

Technická zpráva číslo 199/2017

---

# TEST OMEZENÍ KOROZE UOS VYUŽITÍM DRENÁŽNÍ VRSTVY V ÚLOŽNÝCH VRTECH

---

Autoři: Ing. David Dobrev, Ing. Vlastislav  
Kašpar, Mgr. Milan Zuna Ph.D., Ing. Angela  
Norma Mendoza Miranda

ÚJV Řež, a. s.

**Praha, listopad 2017**

**Název projektu: Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště**

**Název dílčího projektu: Chování UOS pro VJP a RAO**

**Název dílčí etapové zprávy: Test omezení koroze UOS využitím drenážní vrstvy v úložných vrtech**

**Průběžná zpráva**

*Evidenční číslo objednatele: SO2014-061/2/SURAO-2016-0578*

*Evidenční číslo poskytovatele: PB-2017-PZ-S0578-026-TestDrenazi*

**ŘEŠITELÉ:**

**ÚJV Řež, a. s.**

**Autoři:** Ing. David Dobrev, Ing. Vlastislav Kašpar, Mgr. Milan Zuna Ph.D., Ing. Angela Norma Mendoza Miranda

| Schválil                                              |                |                              |       |        |
|-------------------------------------------------------|----------------|------------------------------|-------|--------|
| Funkce                                                | Instituce      | Jméno                        | Datum | Podpis |
| Osoba poskytovatele zodpovědná za technické řešení    | ÚJV Řež, a. s. | Ing. David Dobrev            |       |        |
| Osoba poskytovatele zodpovědná za koordinaci projektu | ÚJV Řež, a. s. | RNDr. Václava Havlová, Ph.D. |       |        |
| Osoba objednatele zodpovědná za koordinaci projektu   | SÚRAO          | Ing. Antonín Vokál, CSc.     |       |        |

## Obsah

|          |                                                                   |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod</b> .....                                                 | <b>10</b> |
| <b>2</b> | <b>Přípravné experimentální práce</b> .....                       | <b>12</b> |
| 2.1      | Příprava bobtnacích experimentů .....                             | 12        |
| 2.1.1    | Příprava bentonitových zkušebních těles .....                     | 12        |
| 2.1.2    | Varianta s drenáží .....                                          | 14        |
| 2.1.3    | Varianta se simulací pukliny .....                                | 15        |
| 2.2      | Průběh experimentů .....                                          | 16        |
| 2.2.1    | První série – bobtnání bentonitu do drenážní vrstvy .....         | 16        |
| 2.2.2    | Druhá série – krátkodobé sycení .....                             | 19        |
| 2.2.3    | Třetí série – sycení simulovanou puklinou .....                   | 22        |
| 2.3      | Stanovení retenční křivky .....                                   | 23        |
| <b>3</b> | <b>Experimenty s ocelovými vzorky v drenážní cele</b> .....       | <b>25</b> |
| 3.1      | Příprava vzorků .....                                             | 25        |
| 3.1.1    | Vzorky uhlíkové oceli před experimentem .....                     | 25        |
| 3.1.2    | Měření povrchu vzorků uhlíkové oceli optickým profilometrem ..... | 25        |
| 3.2      | Instrumentace experimentu .....                                   | 29        |
| 3.2.1    | Testování regulátorů teploty s topidly .....                      | 30        |
| 3.3      | Drenážní aparatury .....                                          | 32        |
| 3.4      | Příprava korozní zkoušky .....                                    | 34        |
| <b>4</b> | <b>Výsledky</b> .....                                             | <b>36</b> |
| 4.1      | Měření teplot .....                                               | 36        |
| 4.2      | Stanovení vlhkosti bentonitu po experimentu .....                 | 40        |
| 4.3      | Uhlíková ocel – vyhodnocení .....                                 | 45        |
| <b>5</b> | <b>Závěr</b> .....                                                | <b>52</b> |
| <b>6</b> | <b>Literatura</b> .....                                           | <b>53</b> |

## Seznam obrázků:

|        |                                             |    |
|--------|---------------------------------------------|----|
| Obr. 1 | Lisovací přípravky a použitý lis MEGA ..... | 13 |
| Obr. 2 | Nalisované vzorky bentonitu .....           | 13 |

|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 3 Schéma bobtnací aparatury – varianta s drenáží. 1 – vzorek bentonitu, 2 – drenážní vrstva, 3 – ocelové okruží, 4 – víka z plexiskla, 5 - filtry, 6 – odvodní hadička, 7 – přívodní hadička.....              | 14 |
| Obr. 4 Instalace bentonitového válečku a drenážní vrstvy.....                                                                                                                                                       | 14 |
| Obr. 5 Bobtnací aparatury připojené k byretám .....                                                                                                                                                                 | 15 |
| Obr. 6 Schéma aparatury s umělou puklinou. 8 – bentonit, 9 – rozváděcí mezikruží .....                                                                                                                              | 15 |
| Obr. 7 Sledování rozložení vlhkosti v drenážní vrstvě .....                                                                                                                                                         | 16 |
| Obr. 8 Homogenní saturace drenážní vrstvy .....                                                                                                                                                                     | 16 |
| Obr. 9 Průběh sycení vzorků (vlevo nahoře před začátkem sycení, vpravo nahoře po nasycení drenážní vrstvy, vlevo dole po 3 dnech, vpravo dole po 7 dnech).....                                                      | 17 |
| Obr. 10 Vlevo částečně očištěný vzorek po vyjmutí z bobtnací cely, vpravo odřezaná část vzorku .....                                                                                                                | 17 |
| Obr. 11 Schéma rozřezání vzorku D1.....                                                                                                                                                                             | 17 |
| Obr. 12 Způsob formátování a odběru vzorků bentonitu po krátkodobém sycení – vlevo nahoře po vyjmutí z cely a očištění, vpravo nahoře rozdělené na tři řezy, vlevo dole středová část, vpravo dole krajní část..... | 20 |
| Obr. 13 Distribuce vlhkosti (%) v bentonitovém zkušebním tělese po krátkodobém sycení (1 den), modře zvýrazněna vlhkost krajního segmentu, červeně pak vlhkost středového segmentu .....                            | 21 |
| Obr. 14 Distribuce vlhkosti (%) v bentonitovém zkušebním tělese po krátkodobém sycení (2 dny), modře zvýrazněna vlhkost krajního segmentu, červeně pak vlhkost středového segmentu .....                            | 21 |
| Obr. 15 Distribuce vlhkosti (%) v bentonitovém zkušebním tělese po krátkodobém sycení (4 dny), modře zvýrazněna vlhkost krajního segmentu, červeně pak vlhkost středového segmentu .....                            | 21 |
| Obr. 16 Bentonitové těleso D8 po vyjmutí z cely .....                                                                                                                                                               | 22 |
| Obr. 17 Distribuce vlhkosti v délce bentonitového tělesa D8. Řez č. 3 je umístěn pod modelovou puklinou .....                                                                                                       | 22 |
| Obr. 18 Distribuce vlhkosti v délce bentonitového tělesa D9 .....                                                                                                                                                   | 23 |
| Obr. 19 Aparatura pro stanovení retenční křivky .....                                                                                                                                                               | 23 |
| Obr. 20 Retenční křivka bentonitu BaM při suché objemové hmotnosti $1,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .....                                                                                                       | 24 |
| Obr. 21 Převod kartézských souřadnic vzorku do válcových souřadnic, příklad pro vzorek č. 2.....                                                                                                                    | 26 |
| Obr. 22 Vybrané soubory dat pro podélný směr, příklad pro vzorek č. 2.....                                                                                                                                          | 26 |
| Obr. 23 Křivky profilu povrchu pro podélný směr, příklad pro vzorek č. 2 .....                                                                                                                                      | 27 |
| Obr. 24 Vybrané soubory dat po obvodu, příklad pro vzorek č. 2 .....                                                                                                                                                | 27 |
| Obr. 25 Křivky po obvodu, příklad pro vzorek č. 2 .....                                                                                                                                                             | 27 |
| Obr. 26 Barevná mapa rozložení odchylek $R_{\text{dev}}$ , příklad pro vzorek č. 2 .....                                                                                                                            | 28 |
| Obr. 27 Překrytí naměřených dat homogenní sítí bodů – ilustrativní schéma .....                                                                                                                                     | 29 |



|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 28 instrumentace experimentu a) topné těleso, b) regulátor teploty, c) systém měření teploty .....                            | 30 |
| Obr. 29 Sestava pro měření povrchové teploty vzorků z uhlíkové oceli .....                                                         | 30 |
| Obr. 30 Měření povrchové teploty vzorků z uhlíkové oceli (vlevo měření infračerveným teploměrem, vpravo termočlánkem typu K) ..... | 31 |
| Obr. 31 Průběh povrchových teplot v cele IA při vytápění na 70 °C .....                                                            | 31 |
| Obr. 32 Průběh povrchových teplot v cele IB při vytápění na 65 °C / 70 °C .....                                                    | 31 |
| Obr. 33 Průběh povrchových teplot v cele IIA při vytápění na 70 °C .....                                                           | 32 |
| Obr. 34 Průběh povrchových teplot v cele IIB při vytápění na 70 °C .....                                                           | 32 |
| Obr. 35 Svislý řez drenážní aparaturou – varianta s drenáží .....                                                                  | 33 |
| Obr. 36 Svislý řez drenážní aparaturou – varianta se simulovanou puklinou .....                                                    | 33 |
| Obr. 37 Jednotlivé kroky při sestavování experimentální aparatury s drenáží .....                                                  | 34 |
| Obr. 38 Odkysličování drenážních cel v rukavicovém boxu .....                                                                      | 35 |
| Obr. 39 Celkový pohled na drenážní aparatury v rukavicovém boxu .....                                                              | 36 |
| Obr. 40 Průběhy teplot v modulech IA (bez drenáže – „puklina“; T1, T2) a IB (s drenáží; T3, T4) v průběhu celého experimentu. .... | 37 |
| Obr. 41 Průběhy záznamu teplot v modulu IB (s drenáží). Detailní zobrazení nárůstu teploty .....                                   | 37 |
| Obr. 42 Průběhy záznamu teplot v modulu IB (s drenáží) v průběhu celého experimentu. ...                                           | 38 |
| Obr. 43 Průběhy záznamu teplot v modulu IA (bez drenáže). Detailní zobrazení nárůstu teploty .....                                 | 38 |
| Obr. 44 Průběhy záznamu teplot v modulu IA (bez drenáže) v průběhu celého experimentu. ....                                        | 39 |
| Obr. 45 Průběhy záznamu teplot v modulu IIA (bez drenáže) a IIB (drenáž) v průběhu celého experimentu. ....                        | 39 |
| Obr. 46 Průběhy záznamu teplot v modulu IIA (bez drenáže) a IIB (drenáž) od zapnutí modulu IIB (1. 8. 2017 – 16. 11. 2017) .....   | 40 |
| Obr. 47 Ilustrační schéma rozřezávání bentonitových těles po délce na segmenty .....                                               | 41 |
| Obr. 48 Schéma rozřezávání válečků z aparatury bez drenáže .....                                                                   | 41 |
| Obr. 49 Schéma rozřezávání válečků z aparatury s drenáží .....                                                                     | 42 |
| Obr. 50 Postup odběru a dělení bentonitových vzorků .....                                                                          | 43 |
| Obr. 51 Vzorkování bentonitu .....                                                                                                 | 43 |
| Obr. 52 Vzorek z uhlíkové oceli vyjmutý z bentonitového mezikruží .....                                                            | 43 |
| Obr. 53 Bentonitové segmenty v exsikátoru, ilustrační foto .....                                                                   | 44 |
| Obr. 54 Graf průběhu vlhkosti v cele IA (bez drenážní vrstvy) .....                                                                | 44 |
| Obr. 55 Graf průběhu vlhkosti v cele IB (s drenážní vrstvou) .....                                                                 | 44 |
| Obr. 56 Průběh průměrné vlhkosti po hloubce cely IB (průměrná vlhkost jednotlivých vrstev všech segmentů) .....                    | 45 |

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 57 Vzorek č. 53 (cela IA) před a po čišťení ultrazvukem .....                                                                                                                     | 46 |
| Obr. 58 Vzorek č. 63 (cela IB) před a po čišťení ultrazvukem .....                                                                                                                     | 46 |
| Obr. 59 Povrch vzorku č. 53 (cela IA bez drenáže) po odstranění korozních produktů .....                                                                                               | 46 |
| Obr. 60 Povrch vzorku č. 63 (cela IB s drenáží) po odstranění korozních produktů .....                                                                                                 | 47 |
| Obr. 61 Průběh korozní rychlostí ocelových vzorků. Levá část – korozní cela se simulovanou puklinou (puklina je nad vzorkem č. 42). Pravá část – korozní cela s drenážní vrstvou ..... | 47 |
| Obr. 62 Porovnání histogramů odchylek $R_{dev}$ pro vzorek č. 26 (druhá skupina) a č. 27 (první skupina) .....                                                                         | 48 |
| Obr. 63 Porovnání histogramů odchylek $R_{dev}$ pro vzorek č. 26 (druhá skupina) a č. 27 (první skupina) .....                                                                         | 49 |
| Obr. 64 Porovnání vzorku č. 47 před a po korozní zkoušce.....                                                                                                                          | 49 |
| Obr. 65 Porovnání vzorku č. 54 před a po korozní zkoušce.....                                                                                                                          | 50 |
| Obr. 66 Porovnání objemových úbytků na testovaných vzorcích .....                                                                                                                      | 51 |
| Obr. 67 Vzorek 41 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 55 |
| Obr. 68 Vzorek 42 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 56 |
| Obr. 69 Vzorek 45 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 57 |
| Obr. 70 Vzorek 46 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 58 |
| Obr. 71 Vzorek 47 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 59 |
| Obr. 72 Vzorek 48 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 60 |
| Obr. 73 Vzorek 49 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 61 |
| Obr. 74 Vzorek 51 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 62 |
| Obr. 75 Vzorek 52 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 63 |
| Obr. 76 Vzorek 53 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 64 |
| Obr. 77 Vzorek 54 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 65 |
| Obr. 78 Vzorek 55 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 66 |
| Obr. 79 Vzorek 56 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 67 |
| Obr. 80 Vzorek 57 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 68 |
| Obr. 81 Vzorek 58 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 69 |
| Obr. 82 Vzorek 59 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 70 |
| Obr. 83 Vzorek 60 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 71 |
| Obr. 84 Vzorek 61 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 72 |
| Obr. 85 Vzorek 62 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 73 |
| Obr. 86 Vzorek 63 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....                                                                                               | 74 |

## Seznam tabulek:

|                                                                                                                                                    |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Tab. 1 Vlhkosti řezů vybraných bentonitových těles D2, D3 a D4 po ukončení zkoušky bobtnání, vlhkost stanovena dle normy ČSN EN ISO 17892-1 .....  | 18        |
| Tab. 2 Distribuce vlhkosti v segmentech bentonitového tělesa D1 po ukončení zkoušky bobtnání, vlhkost stanovena dle normy ČSN EN ISO 17892-1 ..... | 19        |
| Tab. 3 Distribuce vlhkosti ve vybraných segmentech bentonitových zkušebních těles D5, D6 a D7 .....                                                | 20        |
| <i>Tab. 4 Chemická složení vzorků uhlíkové oceli 12022 .....</i>                                                                                   | <i>25</i> |
| <i>Tab. 5 Korozní rychlosti jednotlivých vzorků .....</i>                                                                                          | <i>47</i> |
| Tab. 6 Hodnoty referenčních poloměrů před a po experimentu .....                                                                                   | 54        |

### **Seznam textových příloh:**

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Příloha 1 - Hodnoty referenčních poloměrů před a po experimentu ..... | 54 |
| Příloha 2 – Výsledky profilometrie před a po experimentu .....        | 55 |

**Seznam použitých zkratk:**

|      |                           |
|------|---------------------------|
| BaM  | Bentonit a montmorillonit |
| FPM  | Fluorový kaučuk           |
| PE   | Polyethylen               |
| PTFE | Polytetrafluorethylen     |

## Abstrakt

Zpráva se zabývá průběžnými výsledky korozní zkoušky v systému s drenážní vrstvou a bez drenážní vrstvy v podmínkách simulujících hlubinné úložiště radioaktivních odpadů. V první části zprávy jsou uvedeny přípravné práce pro korozní zkoušku. Druhá část zprávy předkládá doposud získané výsledky z probíhajícího experimentu.

## Klíčová slova

*Koroze, bentonit, drenáž*

## Abstract

The report summarizes results of the corrosion test in a system with and without drainage layer under conditions simulating the deep geological repository. The first part of the report presents the preparatory work for the corrosion test. The second part of the report presents preliminary results obtained from ongoing experiment.

## Keywords

*Corrosion, bentonite, drainage*

## 1 Úvod

Tato zpráva byla zpracována v rámci projektu SÚRAO „Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště“, který je součástí přípravy hlubinného úložiště radioaktivních odpadů (dále jen HÚ). Cílem projektu je získat vybraná data, modely, argumenty a další informace potřebné pro zhodnocení potenciálních lokalit pro umístění HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Na základě veřejného zadávacího řízení byla v červenci 2014 uzavřena čtyřletá smlouva s ÚJV Řež, a. s. a jeho subdodavateli: Českou geologickou službou; ČVUT v Pra; Technickou univerzitou v Liberci; Ústavem Geoniky AV ČR, v. v. i.; a společnostmi Arcadis CZ a. s.; Progeo, s. r. o.; Chemcomex Praha, a. s. a Centrum výzkumu Řež s. r. o. o poskytování výzkumné podpory hodnocení dlouhodobé bezpečnosti v následujících oblastech:

- i. Chování VJP a forem RAO, nepřijatelných do přípovrchových úložišť, v prostředí hlubinného úložiště;
- ii. Chování ukládacích obalových souborů (UOS) VJP a RAO v prostředí hlubinného úložiště;
- iii. Chování tlumících, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí hlubinného úložiště;
- iv. Řešení úložných vrtů a jejich vliv na vlastnosti obklopujícího horninového prostředí;
- v. Chování horninového prostředí;
- vi. Transport radionuklidů z úložiště;
- vii. Další charakteristiky lokalit potenciálně ovlivňující bezpečnost úložiště.

Cílem tohoto dílčího projektu *Test omezení koroze UOS využitím drenážní vrstvy v úložných vrtech* je

- 1) Návrh a příprava laboratorního fyzikálního modelu/modelů pro ověření vlivu drenáže na korozi uhlíkové oceli a vlastnosti bentonitu
- 2) Návrh a příprava matematických modelů a nástrojů pro matematické modelování procesů probíhajících při experimentu
- 3) Příprava zařízení pro fyzikální model in-situ v PVP Bukov (v případě, že se navržená hypotéza ukáže jako správná)
- 4) Příprava podrobného věcného a časové harmonogramu prací pro in-situ experiment v PVP Bukov
- 5) Vyhodnocení výsledků a zpracování zprávy

Český koncept ukládání VJP do prostředí krystalinických hornin se odlišuje od švédského či finského konceptu navrženým typem úložného obalového souboru. V českém konceptu je místo měděného přebalu navržen robustní přebal z uhlíkové oceli. Oba dva koncepty mají své výhody a nevýhody. Nevýhodou konceptu s měděným přebalem je to, že sváry měděného přebalu mohou být více ovlivněny lidským faktorem než sváry přebalu z uhlíkové oceli. Chybou lidského faktoru tak může dojít k přehlédnutí nedokonalého sváru snadněji v případě mědi než uhlíkové oceli. Na druhou stranu využití uhlíkového přebalu má řadu

nevýhod, z nichž nejdůležitější je termodynamická nestabilita uhlíkové oceli i za anaerobních podmínek. Tento nedostatek je v českém konceptu zmírněn využitím další bariéry z korozivzdorné oceli, která brání korozi po případném prokorodování uhlíkové oceli. Dalším nedostatkem uhlíkové oceli je to, že při anaerobní korozi vznikají plyny, jejichž tlak by mohl narušit funkci ostatních bariér a určitým problémem může být i nestejný přítok vody k úložným vrtům a v důsledku toho i nestejný bobtnání bentonitu, což může vést k nerovnoměrné korozi a možná i ovlivnění funkčních vlastností bentonitu. Předpokládá se (Neretnieks, 1985) že tyto nedostatky je možno zmírnit využitím drenážní vrstvy, která může zlepšit homogenitu sycení bentonitu, bránit kontaktu vody s UOS a snížit vlivu tlaku vznikajících plynů na bentonit. Zároveň brání vytváření preferenčních cest proudění v případě přítomnosti puklin na kontaktu horniny a přispívá tak k dlouhodobé funkčnosti bentonitového těsnění. Důležité je však všechny tyto předpoklady ověřit experimentálně a prokázat dlouhodobý příznivý vliv této drenážní vrstvy.

Cílem této průběžné zprávy je uvést doposud získané výsledky korozní zkoušky v systému s drenážní vrstvou a bez drenážní vrstvy a vliv rovnoměrného/nerovnoměrného sycení na korozní chování uhlíkové oceli.

## 2 Přípravné experimentální práce

Před spuštěním drenážních experimentů bylo provedeno několik experimentů, jejichž účelem bylo ověření bobtnání bentonitu BaM do drenážní vrstvy a zároveň ověření chování systému s umělou puklinou. Hlavním cílem těchto zkoušek bylo zjistit, zda je bentonit vlivem bobtnacího tlaku při sycení schopen pronikat do drenážní vrstvy tvořené křemičitým pískem. To by mělo za následek zvětšení objemu bentonitu a tudíž snížení jeho objemové hmotnosti. Při přípravě drenážního experimentu by pak bylo zapotřebí s touto eventualitou počítat a připravit navážku bentonitu s odpovídající rezervou tak, aby bylo dosaženo požadované objemové hmotnosti.

Dalším cílem bylo zjistit rychlost sycení bentonitu při variantě s drenáží a při variantě se simulací pukliny a stanovit průběh vlhkosti po délce vzorku.

### 2.1 Příprava bobtnacích experimentů

#### 2.1.1 Příprava bentonitových zkušebních těles

Pro vytvoření zkušebních těles byly zkonstruovány lisovací přípravky z korozi-vzdorné oceli (viz Obr. 1). Lisování bylo prováděno na hydraulickém lisu MEGA 11-300 DM1S (Form+Test Seidner+Co GmbH, Německo). Jako testovací materiál byl zvolen komerčně vyráběný „Bentonit a Montmorillonit“, KERAMOST a.s. označovaný dále zkratkou BaM. Šarže bentonitu byla stejná jako v projektu Zapojení v projektu Material Corrosion Test (MaCoTe)(Dobrev a Zuna, 2015).

Z nádoby s bentonitem bylo odebráno pět vzorků bentonitu BaM (reprezentativní vzorek) o přirozené vlhkosti. Metodou vysušování do konstantní hmotnosti byly tyto vlhkosti stanoveny, průměrná přirozená vlhkost byla poté stanovena jako aritmetický průměr vlhkostí jednotlivých vzorků. Na základě průměrné přirozené vlhkosti a požadovaných rozměrů byla vypočítána odpovídající navážka bentonitu a bylo vylisováno bentonitové zkušební těleso o stanovené suché objemové hmotnosti  $1,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .





*Obr. 1 Lisovací přípravky a použitý lis MEGA*

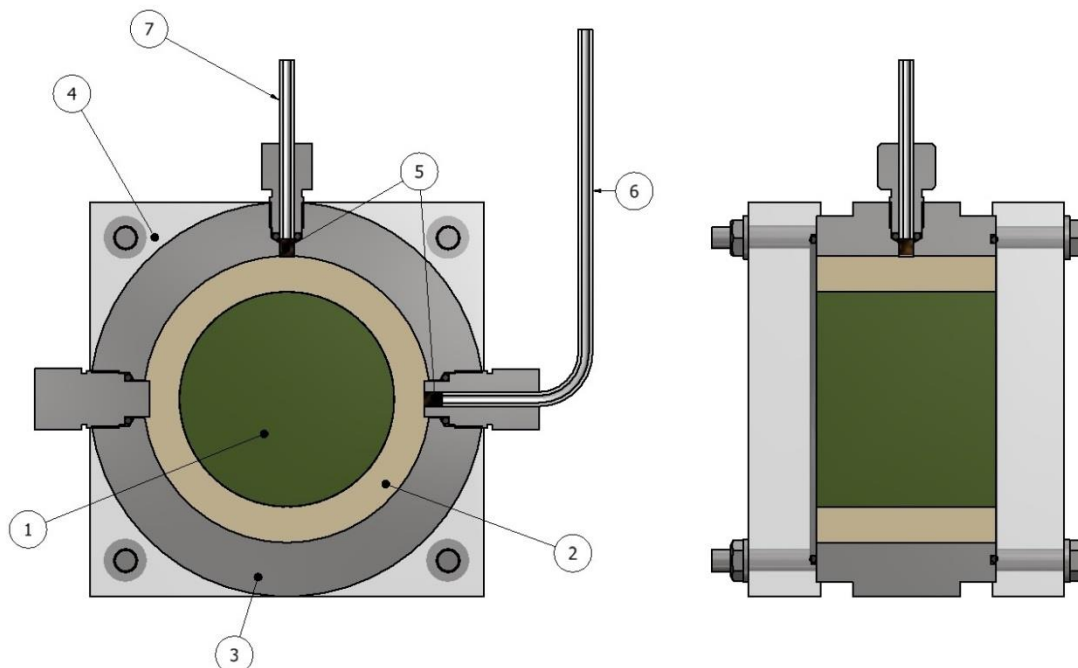
Bobtnací experimenty byly provedeny s dvěma různými typy těles. V prvním experimentu byl bentonit vylisován do tvaru plného válce o průměru 60 mm a délce 50 mm. V druhém experimentu byl bentonit vylisován do tvaru dutého válce o stejných rozměrech s vnitřním otvorem o průměru 20 mm; do vnitřního otvoru byl před umístěním vzorku do cely vložen plastový váleček jako simulace vzorků uhlíkové oceli, které v něm budou během drenážního experimentu umístěny. Ilustrační obrázek vylisovaných bentonitových zkušebních těles je na Obr. 2.



*Obr. 2 Nalisované vzorky bentonitu*

### 2.1.2 Varianta s drenáží

Pro experiment s drenáží byla navržena aparatura, jejíž schéma je uvedeno na Obr. 3.



Obr. 3 Schéma bobtnací aparatury – varianta s drenáží. 1 – vzorek bentonitu, 2 – drenážní vrstva, 3 – ocelové okruží, 4 – víka z plexiskla, 5 - filtry, 6 – odvodní hadička, 7 – přívodní hadička

V ocelovém okruží aparatury o průměru 80 mm a délce 50 mm byly umístěny záslepky a průchodky pro sycení bentonitu. Pod průchodky byly umístěny filtry, aby během experimentu nemohlo docházet ke ztrátě pískových částic ze systému. Materiál vík byl zvolen z plexiskla, aby bylo možné vizuálně pozorovat a dokumentovat průběh experimentu.

Bentonitové zkušební těleso bylo umístěno do středu ocelového okruží a obsypáno drenážní vrstvou z křemičitého písku (výrobce quick-mix k.s., ČR; zrnitost: 0,1-1 mm, obsah  $\text{SiO}_2$ :  $\geq 98$  %, přirozená vlhkost: max. 0,2 %). Písková vrstva byla postupně při montáži aparatury mechanicky hutněna. Ilustrační obrázek bentonitu s drenážní vrstvou je uveden na Obr. 4.



Obr. 4 Instalace bentonitového válečku a drenážní vrstvy.

Bentonit byl sycen přes průchodku destilovanou vodou, jejíž spotřeba byla měřena kontrolována pomocí byrety. Odvod vzduchu ze systému byl zajištěn druhou průchodkou.

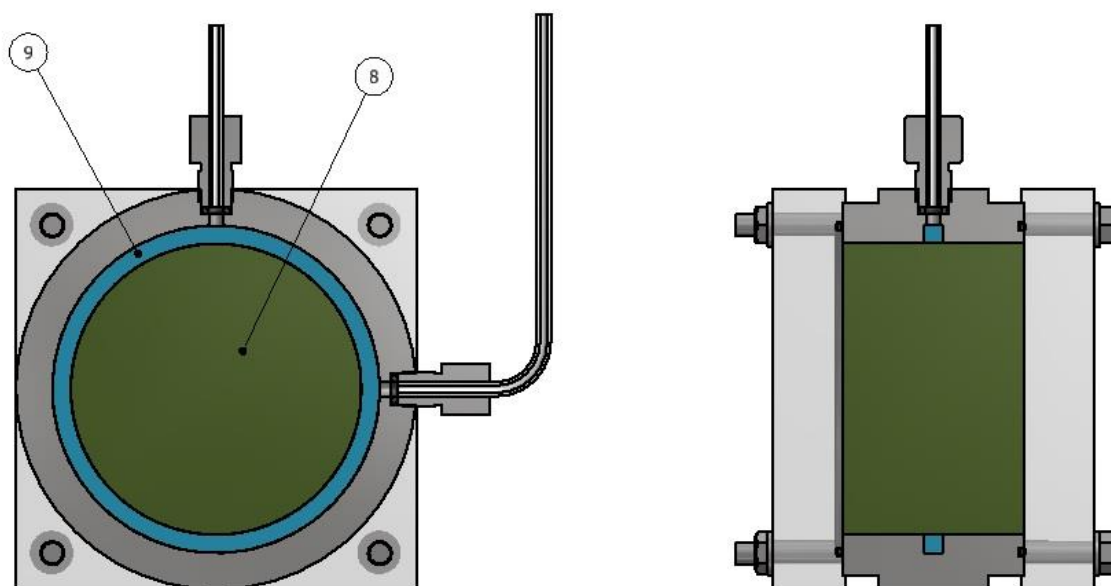
Celá sestava v průběhu experimentu je zobrazena na Obr. 5.



Obr. 5 Bobtnací aparatury připojené k byretám

### 2.1.3 Varianta se simulací pukliny

Aparatura pro systém se simulací pukliny je patrná z následujícího obrázku (Obr. 6). Uspořádání je podobné jako u aparatury s drenáží, byla však zcela vynechána drenážní vrstva a do drážky v ocelovém okruží bylo vloženo rozváděcí mezikruží z pórovitého materiálu (filtrační lamela HSL ze slinutých PE zrn s povlakem z PTFE, výrobce Herding GmbH Filtertechnik, Německo), které simuluje puklinu.



