

Technická zpráva číslo 291/2018

---

**TEST OMEZENÍ KOROZE UOS  
VYUŽITÍM DRENÁŽNÍ VRSTVY V  
ÚLOŽNÝCH VRTECH**

---

Autoři: D. Dobrev a kolektiv

ÚJV Řež, a. s.

**Praha, červen 2018**



SÚRAO

**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**

**Závěrečná zpráva**

*Evidenční číslo objednatele: SÚRAO TZ 291/2018*

*Evidenční číslo poskytovatele: PB-2018-ZZ-S0578-026-TestDrenazi*

**ŘEŠITELÉ:**

**ÚJV Řež, a. s.<sup>1</sup>, Technická univerzita v Liberci<sup>2</sup>, Ústav geoniky AV ČR, v. v. i.<sup>3</sup>, VŠCHT Praha<sup>4</sup>**

**Autoři: David Dobrev <sup>1</sup>**

Autorský kolektiv: I. Hančilová<sup>2</sup>, M. Hasal<sup>3</sup>, M. Hokr<sup>2</sup>, V. Kašpar<sup>1</sup>, M. Kouřil<sup>4</sup>, A. N. Mendoza Miranda<sup>1</sup>, M. Zuna<sup>1</sup>

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 technické řešení	SÚRAO	Ing. Antonín Vokál, CSc.		
Osoba objednatele zodpovědná za koordinaci projektu	SÚRAO	Ing. Antonín Vokál, CSc.		





SÚRAO



## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>Přípravné experimentální práce</b>	<b>16</b>
2.1	Příprava bobtnacích experimentů	16
2.1.1	Příprava bentonitových zkušebních těles	16
2.1.2	Varianta s drenáží	18
2.1.3	Varianta se simulací pukliny	19
2.2	Průběh experimentů	20
2.2.1	První série – bobtnání bentonitu do drenážní vrstvy	20
2.2.2	Druhá série – krátkodobé sycení	23
2.2.3	Třetí série – sycení simulovanou puklinou	26
2.3	Stanovení retenční křivky	27
<b>3</b>	<b>Experimenty s ocelovými vzorky v drenážní cele</b>	<b>29</b>
3.1	Příprava vzorků	29
3.1.1	Vzorky uhlíkové oceli před experimentem	29
3.1.2	Měření povrchu vzorků uhlíkové oceli optickým profilometrem	29
3.2	Instrumentace experimentu	33
3.2.1	Testování regulátorů teploty s topidly	34
3.3	Drenážní aparatury	36
3.4	Příprava korozní zkoušky	39
<b>4</b>	<b>Výsledky</b>	<b>41</b>
4.1	Měření teplot	41
4.2	Stanovení vlhkosti bentonitu po experimentu	45
4.3	Uhlíková ocel – vyhodnocení	52
<b>5</b>	<b>Vyhodnocení modelů s využitím naměřených dat</b>	<b>66</b>
5.1	Jednoduché porovnání výsledků modelů	66
5.2	Rozbor naměřených dat v kontextu s výsledky simulací	67
5.3	Kvalitativní porovnání výsledků simulací s měřenými daty	68
5.4	Vliv vstupních dat na výsledky simulací	70
5.5	Požadavky na data pro modely	73
5.6	Očekávané změny v modelu při přechodu do in-situ podmínek	74
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>76</b>
<b>7</b>	<b>Literatura</b>	<b>77</b>

## Seznam obrázků:

Obr. 1 Lisovací přípravky a použitý lis MEGA.....	17
Obr. 2 Nalisované vzorky bentonitu.....	17
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.....	18
Obr. 4 Instalace bentonitového válečku a drenážní vrstvy.....	18
Obr. 5 Bobtnací aparatury připojené k byretám.....	19
Obr. 6 Schéma aparatury s umělou puklinou. 8 – bentonit, 9 – rozváděcí mezikruží.....	19
Obr. 7 Sledování rozložení vlhkosti v drenážní vrstvě.....	20
Obr. 8 Homogenní saturace drenážní vrstvy.....	20
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).....	21
Obr. 10 Vlevo částečně očištěný vzorek po vyjmutí z bobtnací cely, vpravo odřezaná část vzorku.....	21
Obr. 11 Schéma rozřezání vzorku D1.....	21
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.....	24
Obr. 13 Distribuce vlhkosti (%) v bentonitovém zkušebním tělese po krátkodobém sycení (1 den), modře zvýrazněna vlhkost krajního segmentu, červeně pak vlhkost středového segmentu.....	25
Obr. 14 Distribuce vlhkosti (%) v bentonitovém zkušebním tělese po krátkodobém sycení (2 dny), modře zvýrazněna vlhkost krajního segmentu, červeně pak vlhkost středového segmentu.....	25
Obr. 15 Distribuce vlhkosti (%) v bentonitovém zkušebním tělese po krátkodobém sycení (4 dny), modře zvýrazněna vlhkost krajního segmentu, červeně pak vlhkost středového segmentu.....	25
Obr. 16 Bentonitové těleso D8 po vyjmutí z cely.....	26
Obr. 17 Distribuce vlhkosti v délce bentonitového tělesa D8. Řez č. 3 je umístěn pod modelovou puklinou.....	26
Obr. 18 Distribuce vlhkosti v délce bentonitového tělesa D9.....	27
Obr. 19 Aparatura pro stanovení retenční křivky.....	27
Obr. 20 Retenční křivka bentonitu BaM při suché objemové hmotnosti $1,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .....	28

Obr. 21 Převod kartézských souřadnic vzorku do válcových souřadnic, příklad pro vzorek č. 2.....	30
Obr. 22 Vybrané soubory dat pro podélný směr, příklad pro vzorek č. 2.....	30
Obr. 23 Křivky profilu povrchu pro podélný směr, příklad pro vzorek č. 2 .....	31
Obr. 24 Vybrané soubory dat po obvodu, příklad pro vzorek č. 2 .....	31
Obr. 25 Křivky po obvodu, příklad pro vzorek č. 2 .....	31
Obr. 26 Barevná mapa rozložení odchylek $R_{dev}$ , příklad pro vzorek č. 2 .....	32
Obr. 27 Překrytí naměřených dat homogenní sítí bodů – ilustrativní schéma .....	33
Obr. 28 instrumentace experimentu a) topné těleso, b) regulátor teploty, c) systém měření teploty .....	34
Obr. 29 Sestava pro měření povrchové teploty vzorků z uhlíkové oceli .....	34
Obr. 30 Měření povrchové teploty vzorků z uhlíkové oceli (vlevo měření infračerveným teploměrem, vpravo termočlánkem typu K) .....	35
Obr. 31 Průběh povrchových teplot v cele IA při vytápění na 70 °C.....	35
Obr. 32 Průběh povrchových teplot v cele IB při vytápění na 65 °C / 70 °C .....	35
Obr. 33 Průběh povrchových teplot v cele IIA při vytápění na 70 °C.....	36
Obr. 34 Průběh povrchových teplot v cele IIB při vytápění na 70 °C.....	36
Obr. 35 Svislý řez drenážní aparaturou IB – varianta s drenáží .....	37
Obr. 36 Svislý řez drenážní aparaturou IA – varianta se simulovanou puklinou .....	37
Obr. 37 Svislý řez drenážní aparaturou IIB – varianta s drenáží .....	38
Obr. 38 Svislý řez drenážní aparaturou IIA – varianta se simulovanou puklinou .....	38
Obr. 39 Jednotlivé kroky při sestavování experimentální aparatury s drenáží.....	39
Obr. 40 Odkysličování drenážních cel v rukavicovém boxu .....	40
Obr. 41 Celkový pohled na drenážní aparatury v rukavicovém boxu .....	41
Obr. 42 Průběhy teplot v modulech IA (bez drenáže – „puklina“; T1, T2) a IB (s drenáží; T3, T4) v průběhu celého experimentu. ....	42
Obr. 43 Průběhy záznamu teplot v modulu IB (s drenáží). Detailní zobrazení nárůstu teploty. ....	42
Obr. 44 Průběhy záznamu teplot v modulu IB (s drenáží) v průběhu celého experimentu. ...	43
Obr. 45 Průběhy záznamu teplot v modulu IA (bez drenáže). Detailní zobrazení nárůstu teploty .....	43
Obr. 46 Průběhy záznamu teplot v modulu IA (bez drenáže) v průběhu celého experimentu. ....	44
Obr. 47 Průběhy záznamu teplot v modulu IIA (bez drenáže) a IIB (drenáž) v průběhu celého experimentu. ....	44
Obr. 48 Ilustrační schéma rozřezávání bentonitových těles po délce na segmenty .....	45
Obr. 49 Schéma rozřezávání válečků z aparatury bez drenáže.....	46
Obr. 50 Schéma rozřezávání válečků z aparatury s drenáží.....	46

Obr. 51 Postup odběru a dělení bentonitových vzorků .....	47
Obr. 52 Vzorkování bentonitu .....	47
Obr. 53 Vzorek z uhlíkové oceli vyjmutý z bentonitového mezikruží .....	48
Obr. 54 Bentonitové segmenty v exsikátoru, ilustrační foto .....	48
Obr. 55 Graf průběhu vlhkosti v cele IA (bez drenážní vrstvy) .....	49
Obr. 56 Graf průběhu vlhkosti v cele IB (s drenážní vrstvou) .....	49
Obr. 57 Průběh průměrné vlhkosti po hloubce cely IB (průměrná vlhkost jednotlivých vrstev všech segmentů) .....	49
Obr. 58 Graf průběhu vlhkosti v cele IIA (bez drenážní vrstvy) .....	50
Obr. 59 Průběh průměrné vlhkosti po hloubce cely IA a IIA (průměrná vlhkost jednotlivých vrstev všech segmentů) .....	51
Obr. 60 Graf průběhu vlhkosti v cele IIB (s drenážní vrstvou) .....	51
Obr. 61 Průběh průměrné vlhkosti po hloubce cely IB a IIB (průměrná vlhkost jednotlivých vrstev všech segmentů) .....	52
Obr. 62 Vzorek č. 53 (cela IA) před a po čišťení ultrazvukem .....	52
Obr. 63 Vzorek č. 63 (cela IB) před a po čišťení ultrazvukem .....	53
Obr. 64 Vzorek č. 36 (cela IIA) před a po čišťení ultrazvukem .....	53
Obr. 65 Vzorek č. 18 (cela IIB) před a po čišťení ultrazvukem .....	53
Obr. 66 Povrch vzorku č. 53 (cela IA bez drenáže) po odstranění korozních produktů .....	54
Obr. 67 Povrch vzorku č. 63 (cela IB s drenáží) po odstranění korozních produktů .....	54
Obr. 68 Povrch vzorku č. 8 (cela IIA bez drenáže) po odstranění korozních produktů .....	54
Obr. 69 Povrch vzorku č. 13 (cela IIB s drenáží) po odstranění korozních produktů .....	55
Obr. 70 Průběh korozní rychlosti ocelových vzorků. Levá část – korozní cela se simulovanou puklinou (puklina je nad vzorkem č. 42). Pravá část – korozní cela s drenážní vrstvou .....	55
Obr. 71 Porovnání průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků a průměrné vlhkosti vrstev bentonitu cely IA .....	56
Obr. 72 Porovnání průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků a průměrné vlhkosti vrstev bentonitu cely IB .....	57
Obr. 73 Porovnání průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků a průměrné vlhkosti vrstev bentonitu cely IIA .....	57
Obr. 74 Porovnání průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků a průměrné vlhkosti vrstev bentonitu cely IIB .....	58
Obr. 75 Průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků cely IA (modrá barva) a IIA (červená barva) po čtvrt roce a po půl roce – korozní cely bez drenáže .....	58
Obr. 76 Průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků cely IA (modrá barva) a IIA (červená barva) po čtvrt roce (modrá) a po půl roce s korekcí na hmotnostní úbytek po čtvrt roce (červená), tedy mezi časovým úsekem 0,25 až 0,5 roku – korozní cely bez drenáže .....	59
Obr. 77 Průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků cely IB (modrá barva) a IIB (červená barva) po čtvrt roce – korozní cely s drenáží .....	60

Obr. 78 Průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků cely IB (modrá barva) a IIB (červená barva) po čtvrt roce (modrá) a po půl roce s korekcí na hmotnostní úbytek po čtvrt roce (červená), tedy mezi časovým úsekem 0,25 až 0,5 roku – korozní cely s drenáží .....	60
Obr. 79 Porovnání histogramů odchylek $R_{dev}$ pro vzorek č. 26 (druhá skupina) a č. 27 (první skupina) .....	61
Obr. 80 Porovnání histogramů odchylek $R_{dev}$ pro vzorek č. 26 (druhá skupina) a č. 27 (první skupina) .....	62
Obr. 81 Porovnání vzorku č. 47 cely IA před a po korozní zkoušce .....	62
Obr. 82 Porovnání vzorku č. 54 cely IA před a po korozní zkoušce .....	63
Obr. 83 Ilustrační obrázek rozložení výškových odchylek povrchu v ploše vzorku č. 7 cely IIA se skenem jeho povrchu ve 3D. Barevné škály nejsou ve stejném měřítku. ....	64
Obr. 84 Ilustrační obrázek rozložení výškových odchylek povrchu v ploše vzorku č. 11 cely IIA se skenem jeho povrchu ve 3D. Barevné škály nejsou ve stejném měřítku. ....	64
Obr. 85 Ilustrační obrázek rozložení výškových odchylek povrchu v ploše vzorku č. 36 cely IIA se skenem jeho povrchu ve 3D. Barevné škály nejsou ve stejném měřítku. ....	65
Obr. 86 Porovnání objemových úbytků na testovaných vzorcích .....	65
Obr. 87 Porovnání výsledků modelů (TUL vs. ÚGN, hydraulické modely bez drenáže a s drenáží s označením souřadnic bodů, ve kterých byly průběhy vyneseny) .....	66
Obr. 88 Porovnání výsledků modelů (TUL vs. ÚJV, termo-hydraulické modely bez drenáže a s drenáží) .....	67
Obr. 89 Porovnání průměrného stupně saturace v závislosti na vzdálenosti od topidla pro experiment s drenáží (modelový průběh vs. měřená data pro segmenty A až J) .....	69
Obr. 90 Porovnání průměrného stupně saturace v závislosti na vzdálenosti od topidla pro experiment bez drenáže (modelový průběh vs. měřená data pro segmenty B až I) .....	70
Obr. 91 Vliv různé propustnosti bentonitu na rozložení stupně saturace (průběh v závislosti na vzdálenosti od topidla v TH modelu s drenáží v čase 46 dní – vlevo a 91 dní – vpravo) ..	71
Obr. 92 Vliv různé tepelné vodivosti bentonitu na rozložení stupně saturace (průběh v závislosti na vzdálenosti od topidla v TH modelu s drenáží v čase 46 dní – vlevo a 91 dní – vpravo) .....	72
Obr. 93 Vliv parametru $P_0$ retenční křivky bentonitu na rozložení stupně saturace (průběh v závislosti na vzdálenosti od topidla v TH modelu s drenáží v čase 46 dní – vlevo a 91 dní – vpravo) .....	72
Obr. 94 Vliv parametru $\lambda$ retenční křivky bentonitu na rozložení stupně saturace (průběh v závislosti na vzdálenosti od topidla v TH modelu s drenáží v čase 46 dní – vlevo a 91 dní – vpravo) .....	73
Obr. 95 Vzorek 7 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	80
Obr. 96 Vzorek 8 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	81
Obr. 97 Vzorek 10 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	82
Obr. 98 Vzorek 11 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	83
Obr. 99 Vzorek 13 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	84
Obr. 100 Vzorek 14 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	85

Obr. 101	Vzorek 15 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	86
Obr. 102	Vzorek 18 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	87
Obr. 103	Vzorek 20 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	88
Obr. 104	Vzorek 21 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	89
Obr. 105	Vzorek 24 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	90
Obr. 106	Vzorek 25 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	91
Obr. 107	Vzorek 28 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	92
Obr. 108	Vzorek 30 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	93
Obr. 109	Vzorek 32 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	94
Obr. 110	Vzorek 34 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	95
Obr. 111	Vzorek 35 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	96
Obr. 112	Vzorek 36 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	97
Obr. 113	Vzorek 38 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	98
Obr. 114	Vzorek 39 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu .....	99
Obr. 115	Vzorek 41 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	100
Obr. 116	Vzorek 42 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	101
Obr. 117	Vzorek 45 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	102
Obr. 118	Vzorek 46 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	103
Obr. 119	Vzorek 47 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	104
Obr. 120	Vzorek 48 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	105
Obr. 121	Vzorek 49 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	106
Obr. 122	Vzorek 51 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	107
Obr. 123	Vzorek 52 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	108
Obr. 124	Vzorek 53 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	109
Obr. 125	Vzorek 54 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	110
Obr. 126	Vzorek 55 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	111
Obr. 127	Vzorek 56 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	112
Obr. 128	Vzorek 57 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	113
Obr. 129	Vzorek 58 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	114
Obr. 130	Vzorek 59 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	115
Obr. 131	Vzorek 60 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	116
Obr. 132	Vzorek 61 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	117
Obr. 133	Vzorek 62 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	118
Obr. 134	Vzorek 63 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu ....	119

## 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 .....	22
Tab. 2 Distribuce vlhkosti v segmentech bentonitového tělesa D1 po ukončení zkoušky bobtnání, vlhkost stanovena dle normy ČSN EN ISO 17892-1 .....	23
Tab. 3 Distribuce vlhkosti ve vybraných segmentech bentonitových zkušebních těles D5, D6 a D7 .....	24
Tab. 4 Chemická složení vzorků uhlíkové oceli 12022 .....	29
Tab. 5 Korozní rychlosti jednotlivých vzorků .....	55
Tab. 6 Materiálové parametry bentonitu využité ve srovnávacích modelech (srovnání průběhů TUL s výsledky ÚGN a ÚJV), kde $P_0$ je vstupní tlak, $\lambda$ tvarový koeficient, $k$ propustnost, $n$ porozita, $SI(t=0)$ počáteční stupeň saturace a $T(t=0)$ počáteční teplota. ....	67
Tab. 7 Hodnoty referenčních poloměrů před a po experimentu .....	78

## Seznam textových příloh:

Příloha 1 - Hodnoty referenčních poloměrů před a po experimentu .....	78
Příloha 2 – Výsledky profilometrie před a po experimentu .....	80

### Seznam použitých zkratk:

BaM	Bentonit a montmorillonit
FPM	Fluorový kaučuk
PE	Polyetylen
PTFE	Polytetrafluoretylen
TUL	Technická univerzita v Liberci
UOS	Ukládací obalový soubor
ÚGN	Ústav geoniky Akademie věd ČR, v.v.i.
ÚJV	ÚJV Řež, a. s.



## Abstrakt

Zpráva shrnuje 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 získané výsledky z experimentů.

## 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 results obtained from experiments.

## 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 SG Geotechnika a. s.; Progeo, s. r. o.; Chemcomex, 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 vnějšího obalu navržen robustní vnější obal z uhlíkové oceli. Oba dva koncepty mají své výhody a nevýhody. Nevýhodou konceptu s měděným vnějším obalem je to, že svary měděného přebalu mohou být více ovlivněny lidským faktorem než svary přebalu z uhlíkové oceli. Chybou lidského faktoru tak může dojít k přehlédnutí nedokonalého svaru snadněji v případě mědi než uhlíkové oceli. Na druhou stranu využití uhlíkového pro vnější

obal 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 vliv 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 závěrečné zprávy je shrnout 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 korozivzdorné 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*

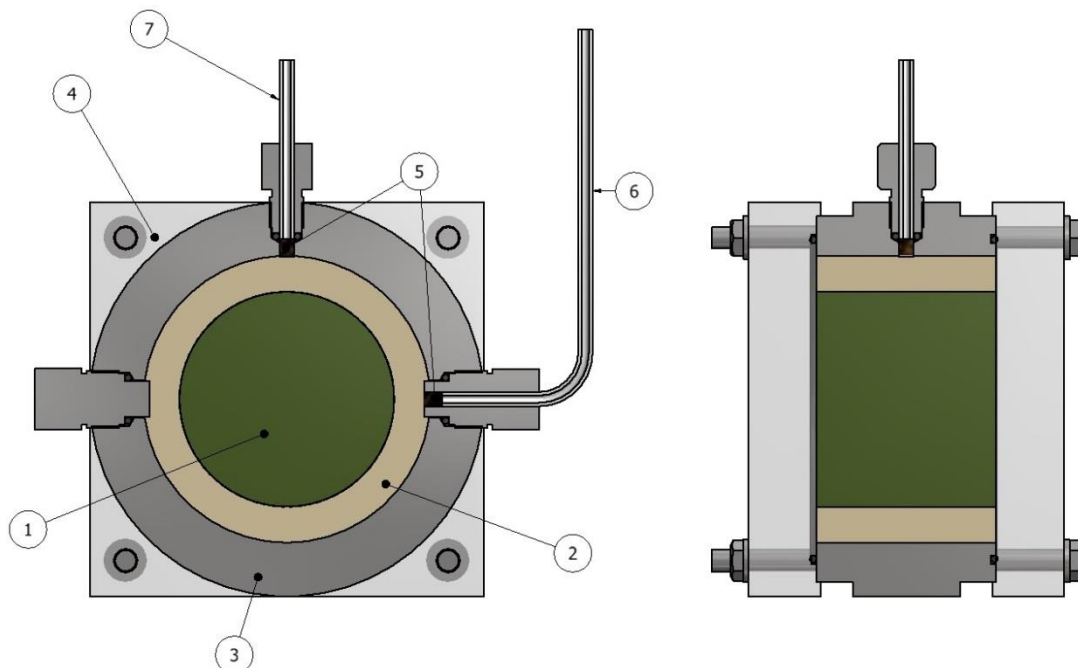
Bobtnací experimenty byly provedeny s dvěma různými typy těles. V prvním experimentu byl bentonit vylisován do tvaru plného válce o průměru 60 mm a délce 50 mm. V druhém experimentu byl bentonit vylisován do tvaru dutého válce o stejných rozměrech s vnitřním otvorem o průměru 20 mm; do vnitřního otvoru 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.

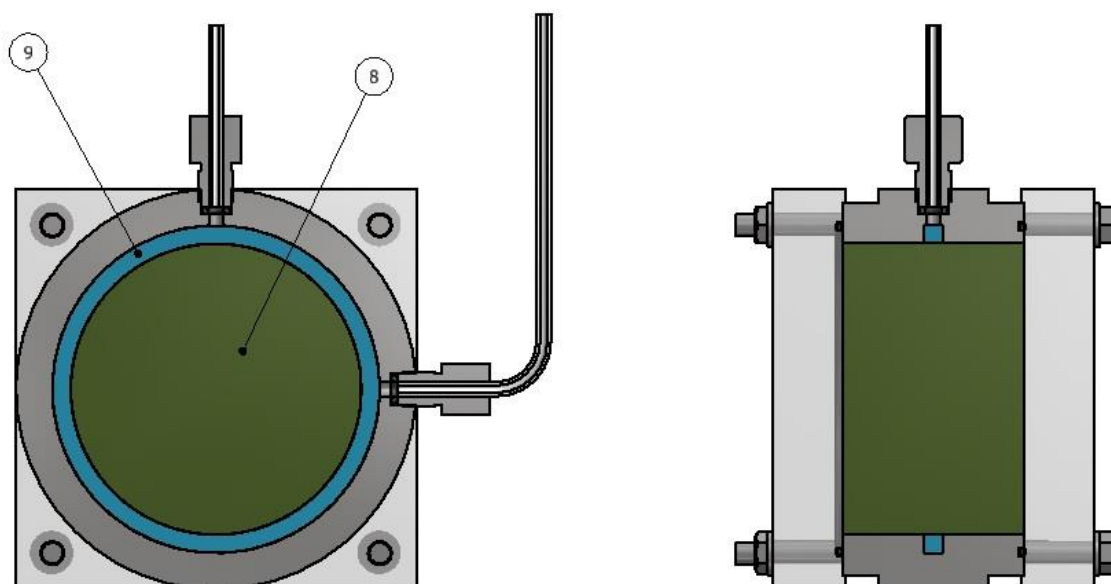
Celá sestava v průběhu experimentu je zobrazena na Obr. 5.



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

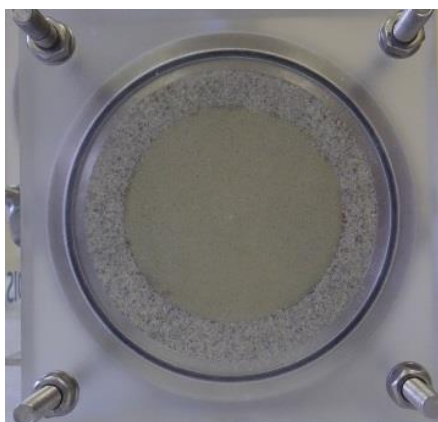
### 2.2.1 První série – bobtnání bentonitu do drenážní vrstvy

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).

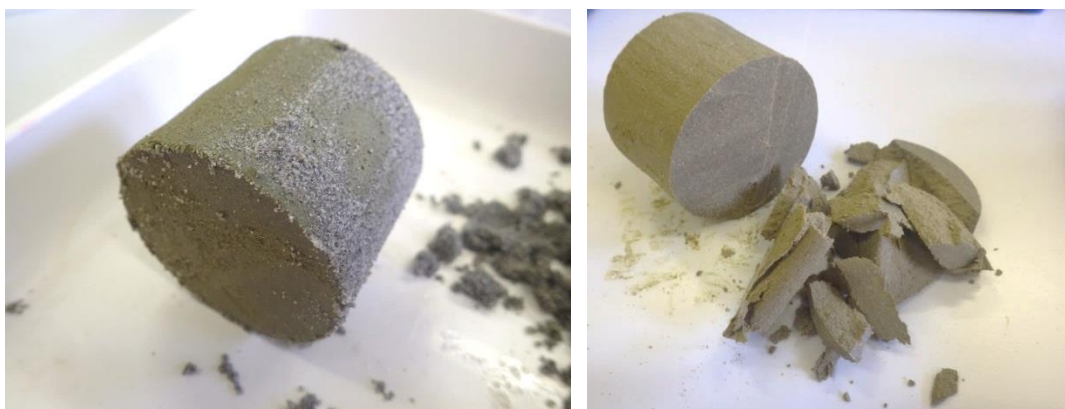






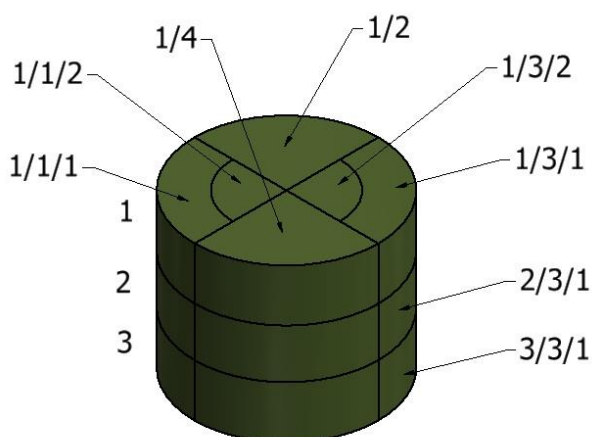
Obr. 9 Průběh sycení vzorků (vlevo nahoře před začátkem sycení, vpravo nahoře po nasycení drenážní vrstvy, vlevo dole po 3 dnech, vpravo dole po 7 dnech)

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	

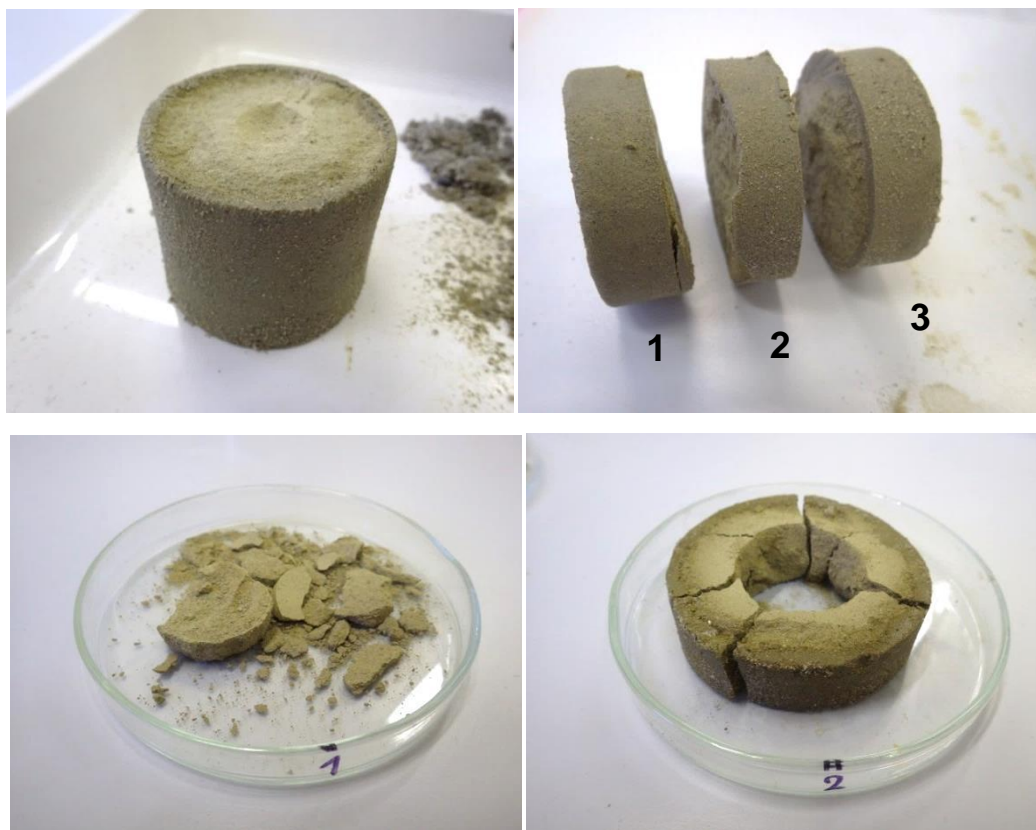
Tab. 2 Distribuce vlhkosti v segmentech bentonitového tělesa D1 po ukončení zkoušky bobtnání, vlhkost stanovena dle normy ČSN EN ISO 17892-1

	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

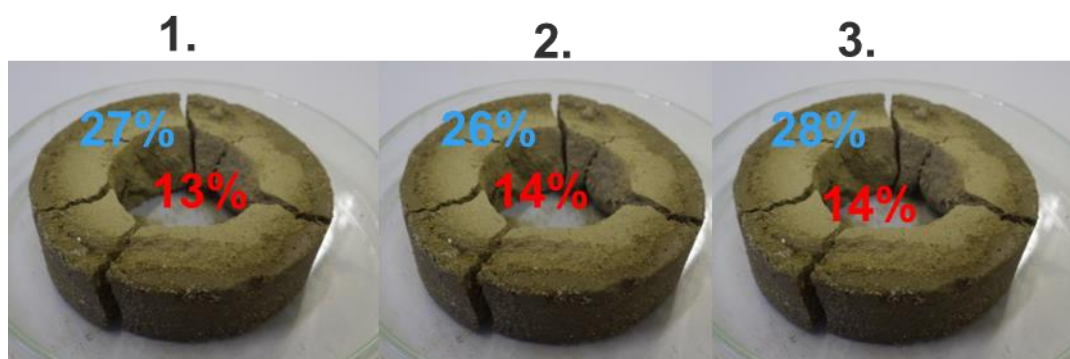
Stanovené hodnoty vlhkosti bentonitových vzorků jsou uvedené v Tab. 3.

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

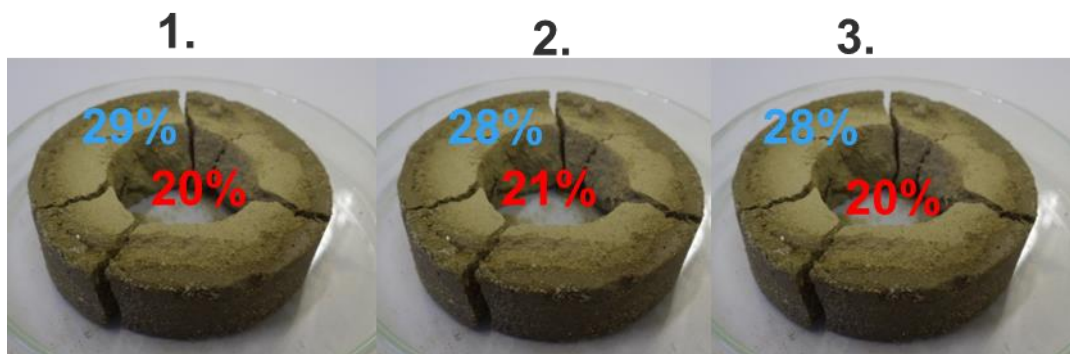
Vzorek	Čas sycení (dny)	Segmenty	Číslo řezu	Vlhkost (%)	Průměrná vlhkost (%)
D6	1	krajní	1	27,06	<b>27,02</b>
			2	26,45	
			3	27,56	
		středové	1	13,10	<b>13,71</b>
			2	13,76	
			3	14,27	
D7	2	krajní	1	28,95	<b>28,33</b>
			2	27,95	
			3	28,09	
		středové	1	19,85	<b>19,93</b>
			2	20,60	
			3	19,33	

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	

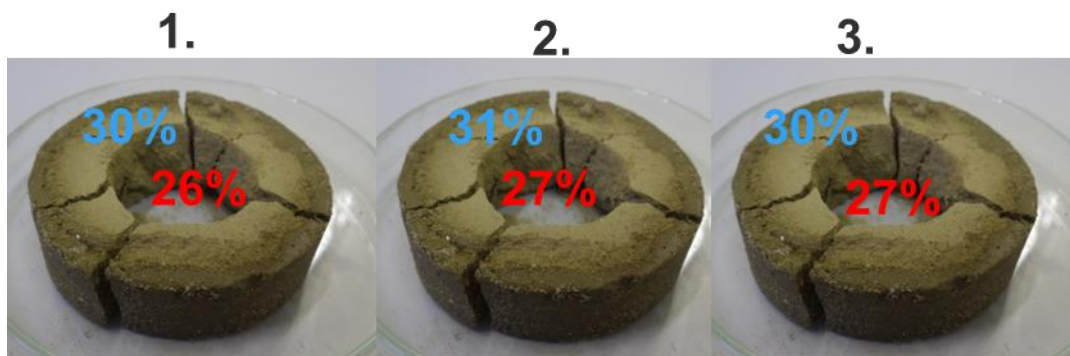
Na Obr. 13 až Obr. 15 jsou graficky zobrazeny hodnoty vlhkostí a jejich rozložení po 1,2 a 4 dnech sycení.



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

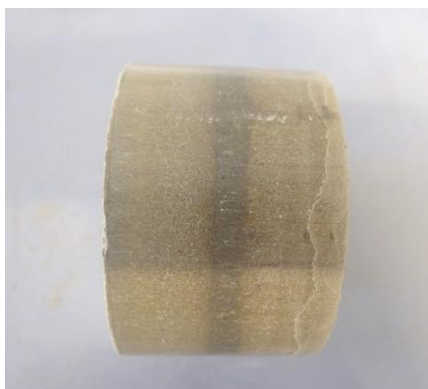


Obr. 15 Distribuce vlhkosti (%) v bentonitovém zkušebním tělese po krátkodobém sycení (4 dny), modře zvýrazněna vlhkost krajního segmentu, červeně pak vlhkost středového segmentu



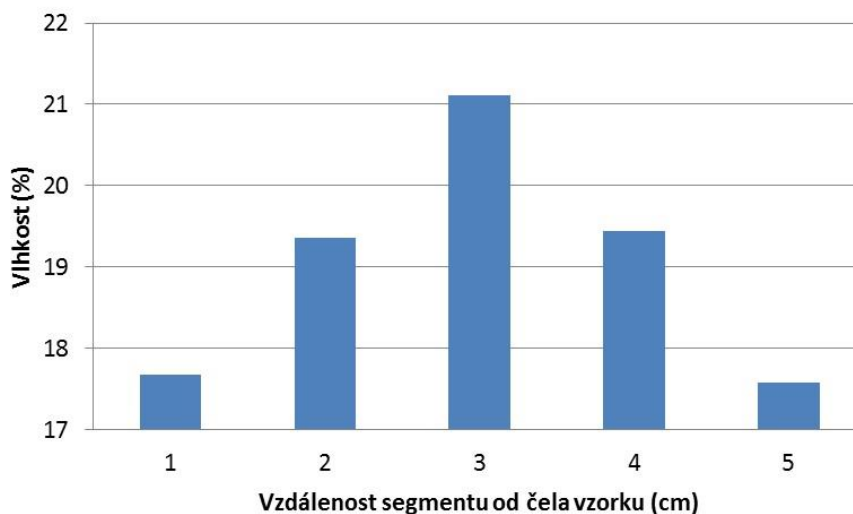
### 2.2.3 Třetí série – sycení simulovanou puklinou

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 vlhkost těchto řezů. Těleso po vyjmutí z cely je pro ilustraci zobrazeno na Obr. 16.



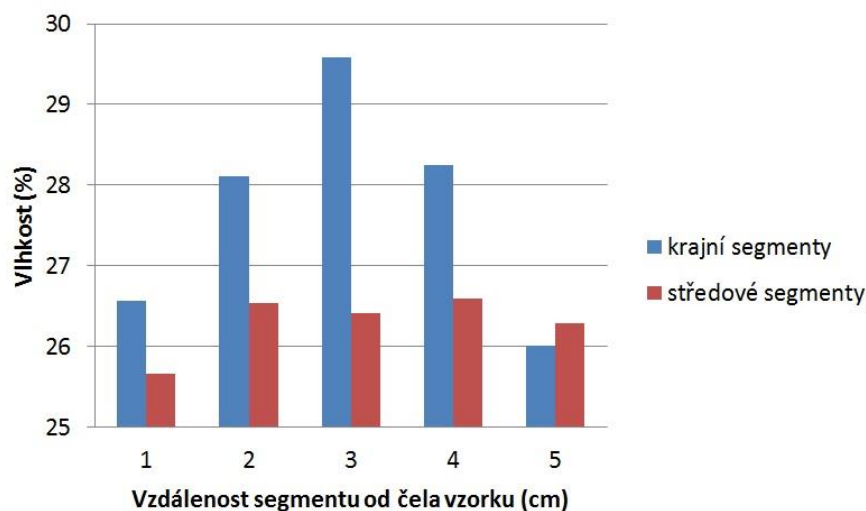
Obr. 16 Bentonitové těleso D8 po vyjmutí z cely

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

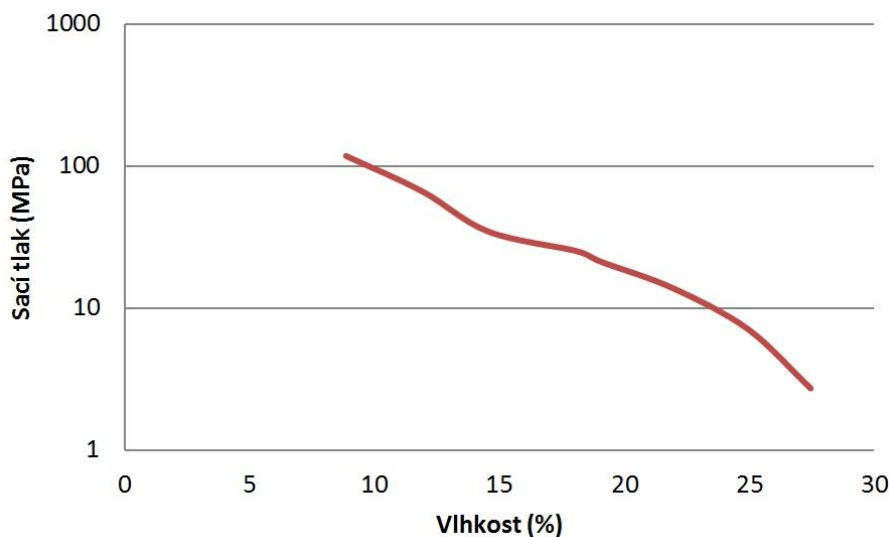
V rámci přípravy experimentů byla blokovou metodou stanovena retenční křivka bentonitu BaM o suché objemové hmotnosti  $1,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

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 třikrát 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> [%]	<b>Mn</b> [%]	<b>Si</b> [%]	<b>P</b> [%]	<b>S</b> [%]	<b>Cu</b> [%]	<b>Cr</b> [%]	<b>Ni</b> [%]	<b>Fe</b> [%]
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

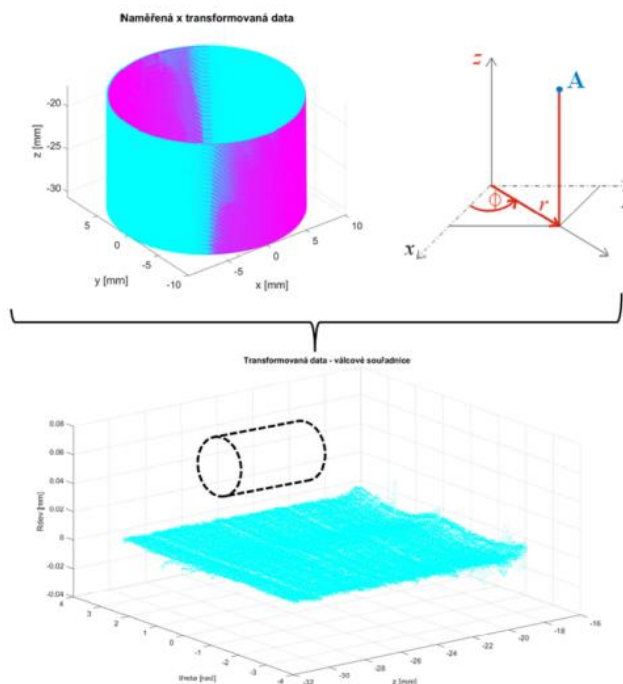
Geometrie vzorků uhlíkové oceli byla měřena pomocí optického profilometru RedLux před a po experimentu. Měření válcových vzorků se provádí jejími rotací kolem své osy a sonda se pohybuje podél vzorku přes měřenou vzdálenost. Souřadnice bodů na povrchu jsou zaznamenávány s určitou frekvencí. Při měření 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 μm. 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 μm. 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.

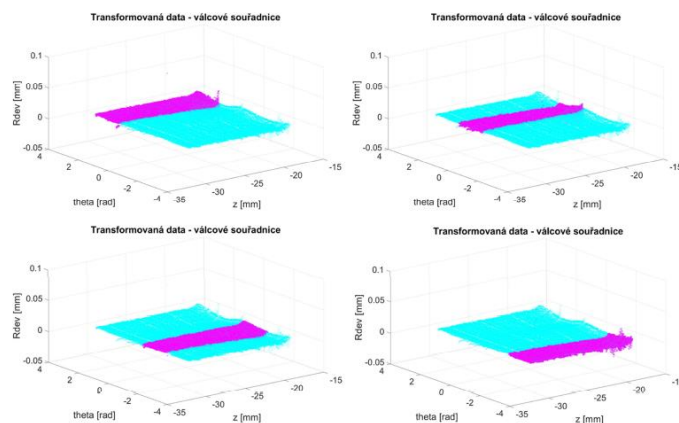
$$R_{dev} = r - R_{ref} \quad (1)$$



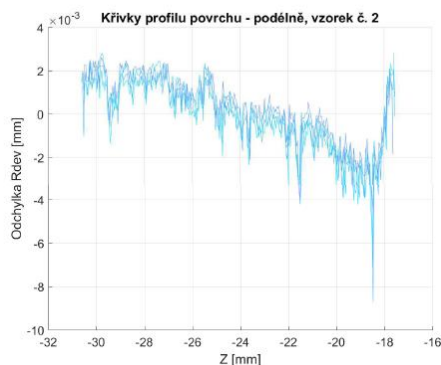
Obr. 21 Převod kartézských souřadnic vzorku do válcových souřadnic, příklad pro vzorek č. 2

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 bodů. 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.

