obr. 18 Zrnitostní složení peletizovaného bentonitu při šestém cyklu průmyslové výroby, v grafu jsou vykresleny 3 výsledky zkoušek a silně křivky zrnitosti podle Fullera pro maximální zrno 4 mm resp. 8 mm.

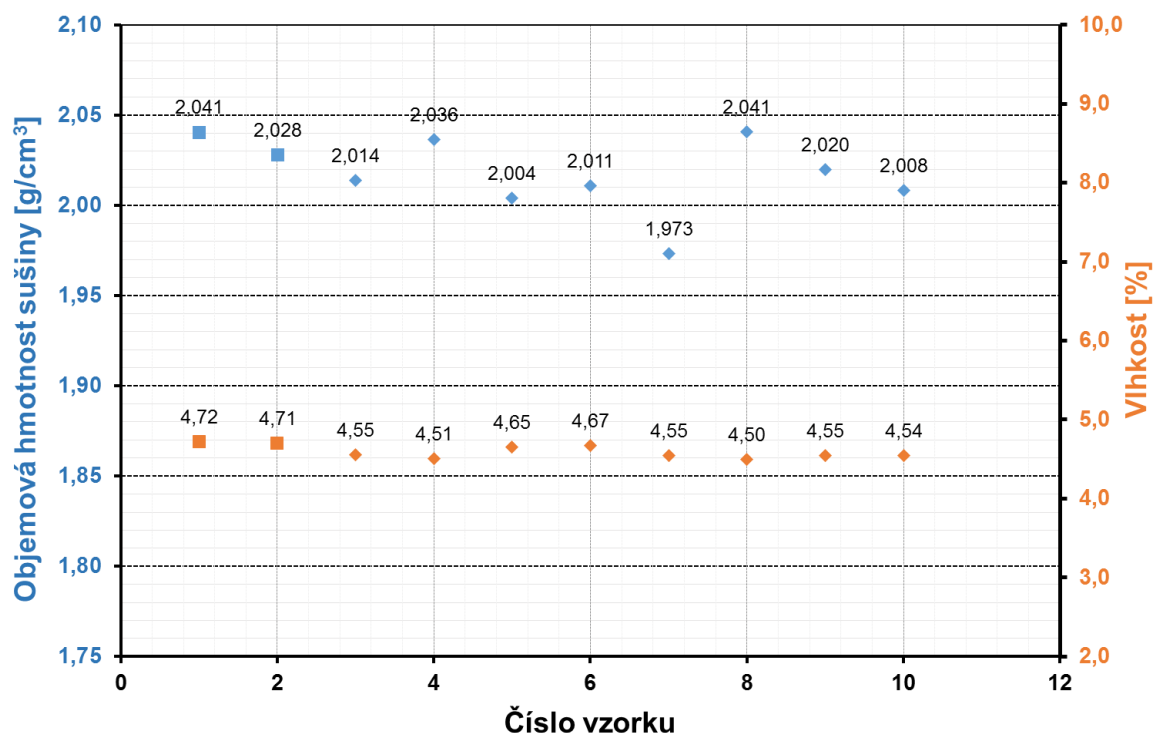
## 4.7 Cyklus č. 7

Poslední cyklus průmyslové výroby byl realizován 21. 2. 2020. Celkem byla odebrána cca 1 t lisovaného bentonitu M182 0-8 mm a 1 t lisovaného bentonitu M182 0-50 mm (drť). Oba materiály byly laboratorně analyzovány stejným způsobem jako v předchozích cyklech a u obou byly provedeny zkoušky zhutnění (viz kapitola 5). U materiálu M182 0-8 mm bylo navíc provedeno laboratorní stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku (viz kapitola 6).

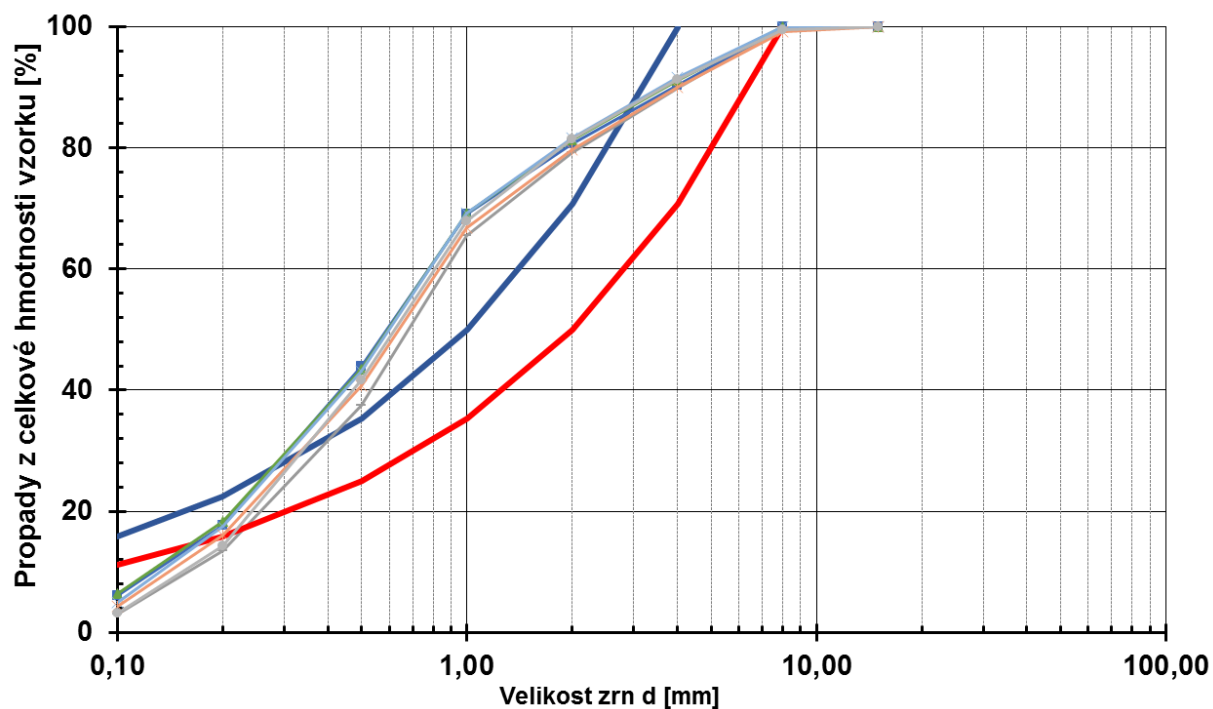
U M182 0-8 mm bylo provedeno porovnání objemových hmotností sušiny a vlhkostí po skladování (v igelitových pytlích v množství zhruba 30 kg), viz Obr. 19. Mezi zkouškami provedenými týden po výrobě a po třech týdnech po výrobě nedošlo ke změně vlhkosti ani objemové hmotnosti sušiny. Z porovnání tedy není zřejmý vliv krátkodobého skladování. Stejným způsobem byl testován materiál M182 0-50 mm. Výsledky objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti jsou uvedeny na Obr. 20. Dvě zkoušky byly provedeny přímo ve výrobě a další zkoušky byly uskutečněny tři týdny po výrobě. I u těchto vzorků nebyl prokázán vliv krátkodobého skladování. Dále pak byly provedeny u obou materiálů zrnitostní rozборы, viz Obr. 21 a Obr. 22.



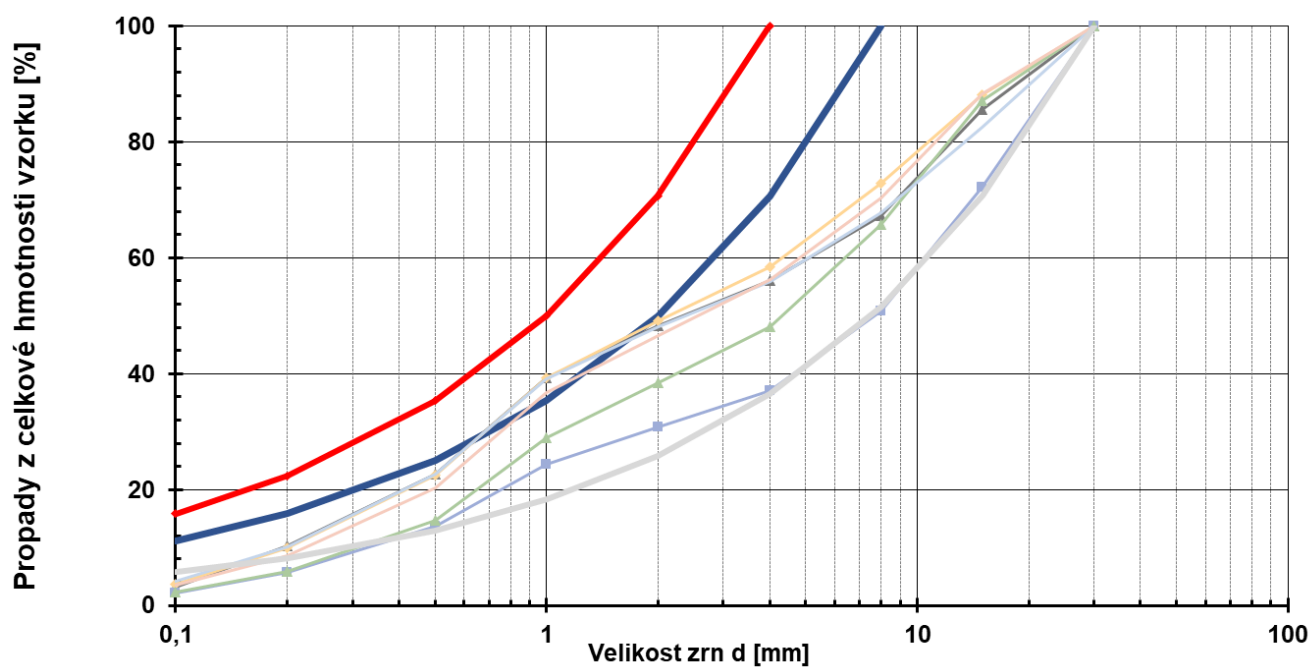
Obr. 19 Výsledky objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti ze sedmého cyklu průmyslové výroby pro materiál M182 0-8. Velikostí značek jsou odlišeny zkoušky realizované po výrobě (vzorky 1-8) a zkoušky realizované po třech týdnech skladování (vzorky číslo 9 až 16).