Obr. 6 Schéma aparatury s umělou puklinou. 8 – bentonit, 9 – rozváděcí mezikruží

## 2.2 Průběh experimentů

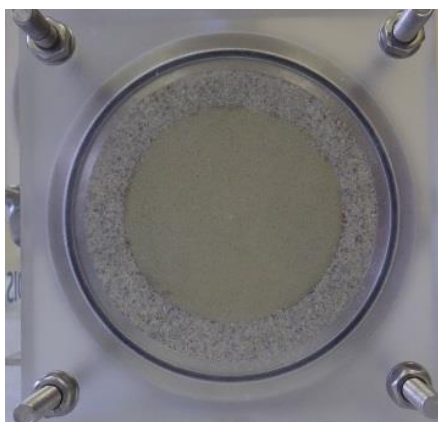
### 2.2.1 První série – bobtnání bentonitu do drenážní vrstvy

První série experimentů proběhla především za účelem sledování, zda bentonit bude bobtnat do drenážní vrstvy. Jako vzorky byla použita celistvá bentonitová zkušební tělesa (vzorky D1, D2, D4) a jedno těleso s vnitřním otvorem (vzorek D3). Každé těleso bylo podle výše zmíněného postupu umístěno do aparatury, kde bylo následně syceno destilovanou vodou. Zároveň byl spuštěn časový a obrazový záznam sycení drenážní vrstvy. K jejímu nasycení došlo již po přibližně 1 minutě. Pro sledování stejnoměrného sycení drenážní vrstvy bylo provedeno ověření sycení s průhlednou trubicou nahrazující bentonitový váleček. Po ukončení sycení bylo rozložení vlhkosti vizuálně homogenní po celé délce drenážní vrstvy (Obr. 7, Obr. 8).



Obr. 7 Sledování rozložení vlhkosti v drenážní vrstvě Obr. 8 Homogenní saturace drenážní vrstvy

Vzorky bentonitu byly syceny přibližně tři týdny, kdy se již předpokládalo jejich dostatečné nasycení pro účely experimentu. Průběžně byla zaznamenávána spotřeba vody v byretách. Ukázka postupu sycení je vidět na následujících fotografiích (Obr. 9).

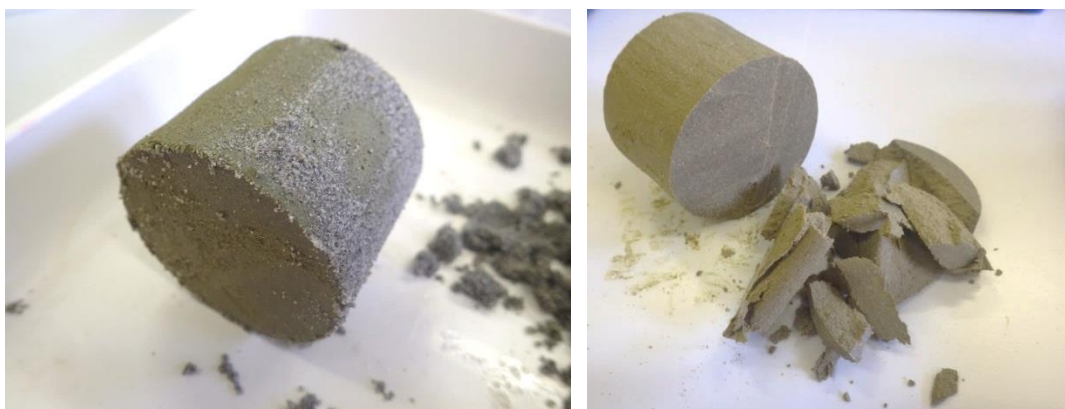






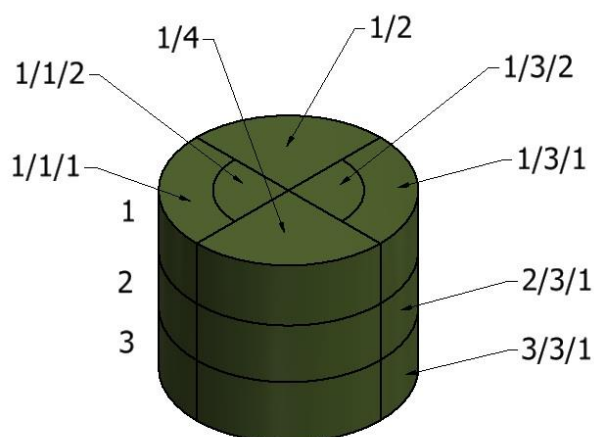
Obr. 9 Průběh sycení vzorků (vlevo nahoře před začátkem sycení, vpravo nahoře po nasycení drenážní vrstvy, vlevo dole po 3 dnech, vpravo dole po 7 dnech)

Po ukončení sycení byly přes víko cely změřeny rozměry vzorku pomocí posuvného měřítka, aby bylo ověřeno, zda došlo k bobtnání vzorku do pískové vrstvy. Měřitelné bobtnání nebylo pozorováno u žádného ze vzorků, rozměry vzorků před a po sycení zůstaly nezměněny. Následně byly cely demontovány, vzorek bentonitu byl vyjmut a očištěn od pískových zrn a poté po délce rozřezán na 5 centimetrových částí. Vzorek po vyjmutí z bobtnací cely a po částečném očištění je zobrazen na (Obr. 10).



Obr. 10 Vlevo částečně očištěný vzorek po vyjmutí z bobtnací cely, vpravo odřezaná část vzorku

Vzorek bentonitu D1 byl na rozdíl od ostatních vzorků rozřezán podle schématu na Obr. 11, aby se ověřilo také rozložení vlhkosti uvnitř vzorku radiálně.



Obr. 11 Schéma rozřezání vzorku D1

U všech takto získaných řezů bylo provedeno stanovení vlhkosti dle ČSN EN ISO 17892-1. Stanovené hodnoty vlhkosti bentonitových vzorků jsou uvedeny v Tab. 1 a Tab. 2.

*Tab. 1 Vlhkosti řezů vybraných bentonitových těles D2, D3 a D4 po ukončení zkoušky bobtnání, vlhkost stanovena dle normy ČSN EN ISO 17892-1*

| Vzorek | Číslo řezu | Vlhkost (%) | Průměrná vlhkost (%) |
|--------|------------|-------------|----------------------|
| D2     | 1          | 34,30       | <b>32,95</b>         |
|        | 2          | 32,67       |                      |
|        | 3          | 32,43       |                      |
|        | 4          | 32,33       |                      |
|        | 5          | 33,05       |                      |
| D3     | 1          | 34,03       | <b>32,29</b>         |
|        | 2          | 32,97       |                      |
|        | 3          | 31,88       |                      |
|        | 4          | 31,22       |                      |
|        | 5          | 31,33       |                      |
| D4     | 1          | 33,75       | <b>32,56</b>         |
|        | 2          | 32,65       |                      |
|        | 3          | 32,16       |                      |
|        | 4          | 31,87       |                      |
|        | 5          | 32,36       |                      |

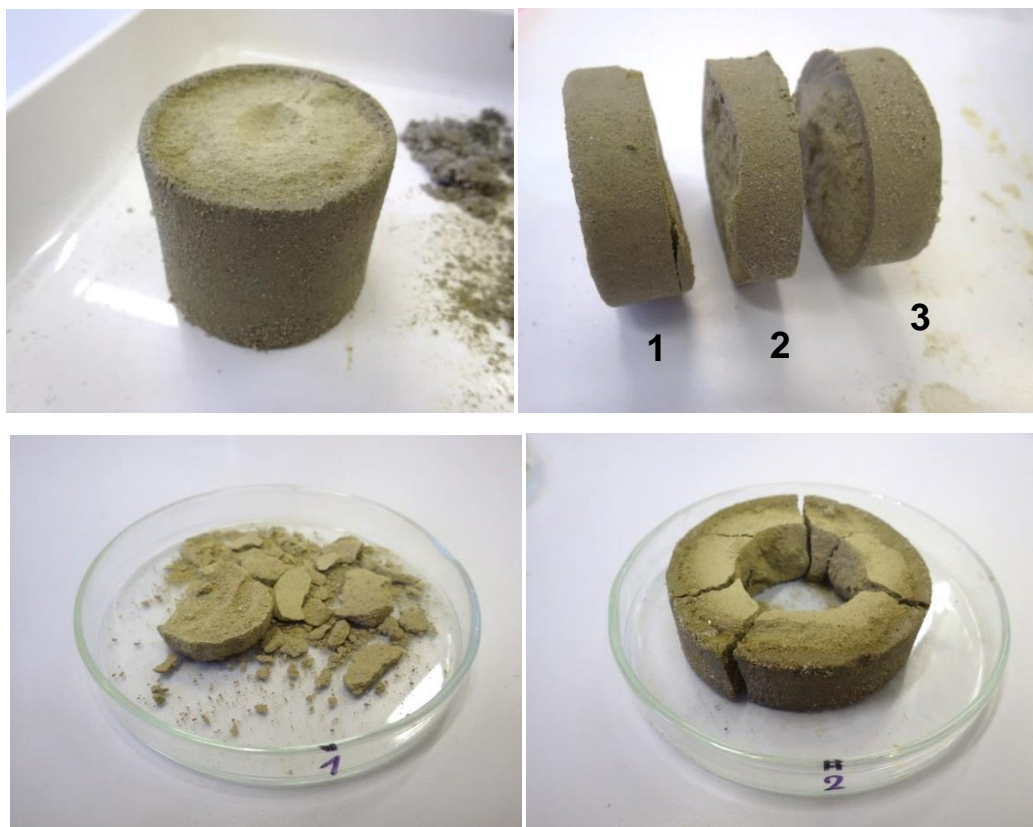
Tab. 2 Distribuce vlhkosti v segmentech bentonitového tělesa D1 po ukončení zkoušky bobtnání, vlhkost stanovena dle normy ČSN EN ISO 17892-1

|                    | Číslo segmentu | Vlhkost (%) | Průměrná vlhkost (%) |
|--------------------|----------------|-------------|----------------------|
| Krajní segmenty    | 1/1/1          | 31,79       | <b>32,28</b>         |
|                    | 1/3/1          | 31,50       |                      |
|                    | 2/1/1          | 33,20       |                      |
|                    | 2/3/1          | 31,83       |                      |
|                    | 3/1/1          | 32,59       |                      |
|                    | 3/3/1          | 32,79       |                      |
| Středové segmenty  | 1/1/2          | 29,63       | <b>30,98</b>         |
|                    | 1/3/2          | 36,10       |                      |
|                    | 2/1/2          | 30,41       |                      |
|                    | 2/3/2          | 30,05       |                      |
|                    | 3/1/2          | 29,39       |                      |
|                    | 3/3/2          | 30,28       |                      |
| Zbývající segmenty | 1/2            | 31,32       | <b>31,67</b>         |
|                    | 1/4            | 31,10       |                      |
|                    | 2/2            | 31,65       |                      |
|                    | 2/4            | 31,42       |                      |
|                    | 3/2            | 32,18       |                      |
|                    | 3/4            | 32,35       |                      |

Z výsledků měření první série bentonitových těles vyplývá, že po třech týdnech se průměrná vlhkost jednotlivých vzorků neliší o více než 4 %. Průměrná vlhkost středových segmentů je cca o 4 % nižší než průměrná vlhkost krajních segmentů (kromě řezu 1/3/2, kde patrně došlo k chybě v měření).

### 2.2.2 Druhá série – krátkodobé sycení

Druhá série experimentů proběhla především za účelem zjistit, jak rychle bude narůstat vlhkost ve vzorku v radiálním směru. Pro tyto účely byla připravena bentonitová tělesa D5, D6 a D7 (plná tělesa). Sycení tělesa D6 bylo ukončeno po 24 hodinách, D7 po 2 dnech a D5 po 4 dnech. Po vyjmutí z cel byla tělesa rozdělena na 3 přibližně stejně široké řezy tvaru disku a každý z těchto řezů byl následně rozdělen na díl středový a díl okrajový (viz Obr. 12). U takto připravených vzorků bylo následně provedeno stanovení vlhkosti dle ČSN EN ISO 17892-1.



Obr. 12 Způsob formátování a odběru vzorků bentonitu po krátkodobém sycení – vlevo nahoře po vyjmutí z cely a očištění, vpravo nahoře rozdělené na tři řezy, vlevo dole středová část, vpravo dole krajní část

Stanovené hodnoty vlhkosti bentonitových vzorků jsou uvedené v Tab. 3.

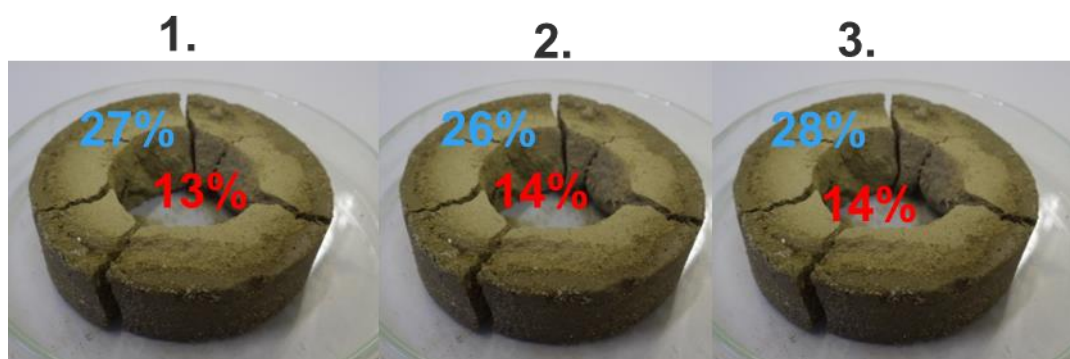
Tab. 3 Distribuce vlhkosti ve vybraných segmentech bentonitových zkušebních těles D5, D6 a D7

| Vzorek | Čas sycení (dny) | Segmenty | Číslo řezu | Vlhkost (%) | Průměrná vlhkost (%) |
|--------|------------------|----------|------------|-------------|----------------------|
| D6     | 1                | krajní   | 1          | 27,06       | <b>27,02</b>         |
|        |                  |          | 2          | 26,45       |                      |
|        |                  |          | 3          | 27,56       |                      |
|        |                  | středové | 1          | 13,10       | <b>13,71</b>         |
|        |                  |          | 2          | 13,76       |                      |
|        |                  |          | 3          | 14,27       |                      |
| D7     | 2                | krajní   | 1          | 28,95       | <b>28,33</b>         |
|        |                  |          | 2          | 27,95       |                      |
|        |                  |          | 3          | 28,09       |                      |
|        |                  | středové | 1          | 19,85       | <b>19,93</b>         |
|        |                  |          | 2          | 20,60       |                      |
|        |                  |          | 3          | 19,33       |                      |

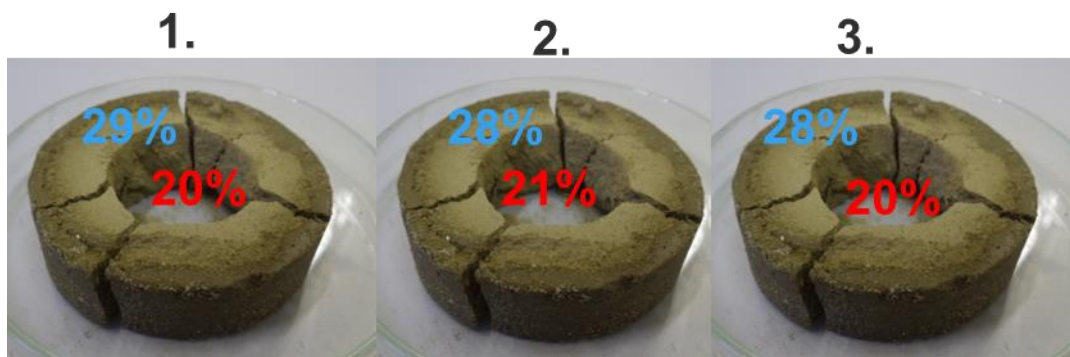


|    |   |          |   |       |              |
|----|---|----------|---|-------|--------------|
| D5 | 4 | krajní   | 1 | 30,13 | <b>30,42</b> |
|    |   |          | 2 | 30,97 |              |
|    |   |          | 3 | 30,15 |              |
|    |   | středové | 1 | 25,85 | <b>26,40</b> |
|    |   |          | 2 | 26,52 |              |
|    |   |          | 3 | 26,82 |              |

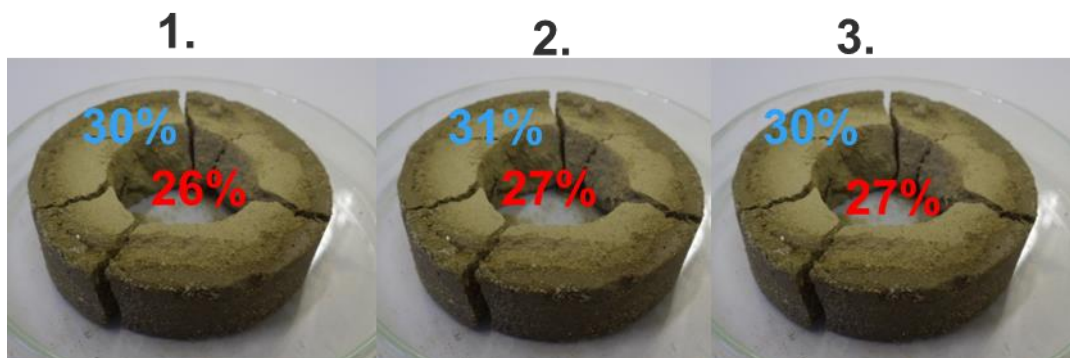
Na Obr. 13 až Obr. 15 jsou graficky zobrazeny hodnoty vlhkostí a jejich rozložení po 1,2 a 4 dnech sycení.



Obr. 13 Distribuce vlhkosti (%) v bentonitovém zkušebním tělese po krátkodobém sycení (1 den), modře zvýrazněna vlhkost krajního segmentu, červeně pak vlhkost středového segmentu



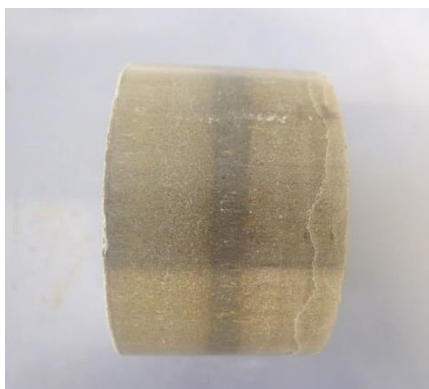
Obr. 14 Distribuce vlhkosti (%) v bentonitovém zkušebním tělese po krátkodobém sycení (2 dny), modře zvýrazněna vlhkost krajního segmentu, červeně pak vlhkost středového segmentu



Obr. 15 Distribuce vlhkosti (%) v bentonitovém zkušebním tělese po krátkodobém sycení (4 dny), modře zvýrazněna vlhkost krajního segmentu, červeně pak vlhkost středového segmentu

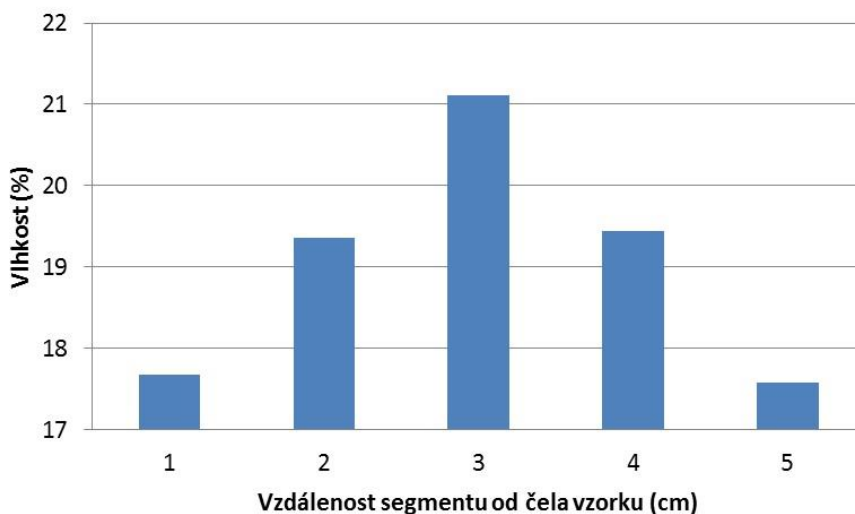
### 2.2.3 Třetí série – sycení simulovanou puklinou

Třetí série experimentů proběhla především za účelem zjistit, jak rychlý bude průběh sycení vzorku v případě, že se místo drenážní vrstvy použije simulovaná puklina. Pro tyto účely byla připravena tělesa D8 a D9, která byla nalisována do cel s drážkou po obvodě, do které bylo předem vloženo rozváděcí mezikruží z pórovitého materiálu (slinutý PE). Těleso D8 bylo z cely vyjmuto po 7 dnech, následně bylo rozděleno na 5 řezů tloušťky 1 cm a bylo provedeno stanovení vlhkosti těchto řezů. Těleso po vyjmutí z cely je pro ilustraci zobrazeno na Obr. 16.



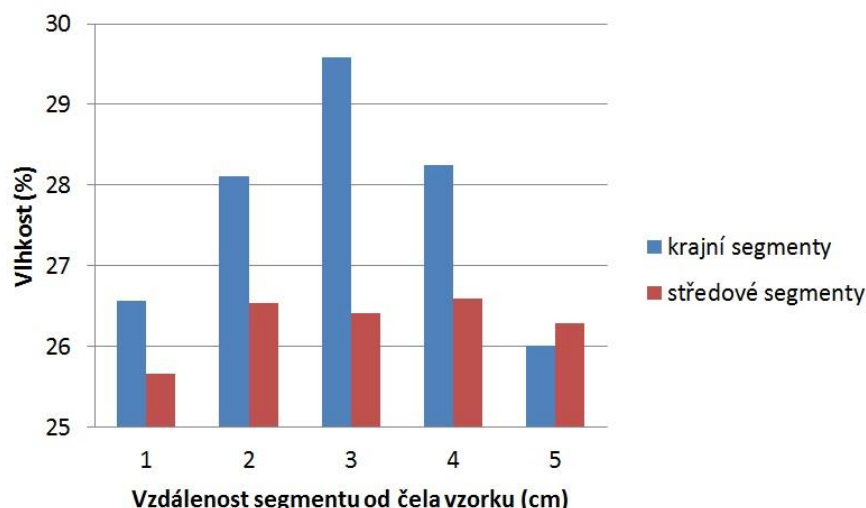
Obr. 16 Bentonitové těleso D8 po vyjmutí z cely

Distribuce vlhkosti v délce bentonitového tělesa je zobrazena v grafu na Obr. 17.



Obr. 17 Distribuce vlhkosti v délce bentonitového tělesa D8. Řez č. 3 je umístěn pod modelovou puklinou

Těleso D9 bylo z cely vyjmuto po 17 dnech, následně bylo rozděleno na 5 řezů tloušťky 1 cm a každý z těchto řezů byl dále rozdělen na středový a okrajový díl. Poté byla stanovena vlhkost každého z těchto vzorků. Distribuce vlhkostí v délce bentonitového tělesa je zobrazena v grafu na Obr. 18.



Obr. 18 Distribuce vlhkosti v délce bentonitového tělesa D9

Jak je vidět z porovnání hodnot vlhkostí ve vzorcích sycených pomocí drenážní vrstvy a ve vzorcích sycených simulovanou puklinou, sycení simulovanou puklinou probíhá dle očekávání výrazně pomaleji.

### 2.3 Stanovení retenční křivky

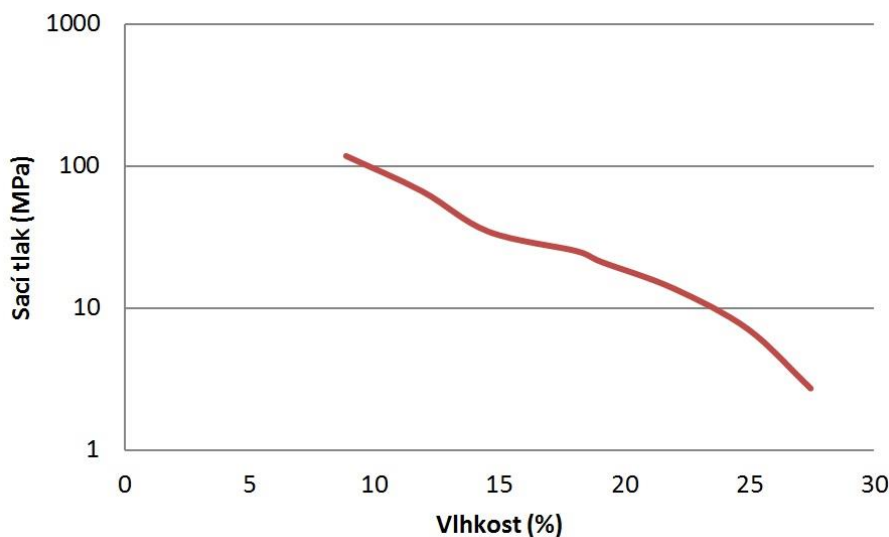
V rámci přípravy experimentů byla blokovou metodou stanovena retenční křivka bentonitu BaM o suché objemové hmotnosti  $1,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

Do připravených retenčních cel byly nalisovány vzorky bentonitu BaM o uvedené suché objemové hmotnosti a předem stanovených vlhkostech. Do těchto vzorků byly instalovány sondy relativní vlhkosti. Ilustrační fotografie experimentální sestavy je zobrazena na Obr. 19.



Obr. 19 Aparatura pro stanovení retenční křivky

Z naměřených hodnot relativních vlhkostí byly pomocí Kelvinovy rovnice vypočítány sací tlaky, retenční křivka byla poté vynesena jako závislost sacího tlaku na vlhkosti (Bartovská a Šišková, 2005). Stanovená retenční křivka je uvedena na Obr. 20.



Obr. 20 Retenční křivka bentonitu BaM při suché objemové hmotnosti  $1,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Z provedených experimentů a stanovení lze konstatovat, že dle očekávání probíhá saturace bentonitových těles déle v případě sycení prostřednictvím simulované pukliny než v případě použití drenážní vrstvy v kontaktu s celou válcovou plochou bentonitového tělesa. V případě simulované pukliny nebylo dosaženo rovnoměrné vlhkosti v celém objemu vzorku ani za 17 dní trvání experimentu a byla pozorována změna v distribuci vlhkosti symetricky v obou směrech od simulované pukliny. Naopak v případě experimentu s drenáží byla pozorována rychlá saturace bentonitu, kdy v okrajové části zkušebních těles byla stanovena vlhkost kolem 30 % již po 2 dnech trvání zkoušky a s postupujícím časem saturace se významně neměnila. Nárůst vlhkosti bentonitu však byl pozorován ve střední části bentonitových těles, kdy s dobou trvání zkoušky hodnoty postupně rostly (z přibližně 14 % na 27 % v čase 1 den až 4 dny). Při žádné z provedených zkoušek nebylo pozorováno významné bobtnání bentonitu do drenážní vrstvy.

## 3 Experimenty s ocelovými vzorky v drenážní cele

### 3.1 Příprava vzorků

#### 3.1.1 Vzorky uhlíkové oceli před experimentem

Použité vzorky oceli pro experimenty v drenážních celách byla mezikruží o výšce 14 mm vyrobená z trubky TRKR 21,3×4 mm, materiál uhlíková ocel 12022. Vnitřní průměr vzorků byl zbroušen na 14 mm, vnější na 20 mm s drsností povrchu 0,8. Čela vzorků byla zkosená směrem dovnitř pod úhlem 5°.

Před stanovením výchozí hmotnosti vzorků bylo provedeno jejich očištění a odmaštění v ultrazvukové lázni (Sonorex RK 106 Bandelin Electronic GmbH & Co. KG, Německo) po dobu 15 minut. Po ukončení stanovené doby byly vzorky z lázně vyjmuty a osušeny. Každý vzorek byl poté 3 krát zvážen na analytických vahách PRECISA 240A (Precisa Gravimetrics AG, Švýcarsko). Výsledné hmotnosti jednotlivých vzorků byly stanoveny aritmetickým průměrem. Po ukončení vážení byl každý vzorek uložen do obalu označeného číslem vzorku.

Chemické složení uhlíkové oceli dle normy ČSN 41 2022 je uvedeno v Tab. 4.

Tab. 4 Chemická složení vzorků uhlíkové oceli 12022

|           | <b>C</b><br>[%] | <b>Mn</b><br>[%] | <b>Si</b><br>[%] | <b>P</b><br>[%] | <b>S</b><br>[%] | <b>Cu</b><br>[%] | <b>Cr</b><br>[%] | <b>Ni</b><br>[%] | <b>Fe</b><br>[%] |
|-----------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Dle normy | 0,15-0,22       | 0,5-0,8          | 0,17-0,37        | 0,04            | 0,04            | 0,25             | 0,25             | 0,25             | do 100%          |

#### 3.1.2 Měření povrchu vzorků uhlíkové oceli optickým profilometrem

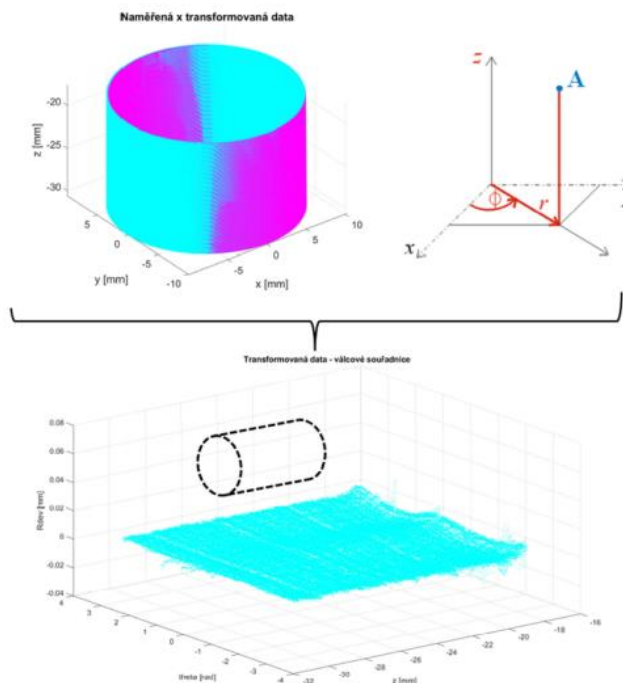
Geometrie vzorků uhlíkové oceli byla měřena pomocí optického profilometru RedLux před a po experimentu. Měření válcových vzorků se provádí jejími rotací kolem své osy a sonda se pohybuje podél vzorku přes měřenou vzdálenost. Souřadnice bodů na povrchu jsou zaznamenávány s určitou frekvencí. Při měření se využívá tzv. autofokus, což je vlastně zpětnou vazbou řídicí pohyb konfokálního snímače směrem k/od vzorku tak, aby měřený povrch zůstal v měřicím rozsahu snímače.