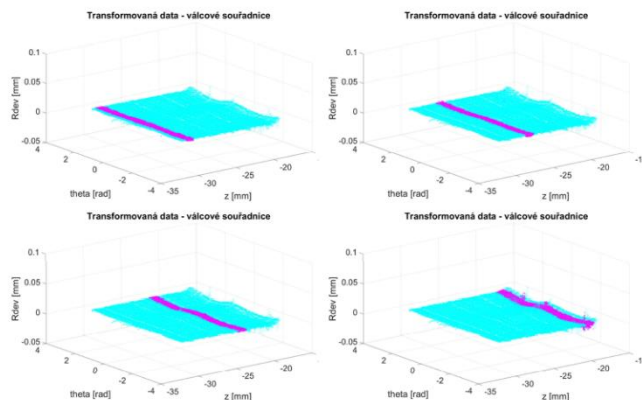


Obr. 22 Vybrané soubory dat pro podélný směr, příklad pro vzorek č. 2

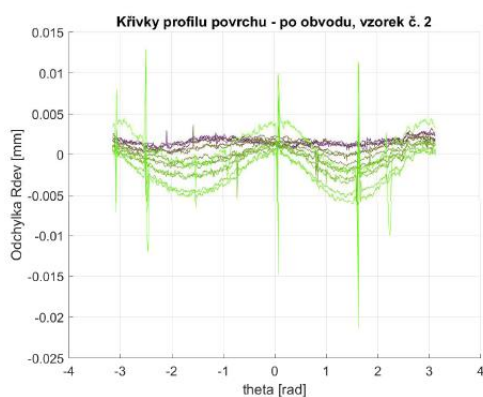


Obr. 23 Křivky profilu povrchu pro podélný směr, příklad pro vzorek č. 2

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

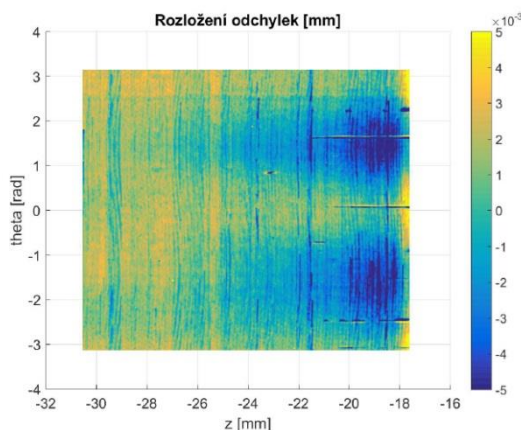


Obr. 24 Vybrané soubory dat po obvodu, příklad pro vzorek č. 2



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

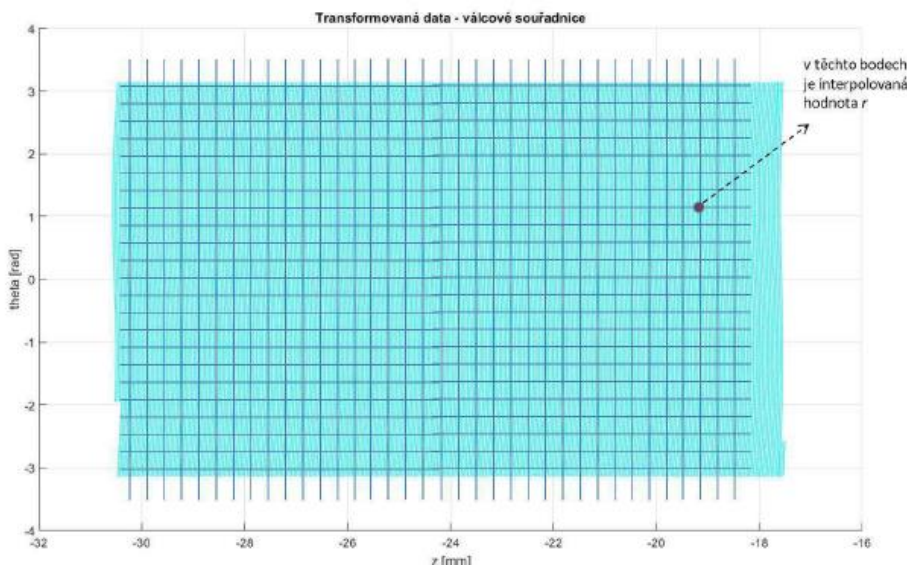
Stanovení změny povrchu vzorků se provádělo porovnáním data válcových ploch po experimentu a válcových ploch získaných před experimentem. Odchytky získaných údajů  $R_{dev\_po}$  se vypočítaly jako rozdíl referenčního poloměru  $R_{ref}$  (před experimentem) viz Příloha 1 **Chyba! Nebyl zadán název záložky.** 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 representuje 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.

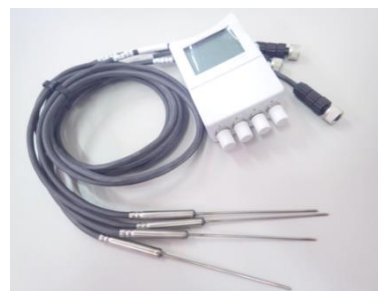




a)



b)



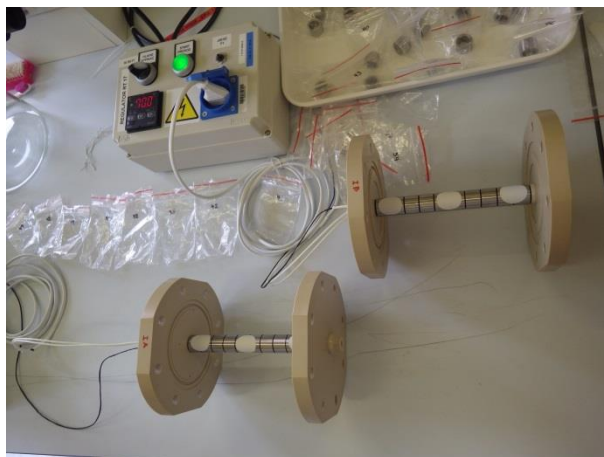
c)

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.

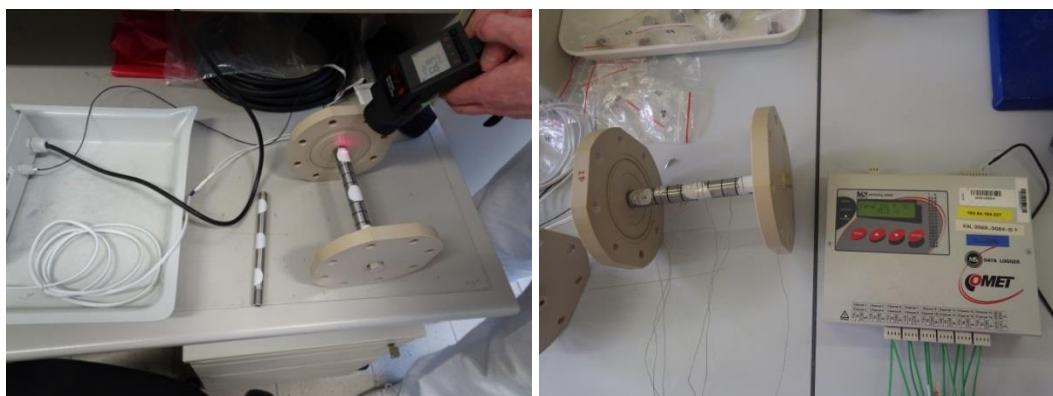
Do plastového čela drenážní aparatury byla našroubována středová trubka a na ni byly postupně navlečeny vzorky z uhlíkové oceli, které byly od sebe vždy odděleny FPM O-kroužky. Kroužky byly staženy k čelu pomocí plastové stahovací matice. Na vzorky byly poté nalepeny papírové terčičky o známé emisivitě 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). Řídící 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

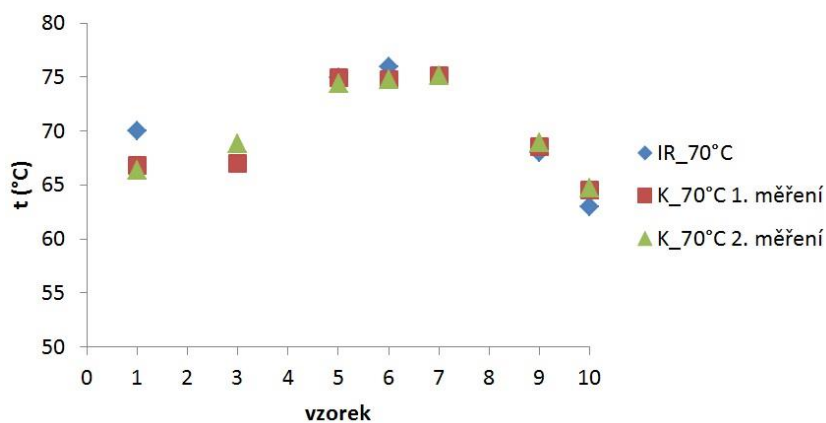
Na regulátoru teploty byla poté nastavena požadovaná teplota vytápění (70 °C, 65 °C), regulátor byl zapnut a ponechán zapnutý až do dosažení dané teploty. Poté byl na regulátoru spuštěn autokalibrační program, který by měl optimalizovat vytápění, aby bylo co možná nejrovnoměrnější.

Po ukončení autokalibračního programu byla na terčících 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.

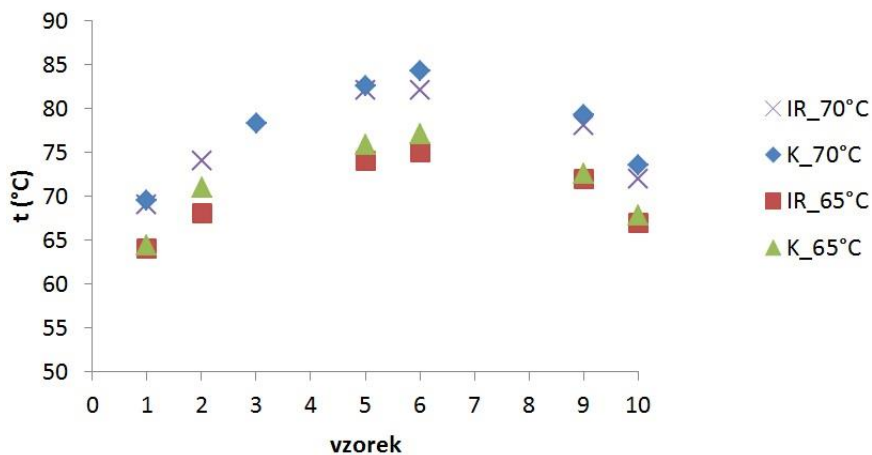


Obr. 30 Měření povrchové teploty vzorků z uhlíkové oceli (vlevo měření infračerveným teploměrem, vpravo termočlánkem typu K)

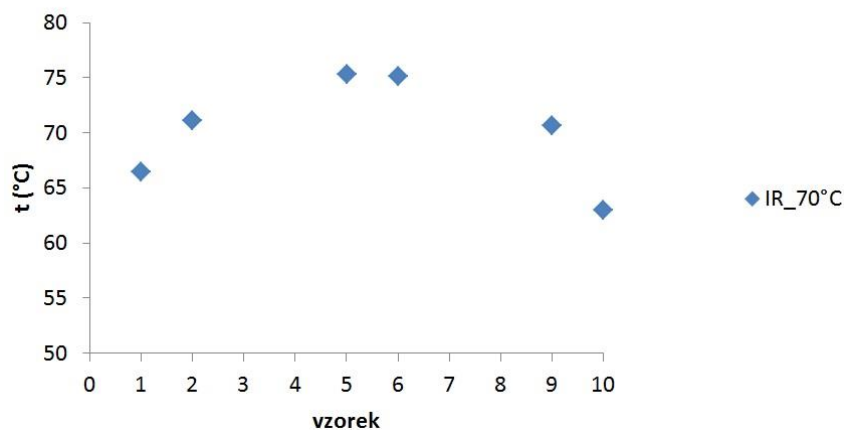
Výsledky měření povrchových teplot jsou shrnuty v následujících grafech (Obr. 31, Obr. 32, Obr. 33, Obr. 34).



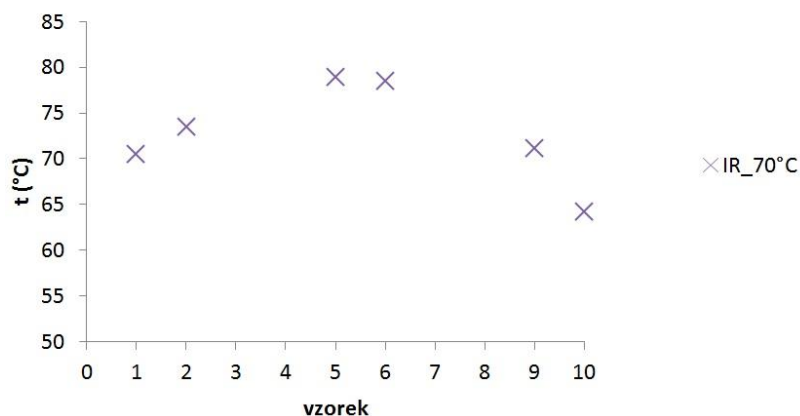
Obr. 31 Průběh povrchových teplot v cele IA při vytápění na 70 °C



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.

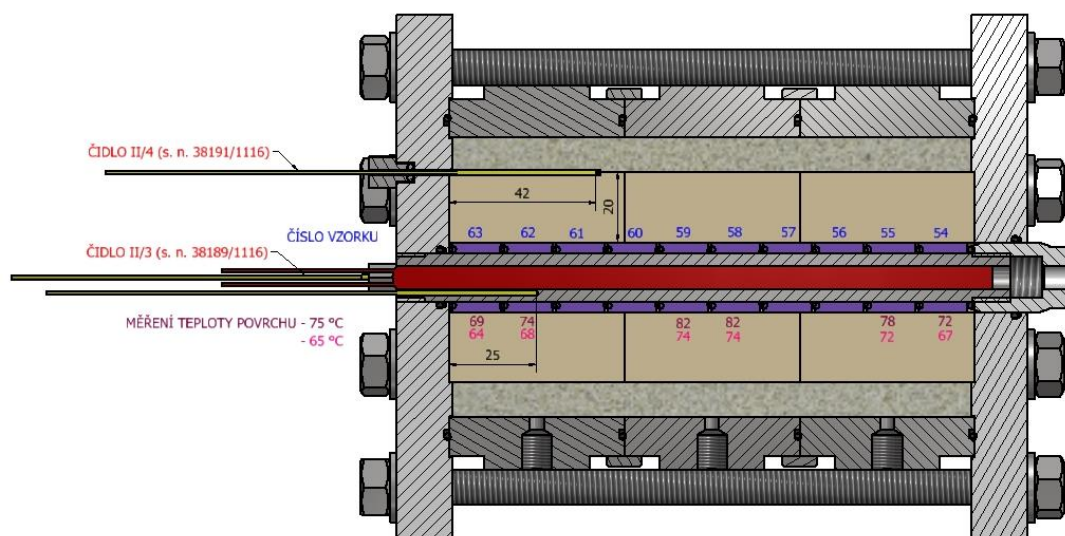
### 3.3 Drenážní aparatury

Obě sady drenážních aparatur byly provedeny ve dvou variantách – ve variantě s drenážní vrstvou a ve variantě se simulovanou puklinou. Tyto varianty jsou zobrazeny na Obr. 35, Obr. 36.



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

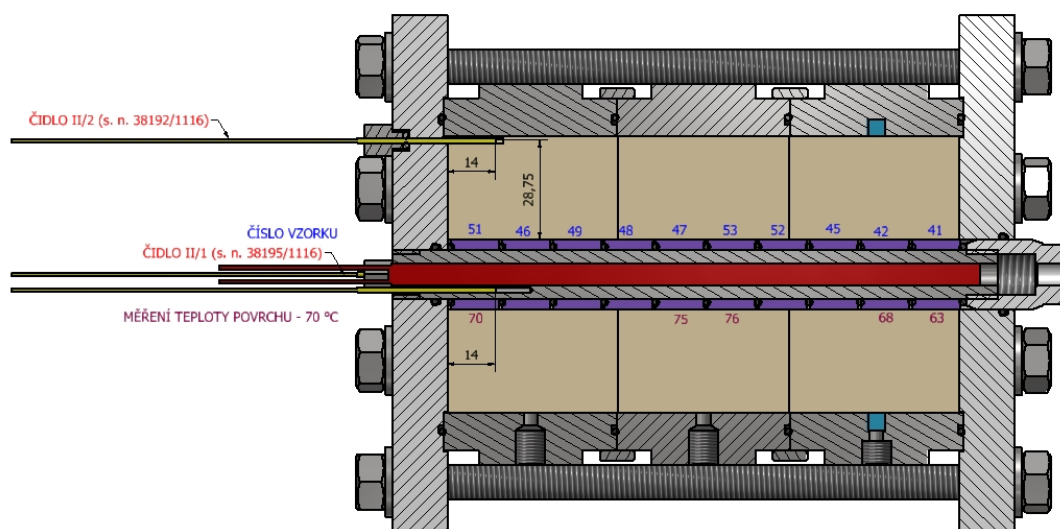
- REGULÁTOR RT 17
- TOPIDLO 5



Obr. 35 Svislý řez drenážní aparaturou IB – varianta s drenáží

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

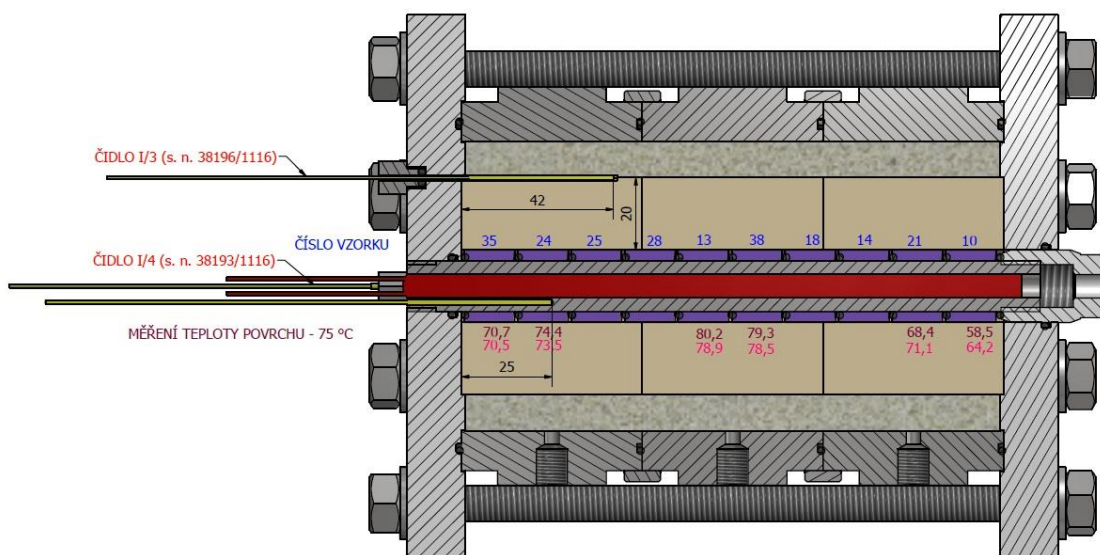
- REGULÁTOR RT2
- TOPIDLO 3



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

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

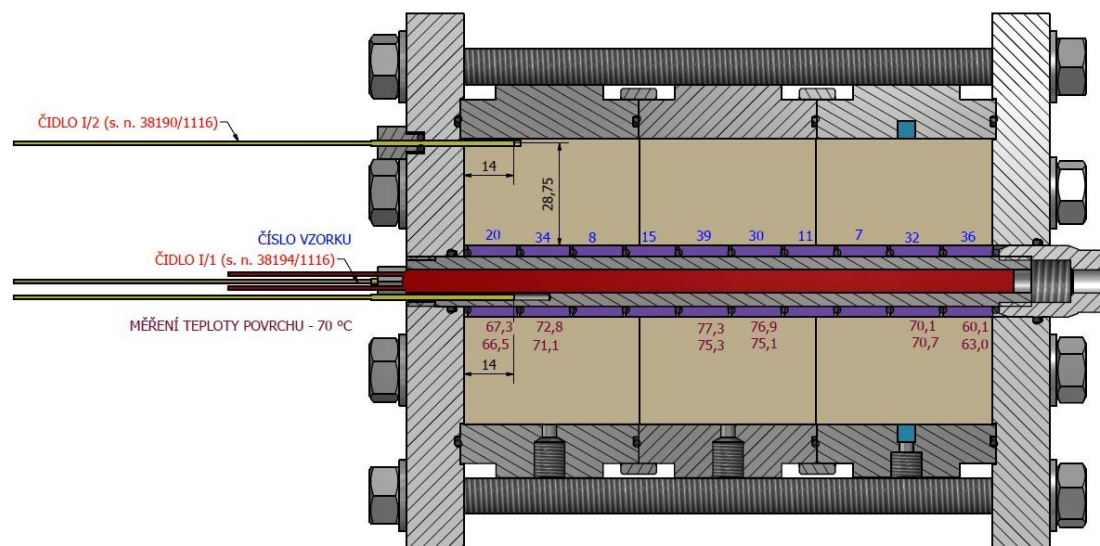
- REGULÁTOR RT 7
- TOPIDLO 4



Obr. 37 Svislý řez drenážní aparaturou IIB – varianta s drenáží

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

- REGULÁTOR RT20
- TOPIDLO 2



Obr. 38 Svislý řez drenážní aparaturou IIA – varianta se simulovanou puklinou

Do drážky po obvodu středového otvoru plastového víka byl vložen O-kroužek a do otvoru byla našroubována trubka z korozi-vzdorné 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 okružní s nalisovaným bentonitem, do kterého byl předem vyvrtán otvor o průměru shodném s vnějším průměrem vzorků z uhlíkové oceli. Nerezová okružní 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 zrní 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. 39.



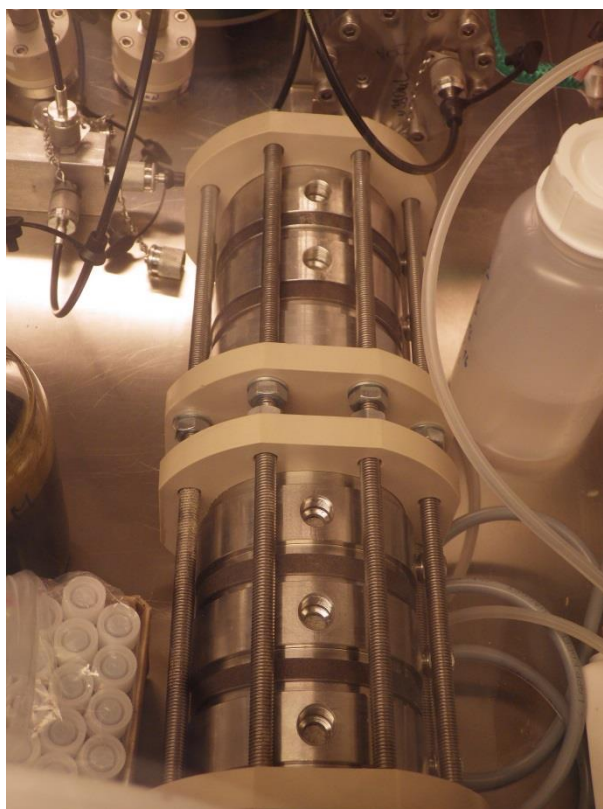
Obr. 39 Jednotlivé kroky při sestavování experimentální aparatury s drenáží

### 3.4 Příprava korozní zkoušky

Sestavené drenážní cely byly umístěny do rukavicového boxu MB 200B (MBRAUN GmbH, Německo) k odkysličení (viz Obr. 40). Pro rychlejší průběh byly z ocelových okruží



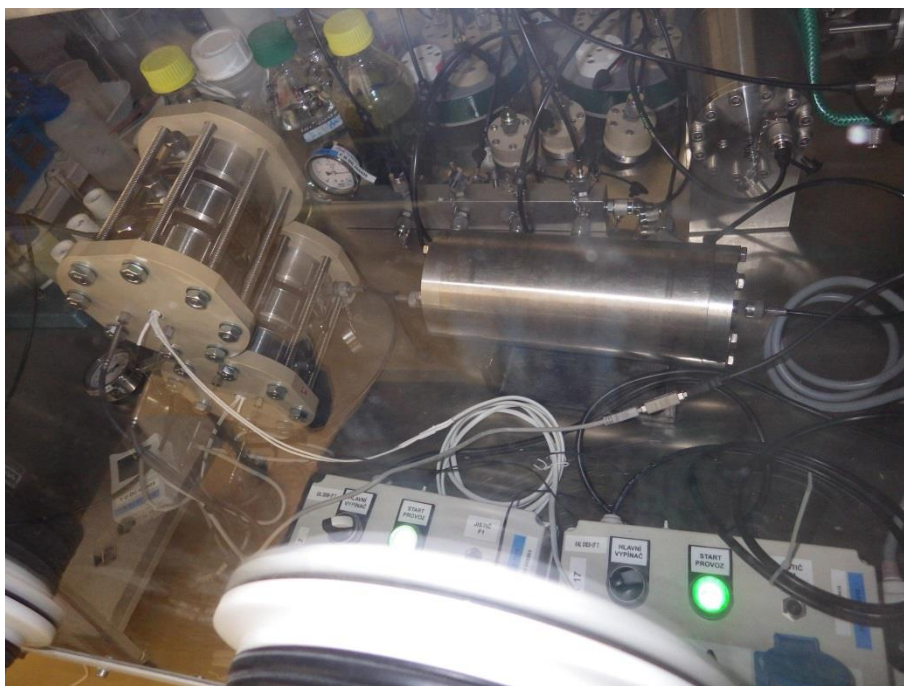
odšroubovány záslepky. K odkysličení byl do boxu umístěn také tlakový výměník plyn – voda. Aparatury i tlakový výměník byly v boxu ponechány po dobu tří týdnů.



*Obr. 40 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. 41.



Obr. 41 Celkový pohled na drenážní aparatury v rukavicovém boxu

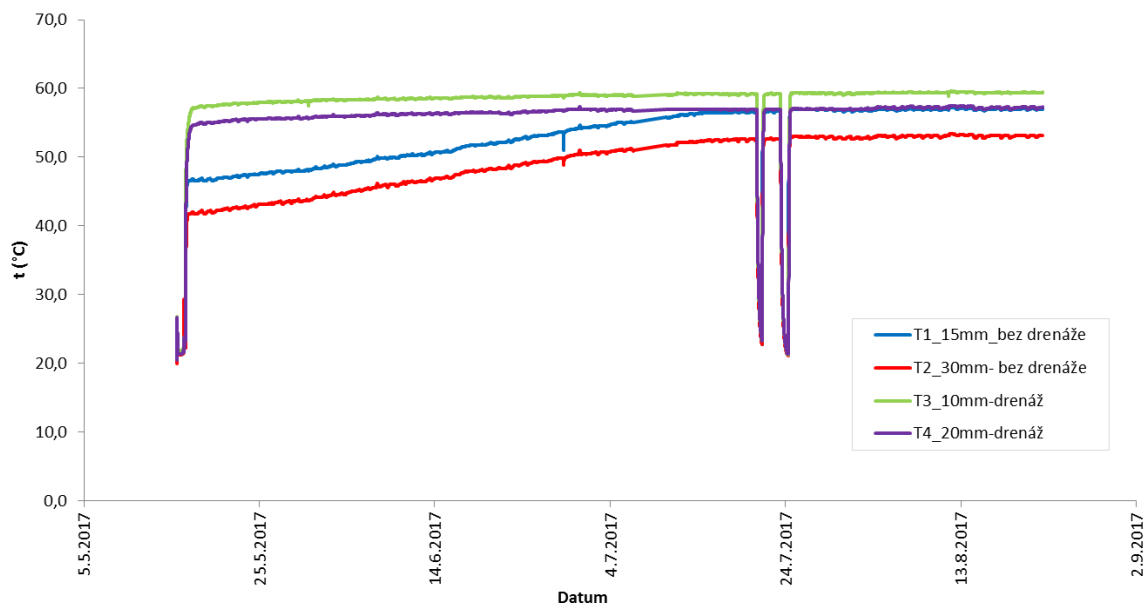
Regulátory teploty a teplota vytápění byla nastavena na 70 °C. Zároveň bylo zahájeno zaznamenávání teplot teploměrem s intervalem 5 minut. Po zahájení experimentu byl průběžně kontrolován tlak v systému a funkčnost regulátorů teploty a teploměru.

## 4 Výsledky

### 4.1 Měření teplot

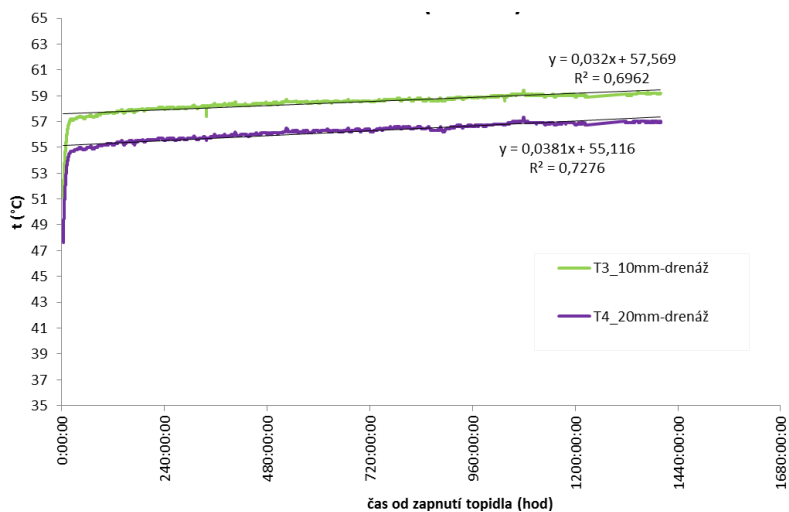
Po sestavení a umístění experimentu do anaerobního boxu byla zaznamenávaná data z instalovaných měřících teplotních čidel. U každého modulu byla instalována 2 měřící čidla se záznamem dat. Umístění jednotlivých měřících teplotních čidel je zobrazeno na Obr. 35 a Obr. 36.

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. 42.



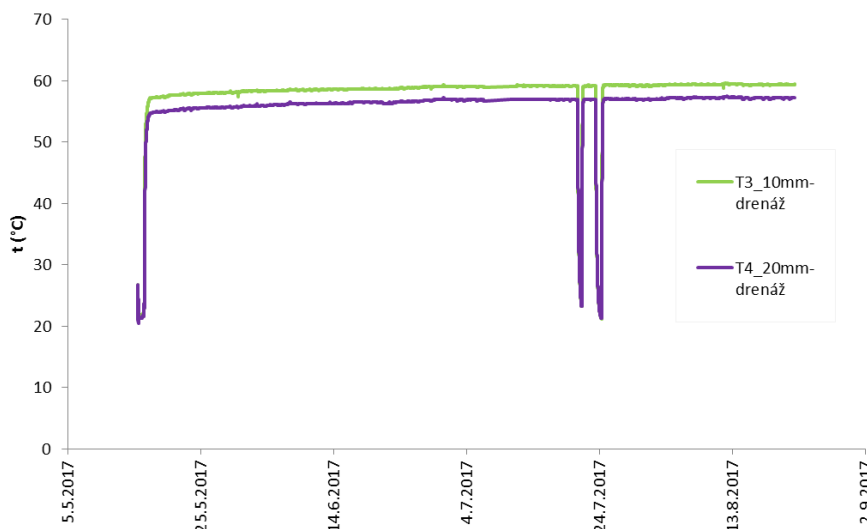
Obr. 42 Průběhy teplot v modulech IA (bez drenáže – „puklina“; T1, T2) a IB (s drenáží; T3, T4) v průběhu celého experimentu.

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. 41).



Obr. 43 Průběhy záznamu teplot v modulu IB (s drenáží). Detailní zobrazení nárůstu teploty.

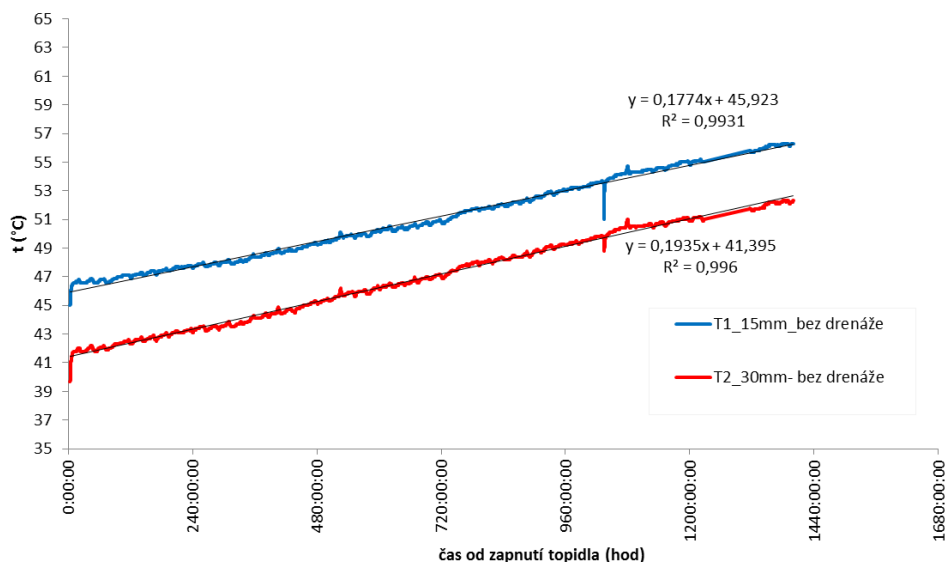
Následný růst teplot byl již velmi pozvolný a hodnoty teploty se na konci experimentu (po 98 dnech) pohybovaly kolem 59 °C (1 cm od topidla) a 57 °C u rozhraní bentonit/drenážní vrstva. Výrazné poklesy teploty pozorované ve dnech 21. 7. a 24. 7. byly způsobeny výpadky elektrického proudu a přerušením elektrického ohřevu. Po opětovném zapnutí ohřevu bylo dosaženo velmi rychle původních teplot (Obr. 44).



Obr. 44 Průběhy záznamu teplot v modulu IB (s drenáží) v průběhu celého experimentu.

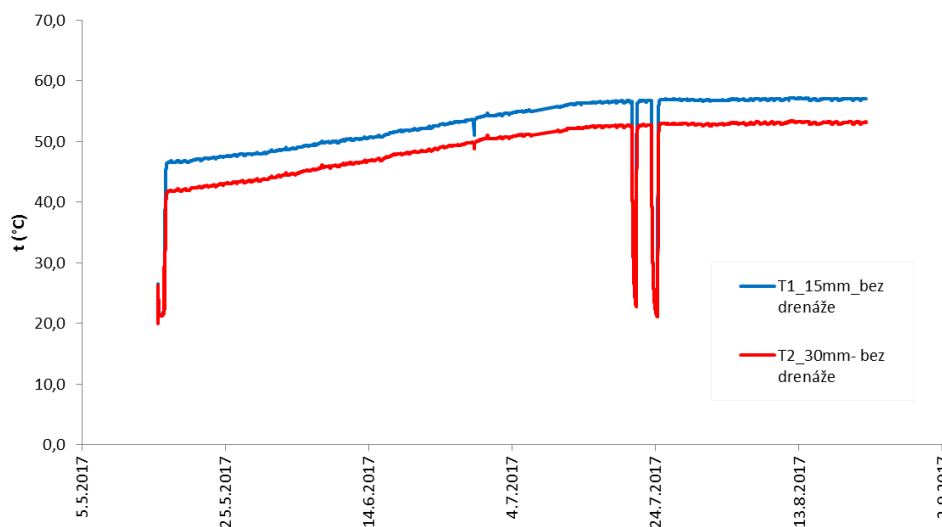
U modulu IA (bez drenážní vrstvy) byl oproti vzorku IB nárůst teploty výrazně pomalejší. Po počátečním rychlém nárůstu od zapnutí topidla se teplota ve středu (1,5 cm od topidla) bentonitového tělesa pohybovala kolem 46 °C a 41 °C na kontaktu bentonit/cela.

Na Obr. 45 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. 45 Průběhy záznamu teplot v modulu IA (bez drenáže). Detailní zobrazení nárůstu teploty

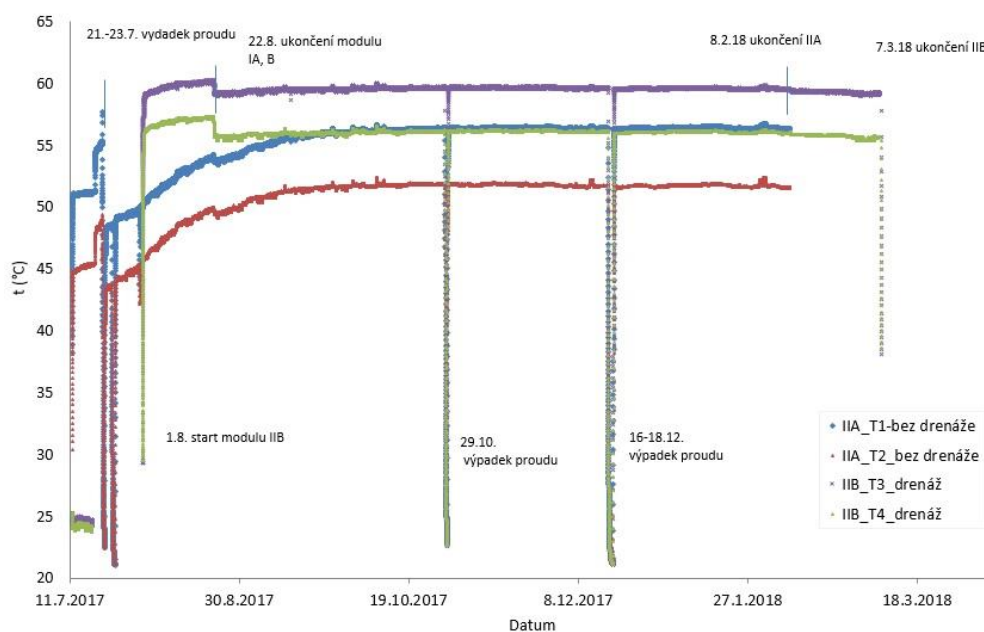
Ustálených teplot v modulu IA bylo dosaženo po více jak 58 dnech od zahájení experimentu. Teploty se na konci experimentu (po 98 dnech) pohybovaly kolem 57,1 °C (1,5 cm od topidla) a 53,1 °C u rozhraní bentonit/cela (3 cm od topidla) (viz Obr. 46).



Obr. 46 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). Po odstranění kyslíku z modulu v anaerobním boxu, bylo dne 11. 7. 2017 zahájeno syčení a ohřev experimentu IIA (bez drenáže). Experiment byl ukončen po 218 dnech (8.2.2018).

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. Topidlo bylo zapnuté dne 1.8.2017 a experiment byl ukončen po 212 dnech (7.3.2018). Průběhy teplot v obou aparaturách jsou vidět na Obr. 47.



Obr. 47 Průběhy záznamu teplot v modulu IIA (bez drenáže) a IIB (drenáž) v průběhu celého experimentu.



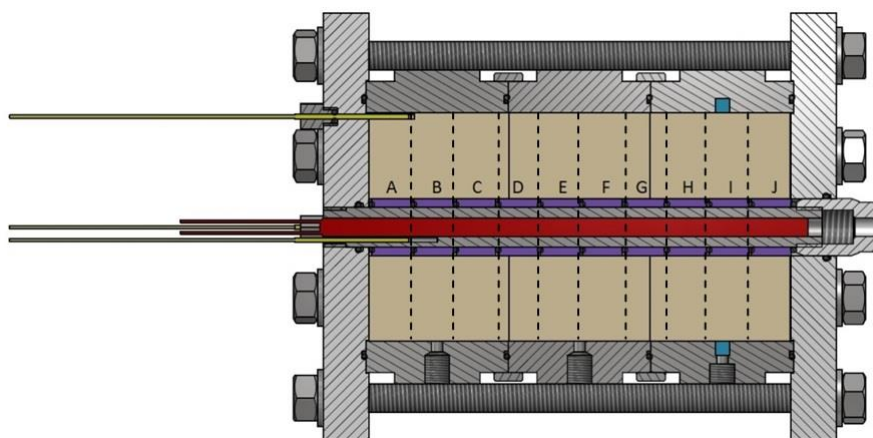
Po zahájení ohřevu modulu IIA (bez drenáže) byl jako v předešlých modulech pozorován rychlý nárůst teploty u středu segmentu na hodnoty kolem 51 °C na kontaktu bentonit/cela kolem 44 °C. Po 17. 7. je možné pozorovat nárůst teploty cca o 3 °C vyšší, což bylo způsobeno umístěním modulu IIA na modul IA (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. 47).

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).

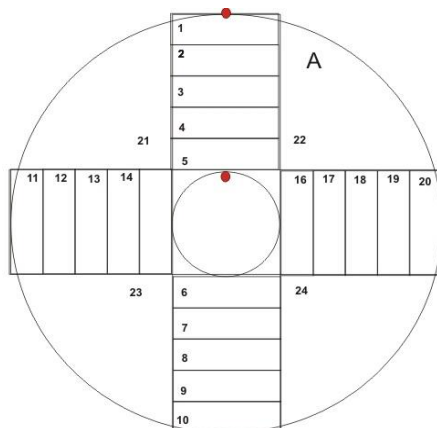
## 4.2 Stanovení vlhkosti bentonitu po experimentu

### 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. 48), 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. 49, Obr. 50). Tímto způsobem bylo možno postihnout změny vlhkosti jak po délce cely, tak po její šířce.

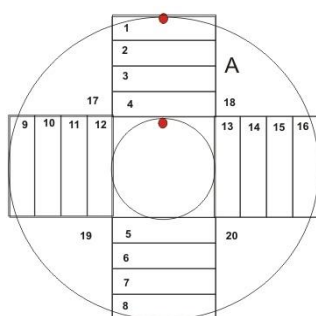


Obr. 48 Ilustrační schéma rozřezávání bentonitových těles po délce na segmenty



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. 49 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)  
 - výseče 4 \* 10 = 40 vz  
 celkem 200 vzorků

*Obr. 50 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. 51).



*Obr. 51 Postup odběru a dělení bentonitových vzorků*

Jednotlivé reprezentativní vzorky byly poté vloženy do předem připravených a zvážených očíslovaných hliníkových nádobek (viz Obr. 52) a byly okamžitě zváženy na analytických vahách AND GH-252 (A&D Instruments Ltd., GB).



*Obr. 52 Vzorkování bentonitu*

Zároveň s přípravou bentonitových vzorků byly z aparatur vyjímány jednotlivé ocelové vzorky nasazené na středových trubkách (viz Obr. 53).



*Obr. 53 Vzorek z uhlíkové oceli vyjmutý z bentonitového mezikruží*

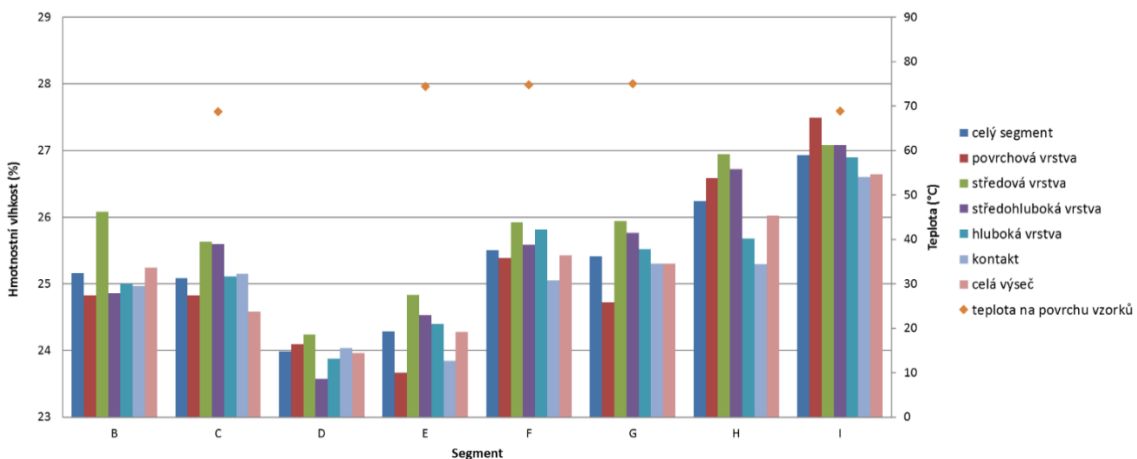
Pro každý bentonitový vzorek byla stanovena jeho vlhkost dle ČSN EN ISO 17892-1. Z těchto vlhkostí byly vypočítány průměrné vlhkosti jednotlivých vrstev a celých segmentů A až J.