Obr. 20 Výsledky objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti pro materiál M182 0- 50 mm (bez zrnitostního třídění). Velikostí značek jsou odlišeny zkoušky realizované při výrobě (č. vzorku 1 a 2) a zkoušky realizované po třech týdnech skladování (vzorky číslo 3 až 11).



Obr. 21 Zrnitostní složení peletizovaného bentonitu M182 0-8, 6 výsledků zkoušek; silně znázorněny křivky zrnitosti podle Fullerova výpočtu pro maximální zrno 4 mm resp. 8 mm.



Obr. 22 Zrnitostní složení peletizovaného bentonitu M 182 0-50 mm, 6 výsledků zkoušek; silně znázorněny křivky zrnitosti podle Fullerova výpočtu pro maximální zrno 4 mm resp. 8 mm a 30 mm.



## 5 Zkoušky zhutnění vrstvy

Pro zkoušky zhutnění byly v rámci posledního cyklu průmyslové výroby připraveny zhruba 2 tuny peletizovaného bentonitu - 1 t s označením M182 0-8 a 1 t materiálu M182 (tj. bez zrnitostního třídění; s průměrnou objemovou hmotností sušiny  $2,01 \text{ g/cm}^3$  při hmotnostní vlhkosti 4,6 %). Cílem zkoušek zhutnění bylo zjistit průměrnou objemovou hmotnost sušiny vrstvy<sup>2</sup> zhutněné z vyvinutého peletizovaného materiálu.

Stejně jako v předcházejících pracích v rámci projektu Pelety I (Pacovský, 2019) byly zkoušeny tři laboratorní způsoby aplikace pro vzorky o objemu  $5 \text{ dm}^3$  (odměrný válec viz Obr. 23 vlevo), a to volné sypání, ruční setřesení a strojové setřesení za použití vibračního stolu VSB 40 (výrobce Brio Hranice).

Jako další krok byly provedeny zkoušky zhutnění, které lze označit jako „poloprovozní“, protože byly hutněny desítky kilogramů peletizovaného bentonitu v ocelovém válci o objemu  $120 \text{ dm}^3$  (Obr. 23 vpravo). Stejně jako u malých vzorků ( $5 \text{ dm}^3$ ) byly při zhutňování v ocelovém válci zkoušeny různé způsoby zhutnění, a to volné sypání, „setřesení“ - ručními pohyby válcem a zhutnění pelet pádem ocelového pěchu. Pro zjištění zhutnění (objemové hmotnosti) byla využita jeřábová váha a ze zjištěné hmotnosti válce se zhutněným bentonitem a objemu vrstvy byla dopočtena výsledná objemová hmotnost.

Vrstva z peletizovaného bentonitu o zrnitosti 0-8 mm vykazovala při volném sypání bentonitu objemové hmotnosti sušiny nad  $1,20 \text{ g/cm}^3$ . Při použití hutnicího pěchu bylo dosaženo maximálního zhutnění  $1,55 \text{ g/cm}^3$ .

Pro peletizovaný bentonit se zrnitostí 0-50 mm byly objemové hmotnosti sušiny vyšší než pro zrnitost 0-8 mm. Objemová hmotnost sušiny po volném sypání byla  $1,26 \text{ g/cm}^3$  u maloobjemových vzorků ( $5 \text{ dm}^3$ ) a  $1,41 \text{ g/cm}^3$  pro větší zkoušky s objemem cca  $80 \text{ dm}^3$ . Vysokých objemových hmotností (nad  $1,64 \text{ g/cm}^3$ ) bylo dosaženo při hutnění pěchem ve velkém objemu ( $120 \text{ dm}^3$ ).

Výsledky všech zkoušek zhutnění jsou shrnuty v Tab 1.

---

<sup>2</sup> Objemová hmotnost sušiny je důležitým parametrem vrstvy z bentonitu. Důležité geotechnické vlastnosti bentonitu pro omezení pohybu radionuklidů – hydraulická vodivost a bobtnací tlak – exponenciálně závisí na zhutnění bentonitu, viz výsledky v kapitole 6. Při zvýšení průměrné objemové hmotnosti sušiny vrstvy např. o 5 %, se vlastnosti (hydraulická vodivost a bobtnací tlak) mohou zlepšit např. o 15 %, záleží tedy na hodnotě objemové hmotnosti sušiny.



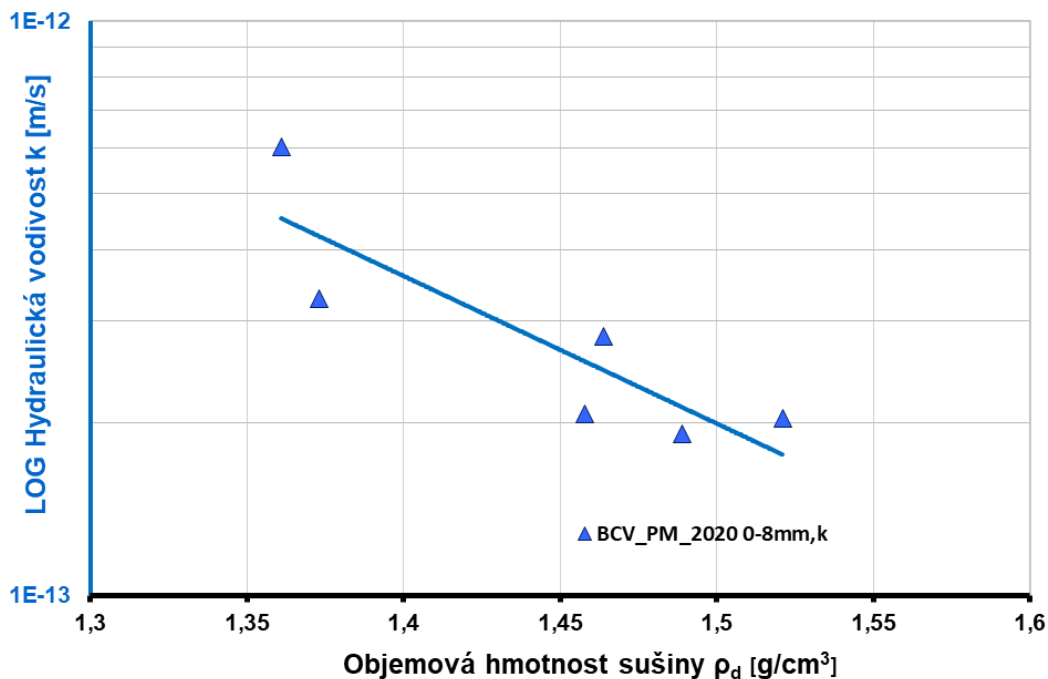
Obr. 23 Vlevo je odměrný válec (5 dm<sup>3</sup>), který byl používán na menší hutní zkoušky a vpravo je válec o objemu 120 dm<sup>3</sup> s hutním pěchem.

Tab 1 Přehled výsledků ze všech hutních testů peletizovaného bentonitu.

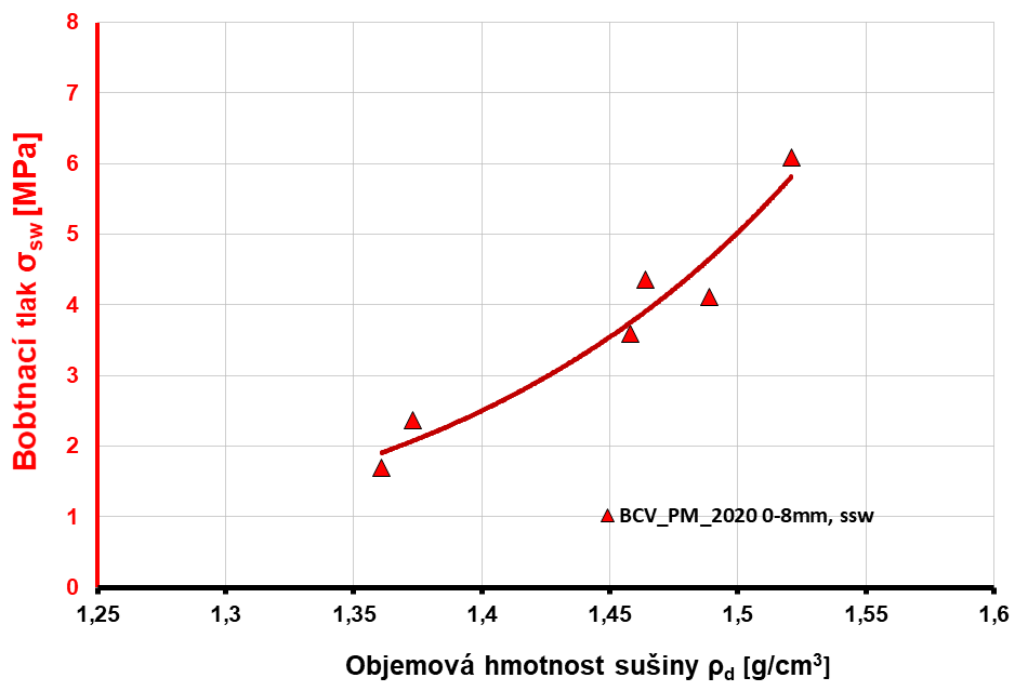
Peletizovaný bentonit ze sedmé průmyslové výroby				
w=4,6%, ρ <sub>dpelety</sub> = 2,01 g/cm <sup>3</sup>				
	Zhutnění v g/cm <sup>3</sup>			Způsob zhutnění a objem zkušebního válce
<b>M 182 (drť 0-50 mm)</b>	1,27	1,27	1,26	volně sypaný (5 dm <sup>3</sup> )
	1,33	1,35	1,34	setřepaný (5 dm <sup>3</sup> )
	1,54	1,53	1,52	strojově setřepaný (5 dm <sup>3</sup> )
	1,4	1,42	1,41	volně sypaný (120 dm <sup>3</sup> )
	1,48	1,5	1,5	setřesený (120 dm <sup>3</sup> )
	1,62			zhutněný pístem (60 kg) po cca 10 cm vrstvách (120 dm <sup>3</sup> )
		1,65	1,64	zhutněný pístem (60 kg) po 5 cm vrstvách (120 dm <sup>3</sup> )
<b>M 182 0-8</b>	1,2	1,23	1,24	volně sypaný (5 dm <sup>3</sup> )
	1,3	1,33	1,35	setřepaný (5 dm <sup>3</sup> )
	1,43	1,43	1,44	strojově setřepaný (5 dm <sup>3</sup> )
	1,26	1,23	1,22	volně sypaný (120 dm <sup>3</sup> )
	1,36	1,32	1,33	setřesený (120 dm <sup>3</sup> )
	1,51			zhutněný pístem (60 kg) po cca 10 cm vrstvách (120 dm <sup>3</sup> )
		1,55	1,55	zhutněný pístem (60 kg) po 5 cm vrstvách (120 dm <sup>3</sup> )

## 6 Vyhodnocení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku

Zadáním projektu bylo definováno, že mají být v rámci projektu provedeny tři zkoušky hydraulické vodivosti a tři zkoušky bobtnacího tlaku s jedním opakováním, tzn. celkem 6 zkoušek pro jednu vlastnost peletizovaného bentonitu. Pro vyhodnocení hydraulické vodivosti byl využitý materiál ze sedmého cyklu průmyslové výroby a to M182 0-8. Pro porovnání s ostatními materiály z předešlého výzkumu byl tento materiál označen jako BCV\_PM\_2020 0-8 mm. V grafech níže jsou uvedeny výsledky hydraulických vodivostí, resp. bobtnacích tlaků. Vyhodnocení probíhalo podle interních metodik dodavatele vycházejících z platných technických norem. Ukončení zkoušek bobtnacího tlaku však neproběhlo standardním způsobem a vzhledem k tomu bylo nutné provést stanovení bobtnacího tlaku redukcí totálního napětí ze závěru zkoušky (o cca 3-15 %; více kapitola 11.3.).