Dále bylo nutné stanovit frekvenci snímání bodů. Na válcové ploše bylo měřeno v obvodovém směru 1080 bodů na otáčku, a vzdálenost jednotlivých bodů byla přibližně 58  $\mu\text{m}$ . Frekvence v podélném směru byla stanovena tak, aby vzdálenost byla obdobná jako v předchozím případě. Tím se zajistilo homogenní pokrytí celé plochy vzorku. Výška vzorků je 14 mm, od každého okraje bylo vynecháno přibližně 0,5 mm. Na měřenou výšku 13 mm bylo tedy zvoleno 300 bodů, což odpovídá vzdálenosti mezi body 43  $\mu\text{m}$ . Z toho vyplývá, že pro zvolené frekvence snímání bylo naměřeno více jak 300 000 bodů pro každý vzorek.

Základní vyhodnocení bylo provedeno použitím skriptu v programu Matlab (MathWorks, Inc., Massachusetts, USA) a GOM Inspect (GOM GmbH, Germany). Všechna data byla transformována tak, aby osa z, byla osou naměřené plochy válců. Naměřená data celé válcové plochy byla proložena v softwaru zařízení RedLux, aby bylo možné získat transformační matici a poloměr válcové plochy. Další postup bylo převedení dat z kartézských souřadnic  $x, y, z$  do válcových souřadnic  $r, \theta, z$ , jak je vidět na Obr. 21. U

měřených vzorků byla souřadnice  $r$  nahrazena souřadnicí  $R_{dev}$  aby bylo možné hodnotit odchylky od ideálního válce.  $R_{dev}$  je definována jako rozdíl  $r$  a poloměru fitovaného válce.

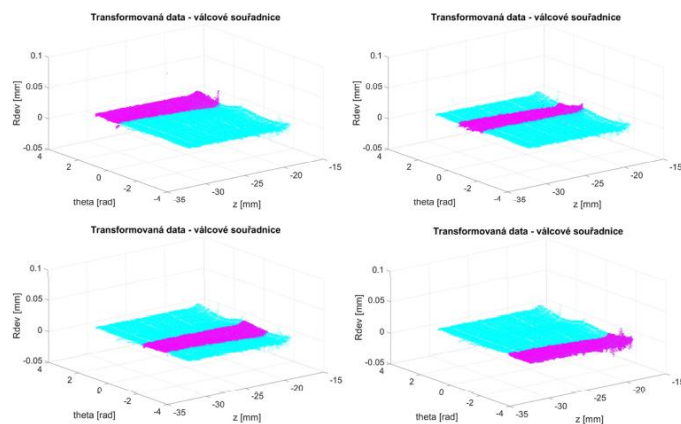
$$R_{dev} = r - R_{ref} \quad (1)$$



Obr. 21 Převod kartézských souřadnic vzorku do válcových souřadnic, příklad pro vzorek č. 2

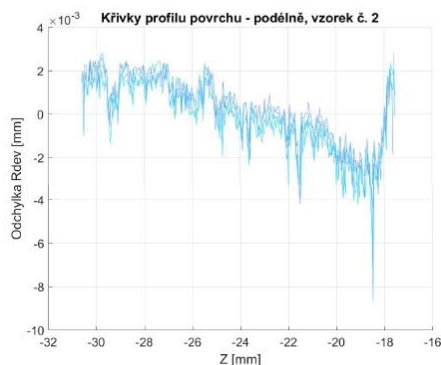
Souřadnice  $R_{dev}$  jsou odchylky od ideálního válce o poloměru  $R_{ref}$ .

Hodnocení geometrie vzorků v podélném směru (rovině  $theta$ - $z$ ) bylo provedeno následovně: z bodu ve válcových souřadnicích byly vybrány 4 soubory dat, které tvoří pásy podél vzorku o šířce  $90^\circ(\pi/2)$ , příklad je znázorněn v Obr. 22. V každém souboru, který byl vybrán, byly napříč průměrovány souřadnice  $z$  a  $R_{dev}$  daných bodu. Tímto způsobem je získaná 2D křivka profilu povrchu, která reprezentuje danou část povrchu. Každý vzorek má 4 podélné křivky profilu povrchu jak je vidět v Obr. 23.



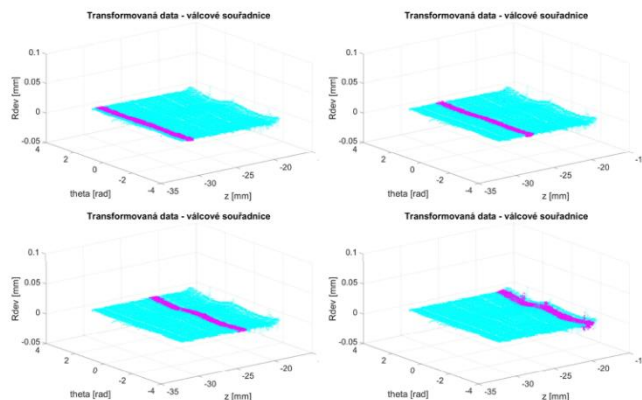
Obr. 22 Vybrané soubory dat pro podélný směr, příklad pro vzorek č. 2



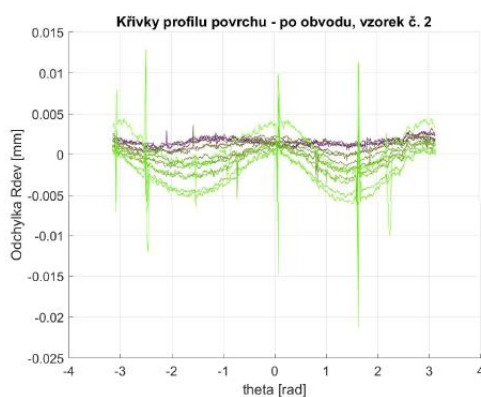


Obr. 23 Křivky profilu povrchu pro podélný směr, příklad pro vzorek č. 2

Hodnocení geometrie vzorků v obvodovém směru (rovině  $theta$ - $z$ ) se provádělo podobným způsobem. Z bodu válcových souřadnic bylo vybráno 13 souborů dat, které tvoří po obvodu vzorku v šířce 1 mm, příklad je vidět na Obr. 24. V každém vybraném souboru dat byl poté podél osy „ $z$ “ průměrovány souřadnice  $R_{dev}$  a  $theta$ . Pro každý vzorek je k dispozici 13 obvodových křivek profilu povrchu, jak je znázorněno v Obr. 25

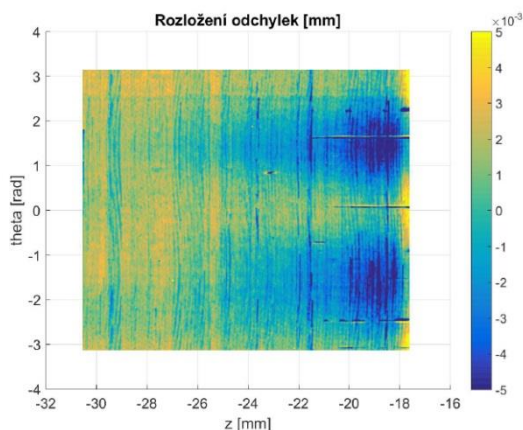


Obr. 24 Vybrané soubory dat po obvodu, příklad pro vzorek č. 2



Obr. 25 Křivky po obvodu, příklad pro vzorek č. 2

Ilustrační mapa rozložení odchylek  $R_{dev}$  přes celou plochu vzorku ve válcových souřadnicích je zobrazena v Obr. 26.



Obr. 26 Barevná mapa rozložení odchylek  $R_{dev}$ , příklad pro vzorek č. 2

Stanovení změny povrchu vzorků se provádělo porovnáním data válcových ploch po experimentu a válcových ploch získaných před experimentem. Odchytky získaných údajů  $R_{dev\_po}$  se vypočítaly jako rozdíl referenčního poloměru  $R_{ref}$  (před experimentem) a poloměru  $r_{po}$  každého měřeného bodu:

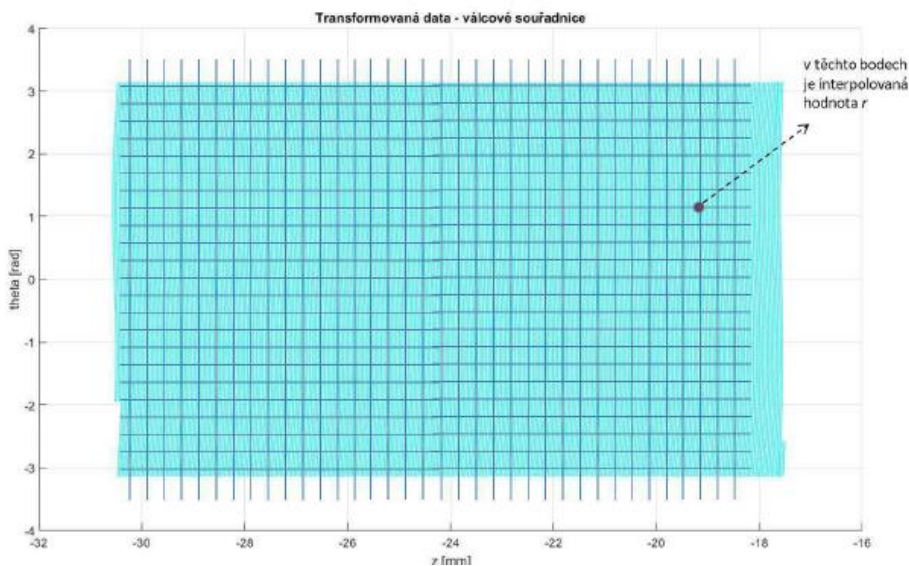
$$R_{dev\_po} = r_{po} - R_{ref} \quad (2)$$

Obdržené výsledky jsou částečně zkreslené tím, že vzorky už před experimentem vykazovaly eliptický tvar a mírnou kuželovitost. Z toho důvodu bylo rozhodnuto srovnat přímo měřené plochy před a po experimentu. Vzhledem k tomu, že nebylo z experimentálních důvodů možné na vzorcích vyrazit značky pro následnou přesnou shodu získaných dat před a po experimentu, značky byly vyraženy na vnitřním povrchu a shoda vzorků byla provedena podle nastavení vzorku operátorem.

Naměřená data povrchu vzorku před a po korozní zkoušce byla převedena do válcových souřadnic. Z důvodu zajištění stejné polohy a velikost překrytí obou povrchů byla data ve válcových souřadnicích (v rovině  $z$ - $theta$ ) překryta homogenní sítí bodů (se stejnými roztečemi v obou směrech jako naměřené body), viz Obr. 27. Hodnoty poloměru  $r$  byly na obou površích interpolovány. Hodnota poloměru  $r$  je skutečná hodnota poloměru válcové plochy v daném bodě. Tímto způsobem jsou získány dvě stejně velké matice bodů pro každý vzorek před a po korozní zkoušce. Odečtením hodnot poloměru  $r$  v těchto maticích jsou získány odchylky  $R_{dev\_po}$ , reprezentující úbytek materiálu pro každý bod:

$$R_{dev\_po} = r_{po} - R_{před} \quad (3)$$





Obr. 27 Překrytí naměřených dat homogenní sítí bodů – Ilustrativní schéma

Stanovení celkového objemového úbytku je důležité pro kvalitativní porovnání vzorků. Předem byl spočten objemový úbytek ( $U_p$ ) jako rozdíl objemu válců s rozdílným referenčním poloměrem, získaný před a po korozní zkoušce. Výška vzorků byla  $v = 13$  mm.

$$U_p = \pi v R_{ref}^2 - \pi v R_{ref\_po}^2 \quad (4)$$

Objemový úbytek ( $U_m$ ) byl dále spočten jako suma dílčích objemů, které jsou dané výslednou maticí. Každý bod v této matici má určitou hodnotu úbytku a reprezentuje určitou dílčí plochu resp. dílčí objem. Objemový úbytek  $U_m$  je spočten jako:

$$U_m = \sum_{i=1}^n U_{mi} \quad (5)$$

kde  $n$  je počet bodů v matici. V našem případě  $n = 1080 * 300 = 324\,000$ ). Takto získané objemové úbytky jsou dále porovnány s hodnotami  $U_v$ . Hodnoty objemových úbytků  $U_v$  byly získány přepočtem měřených hmotnostních úbytků. Pro hustotu materiálu byla použita hodnota hustoty uhlíkové oceli  $7850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

## 3.2 Instrumentace experimentu

Pro navržený experiment byla připravena instrumentace pro ohřev, regulaci a záznam průběhu teplot experimentů (Obr. 28). Bylo vyrobeno topidlo o průměru 6 mm a délce 200 mm s výkonem 200 W (Backer ELTOP s.r.o., Česká republika). Regulace vytápění byla zajištěna pomocí rozvaděče vytápění (MKsystem, Česká republika) se zabudovaným regulátorem teploty OMRON E5CSV (Omron, Japonsko) a odporovým čidlem teploty Pt100 (Sensit s.r.o., Česká republika). Každý modul je monitorován pomocí 2 teplotních čidel instalovaných do modulu a teploty jsou zaznamenávány čtyřkanálovým teploměrem S0141 (COMET SYSTEM s.r.o., Česká republika). Počet čidel byl minimalizován, aby nedošlo k ovlivnění experimentu vlivem monitorovacího systému.



a)

b)

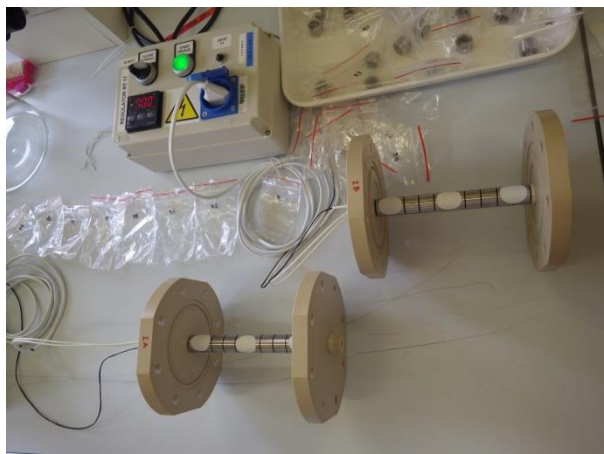
c)

*Obr. 28 instrumentace experimentu a) topné těleso, b) regulátor teploty, c) systém měření teploty*

### 3.2.1 Testování regulátorů teploty s topidly

Před sestavováním drenážních cel bylo přistoupeno ke změření povrchové teploty vzorků z uhlíkové oceli. Cílem testu bylo především postihnout nerovnoměrnosti v povrchových teplotách a jejich rozložení po délce sestavy.

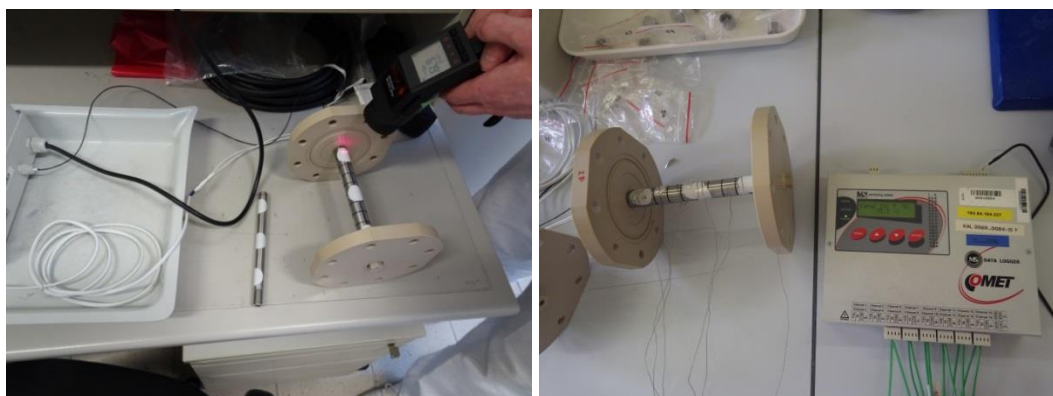
Do plastového čela drenážní aparatury byla našroubována středová trubka a na ni byly postupně navlečeny vzorky z uhlíkové oceli, které byly od sebe vždy odděleny FPM O-kroužky. Kroužky byly staženy k čelu pomocí plastové stahovací matice. Na vzorky byly poté nalepeny papírové terčičky o známé emisivitě 0,95. Do otvoru v trubce bylo vloženo topné těleso připojené k regulátoru teploty. Pro test bylo použito stejné těleso a stejný regulátor, které byly následně použity v drenážním experimentu (aparatura IA + regulátor RT2 + topné těleso 3; aparatura IB + regulátor RT17 + topné těleso 5). Řídicí teplotní čidlo regulátoru bylo zasunuto do otvoru v trubce. Testovací sestava je zobrazena na Obr. 29.



*Obr. 29 Sestava pro měření povrchové teploty vzorků z uhlíkové oceli*

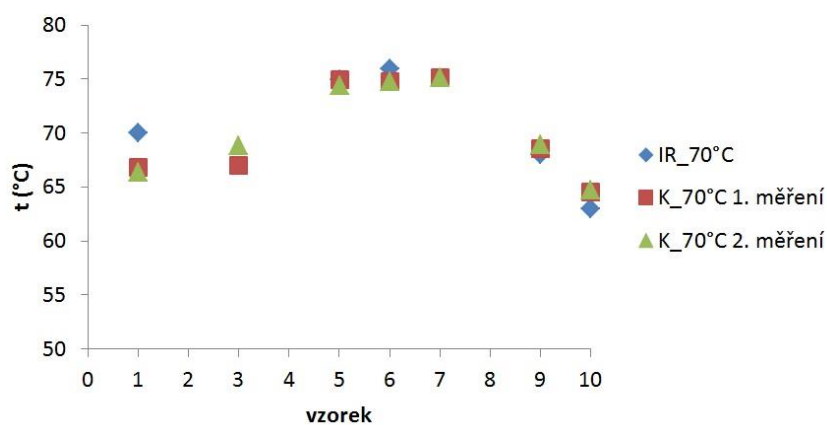
Na regulátoru teploty byla poté nastavena požadovaná teplota vytápění (70°C, 65 °C), regulátor byl zapnut a ponechán zapnutý až do dosažení dané teploty. Poté byl na regulátoru spuštěn autokalibrační program, který by měl optimalizovat vytápění, aby bylo co možná nejrovnoměrnější.

Po ukončení autokalibračního programu byla na terčičích změřena povrchová teplota pomocí infračerveného teploměru thermoMETER LS (Micro-Epsilon Messtechnik, Německo). Pro kontrolu byly teploty změřeny také pomocí kontaktních termočlánků typu K připojených na ústřednu Comet MS6D (COMET SYSTEM s.r.o., Česká republika), které byly přiloženy na měřené segmenty. Oba způsoby měření jsou zachyceny na Obr. 30.

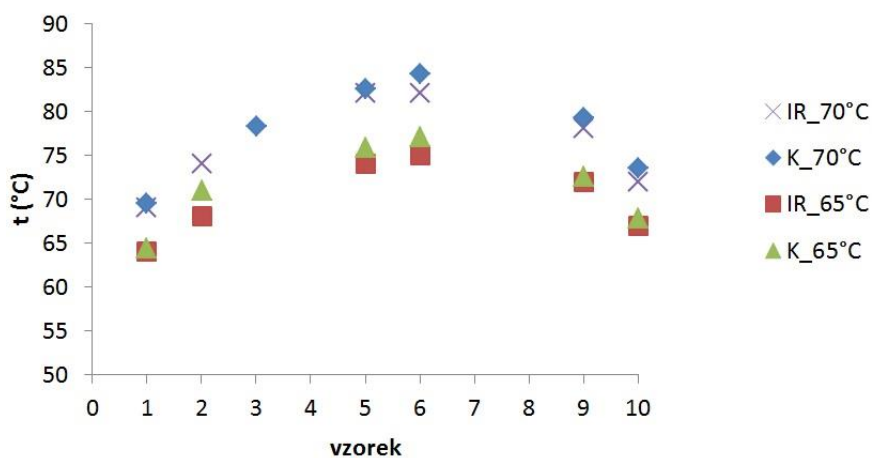


Obr. 30 Měření povrchové teploty vzorků z uhlíkové oceli (vlevo měření infračerveným teploměrem, vpravo termočlánkem typu K)

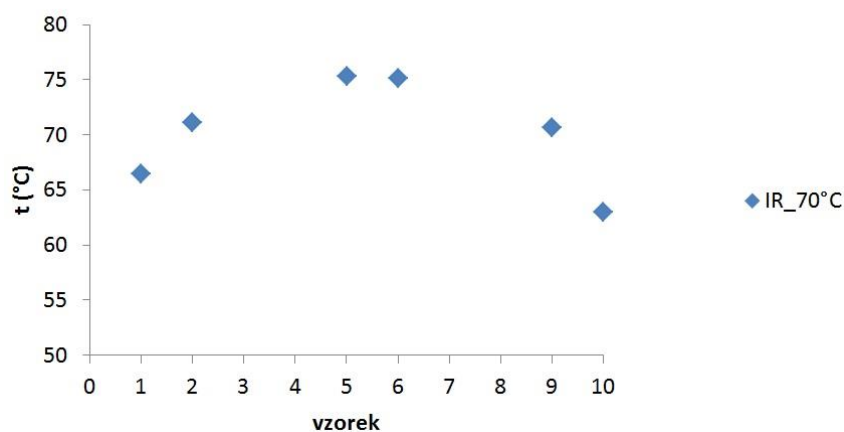
Výsledky měření povrchových teplot jsou shrnuty v následujících grafech (Obr. 31, Obr. 32, Obr. 33, Obr. 34).



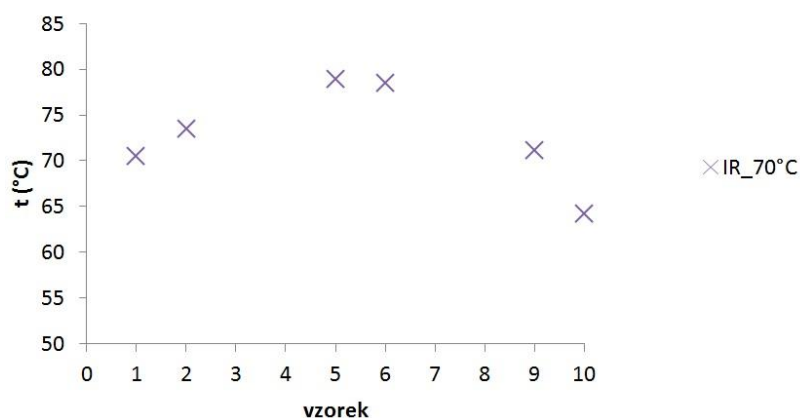
Obr. 31 Průběh povrchových teplot v cele IA při vytápění na 70 °C



Obr. 32 Průběh povrchových teplot v cele IB při vytápění na 65 °C / 70 °C



Obr. 33 Průběh povrchových teplot v cele IIA při vytápění na 70 °C



Obr. 34 Průběh povrchových teplot v cele IIB při vytápění na 70 °C

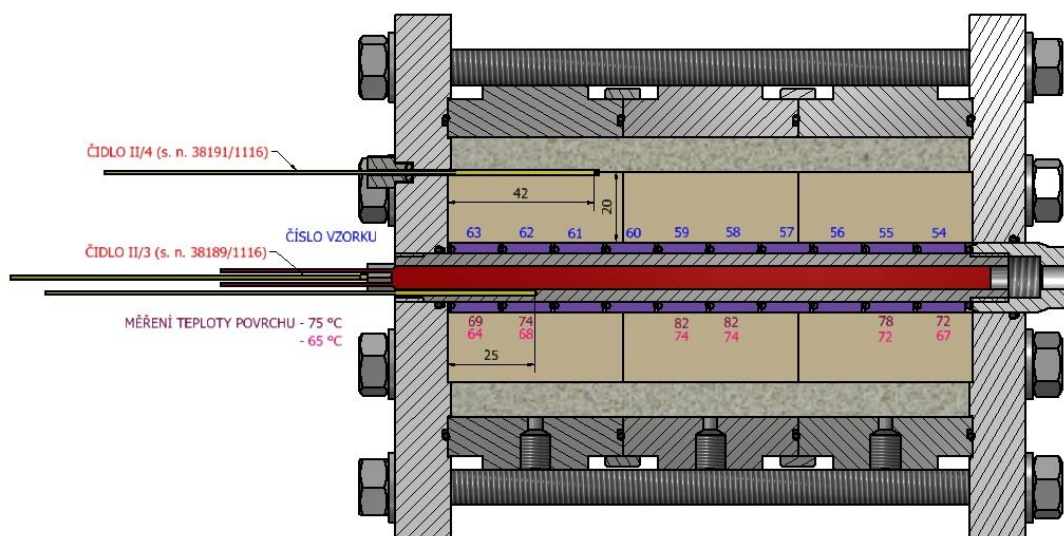
Z grafů je patrné, že povrchová teplota vzorků není po délce aparatury konstantní, ale směrem od středu ke krajům se snižuje. Rozdíly v absolutních hodnotách jednotlivých cel jsou dány především hloubkou a teplotou umístěného regulačního čidla. Tuto skutečnost je třeba zohlednit při vyhodnocení experimentu.

### 3.3 Drenážní aparatury

Drenážní aparatury byly provedeny ve dvou variantách – ve variantě s drenážní vrstvou a ve variantě se simulovanou puklinou. Obě varianty jsou zobrazeny na Obr. 35 a Obr. 36.

**SVISLÝ ŘEZ APARATUROU (VARIANTA S DRENÁŽNÍ VRSTVOU) IB**

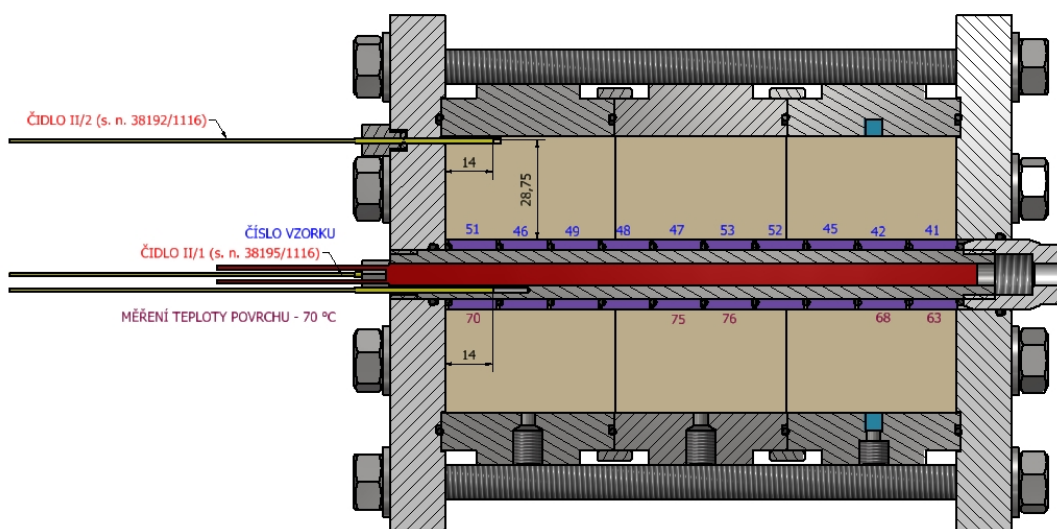
- REGULÁTOR RT 17
- TOPIDLO 5



Obr. 35 Svislý řez drenážní aparaturou – varianta s drenáží

**SVISLÝ ŘEZ APARATUROU (VARIANTA BEZ DRENÁŽNÍ VRSTVY) IA**

- REGULÁTOR RT2
- TOPIDLO 3



Obr. 36 Svislý řez drenážní aparaturou – varianta se simulovanou puklinou

Do drážky po obvodu středového otvoru plastového víka byl vložen O-kroužek a do otvoru byla našroubována trubka z korozivzdorné oceli. Na trubku byly postupně střídavě nasazovány FPM O-kroužky a vzorky z uhlíkové oceli. V případě varianty se simulovanou puklinou byla následně na středovou trubku se vzorky nasazena nerezová okruží s nalisovaným bentonitem, do kterého byl předem vyvrtán otvor o průměru shodném s vnějším průměrem vzorků z uhlíkové oceli. Nerezová okruží byla mezi sebou a mezi víky

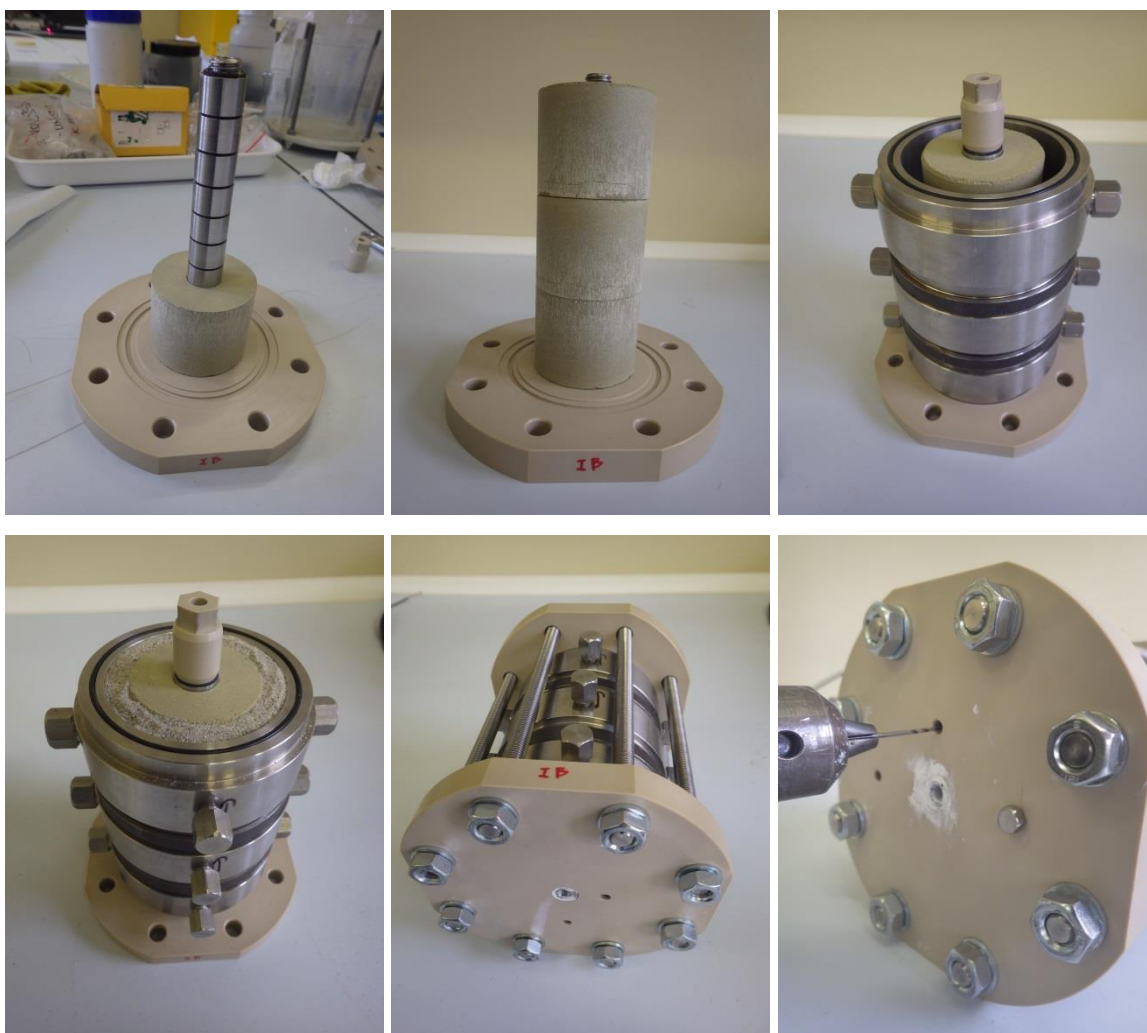


utěsněna O-kroužky. Jako poslední bylo nasazeno okruží s vnitřní drážkou po obvodu, do které bylo před nalisováním bentonitu vloženo rozváděcí pórovité mezikružší ze slinutého PE.