*Obr. 54 Bentonitové segmenty v exsikátoru, ilustrační foto*

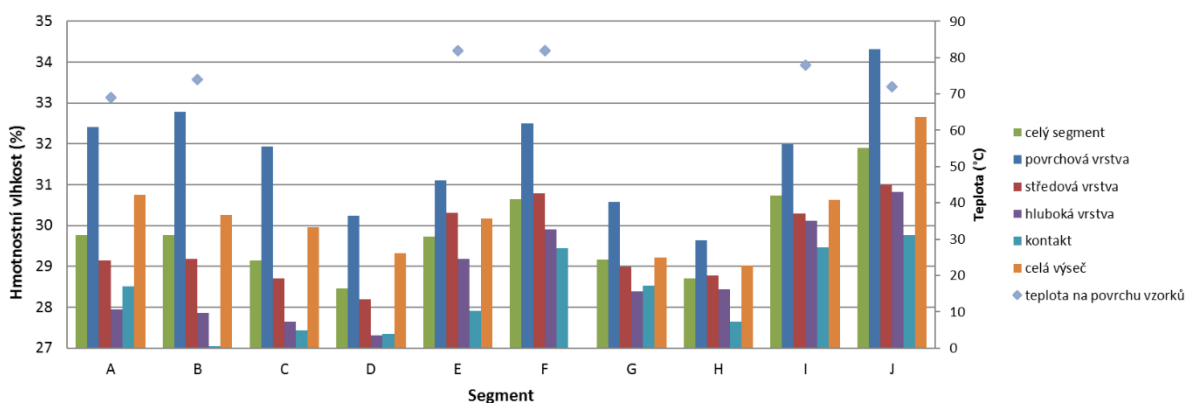
Výsledné grafy průběhů vlhkosti v bentonitu po šířce a délce obou drenážních cel jsou zobrazeny na Obr. 55, a Obr. 56.

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.



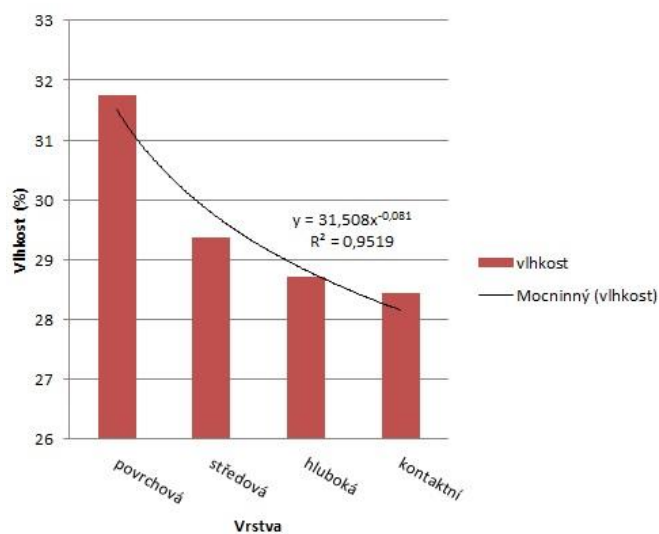
Obr. 55 Graf průběhu vlhkosti v cele IA (bez drenážní vrstvy)

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.



Obr. 56 Graf průběhu vlhkosti v cele IB (s drenážní vrstvou)

Radiální průběh vlhkosti v cele IB (viz Obr. 57) nicméně ukazuje, že syčení směrem od drenážní vrstvy ke středu aparatury probíhalo rovnoměrně.



Obr. 57 Průběh průměrné vlhkosti po hloubce cely IB (průměrná vlhkost jednotlivých vrstev všech segmentů)

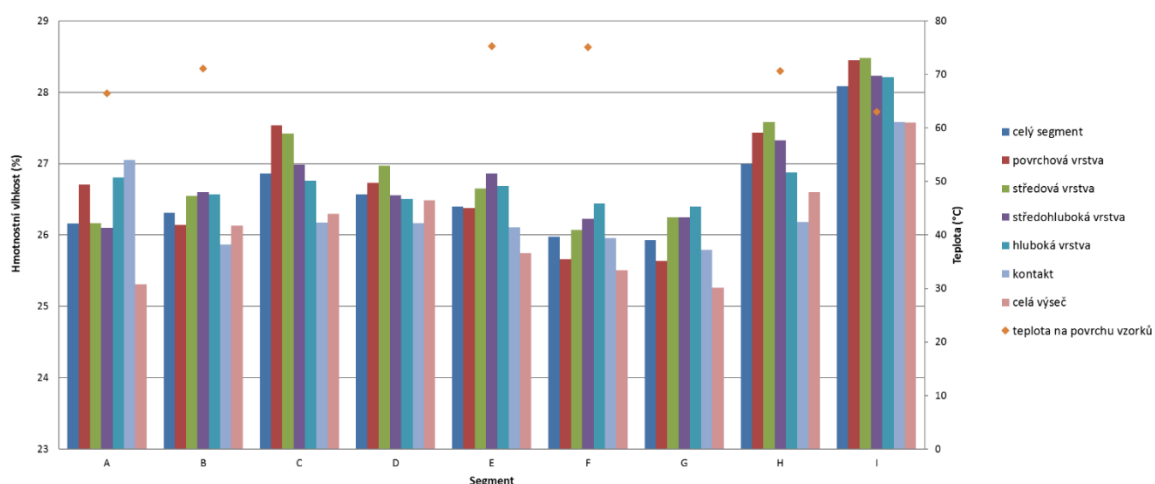


Porovnáme-li průměrné hodnoty distribuce vlhkosti v jednotlivých modulech ve střední a okrajové části, můžeme pozorovat, že u vzorků s drenáží (modul IB) se hodnoty vlhkosti na kontaktu s drenážní vrstvou pohybují kolem 32 %.

Výsledné grafy průběhů vlhkosti v bentonitu po délce a hloubce drenážních cel IIA a IIB jsou zobrazeny na Obr. 58, Obr. 59, Obr. 60, Obr. 61.

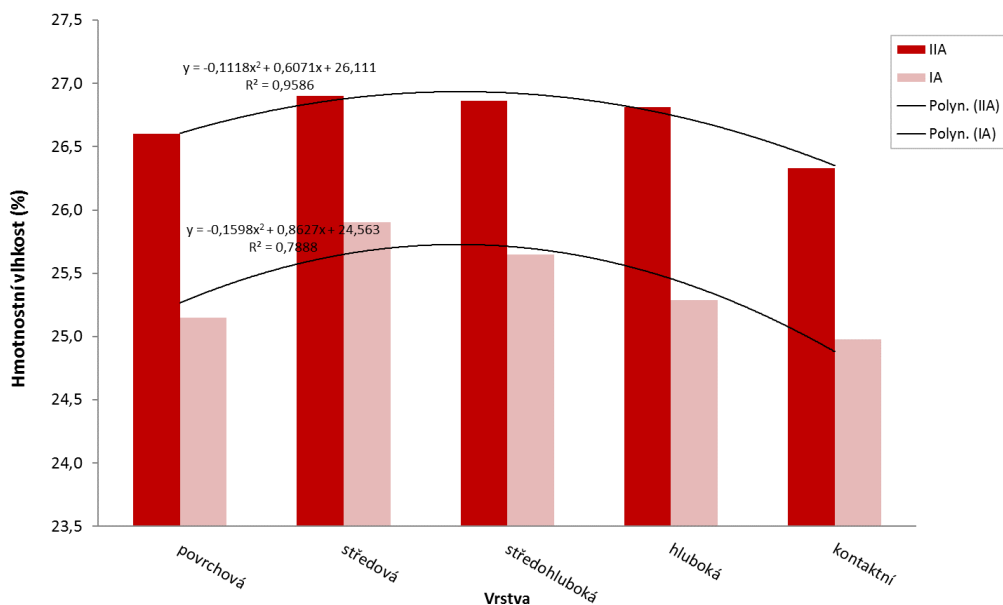
Z porovnání grafů vlhkostí první a druhé sady experimentů je zřejmé, že celková průměrná vlhkost v aparaturách IIA (26,6 %) a IIB (30,8 %) je mírně vyšší než v aparaturách IA (25,3 %) a IB (29,8 %). To je způsobeno delší expozicí druhé sady experimentů vodě (218, resp. 212 dní oproti 98 dnům).

V případě aparatury IIA je patrná mírně zvýšená vlhkost v segmentu I, odkud probíhalo syčení, a zároveň je patrný její pokles po délce aparatury. Stejně jako v případě aparatury IA nejsou odchylky vlhkosti po délce aparatury statisticky významné a je pravděpodobné, že byly částečně způsobeny nerovnoměrností vytápění danou konstrukcí topidla.



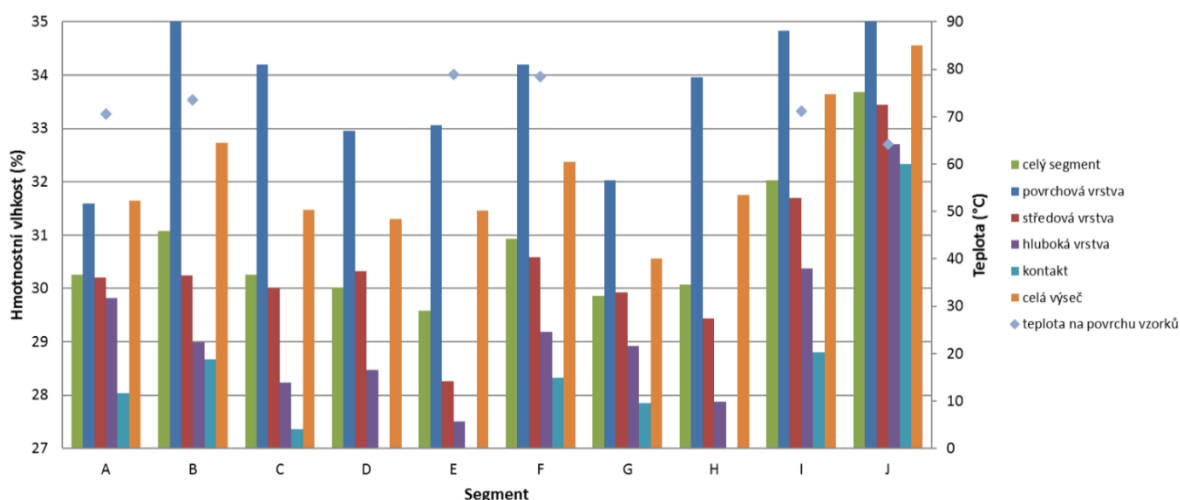
Obr. 58 Graf průběhu vlhkosti v cele IIA (bez drenážní vrstvy)

Stejně jako u aparatury IA byla v aparatuře IIA zjištěna vyšší vlhkost středových vrstev oproti vrstvě povrchové (Obr. 59). U aparatury IIA je možné sledovat nárůst vlhkosti s ohledem na dobu syčení modulu.



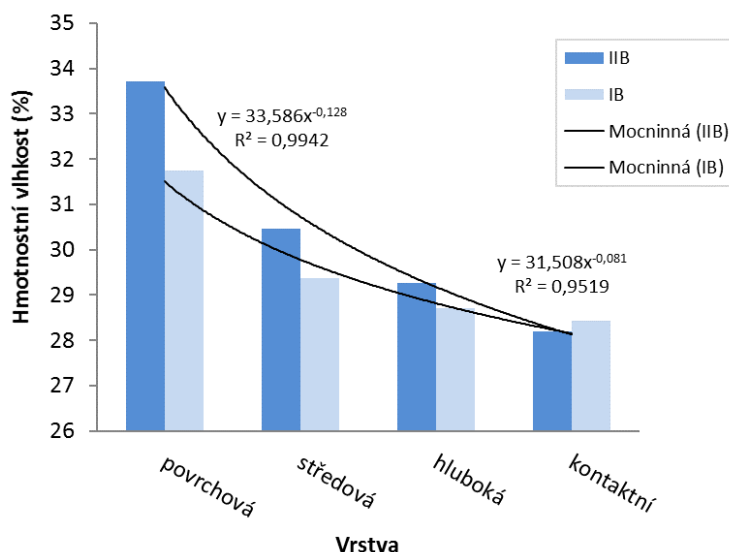
Obr. 59 Průběh průměrné vlhkosti po hloubce cely IA a IIA (průměrná vlhkost jednotlivých vrstev všech segmentů)

I v případě aparatury IIB (s drenážní vrstvou) je vlhkost po celé délce aparatury rovnoměrná se statisticky nevýznamnými odchylkami. Zajímavá je zvýšená vlhkost v segmentech J a I, což naznačuje, že segment J nedoléhal dokonale na plastové čelo aparatury a sytící voda pronikla do tohoto rozhraní a odtud dále do segmentu I.



Obr. 60 Graf průběhu vlhkosti v cele IIB (s drenážní vrstvou)

Na Obr. 61 je zobrazen radiální průběh vlhkosti v cele IIB, který vykazuje podobný trend s radiálním průběhem vlhkosti v cele IB. U obou modulu IB a IIB je možné sledovat maximální saturaci v kontaktu s drenážní vrstvou s postupným poklesem směrem k topidlu. Tyto rozdíly jsou u modulů s drenážní vrstvou výraznější oproti modulům bez drenáže (IA, IIA).

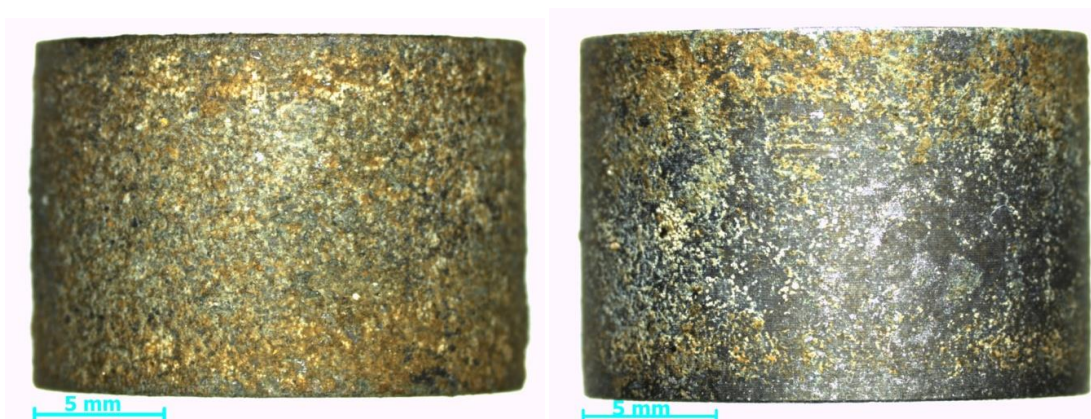


Obr. 61 Průběh průměrné vlhkosti po hloubce cely IB a IIB (průměrná vlhkost jednotlivých vrstev všech segmentů)

V souladu s očekáváním byla zjištěna vyšší průměrná vlhkost u bentonitu v cele IIB (s drenáží) (30,8 %) oproti cele IIA (bez drenáže) (26,6 %).

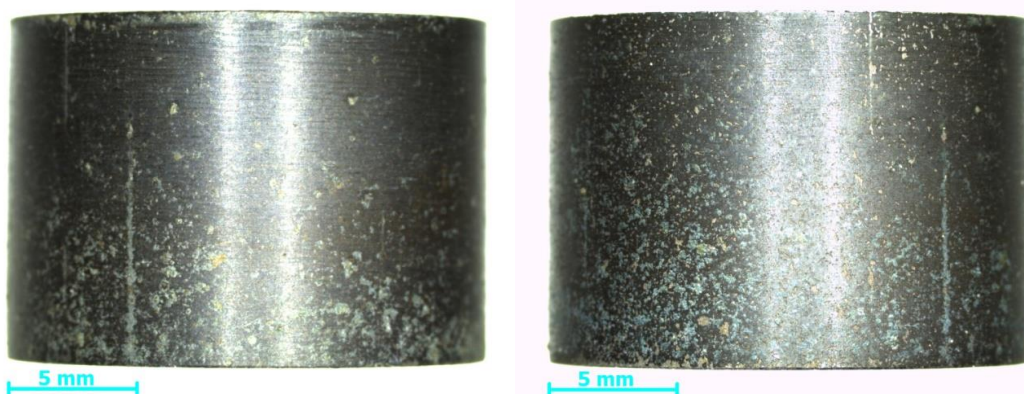
### 4.3 Uhlíková ocel – vyhodnocení

Vzorky uhlíkové oceli byly po ukončení experimentu v celách IA, IB, IIA a IIB vyfotografovány mikroskopem Leica S6 D (Leica Microsystems, Švýcarsko) (viz příklad na Obr. 62 až Obr. 65) 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. 62 Vzorek č. 53 (celá IA) před a po čišťení ultrazvukem

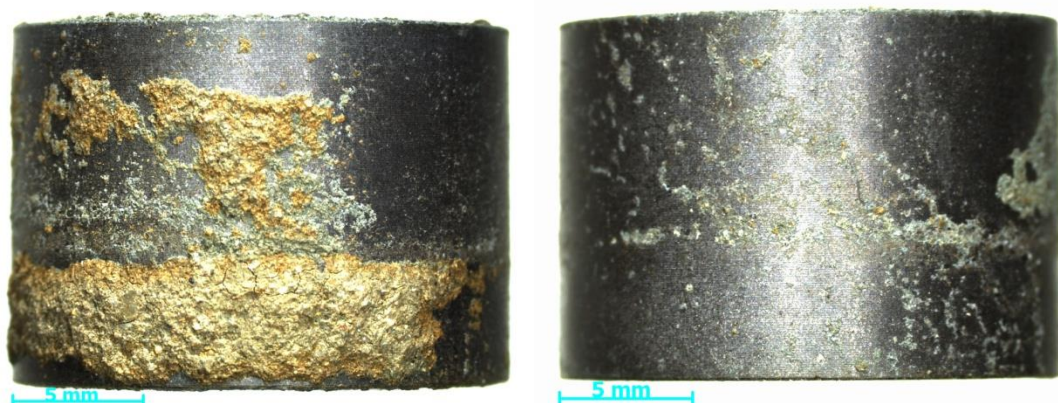




Obr. 63 Vzorek č. 63 (cela IB) před a po čišťení ultrazvukem



Obr. 64 Vzorek č. 36 (cela IIA) před a po čišťení ultrazvukem

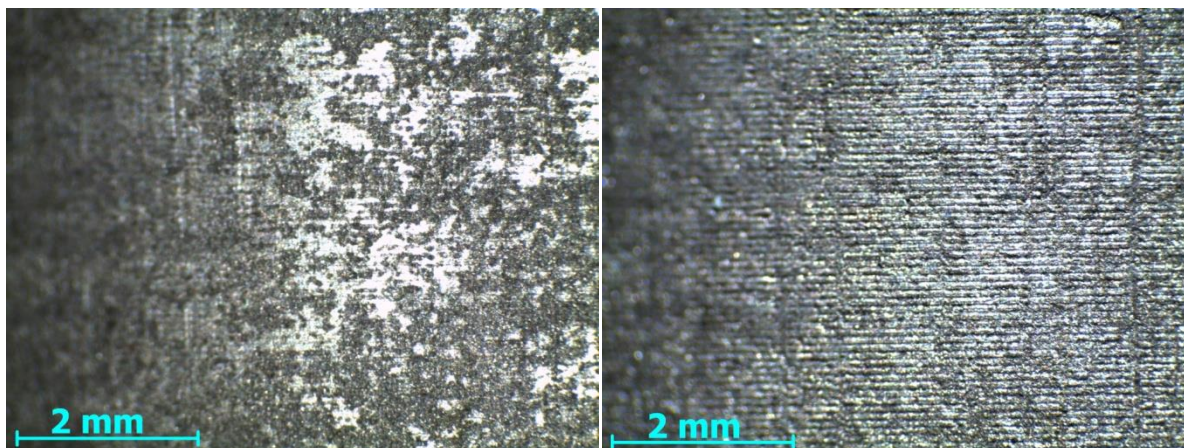


Obr. 65 Vzorek č. 18 (cela IIB) před a po čišťení ultrazvukem

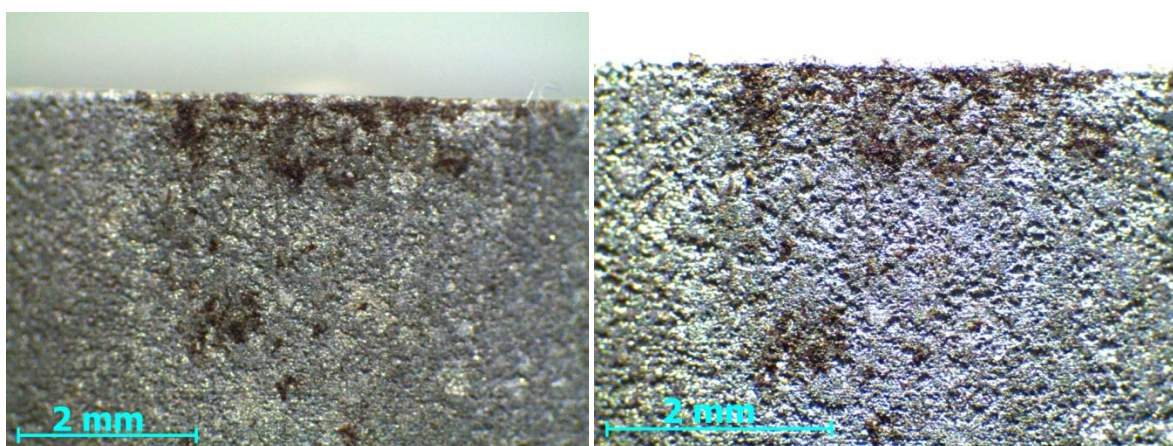
Korozní rychlost ocelových vzorků byla stanovena přes hmotnostní úbytky dle normy ČSN ISO 8407. Pro tento účel se použil roztok kyseliny chlorovodíkové s hexamethylen-tetraminem.

Po ukončení odmoření byl každý vzorek opět vyfotografován (viz příklad na Obr. 66 až Obr. 69).

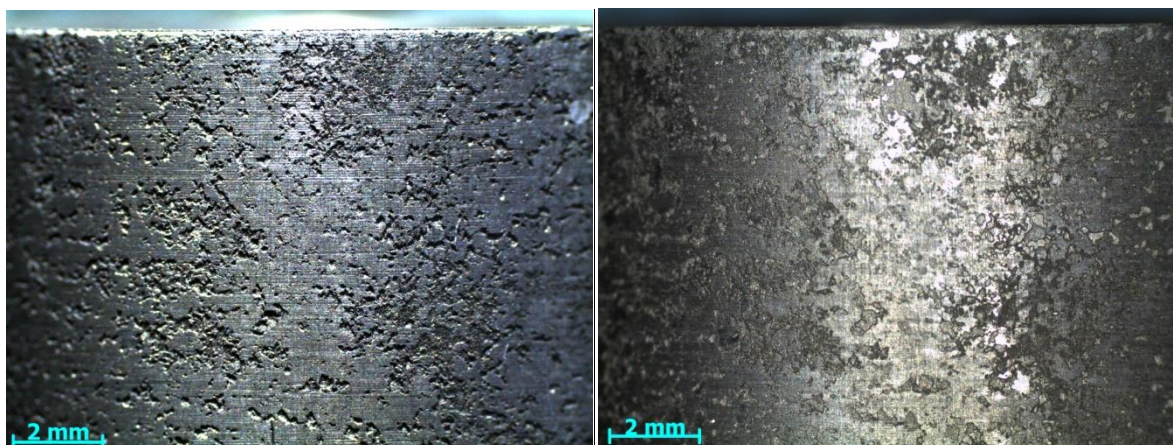




Obr. 66 Povrch vzorku č. 53 (cela IA bez drenáže) po odstranění korozních produktů

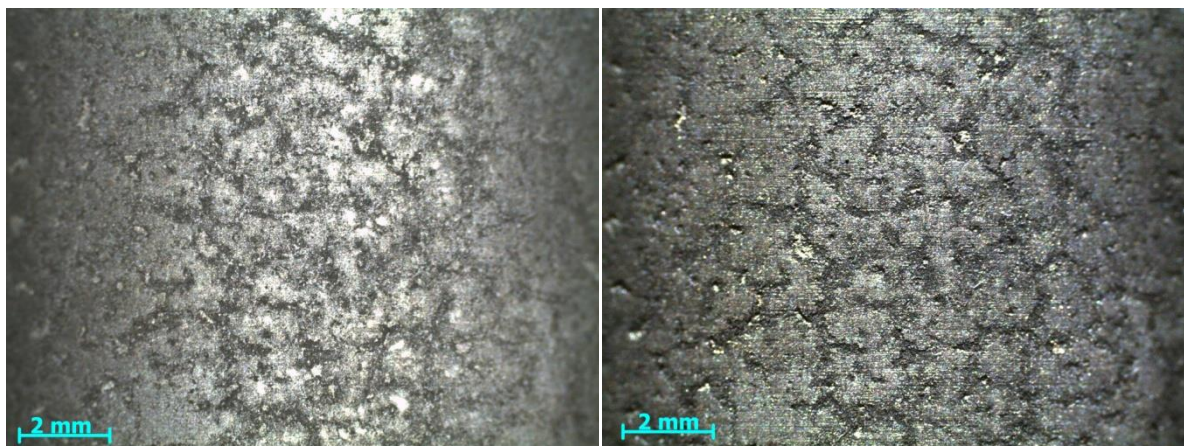


Obr. 67 Povrch vzorku č. 63 (cela IB s drenáží) po odstranění korozních produktů



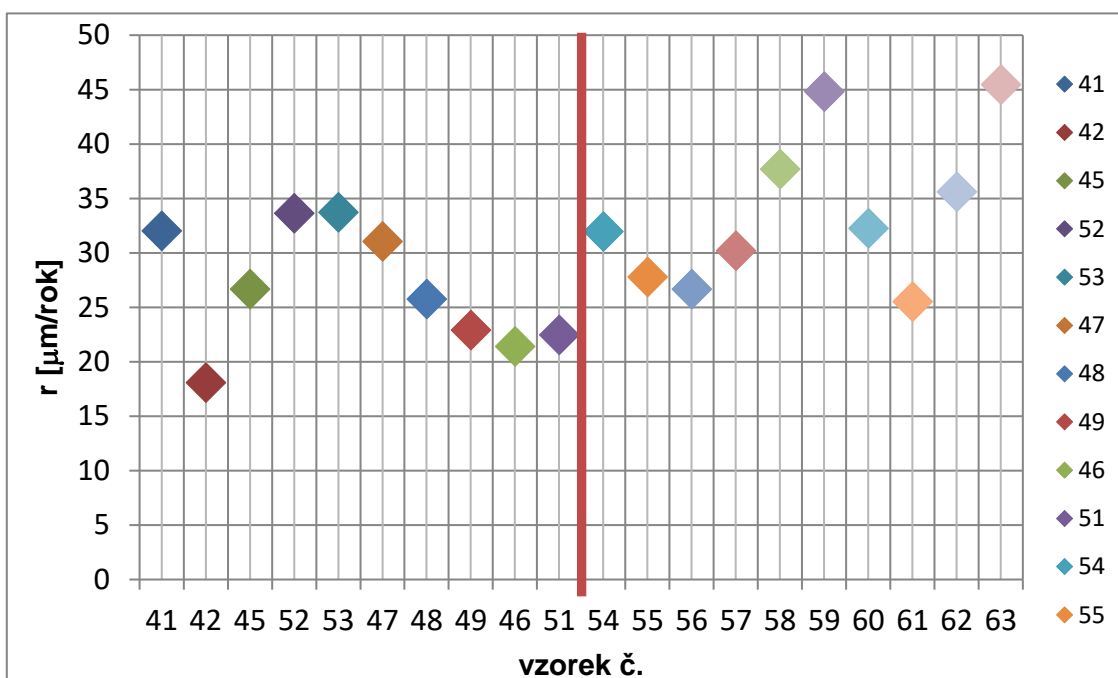
Obr. 68 Povrch vzorku č. 8 (cela IIA bez drenáže) po odstranění korozních produktů





Obr. 69 Povrch vzorku č. 13 (cela IIB s drenáží) po odstranění korozních produktů

Výsledky korozních rychlostí a pozic všech kroužků (cela IA a IB) jsou znázorněny na Obr. 70.



Obr. 70 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.

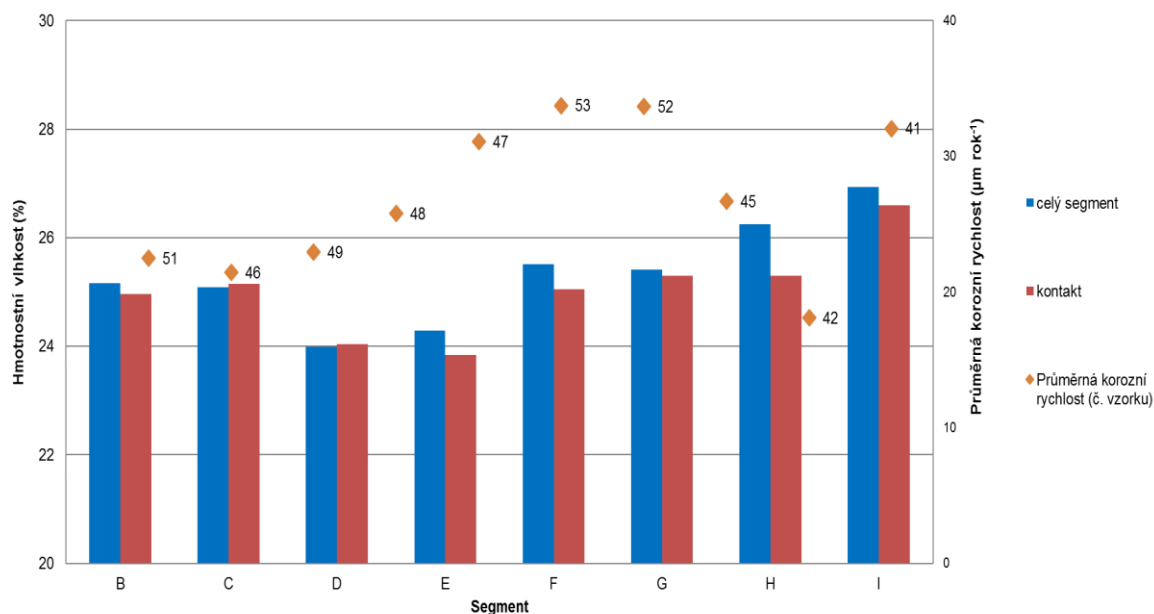
Tab. 5 Korozní rychlosti jednotlivých vzorků

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

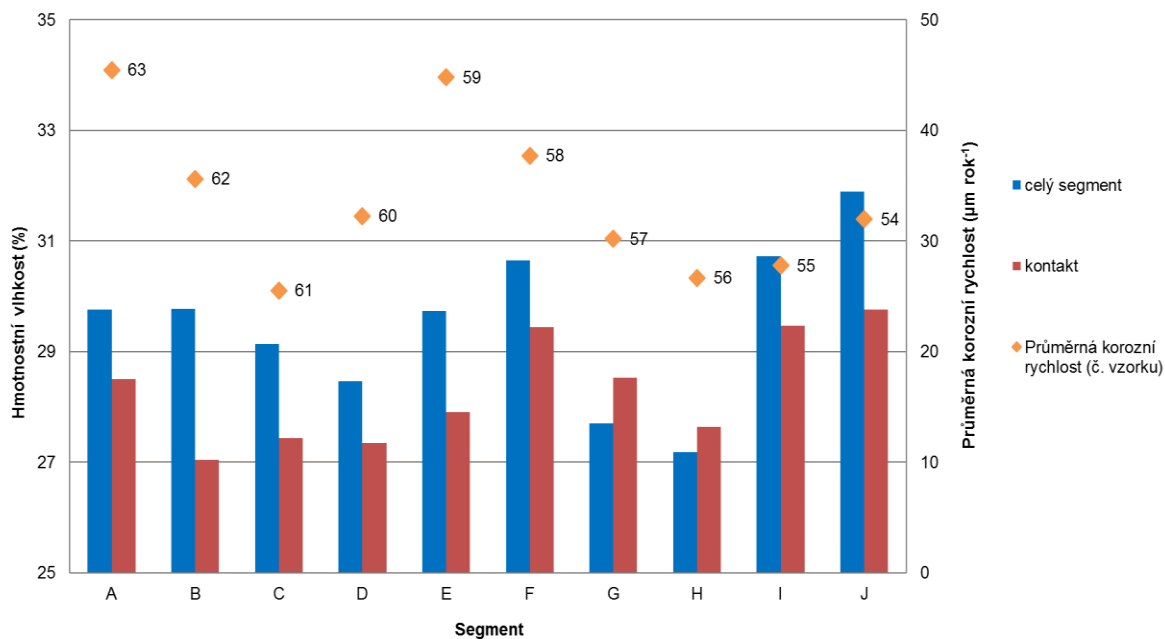
53	33,75
47	31,07
48	25,76
49	22,92
46	21,43
51	22,47
54	31,99
55	27,80
56	26,68
57	30,22
58	37,72
59	44,82
60	32,27
61	25,54
62	35,63
63	45,47

Na Obr. 71 a Obr. 72 je znázorněna závislost korozních rychlostí ocelových vzorků na vlhkost bentonitu (průměrná vlhkost celého segmentu a vlhkost vrstva v kontaktu s ocelovým kroužkem) cely IA a IB. V grafech poloha vzorku je přibližná vůči konkrétní vrstvě bentonitu.

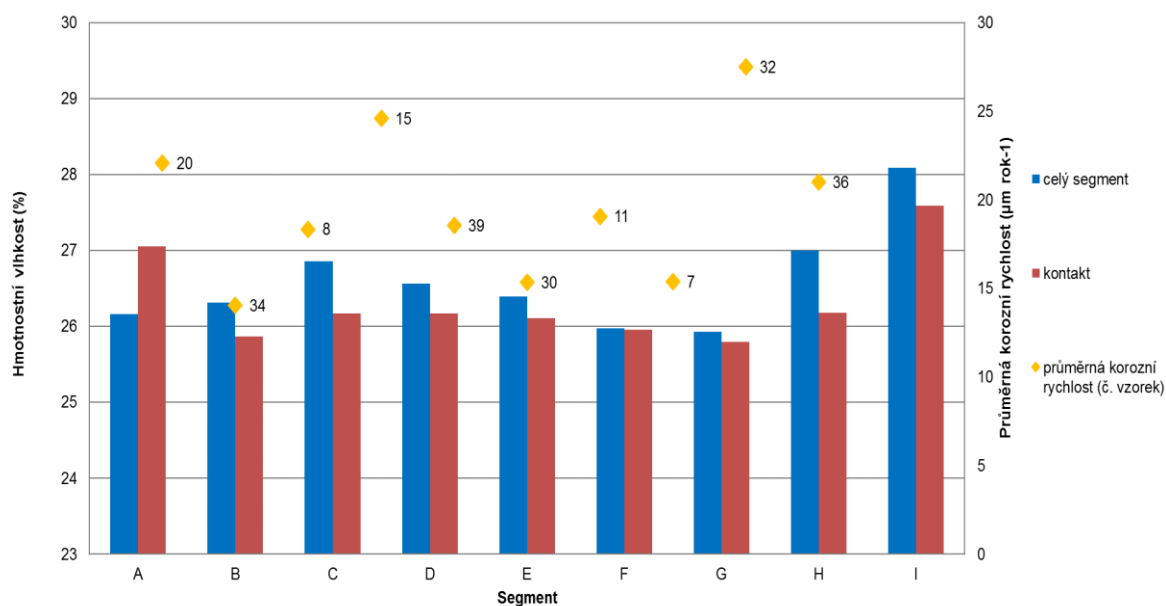
Relativně dobrá shoda mezi korozní rychlostí a vlhkostí je pozorována u cely IB, oproti cele IA, kde není možné dát do souvislosti vlhkost a korozní rychlost. Pravděpodobně je to dáno tím, že se v cele IB voda dostala ke vzorkům rovnoměrněji kvůli přítomnosti drenážní vrstvy. Výpočet průměrné korozní rychlosti v cele IB je tak zatížen nižší nejistotou než v cele IA, kde nerovnoměrná distribuce vody mezi vzorky zvětšuje nejistotu výpočtu průměrných korozních rychlostí. Podobná tendence je vidět na Obr. 73 a Obr. 74 kde jsou znázorněny půlroční experimentální výsledky cely IIA a IIB.



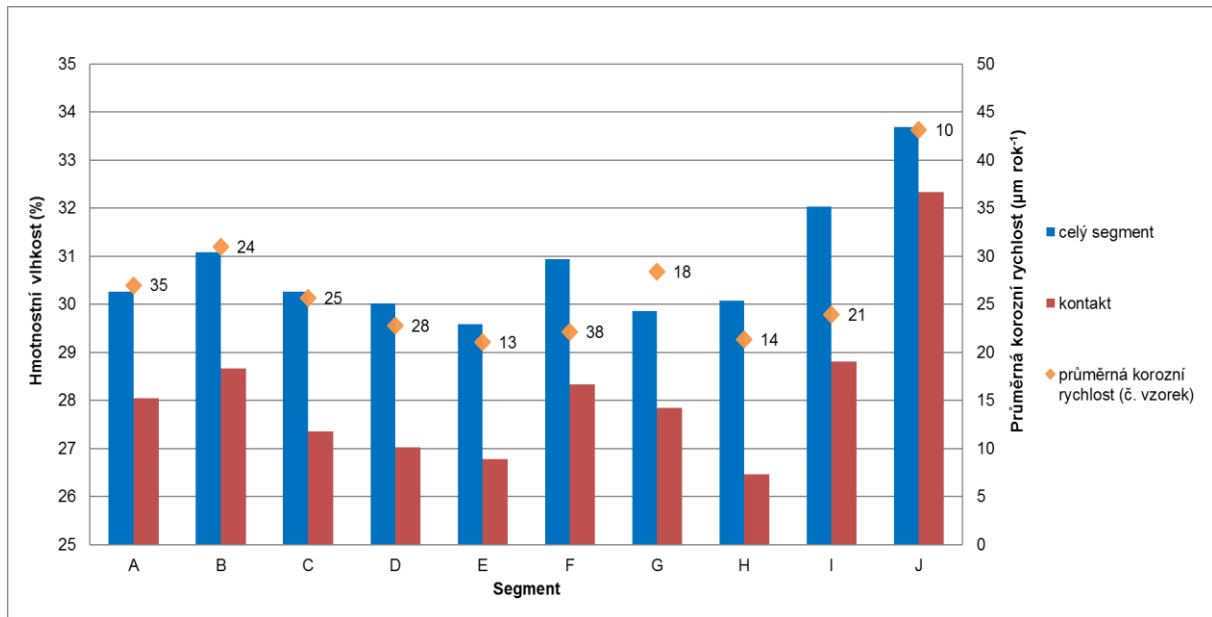
Obr. 71 Porovnání průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků a průměrné vlhkosti vrstev bentonitu cely IA



Obr. 72 Porovnání průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků a průměrné vlhkosti vrstev bentonitu cely IB

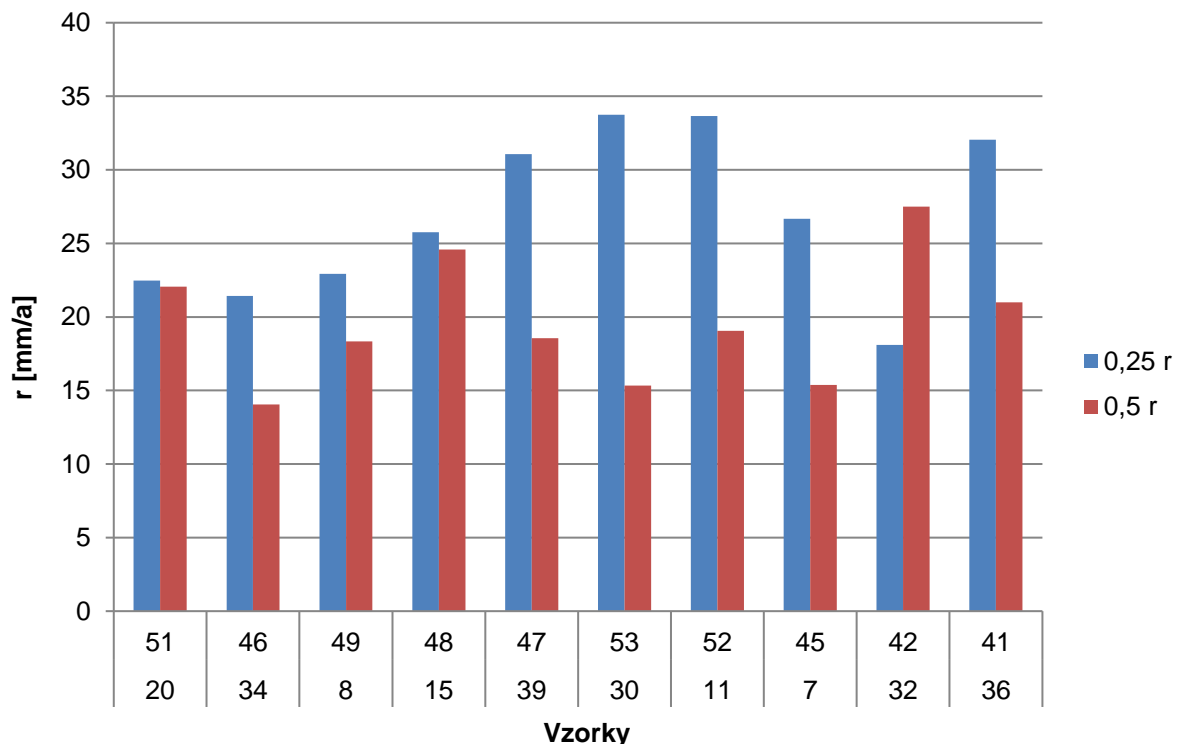


Obr. 73 Porovnání průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků a průměrné vlhkosti vrstev bentonitu cely IIA

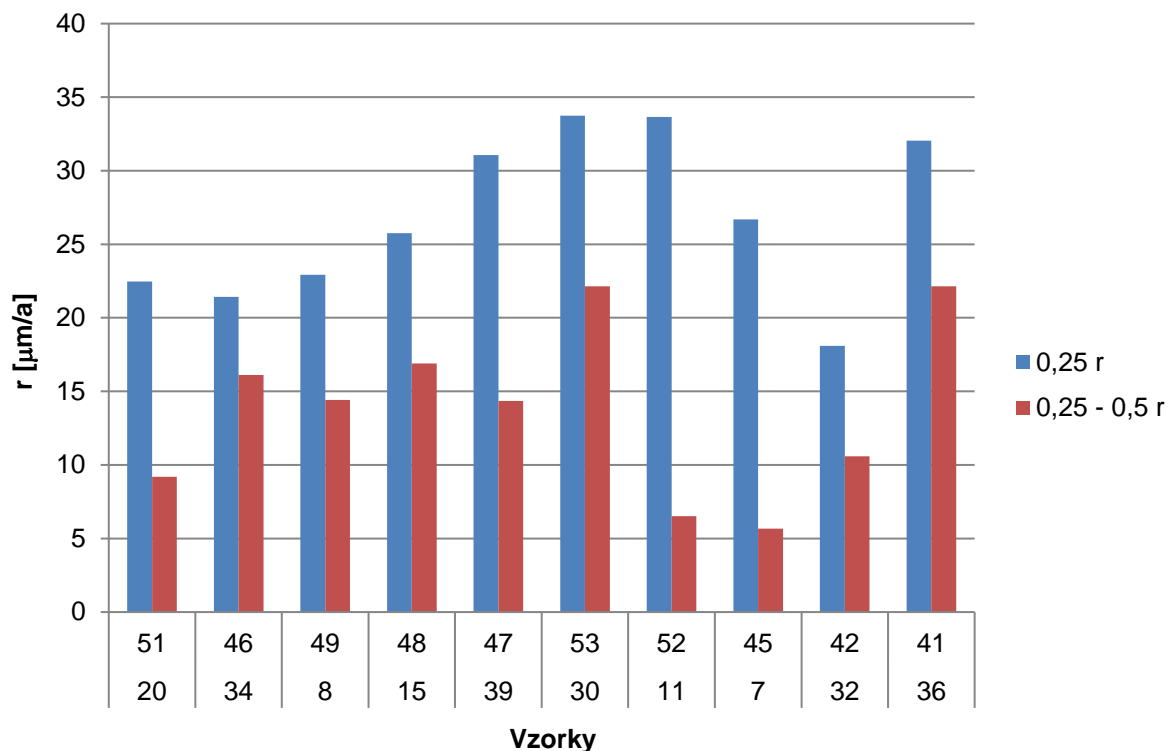


Obr. 74 Porovnání průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků a průměrné vlhkosti vrstev bentonitu cely IIB

Porovnání korozních rychlostí a pozic všech kroužků cely IA (modrá barva) a cely IIA (červená barva) jsou uvedeny na Obr. 75 a Obr. 76. Výsledky cely IA byly získány po čtvrt roce, zatímco výsledky cely IIA po půl roce. Puklina se nacházela nad vzorkem č. 42 (cela IA) a č. 32 (cela IIA).