Obr. 24 Hydraulická vodivost peletizovaného bentonitu M182 0-8 (BCV\_PM\_2020 0-8 mm) v závislosti na objemové hmotnosti sušiny.



Obr. 25 Bobtnací tlak peletizovaného bentonitu M182 0-8 (BCV\_PM\_2020 0-8 mm) v závislosti na objemové hmotnosti sušiny.

## 7 Vyhodnocení projektu

Hlavním cílem projektu byla výroba peletizovaného bentonitu s objemovou hmotností sušiny nad  $2 \text{ g/cm}^3$  s tím, že by peletizovaný bentonit měl mít křivku zrnitosti blížíící se ideální zrnitosti podle Fullerova výpočtu. Tento cíl byl splněn. V následujících kapitolách jsou výsledky shrnuty.

### 7.1 Shrnutí postupu výroby a výsledky objemových hmotností sušiny

Po konzultacích s výrobcem strojů ve výrobě bentonitů byly provedeny úpravy technologie. Po těchto úpravách byla provedena poloprovozní výroba, při které bylo ověřeno, že lze lisovat bentonit do pelet (granulátu) s objemovou hmotností vyšší než  $2000 \text{ kg/m}^3$ , tzn.  $2 \text{ g/cm}^3$ .

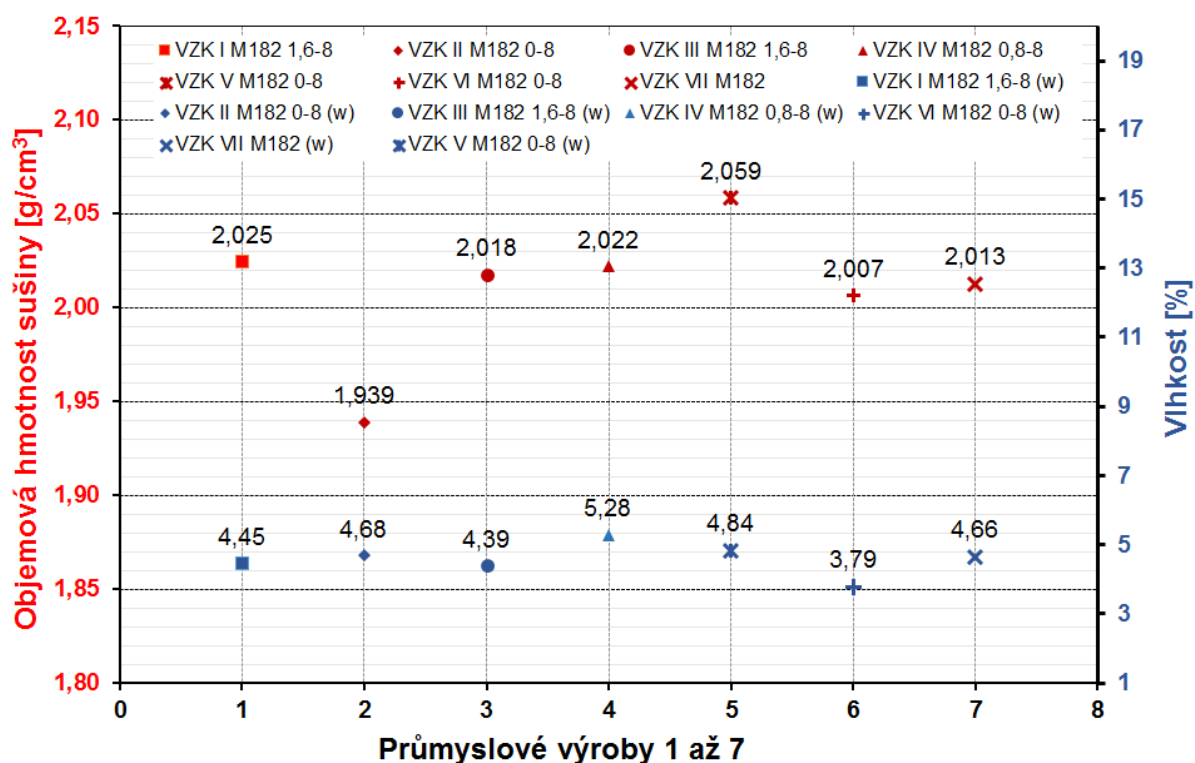
V průběhu října a listopadu 2019 pak byly provedeny čtyři průmyslové výrobní cykly, při kterých probíhala produkce slisovaného bentonitu v objemu zhruba  $1 \text{ t/hod}$ , v celkovém množství cca  $4 \text{ t}$ . Z každého cyklu průmyslové výroby bylo odebráno několik vzorků, u kterých byly sledovány parametry objemové hmotnosti a vlhkosti a případně zrnitostní složení. Podle těchto vlastností byla spočítána objemová hmotnost sušiny bentonitového granulátu. Při prvním cyklu průmyslové výroby v zrnitosti  $1,6$  až  $8 \text{ mm}$  byla podmínka hodnoty objemové hmotnosti splněna. Při druhém cyklu výroby, v zrnitosti  $0,8$  až  $8 \text{ mm}$ , tato podmínka splněna nebyla, což bylo způsobeno zřejmě tím, že se při výrobě nevracelo ke kompaktoru tzv. podsítné obsahující jemnou frakci. Tento předpoklad byl ověřen v dalším (třetím) cyklu výroby granulátu ( $1,6$ - $9 \text{ mm}$ ), kde byla podmínka na hodnotu objemové hmotnosti opět splněna. Pro čtvrtý cyklus byl připraven test výroby materiálu s odlišným nastavením linky. Tzn., byla odebrána síta, která při běžné výrobě materiál třídí a tři tuny materiálu byly několikrát (v tomto případě 3krát) slisovány a rozdrčeny. Po několikrát opakovaném lisování byla linka vypnuta a instalována síta v rozmezí  $0,8$  až  $9 \text{ mm}$ . Po instalaci sít byl vyroben granulát  $0,8$ - $8 \text{ mm}$  (M182  $0,8$ - $8$ ) v množství odpovídající průmyslové výrobě. V laboratoři pak bylo ověřeno, že tento granulát splňuje hlavní podmínku výzkumu na objemovou hmotnost sušiny (nad  $2 \text{ g/cm}^3$ ). Nicméně všechny granulované bentonity vyráběné s definovanou spodní zrnitostí ( $0,8 \text{ mm}$  a  $1,6 \text{ mm}$ ) neměly zrnitost blížíící se zrnitostní křivce podle Fullera.

Po kontrolním dnu k druhému dílčímu (4 výrobní cykly) plnění byly domluveny další tři cykly průmyslové výroby, ve kterých bylo odzkoušeno tzv. opakované lisování bentonitu před výrobou finálního granulátu. U všech těchto zkoušek byly průměrné objemové hmotnosti sušiny nad  $2 \text{ g/cm}^3$ , viz graf na Obr. 26.

Bylo provedeno statistické vyhodnocení měřených dat objemové hmotnosti sušiny. Výsledky jsou vyjádřeny jako průměrné hodnoty a meze 95% intervalu spolehlivosti ( $k = 2$ ; průměr  $\pm L_{1,2}$ ), viz Tab 2. Dále pak byly připraveny přehledné krabicové grafy, viz Obr. 27 (data Tab 3), a Obr. 28 (data Tab 4).

Tab 2 Statistické vyhodnocení laboratorních výsledků objemové hmotnosti sušiny ze všech cyklů

cyklus	I	II	III	IV	V	VI	VII
materiál	1,6-8	0-8	1,6-8	0,8-8	0-8	0-8	více
počet hodnocených výsledků	16	16	16	16	16	16	25
průměr [g/cm <sup>3</sup> ]	2,025	1,939	2,017	2,022	2,059	2,007	2,013
splněna podmínka min. 2 g/cm <sup>3</sup>	<b>ANO</b>	<b>NE</b>	<b>ANO</b>	<b>ANO</b>	<b>ANO</b>	<b>ANO</b>	<b>ANO</b>
L <sub>1,2</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	0,008	0,018	0,013	0,010	0,016	0,012	0,006
L <sub>1,2</sub> (%)	0,4%	0,9%	0,7%	0,5%	0,8%	0,6%	0,3%
Horní mez intervalu spolehlivosti (95 %)	2,033	1,958	2,031	2,032	2,074	2,019	2,019
Dolní mez intervalu spolehlivosti (95 %)	2,017	1,921	2,004	2,012	2,043	1,994	2,006