V případě varianty s drenážní vrstvou byla na středovou trubku se vzorky nasazena bentonitová tělesa a následně byla do drážky ve víku nasazena nerezová okruží s otvory utěsněnými záslepkami. Okruží byla mezi sebou a mezi víky utěsněna O-kroužky. Mezera mezi vnějším povrchem bentonitových těles a vnitřním povrchem nerezových okruží byla vyplněna drenážní vrstvou z křemičitého písku se zrna o frakci < 1 mm.

V obou případech byla poté aparatura zakryta druhým plastovým víkem s vloženými O-kroužky a víka byla mezi sebou stažena svorníky s maticemi, takže došlo k utěsnění pláště aparatury. Posledním krokem bylo utěsnění kovových vzorků mezi sebou a zároveň dotěsnění celé aparatury pomocí plastové stahovací matice našroubované na středovou trubku. Skrz otvory ve víkách byly poté do bentonitu vyvrtány otvory pro osazení teplotních čidel.

Sestavování drenážních cel je zobrazeno na následujících fotografiích na Obr. 37.



Obr. 37 Jednotlivé kroky při sestavování experimentální aparatury s drenáží

### 3.4 Příprava korozní zkoušky

Sestavené drenážní cely byly umístěny do rukavicového boxu MB 200B (MBRAUN GmbH, Německo) k odkysličení (viz Obr. 38). Pro rychlejší průběh byly z ocelových okruží

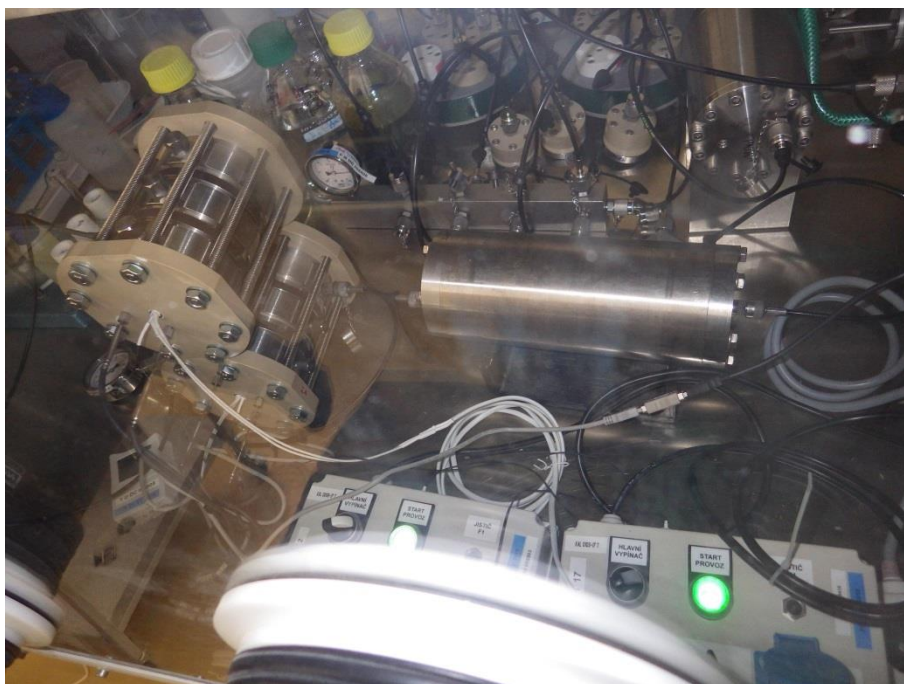
odšroubovány záslepky. K odkysličení byl do boxu umístěn také tlakový výměník plyn – voda. Aparatury i tlakový výměník byly v boxu ponechány po dobu tří týdnů.



*Obr. 38 Odkysličování drenážních cel v rukavicovém boxu*

Po uplynutí zvolené doby byly do okruží cel našroubovány průchodky k sycení vodou. Ostatní otvory byly opět zaslepeny, jeden otvor na horní straně aparatury IB byl ponechán otevřený kvůli kontrole nasycení drenážní vrstvy. Poté byla do vyvrtaných otvorů instalována teplotní čidla pokrytá teplovodivou pastou. Čidla byla připojena ke čtyřkanálovému teploměru S0141 (COMET SYSTEM s.r.o., Česká republika) a utěsněna pomocí průchodek a O-kroužků. Do středového otvoru aparatury bylo vsazeno topné těleso pokrytá teplovodivou pastou. Nakonec bylo do otvoru v trubce umístěno řídicí teplotní čidlo regulátoru teploty.

K průchodkám pro sycení aparatury vodou byly připojeny hadičky vedoucí k rozváděcí kostce osazené indikačním manometrem 03304-CH 11GB (Prematlak a.s., Slovensko). Kostka byla dále připojena k tlakovému výměníku a ten byl pomocí průchodky ve stěně rukavicového boxu spojen s argonovou tlakovou lahví. Aplikovaný tlak argonu byl postupně zvyšován na hodnotu 2 MPa. Celkový pohled na drenážní aparatury je na Obr. 39.



Obr. 39 Celkový pohled na drenážní aparatury v rukavicovém boxu

Regulátory teploty a teplota vytápění byla nastavena na 70 °C. Zároveň bylo zahájeno zaznamenávání teplot teploměrem s intervalem 5 minut. Po zahájení experimentu byl průběžně kontrolován tlak v systému a funkčnost regulátorů teploty a teploměru.

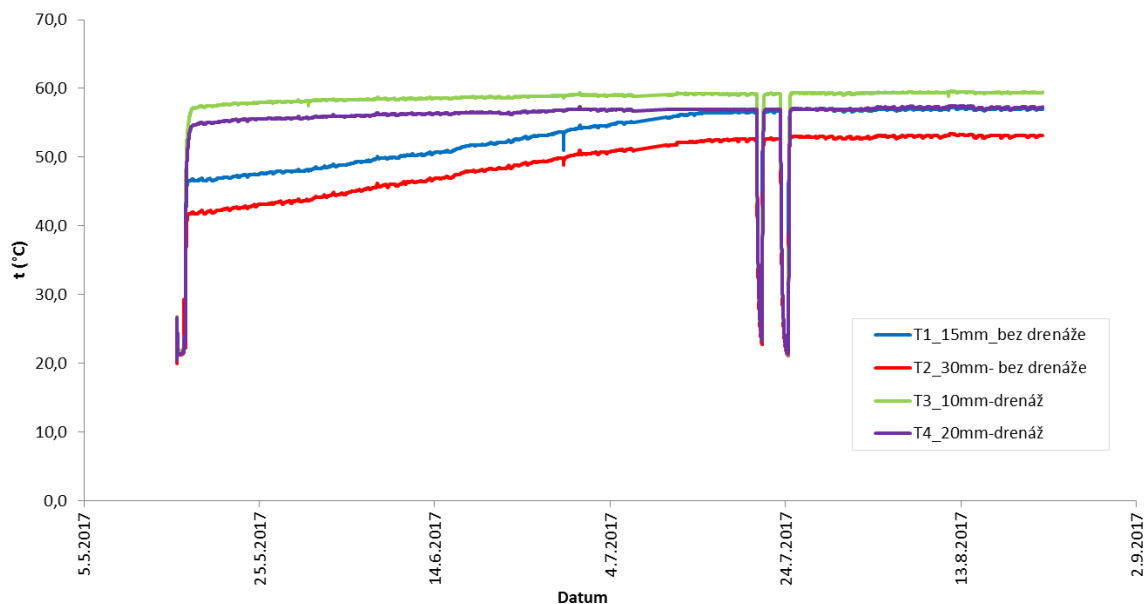
## 4 Výsledky

### 4.1 Měření teplot

Po sestavení a umístění experimentu do anaerobního boxu byla zaznamenávána data z instalovaných měřících teplotních čidel. U každého modulu byla instalována 2 měřící čidla se záznamem dat. Umístění jednotlivých měřících teplotních čidel zobrazeno na Obr. 35 a Obr. 36.

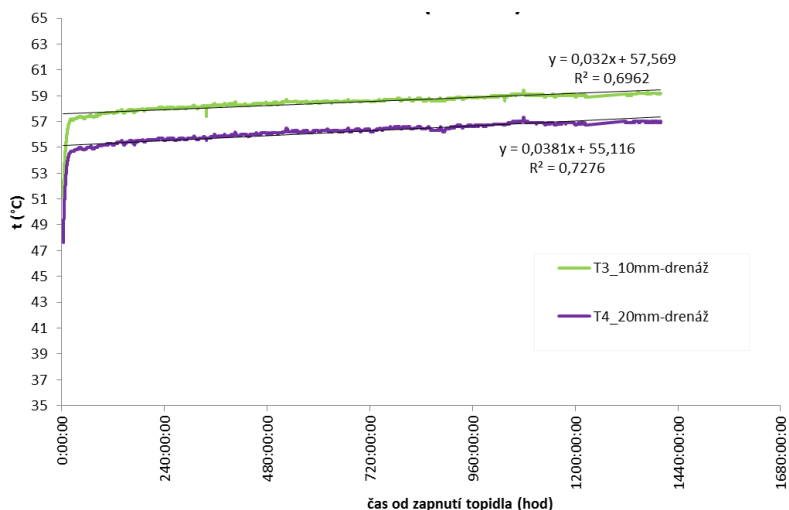
Měření teplot bylo zahájeno jeden den před zahájením sycení a zapnutí topného tělesa, pro otestování měřícího systému a záznamu pozadových hodnot průběhů teploty. Dne 16. 5. 2017 byl následně zapnutý ohřev modulů (IA, IB) na 70 °C a zahájena saturace odkysličenou vodou pod tlakem 2 MPa. Průběhy teplot od zahájení experimentu jsou zobrazeny na Obr. 40.





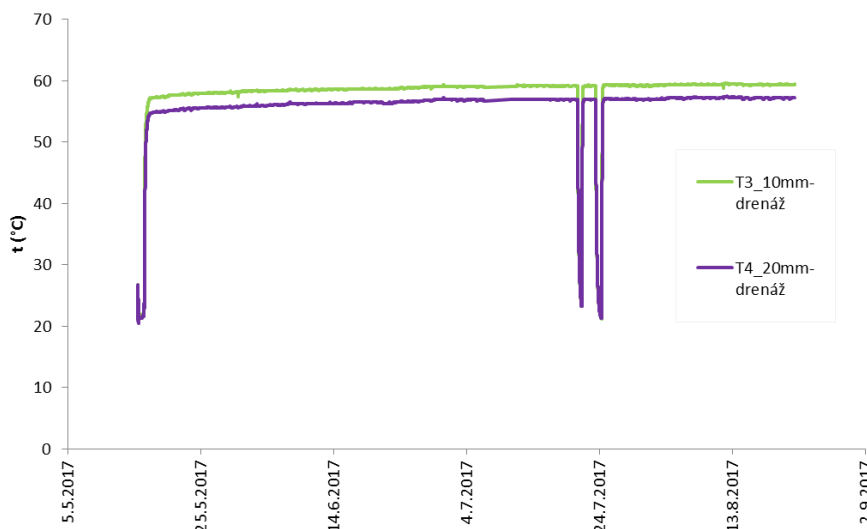
Obr. 40 Průběhy teplot v modulech IA (bez drenáže – „puklina“; T1, T2) a IB (s drenáží; T3, T4) v průběhu celého experimentu.

Po zapnutí topidla byl pozorován velice rychlý nárůst teploty v obou experimentálních aparaturách. U aparatury s drenážní vrstvou (IB) však došlo k rychlému dosažení vyšších hodnot, kdy již během 24 hodin byly naměřené teploty ve středu segmentu (1 cm od topidla) kolem 57 °C. Na kontaktu bentonitových segmentů s drenážní vrstvou se pak teploty pohybovaly kolem 55 °C (Obr. 39).



Obr. 41 Průběhy záznamu teplot v modulu IB (s drenáží). Detailní zobrazení nárůstu teploty

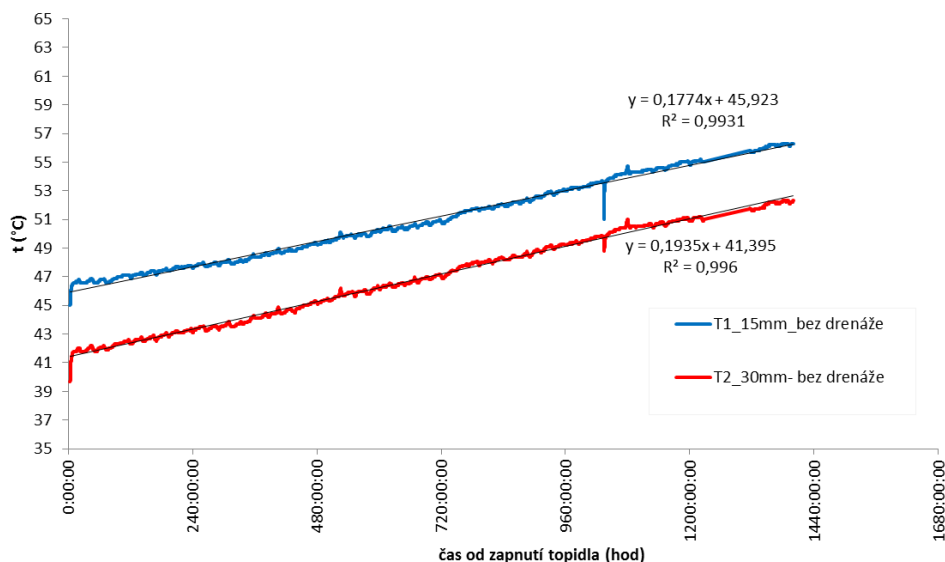
Následný růst teplot byl již velmi pozvolný a hodnoty teploty se na konci experimentu (po 98 dnech) pohybovaly kolem 59 °C (1 cm od topidla) a 57 °C u rozhraní bentonit/drenážní vrstva. Výrazné poklesy teploty pozorované ve dnech 21. 7. a 24. 7. byly způsobeny výpadky elektrického proudu a přerušením elektrického ohřevu. Po opětovném zapnutí ohřevu bylo dosaženo velmi rychle původních teplot (Obr. 42).



Obr. 42 Průběhy záznamu teplot v modulu IB (s drenáží) v průběhu celého experimentu.

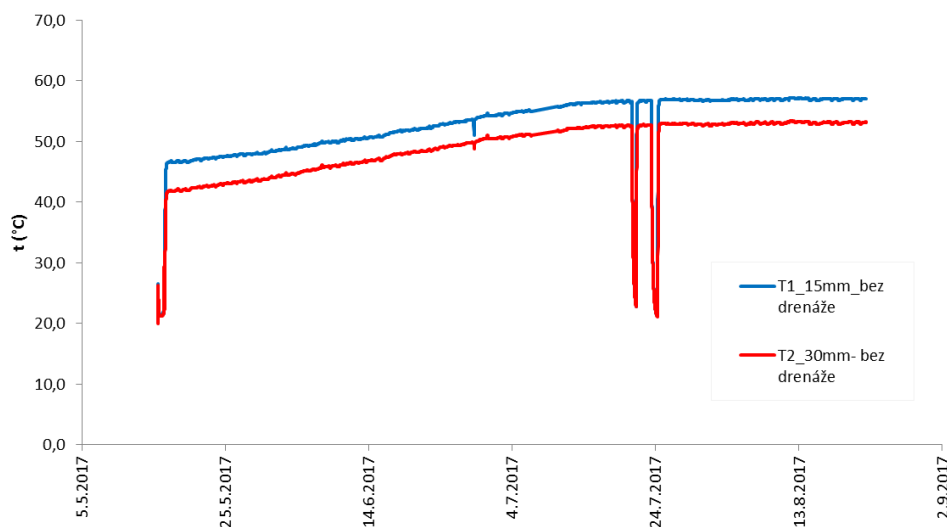
U modulu IA (bez drenážní vrstvy) byl oproti vzorku IB nárůst teploty výrazně pomalejší. Po počátečním rychlém nárůstu od zapnutí topidla se teplota ve středu (1,5 cm od topidla) bentonitového tělesa pohybovala kolem 46 °C a 41 °C na kontaktu bentonit/cela.

Na Obr. 43 je možné pozorovat pozvolný nárůst teploty během 58 dní s většími rozdíly teplot mezi středem a okrajem segmentu v porovnání se záznamem v modulu IB. Tento trend odpovídá nižší saturaci bentonitu modulu IA jak u okraje, tak blíže k topidlu.



Obr. 43 Průběhy záznamu teplot v modulu IA (bez drenáže). Detailní zobrazení nárůstu teploty

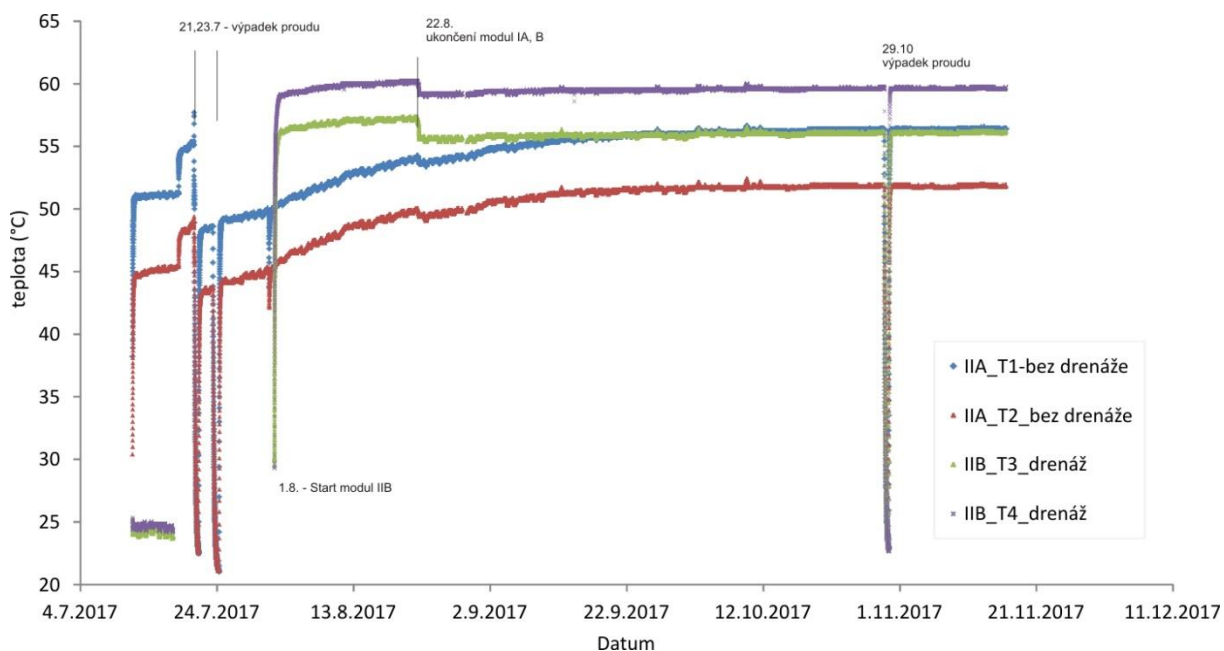
Ustálených teplot v modulu IA bylo dosaženo po více jak 58 dnech od zahájení experimentu. Teploty se na konci experimentu (po 98 dnech) pohybovaly kolem 57,1 °C (1,5 cm od topidla) a 53,1 °C u rozhraní bentonit/cela (3 cm od topidla) (viz Obr. 44).



Obr. 44 Průběhy záznamu teplot v modulu IA (bez drenáže) v průběhu celého experimentu.

Dne 16. 6. 2017 byl do anaerobního boxu umístěn a instalován modul IIA (bez drenáže, se simulovanou puklinou). Bohužel vzhledem k technickým problémům aparatury IIB, zjištěným při kompletaci, musela být aparatura opravena a tak došlo k posunu zahájení experimentu modulu IIB na 18. 7., kdy byl modul umístěn do anaerobního boxu.

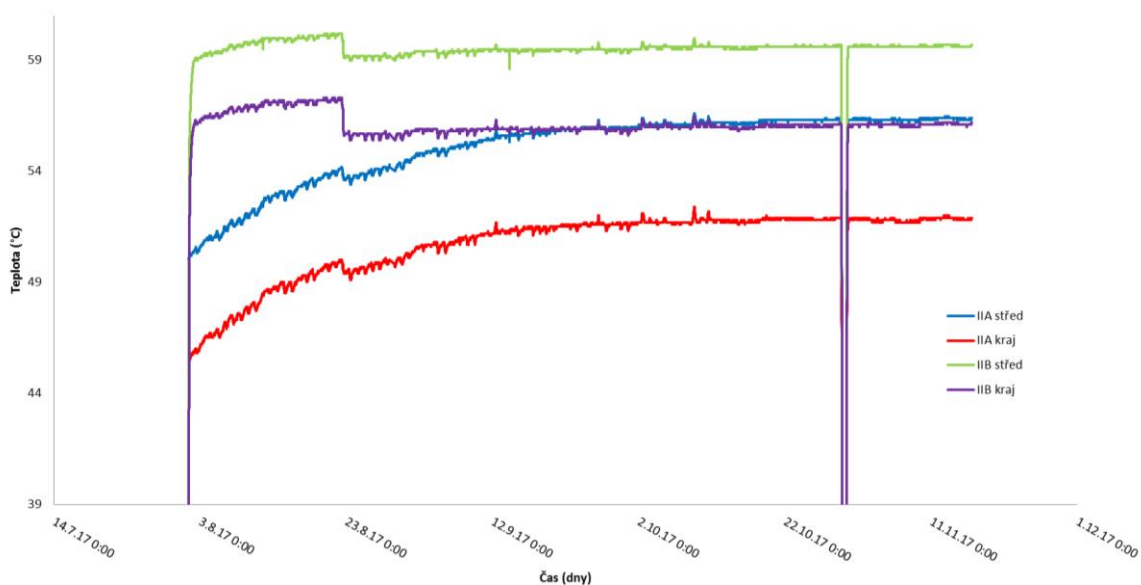
Po odstranění kyslíku z modulu v anaerobním boxu, bylo dne 11. 7. zahájeno sycení a ohřev experimentu IIA (bez drenáže).



Obr. 45 Průběhy záznamu teplot v modulu IIA (bez drenáže) a IIB (drenáž) v průběhu celého experimentu.

Po zahájení ohřevu modulu IIA (bez drenáže) byl jako v předešlých modulech pozorován rychlý nárůst teploty u středu segmentu na hodnoty kolem 51 °C na kontaktu bentonit/cela kolem 44 °C. Po 17. 7. je možné pozorovat nárůst teploty cca o 3 °C vyšší, což bylo

způsobeno umístěním modulu IIA na modul IA (vzhledem k omezenému prostoru v anaerobním boxu). Ve dnech 21. 7., 23. 7. a 29. 10. došlo k výpadkům elektrické energie a tím k přerušení vyhřívání modulů, které se projevilo na rychlém poklesu teplot v bentonitu. Po opětovném zapnutí byl pozorován rychlý nárůst teploty. Oproti modelu s drenáží (IIB) je nárůst teploty pomalejší a k ustálení teplot dochází kolem 65 dnů. Ustálené teploty modulu IIA se pohybují kolem 56,1 °C (střed segmentu) a 51,8 °C (okraj segmentu) (Obr. 45).



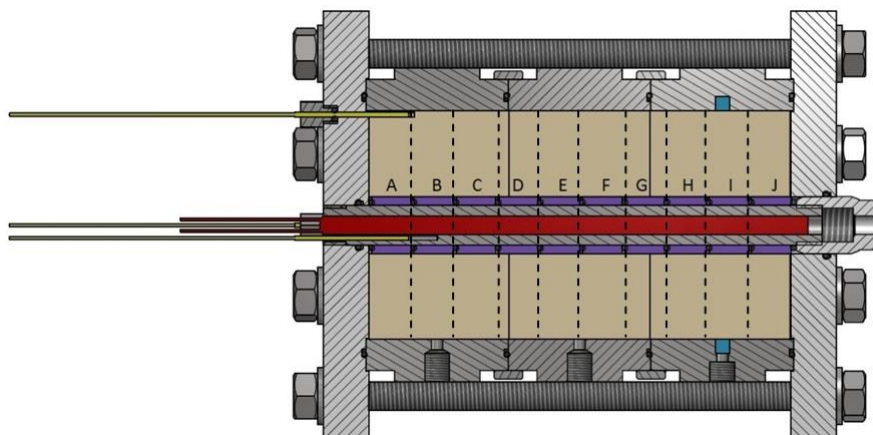
Obr. 46 Průběhy záznamu teplot v modulu IIA (bez drenáže) a IIB (drenáž) od zapnutí modulu IIB (1. 8. 2017 – 16. 11. 2017)

Dne 1. 8. 2017 byl zahájen ohřev a sycení experimentu IIB (s drenáží). Stejně jako u modelů IA, IB je možné pozorovat rychlejší nárůst a ustálení teploty u modu s drenáží (IIB) oproti modulu bez drenáže (IA). Pokles teploty cca o 1 °C byl zaznamenán 22. 8. po vyjmutí modulů IA, IB. Ustálené teploty se pohybují kolem 59,6 °C (střed segmentu) a 56,1 °C (okraj segmentu) (Obr. 46).

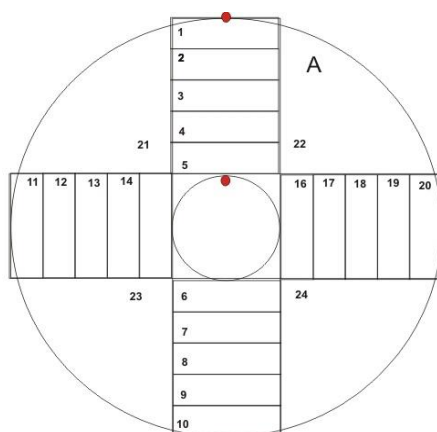
## 4.2 Stanovení vlhkosti bentonitu po experimentu

### 4.2.1 Postup stanovování průběhu vlhkosti v drenážní cele

Jedním z cílů experimentu bylo zjistit, jaká bude prostorová distribuce vlhkosti v obou experimentálních aparaturách v závislosti na způsobu jejich sycení. Aby bylo možno tuto distribuci postihnout, byly obě aparatury postupně odpojeny od zdroje tlakové vody a zdroje tepla a následně demontovány. Z cel byla za pomoci vytlačovacího přípravku postupně vytlačována bentonitová tělesa, ze kterých byly oddělovány jednotlivé segmenty A až J (viz Obr. 47), které poté byly rozřezány na jednotlivé vrstvy (povrchová vrstva, středová vrstva, středo-hluboká vrstva, hluboká vrstva, kontakt) a vzorky 1-24, resp. 1-20, podle následujících schémat (Obr. 48, Obr. 49). Tímto způsobem bylo možno postihnout změny vlhkosti jak po délce cely, tak po její šířce.