Obr. 75 Průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků cely IA (modrá barva) a IIA (červená barva) po čtvrt roce a po půl roce – korozní cely bez drenáže

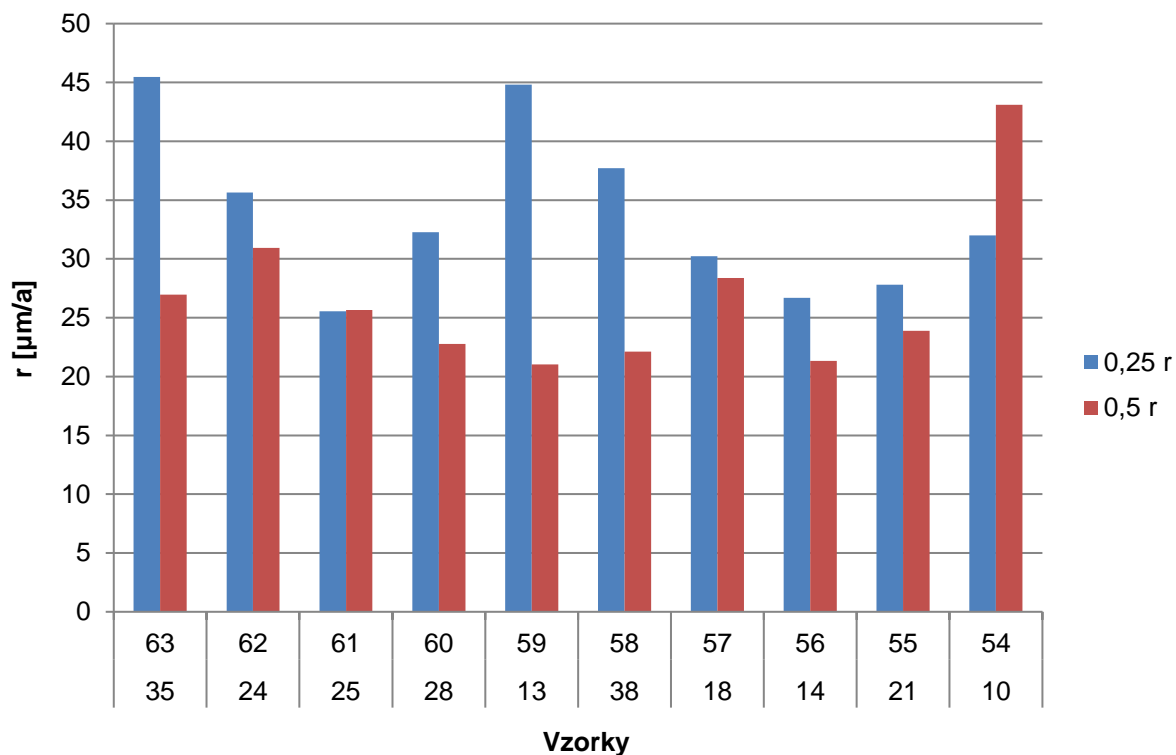


Obr. 76 Průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků cely IA (modrá barva) a IIA (červená barva) po čtvrt roce (modrá) a po půl roce s korekcí na hmotnostní úbytek po čtvrt roce (červená), tedy mezi časovým úsekem 0,25 až 0,5 roku – korozní cely bez drenáže

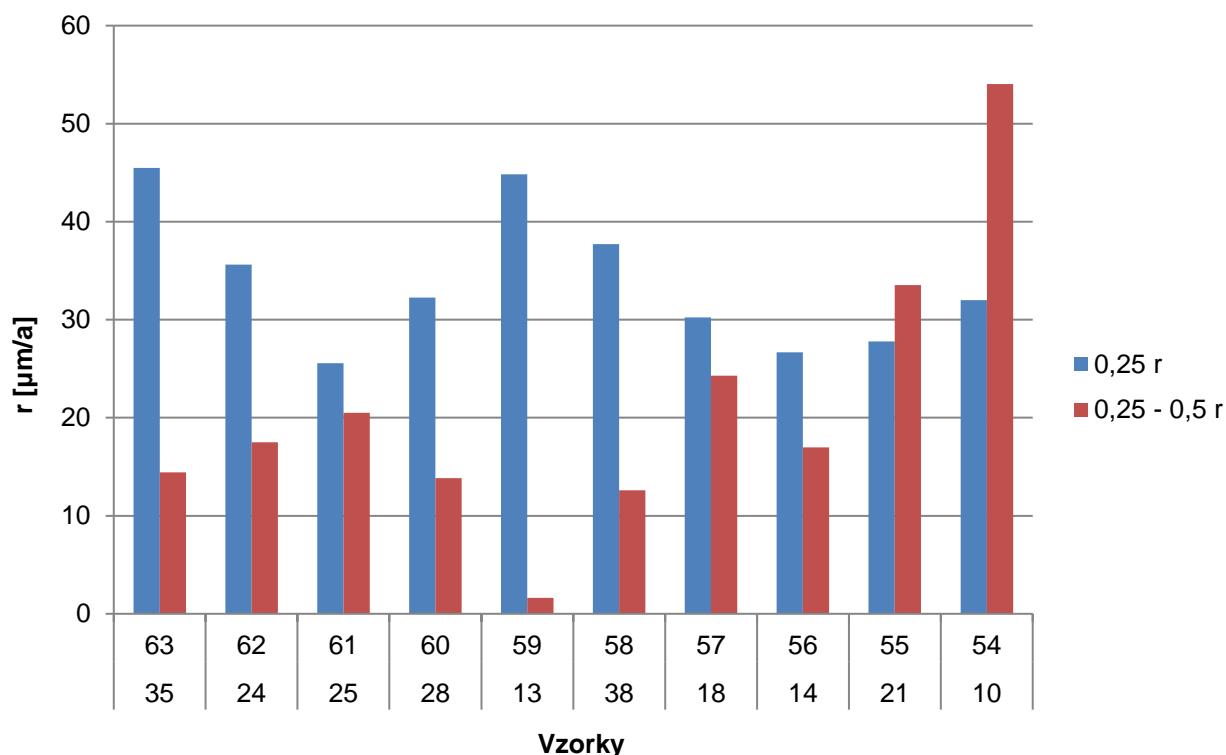
Korozní rychlosti a pozice všech ocelových vzorků cely IB (modra barva) a cely IIB (červená barva) jsou znázorněny na Obr. 77 a Obr. 78. V grafu jsou porovnány výsledky po půlročním a po čtvrtročním experimentu.

Porovnání výsledků obou cel po čtvrt roce je znázorněno na Obr. 77. Nejnižší korozní rychlost je u vzorku č. 13, zatímco největší rychlost je vidět u vzorku č. 10, který se nacházel na kraji cely IIB. Podobná tendence byla pozorována v cele IB, rozdíl spočívá v tom, že největší rychlost byla v tomto případě u krajního vzorku z druhé strany cely.

Získané výsledky z čtvrtročního a půlročního experimentu neposkytují dostatečná data pro určení vlivu nerovnoměrného sycení na korozi uhlíkové oceli. Je to dáno tím, že jednak je každý vzorek unikátní svou pozicí vůči ostatním vzorkům v korozní cele, a tedy nemůžeme souhrnně vzorky podrobit statistickému zhodnocení, dále korekce hmotnostních úbytků po půl roce je provedena pomocí hmotnostního úbytku ekvivalentního vzorku na stejné pozici v experimentu po čtvrt roce a tím si vnášíme do výpočtu velkou nejistotu. Další nejistotu představuje čas, kdy začíná koroze na jednotlivých vzorcích, neboť při nerovnoměrném sycení nebude doba koroze všech vzorků stejná a výpočtem průměrné korozní rychlosti s využitím celkové doby experimentu vnášíme do výsledků další nejistotu.



Obr. 77 Průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků cely IB (modrá barva) a IIB (červená barva) po čtvrt roce – korozní cely s drenáží

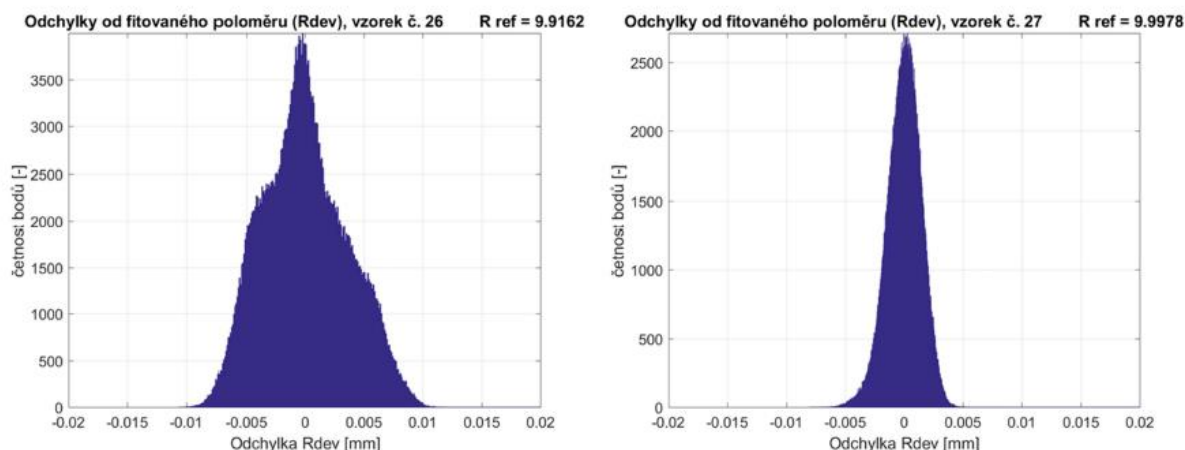


Obr. 78 Průměrné korozní rychlosti ocelových vzorků cely IB (modrá barva) a IIB (červená barva) po čtvrt roce (modrá) a po půl roce s korekcí na hmotnostní úbytek po čtvrt roce (červená), tedy mezi časovým úsekem 0,25 až 0,5 roku – korozní cely s drenáží



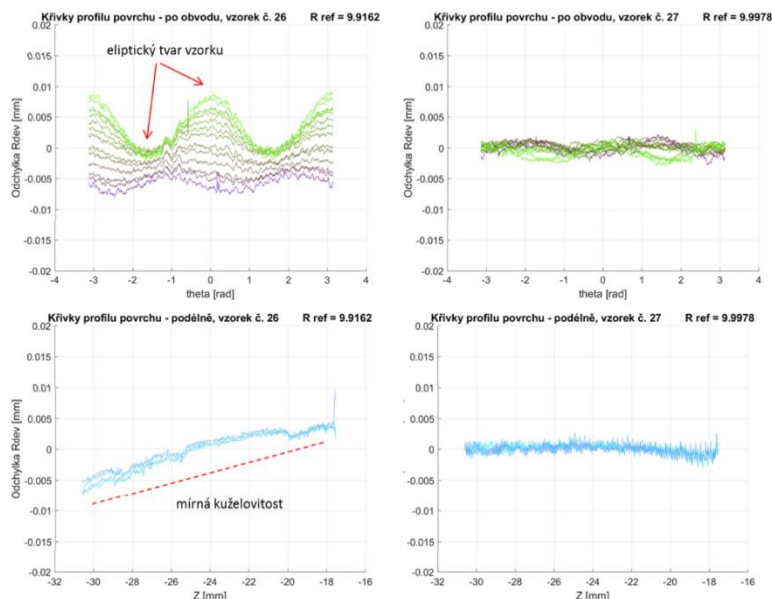
### 4.3.1 Porovnání výsledků optické profilometrie ocelových vzorků před a po experimentu

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. 79, kde je pro příklad porovnán histogram odchylek  $R_{dev}$  vzorků č. 26 (větší rozptyl) a 27 (menší rozptyl).



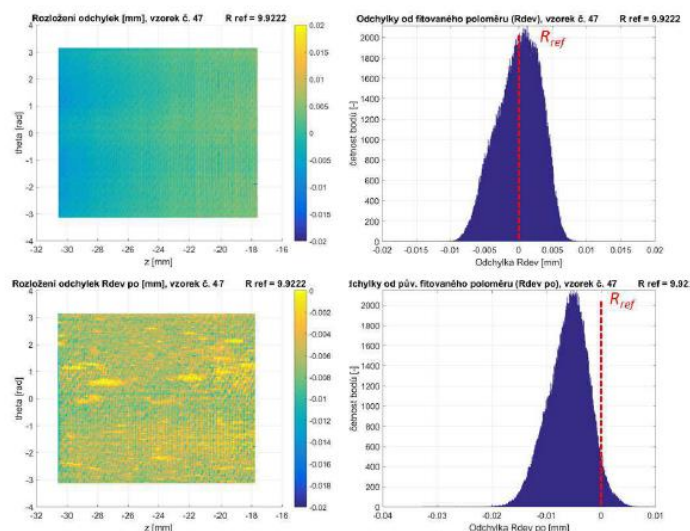
Obr. 79 Porovnání histogramů odchylek  $R_{dev}$  pro vzorek č. 26 (druhá skupina) a č. 27 (první skupina)

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. 80 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. 80). Vzorek č. 27 z první skupiny pak vykazuje v obou případech lepší geometrické parametry.

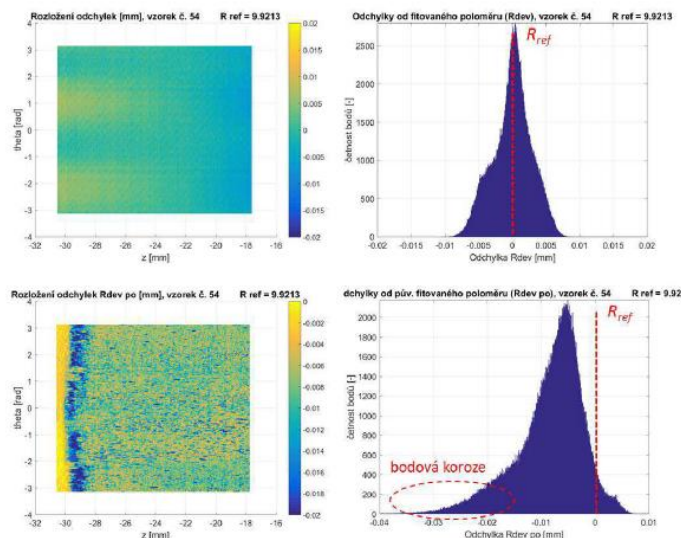


Obr. 80 Porovnání histogramů odchylek  $R_{dev}$  pro vzorek č. 26 (druhá skupina) a č. 27 (první skupina)

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. 81, Obr. 82 a je možné vidět porovnání vzorků před a po korozní zkoušce pro vzorky č. 47 a 54 (cela IA bez drenáže, čtvrtletní experiment).



Obr. 81 Porovnání vzorku č. 47 cely IA před a po korozní zkoušce

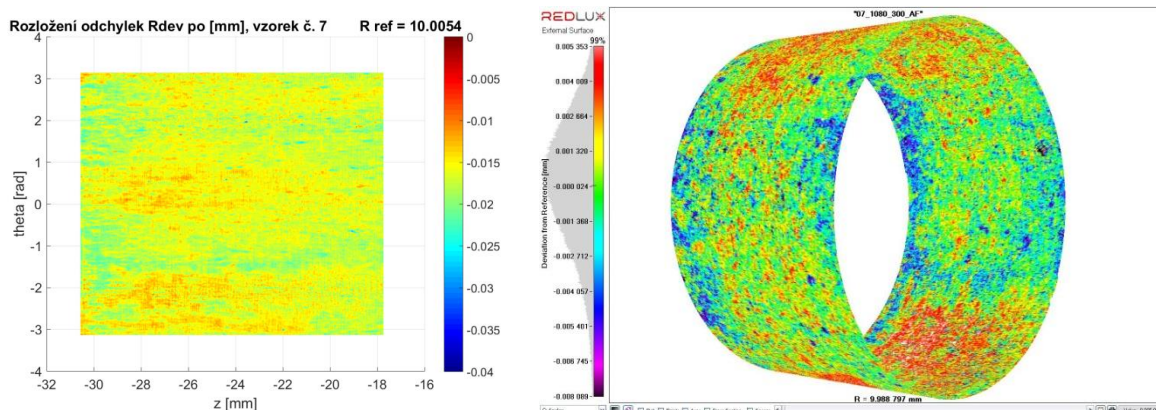


Obr. 82 Porovnání vzorku č. 54 cely IA před a po korozní zkoušce

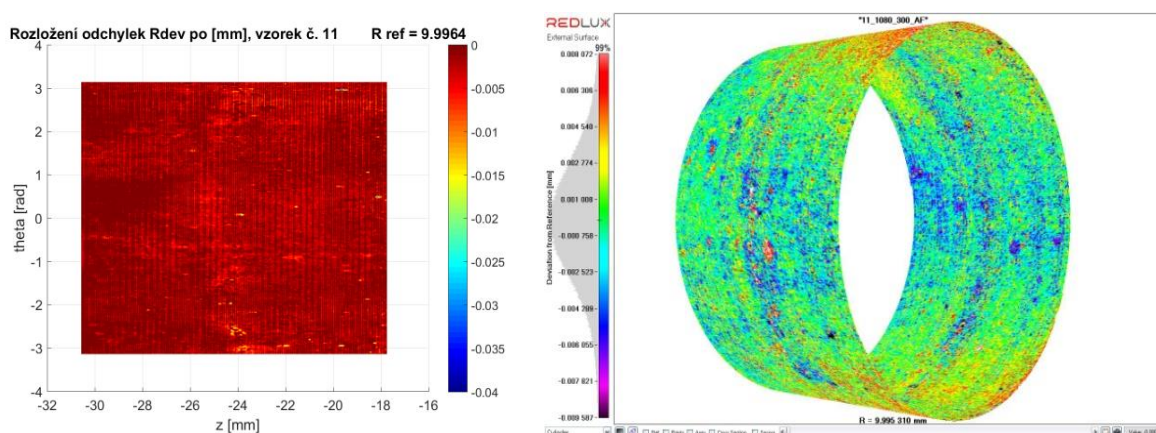
V případě vzorků z cely IIA a IIB nebyla u některých vzorků po ukončení experimentu dohledatelná značka sloužící pro nastavení stejné pozice vzorku v optickém profilometru. V důsledku toho je srovnání povrchu vzorků před a po experimentu zatíženo nejistotou, která se projevila vizuálně na plošných mapách, které jsou zkráceny z hlediska lokálního korozního napadení, což je patrné např. na Obr. 84, kde je povrchová mapa srovnána s 3D obrazem povrchu, který není korigován na stav povrchu před experimentem. Tento problém se nepodařilo odstranit ani opakovaným skenováním vzorků v různých pozicích.

U vzorků č. 41 a 54 a 36 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 z čtvrtročního experimentu nebo u všech vzorcích z půlročního experimentu, jak je vidět z histogramů odchylek  $R_{dev\_po}$  (viz Příloha 2) 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 s jeho obrazem získaným z optické profilometrie, kdy patrné nerovnoměrné napadení je relativně ztraceno v barevné škále na změřené ploše.

Příklady nedostatků toho omezení jsou vidět na Obr. 83 a Obr. 84. Např. lokální korozní napadení je relativně dobře pozorovatelné na povrchové mapě vzorku č. 7 (cela IIA), zatímco povrchová mapa u vzorku č. 11, jak již bylo řečeno výše, je zatížena nejistotou z důvodu nenalezení poziční značky na vzorku.



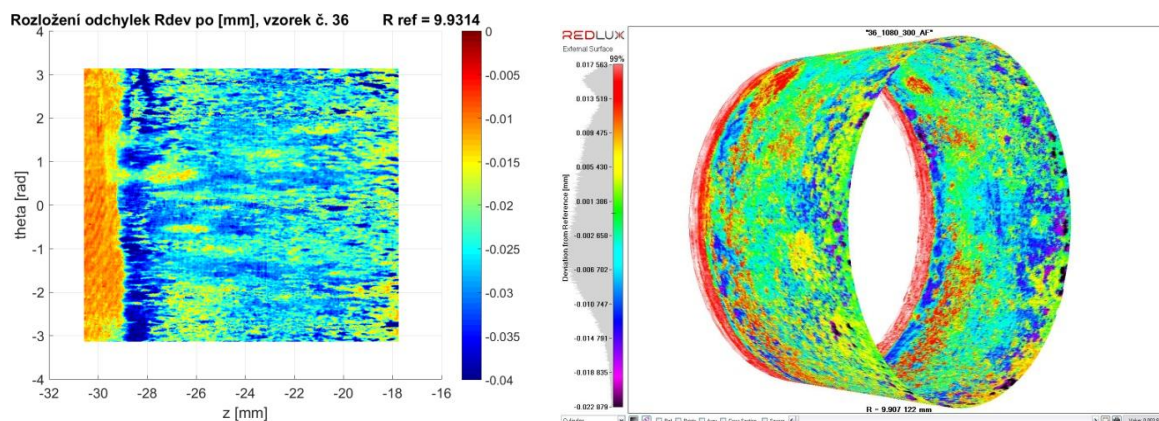
Obr. 83 Ilustrační obrázek rozložení výškových odchylek povrchu v ploše vzorku č. 7 cely IIA se skenem jeho povrchu ve 3D. Barevné škály nejsou ve stejném měřítku.



Obr. 84 Ilustrační obrázek rozložení výškových odchylek povrchu v ploše vzorku č. 11 cely IIA se skenem jeho povrchu ve 3D. Barevné škály nejsou ve stejném měřítku.

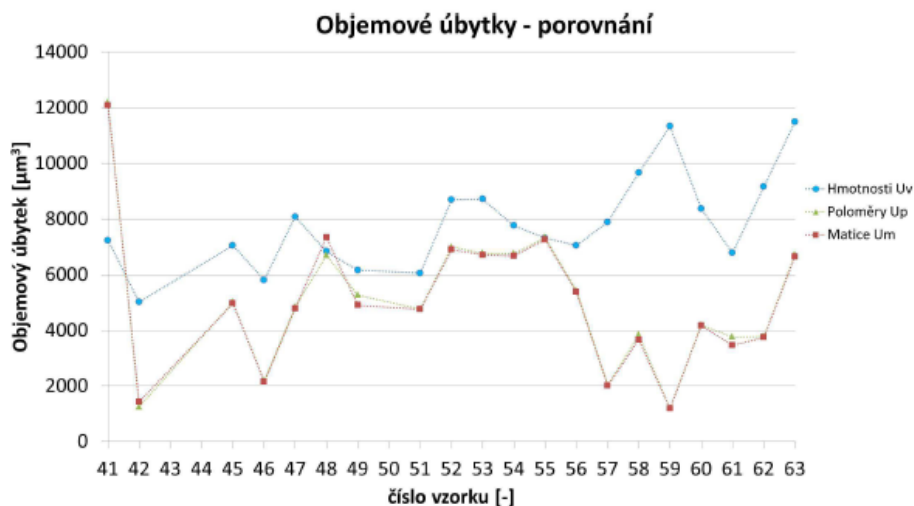
Rozdílné korozní napadení odpovídá umístění vzorku v cele. Vzorky č. 41 (cela IA), 54 (cela IB) a 36 (cela IIA) byly v okrajích cel, v tomto místě se voda nedostala k celé ploše vzorku kvůli tomu, že část vzorku byla zakryta materiálem víka cely a těsněním (Obr. 85). Další viditelné rozdíly jsou u povrchů vzorků č. 57 a 60 (cela s drenáží IB) a vzorků č. 18 a 28 (cela s drenáží IIB), 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 a IIA (bez drenáže) nebylo u vzorků na stejné pozici (vzorky č. 52 a 48 z cely IA, nebo vzorky č. 15 a 11 z cely IIA) 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.





Obr. 85 Ilustrační obrázek rozložení výškových odchylek povrchu v ploše vzorku č. 36 cely IIA se skenem jeho povrchu ve 3D. Barevné škály nejsou ve stejném měřítku.

Dále byl porovnán celkový objemový úbytek materiálu na testovaných vzorcích. Na Obr. 86 je znázorněn objemový úbytek získaný měřením profilometrem, který 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. 86 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.



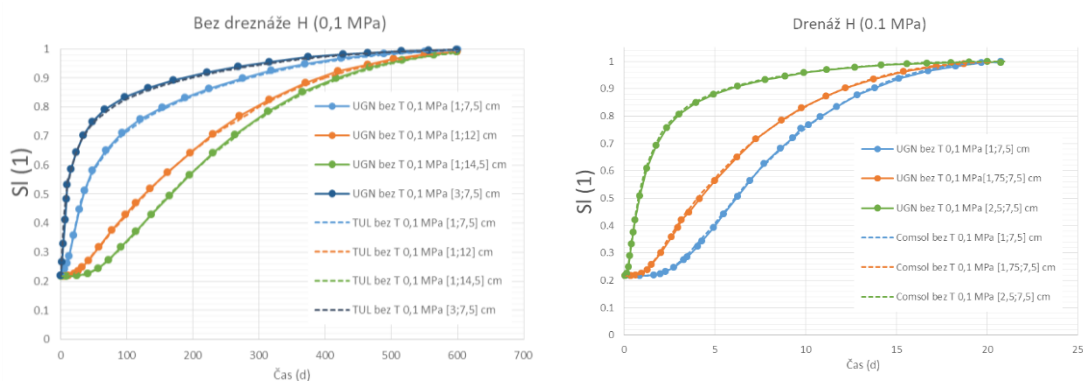
Obr. 86 Porovnání objemových úbytků na testovaných vzorcích

## 5 Vyhodnocení modelů s využitím naměřených dat

V této kapitole se budeme zabývat výstupy simulací v souvislosti s naměřenými daty získanými po ukončení experimentů. Budou popsány nejistoty, které významně ovlivňují výsledky (ať už se jedná o materiálové parametry, či skutečnosti, které jsou v modelech obtížně postihnutečné). Dále budou uvedeny parametry a data, která jsou klíčová pro predikci sycení bentonitu v kontextu provedeného experimentu, což bude podloženo několika jednoduchými citlivostními testy provedenými pomocí nově definovaného termo-hydraulického modelu.

### 5.1 Jednoduché porovnání výsledků modelů

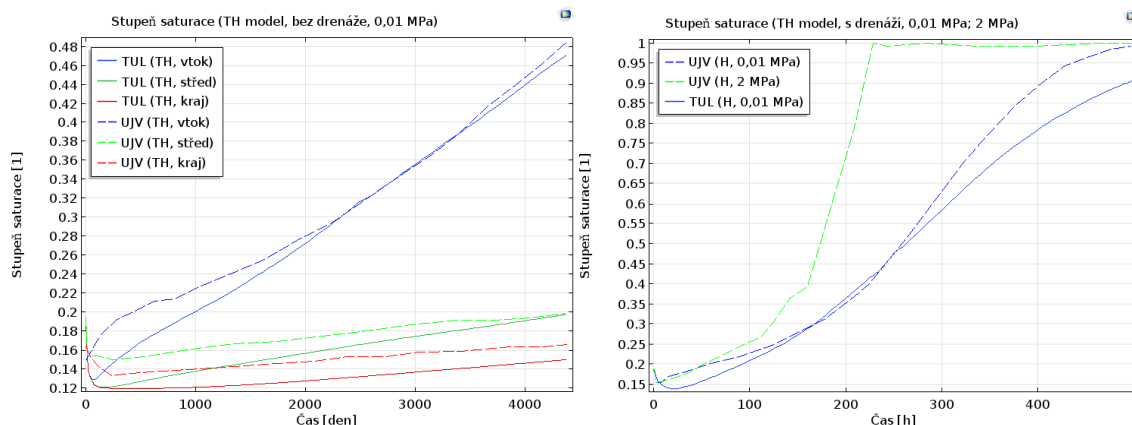
Ještě bez využití experimentálních dat byla provedena jednoduchá porovnání výsledků simulací mezi jednotlivými týmy (TUL, ÚGN, ÚJV). Kvalitativně se výrazně liší modely s vlivem a bez vlivu teploty. V případě modelování laboratorního experimentu (navíc poměrně malých rozměrů) je vliv teploty velice důležitý. Dochází totiž k vysoušení bentonitu a tím se ovlivní průběh saturace v čase (rozdílný charakter průběhů bez vlivu a s vlivem teploty jsou uvedeny na Obr. 87 a na Obr. 88). Při porovnání výsledků simulací bez vlivu teploty (TUL a ÚGN), jsou rozdíly pro modely bez drenáže i s drenáží minimální (Obr. 87). Důvodem malých rozdílů je fakt, že týmy vycházely ze stejného fyzikálního popisu – z Richardsovy rovnice v různém tvaru, stejně definovaných materiálových parametrů (Tab. 6) a shodné celkové koncepce modelu. Čistě hydraulický model je však při predikci sycení uvažovaného experimentu nutné brát pouze jako orientační a pro přesnější odhad je nutný model uvažující i vliv teploty.



Obr. 87 Porovnání výsledků modelů (TUL vs. ÚGN, hydraulické modely bez drenáže a s drenáží s označením souřadnic bodů, ve kterých byly průběhy vyneseny)

Dodatečně byly provedeny také termo-hydraulické simulace v softwaru COMSOL Multiphysics (pomocí koncepce s neisotermálním tvarem Richardsovy rovnice s difúzí vodních par a rovnicí vedení tepla v porézním prostředí, bez využití dat z experimentu). Průběhy získané touto metodou se kvalitativně přibližují výsledkům získaným ÚJV Dobrev et al. (2016), přičemž byla nutná úprava materiálových parametrů modelu TUL podle Tab. 6, aby byly porovnávány co nejpodobněji zadané modely. Z výsledků na Obr. 88 vlevo je pro model bez drenáže patrné, že každý model popisuje počátek procesu odlišně – lze vidět rozdílný charakter vysoušení bentonitu do času 200 dní, který může být dán např. rozdílnou

jemností sítě nebo některými rozdílnými parametry popisující difúzi vodních par. Dále se však průběhy přibližují a v konečném stavu 4000 dní už se výrazně neliší. V modelu s drenáží jsou průběhy kvalitativně velice podobné (opět kromě počátku procesu), ale v konečném stavu dosahuje průběh TUL nižšího nasycení než průběh ÚJV ( $S_l = 0,91$  vs.  $S_l = 0,99$ ).



Obr. 88 Porovnání výsledků modelů (TUL vs. ÚJV, termo-hydraulické modely bez drenáže a s drenáží)

Tab. 6 Materiálové parametry bentonitu využité ve srovnávacích modelech (srovnání průběhů TUL s výsledky ÚGN a ÚJV), kde  $P_0$  je vstupní tlak,  $\lambda$  tvarový koeficient,  $k$  propustnost,  $n$  porozita,  $Sl(t=0)$  počáteční stupeň saturace a  $T(t=0)$  počáteční teplota.

	Parametry srovnávacích modelů	
	podle ÚGN	podle ÚJV
$P_0$ (MPa)	6,25	6,25
$\lambda$ (1)	0,345	0,345
$k$ (m <sup>2</sup> )	$5 \cdot 10^{-21}$	$5 \cdot 10^{-21}$
$n$ (1)	0,422	0,44
$Sl(t=0)$	0,217	0,187
$T(t=0)$ (°C)	–	20

## 5.2 Rozbor naměřených dat v kontextu s výsledky simulací

Po ukončení experimentů a demontáži experimentálních cel jsou pro obě varianty (bez drenáže a s drenáží) k dispozici průběhy teploty v čase v místech dvou teplotních čidel a dále výsledný stav vlhkosti v bentonitu v jednotlivých segmentech přesně popsanych v předchozí zprávě (Dobrev et al., 2017). První čidlo bylo v obou variantách umístěno v blízkosti topidla. Druhé čidlo bylo v systému bez drenáže umístěno na rozhraní bentonitu a vnitřního povrchu cely. V systému s drenážní vrstvou bylo druhé čidlo umístěno na rozhraní



bentonitové vrstvy a drenážní vrstvy. Pozice, ze kterých jsou data získána, v modelech figurují jako okraje geometrie, na něž předepisujeme vstupní data (okrajovou podmínku). Proto je zde možné předepsat měřené průběhy teploty při ověřování modelů a tím zpřesnit výsledky.

Porovnání míry nasycení bentonitu v kontextu měřených dat je možné pouze v čase ukončení experimentu, ale díky množství vyhodnocených vzorků můžeme provést prostorové srovnání. Pro srovnání je nutné převést měřené hodnoty hmotnostní vlhkosti na stupeň saturace, jehož průběhy byly získány přímo z modelů (nebo opačně). Protože se však mění porozita bentonitu v průběhu sycení, mění se i jeho objemová hmotnost a není možné ze základního vztahu pro hmotnostní vlhkost  $w$  a objemovou vlhkost  $\theta$  (platícího pro konstantní hodnoty parametrů) např. podle Böckgard et al. (2010) určit výsledný stupeň saturace.

$$w = \frac{\theta \rho_w}{\rho_d} = \frac{S_l n \rho_w}{\rho_d} \quad (5.1)$$

Je však možné zjistit počáteční stupeň saturace ze známých počátečních podmínek: specifická hustota bentonitu  $\rho_s = 2855 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Vašíček et al., 2016), suchá objemová hmotnost  $\rho_d = 1600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , hustota vody  $\rho_w = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , porozita  $n = 0,44$  a počáteční hmotnostní vlhkost 8,3%, který vychází  $S_l(t=0) = 0,30$ . Pro  $\rho_d = 1400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  pak počáteční stupeň nasycení odpovídá  $S_l(t=0) = 0,26$ .

Pro srovnání naměřených dat po ukončení experimentu tedy musíme znát nejen počáteční podmínky, konečnou vlhkost, ale také další parametr, který popisuje stav vzorku po ukončení experimentu (tj. porozitu či objemovou hmotnost bentonitu).

Z výše uvedeného plyne, že při nepřesné znalosti vstupních dat je kvantitativní porovnání míry nasycení bentonitových segmentů velice obtížné. Je ale možné a důležité získat představu, zda modely predikují předpokládané chování alespoň kvalitativně. Pro přesnější srovnání by bylo vhodné sledovat vlhkost v průběhu experimentu.

### 5.3 Kvalitativní porovnání výsledků simulací s měřenými daty

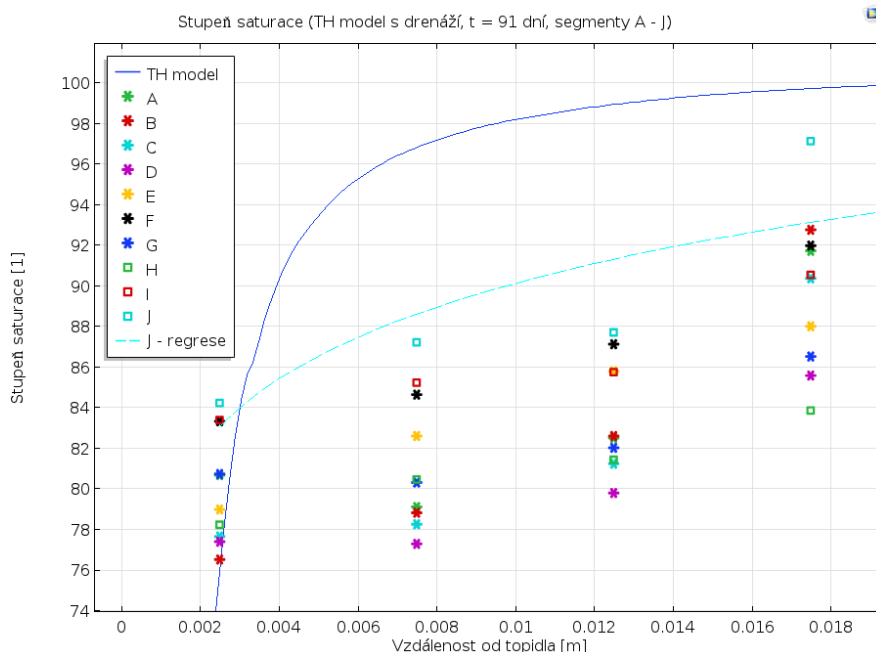
Hmotnostní vlhkosti naměřené po ukončení experimentu byly převedeny na stupeň saturace. Aby bylo možné kvalitativní srovnání, byla z výše zmíněných důvodů uvažována při převodu  $\rho_d = 1400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a  $\rho_s = 2855 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  s hodnotou počáteční porozity  $n = 0,44$ , i když tyto parametry zcela neodpovídají reálným hodnotám pro bentonit ve stavu ukončení experimentu. Pro kvalitativní srovnání je však tento převod dostačující – pokud je totiž využita jiná hodnota  $\rho_d$ , či  $n$  dojde pouze k posunutí měřených hodnot v rámci směru osy  $y$  při zachování tvaru křivky.

#### 5.3.1 Cela s drenáží

V modelech s drenáží bylo předpokládáno rozložení nasycení nezávislé na pozici ve směru osy symetrie cely. Modelový průběh stupně saturace v závislosti na vzdálenosti od topidla reprezentuje plnou čarou vykreslená linie na Obr. 89. Z měřených dat ale vyplývá, že průběh není po délce cely konstantní. Nejvyššího nasycení je celkově dosaženo v okrajovém segmentu J a dále i v segmentech I a F (Obr. 48). K porovnání trendu a tvaru křivek je využita linie vykreslená čárkovanou čarou reprezentující exponenciální závislost, která prokládá hodnoty stupně saturace v segmentu J. Při porovnání obou linií je patrný podobný

tvár průběhu, ale modelová data ukazují strmější nástup a vyšší konečné nasycení (oproti proložené linii, která roste pozvolněji).

Nehomogenní nasycení bentonitu podél osy cely v experimentu s drenáží je jedním z jevů, které modely nedokáží predikovat (zřejmě je způsobeno nerovnoměrným vytápěním topidla a tudíž nerovnoměrným vysoušením bentonitu, o kterém nemáme přesnější informace a nedokážeme jej predikovat, a proto je nemůžeme do modelu zahrnout). Na druhou stranu distribuce vlhkosti v závislosti na vzdálenosti od topidla je v modelech poměrně dobře kvalitativně postihnuteľná.



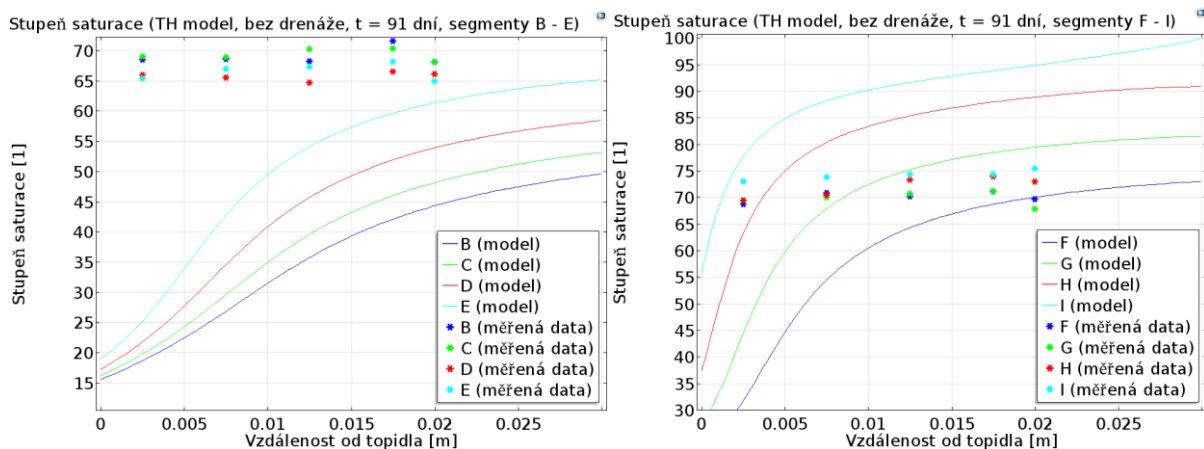
Obr. 89 Porovnání průměrného stupně saturace v závislosti na vzdálenosti od topidla pro experiment s drenáží (modelový průběh vs. měřená data pro segmenty A až J)

### 5.3.2 Cela bez drenáže

Průběhy pro celu bez drenáže jsou pro přehlednost rozděleny do dvou grafů na Obr. 90, přičemž vlevo jsou zobrazeny výsledky pro segmenty B až E, jež jsou situovány dále od simulované pukliny, vpravo pak segmenty F až I (Obr. 48) nacházející se v blízkosti simulované pukliny (segment I přiléhá přímo k puklině). Modely v tomto případě předpokládají podstatně vyšší rozdíly v nasycení mezi místy v blízkosti pukliny a mezi zbytkem modelu (pro modely jsou rozdíly ve stupni saturace přes 20 %, v měřených datech se pohybují pouze přibližně do 10 %). Modelové průběhy pak více podhodnocují nasycení v části dále od zdroje sycení, v části blíže k puklině je nasycení přibližně odpovídající (nebo vyšší) než měřená data. Experiment navíc ukazuje vyšší nasycení v krajních segmentech (B a C), kde by se dle předpokladu a modelových predikcí měla nacházet nejsušší část. Tento efekt se dosud nepodařilo spolehlivě vysvětlit, ale ukazuje na možný postup vlhkosti po povrchu bentonitových segmentů. Z měřených dat podle předchozí zprávy (Dobrev et al., 2017) také vyplývá, že povrch bentonitu je saturovaný v menší míře než vnitřní přiléhající část. Kromě této skutečnosti je vlhkost distribuována v radiálním směru podle předpokladu.

Podobně jako v cele s drenáží docházelo v experimentu k jinému charakteru sycení, než bylo na základě predikcí očekáváno, zároveň se jedná o jevy, které jsou v modelech obtížně

postihnutelné. Otázkou ale zůstává, které jevy se při experimentu přirozeně dějí a které jsou způsobeny konstrukcí a provedením cely a celého experimentu.



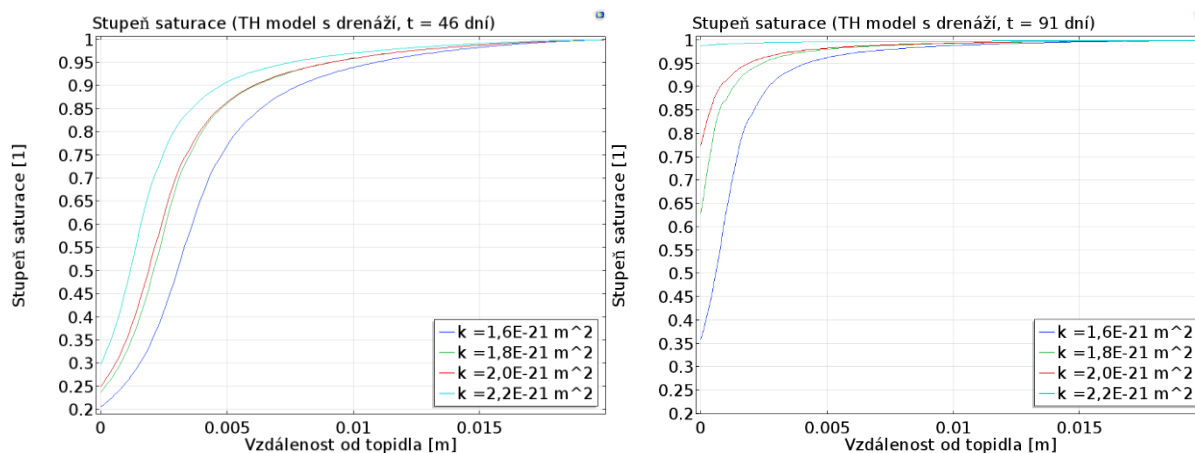
Obr. 90 Porovnání průměrného stupně saturace v závislosti na vzdálenosti od topidla pro experiment bez drenáže (modelový průběh vs. měřená data pro segmenty B až I)

## 5.4 Vliv vstupních dat na výsledky simulací

V této části bude zkoumáno několik vybraných vstupních parametrů a jejich vliv na charakter sycení bentonitu. Pro lepší představu bylo provedeno na TH modelu s drenáží a parametry podle ÚJV (viz výsledky Obr. 88) několik jednoduchých citlivostních studií, podle kterých je možné posoudit míru významnosti daného vstupního parametru (je otestována propustnost  $k$ , tepelná vodivost  $\alpha$  a parametry retenční křivky: vstupní tlak  $P_0$  a tvarový koeficient  $\lambda$ ).