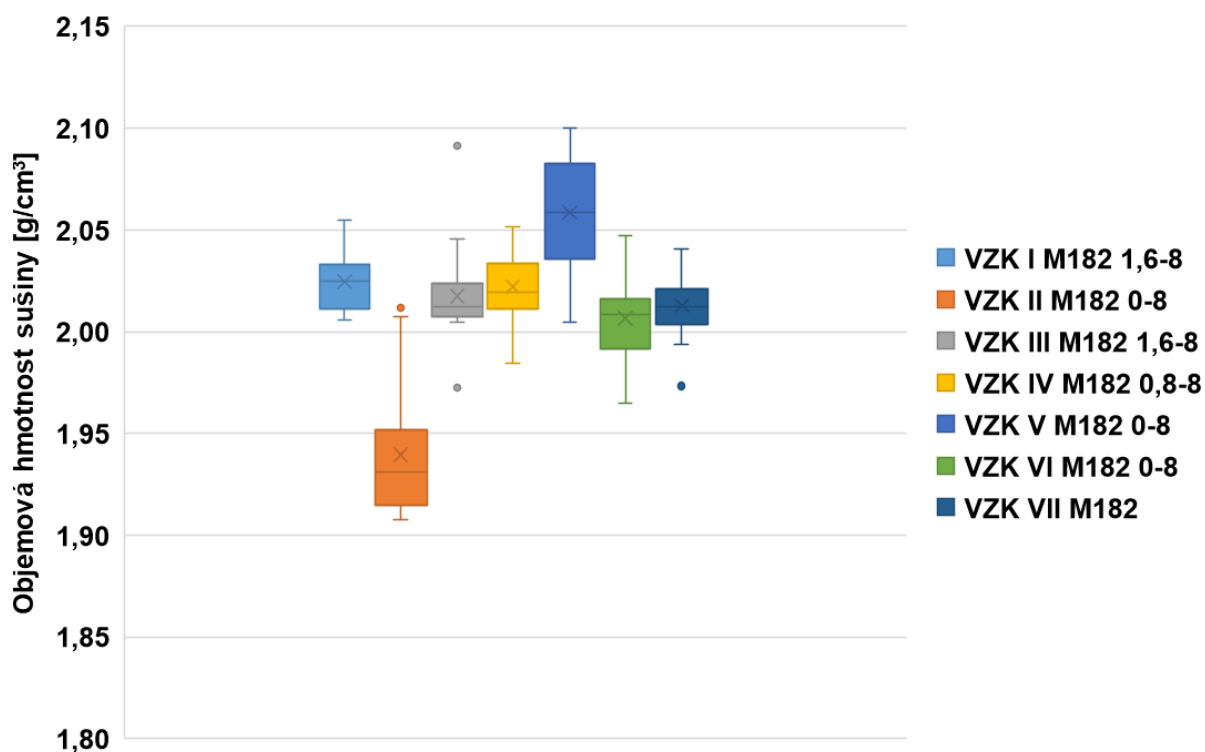
Obr. 26 Grafické znázornění průměrných objemových hmotností sušiny a vlhkostí peletizovaného bentonitu ze všech provedených cyklů výroby (VZK je označení výrobního cyklu – VZK I je první výrobní cyklus).

Tab 3 Tabulka s daty pro krabicové grafy s objemovými hmotnostmi sušiny peletizovaného bentonitu ze sedmi cyklů průmyslové výroby (I až VII)

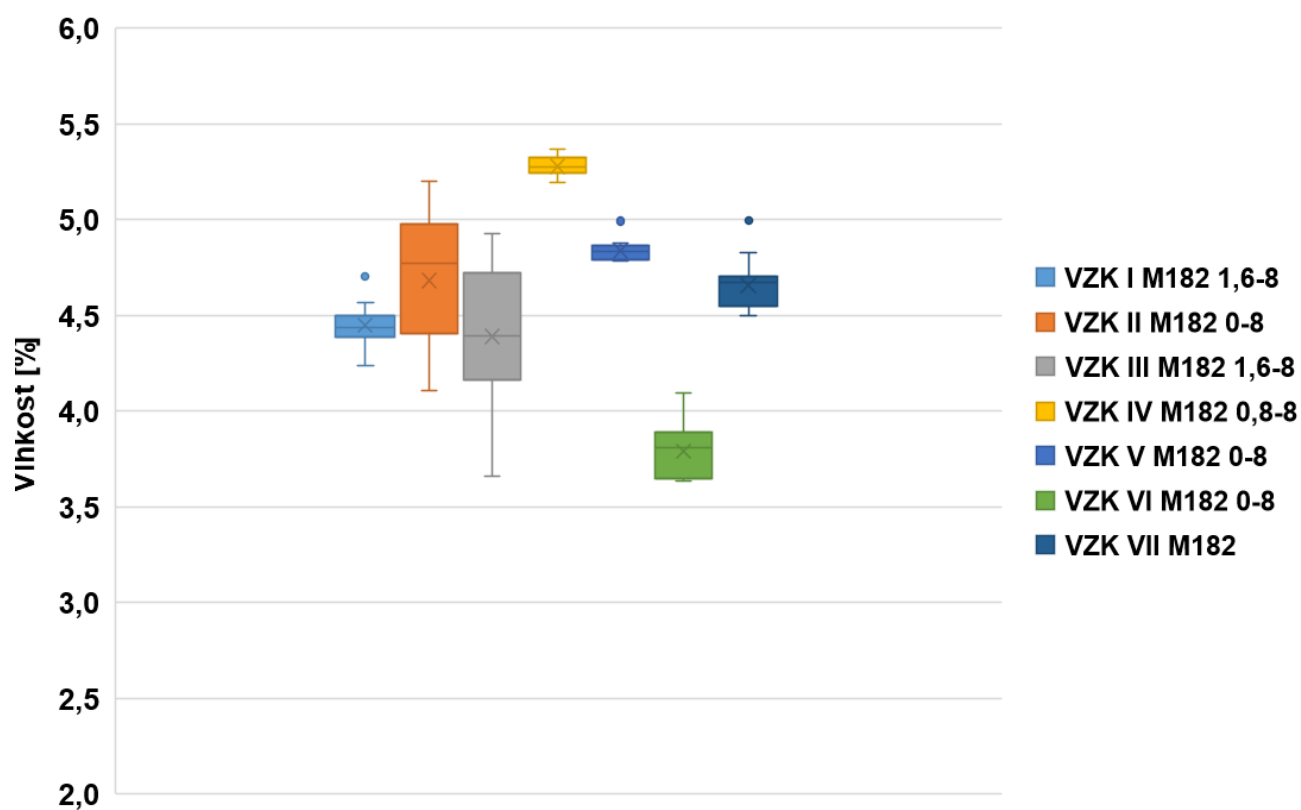
	Statistické hodnocení objemových hmotností sušiny v g/cm <sup>3</sup>						
	Minimum	Kvartil Q1	Medián	Kvartil Q3	Maximum	Průměr	Rozpětí
I M182 1,6-8	2,006	2,012	2,025	2,031	2,055	<b>2,025</b>	0,049
II M182 0-8	1,908	1,916	1,931	1,939	2,012	<b>1,939</b>	0,104
III M182 1,6-8	1,972	2,008	2,012	2,021	2,091	<b>2,018</b>	0,119
IV M182 0,8-8	1,985	2,011	2,019	2,033	2,051	<b>2,022</b>	0,067
V M182 0-8	2,005	2,042	2,059	2,073	2,100	<b>2,059</b>	0,095
VI M182 0-8	1,965	1,995	2,008	2,015	2,047	<b>2,007</b>	0,082
VII M182 (0-8; 0-50)	1,973	2,004	2,012	2,019	2,041	<b>2,012</b>	0,067

Tab 4 Tabulka s daty pro krabicové grafy s vlhkostmi peletizovaného bentonitu ze sedmi cyklů průmyslové výroby (I až VII)

	Statistické hodnocení vlhkostí v %						
	Minimum	Kvartil Q1	Medián	Kvartil Q3	Maximum	Průměr	Rozpětí
I M182 1,6-8	4,237	4,423	4,438	4,463	4,702	4,450	0,464
II M182 0-8	4,110	4,427	4,771	4,945	5,203	4,683	1,094
III M182 1,6-8	3,658	4,197	4,392	4,637	4,928	4,392	1,271
IV M182 0,8-8	5,193	5,245	5,272	5,303	5,369	5,279	0,176
V M182 0-8	4,785	4,793	4,837	4,864	4,992	4,837	0,207
VI M182 0-8	3,638	3,653	3,809	3,867	4,094	3,791	0,456
VII M182 (0-8; 0-50)	4,501	4,545	4,620	4,691	4,719	4,617	0,218



Obr. 27 Vizualizace výsledků objemových hmotností sušiny krabicovým grafem pro všech sedm cyklů průmyslové výroby.



Obr. 28 Vizualizace výsledků vlhkostí krabicovým grafem pro všech sedm cyklů průmyslové výroby.



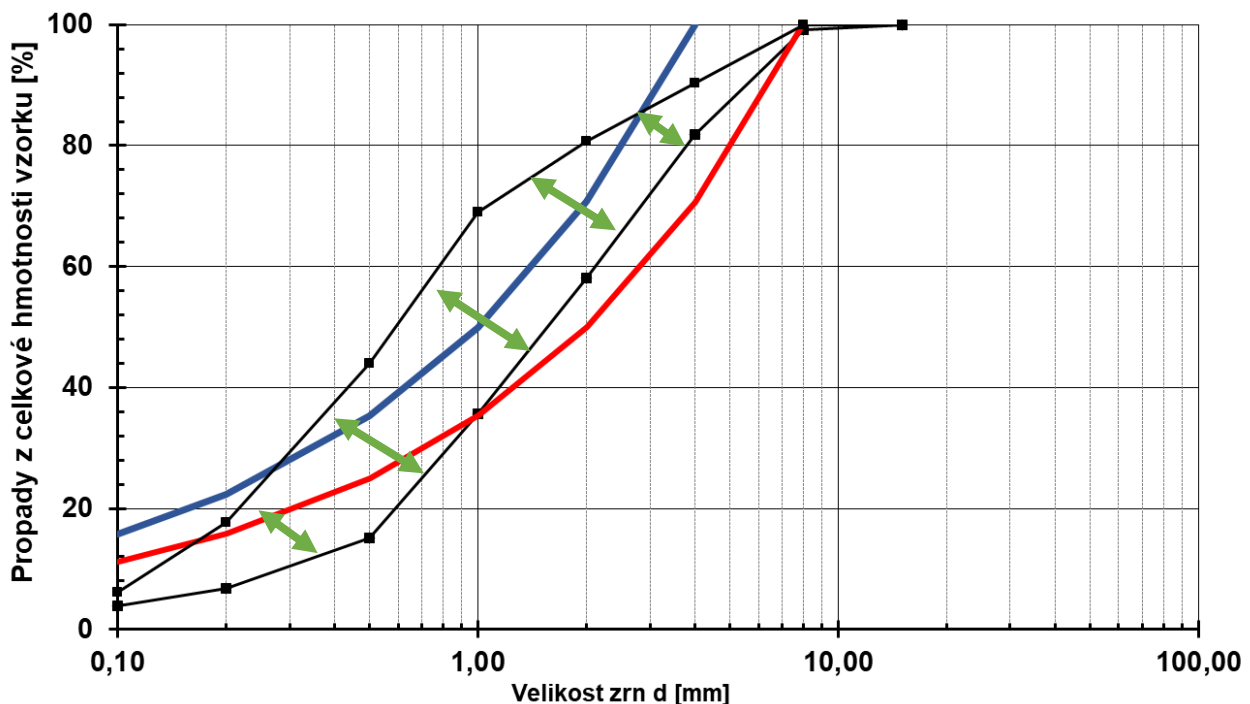
## 7.2 Zrnitosti

Po dohodě s objednatelem projektu byl vyráběn peletizovaný bentonit v zrnitosti dané vrchním sítem, které mělo průměr ok 9 mm. Tento peletizovaný bentonit je označen zkratkou M182 0-8 mm, protože obsah frakce 8-9 se ukázal jako bezvýznamný. Dále pak byl vyroben materiál bez zrnitostní úpravy M182. Zrnitost tohoto bentonitu je určena rozdrčením v tzv. kladivovém drtiči pod kompaktozem. Tento materiál má většinou zrnitost v rozmezí 0 až 50 mm, ale ojediněle obsahuje desky (čočku) se zrnitostí větší.