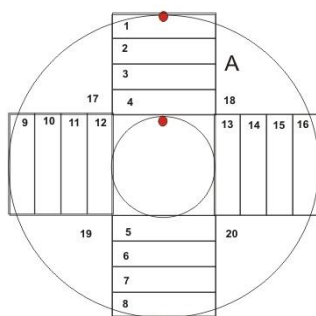


Obr. 47 Ilustrační schéma rozřezávání bentonitových těles po délce na segmenty



Rozměry - bez drenáže  
 průměr 80 mm  
 topidlo 20 mm  
 prstenec 30 mm  
 - segmenty 10 x 14mm (A - J)  
 - celkem 10 \* 20 = 200 vzorků  
 segment 6 mm  
 + výseče 4 \* 10 = 40  
 celkem 240 vzorků

Obr. 48 Schéma rozřezávání válečků z aparatury bez drenáže



Rozměry - s drenáží  
 průměr 60 mm  
 topidlo 20 mm  
 prstenec 20 mm  
 - segmenty 10 x 14mm (A - J)  
 - celkem 10 \* 16 = 160 vzorků (segment 5 mm)  
 - výšeče 4 \* 10 = 40 vz  
 celkem 200 vzorků

*Obr. 49 Schéma rozřezávání válečků z aparatury s drenáží*

V případě aparatury s drenážní vrstvou byl z cely vytlačen celý kompaktní bentonitový blok; ten byl okamžitě zabalen do pryžového válce, aby nedošlo k ovlivnění vlhkosti povrchové vrstvy osycháním na vzduchu. Ze stejného důvodu byla, stejně jako v případě aparatury bez drenážní vrstvy, po každém oddělení segmentu plocha řezu zakryta PE fólií.

Postup řezání bentonitových vzorků je patrný z následujících fotografií (Obr. 50).







*Obr. 50 Postup odběru a dělení bentonitových vzorků*

Jednotlivé reprezentativní vzorky byly poté vloženy do předem připravených a zvážených očíslovaných hliníkových nádobek (viz Obr. 51) a byly okamžitě zváženy na analytických vahách AND GH-252 (A&D Instruments Ltd., GB).



*Obr. 51 Vzorkování bentonitu*

Zároveň s přípravou bentonitových vzorků byly z aparatur vyjímány jednotlivé ocelové vzorky nasazené na středových trubkách (viz Obr. 52).



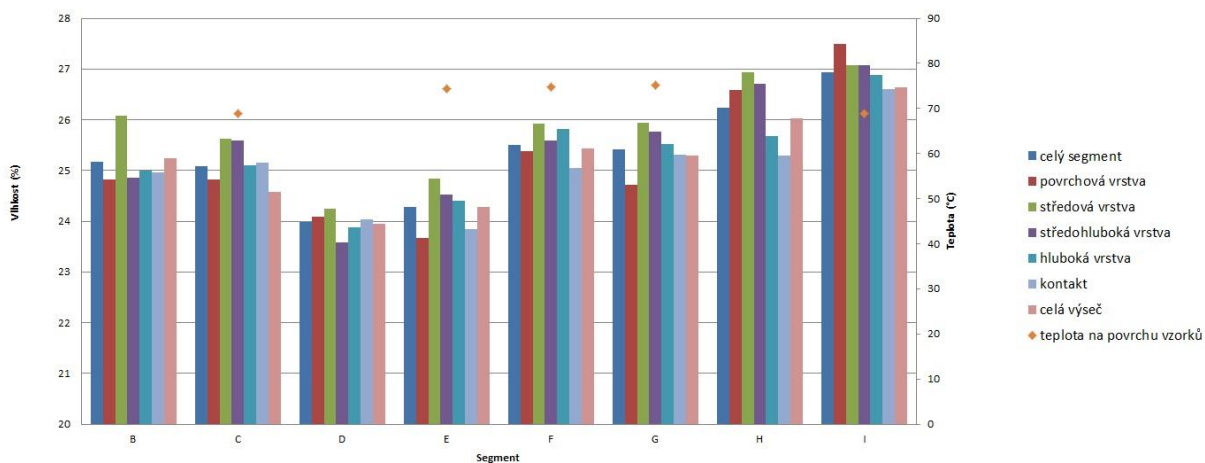
*Obr. 52 Vzorek z uhlíkové oceli vyjmutý z bentonitového mezikruží*

Pro každý bentonitový vzorek byla stanovena jeho vlhkost dle ČSN EN ISO 17892-1. Z těchto vlhkostí byly vypočítány průměrné vlhkosti jednotlivých vrstev a celých segmentů A až J.

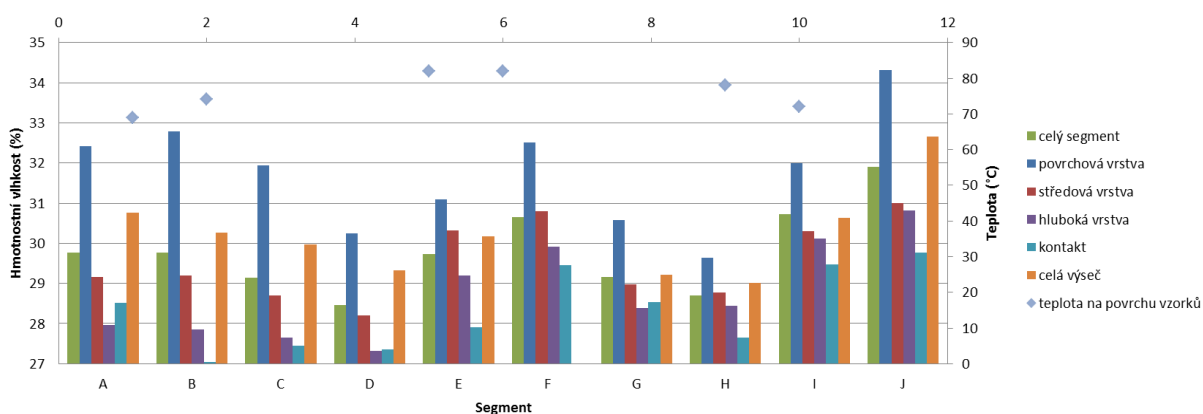


Obr. 53 Bentonitové segmenty v exsikátoru, ilustrační foto

Výsledné grafy průběhů vlhkosti v bentonitu po šířce a délce obou drenážních cel jsou zobrazeny na Obr. 54, a Obr. 55.



Obr. 54 Graf průběhu vlhkosti v cele IA (bez drenážní vrstvy)



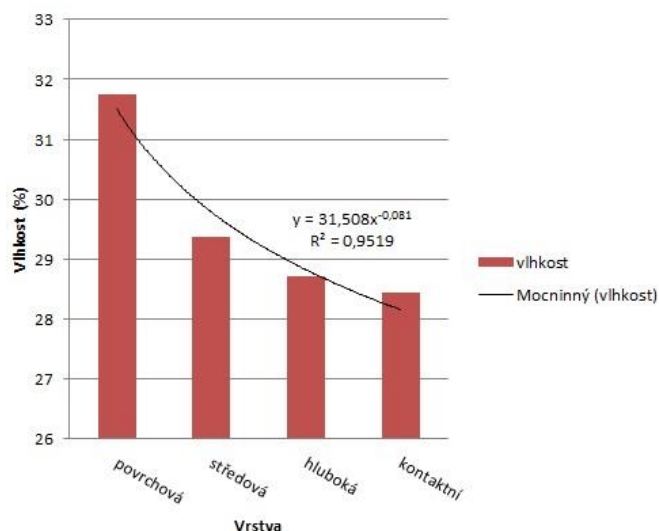
Obr. 55 Graf průběhu vlhkosti v cele IB (s drenážní vrstvou)

V případě aparatury bez drenážní vrstvy (IA) je patrný pokles vlhkosti směrem od segmentu I, který přímo přiléhá k simulované puklině, kterou probíhalo sycení. Není jasné, proč došlo ke zvýšení hodnot vlhkosti v segmentech B a C, je možné, že mohlo být částečně způsobeno náhodnými chybami měření. Zajímavé je to, že kromě segmentu I byla ve všech ostatních segmentech zjištěna vlhkost povrchové vrstvy nižší než vlhkost vrstev blíže středu.



To by znamenalo, že voda do bentonitu prostupovala spíše středem bentonitových těles, než po rozhraní bentonit-ocelové okruží.

V případě aparatury s drenážní vrstvou (IB) je patrné, že hodnoty průměrné vlhkosti celých segmentů, které by teoreticky měly být po délce cely konstantní, mírně fluktuují. S největší pravděpodobností je to způsobeno nerovnoměrností vytápění po délce cely, které je dáno konstrukcí topných těles a není ho tudíž možné eliminovat. Radiální průběh vlhkosti v cele IB (viz Obr. 56) nicméně ukazuje, že sycení směrem od drenážní vrstvy ke středu aparatury probíhalo rovnoměrně.

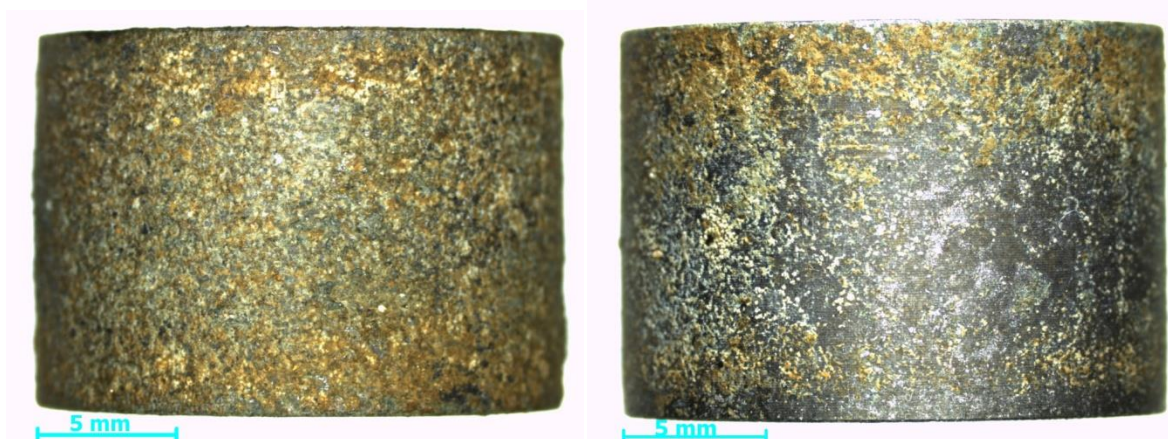


Obr. 56 Průběh průměrné vlhkosti po hloubce cely IB (průměrná vlhkost jednotlivých vrstev všech segmentů)

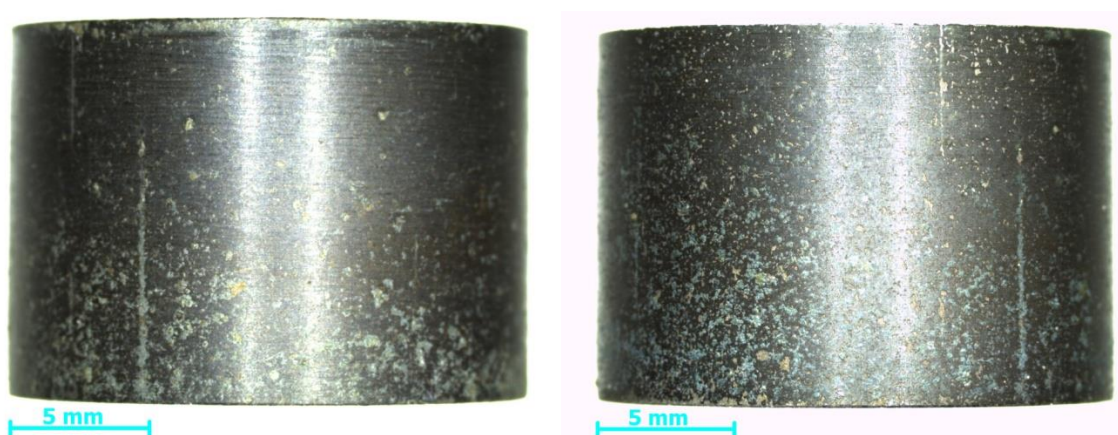
Porovnáme-li průměrné hodnoty distribuce vlhkosti v jednotlivých modulech ve střední a okrajové části, můžeme pozorovat, že u vzorků s drenáží (modul IB) se hodnoty vlhkosti na kontaktu s drenážní vrstvou pohybují kolem 32 %.

### 4.3 Uhlíková ocel – vyhodnocení

Vzorky uhlíkové oceli byly po ukončení experimentu v celách IA a IB vyfotografovány mikroskopem Leica S6 D (Leica Microsystems, Švýcarsko) (viz příklad na Obr. 57 a Obr. 58) a poté byly umístěny v ultrazvukové lázni Sonorex RK 106 (Bandelin Electronic GmbH & Co. KG, Německo) kvůli očištění a odstranění zbytků bentonitu. Po očištění byly vzorky vyjmuty, osušeny a znovu vyfotografovány.



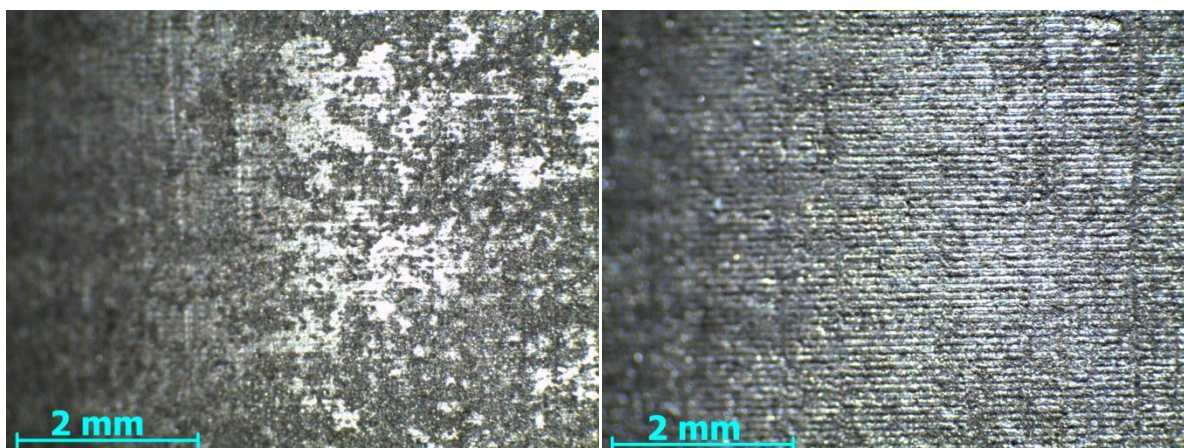
Obr. 57 Vzorek č. 53 (cela IA) před a po čišťení ultrazvukem



Obr. 58 Vzorek č. 63 (cela IB) před a po čišťení ultrazvukem

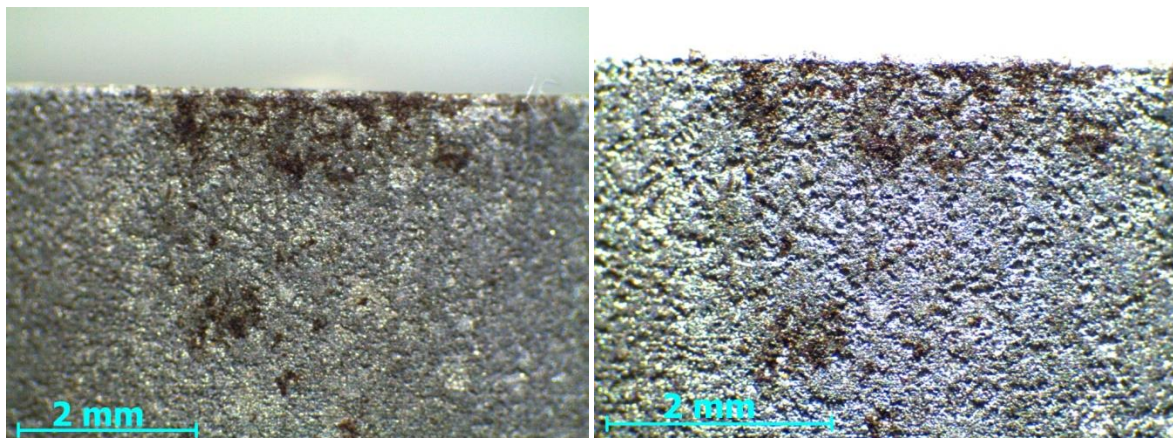
Korozní rychlost ocelových vzorků byla stanovena přes hmotnostní úbytky dle normy ČSN ISO 8407. Pro tento účel se použil roztok kyseliny chlorovodíkové s hexamethylen-tetraminem.

Po ukončení odmoření byl každý vzorek opět vyfotografován (viz příklad na Obr. 59 a Obr. 60).



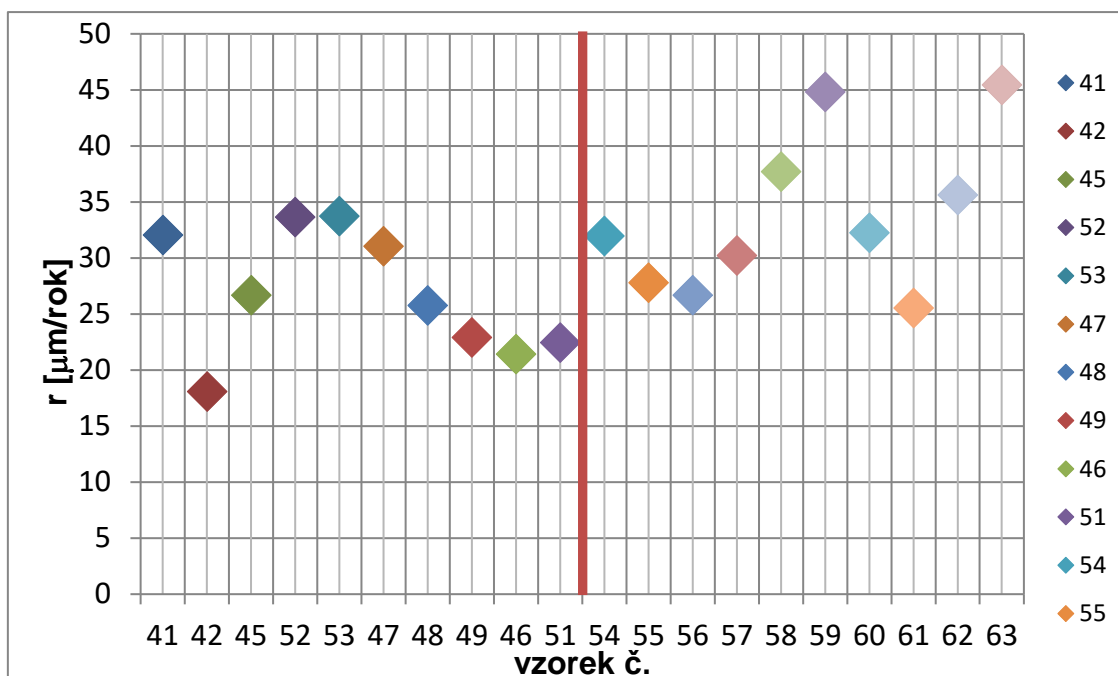
Obr. 59 Povrch vzorku č. 53 (cela IA bez drenáže) po odstranění korozních produktů





Obr. 60 Povrch vzorku č. 63 (cela IB s drenáží) po odstranění korozních produktů

Výsledky korozních rychlostí a pozic všech kroužků jsou znázorněny na Obr. 61.



Obr. 61 Průběh korozní rychlostí ocelových vzorků. Levá část – korozní cela se simulovanou puklinou (puklina je nad vzorkem č. 42). Pravá část – korozní cela s drenážní vrstvou

V Tab. 5 jsou uvedeny stanovené korozní rychlosti jednotlivých vzorků. U cely se simulovanou puklinou klesá korozní rychlost s narůstající vzdáleností od pukliny, což bylo očekávatelné. Výjimku tvoří vzorky č. 42 a 45, které mají nižší korozní rychlosti, ačkoliv jsou v oblasti pukliny. Proč jsou stanovené korozní rychlosti pro tyto dva vzorky nižší, není v současné době zřejmé. Pro další závěry ke stanoveným hodnotám korozních rychlostí bude potřeba srovnání s půlročním experimentem.

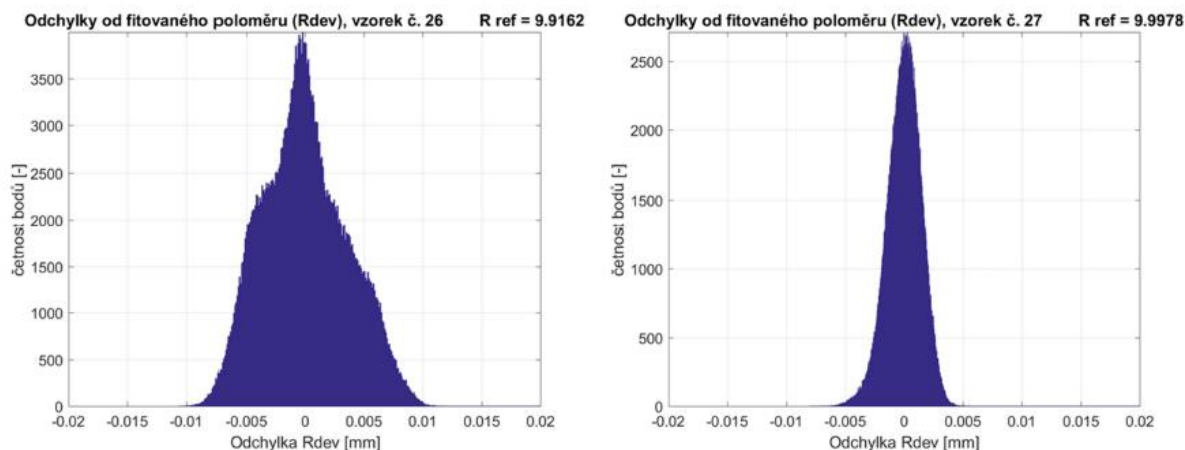
Tab. 5 Korozní rychlosti jednotlivých vzorků

| Číslo vzorku | r [μm rok <sup>-1</sup> ] |
|--------------|---------------------------|
| 41           | 32,05                     |
| 42           | 18,09                     |
| 45           | 26,68                     |
| 52           | 33,66                     |
| 53           | 33,75                     |

|    |       |
|----|-------|
| 47 | 31,07 |
| 48 | 25,76 |
| 49 | 22,92 |
| 46 | 21,43 |
| 51 | 22,47 |
| 54 | 31,99 |
| 55 | 27,80 |
| 56 | 26,68 |
| 57 | 30,22 |
| 58 | 37,72 |
| 59 | 44,82 |
| 60 | 32,27 |
| 61 | 25,54 |
| 62 | 35,63 |
| 63 | 45,47 |

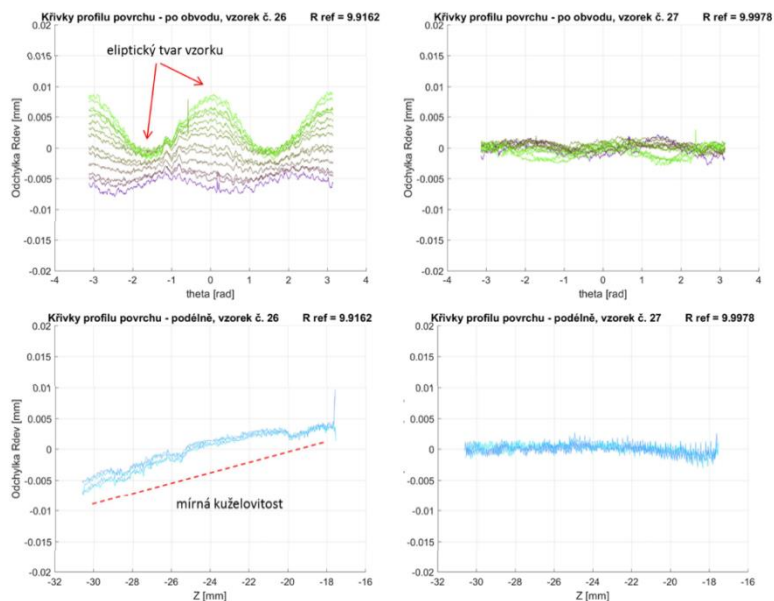
#### 4.3.1 Porovnání výsledků optické profilometrie ocelových vzorků před a po experimentu

Již na výsledcích z měření povrchů vzorků před experimentem je patrné, že některé vzorky mají větší/menší odchylky od ideálního válce. To je patrné na histogramech odchylek  $R_{dev}$  vzorků před experimentem. Jedna skupina vzorků má rozptyl odchylek  $R_{dev}$  v rozmezí  $\pm 5 \mu\text{m}$  a druhá v rozmezí  $\pm 10 \mu\text{m}$ . Tento rozdíl mezi oběma skupinami je vidět na Obr. 62, kde je pro příklad porovnán histogram odchylek  $R_{dev}$  vzorků č. 26 (větší rozptyl) a 27 (menší rozptyl).



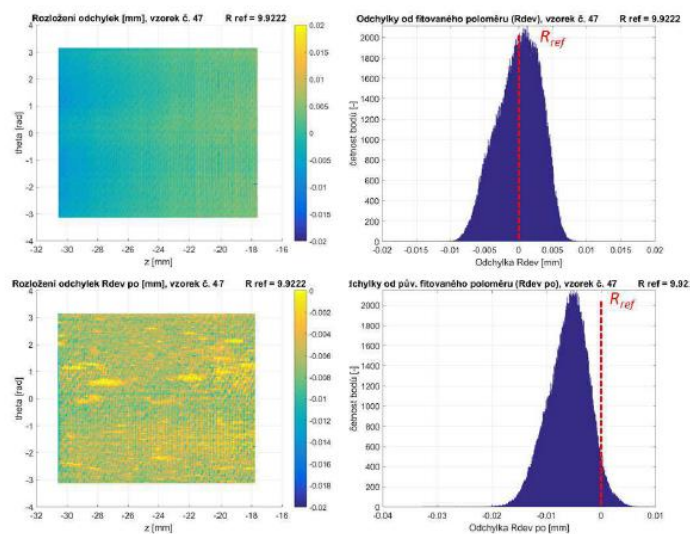
Obr. 62 Porovnání histogramů odchylek  $R_{dev}$  pro vzorek č. 26 (druhá skupina) a č. 27 (první skupina)

Rozdíl mezi skupinami je způsoben jak eliptickým tvarem, tak mírnou kuželovitostí, kterou do jisté míry vykazuje druhá skupina a je dobře patrný na obvodových a podélných křivkách profilu a barevné mapě rozložení odchylek  $R_{dev}$ . Na Obr. 63 je příklad porovnání obvodových křivek profilu pro vzorky č. 26 a 27. Viditelné vlny u vzorku č. 26 ukazují na mírně eliptický tvar. Kuželovitost je pak lépe vidět jako sklon podélných křivek profilu např. vzorku č. 26 (viz Obr. 63). Vzorek č. 27 z první skupiny pak vykazuje v obou případech lepší geometrické parametry.

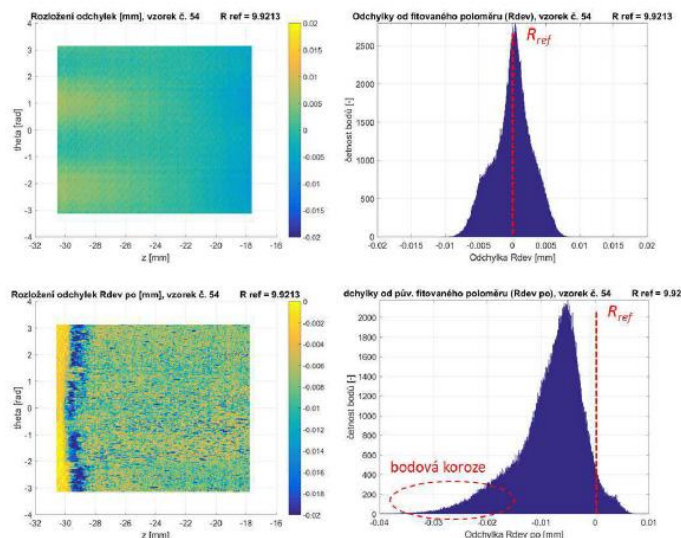


Obr. 63 Porovnání histogramů odchylek  $R_{dev}$  pro vzorek č. 26 (druhá skupina) a č. 27 (první skupina)

Výsledky po korozní zkoušce jsou znázorněny na mapě rozložení odchylek  $R_{dev\_po}$ . Rozložení změn po ploše vzorku by již nemělo být ovlivněno původní geometrií vzorků před experimentem. Na mapách je vidět, že rozložení nerovnoměrností na ploše není u všech vzorků stejné a liší se v závislosti na parametrech korozního experimentu. Na Obr. 64 a Obr. 65 je možné vidět porovnání vzorků před a po korozní zkoušce pro vzorky č. 47 a 54.



Obr. 64 Porovnání vzorku č. 47 před a po korozní zkoušce

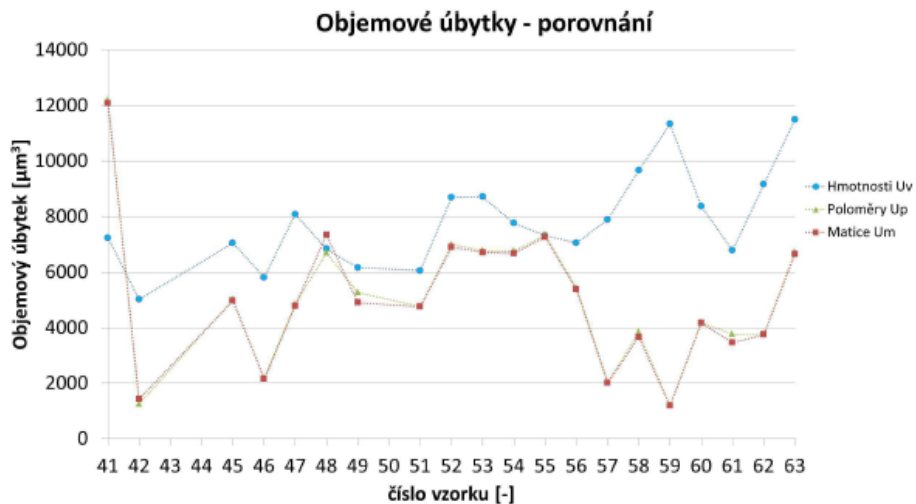


Obr. 65 Porovnání vzorku č. 54 před a po korozní zkoušce

U vzorků číslo 41 a 54 je patrná část nekorodované plochy v šířce 1 až 2 mm po obvodu vzorku. Lokalizované korozní napadení je pozorovatelné např. na vzorcích č. 53 až 58 a 60 až 63, jak je vidět z histogramů odchylek  $R_{dev\_po}$  jako nesymetrie v levé části histogramu. U ostatních vzorků je koroze rozložena relativně rovnoměrněji. Zde je nutné připomenout, že vzdálenost bodů měření je 58 resp. 43  $\mu\text{m}$ . Bude-li tedy lokální napadení menších rozměrů, nemusí být optickou profilometrií zachyceno. Dále v případě velkých rozdílů hodnot v rámci celé plochy může být lokální napadení skryto v rámci barevné škály, která má omezený rozsah. To je patrné při srovnání obrazové dokumentace vzorku pořízená na našem pracovišti s jeho obrazem získaným z optické profilometrie, kdy patrné nerovnoměrné napadení je relativně ztraceno v barevné škále na změřené ploše.