### 5.4.1 Vliv propustnosti bentonitu

Propustnost bentonitu  $k$  byla testována pro čtyři hodnoty v rozmezí  $k = 1,6 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$  až  $k = 2,2 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$  (vyšší hodnoty nebyly v tomto testu uvažovány, protože při jejich užití byl model v určeném čase téměř plně nasycen). Grafy na Obr. 91 uvádí rozložení stupně saturace v závislosti na vzdálenosti od topidla v čase 46 a 91 dní. Průběhy v čase 46 dní ukazují jen poměrně malé rozdíly v rozložení stupně saturace (s kvalitativně shodnou distribucí). V čase 91 dní jsou však již rozdíly poměrně výrazné. Při nejnižší uvažované propustnosti  $k = 1,6 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$  dosahuje stupeň saturace u topidla hodnoty 0,35, za to při nejvyšší uvažované propustnosti  $k = 2,2 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$  je bentonit po celém profilu téměř plně saturován. Podle výsledků těchto testů v podobě grafů na Obr. 91 tedy můžeme říci, že rozložení nasycení je na parametr propustnosti bentonitu poměrně dost citlivé a výrazně je jím ovlivněno.



Obr. 91 Vliv různé propustnosti bentonitu na rozložení stupně saturace (průběh v závislosti na vzdálenosti od topidla v TH modelu s drenáží v čase 46 dní – vlevo a 91 dní – vpravo)

#### 5.4.2 Vliv tepelné vodivosti bentonitu

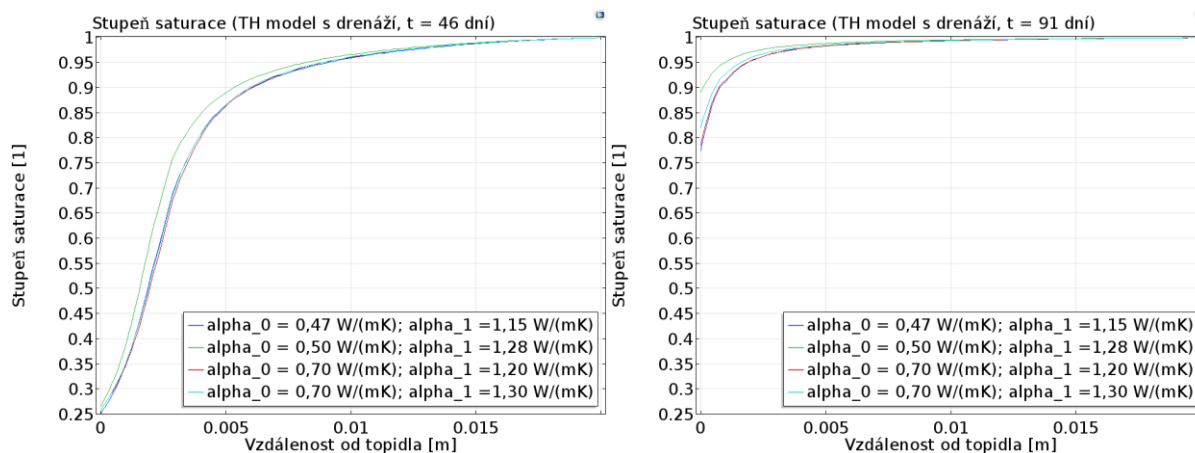
V termo-hydraulických modelech uvažujeme tepelnou vodivost bentonitu závislou na stupni saturace podle vztahu

$$\alpha = \alpha_1 \cdot S_l + \alpha_0 \cdot (1 - S_l), \quad (5.2)$$

např. podle Börgeesson et al. (2001), kde  $\alpha_1$  označuje tepelnou vodivost nasyceného bentonitu a  $\alpha_0$  tepelnou vodivost suchého bentonitu. Protože přesné parametry pro český bentonit použitý v souvisejícím experimentu nejsou známy, byly zvoleny následující kombinace obou parametrů (podle předchozích zkušeností s modelováním experimentů např. Febex (Huertas et al., 2000) a Prototype Repository (Rhén a Forsmark, 2001):

- 1)  $\alpha_0 = 0,47 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $\alpha_1 = 1,15 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
- 2)  $\alpha_0 = 0,50 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $\alpha_1 = 1,28 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
- 3)  $\alpha_0 = 0,70 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $\alpha_1 = 1,20 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
- 4)  $\alpha_0 = 0,70 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $\alpha_1 = 1,30 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ .

Podobně jako v předchozím případě byly vyhodnoceny průběhy stupně saturace v závislosti na vzdálenosti od topidla v časech 46 a 91 dní. Na rozdíl od výsledků s propustností je rozptýl hodnot stupně saturace poměrně malý. Výrazněji se odchyluje pouze průběh pro parametry 2) a to v obou vyhodnocovaných časech (ale pouze přibližně o hodnotu 0,07). Změna průběhu sycení při změně parametrů tepelné vodivosti je na základě uvedených modelů poměrně malá. Což je dáno zejména tím, že vzorek se velmi rychle ohřeje a dostane se do rovnovážného stavu – teplo přijaté/odevzdané. Změna teploty v průběhu celého experimentu je minimální a tímto vliv teplotní vodivosti na saturaci je také minimální.

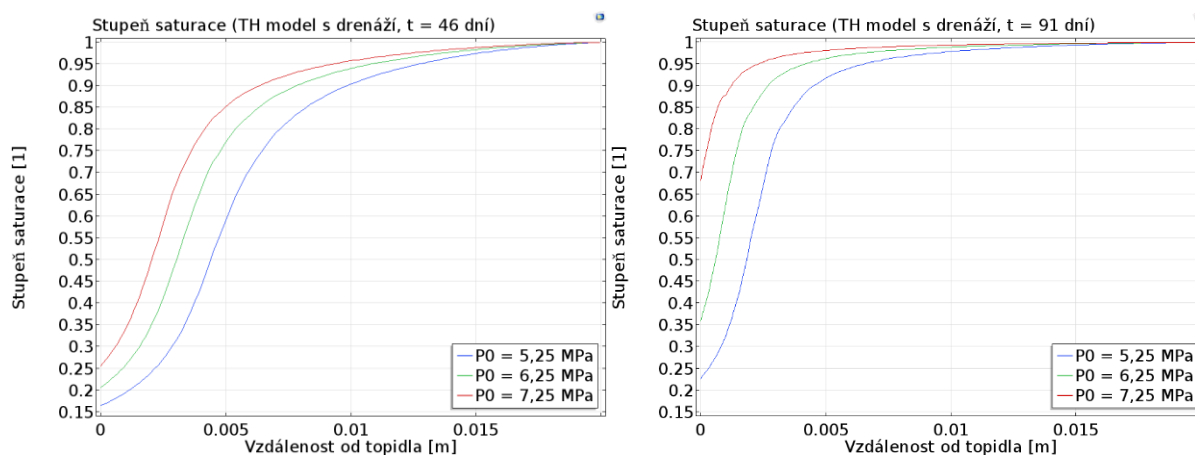


Obr. 92 Vliv různé tepelné vodivosti bentonitu na rozložení stupně saturace (průběh v závislosti na vzdálenosti od topidla v TH modelu s drenáží v čase 46 dní – vlevo a 91 dní – vpravo)

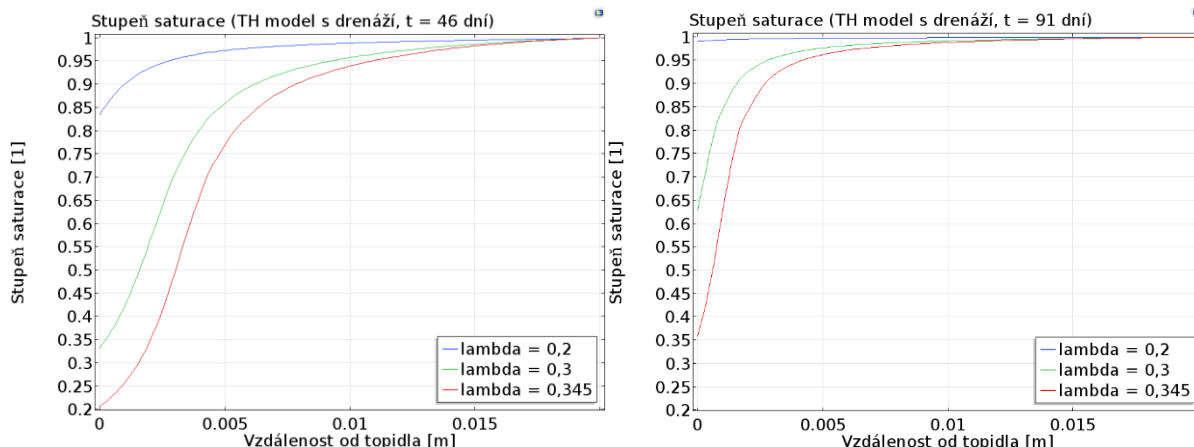
### 5.4.3 Vliv parametrů retenční křivky

Jedním z nejdůležitějších parametrů popisujících charakter chování bentonitu při sycení je retenční křivka. Podobně jako v předchozích případech byl sledován vliv změny parametrů vstupního tlaku  $P_0$  a tvarového koeficientu  $\lambda$  retenční křivky na změnu stupně saturace v bentonitu. Každý parametr byl variován zvlášť, přičemž byla uvažována výchozí hodnota parametru  $P_0 = 6,25$  MPa a následně testovány hodnoty  $P_0 = 5,25$  MPa a  $P_0 = 7,25$  MPa (pro  $\lambda = 0,345$ ). V případě druhého parametru byly testovány hodnoty  $\lambda = 0,2$ ,  $\lambda = 0,3$  a  $\lambda = 0,345$  (pro  $P_0 = 6,25$  MPa).

V grafech na Obr. 93 a Obr. 94 jsou vyneseny profily stupně saturace v časech 46 a 91 dní. Průběhy potvrzují významný vliv retenční křivky na charakter sycení. V našem případě ve větší míře ovlivňuje průběhy parametr  $\lambda$ , ale tato skutečnost je dána hlavně rozsahem testovaných mezí. Pro správnou predikci je tedy správně zvolená retenční křivka (tj. popisující chování reálného bentonitu) klíčovým parametrem.



Obr. 93 Vliv parametru  $P_0$  retenční křivky bentonitu na rozložení stupně saturace (průběh v závislosti na vzdálenosti od topidla v TH modelu s drenáží v čase 46 dní – vlevo a 91 dní – vpravo)



Obr. 94 Vliv parametru  $\lambda$  retenční křivky bentonitu na rozložení stupně saturace (průběh v závislosti na vzdálenosti od topidla v TH modelu s drenáží v čase 46 dní – vlevo a 91 dní – vpravo)

## 5.5 Požadavky na data pro modely

Jedním ze sekundárních cílů tohoto projektu bylo posoudit vliv dodaných materiálových parametrů na přesnost modelu. Ukázalo se, že zde existuje potřeba zpřesňování měření a dodatečného měření několika velmi důležitých parametrů. V této podkapitole se pokusíme zaměřit na několik z nich, jež mají dle našich zkušeností signifikantní vliv na kvalitu modelu, potažmo predikci chování bentonitu jako inženýrské bariéry.

- propustnost – v kapitole 5.4.1 je demonstrováno, jaký má propustnost vliv na celkovou rychlost saturace daného vzorku. Platí, že propustnost musí být změřena u každého typu použitého bentonitu. Další obtíží je, že propustnost závisí na teplotě. Přičemž takovéto měření pro český bentonit není dostupné a bylo by vhodné, aby byla v budoucnu stanovena hodnota propustnosti.
- saturační křivka – byla zadána saturační křivka při jedné hodnotě objemové hmotnosti bentonitu. Což nemůže pokrýt spektrum hodnot, které se vyskytnou v HÚ. Není technologicky možné uložit UOS do bentonitu o jedné konstantní hodnotě objemové hmotnosti vysušené zeminy z důvodu přítomnosti technologických mezer. Z tohoto důvodu je třeba pokrýt toto spektrum předpokládaných hodnot objemové hmotnosti vysušené zeminy v HÚ. Dále dodaná saturační křivka neměla změřené hodnoty v oblastech nízkých tlaků pod 3 MPa, což umožní predikovat rychlost dosaturování do plné saturace.  
Obtížným, ale důležitým měřením je změření saturačních křivek v závislosti na teplotě. Obecně, teplota má velký vliv na rychlost saturace a saturační křivky v závislosti na teplotě jsou jistou mírou, jak tuto závislost kvantifikovat. Doporučujeme provést nejdříve sérii izotermních experimentů, jejichž výsledkem bude série saturačních křivek pro předpokládané hodnoty objemové hmotnosti bentonitu v HÚ.
- tepelná vodivost – tepelná vodivost bentonitu se liší v závislosti na saturaci. V tomto projektu jsme pracovali se tepelnou vodivostí FEBEX bentonitu, která může být výrazně jiná než tepelná vodivost českého bentonitu. Tepelná vodivost má vliv na množství odváděného tepla z UOS, resp. má také vliv na výslednou konfiguraci HÚ, jež zajistí, aby teplota na UOS nepřesáhla kritickou mez. Z tohoto důvodu



doporučujeme provést experiment, který stanoví závislost tepelné vodivosti na saturaci pro bentonit použitý v HÚ.

- termální difúze (někdy také Soret Effect) – tento efekt lze matematicky vyjádřit jako  $-K_{HT}\nabla T$ , přičemž tento člen se přidává do Richardsovy rovnice.  $K_{HT}$  je termo-osmotický parametr, který je dle literatury v rozmezí  $10^{-10}$ – $10^{-14}$   $\text{m}^2 \cdot (\text{sK})^{-1}$ . Platí, že čím vyšší je teplotní gradient, tím větší je vliv tohoto členu na saturaci. Není známo žádné měření pro český bentonit, které by dávalo alespoň řádový odhad tohoto parametru. Tento parametr má vliv na průběh saturace v období, kdy tepelný výkon UOS je vyšší než teplota masivu, proto doporučujeme změřit tento parametr.
- tepelná kapacita – podobně jako u tepelné vodivosti, jsou hodnoty tepelné kapacity převzaty z literatury a její závislost na saturaci není k dispozici. Tepelná kapacita má vliv v počáteční fázi HÚ, kdy nám kvantifikuje míru nárůstu teploty v bentonitu. Z výše uvedených důvodů, doporučujeme změřit tento parametr pro bentonit použitý v HÚ.

Tento výčet termo-hydraulických parametrů představuje základní vstupy do modelů. Cílem je poukázat, které parametry nejsou stále k dispozici pro český bentonit a je třeba je změřit pro tvorbu přesných matematických modelů. Nelze zcela kvantifikovat, který parametr je nejdůležitější, protože pro přesné modelování a popis chování bentonitu jako inženýrské bariéry jsou třeba všechny. Přesto pokud je třeba vybrat, tak hodnota propustnosti má vliv po celou dobu životnosti úložiště a ostatní veličiny vedou k přesnému modelování hodnoty objemové hmotnosti bentonitu, ze které se počítá propustnost.

## 5.6 Očekávané změny v modelu při přechodu do in-situ podmínek

Experiment byl proveden v laboratorních podmínkách, ale při předpokladu, že by někdy v budoucnu byl tento experiment opakován v in-situ podmínkách, je třeba zdůraznit hlavní změny, které lze očekávat.

Z teplotního grafu Obr. 42 a Obr. 46 lze pozorovat rychlý nárůst vnitřní teploty bentonitu od okamžiku zahájení ohřevu, přičemž velmi rychle dojde k rovnováze tepelného toku mezi dodávaným a odváděným teplem. Což vytvoří teplotní gradient, jenž vede k mírné desaturaci bentonitu u topidla. V reálných podmínkách nebude bentonit obklopen nerezovou celou vystavenou inertní argonové atmosféře, ale bude v přímém kontaktu s horninou. Toto způsobí jiný poměr mezi dodávaným a odváděným teplem. Dále záleží na technologickém řešení, ale případná existence mezer v bentonitu (resp. bentonitu s drenážní vrstvou) změní poměr hodnot objemové hmotnosti. Tímto dojde ke změně tepelné vodivosti, resp. množství odváděného tepla.

Velmi bude záležet na tloušťce bentonitové vrstvy. V laboratorním experimentu byl modelován malý teplotní gradient, v souladu s měřením na Obr. 42 a Obr. 46. Tímto je pak vliv termální difúze malý a dochází k malé desaturaci okolí topidla. Což paradoxně při malé velikosti vzorku a vysokém prohřátí vzorku způsobí rychlejší saturaci bentonitu vlivem zvýšené difuzivity vodních par a klesající viskozity vody v závislosti na rostoucí teplotě. Pokud bude mít in-situ experiment silnější vrstvu bentonitu můžeme očekávat nižší rychlost saturace.

Dalším jevem, který je obtížně postihnuteľný a v malém měřítku experimentu má větší vliv, je přítomnost nerovnoměrné distribuce puklin s různými přítoky. Což způsobí jistou nejistotu v převzetí výsledků modelování a jejich aplikaci v in-situ podmínkách. Mimo jiné, v in-situ

 <b>SÚRAO</b>	<b>Test omezení koroze UOS využitím drenážní vrstvy v úložných vrtech</b>	Evidenční označení:
		<i>SÚRAO TZ 291/2018</i>

experimentu může docházet k průsakům vody skrze bentonit neboli skrze bentonit může proudit voda. Toto ovlivní výsledky in-situ experimentu vůči laboratorním experimentům.

Ale i zde platí, že je možno experiment předem modelovat a stanovit předběžný vývoj experimentu. Což umožní nejen predikovat vývoj experimentu, ale následné srovnání experimentálních dat s modelem poskytne kvalitativní představu o modelu. Přičemž toto umožní alespoň částečně predikovat vývoj experimentu i po jeho skončení. Dále předběžný model umožní predikovat vývoj různých návrhů experimentů neboli toto umožní minimalizovat vliv nežádoucích jevů na experimenty.

## 6 Závěr

Výsledky provedených experimentů jsou zatíženy relativně velkým počtem nejistot, které jednak souvisí s charakterem experimentu a dále také s nejistotami v post experimentálních analýzách. Z korozního hlediska není možné na základě obdržených výsledků adekvátně charakterizovat a porovnat systémy s drenáží a bez drenáže. V celách bez drenážní vrstvy není pozorovatelný jednoznačný charakter korozních rychlostí se vzdáleností od sytící drážky a s velkou pravděpodobností je syčení bentonitu ovlivněno „průnikem“ vody na rozhraní cela/bentonit. Rozptyl korozních rychlostí u cel s drenážní vrstvou je také relativně velký a pro vyslovení závěrů nemáme dostatečné množství opakování experimentu, abychom mohli vyslovit nějaké závěry k vlivu drenáže na systém.

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. Tento jev by bylo vhodné do budoucna ověřit na „reálném“ systému v přírodním granitoidním masivu v dlouhodobém časovém horizontu, aby bylo možné případně zahrnout tento efekt při predikcích životnosti ukládacího obalového souboru. Zda je nebo není průnik vody na kontaktu bentonitových segmentů problém, není možné na základě provedených experimentů určit.

Výsledky stanovení vlhkosti bentonitu dle očekávání odpovídají experimentálnímu uspořádání, tedy vyšší vlhkost byla pozorována v systému s drenážní vrstvou oproti systému s modelovou puklinou. Pro „zvýraznění“ tohoto efektu by bylo vhodné opět přistoupit k experimentu „in situ“, ale ve větším měřítku s výrazně silnější vrstvou bentonitu

Budoucí experimenty v této oblasti by měly být diskutovány s týmy zabývajícími se modelováním THM procesů, aby poskytly co možná nejvíce vstupů do modelů. Jak bylo uvedeno ve zprávě, je v současné době relativně velké množství parametrů pro český bentonit nestanoveno a pro budoucí predikce THM procesů v úložišti bude nutné podstatné parametry pro simulace stanovit.

## 7 Literatura

- BARTOVSKÁ L., ŠIŠKOVÁ M. (2005): Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav. – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. ISBN 80-7080-579-X.
- BOCKGÅRD, N., VIDSTRAND, P., ÅKESSON, M. (2010): Task 8 Modelling the Interaction between Engineered and Natural Barriers – An assessment of a Fractured Bedrock Description in the Wetting Process of Bentonite at Deposition Tunnel Scale. Technical report, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden.
- BORGESSON, L., CHIJIMATSU, M., FUJITA, T., NGUYEN, T., JING, L.(2001): Thermo-Hydro-Mechanical Characterisation of a Bentonite-based Buffer Material by Laboratory Tests and Numerical Back Analysis. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 38 (2001), 95–104.
- ČSN EN ISO 17892-1 (2015): Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemín – 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.
- Dobrev D., a kol. (2016): Vliv sycení bentonitu na korozi materiálů ukládacího obalového souboru. – Zpráva SÚRAO 72/2016, ÚJV Řež, a. s., 75 str.
- DOBREV D., a kol. (2017): Test omezení koroze UOS s využitím drenážní vrstvy v úložných vrtech. – Zpráva SÚRAO 199/2017, ÚJV Řež, a. s., 103 str.
- HUERTAS, F., et al. (2000): Full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high-level radioactive waste in crystalline host rock (FEBEX project). EUR(Luxembourg).
- NERETNIEKS I. (1985): Some aspects of the use of iron canisters in deep lying repositories for nuclear waste. Technical Report 85-35, Nagra.
- RHÉN, I., FORSMARK, T.(2001): Äspö Hard Rock Laboratory. Prototype Repository Hydrogeology – Summary Report of Investigations before the Operation Phase. Technical report SKB IPR-01-65, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden.
- VAŠÍČEK, R., HAUSMANNOVÁ, L., ŠŤÁSTKA, J., SVOBODA, J., NÁDHERNÁ, D., PACOVSKÁ, D., HUBÁLOVSKÁ, J., VEČERNÍK, P., TRPKOŠOVÁ, D., GONDOLLI, J., DVOŘÁKOVÁ, M., HANUSOVÁ, I., BĚLÍČKOVÁ, L. (2016): Dopas Deliverable n° D3.21Final results of EPSP laboratory testing, CTU in Prague.

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

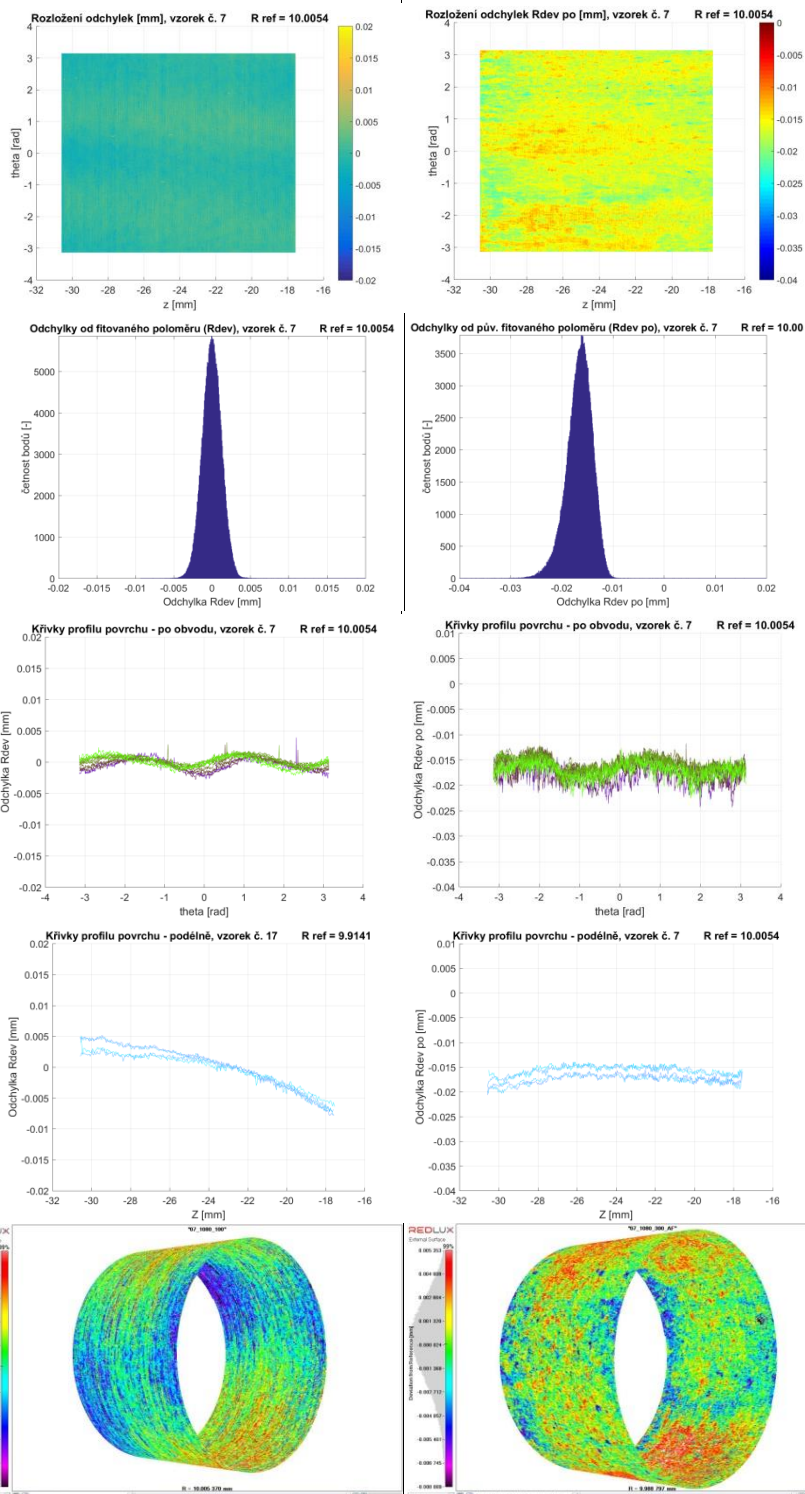
*Tab. 7 Hodnoty referenčních poloměrů před a po experimentu*

Vzorek číslo	Referenční poloměr $R_{ref\_před}$ [mm]	Referenční poloměr $R_{ref\_po}$ [mm]	Průměr $R_{dev}$ (absolutní hodnota, vůči $R_{ref\_před}$ ) [mm]	STD $R_{dev}$ (vůči $R_{ref\_před}$ ) [mm]
7	10,005	9,989	0,0166	0,0025
8	9,92	9,903	0,0175	0,0115
10	9,991	9,960	0,0302	0,0075
11	9,996	9,995	0,0026	0,0022
13	9,916	9,911	0,0065	0,0066
14	9,854	9,849	0,0058	0,0064
15	9,918	9,915	0,0071	0,0061
18	9,991	9,985	0,0063	0,0068
20	9,996	9,994	0,0037	0,0059
21	9,994	9,983	0,0112	0,0068
24	9,895	9,880	0,0156	0,0072
25	9,899	9,883	0,0162	0,0088
28	9,921	9,910	0,0116	0,0084
30	9,912	9,899	0,0135	0,0086
32	10,007	9,990	0,0168	0,0029
34	9,929	9,914	0,0157	0,0110
35	9,929	9,902	0,0266	0,0093
36	9,931	9,907	0,0243	0,0088
38	10,007	9,985	0,0219	0,0067
39	9,905	9,884	0,0209	0,0081
41	10,0122	9,997	0,0149	0,0066
42	9,884	9,882	0,0036	0,0029
45	10,003	9,997	0,0061	0,0028
46	9,914	9,912	0,0044	0,0036
47	9,922	9,916	0,0061	0,0035
48	9,922	9,914	0,0083	0,0033
49	9,920	9,913	0,0066	0,0035

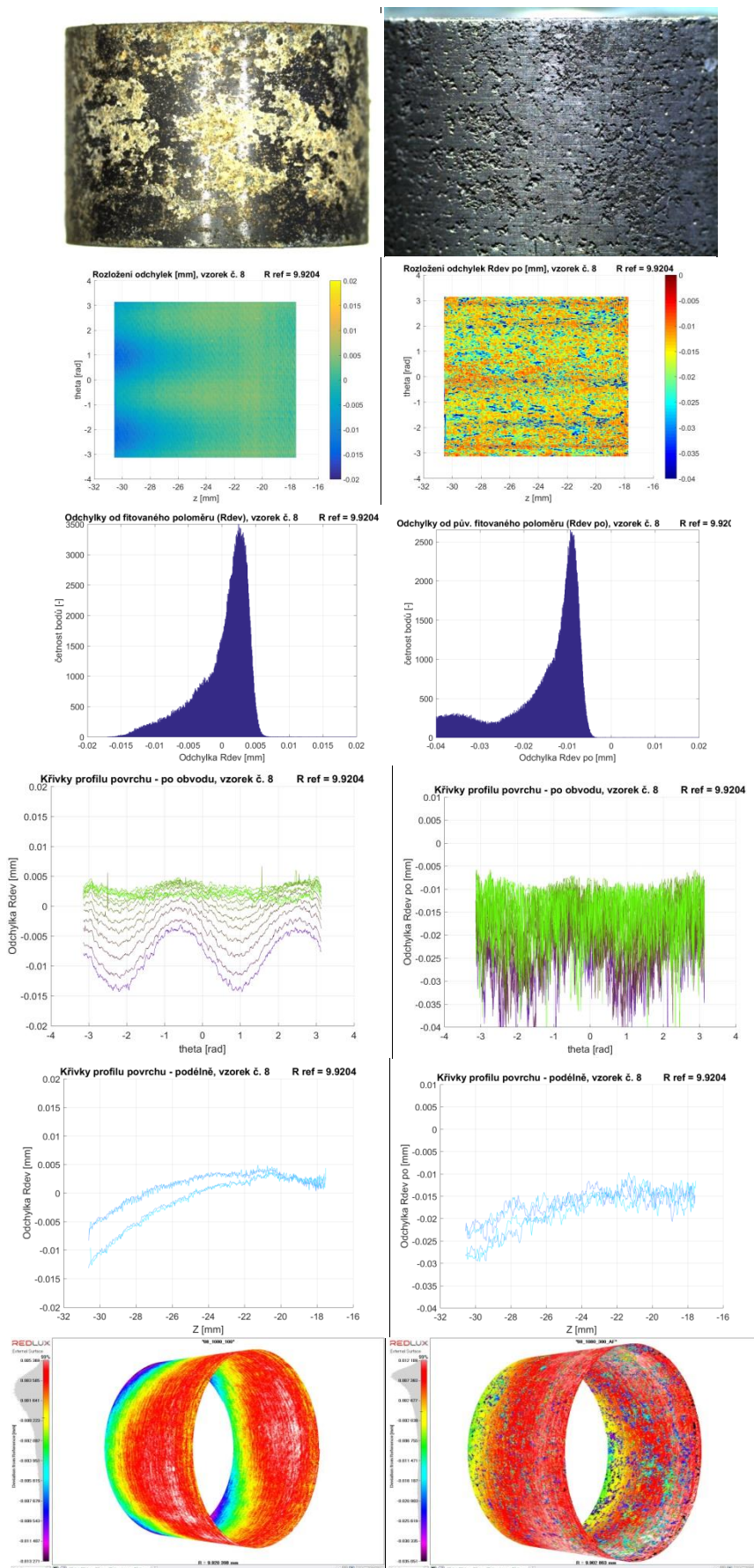
51	9,923	9,917	0,0063	0,0032
52	9,999	9,991	0,0086	0,0029
53	10,000	9,992	0,0083	0,0037
54	9,921	9,913	0,0085	0,0060
55	9,921	9,912	0,0091	0,0059
56	9,909	9,903	0,0067	0,0035
57	9,878	9,875	0,0041	0,0053
58	9,918	9,913	0,0055	0,0066
59	9,992	9,990	0,0023	0,0021
60	9,899	9,894	0,0056	0,0058
61	9,897	9,892	0,0053	0,0040
62	9,926	9,921	0,0054	0,0066
63	9,914	9,905	0,0086	0,0068



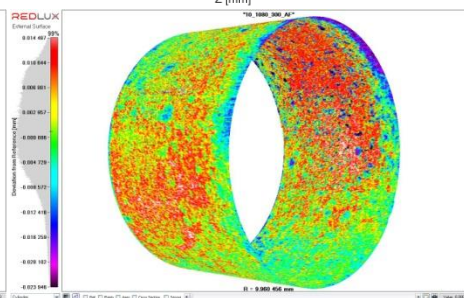
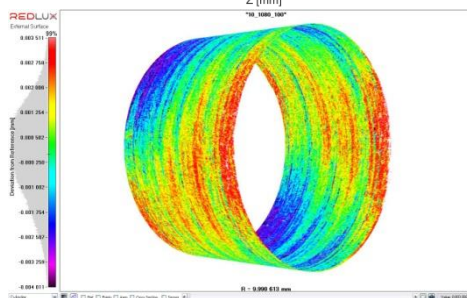
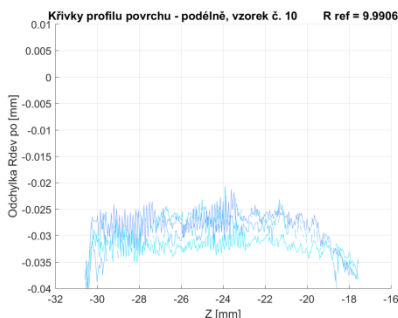
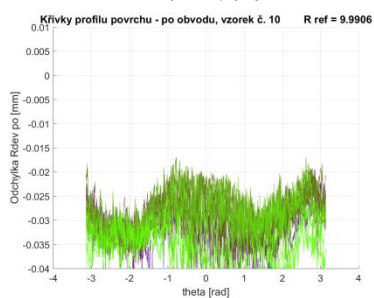
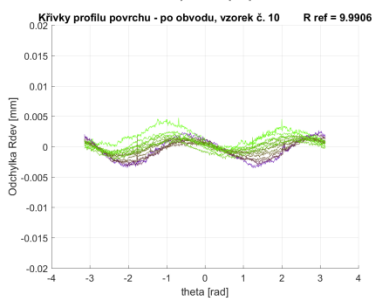
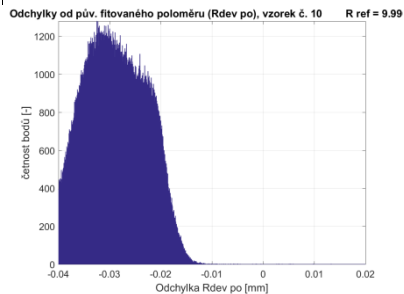
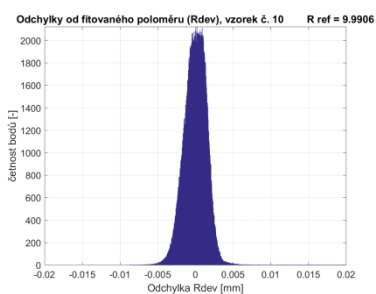
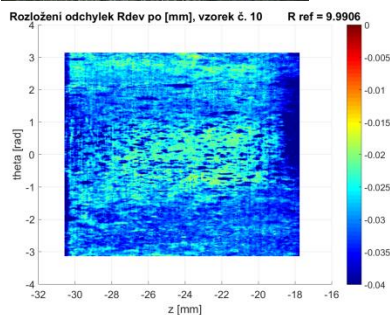
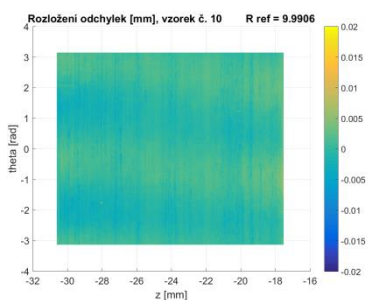
## Příloha 2 – Výsledky profilometrie před a po experimentu



Obr. 95 Vzorek 7 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

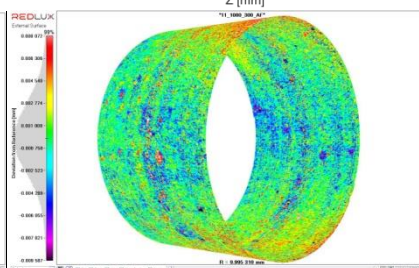
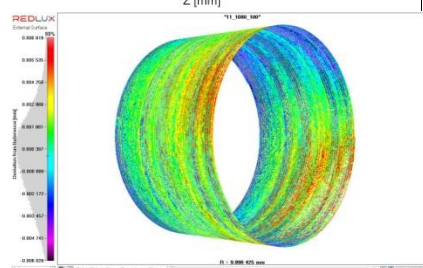
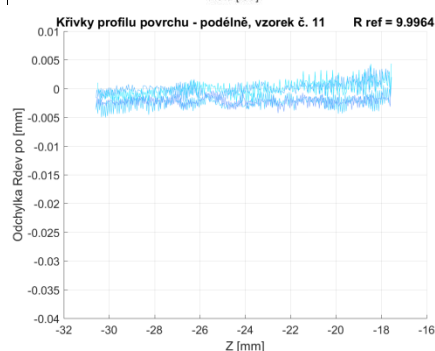
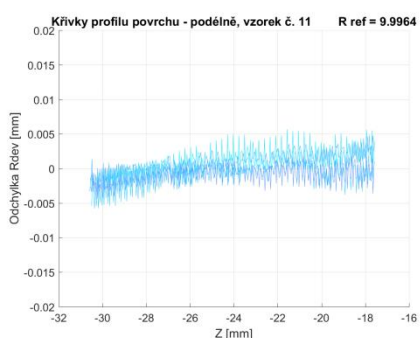
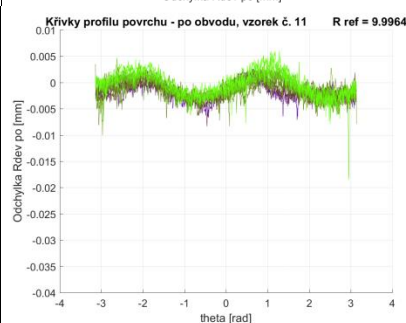
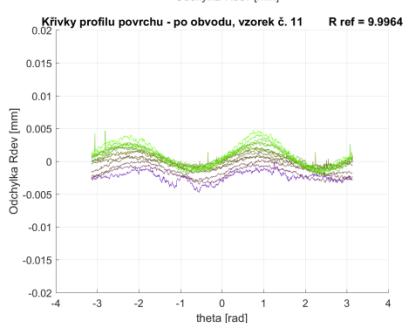
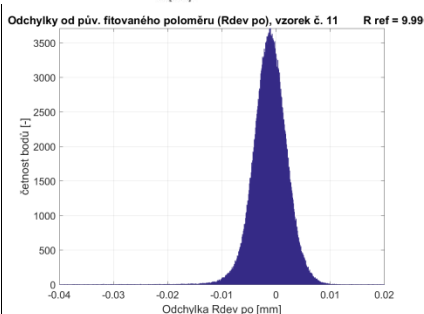
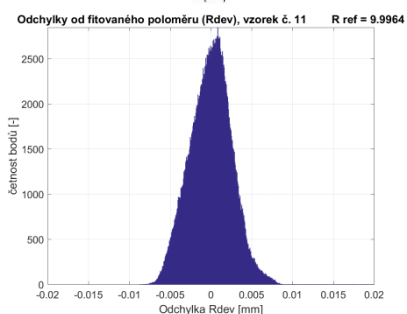
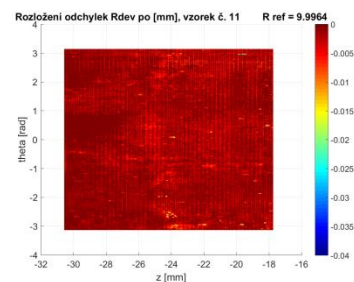
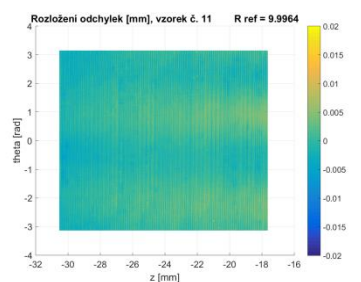


Obr. 96 Vzorek 8 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

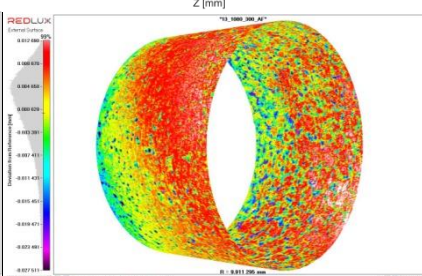
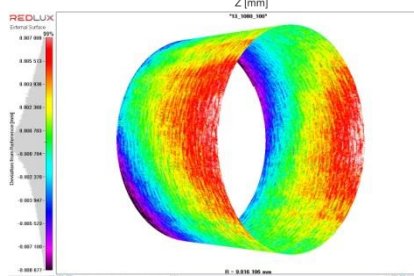
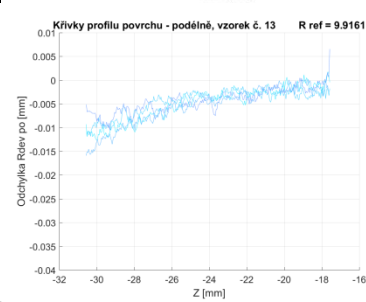
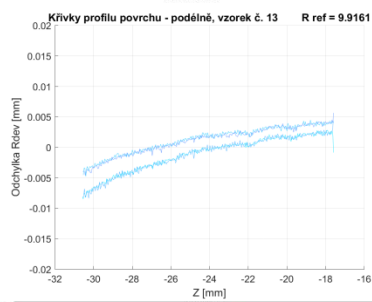
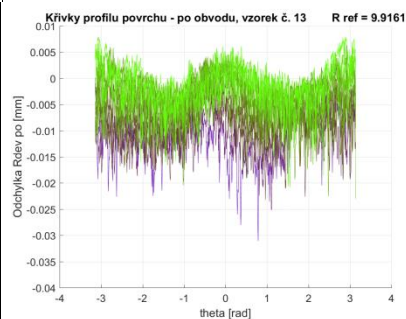
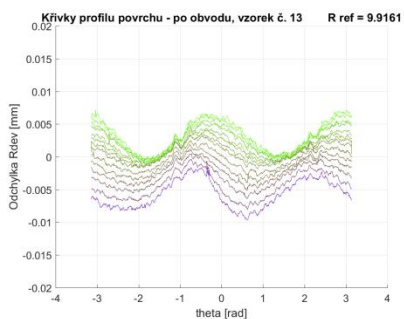
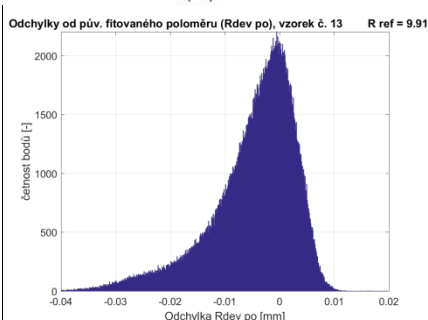
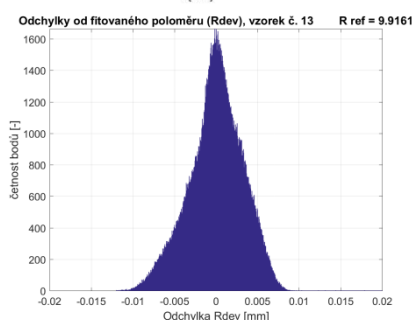
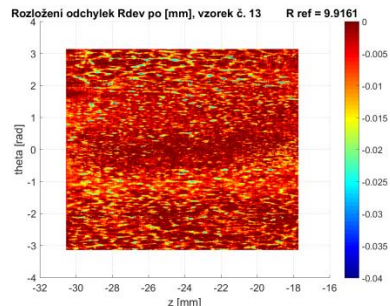
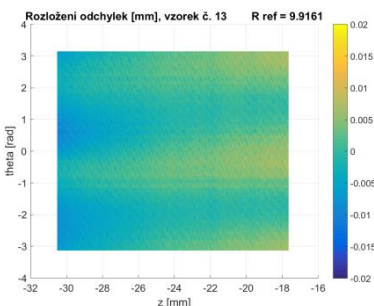