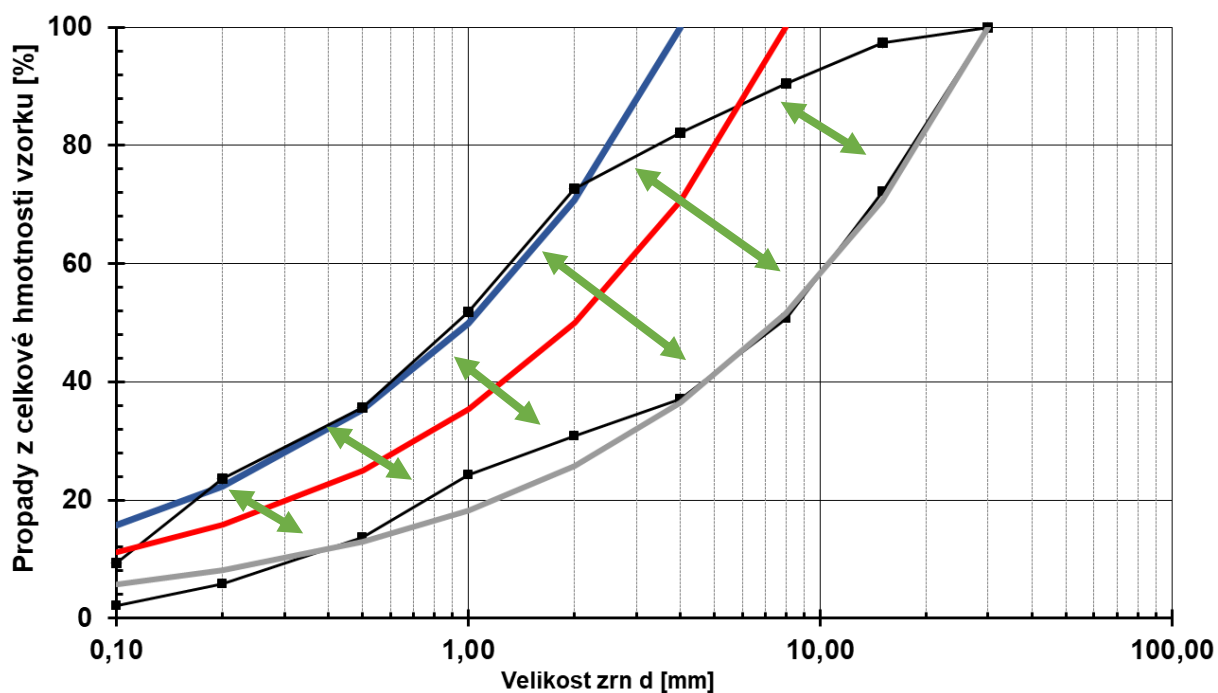
Bohužel linka u subdodavatele neumožňuje sledovat zrnitost bentonitu před lisováním. V zahraničním výzkumu je zrnitost materiálu sledována.

### 7.2.1 Průměrné zrnitosti

Jedním z cílů projektu bylo přiblížit se ideální zrnitosti dle Fullera, tato čára je teoretická. Provedené desítky zkoušek zrnitosti vzorků ze sedmi cyklů průmyslové výroby poskytují obalové křivky, které vyznačují interval, ve kterém se nacházejí křivky zrnitosti výsledného peletizovaného materiálu. Pro M182 0-8 jsou tyto obalové křivky definovány daty z výsledků ze tří cyklů (Obr. 29), tzn. z 10 testů. M182 0-50 jsou obalové křivky definovány z výsledků ze dvou cyklů (Obr. 30, tzn. ze 4 testů).



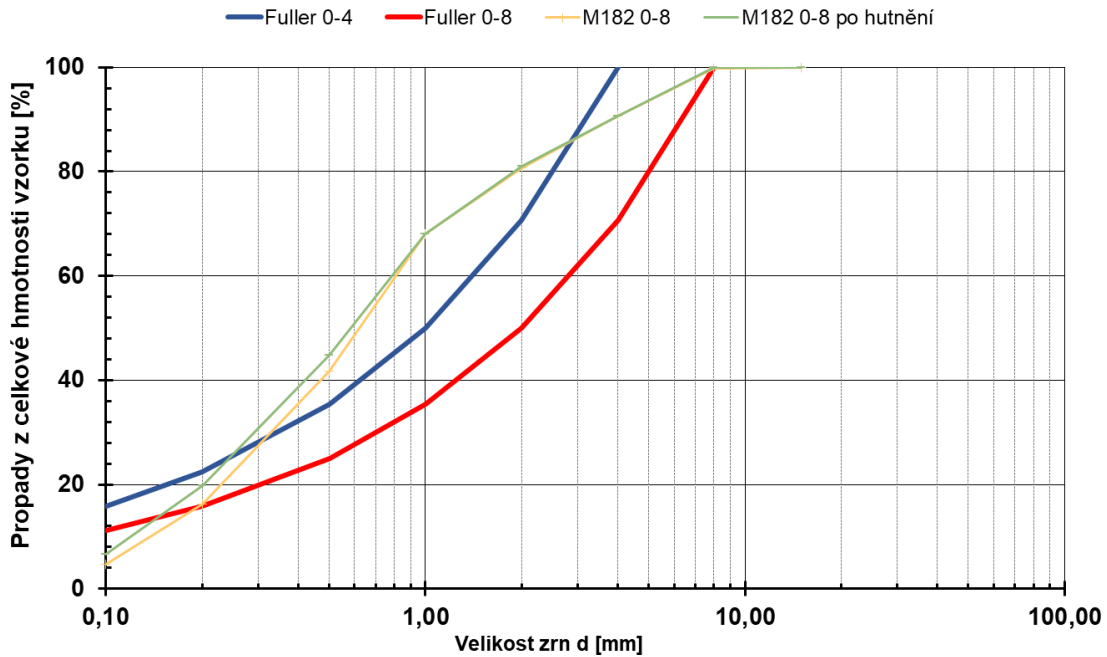
Obr. 29 Černě vyznačeny jsou obalové křivky zrnitosti pro materiál M182 0-8 mm. Silně jsou znázorněny křivky zrnitosti podle Fullera výpočtu pro maximální zrno 4 mm (modře) resp. 8 mm (červeně).



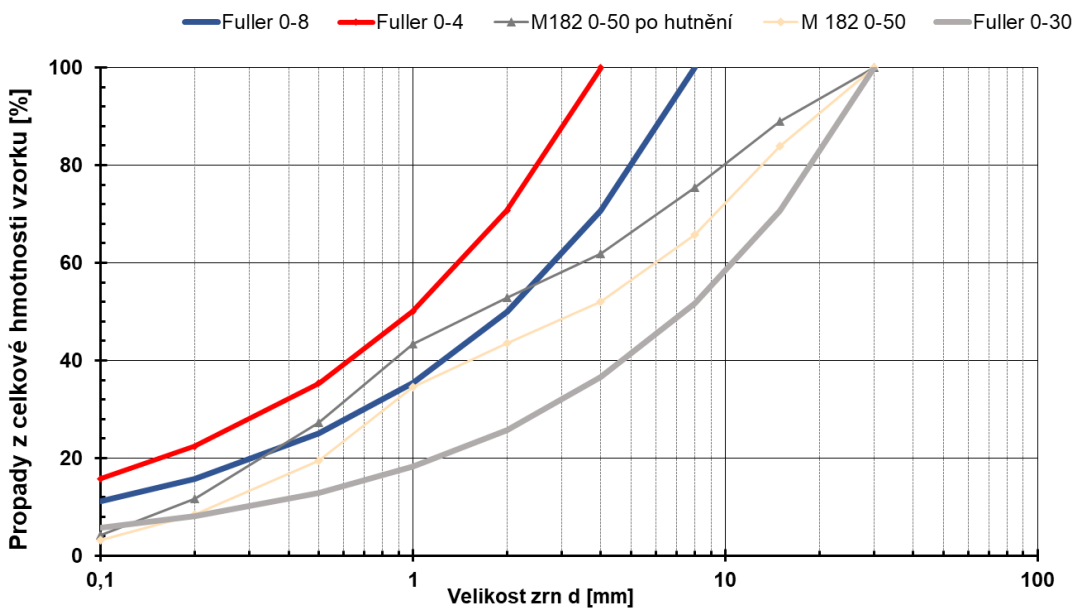
Obr. 30 Černě jsou vyznačeny obalové křivky pro materiál M182 0-50 mm. Silně jsou znázorněny křivky zrnitosti podle Fullerova výpočtu pro maximální zrno 4 mm (modře) resp. 8 mm (červeně) a 30 mm (šedivě).

### 7.2.2 Změna zrnitosti po hutnění

Je zřejmé, že při použití hutnicích prostředků může dojít ke změně zrnitosti vlivem jejich mechanického namáhání/ poškození. Pro ověření tohoto předpokladu byly provedeny zkoušky zrnitosti pro peletizované bentonity M182 0-8 a M182 0-50 po hutnění. Zrnitosti po hutnění byly porovnány s výsledky zrnitostního složení před hutněním. Bylo prokázáno, že vliv použití hutnicího pěchu při na zrnitost při velkoobjemovém testu byl minimální u M182 0-8, viz Obr. 31. Výraznější vliv byl pozorován u M 182 0-50, viz graf na Obr. 32.