Rozdílné korozní napadení odpovídá umístění vzorku v cele. Vzorky č. 41 (cely IA) a 54 (cely IB) byly v okrajích cel, v tomto místě se voda nedostala k celé ploše vzorku kvůli tomu, že část vzorku byla zakryta materiálem víka cely a těsněním. Další viditelné rozdíly jsou u povrchů vzorků č. 57 a 60 (cela s drenáží IB), oba tyto vzorky byly umístěny pod spárami mezi bentonitovými tělesy. Tyto spáry nejspíše na začátku experimentu, v průběhu postupného sycení bentonitu, posloužily jako preferenční cesta přivádějící sytící vodu pod vysokým tlakem (sytící tlak 2 Mpa) přímo k povrchu kovového vzorku. V případě cely IA (bez drenáže) nebylo u vzorků na stejné pozici (vzorky č. 52 a 48) výrazné korozní napadení pozorováno, neboť v tomto případě byl bentonit sycen přes simulovanou puklinu situovanou mimo spáry mezi bentonitovými tělesy. Transport vody v bentonitu tak pravděpodobně probíhal výhradně difúzí, což vedlo k postupné saturaci na rozhraních jednotlivých bentonitových těles a homogenizaci tohoto rozhraní z hlediska hustoty bentonitu.

Dále byl porovnán celkový objemový úbytek materiálu na testovaných vzorcích. Na Obr. 66 je znázorněn objemový úbytek získaný měřením profilometrem je menší než objemový úbytek stanoven přepočtem měřených hmotnostních úbytků, pravděpodobně tento rozdíl je dán měřicí metodou. V případě že povrch vzorku je hrubý, paprsek se nemusí dostat do celé hloubky a měřena data jsou zatížena systematickou chybou měření. Na Obr. 66 také lze vidět, že hodnoty objemového úbytku získané profilometrem mají podobnou tendenci jako hodnoty získané pomocí měřených hmotnostních úbytků, výjimka je u vzorků č. 41 a 47-59. Absolutní hodnoty vyhodnocených objemových úbytků mají pouze informativní charakter.



Obr. 66 Porovnání objemových úbytků na testovaných vzorcích

|                                                                                                |                                                                           |                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------|
|  <b>SÚRAO</b> | <b>Test omezení koroze UOS využitím drenážní vrstvy v úložných vrtech</b> | Evidenční označení: |
|                                                                                                |                                                                           | <i>TZ 199/2017</i>  |

## 5 Závěr

První výsledky získané z korozní zkoušky v systémech s drenážní vrstvou a bez drenážní vrstvy zatím neumožňují jednoznačně specifikovat vliv uspořádání na korozi uhlíkové oceli. Pro ucelenější pohled na daný systém bude nutné srovnat doposud obdržené výsledky s výsledky z probíhající půlroční korozní zkoušky. Přesto jsou patrné některé jevy, projevující se v laboratorním měřítku, které by v reálném systému mohly nastat. Konkrétně se jedná o průnik vody k povrchu uhlíkové oceli v místech kontaktu dvou bentonitových segmentů.

Výsledky stanovení vlhkosti bentonitu dle očekávání odpovídají experimentálnímu uspořádání, tedy vyšší vlhkost byla pozorována v systému s drenážní vrstvou oproti systému s modelovou puklinou. Tyto výsledky mohou být dále použity k ověření programů pro modelování THMC procesů.



## 6 Literatura

BARTOVSKÁ L., ŠIŠKOVÁ M. (2005): Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav. – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. ISBN 80-7080-579-X.

ČSN EN ISO 17892-1 (2015): Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti. – Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

DOBREV D., ZUNA M. (2015): Příprava korozní zkoušky v přírodním granitoidním prostředí. – Zpráva ÚJV Řež, a. s., 14554, 46 str.

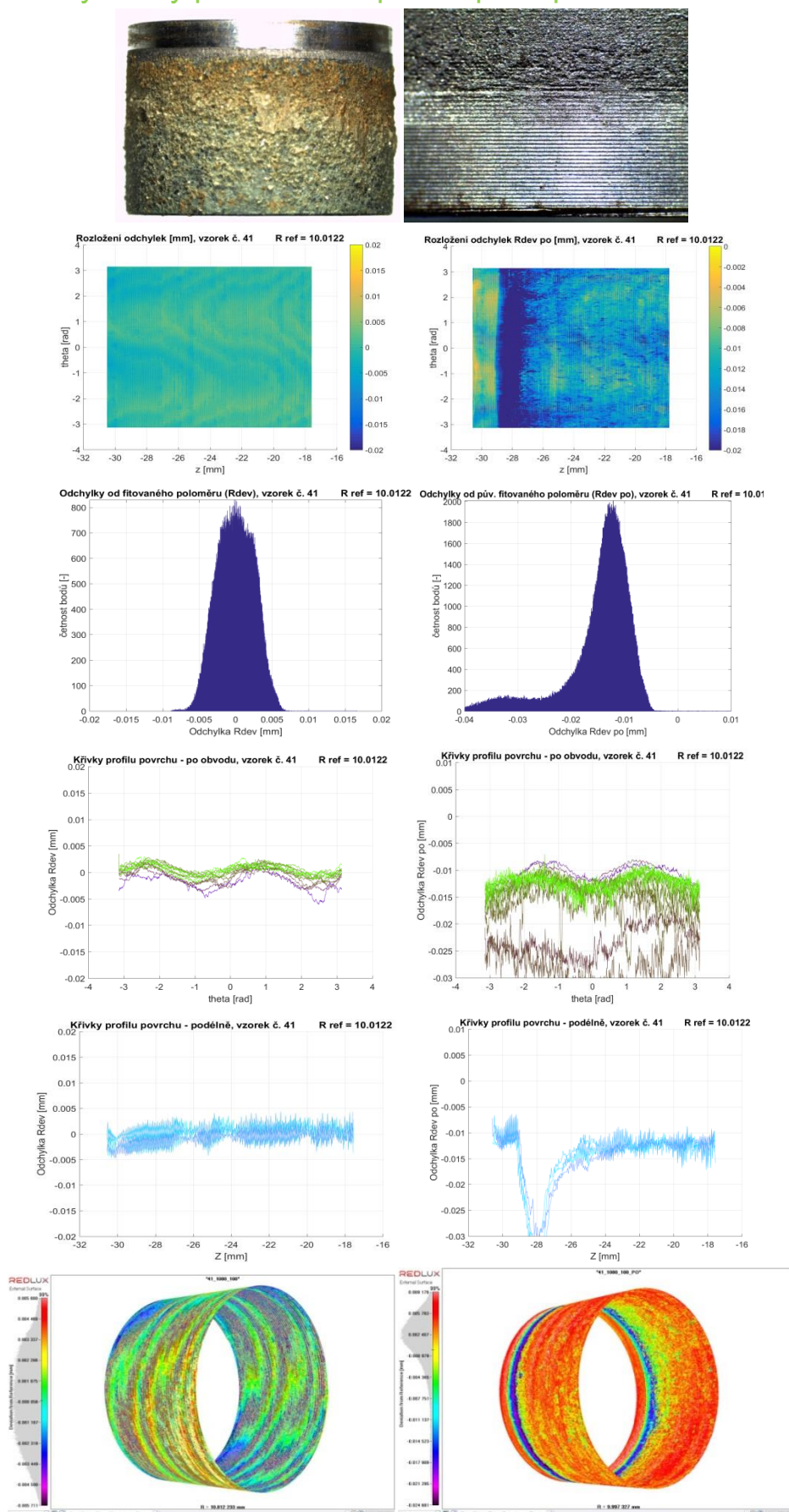
NERETNIEKS I. (1985): Some aspects of the use of iron canisters in deep lying repositories for nuclear waste. Technical Report 85-35, Nagra.

## Příloha 1 - Hodnoty referenčních poloměrů před a po experimentu

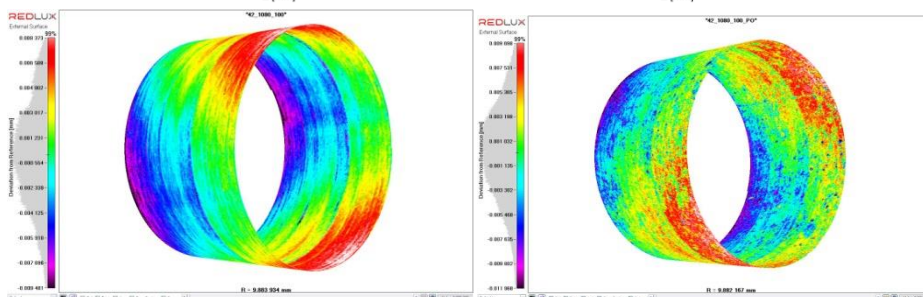
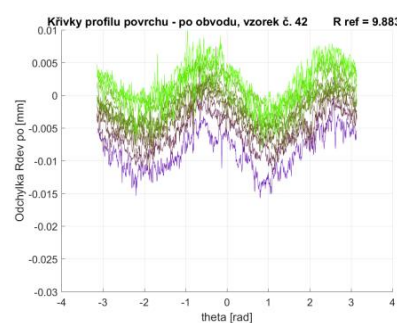
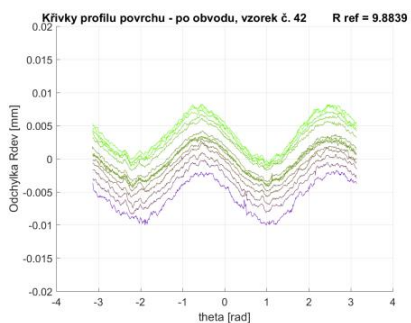
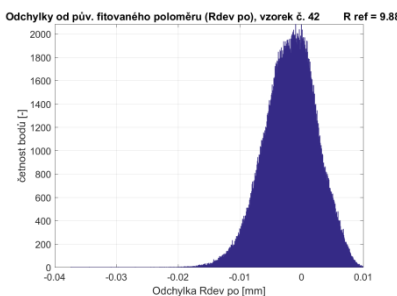
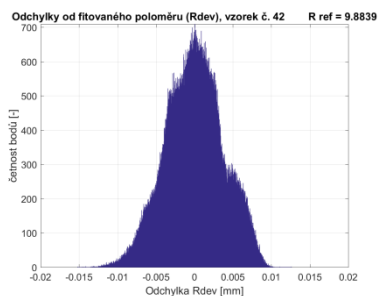
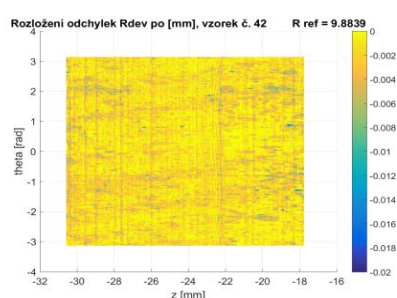
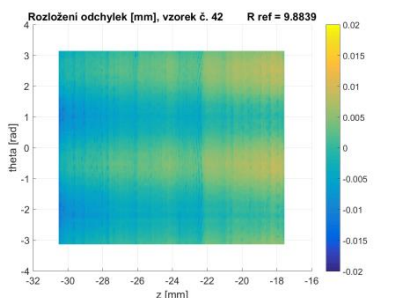
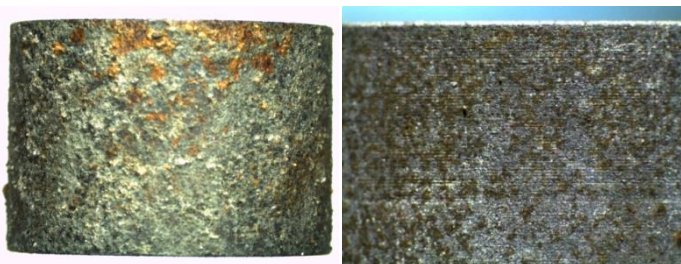
Tab. 6 Hodnoty referenčních poloměrů před a po experimentu

| Vzorek číslo | Referenční poloměr $R_{ref\_před}$<br>[mm] | Referenční poloměr $R_{ref\_po}$<br>[mm] | Průměr $R_{dev}$<br>(absolutní hodnota,<br>vůči $R_{ref\_před}$ )<br>[mm] | STD $R_{dev}$ (vůči<br>$R_{ref\_před}$ )<br>[mm] |
|--------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 41           | 10,0122                                    | 9,9973                                   | 0,0149                                                                    | 0,0066                                           |
| 42           | 9,8839                                     | 9,8824                                   | 0,0036                                                                    | 0,0029                                           |
| 45           | 10,0027                                    | 9,9965                                   | 0,0061                                                                    | 0,0028                                           |
| 46           | 9,9142                                     | 9,9115                                   | 0,0044                                                                    | 0,0036                                           |
| 47           | 9,9222                                     | 9,9162                                   | 0,0061                                                                    | 0,0035                                           |
| 48           | 9,9222                                     | 9,9139                                   | 0,0083                                                                    | 0,0033                                           |
| 49           | 9,9195                                     | 9,9129                                   | 0,0066                                                                    | 0,0035                                           |
| 51           | 9,9226                                     | 9,9167                                   | 0,0063                                                                    | 0,0032                                           |
| 52           | 9,9997                                     | 9,9911                                   | 0,0086                                                                    | 0,0029                                           |
| 53           | 10,0003                                    | 9,9921                                   | 0,0083                                                                    | 0,0037                                           |
| 54           | 9,9213                                     | 9,9130                                   | 0,0085                                                                    | 0,0060                                           |
| 55           | 9,9207                                     | 9,9117                                   | 0,0091                                                                    | 0,0059                                           |
| 56           | 9,9096                                     | 9,9029                                   | 0,0067                                                                    | 0,0035                                           |
| 57           | 9,8778                                     | 9,8753                                   | 0,0041                                                                    | 0,0053                                           |
| 58           | 9,9180                                     | 9,9133                                   | 0,0055                                                                    | 0,0066                                           |
| 59           | 9,9915                                     | 9,9901                                   | 0,0023                                                                    | 0,0021                                           |
| 60           | 9,8986                                     | 9,8935                                   | 0,0056                                                                    | 0,0058                                           |
| 61           | 9,8965                                     | 9,8919                                   | 0,0053                                                                    | 0,0040                                           |
| 62           | 9,9258                                     | 9,9211                                   | 0,0054                                                                    | 0,0066                                           |
| 63           | 9,9137                                     | 9,9054                                   | 0,0086                                                                    | 0,0068                                           |

## Příloha 2 – Výsledky profilometrie před a po experimentu

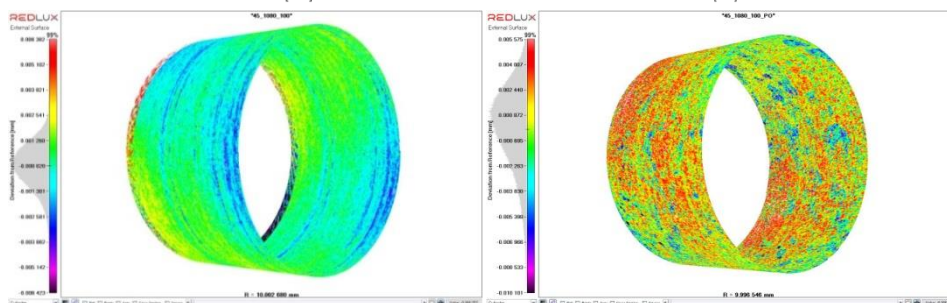
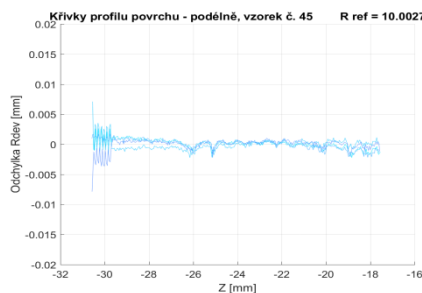
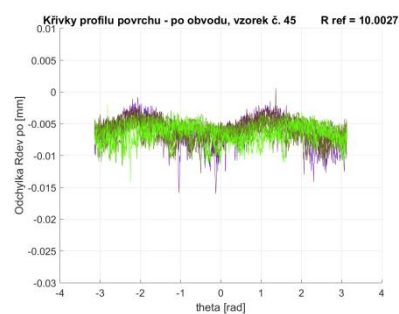
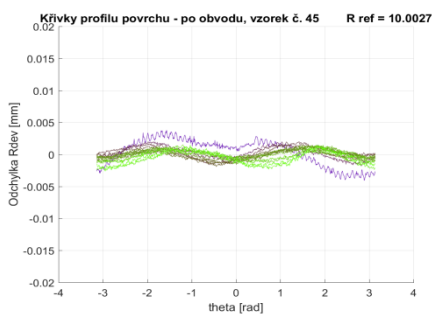
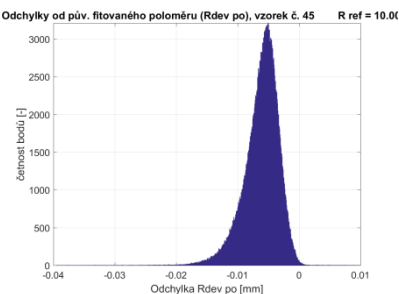
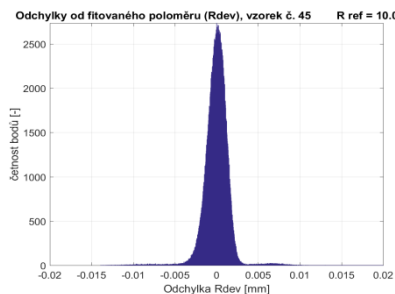
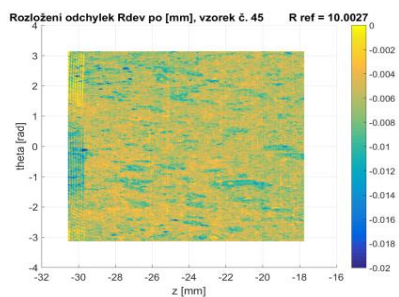
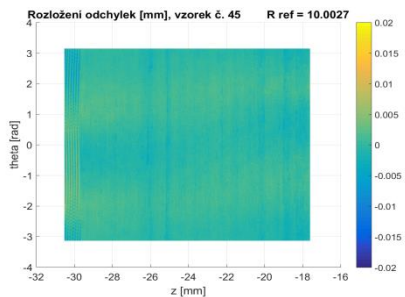
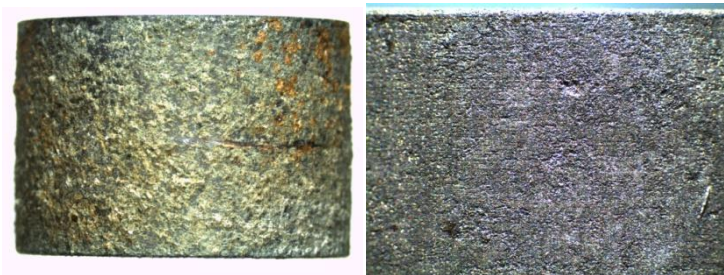


Obr. 67 Vzorek 41 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

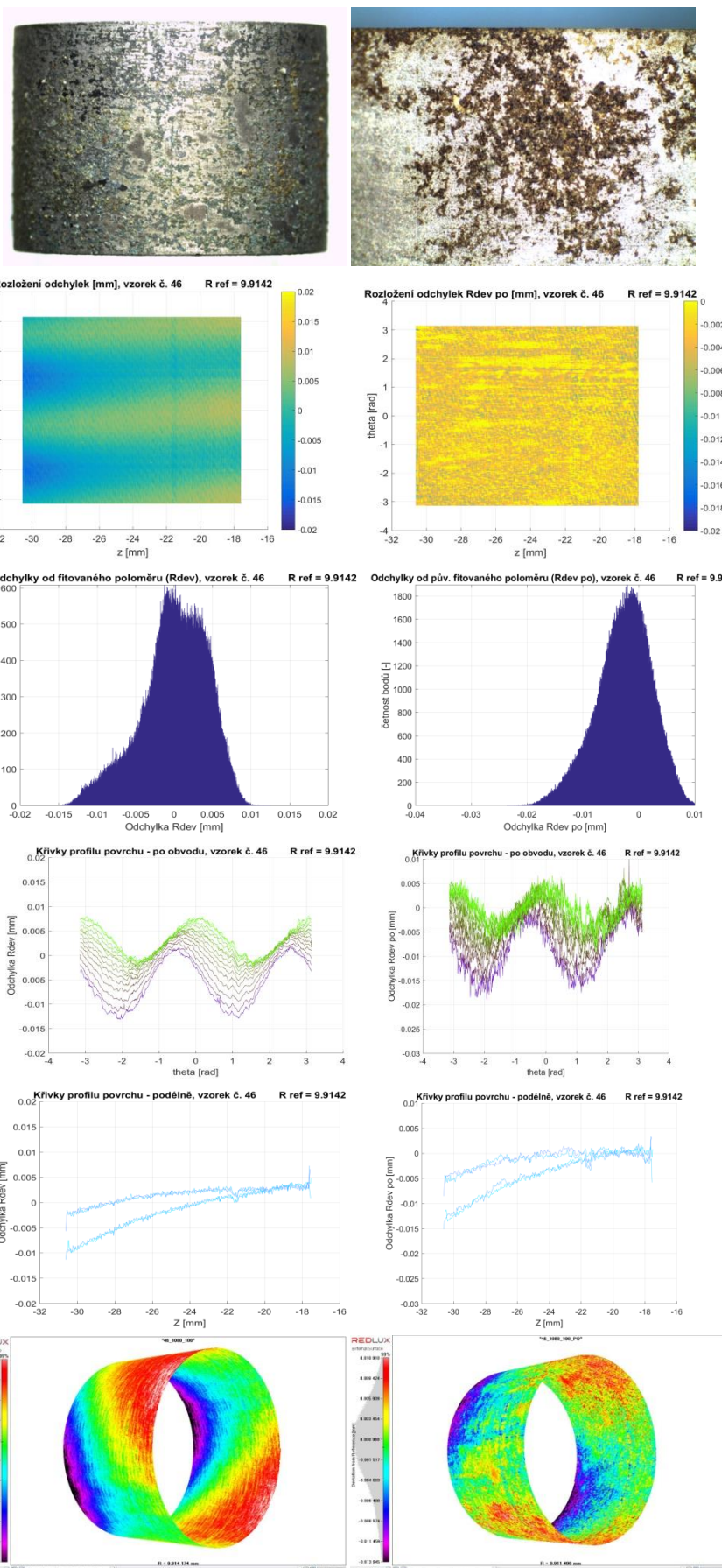


Obr. 68 Vzorek 42 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

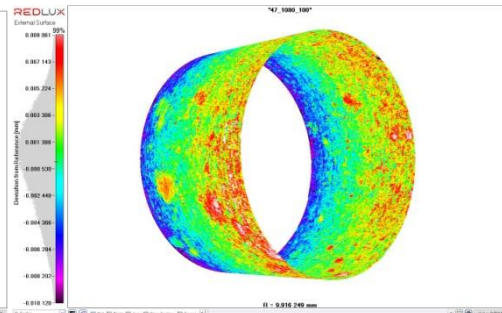
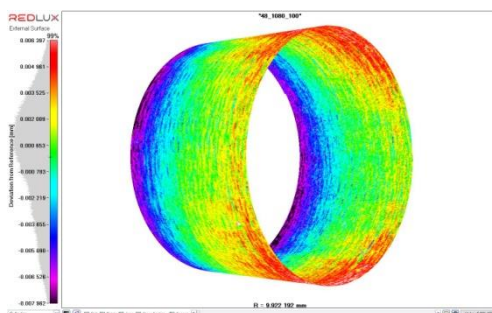
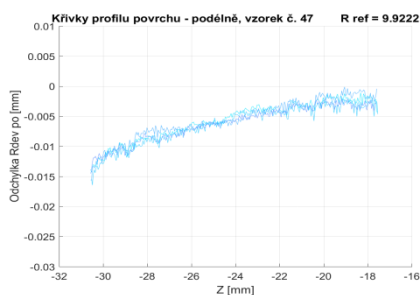
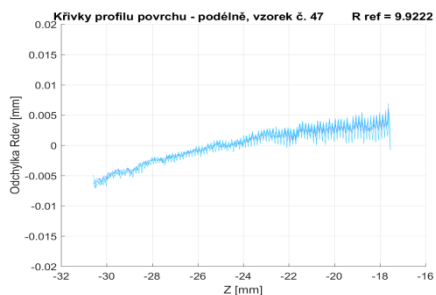
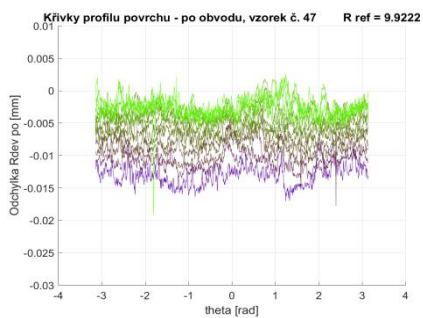
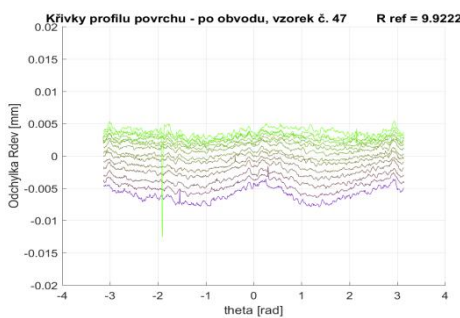
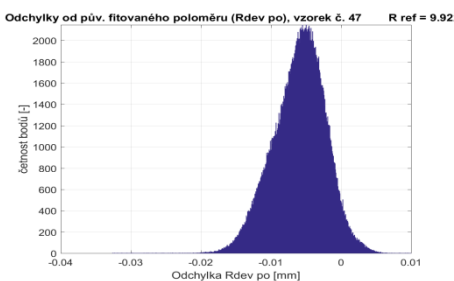
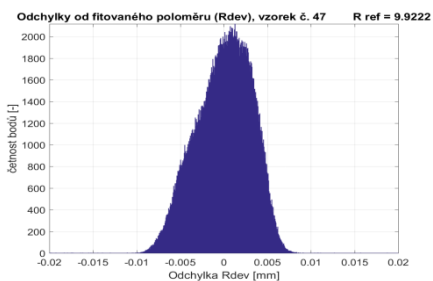
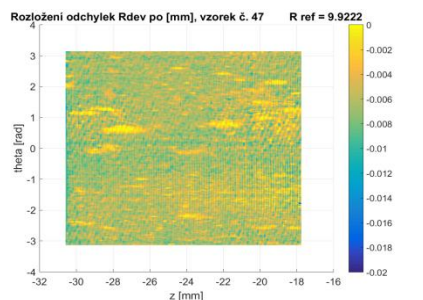
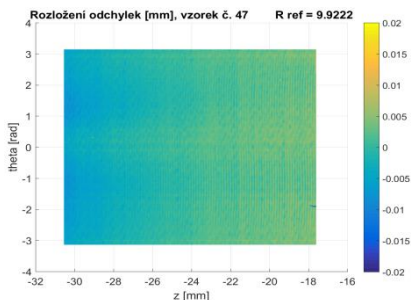
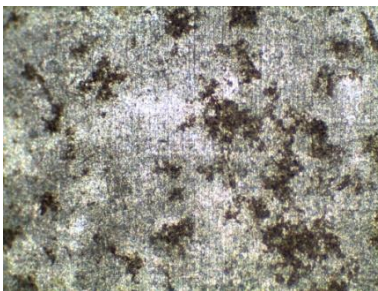