Obr. 97 Vzorek 10 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

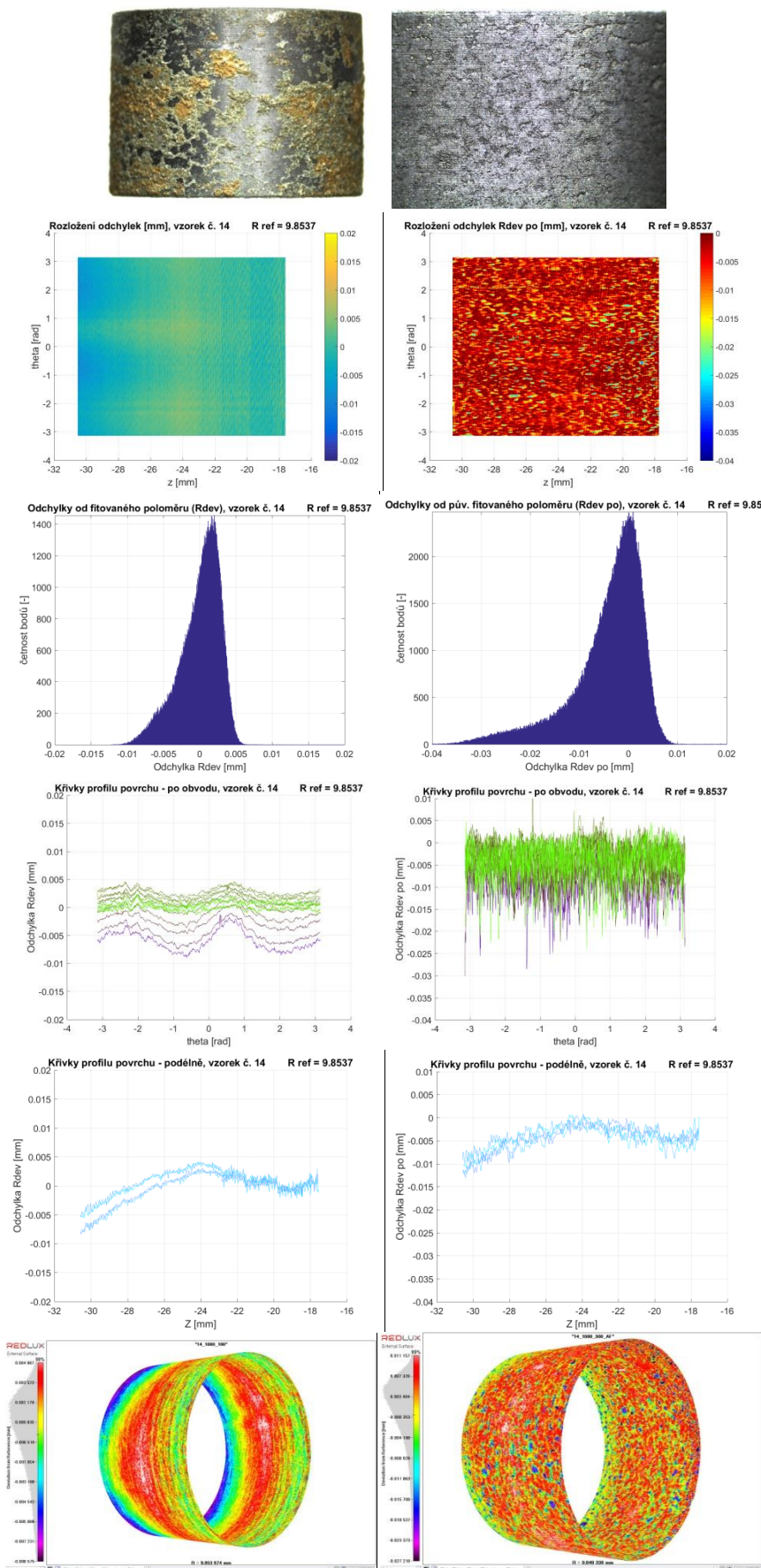




Obr. 98 Vzorek 11 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

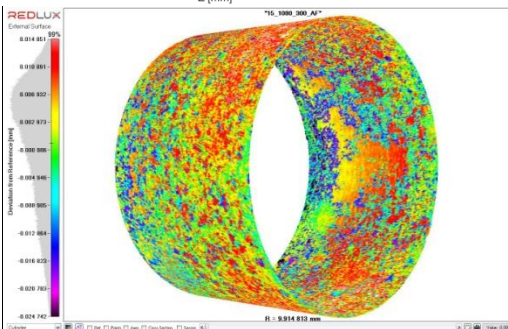
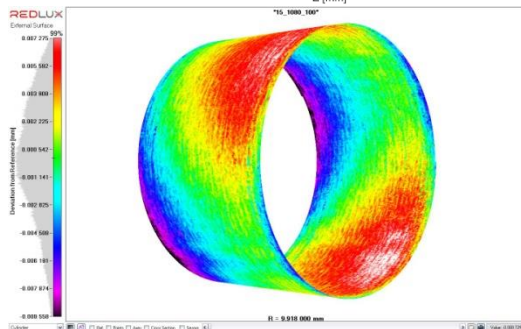
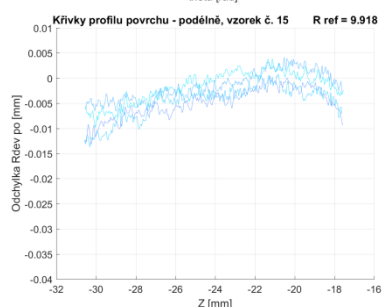
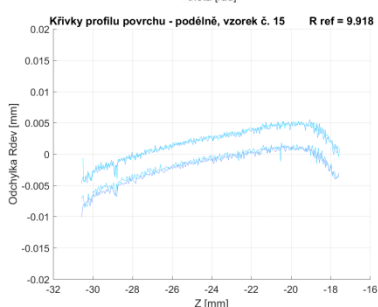
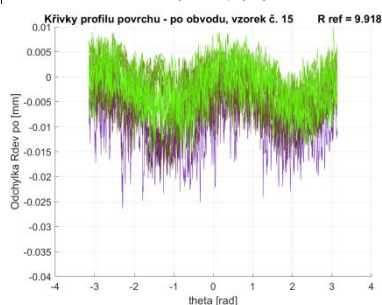
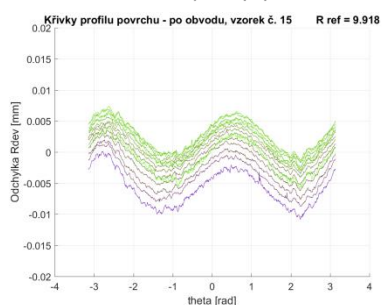
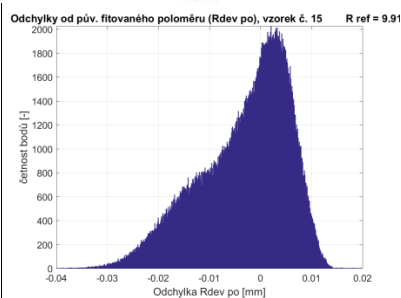
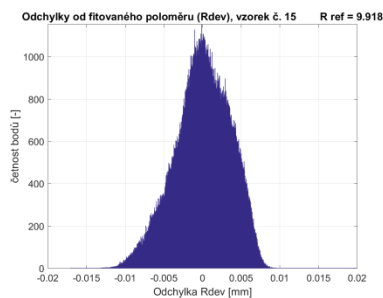
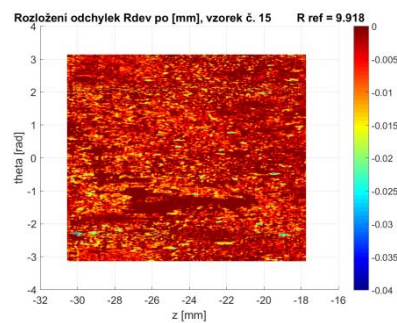
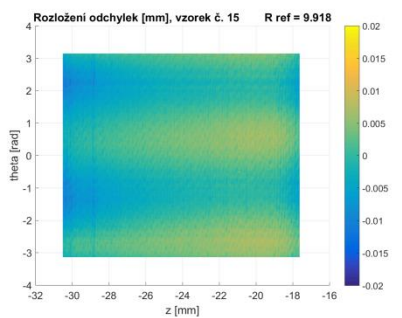


Obr. 99 Vzorek 13 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

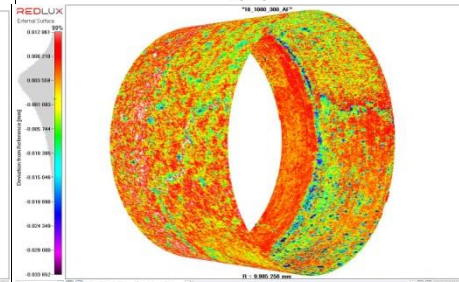
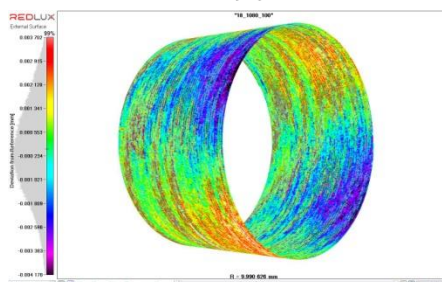
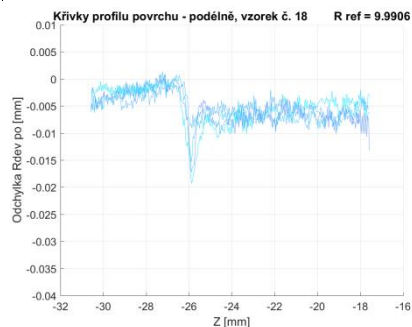
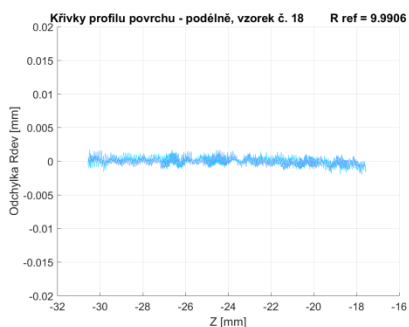
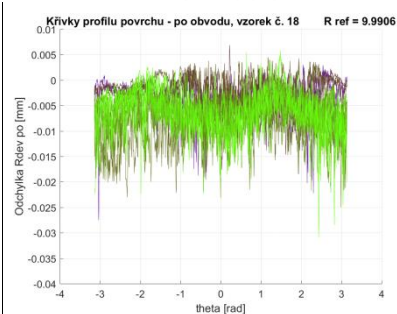
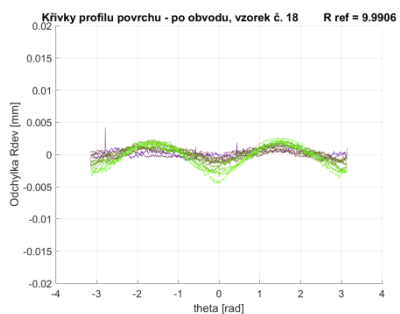
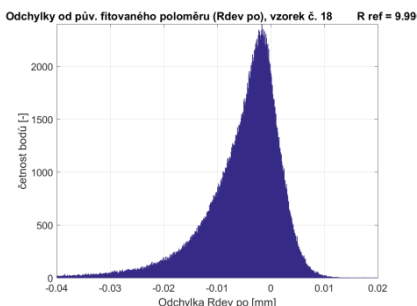
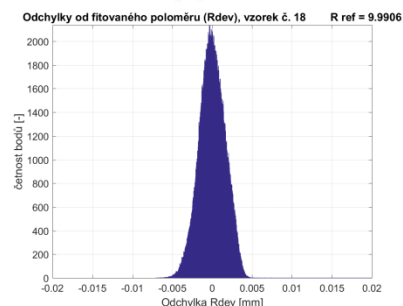
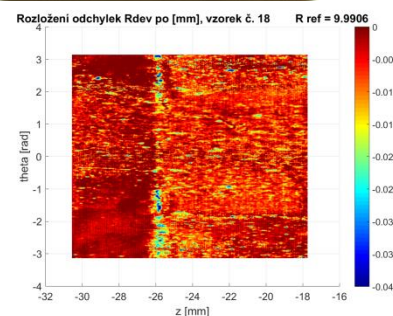
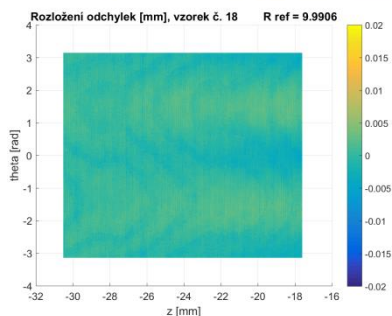
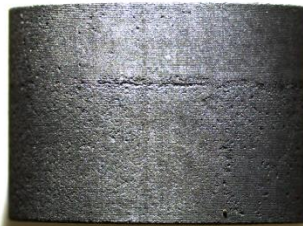


Obr. 100 Vzorek 14 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

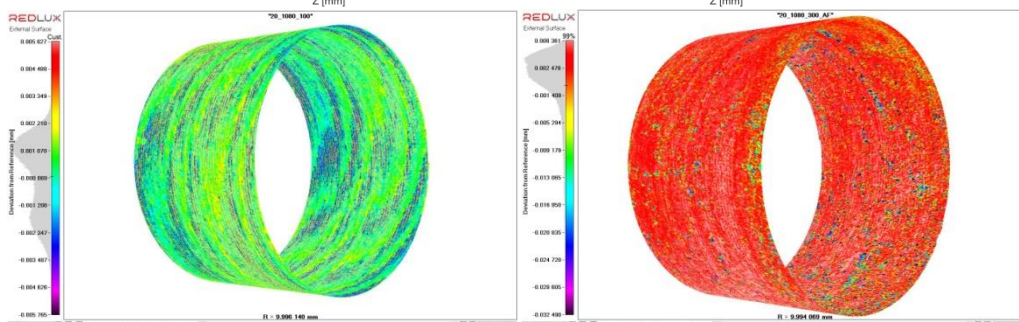
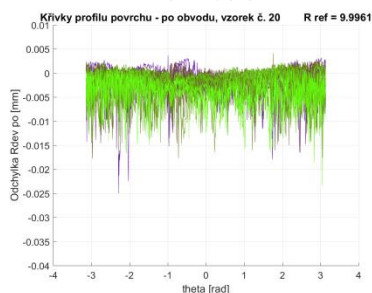
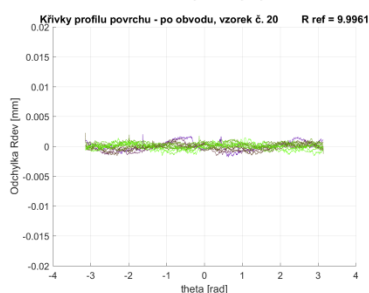
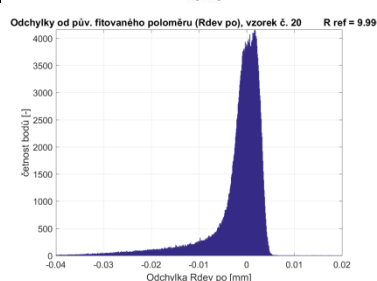
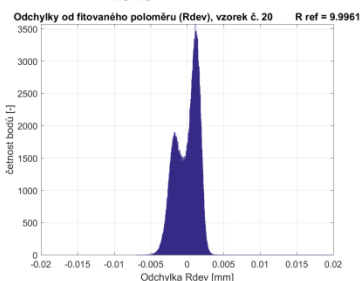
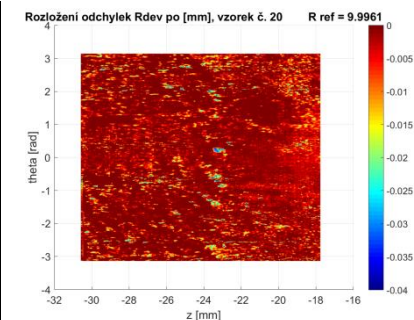
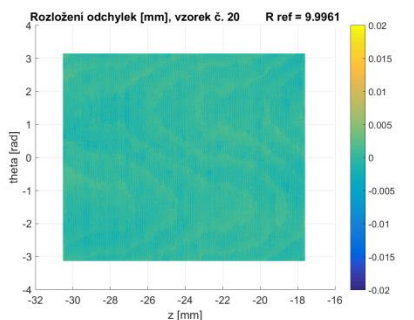




**Obr. 101** Vzorek 15 – Povrch před a po odmofení, profilometrie před a po experimentu

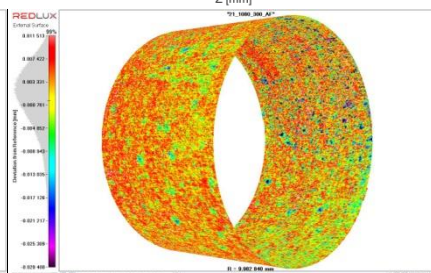
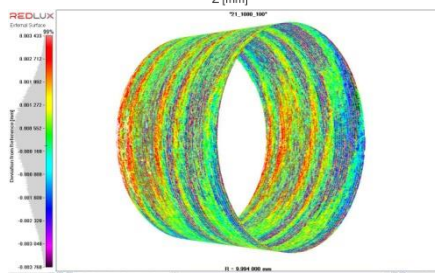
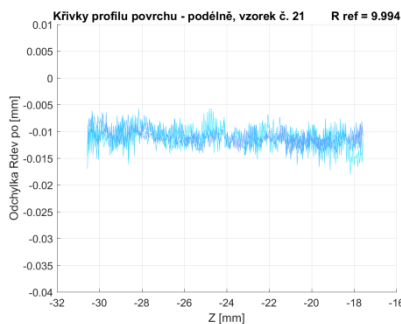
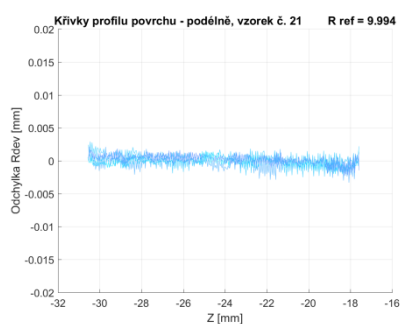
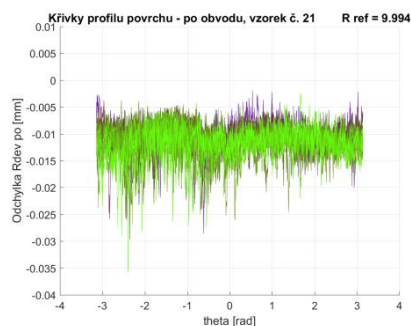
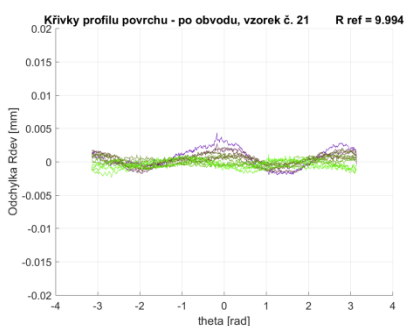
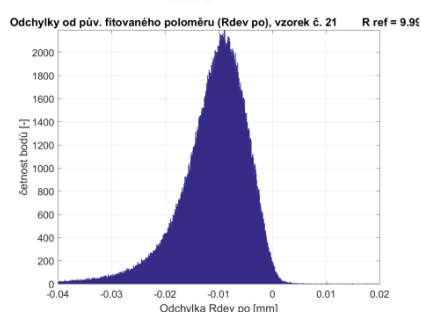
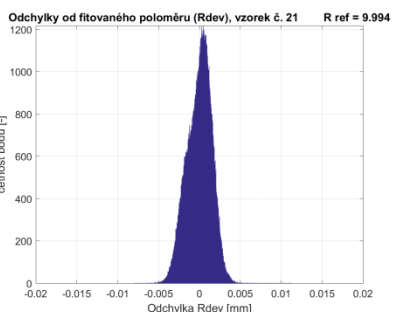
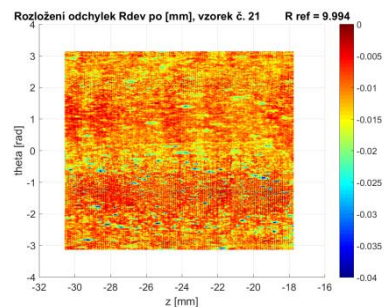
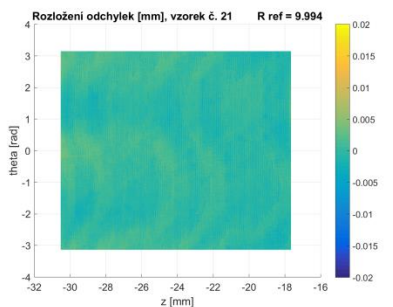


Obr. 102 Vzorek 18 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

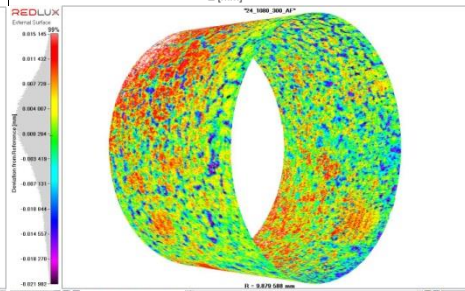
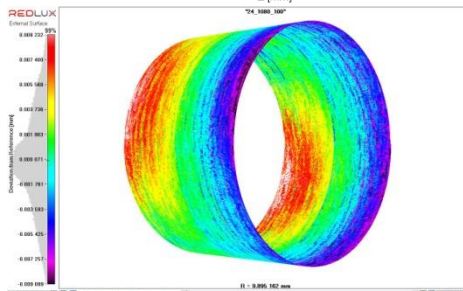
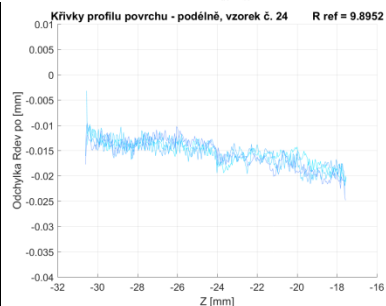
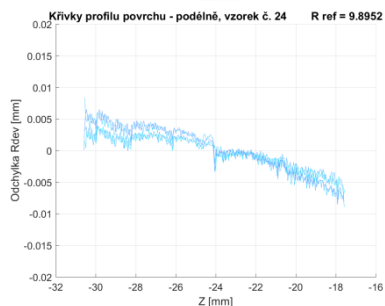
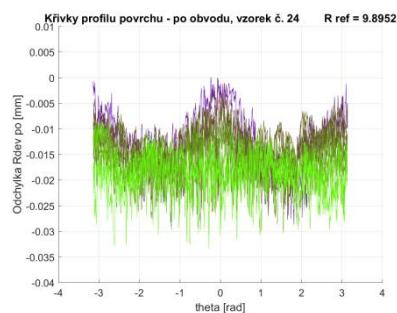
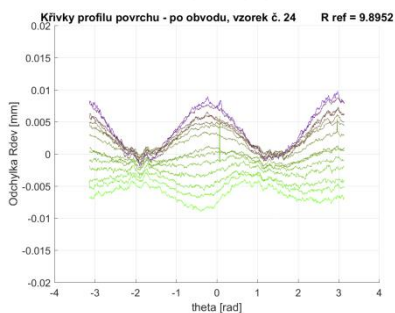
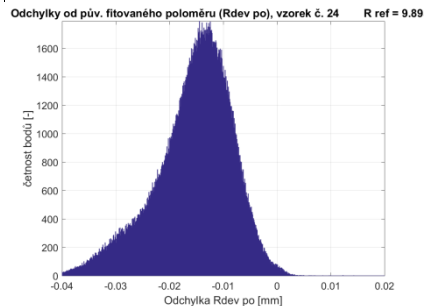
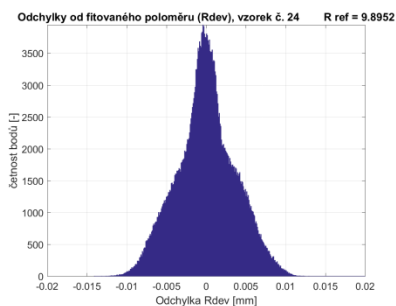
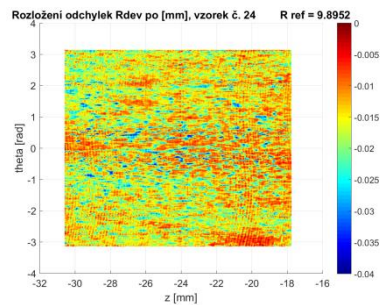
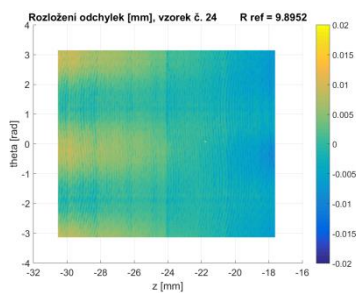


Obr. 103 Vzorek 20 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu



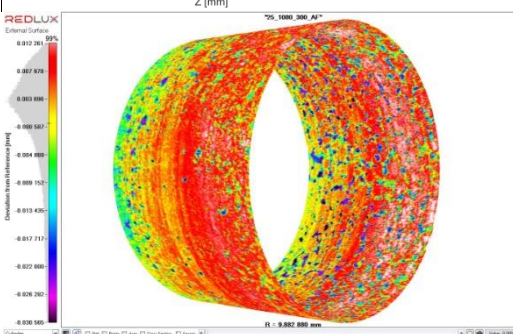
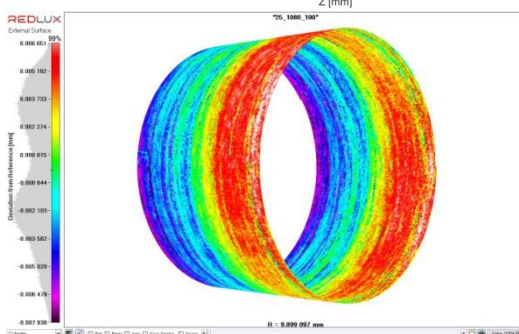
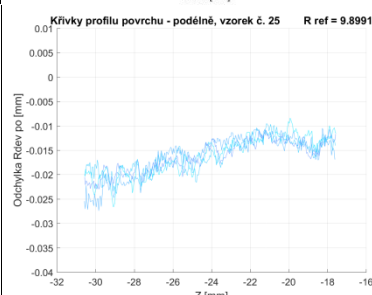
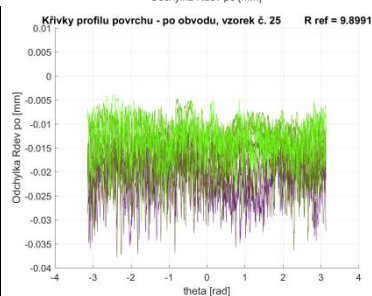
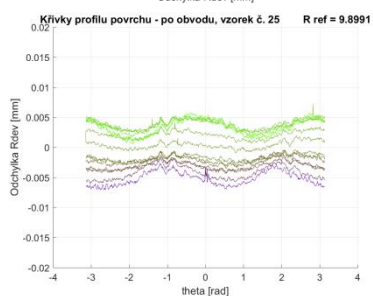
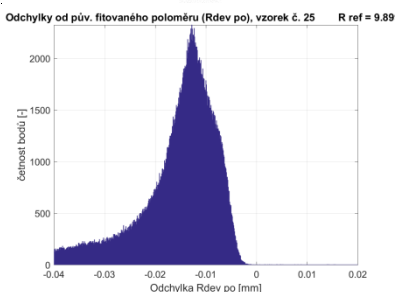
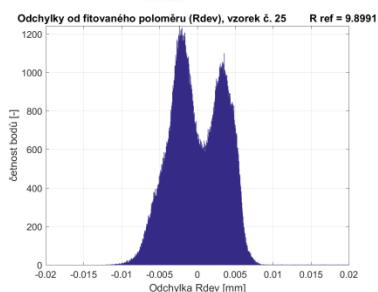
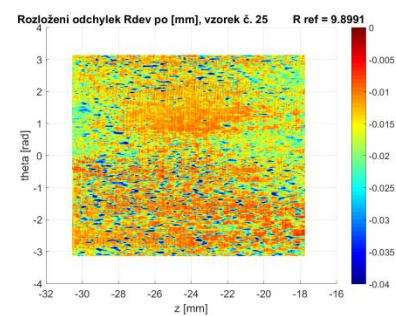
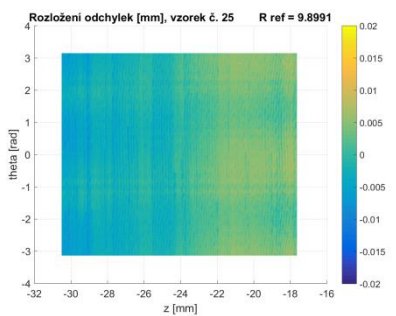
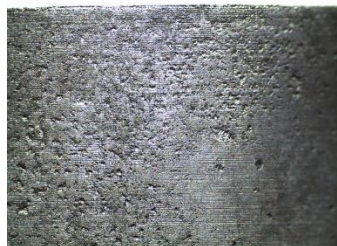


Obr. 104 Vzorek 21 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

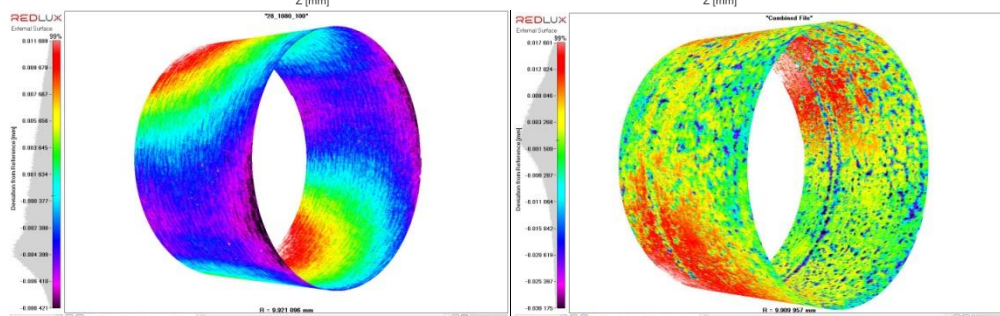
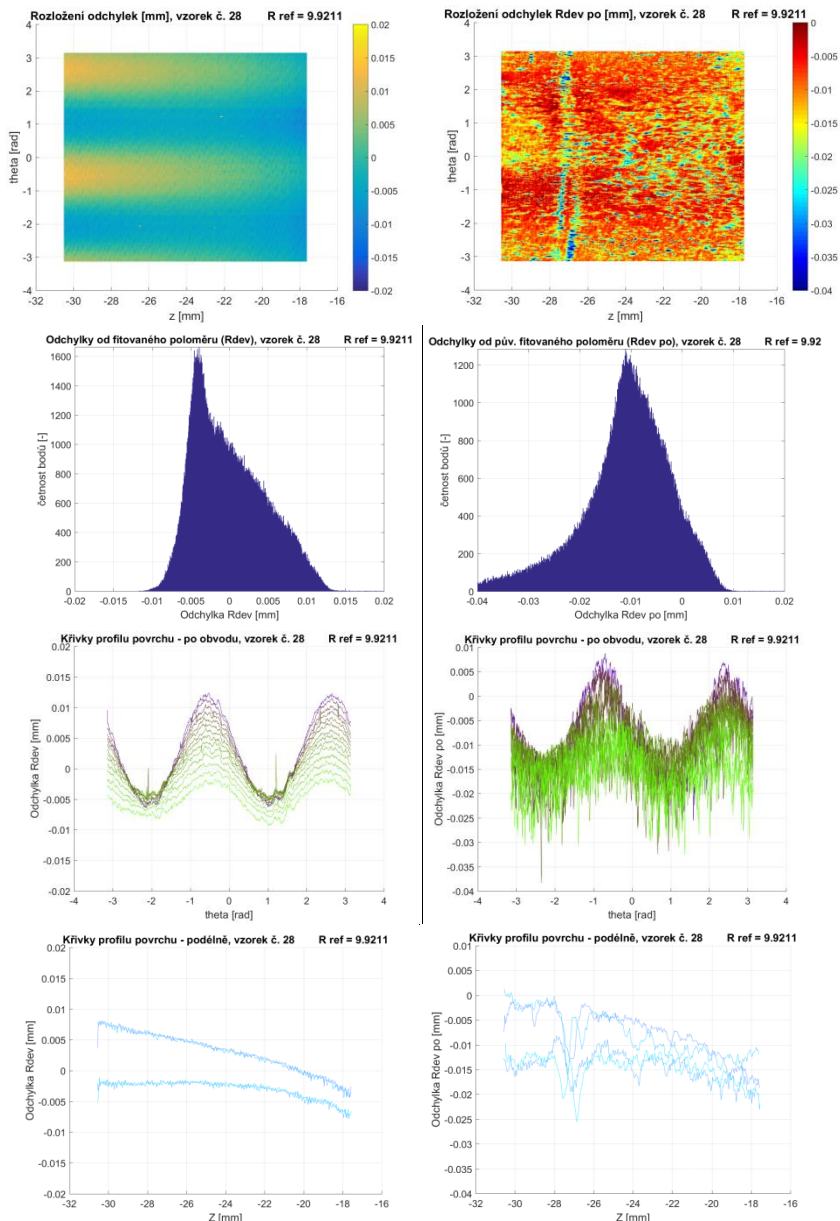


Obr. 105 Vzorek 24 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

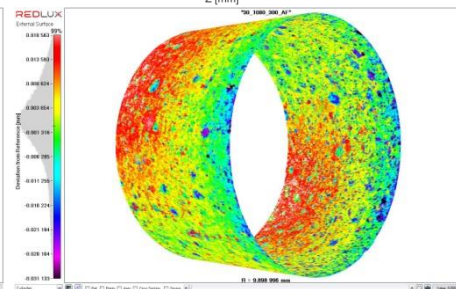
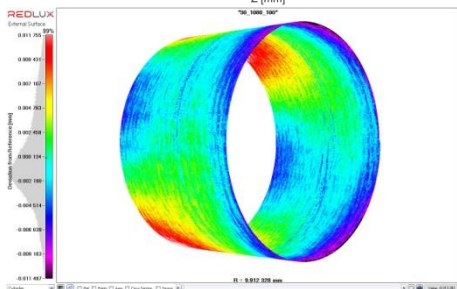
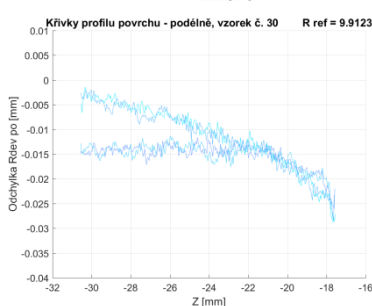
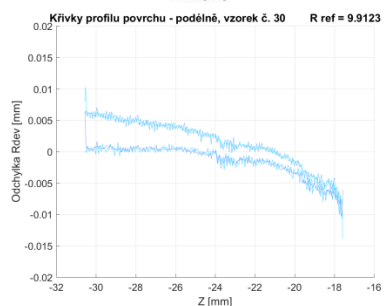
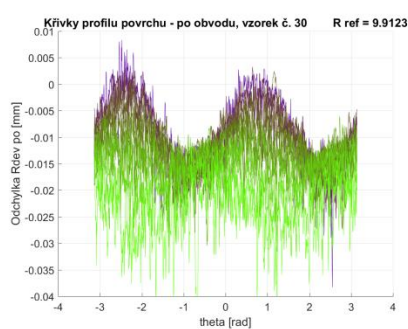
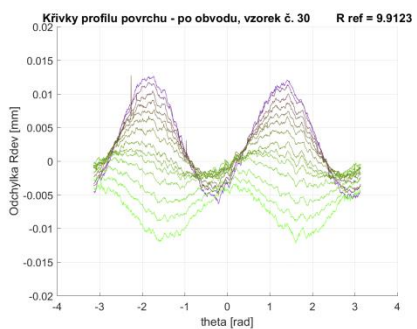
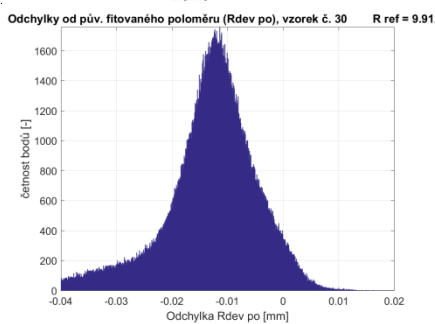
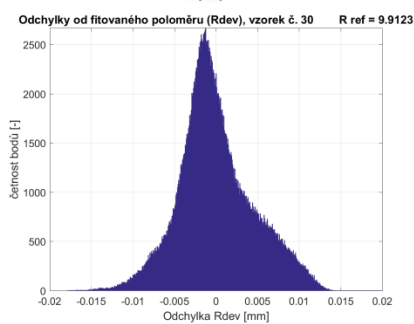
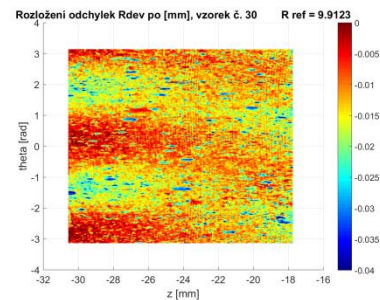
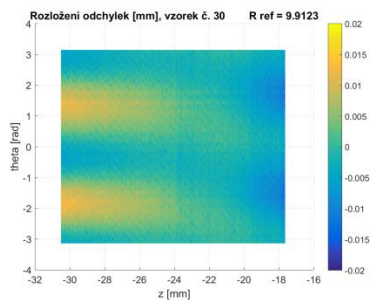
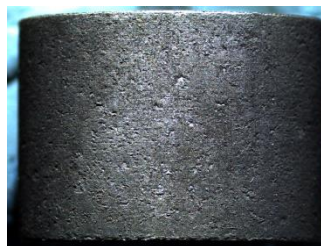




Obr. 106 Vzorek 25 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

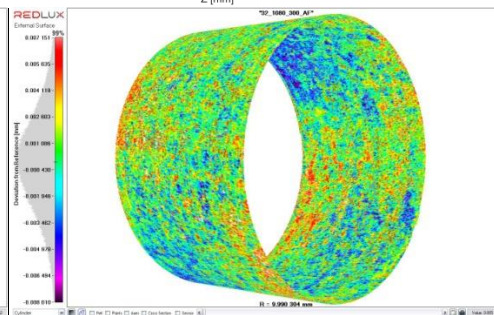
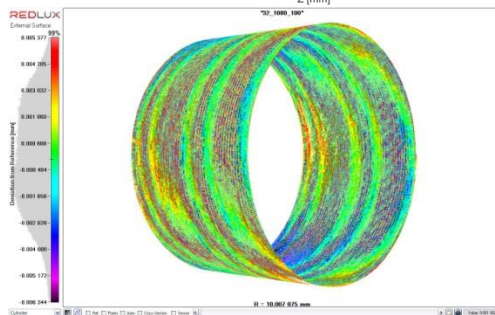
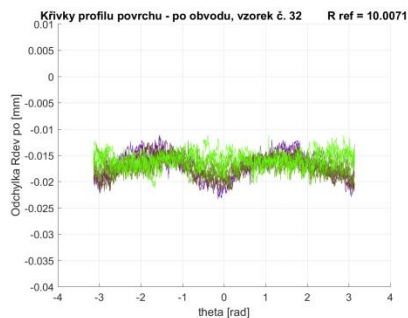
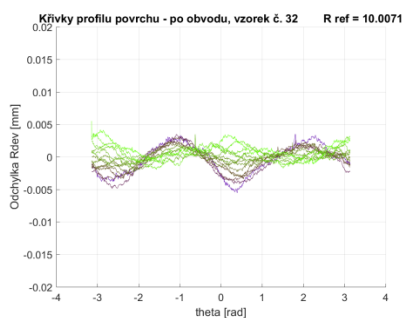
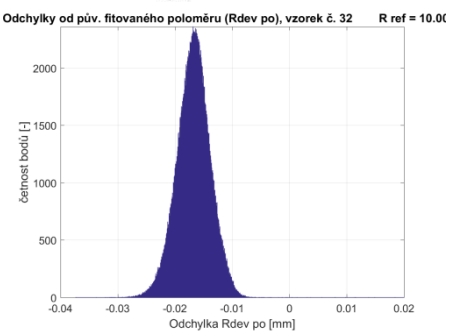
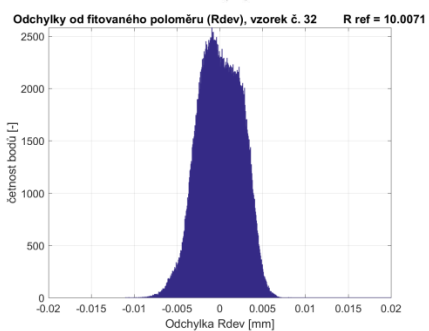
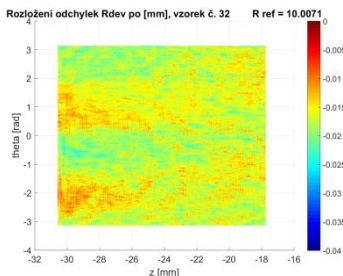
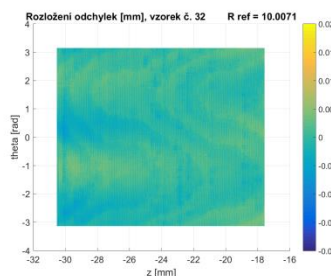


**Obr. 107** Vzorek 28 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

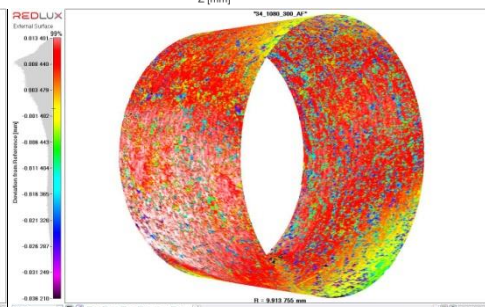
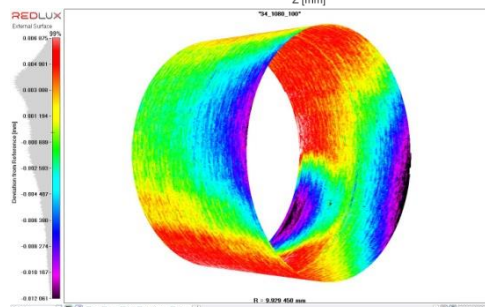
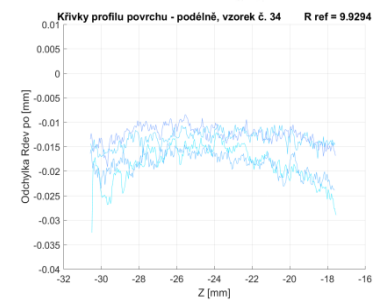
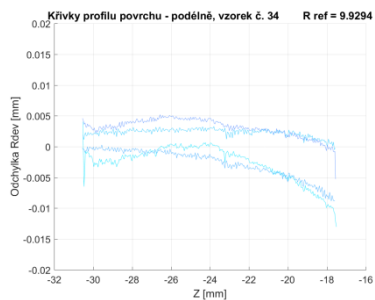
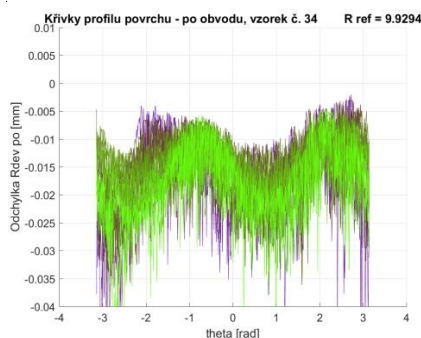
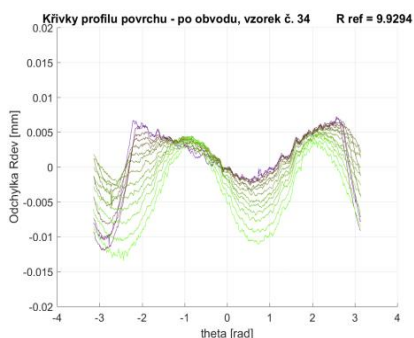
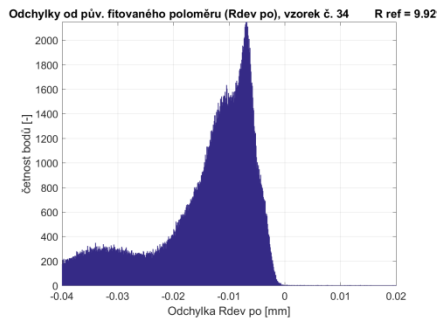
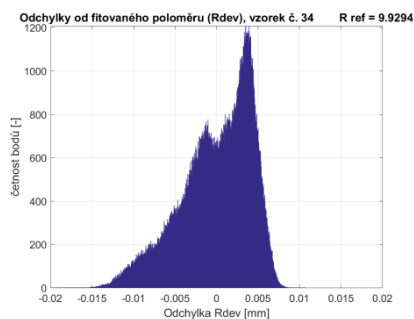
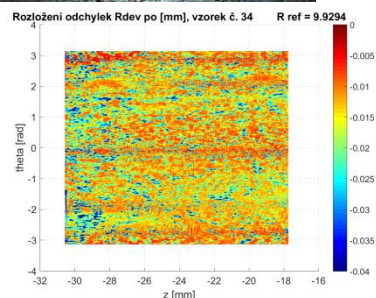
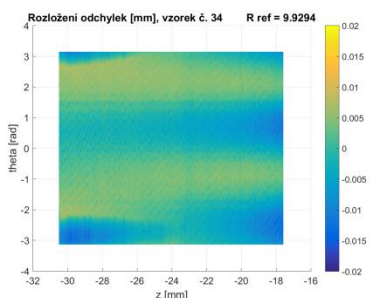