Obr. 31 Porovnání zrnitostního složení M 182 0-8 před a po hutnění při zkoušce za použití pěchu



Obr. 32 Porovnání zrnitostního složení M182 0-50 před a po hutnění při zkoušce za použití pěchu.

## 7.3 Zkoušky zhutnění

V Tab 5 je uvedeno srovnání výsledků hutnicích zkoušek materiálu s předcházejícím výzkumem (Pacovský, 2019), ve kterém byly provedeny tři poloprovozní zkoušky a jedna výroba. Dále pak je v tabulce uveden peletizovaný materiál GBM (Granulated bentonite mixture) s označením NAGRA. Tato švýcarská organizace poskytla materiál Centru experimentální geotechniky v roce 2015.

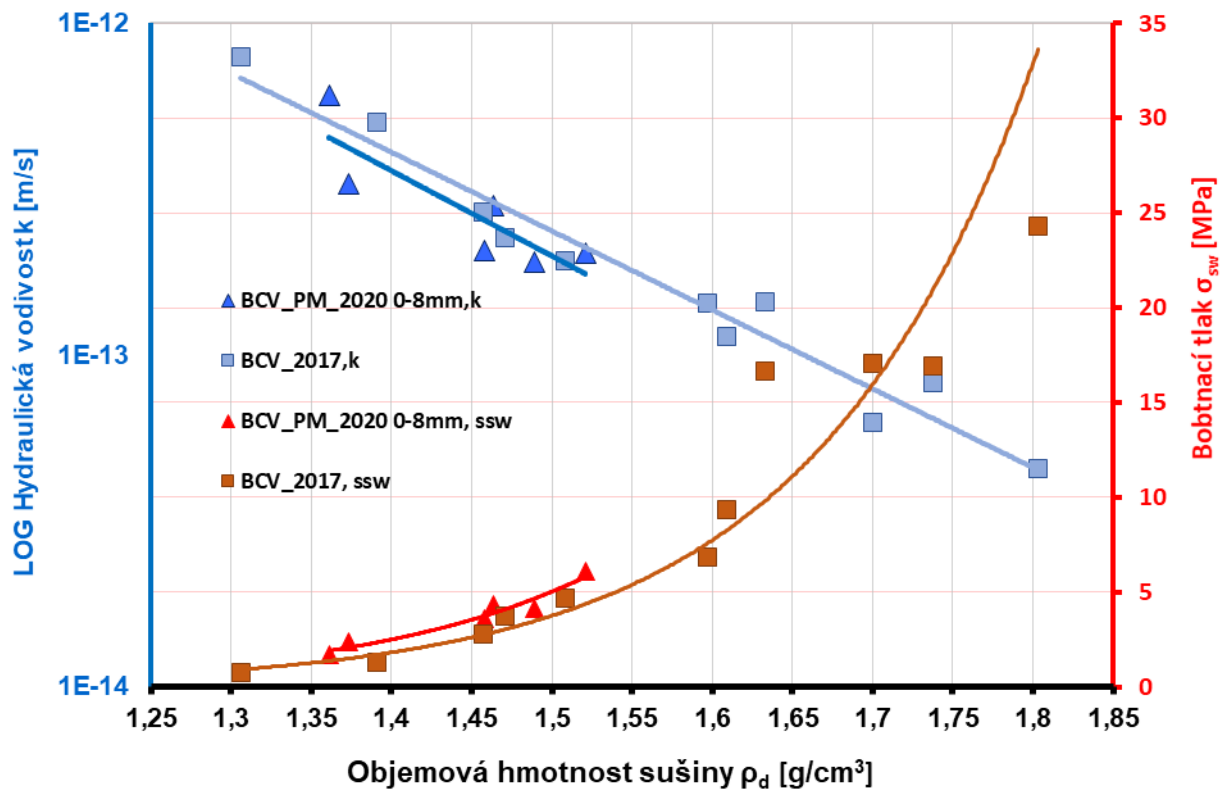
Tab 5 Srovnání průměrných hodnot z hutnicích zkoušek s předcházejícím výzkumem, který je označen jako Pelety I. Pelety II je označení pro tento projekt.

	Způsob zhutnění a objem zkušebního válce	PELETY I				Nagra	PELETY II	
		VZK I	VZK II	VZK III	VZK IV (4 tuny)		Průmyslová výroba č.7 (4 tuny)	Způsob zhutnění a objem zkušebního válce
		$w=6,7\%, \rho_{dpelety} = 1,9 \text{ g/cm}^3$	$w=5,1\%, \rho_{dpelety} = 1,93 \text{ g/cm}^3$	$w=4,6\%, \rho_{dpelety} = 1,91 \text{ g/cm}^3$	$w=4,5\%, \rho_{dpelety} = 1,77 \text{ g/cm}^3$		$w=11\%, \rho_{dpelety} = 2,15 \text{ g/cm}^3$	
Objemové hmotnosti sušiny v $\text{g/cm}^3$								
M 182 (0-50 mm)	volně sypaný (5 $\text{dm}^3$ )	1,25	1,16	1,17			1,27	volně sypaný (5 $\text{dm}^3$ )
	setřepaný (5 $\text{dm}^3$ )	1,36	1,28	1,25			1,34	setřepaný (5 $\text{dm}^3$ )
	strojově setřepaný (5 $\text{dm}^3$ )	1,53	1,56	1,47			1,53	strojově setřepaný (5 $\text{dm}^3$ )
	dynamicky zhutněný (5 $\text{dm}^3$ )	1,61	1,61	1,55				
	volně sypaný (120 $\text{dm}^3$ )		1,3				1,41	volně sypaný (120 $\text{dm}^3$ )
	setřesený (120 $\text{dm}^3$ )		1,41				1,49	setřesený (120 $\text{dm}^3$ )
	zhutněný pístem (53 kg) po cca 15 cm vrstvách (120 $\text{dm}^3$ )		1,55				1,62	zhutněný pístem (60 kg) po cca 10 cm vrstvách (120 $\text{dm}^3$ )
	zhutněný pístem (68 kg) po 5 cm vrstvách (120 $\text{dm}^3$ )		1,62 ; 1,61				1,65	zhutněný pístem (60 kg) po 5 cm vrstvách (120 $\text{dm}^3$ )
M182 0-8 (0-8 mm)	volně sypaný (5 $\text{dm}^3$ )			1,16	1,09	1,26	1,22	volně sypaný (5 $\text{dm}^3$ )
	setřepaný (5 $\text{dm}^3$ )			1,23	1,2	1,4	1,33	setřepaný (5 $\text{dm}^3$ )
	strojově setřepaný (5 $\text{dm}^3$ )			1,41	1,32	1,56	1,43	strojově setřepaný (5 $\text{dm}^3$ )
	dynamicky zhutněný (5 $\text{dm}^3$ )			1,45				
	volně sypaný (120 $\text{dm}^3$ )				1,04	1,37	1,24	volně sypaný (120 $\text{dm}^3$ )
	setřesený (120 $\text{dm}^3$ )				1,11	1,5	1,34	setřesený (120 $\text{dm}^3$ )
							1,51	zhutněný pístem (60 kg) po cca 10 cm vrstvách (120 $\text{dm}^3$ )
						1,55	zhutněný pístem (60 kg) po 5 cm vrstvách (120 $\text{dm}^3$ )	

## 7.4 Hydraulické vodivosti a bobtnací tlaky

Dle zadání projektu bylo provedeno 6 zkoušek hydraulické vodivosti a 6 zkoušek bobtnacího tlaku. Výsledky těchto vlastností byly porovnány s nepeletizovaným BCV\_2017. Toto porovnání je uvedeno na (Obr. 33). Pro výchozí bentonit BCV\_2017 byla využita data z Červinka a kol. (2018) a Svoboda a kol. (2019).

Výsledky (průběhy závislostí) pro oba porovnávané materiály se jeví jako obdobné. V případě peletizovaného materiálu lze sice opticky sledovat mírně „lepší“ parametry (vyšší bobtnací tlaky a nižší propustnosti), avšak při přihlédnutí k rozptylu výsledků v rámci jednotlivých sad měření se rozdíly jeví jako malé. Určitou, dosud málo popsanou roli, může hrát právě peletizace materiálu tvořící výrazné nehomogenity vzorku (velikost lisovaných zrn/ pelet k velikosti zkušební komory; orientace pelet vůči směru proudění vody a směru měření bobtnacího tlaku). Rozměry vzorků byly cca čtyřnásobkem maximální velikosti zrna.



Obr. 33 Hydraulická vodivost a bobtnací tlak bentonitu M182 0-8 (označení BCV\_PM\_2020 0-8 mm) v závislosti na objemové hmotnosti sušiny. Výsledky srovnány s nepeletizovaným mletým bentonitem BCV\_2017.

## 8 Doporučení pro další výzkum

Na základě získaných zkušeností jsou nastíněny možnosti dalšího výzkumu:

1. Optimalizace dynamických (vibračních) hutnicích technologií při on site plnění úložných studní peletizovaným bentonitovým materiálem:
  - a. Laboratorní výzkum s využitím dynamických zatěžovacích lisů
  - b. In situ výzkum v podzemní laboratoři se zaměřením na robotizaci hutnicích technologií
2. V České republice je provozován experiment Mock-up-Josef, který je prvním in-situ fyzikálním modelem na území ČR. Experiment byl vystavěn z bentonitových cihel. Tento experiment poskytuje reálná data pro účely validace termo-hydro-mechanických numerických modelů pro popis dějů v hlubinném úložišti. Podobný experiment vystavěn z peletizovaného bentonitu by mohl mj. přinést další podklady pro validaci matematických modelů, které jsou klíčové pro projekt hlubinného úložiště.
3. Pro další výzkum peletizovaného materiálu by souběžně s reálnými experimenty mohly probíhat i projekty výzkumu např. na popis chování peletizovaného bentonitu, na stanovení vlivu maximálního zrna v peletizovaném bentonitu a vlivu na objemovou hmotnost sušiny celé vrstvy, anebo stanovení tzv. efektivní (průměrné) tepelné vodivosti pro geotechnickou bariéru vystavěnou z (českého) bentonitu (např. rozdíl mezi bariérou z lisovaných bentonitových bloků a peletizovaného bentonitu).