Obr. 69 Vzorek 45 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

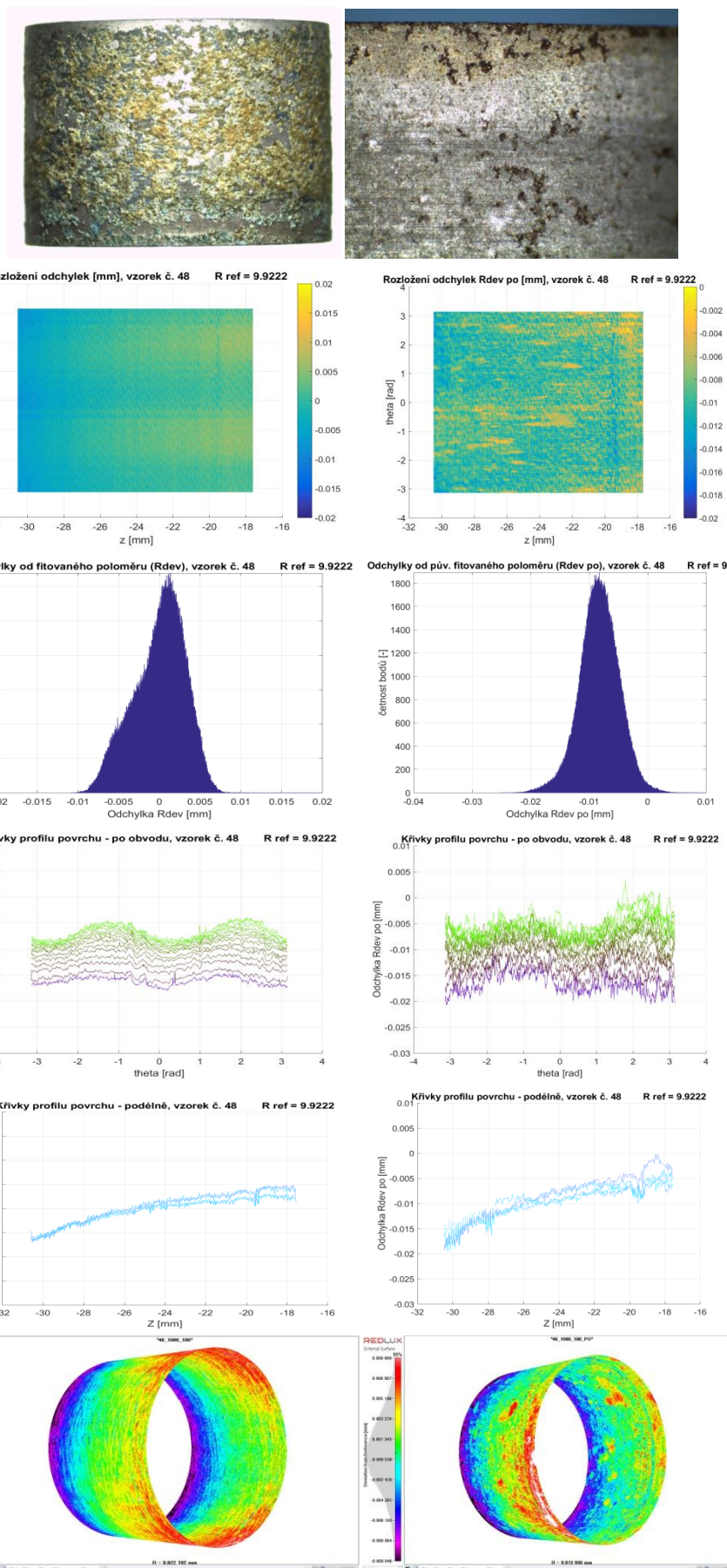


Obr. 70 Vzorek 46 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

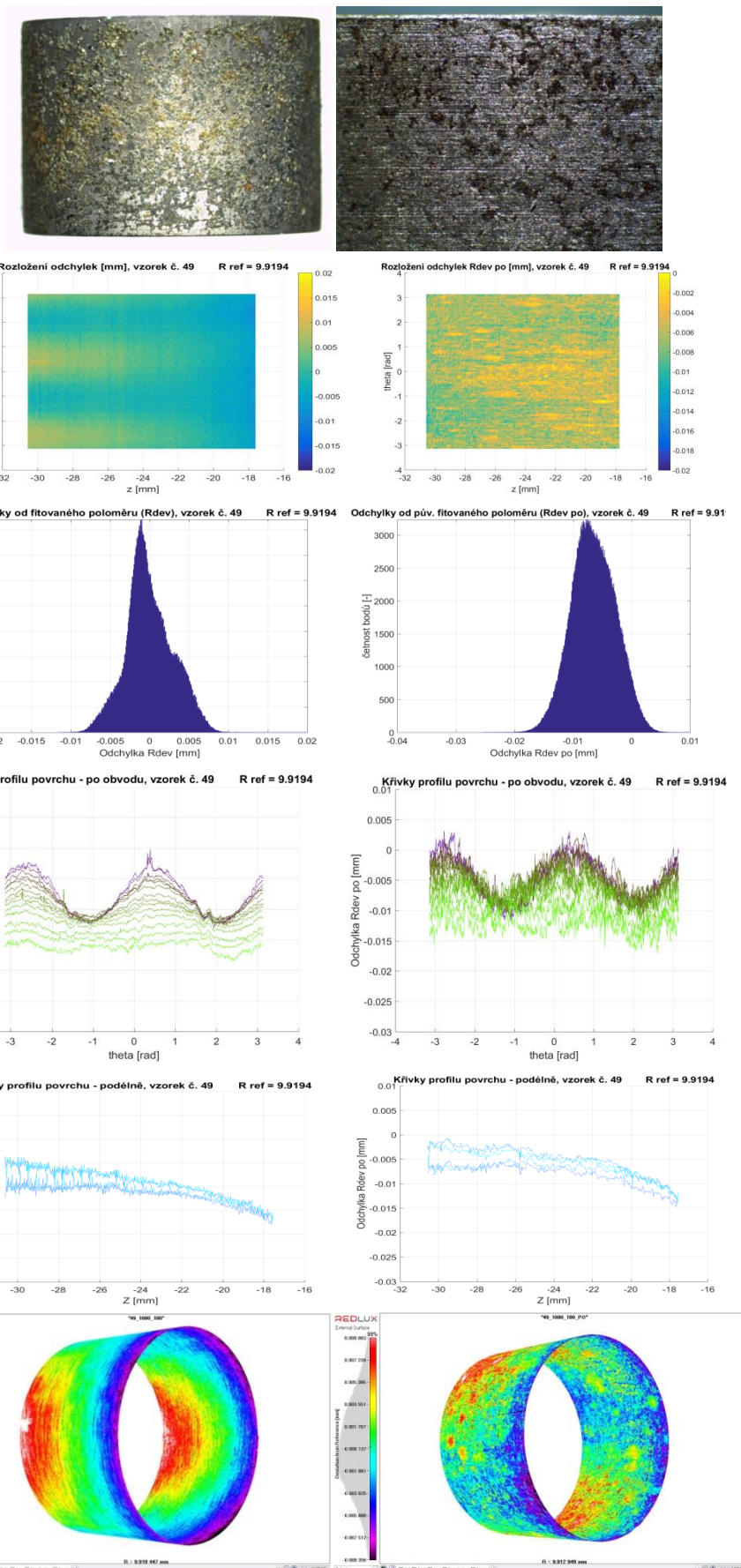


Obr. 71 Vzorek 47 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

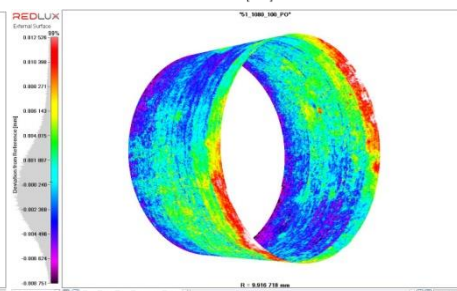
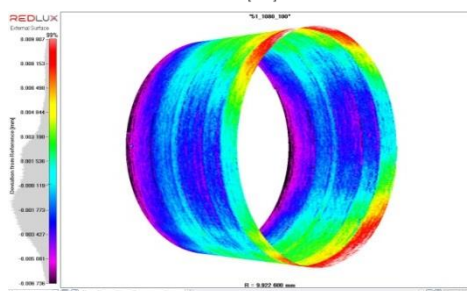
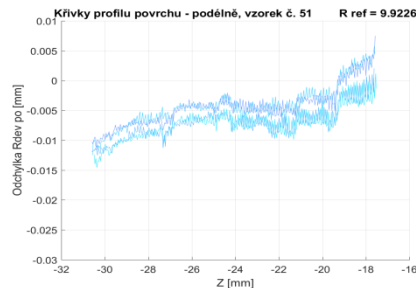
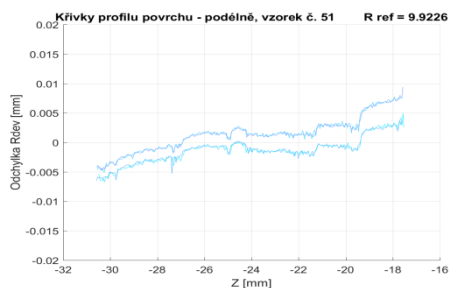
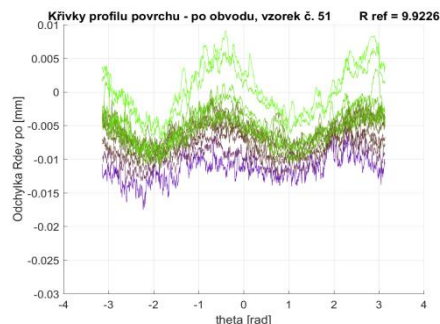
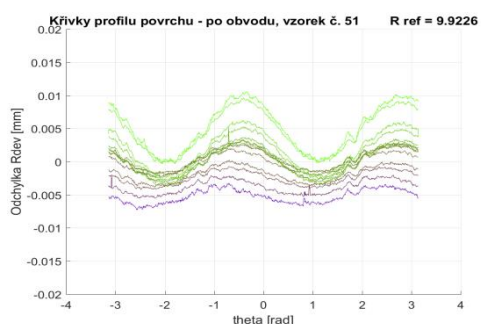
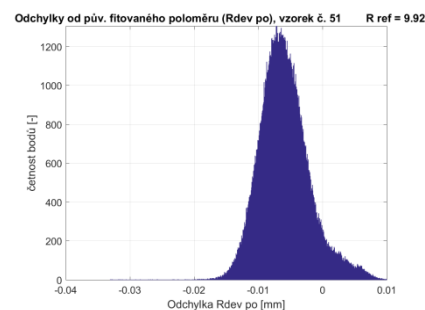
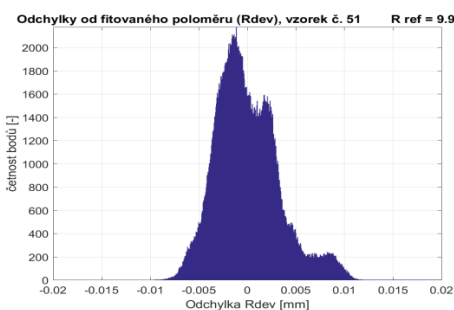
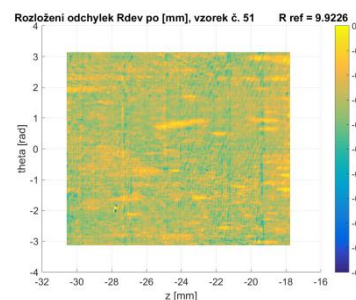
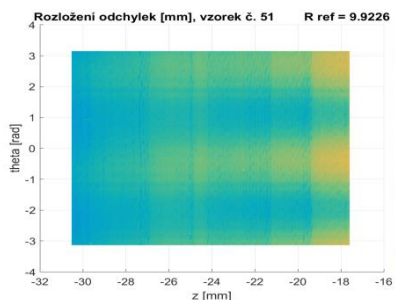
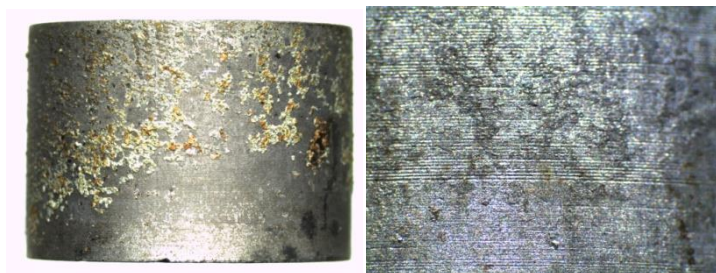




Obr. 72 Vzorek 48 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

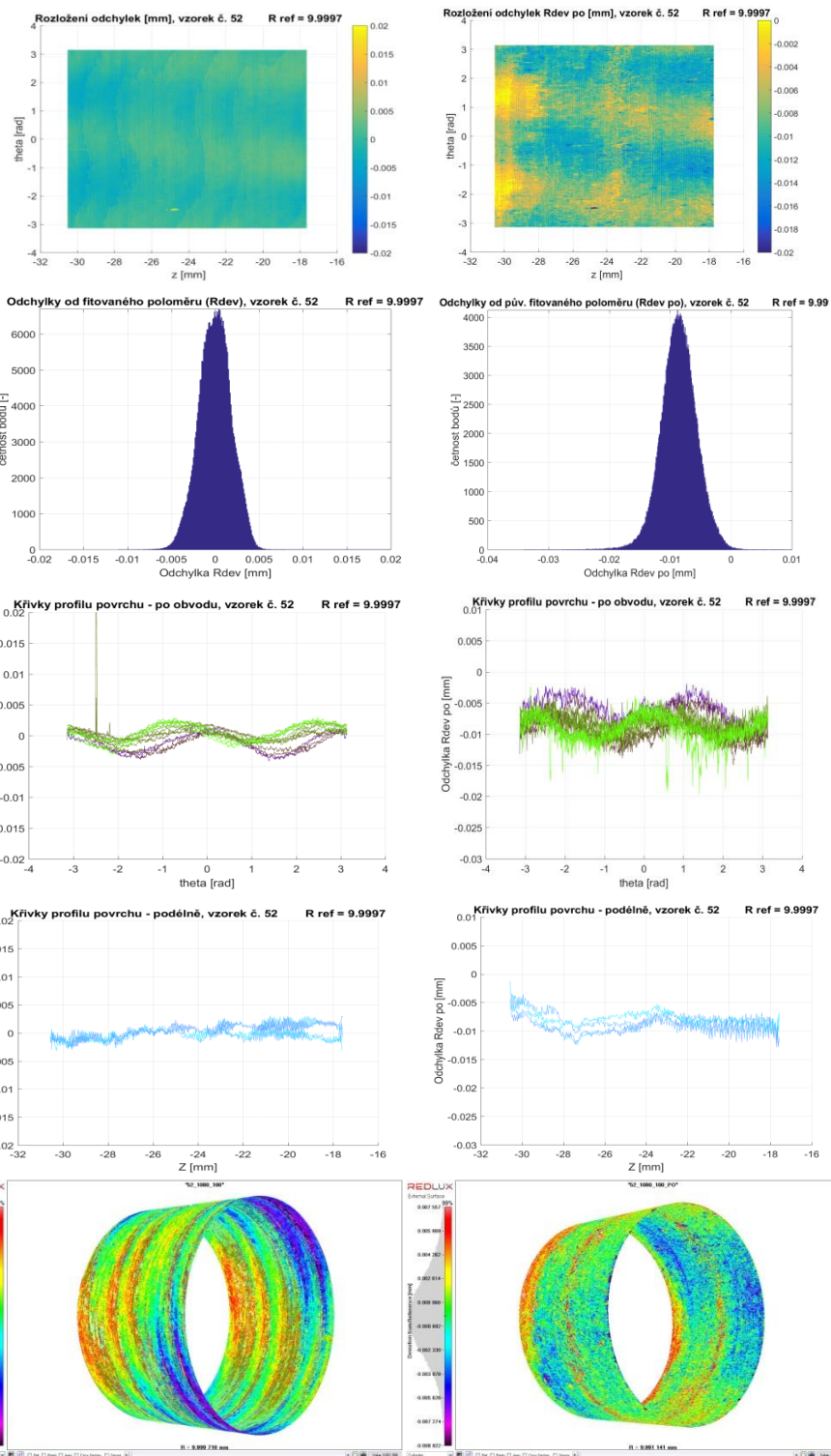
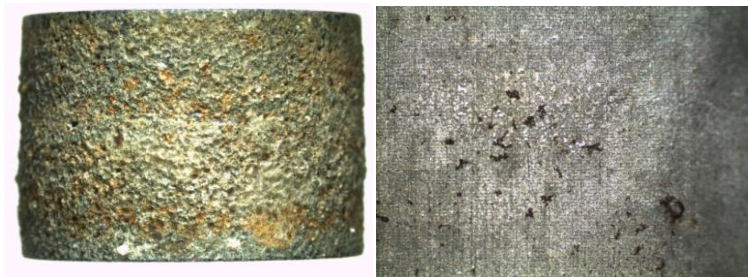


Obr. 73 Vzorek 49 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

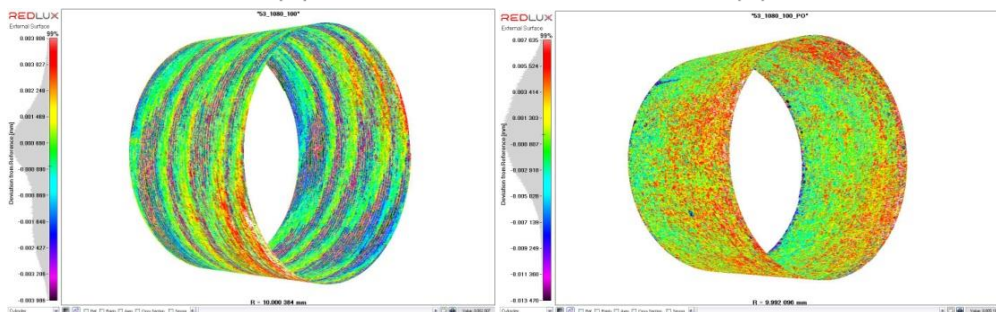
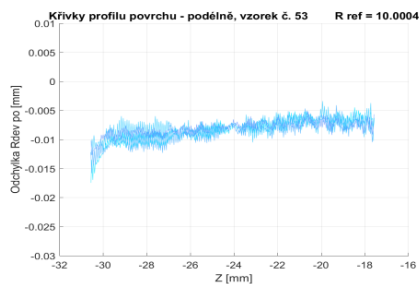
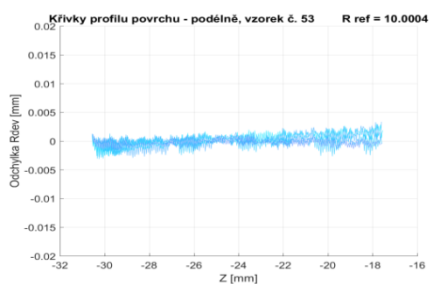
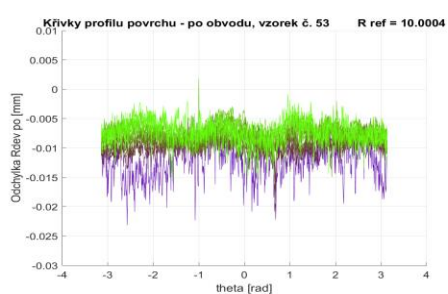
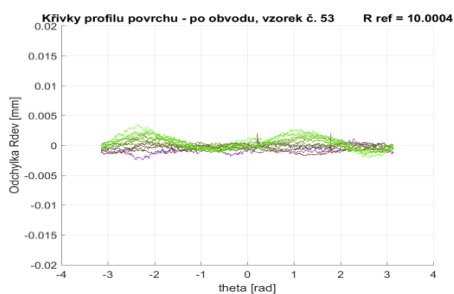
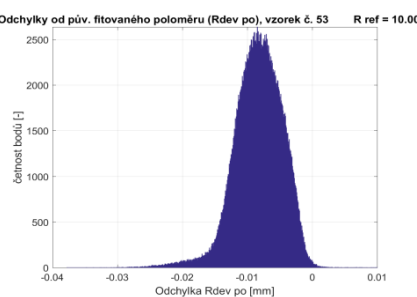
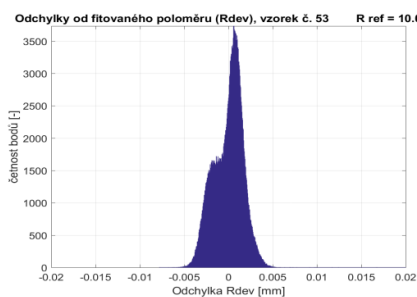
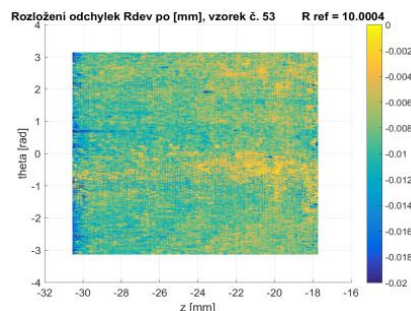
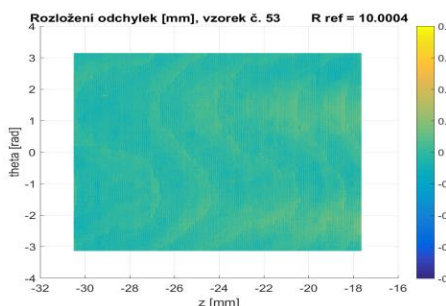
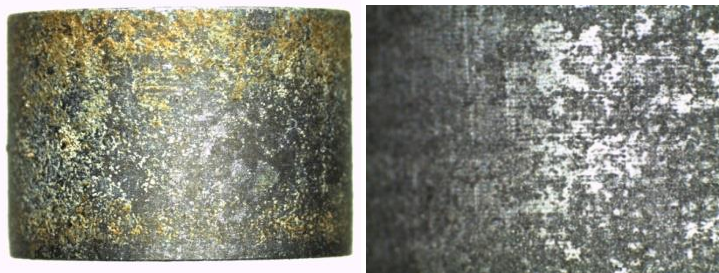


Obr. 74 Vzorek 51 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

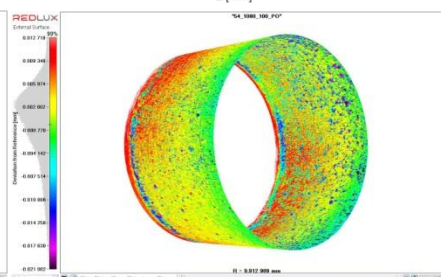
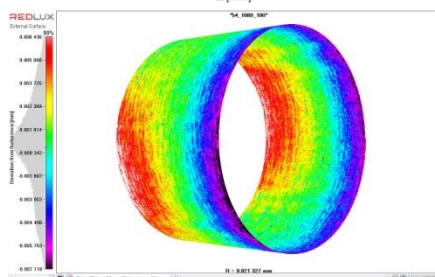
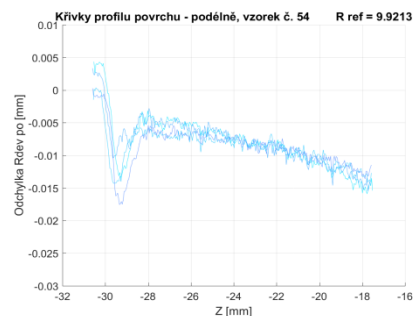
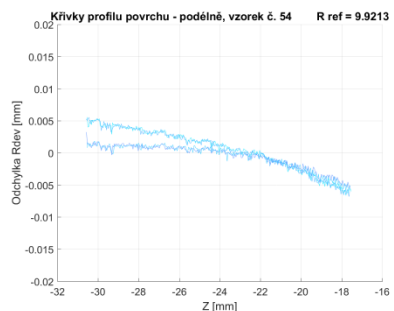
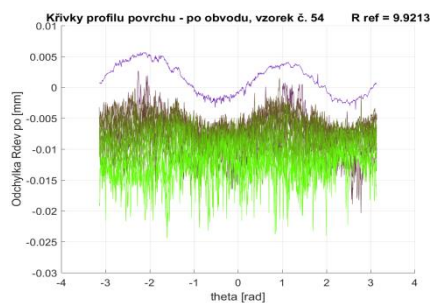
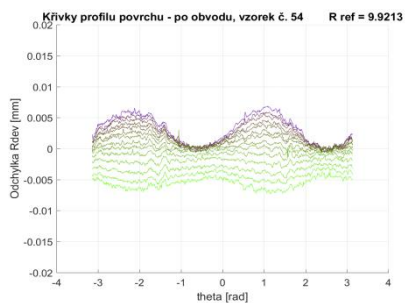
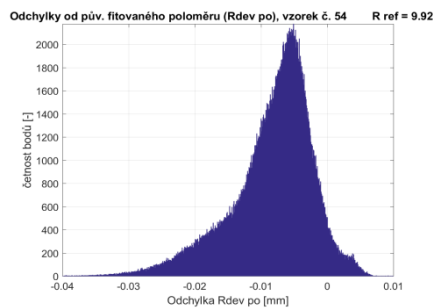
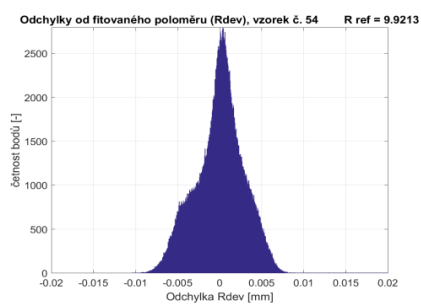
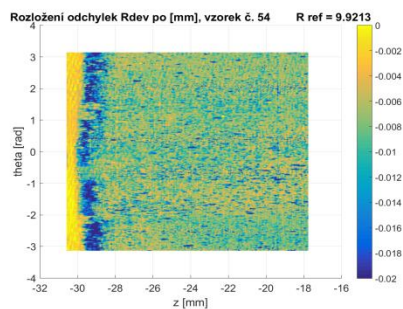
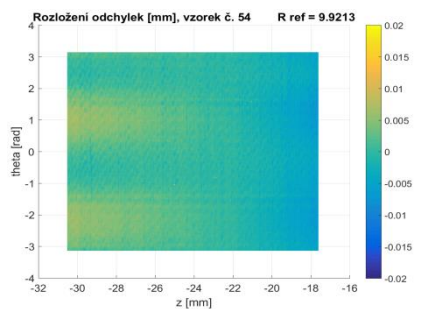
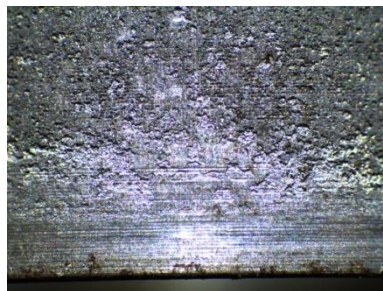




Obr. 75 Vzorek 52 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

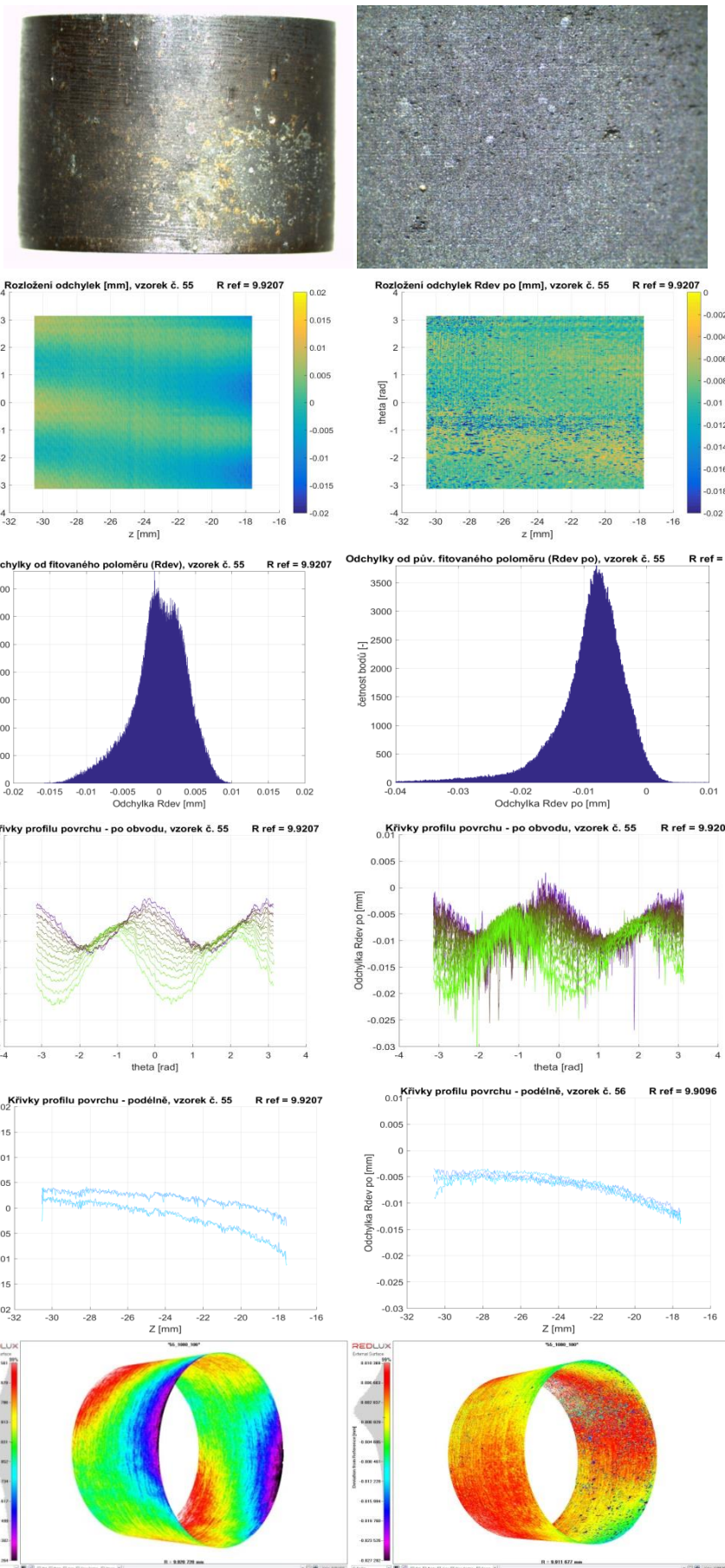


Obr. 76 Vzorek 53 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

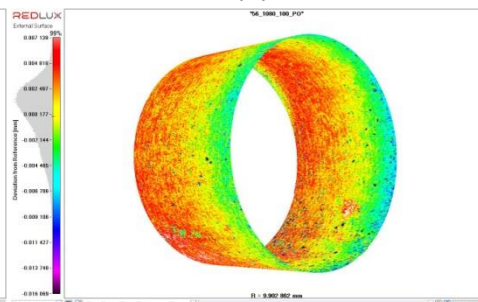
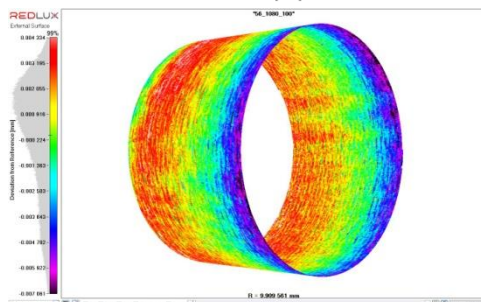
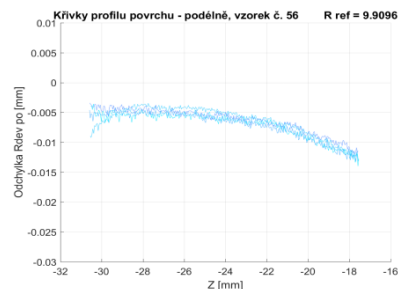
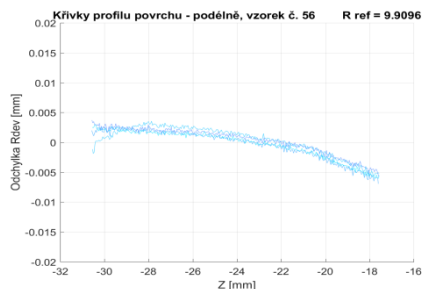
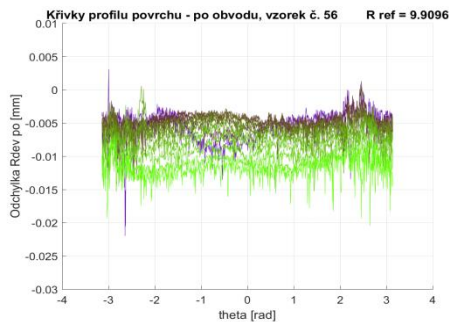
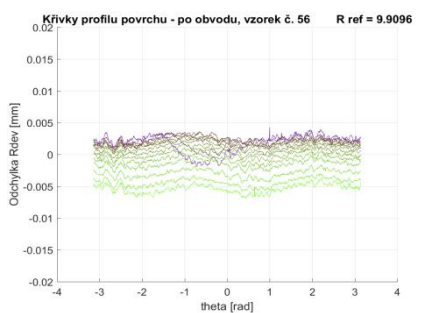
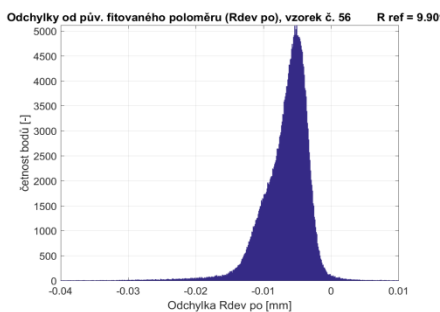
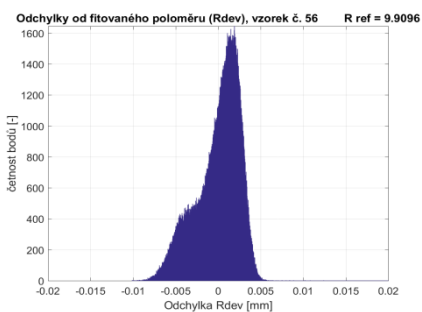
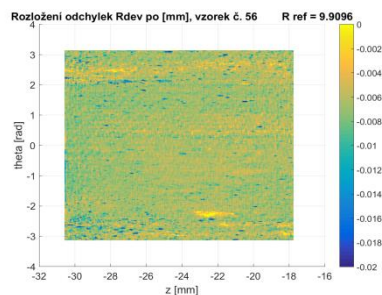
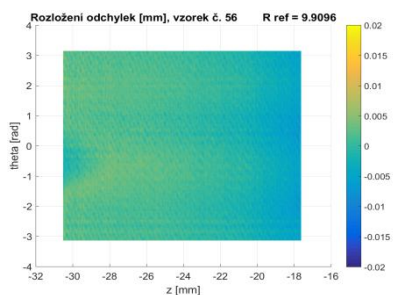