Obr. 108 Vzorek 30 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

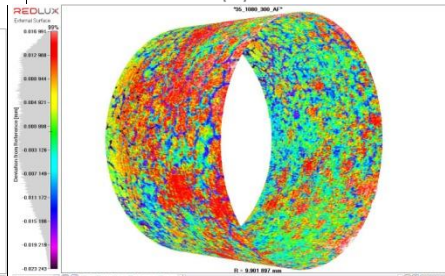
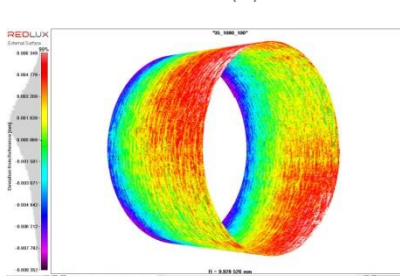
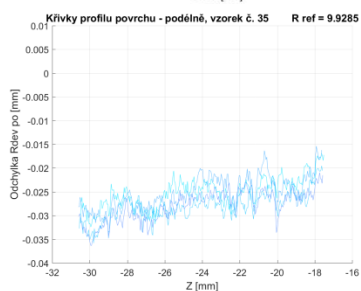
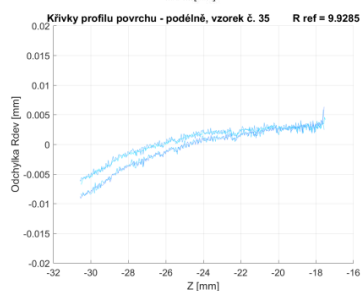
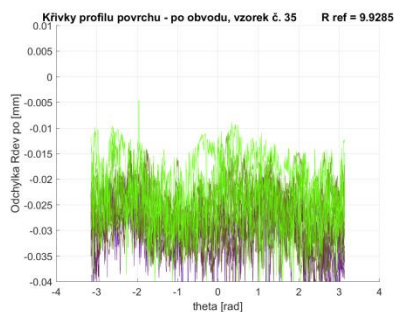
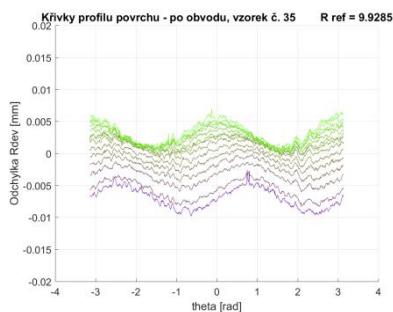
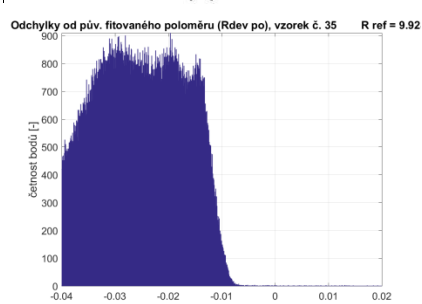
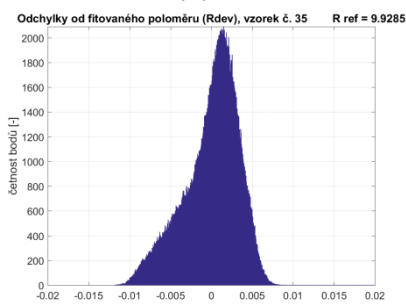
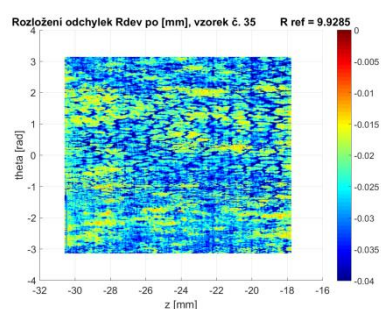
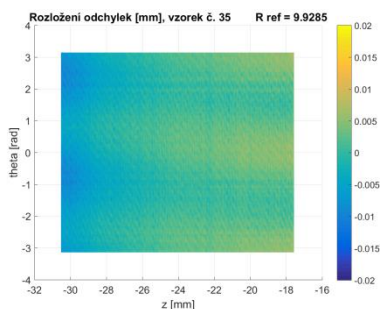




Obr. 109 Vzorek 32 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

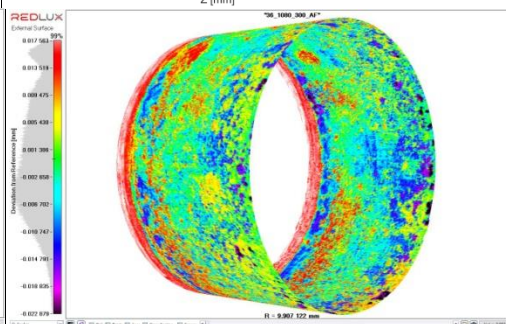
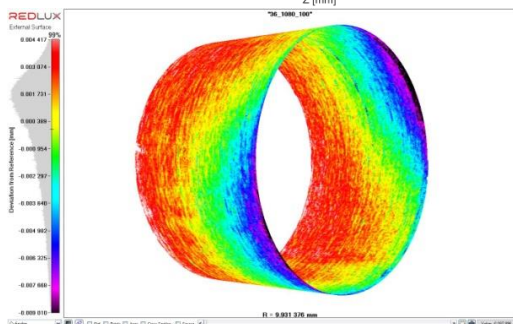
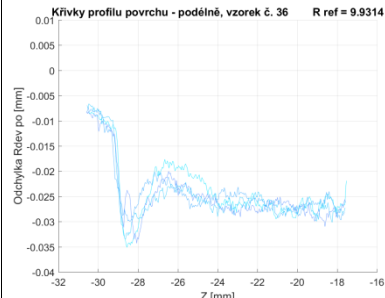
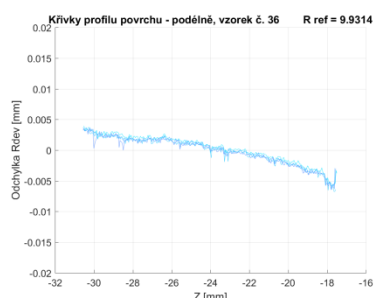
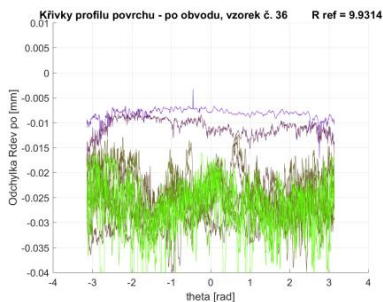
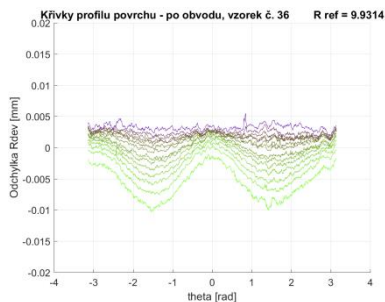
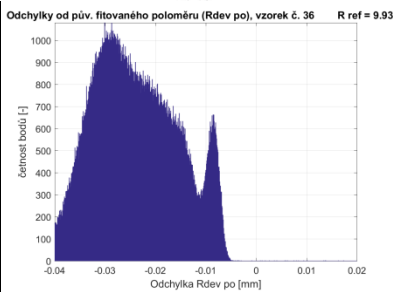
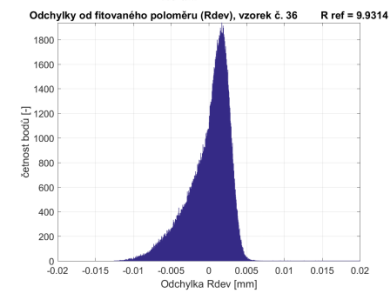
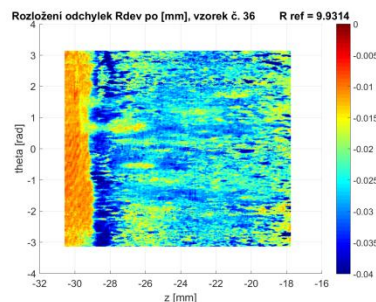
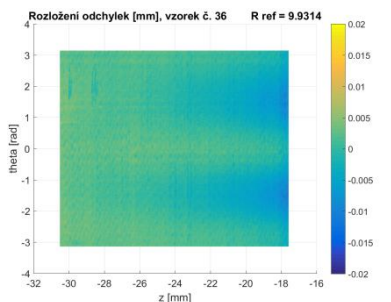


Obr. 110 Vzorek 34 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

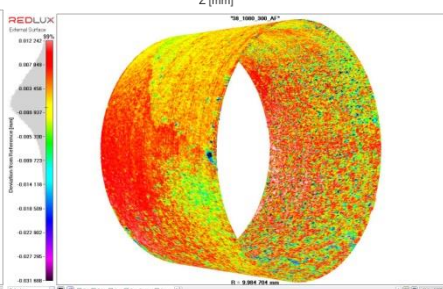
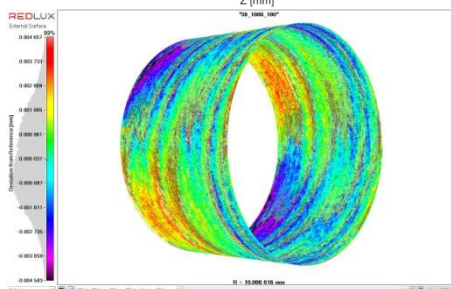
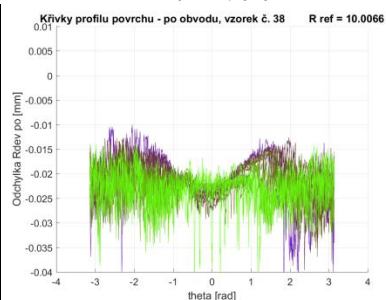
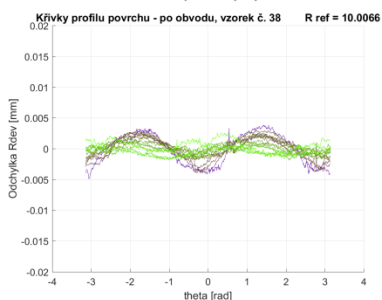
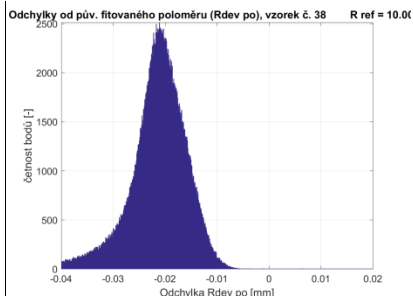
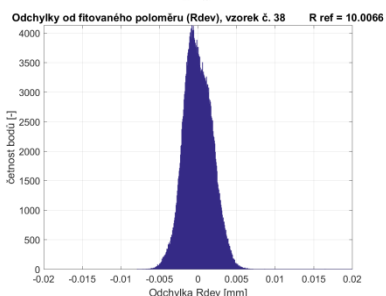
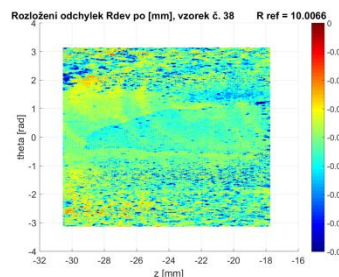
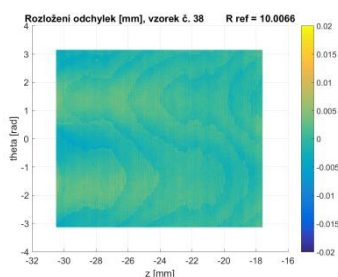


Obr. 111 Vzorek 35 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

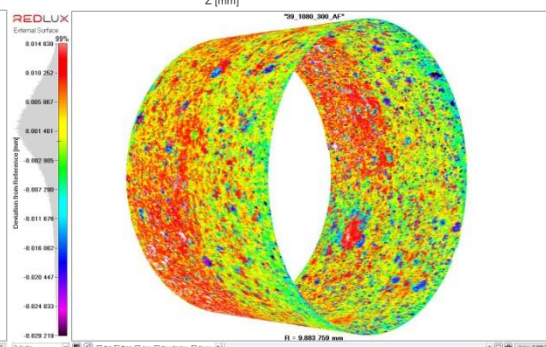
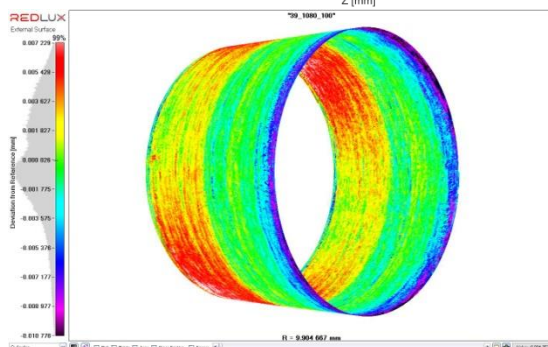
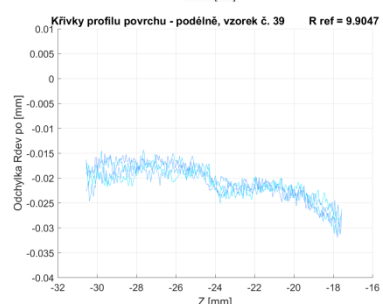
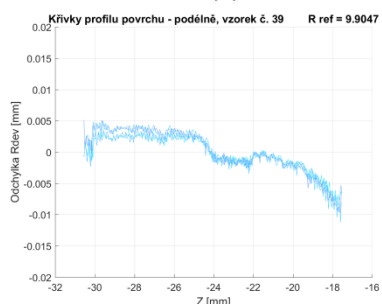
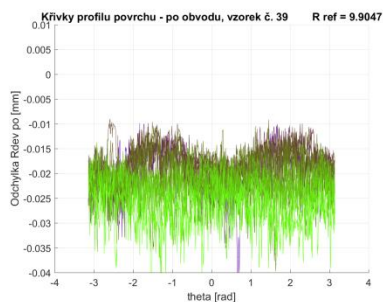
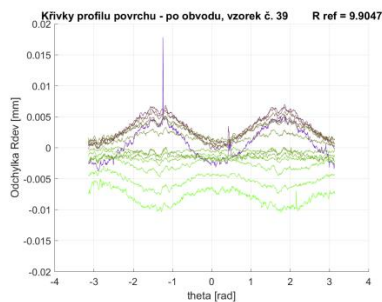
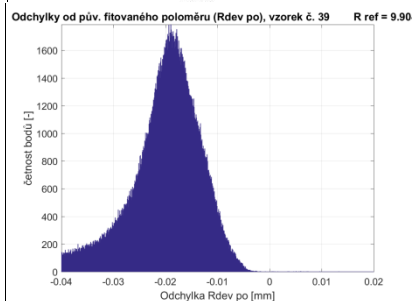
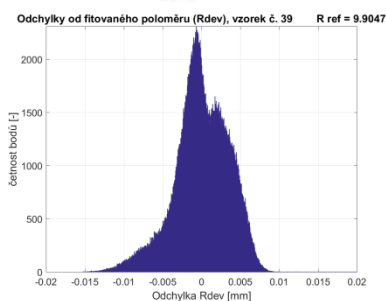
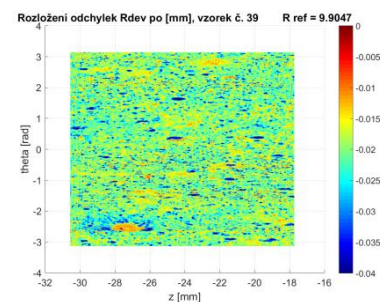
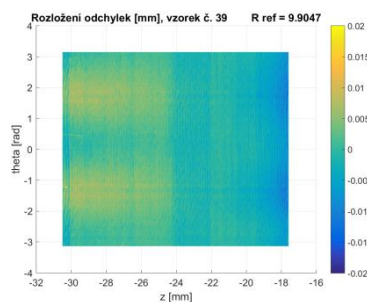




Obr. 112 Vzorek 36 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

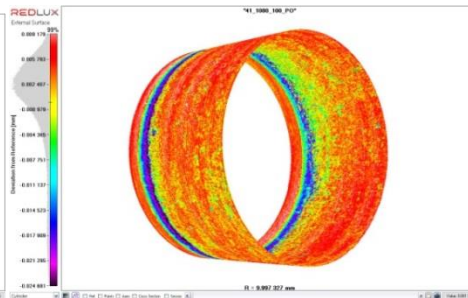
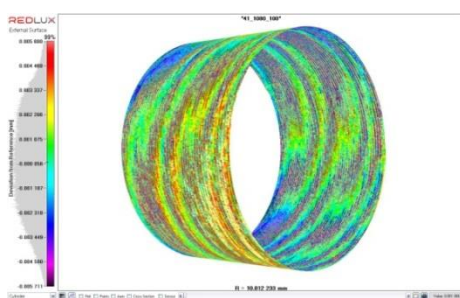
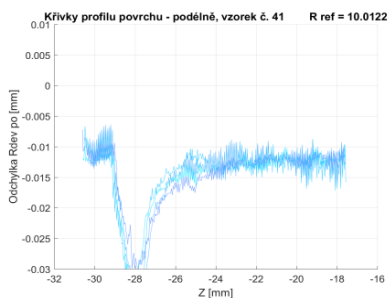
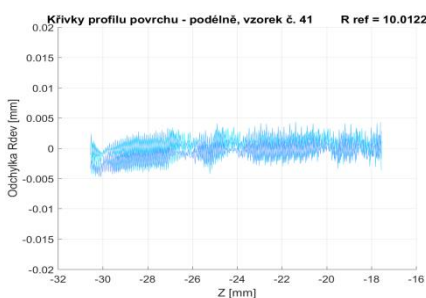
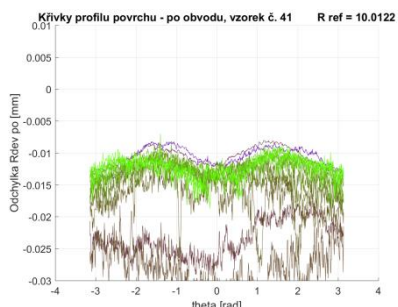
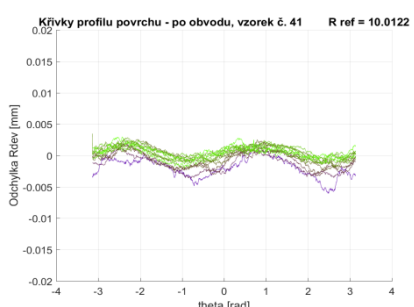
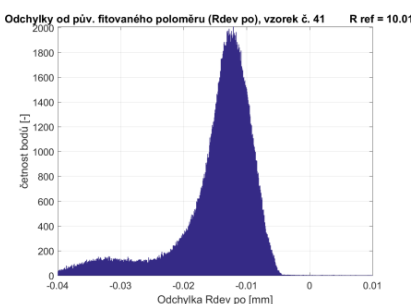
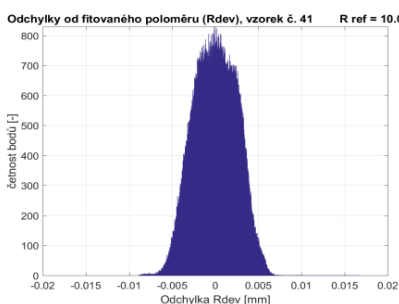
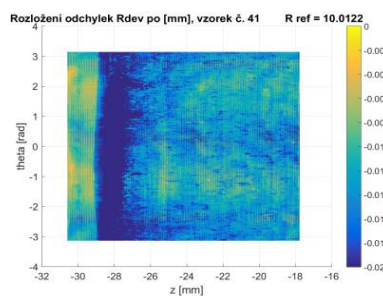
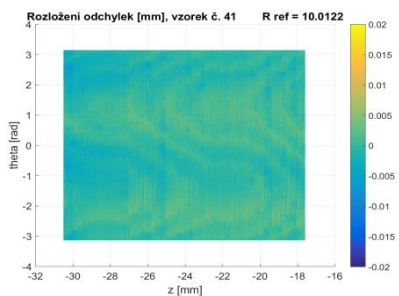
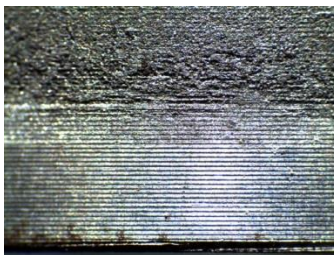


Obr. 113 Vzorek 38 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

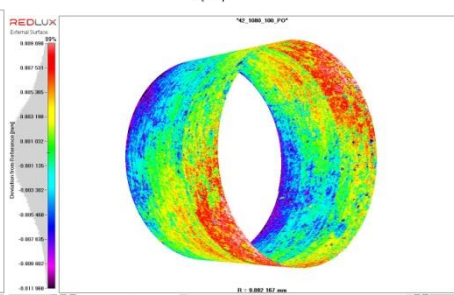
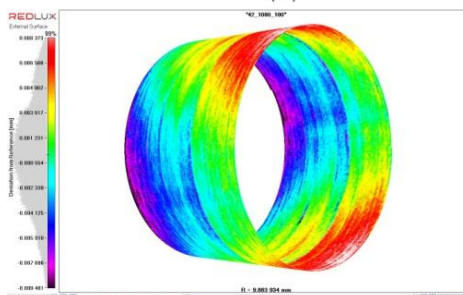
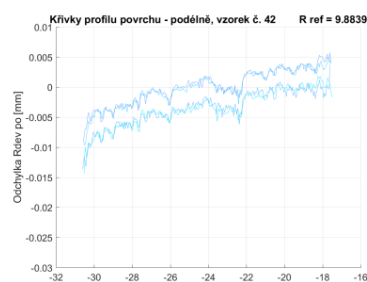
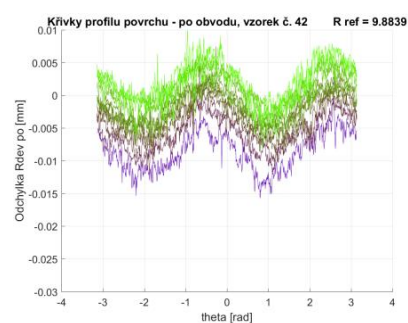
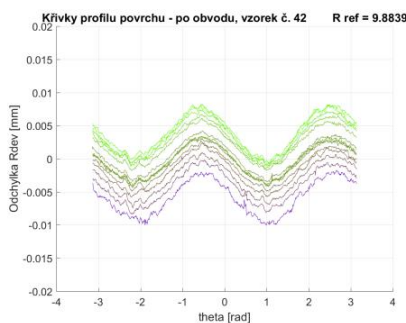
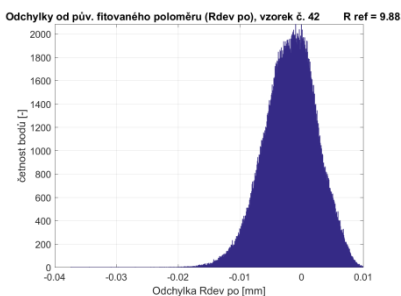
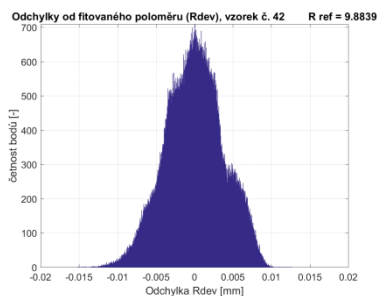
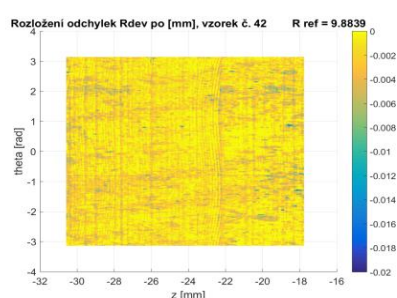
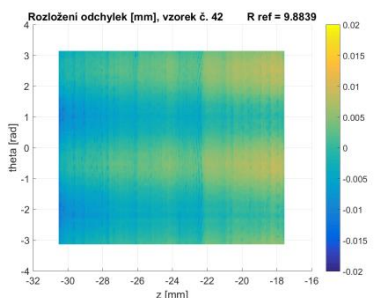
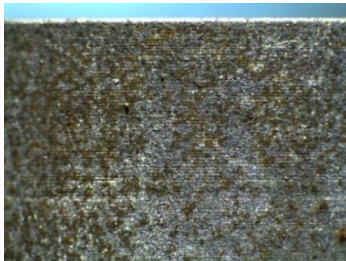
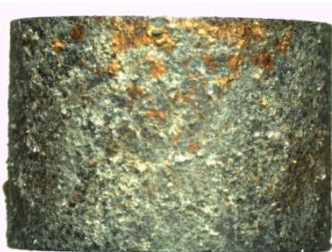


Obr. 114 Vzorek 39 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

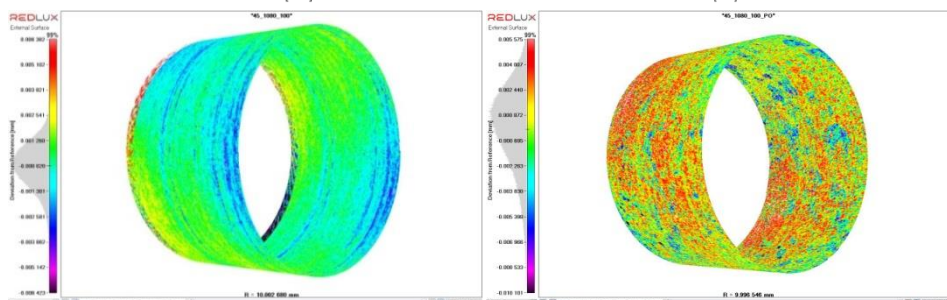
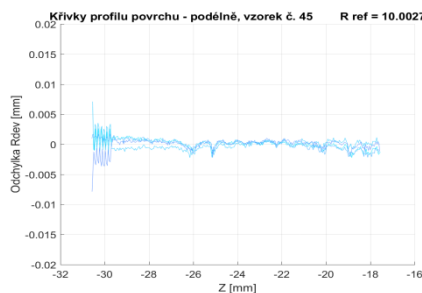
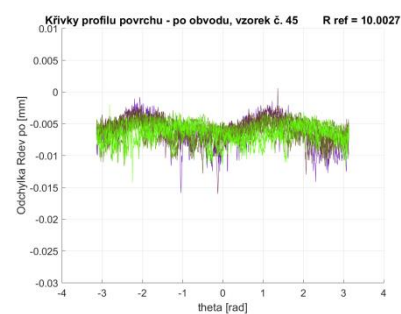
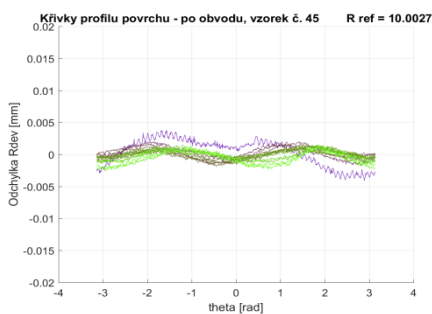
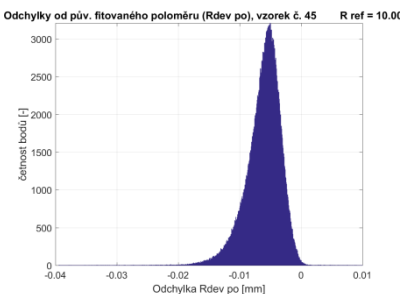
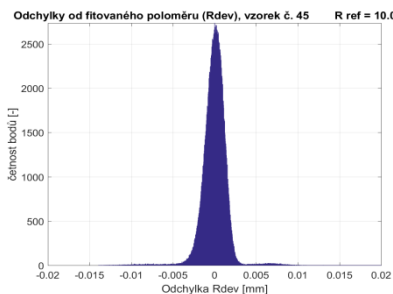
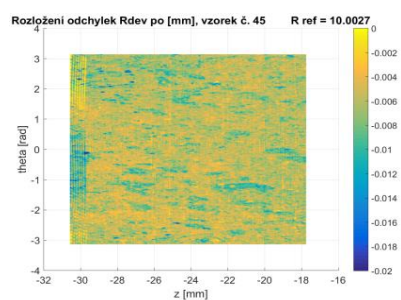
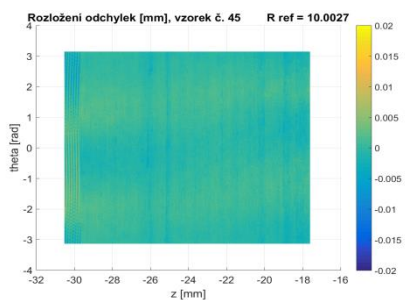
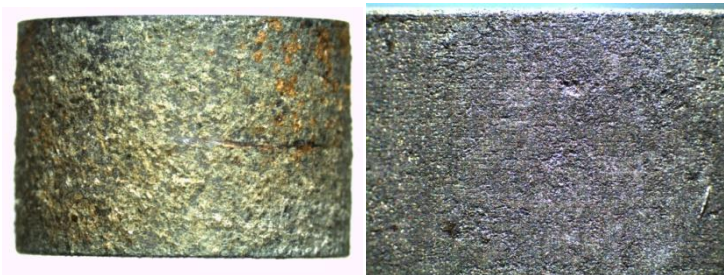




Obr. 115 Vzorek 41 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

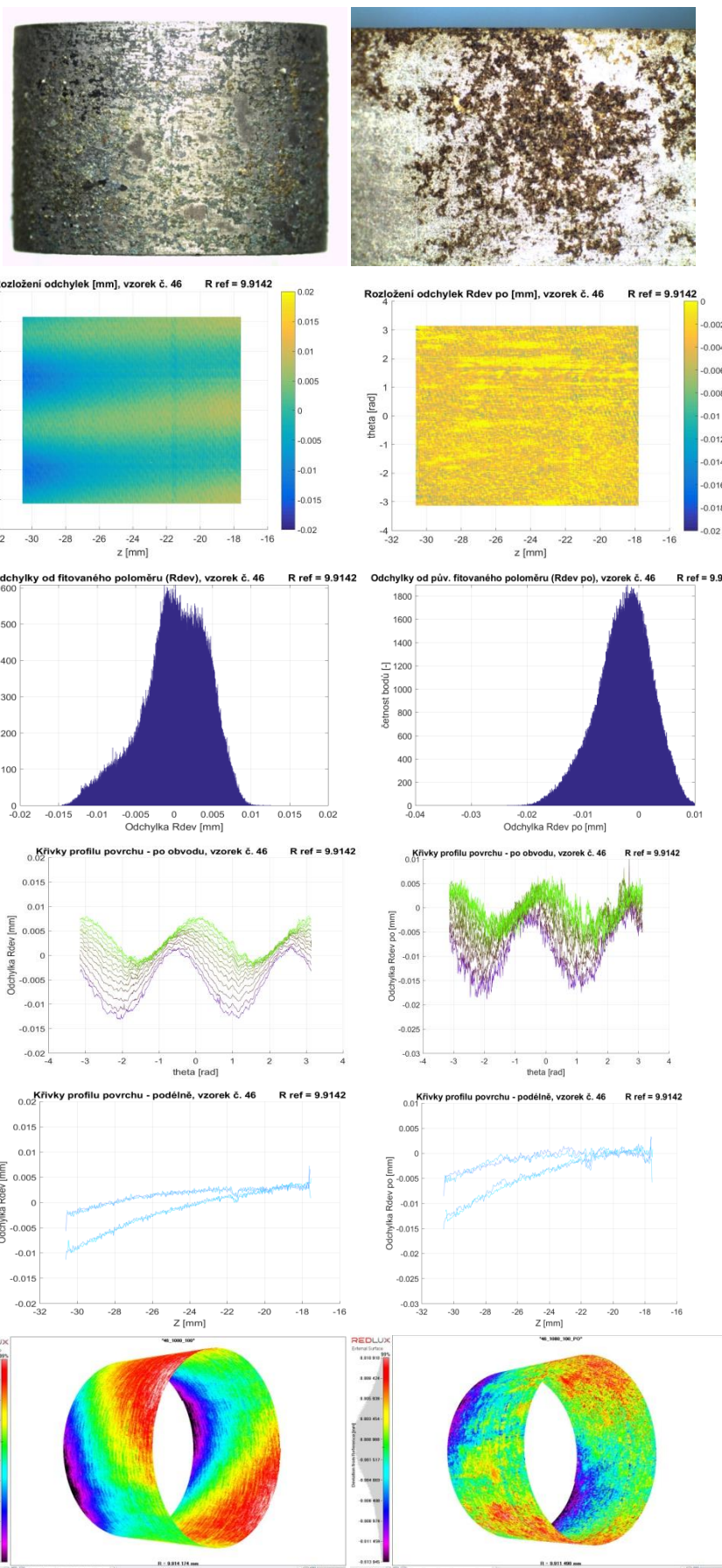


Obr. 116 Vzorek 42 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

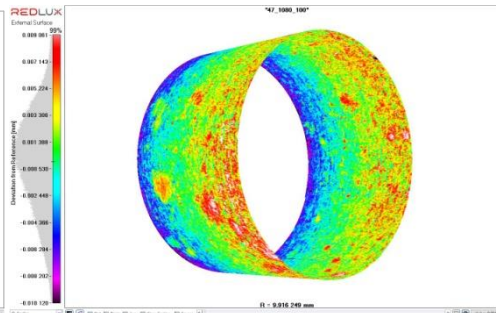
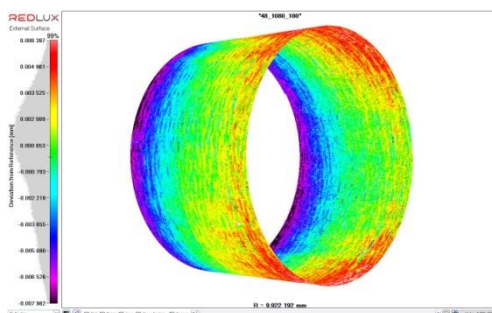
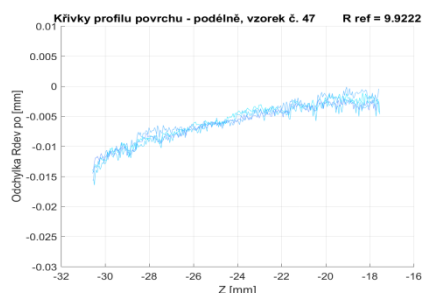
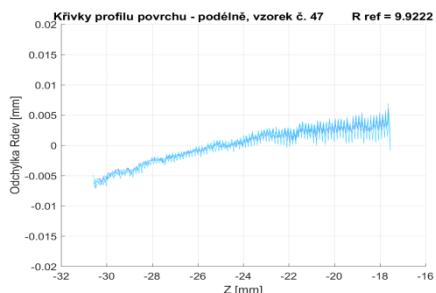
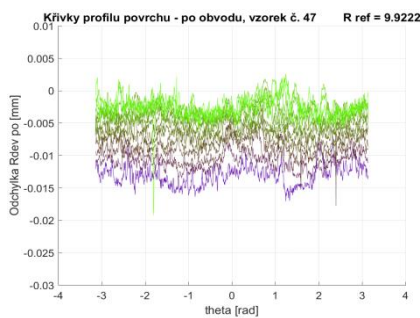
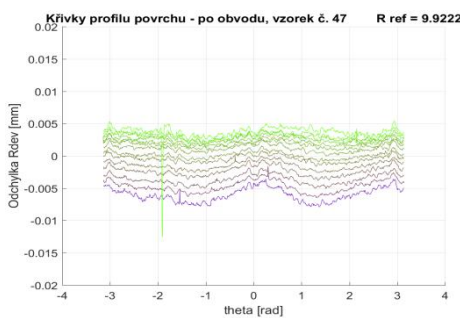
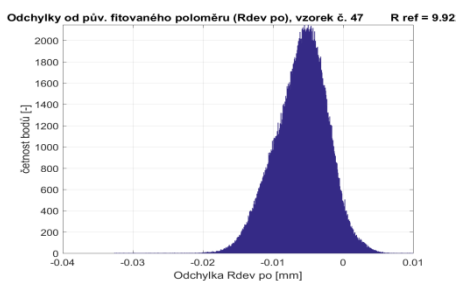
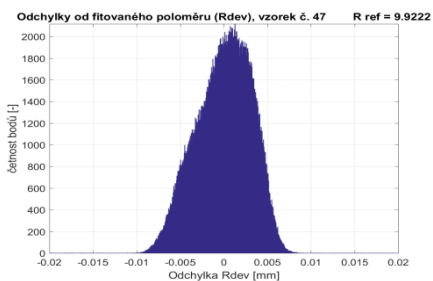
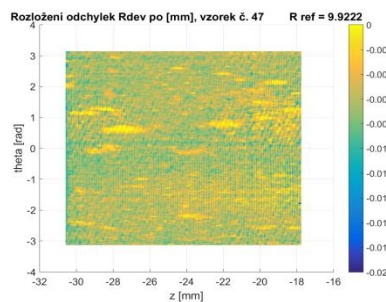
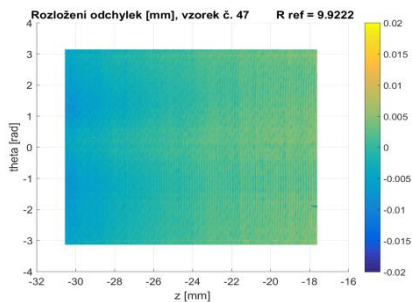
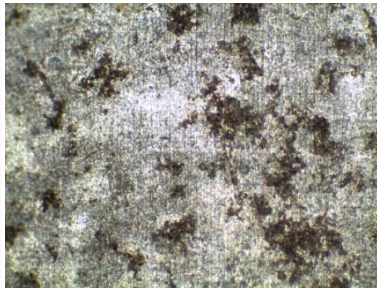