## 9 Závěr

Práce probíhaly dle zadání a v souladu s dohodami se zadavatelem na průběžně organizovaných kontrolních dnech. V průběhu projektu byly postupně realizovány úpravy linky podle doporučení poddodavatele lisovacího stroje na bentonit (kompaktoru). Dále pak v průběhu cyklů průmyslové výroby byl zlepšován postup výroby. Všechny tyto úpravy vedly k tomu, že oproti průmyslové výrobě provedené v předcházejícím projektu „Pelety I“ (Pacovský, 2019) byla zvýšena průměrná objemová hmotnost sušiny pelet (zrna granulátu) o zhruba 10 %, a to, v souladu se zadáním projektu, nad  $2000 \text{ kg/m}^3$  ( $2 \text{ g/cm}^3$ ).

Hlavním výsledkem projektu jsou dva peletizované granulované bentonity z neaktivovaného bentonitu z ložiska Černý vrch. Pro tyto peletizované bentonity bylo stanoveno výsledné výrobní označení BCV\_PM\_2020 0-8 mm a BCV\_PM\_2020 0-50 mm. Na základě znalosti výrobní linky lze konstatovat, že lze případně objednat i jiné zrnitosti, kterou mohou být např. z technologického hlediska výstavby bentonitové vrstvy pro hlubinné úložiště výhodnější. Pro oba materiály byly zpracovány katalogové materiálové listy, které jsou přílohami této zprávy.

Dle zadání projektu bylo dalším cílem přiblížit křivku zrnitosti výsledného materiálu ke křivce „ideální zrnitosti“ podle Fullerova výpočtu. Tato čára je teoretická a v případě průmyslové výroby není možné zaručit, že všechny cykly výroby, či vzorky v rámci jednoho cyklu budou mít identickou zrnitost. Byly provedeny desítky zkoušek různě připravených a různě zrnitých materiálů. Křivce ideální zrnitosti se blíží oba materiály, pro které byly zpracovány materiálové listy.

V rámci projektu byly realizovány laboratorní zkoušky zhutnění vrstvy z peletizovaného bentonitu. Byly realizovány postupně různými způsoby hutnění, ve vzrůstajícím měřítku (objemu), s různě zrnitým peletizovaným bentonitem. Výsledky vždy poskytly informaci o objemové hmotnosti sušiny po hutnění. Tyto laboratorní výsledky je však nutné ověřit zkouškami v reálném měřítku 1:1 (1:2), např. v některé z existujících podzemních laboratoří. Další možností vývoje v této oblasti je robotizace celého procesu výstavby bentonitové vrstvy.

Dále byly laboratorně stanoveny hydraulické vodivosti a bobtnací tlaky peletizovaného bentonitu. Celkem bylo provedeno šest zkoušek a bylo zjištěno, že peletizovaný bentonit má vlastnosti obdobné práškovému (jemně mletému) bentonitu z ložiska Černý vrch (BCV\_2017).

V práci jsou navrženy i další možnosti výzkumu, který by napomohl konečnému rozhodnutí o použití peletizovaného bentonitu jako materiálu inženýrské bariéry hlubinného úložiště.

## 10 Reference

- GARITTE B., WEBER H. MÜLLER H. R.: (2015). Requirements, manufacturing and QC of the buffer components Report LUCOEX – WP2: European Union's EURATOM - research program (FP7) under grant agreement 269905 – LUCOEX [online]. Nagra. Dostupné z: <http://www.lucoex.eu/files/D0203.pdf>
- PACOVSKÝ J., et. al. (2019) Návrh a výroba směsi bentonitových pelet – závěrečná zpráva, ČVUT v Praze, objednatel SÚRAO SO2016-017 - Výzkumná podpora pro projektové řešení HÚ
- ČERVINKA R., VAŠÍČEK R., VEČERNÍK P., KAŠPAR V. (2018): Kompletní charakterizace bentonitu BCV 2017 - průběžná zpráva. SÚRAO Technická zpráva 419/2019, Česká republika, 33 s.
- ČSN CEN ISO/TS 17892-11 (ČSN 72 1007). Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu. Účinnost od 1.5.2005. Český normalizační institut, 2005, 19 s.
- SVOBODA J., VAŠÍČEK R., PACOVSKÁ D., ŠTÁSTKA J., FRANĚK J., RUKAVIČKOVÁ L., VEČERNÍK P., ČERVINKA R., NAHODILOVÁ R., LAUFEK F., ŘIHOŠEK J., BURIÁNEK D. (2019): Interakční experiment – Přípravné a podpůrné práce. Dílčí etapová zpráva zakázky Interakční fyzikální modely in-situ v PVP Bukov; Technická zpráva SÚRAO 385/2019, Česká republika, 126 s.
- VAŠÍČEK R., HAUSMANNOVÁ L. (2012): Stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku – Interní postupy č. 182/21 a 182/22. Centrum experimentální geotechniky Fakulta stavební ČVUT v Praze. 18



## 11 Přílohy

### 11.1 Katalogový materiálový list pro M182 0-8 (BCV\_PM\_2020 0-8)

KATALOGOVÝ MATERIÁLOVÝ LIST VÝROBKU		
<b>BCV_PM_2020 0-8</b>		

#### Charakteristika výrobku:

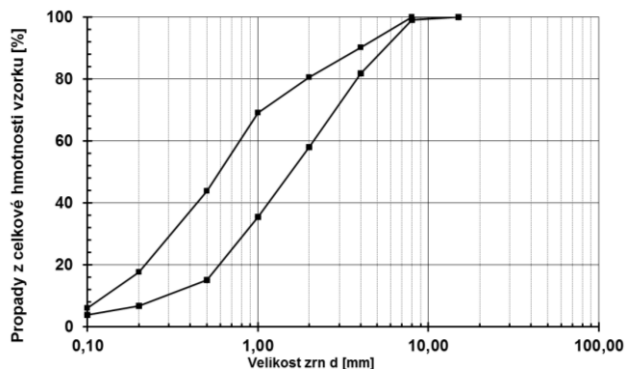
Kompaktované bentonitové granule (peletizaovaný bentonit) s vysokou hustotou v suchém stavu. Objemová hmotnost sušiny granule je u tohoto materiálu vyšší než 2.000 kg/m<sup>3</sup>.

#### Technické informativní parametry

Produkt	Vlhkost (%)	pH	Objemová hmotnost granulí v sušíně (kg/m <sup>3</sup> )	Zrnitost (mm)	Obsah montmorillonitu (%)
BCV_PM_2020 0-8	3 - 6	< 11	≥ 2.000	Variabilní v rozmezí 0 – 8 (propad sítem 9 mm, maximální zrna 8 mm)	min. 60

#### Orientační obalová zrnitostní křivka

průměr zrna/síta [mm]	Propad sítem v rozmezí [%]	
8	100	99
4	90	82
2	81	58
1	69	36
0,5	44	15
0,2	18	7
0,1	6	4



#### Zkoušení:

podle ČSN 72 1077 a podle metodiky a.s. KERAMOST

#### Skladovatelnost:

V suchém prostředí a s PE vložkou. Při nedodržení těchto podmínek, bentonit rychle absorbuje okolní vlhkost a mění své vlastnosti.

#### Balení a expedice:

V big bag 1 tuna.

#### Místo nakládky:

KERAMOST, a.s., provoz Obrnice, 435 21 Obrnice

## 11.2 Katalogový materiálový list pro M182 0-50 (BCV\_PM\_2020 0-50)

KATALOGOVÝ MATERIÁLOVÝ LIST VÝROBKU		
<b>BCV_PM_2020 0-50</b>		

### Charakteristika výrobku:

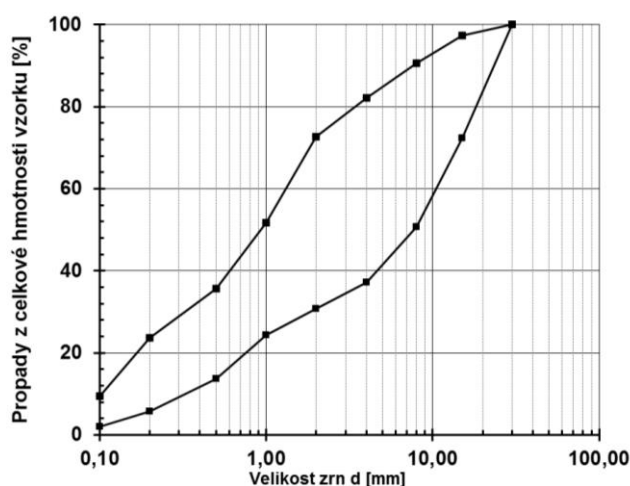
Kompaktované bentonitové granule (peletizovaný bentonit) s vysokou hustotou v suchém stavu. Objemová hmotnost sušiny granule je u tohoto materiálu vyšší než 2.000 kg/m<sup>3</sup>.

### Technické informativní parametry

Produkt	Vlhkost (%)	pH	Objemová hmotnost granulí v sušině (kg/m <sup>3</sup> )	Zrnitost (mm)	Obsah montmorillonitu (%)
BCV_PM_2020 0-50	3 - 6	< 11	≥ 2.000	Variabilní v rozmezí 0 – 50 (vzácně může být i větší zrno)	min. 60

### Orientační obalová zrnitostní křivka

průměr zrna/síta [mm]	Propad sítem v rozmezí [%]	
<b>Ojedinele i nad 30 (max zhruba 50 mm)</b>	100	99
<b>15</b>	97	72
<b>8</b>	91	51
<b>4</b>	82	37
<b>2</b>	73	31
<b>1</b>	52	24
<b>0,5</b>	36	14
<b>0,2</b>	24	6
<b>0,1</b>	9	2



**Zkoušení:** podle ČSN 72 1077 a podle metodiky a.s. KERAMOST

**Skladovatelnost:** V suchém prostředí a s PE vložkou. Při nedodržení těchto podmínek, bentonit rychle absorbuje okolní vlhkost a mění své vlastnosti.