Obr. 77 Vzorek 54 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

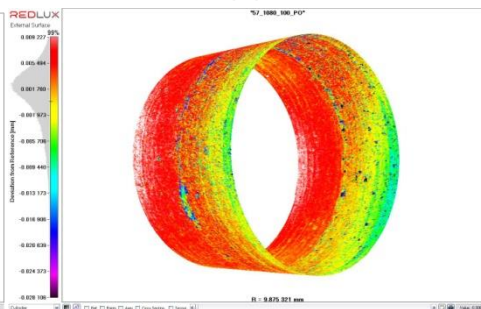
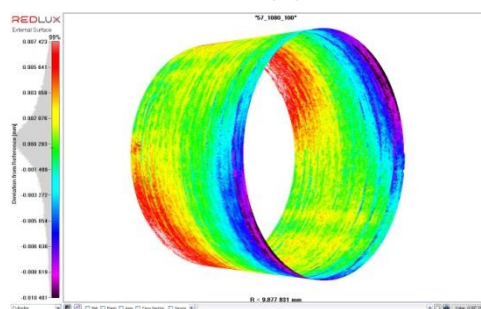
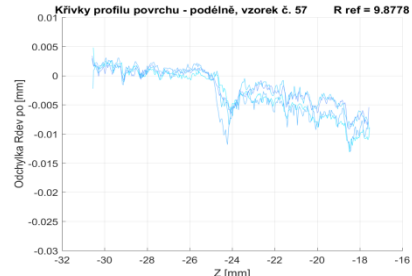
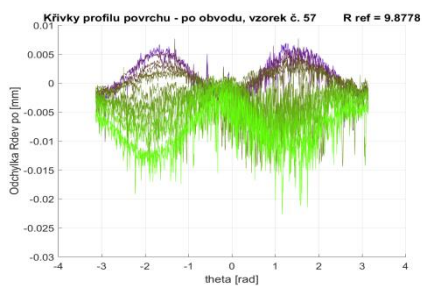
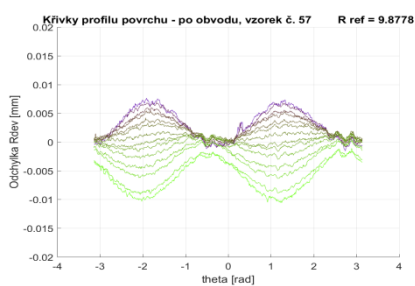
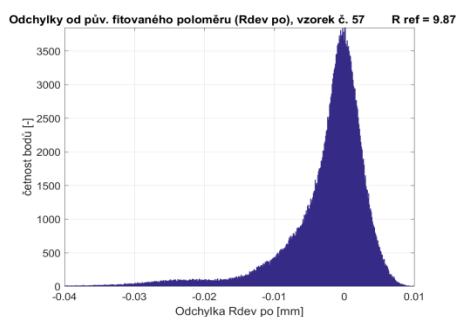
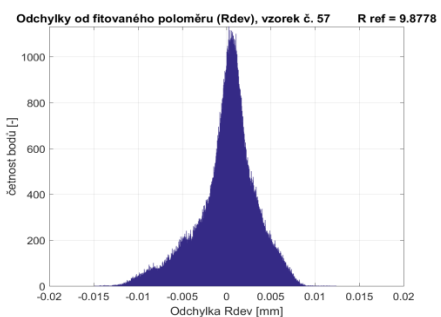
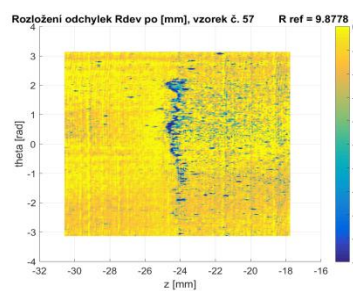
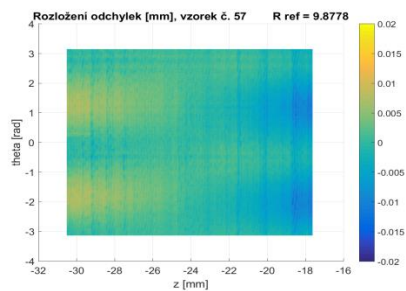




Obr. 78 Vzorek 55 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu



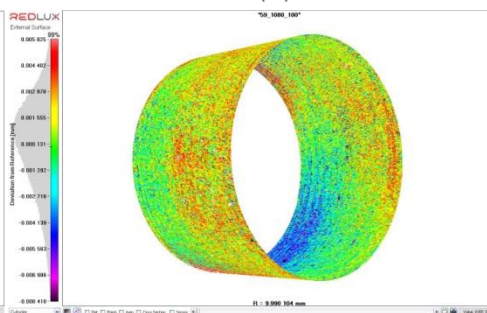
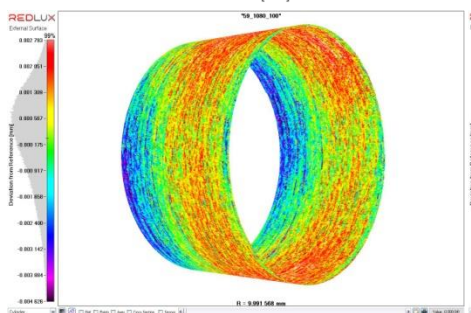
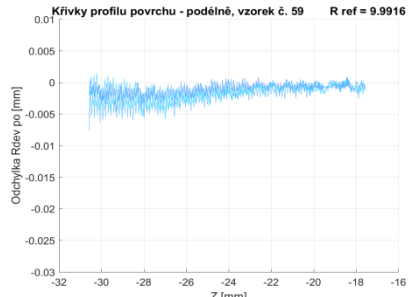
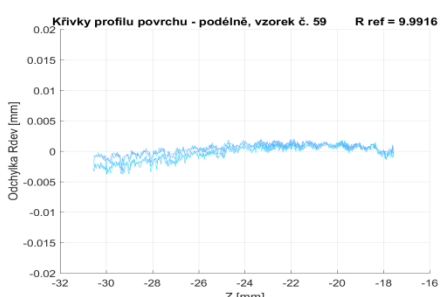
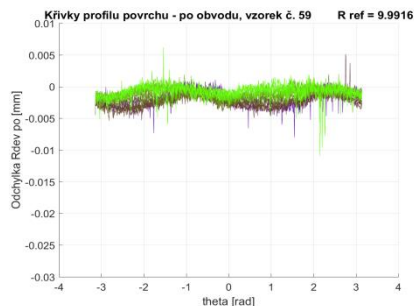
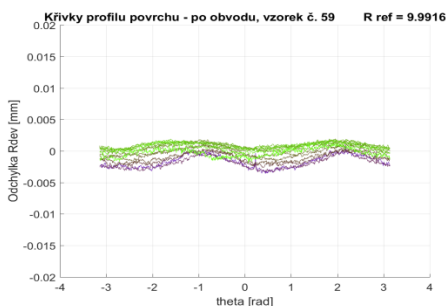
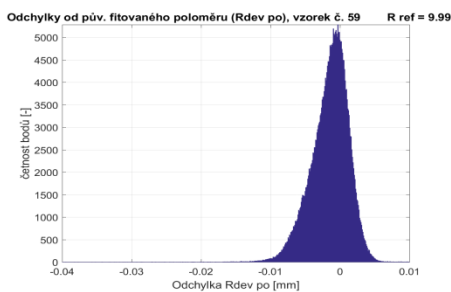
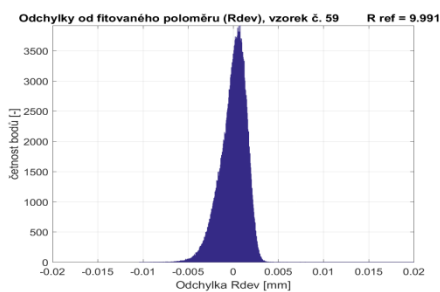
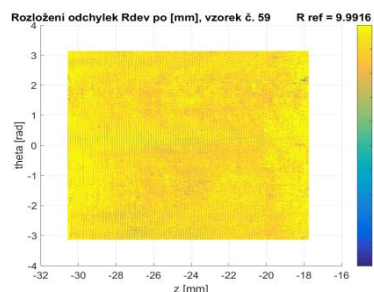
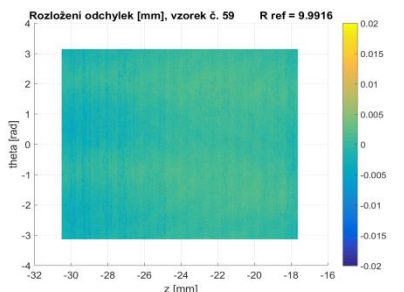
Obr. 79 Vzorek 56 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu



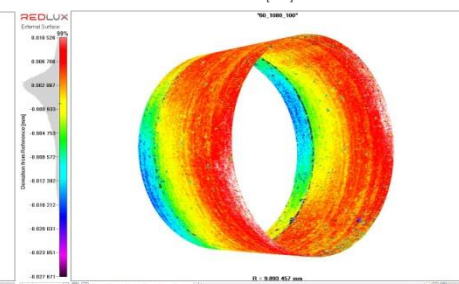
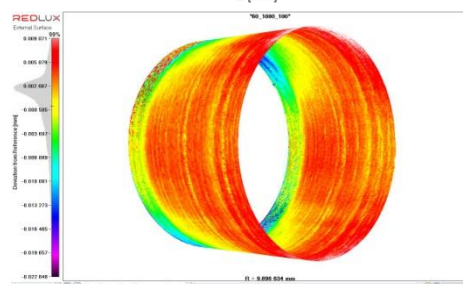
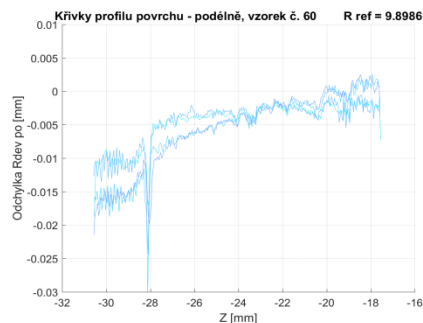
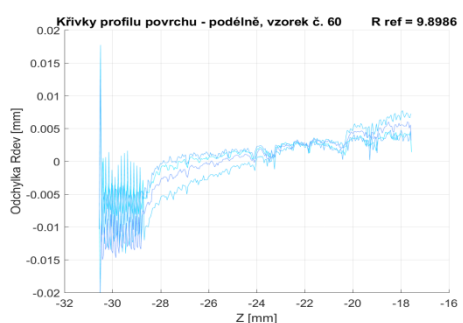
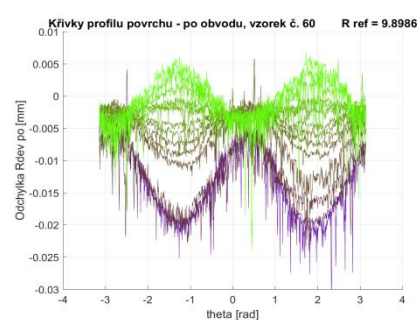
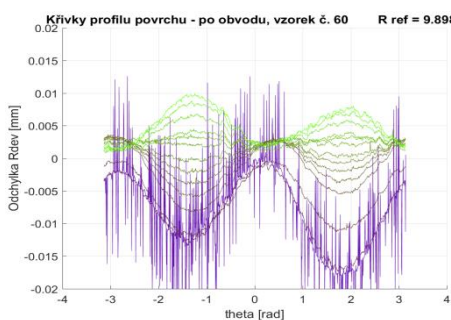
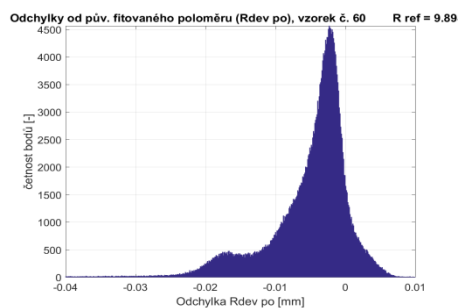
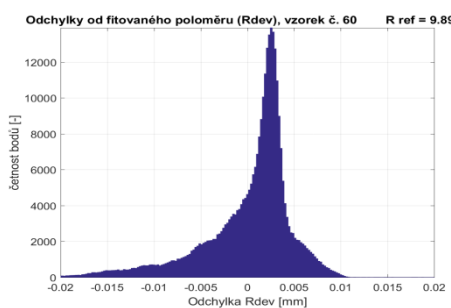
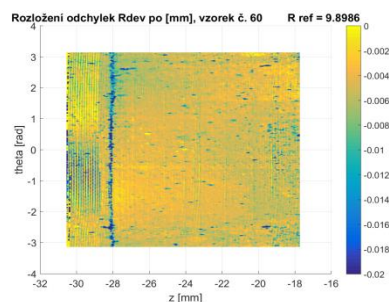
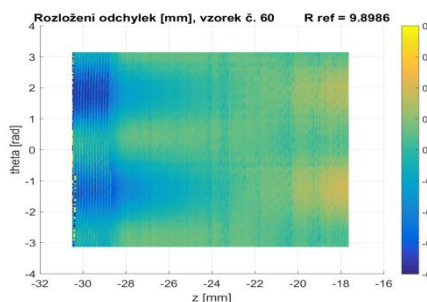
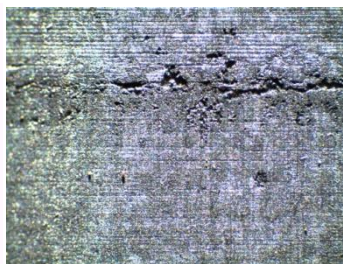
Obr. 80 Vzorek 57 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu





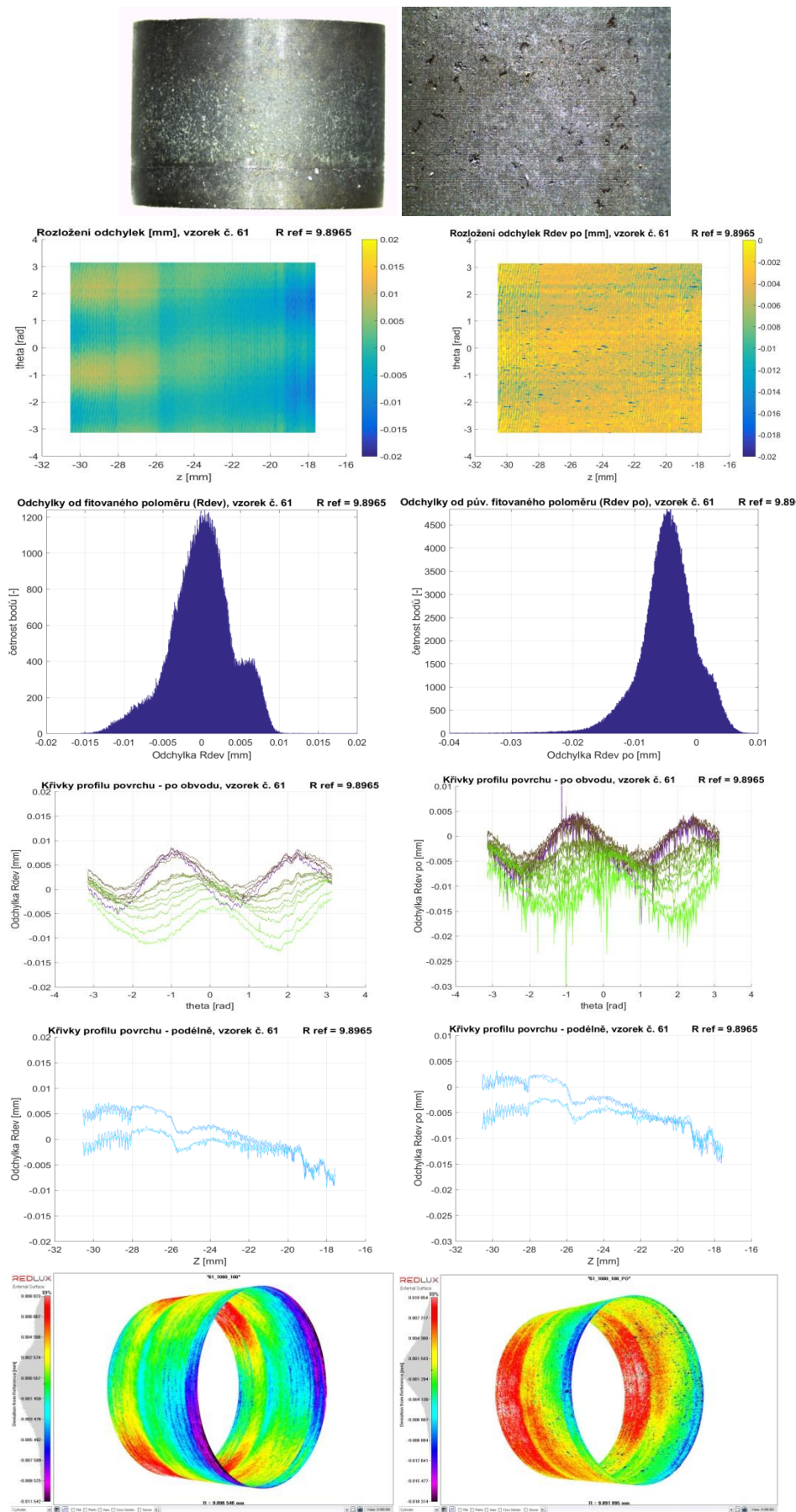


Obr. 82 Vzorek 59 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

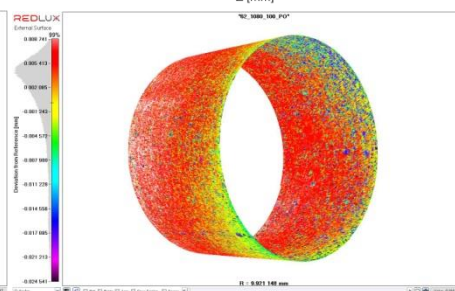
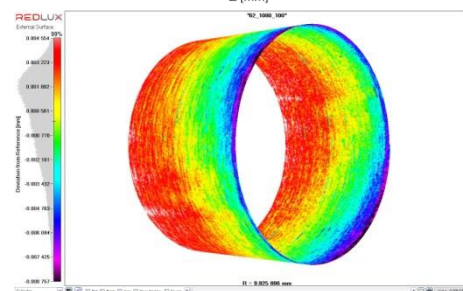
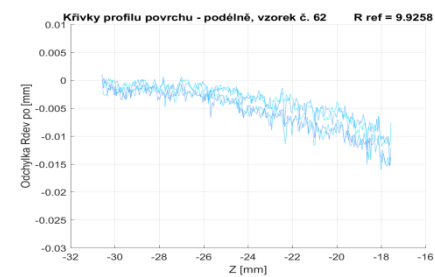
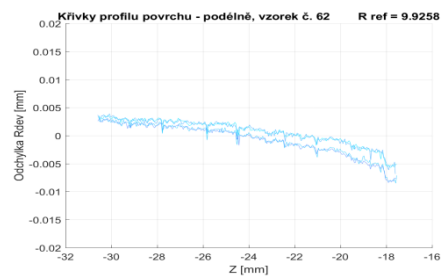
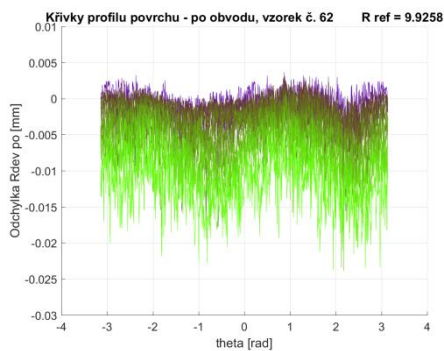
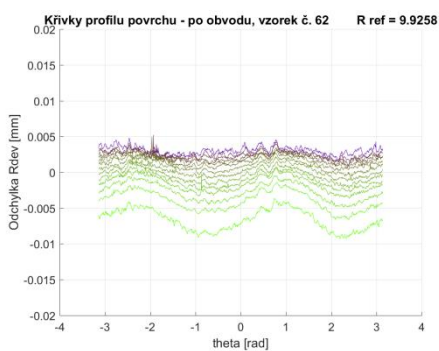
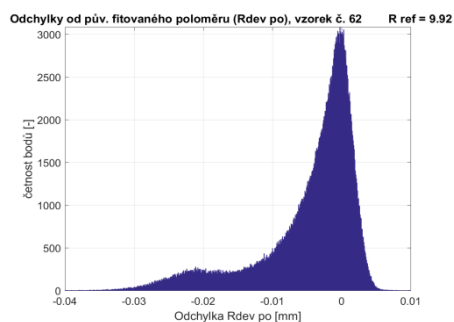
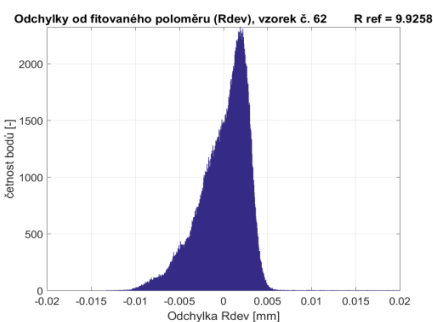
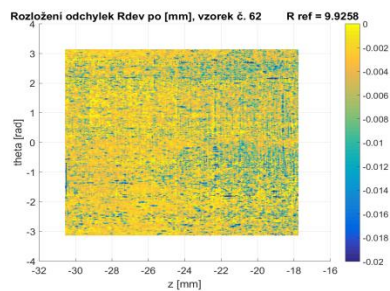
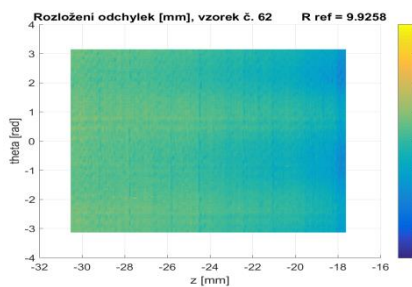
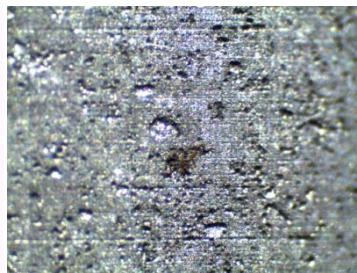


Obr. 83 Vzorek 60 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

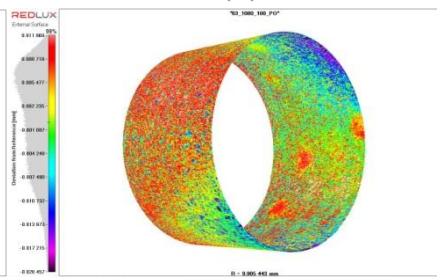
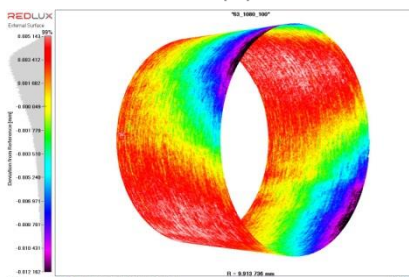
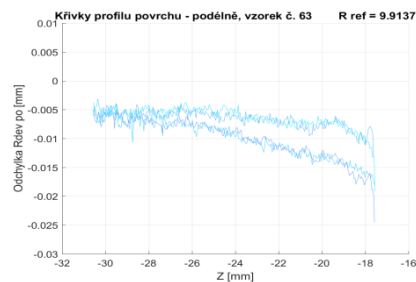
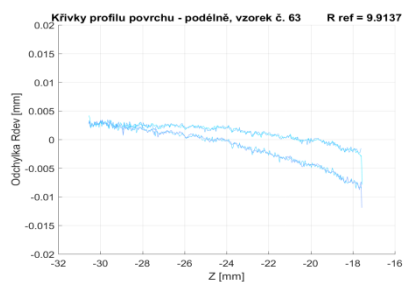
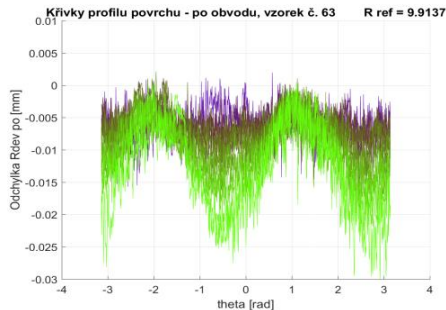
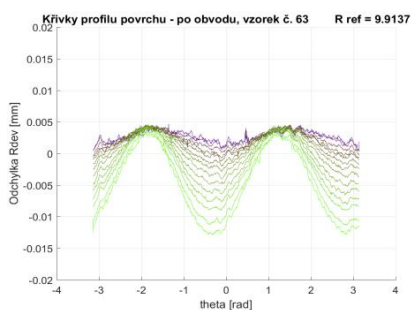
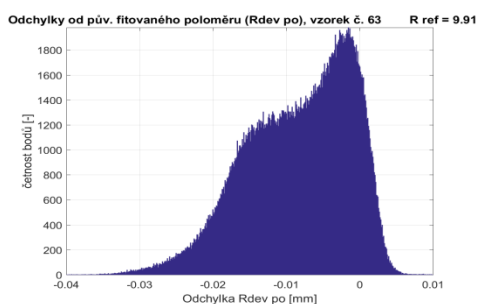
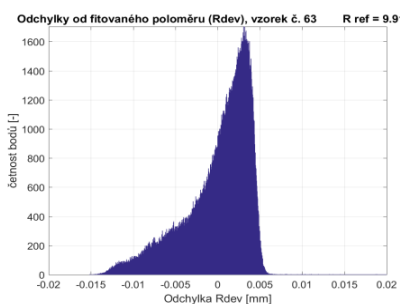
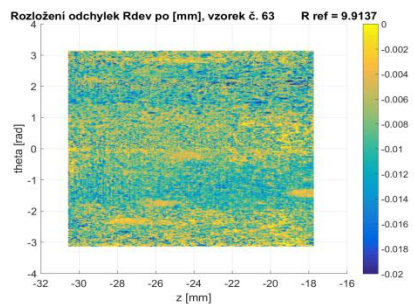
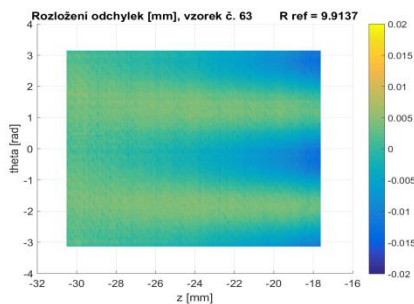
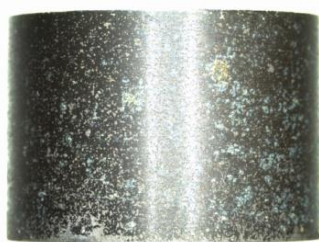




Obr. 84 Vzorek 61 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu



Obr. 85 Vzorek 62 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu



Obr. 86 Vzorek 63 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu



# NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST



**SÚRAO**

Správa úložišť radioaktivních odpadů

Dlážděná 6, 110 00 Praha 1

Tel.: 221 421 511, E-mail: [info@surao.cz](mailto:info@surao.cz)

[www.surao.cz](http://www.surao.cz)