**Balení a expedice:** V big bag 1 tuna.

**Místo nakládky:** KERAMOST, a.s., provoz Obrnice, 435 21 Obrnice

## 11.3 Způsoby vyhodnocení vzorků

Vzhledem k cílům projektu byly v průběhu zkoušek sledovány:

1. Hydraulická vodivost a bobtnací tlaky
2. Objemová hmotnost sušiny pelet
3. Objemová hmotnost pelet
4. Hmotnostní vlhkost
5. Zrnitostní složení
6. Objemová hmotnost bentonitové vrstvy

### 11.3.1 Hydraulické vodivosti a bobtnací tlaky

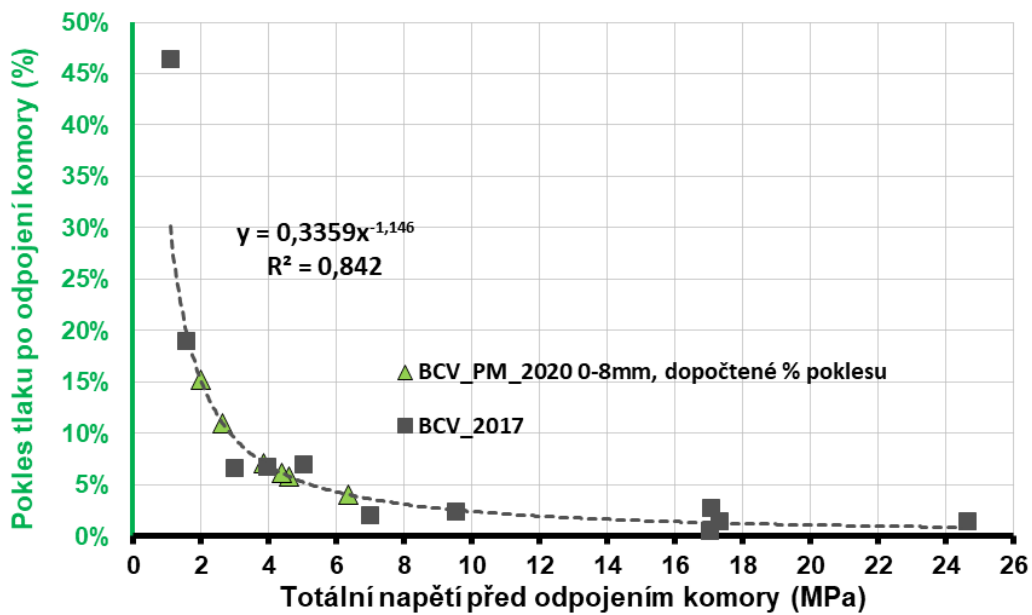
Vyhodnocení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku probíhalo podle interní neakreditované metodiky CEG FSV ČVUT č. OL 182/21, 22 vycházející z ČSN CEN ISO/TS 17892-11.

Vlivem omezeného provozu laboratoře a ztížených podmínek práce v období 3/2020 (Covid-19) došlo k nestandardnímu ukončení zkoušek, které ovlivnilo poslední měřenou hodnotu totálního napětí vzorku, resp. vyhodnocení bobtnacího tlaku. Běžný proces ukončování zkoušky spočívá ve vypnutí sycení vzorku a následném odpojení komory od systému sycení. Tím dojde k poklesu sytícího tlaku – tlaku na vstupu do vzorku na úroveň tlaku atmosférického. Poté je komora ponechána až do ustálení měřených hodnot totálního napětí, což trvá řádově první desítky hodin. Ustálená hodnota totálního napětí odpovídá zjišťovanému bobtnacímu tlaku. Následuje rozebrání komory, měření odezvy nezátíženého čidla (kontrola) a ukončení zkoušky.

Při ukončování šesti zkoušek (P742-747) bylo vypnuto sycení vzorků (příslus tlakového media), ale nebyla současně odpojena komora od sytícího systému, k čemuž došlo až 24 hod poté. Po tuto dobu byly vzorky dotovány vodou pod zbytkovým sytícím tlakem, který zůstal mezi uzavíracím ventilem sytícího systému a komorou se vzorkem (tento tlak je běžně upuštěn při odpojení komory od systému). Komora byla po odpojení bez časové prodlevy rozebrána.

Z důvodu ukončení zkoušek výše popsaným způsobem a nutnosti stanovení bobtnacích tlaků byla provedena analýza míry vlivu sytícího tlaku na měřené totální napětí, a to pomocí záznamů předchozích zkoušek nepeletizovaného materiálu BCV\_2017. Po odpojení komory od sycení je zaznamenán pokles totálního napětí (do ustálení). V rámci analýzy byl stanoven vztah mezi totálním napětím před odpojením komory a hodnotou poklesu napětí po jejím odpojení. Pokles je vyjádřen v procentech z původního tlaku před odpojením komory od sycení a míra ovlivnění se snižuje se zvyšujícím se bobtnacím tlakem (resp. objemovou hmotností sušiny).

Získaná rovnice byla použita pro procentuální vyjádření míry poklesu napětí a následný výpočet bobtnacího tlaku u zkoušek materiálu BCV\_PM\_2020 0-8 mm. Grafické vyjádření je zobrazeno na Obr. 34. V případě zkoušek BCV-PM\_2020 0-8 mm šlo o redukce o 4-15 %, viz Tab 6.



Obr. 34 Procentuální pokles totálního napětí po odpojení od sycení v závislosti na původním napětí (při sycení 1 MPa)

Tab 6 Výpočet bobtnacího tlaku z hodnot totálního napětí před odpojením komory a regresním vztahem odhadnutým procentuálním snížením

č.protokolu	$\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Totální napětí před odpojením komory (MPa)	Výpočet % snížení BCV_PM_2020 0-8mm	Hodnota snížení (MPa)	Vypočtený bobtnací tlak BCV_PM_2020 0-8mm (MPa)
P742	1361	1,99	15 %	0,30	1,69
P745	1373	2,66	11 %	0,29	2,37
P746	1458	3,87	7 %	0,27	3,59
P743	1464	4,62	6 %	0,27	4,36
P747	1489	4,38	6 %	0,27	4,11
P744	1521	6,35	4 %	0,26	6,09

### 11.3.2 Objemová hmotnost sušiny

Objemová hmotnost vysušené zeminy (sušiny)  $\rho_d$  [Mg/m<sup>3</sup>; kg/m<sup>3</sup>; g/cm<sup>3</sup>] je definována jako podíl hmotnosti pevné fáze materiálu a celkového objemu vzorku. Určuje se dle ČSN EN ISO 17892-2. Pro stanovení objemu peletizovaného bentonitu byla zvolena metoda používaná v zahraničním výzkumu, a to určení objemu bentonitu ponořením v olivovém oleji, viz Garrite et.al. (2015).

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \quad \text{Rovnice 1,}$$

kde  $m_d$  – hmotnost vysušeného vzorku [kg],

V – celkový objem vzorku [m<sup>3</sup>]

### 11.3.3 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost  $\rho$  [Mg/m<sup>3</sup>; kg/m<sup>3</sup>; g/cm<sup>3</sup>] je definována jako podíl hmotnosti materiálu a celkového objemu vzorku. Určuje se dle ČSN EN ISO 17892-2.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Rovnice 2,}$$

kde m – hmotnost vzorku [kg], V – celkový objem vzorku [m<sup>3</sup>]

Vztah mezi hmotnostní vlhkostí, objemovou hmotností a vysušenou objemovou hmotností je:

$$\rho = \rho_d \left(1 + \frac{w}{100}\right) \quad \text{Rovnice 3,}$$

kde: w – vlhkost [%],

### 11.3.4 Vlhkost (hmotnostní vlhkost)

Obsah vody v zemině je možno popsat hmotnostní vlhkostí w [%] jako podíl hmotnosti vody v zemině a hmotnosti vysušené zeminy. Určuje se dle ČSN EN ISO 17892-1:

$$w = \frac{m_w}{m_d} * 100\% \quad \text{Rovnice 4,}$$

kde:  $m_w$  – hmotnost vody ve vzorku [g],  $m_d$  – hmotnost vysušeného vzorku [g]

### 11.3.5 Zrnitostní složení

Zrnitostní složení se stanovuje podle normy ČSN EN ISO 17892- 4. Výsledkem je zrnitostní křivka, což je součtová čára, jejíž každý bod udává, kolik procent z celkové hmotnosti vzorku činí hmotnost všech zrn menších než určitý průměr zrna  $d$ . Pro její stanovení existují dva nejčastěji používané laboratorní způsoby:

- sítový rozbor - prosévání na sítích standardizované řady pro písčité až štěrkovité frakce
- hustoměrná metoda - pro jemnozrnnou frakci, vychází ze Stokesova zákona udávajícího vztah mezi průměrem zrn a rychlostí jejich usazování v kapalině.

V tomto projektu je využit pouze sítový rozbor, protože zrnitost prachových zrn není z pohledu celkového zhutnění těsnicí vrstvy z bentonitu důležitá. Určitou roli však hraje celkový obsah prachových (jemnozrnných) zrn v hutněné směsi (těsnicí vrstvě). V projektu je využívána tato řada sít s průměry ok 30; 15; 8; 4; 2; 1; 0,5; 0,2 a 0,1 mm. Materiál propadnutý sítím 0,1 se nazývá podsítné a má tedy frakci v rozpětí 0 až 0,1 mm.

### 11.3.6 Objemová hmotnost bentonitové vrstvy

Pro určení objemové hmotnosti bentonitové vrstvy se využívá některých metod z normy pro sypání kameniva. Peletizovaný materiál je nejdříve nasypán do odměrného válce o známém objemu a hmotnosti, poté je zvážen celý válec i s bentonitovou náplní. Pomocí odečtu objemu na stupnici válce a hmotnosti je dopočítána objemová hmotnost. Tím je stanovena tzv. sypná hmotnost bentonitové vrstvy. Dále je pak ručním setřesením získána objemová hmotnost bentonitové vrstvy „po setřesení“. Další způsob je získání objemové hmotnosti bentonitové vrstvy po tzv. strojovém setřesení. Strojové setřesení je zkoušeno na vibračním stole (VSB 40 – výrobce BRIO Hranice) pro hutnění betonových vzorků a pro všechny zkoušky je nastaven stejný čas a rychlost otáček (amplitudu vibrací). Poslední způsob bylo testování zhutnění v ocelovém válci se zavařeným dnem o objemu 120 dm<sup>3</sup>. Stejně jako u malých vzorků byly při zhutňování v ocelovém válci zkoušeny různé způsoby zhutnění a to volné sypání, ruční třesení válcem a zhutnění pelet pádem ocelového tělesa (válec se zavařeným dnem).





**SÚRAO**

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ  
RADIOAKTIVNÍCH  
ODPADŮ

NAŠE  
BEZPEČNÁ  
BUDOUCNOST

info@suraao.cz | [www.suraao.cz](http://www.suraao.cz)