**Obr. 117** Vzorek 45 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

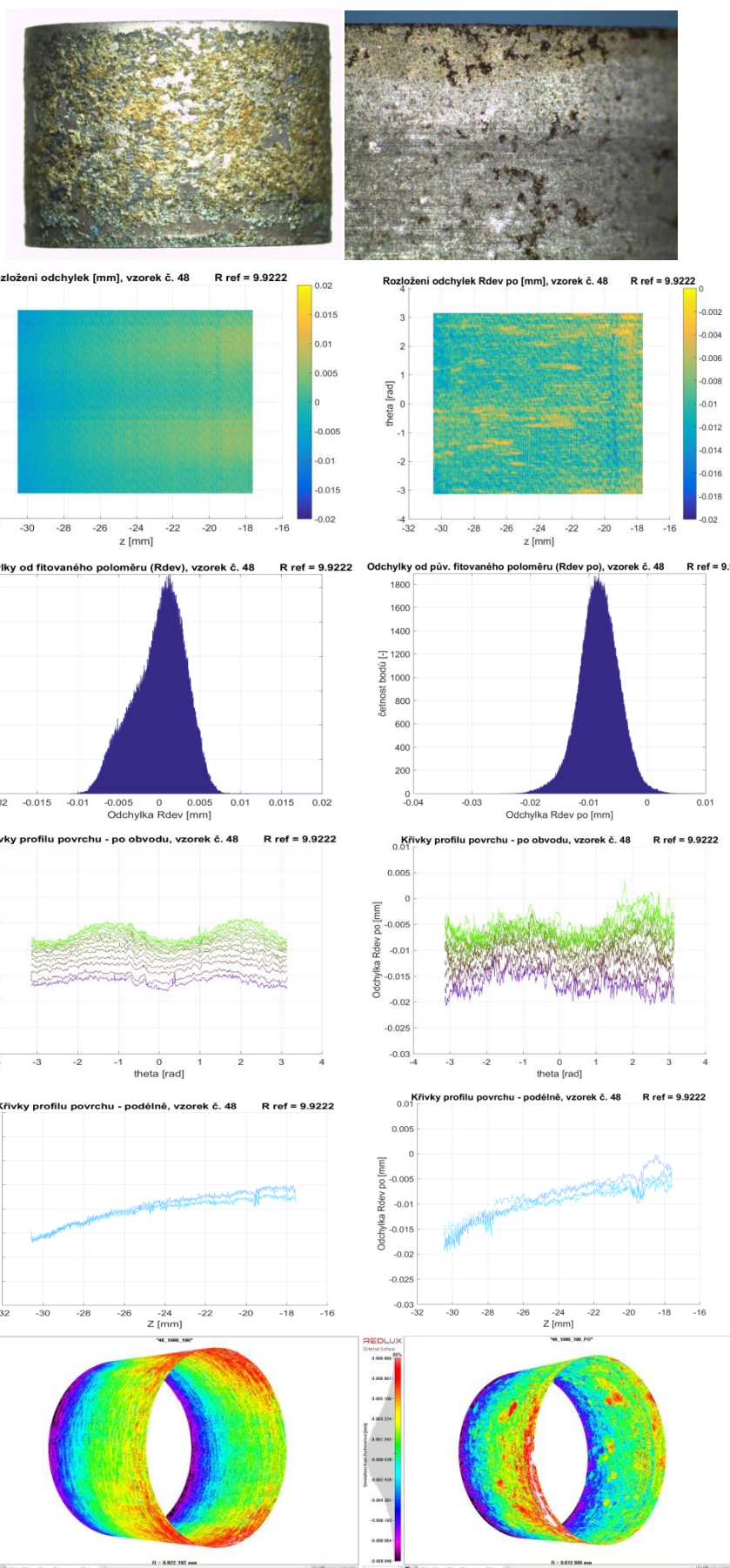




Obr. 118 Vzorek 46 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

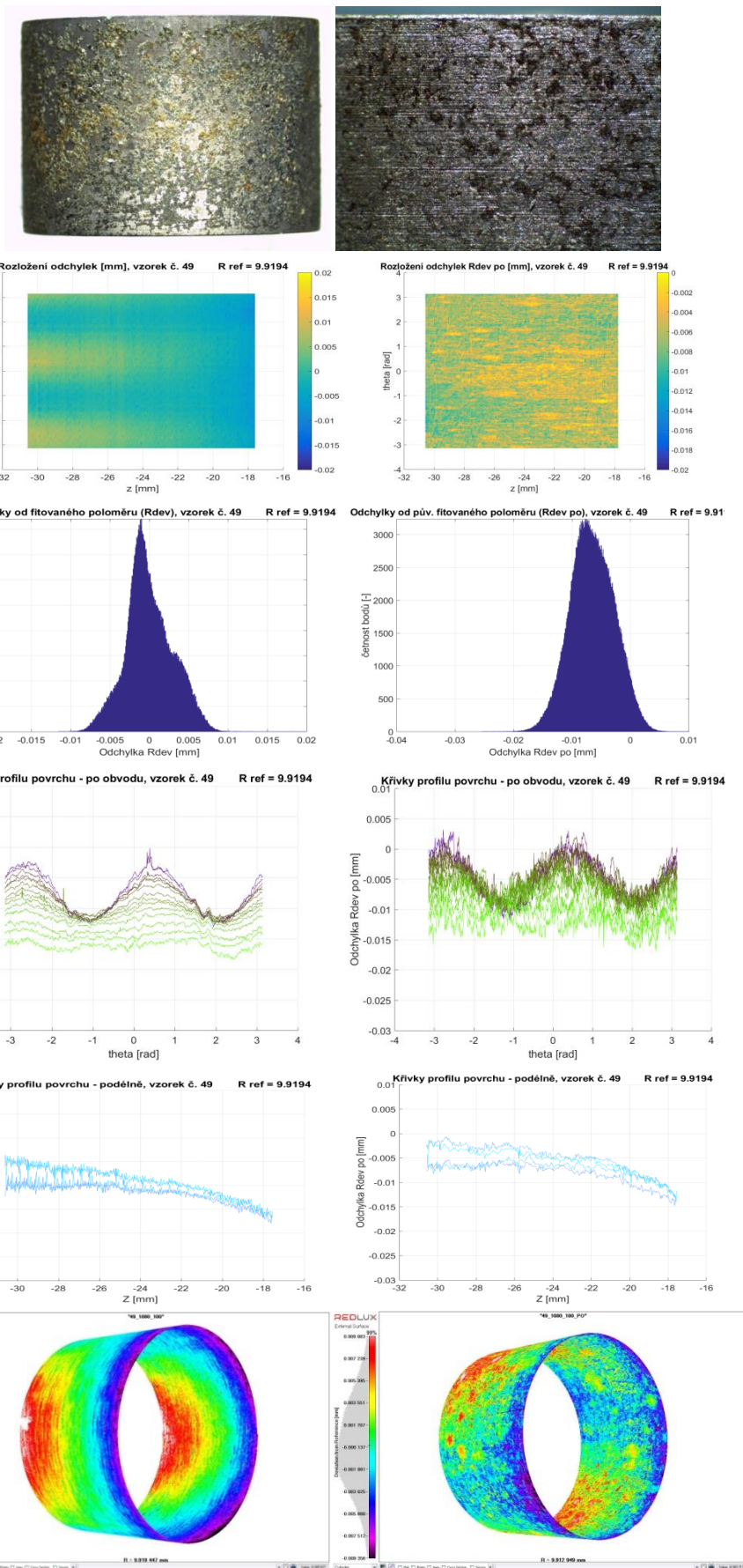


Obr. 119 Vzorek 47 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

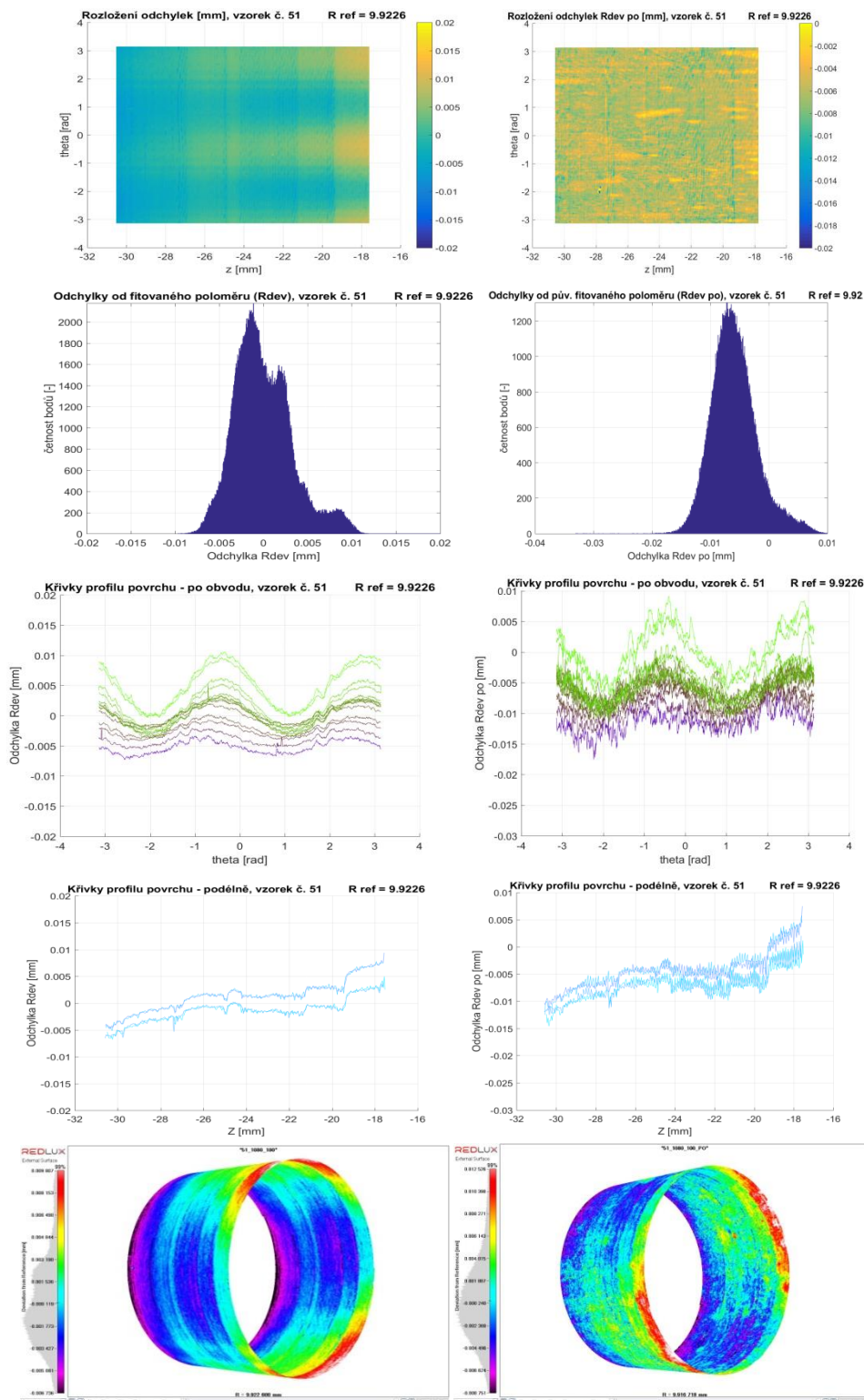
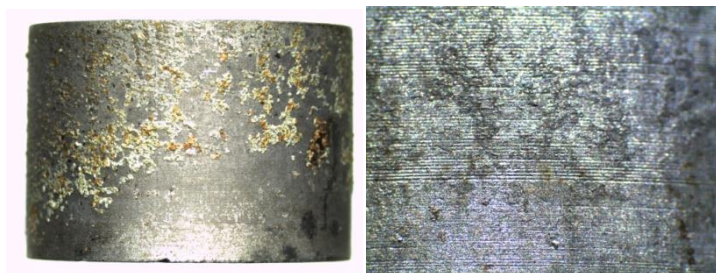


Obr. 120 Vzorek 48 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu



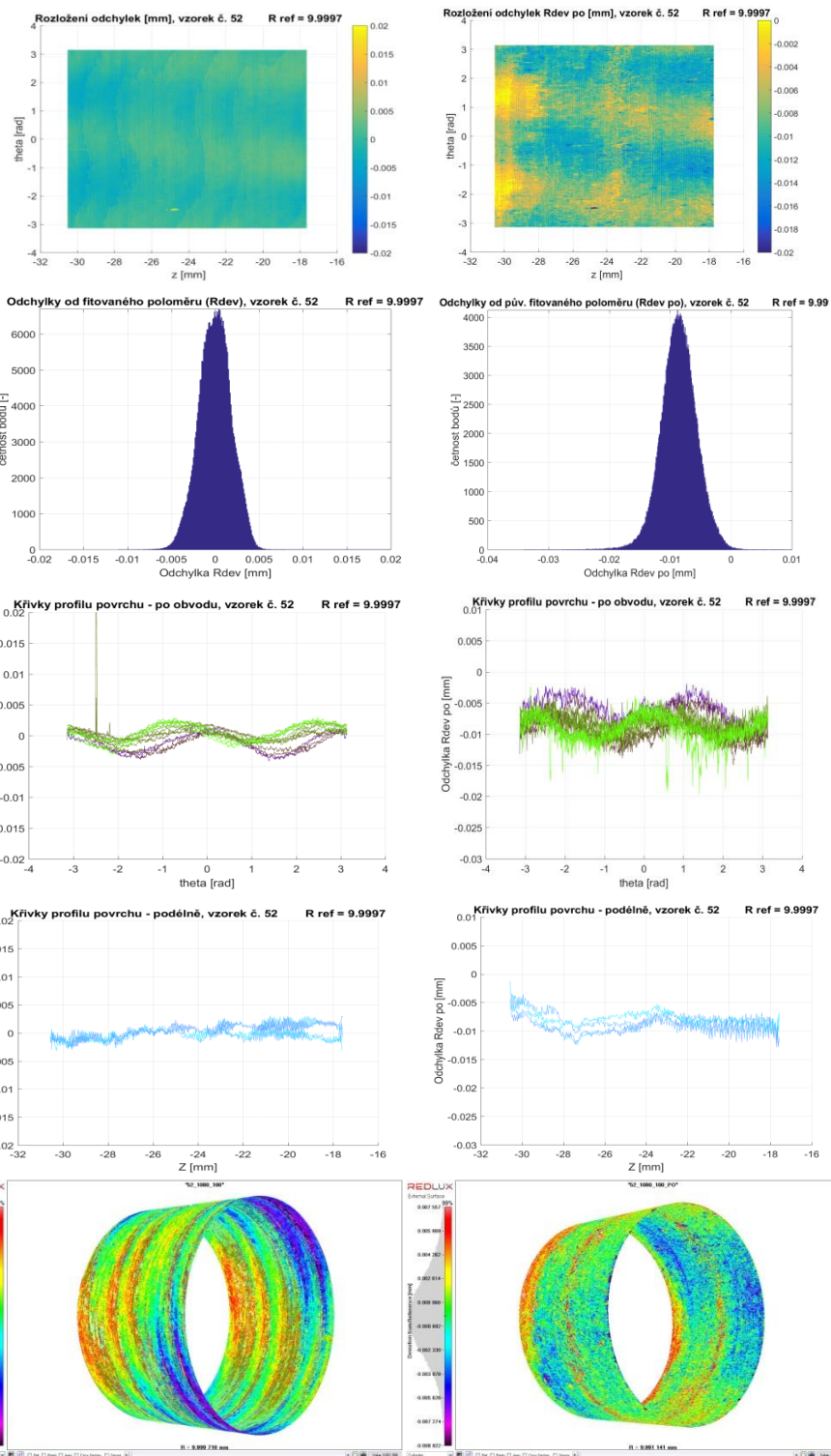
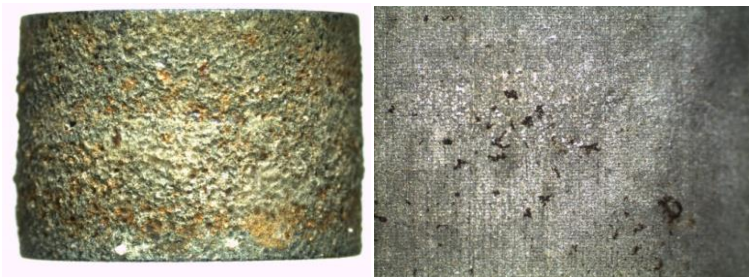


Obr. 121 Vzorek 49 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

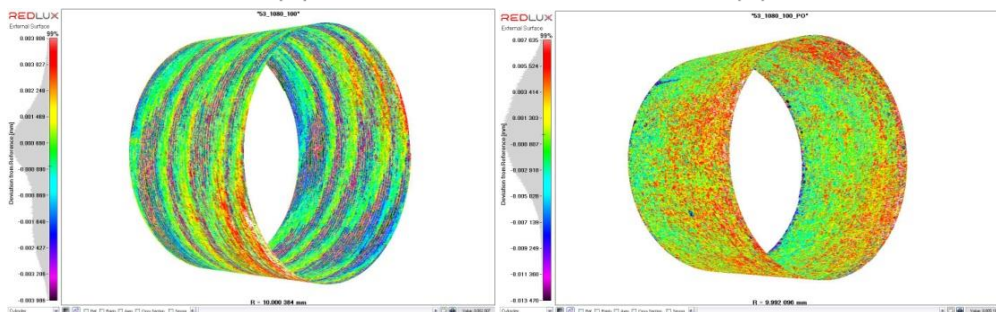
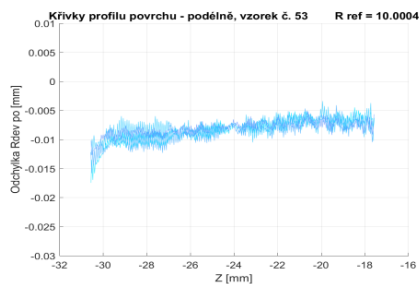
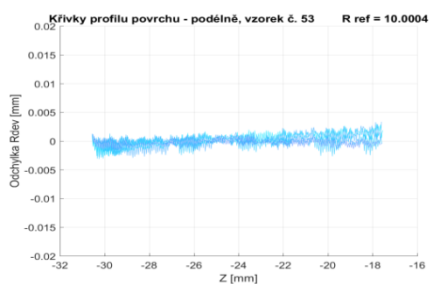
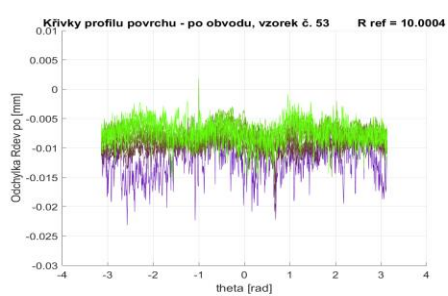
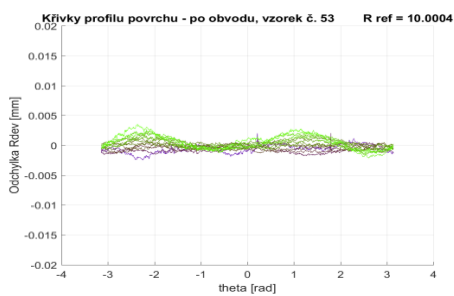
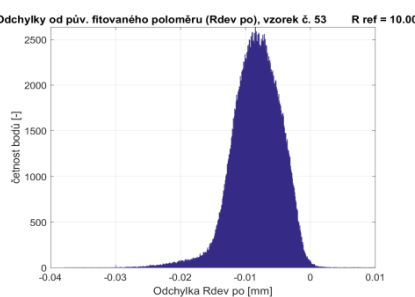
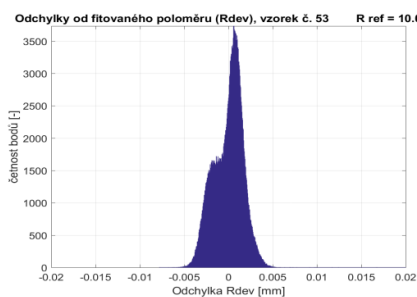
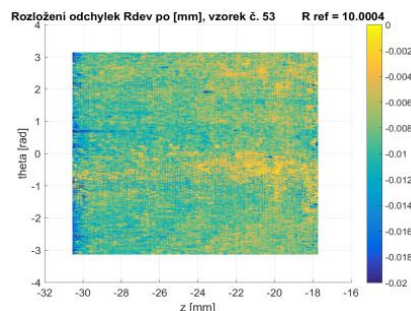
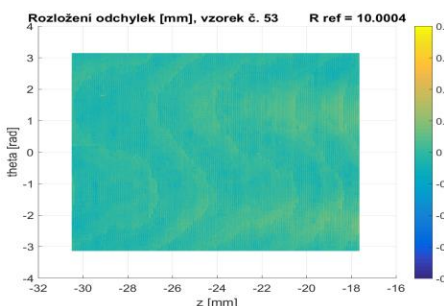
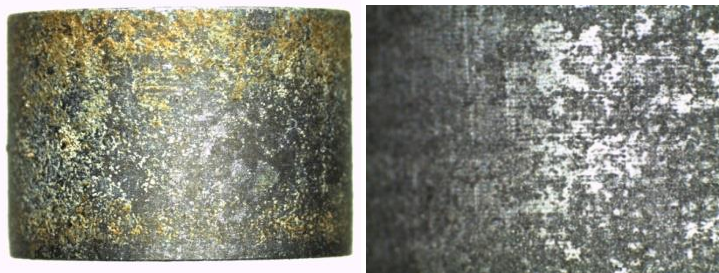


Obr. 122 Vzorek 51 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

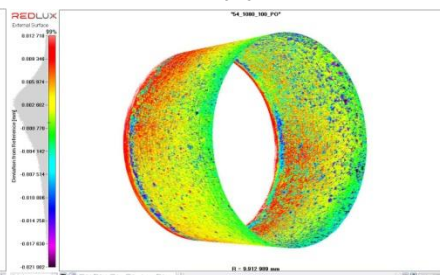
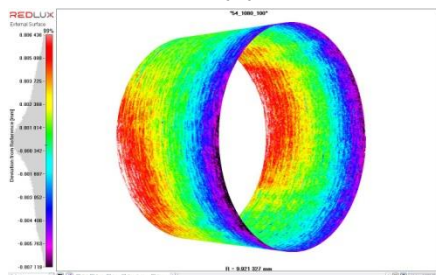
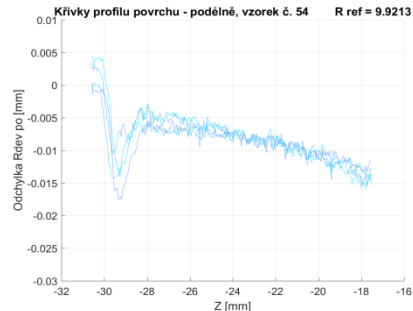
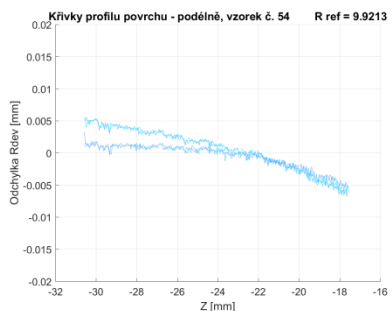
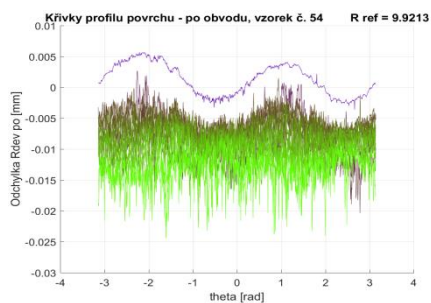
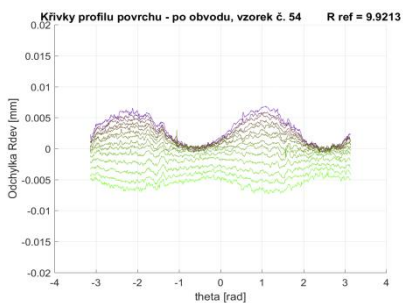
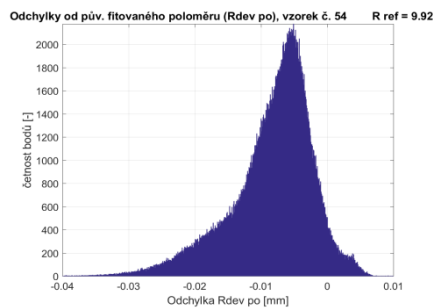
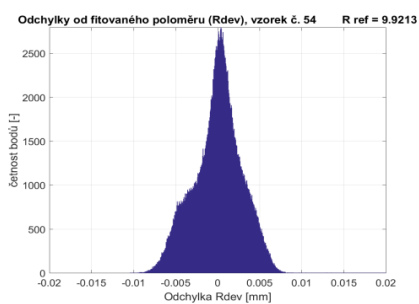
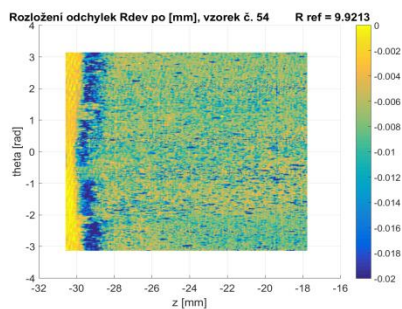
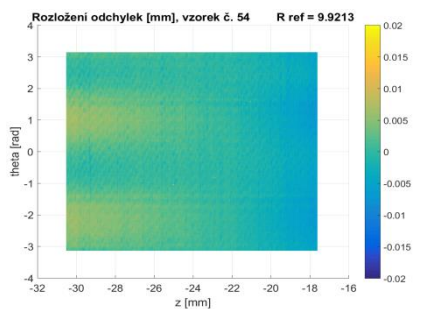
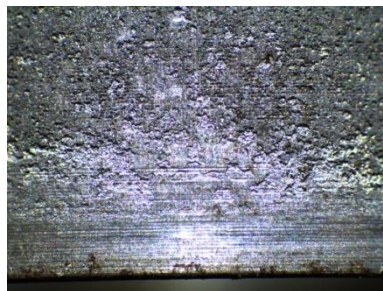




Obr. 123 Vzorek 52 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

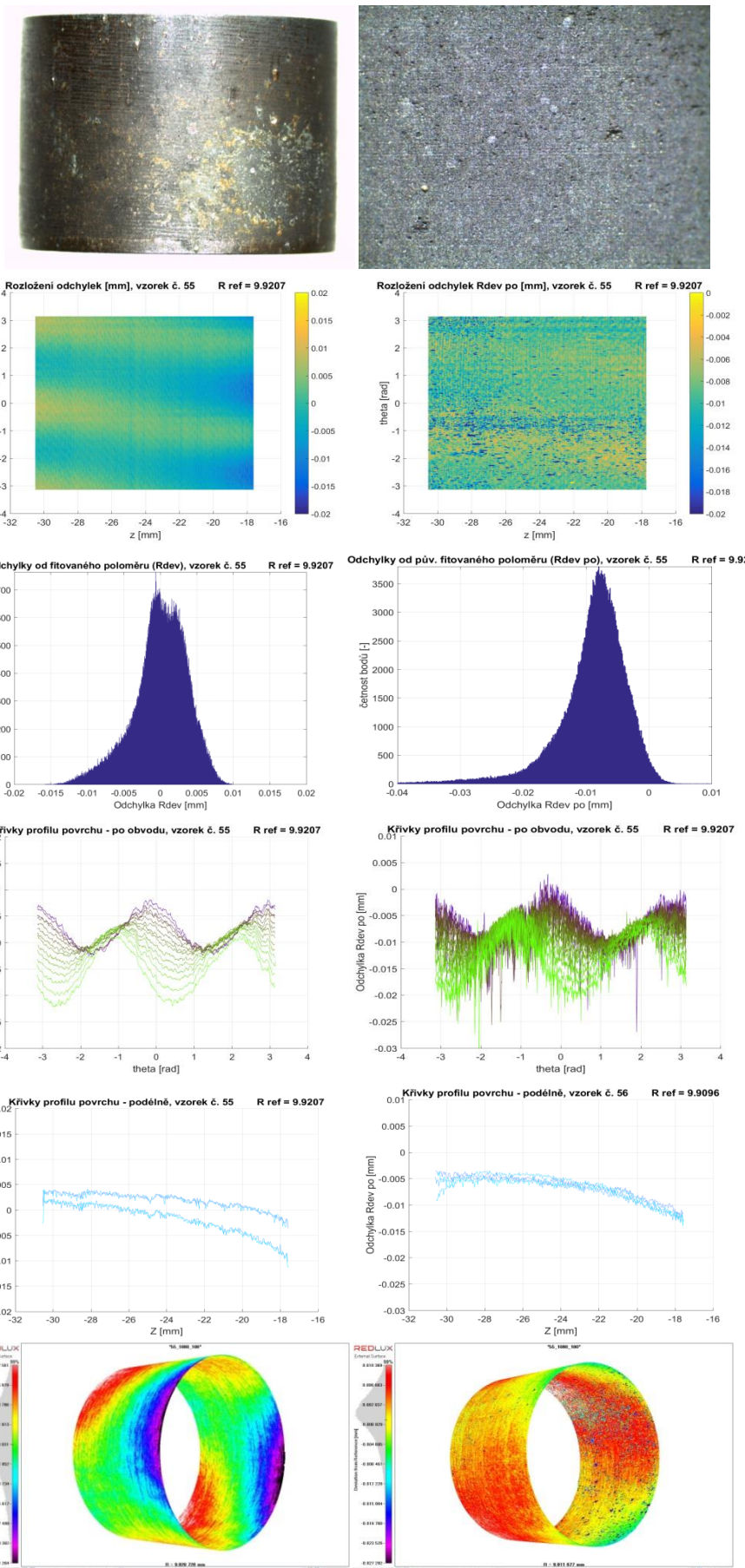


Obr. 124 Vzorek 53 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu



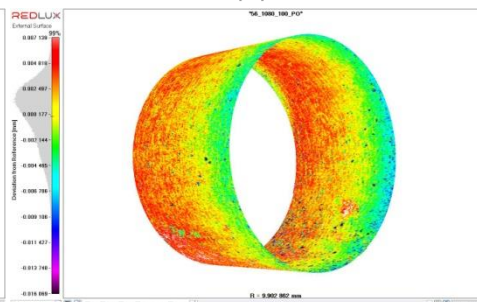
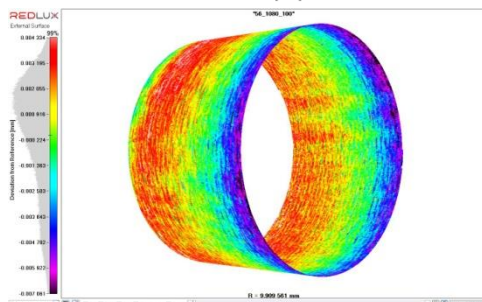
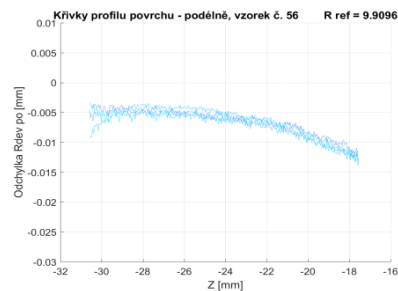
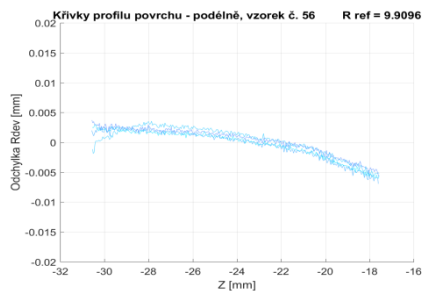
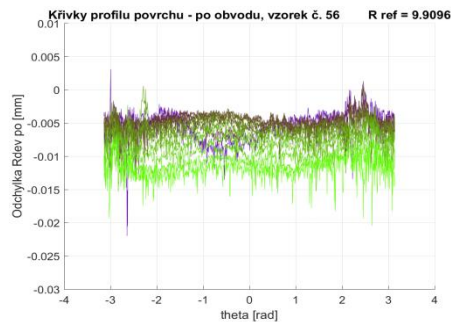
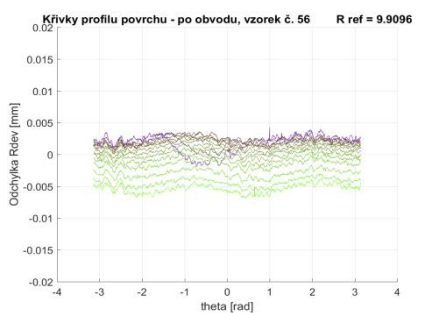
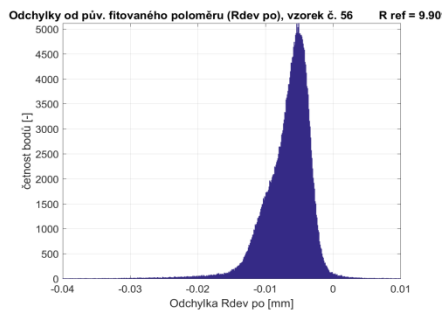
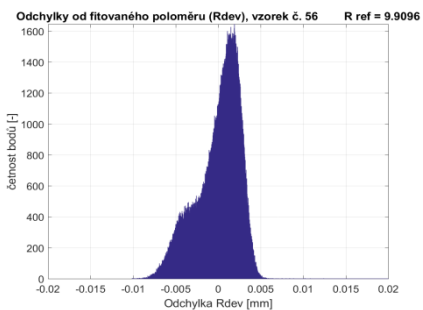
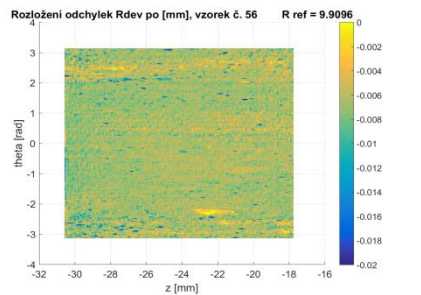
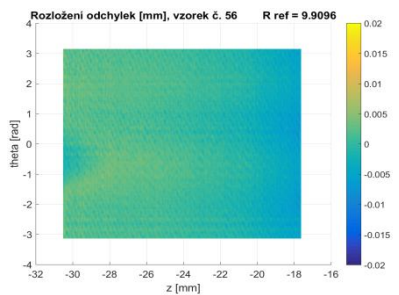
*Obr. 125 Vzorek 54 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu*



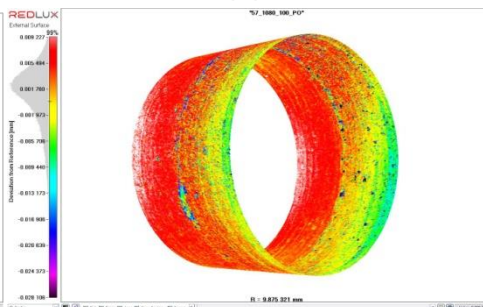
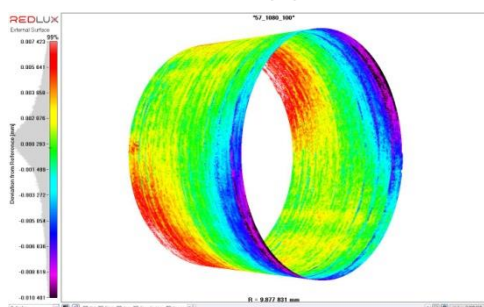
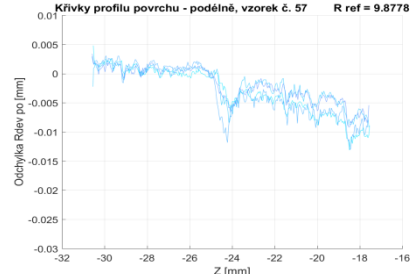
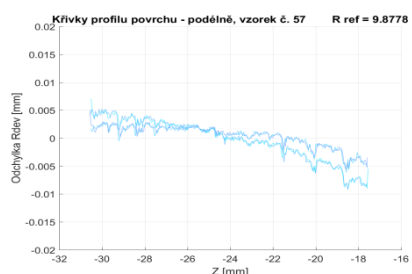
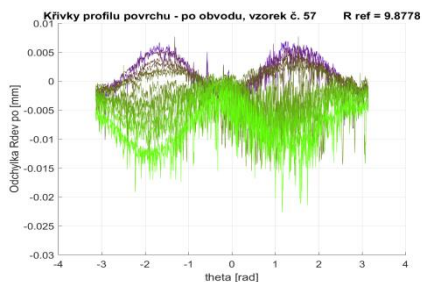
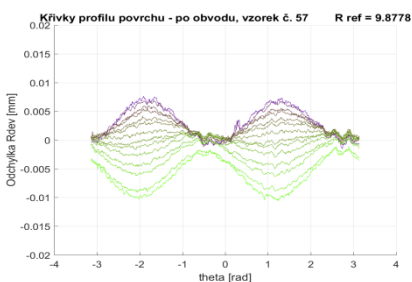
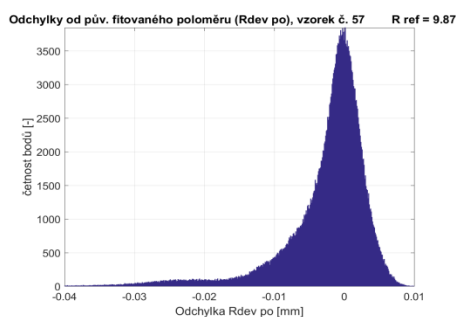
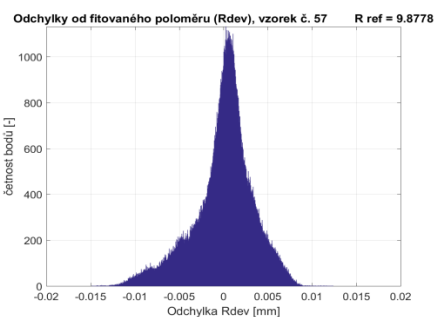
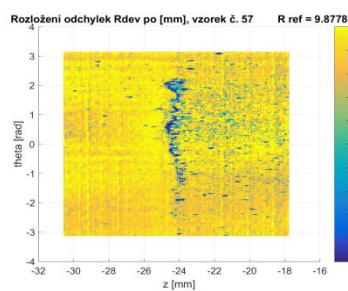
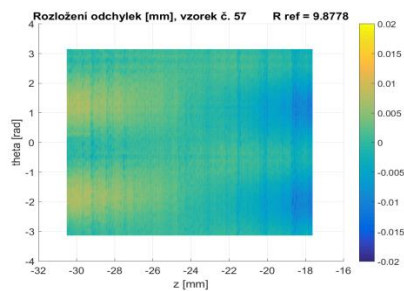


Obr. 126 Vzorek 55 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

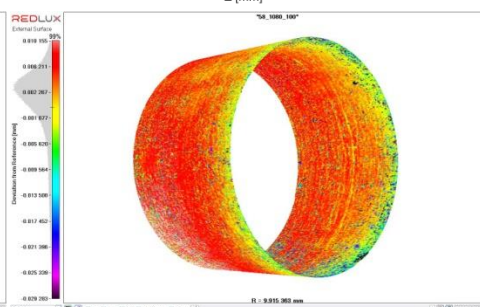
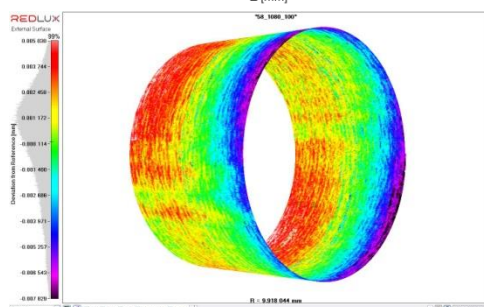
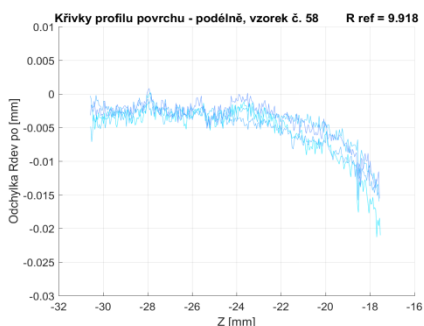
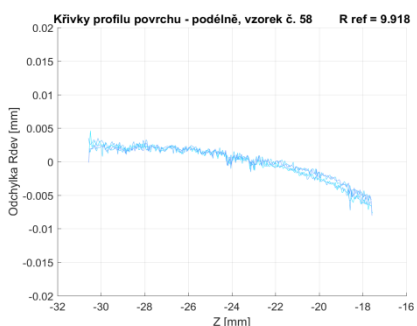
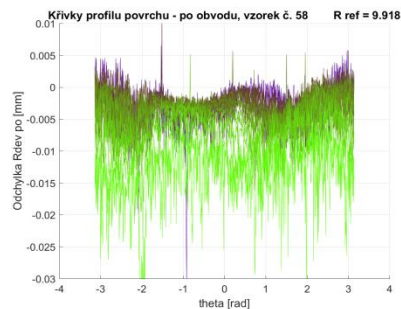
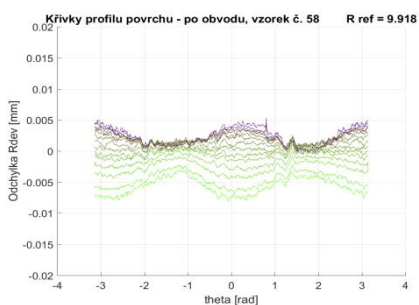
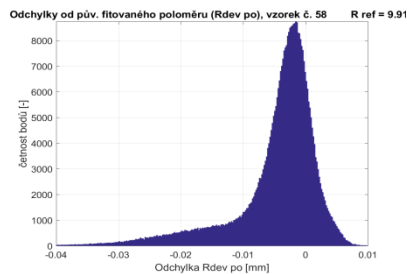
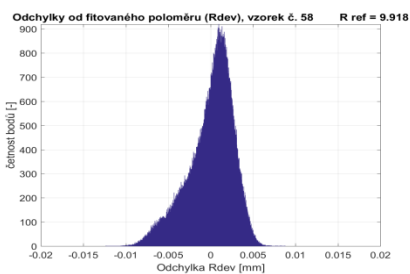
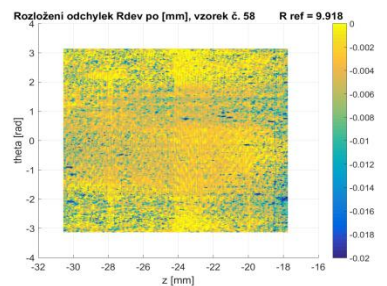
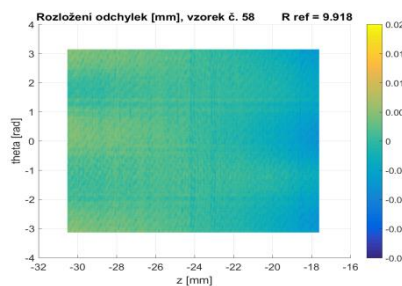
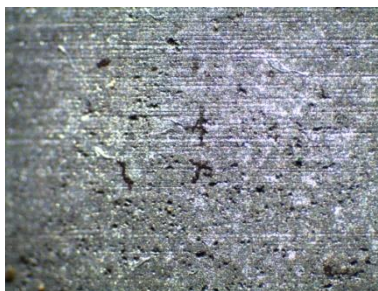




Obr. 127 Vzorek 56 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

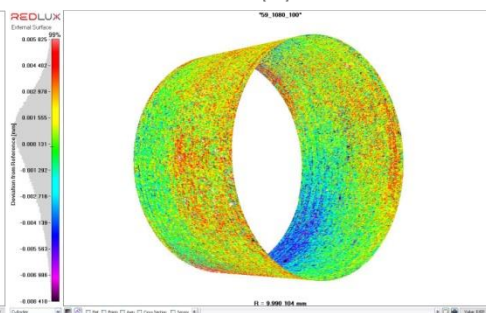
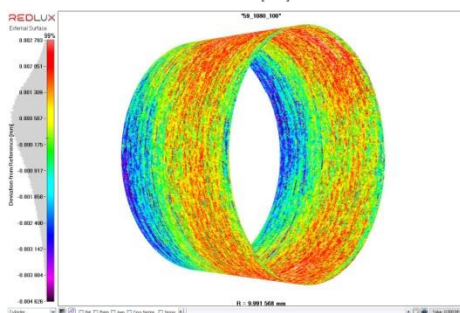
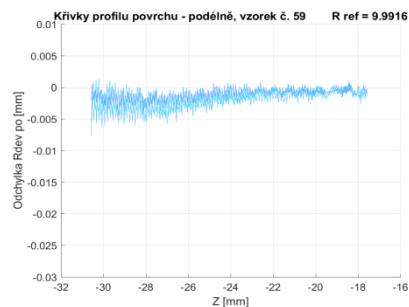
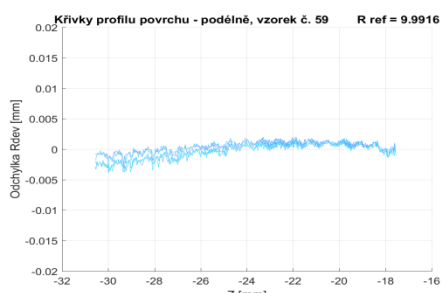
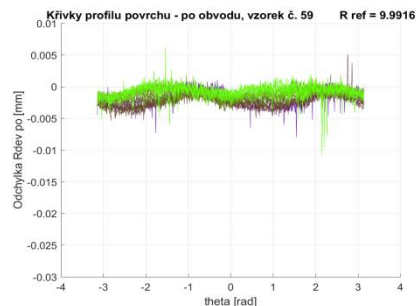
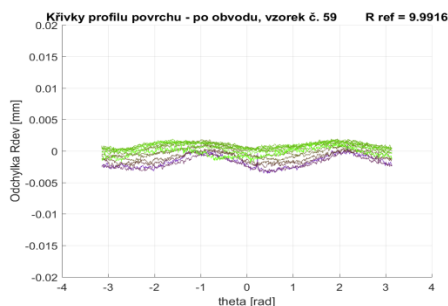
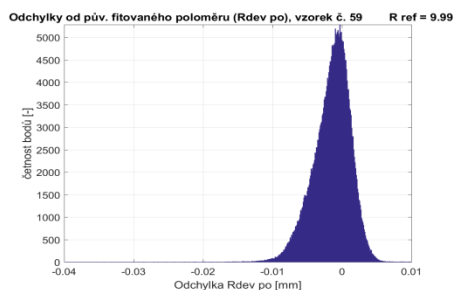
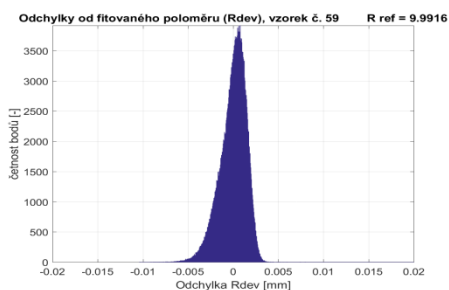
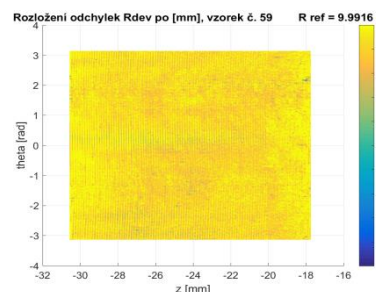
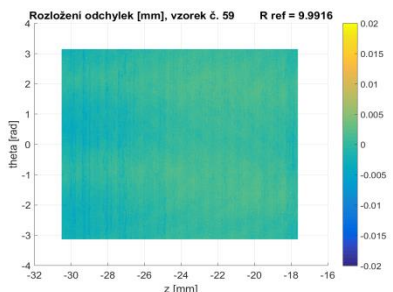
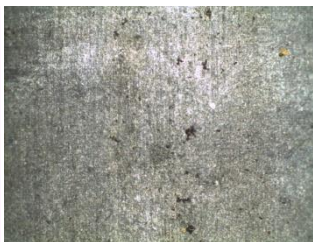


Obr. 128 Vzorek 57 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu



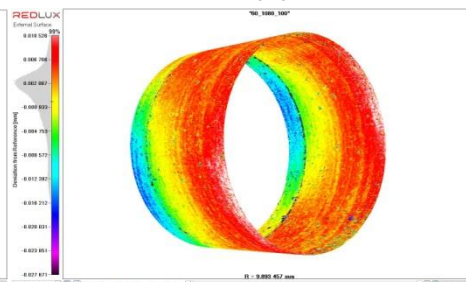
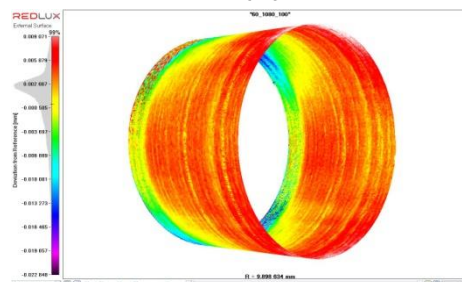
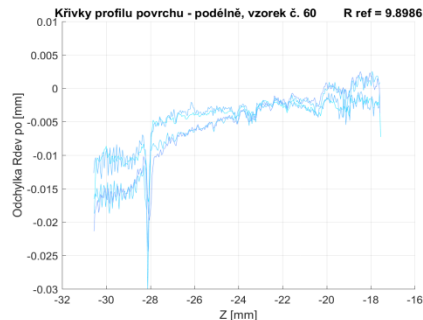
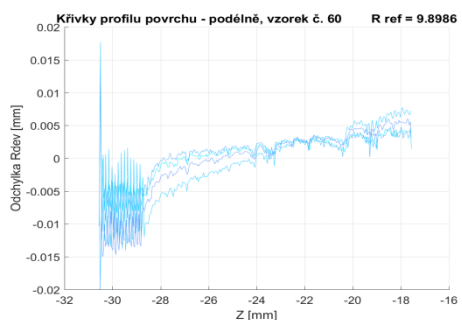
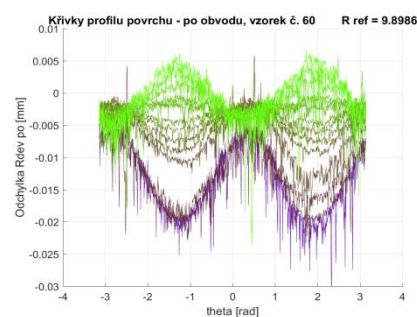
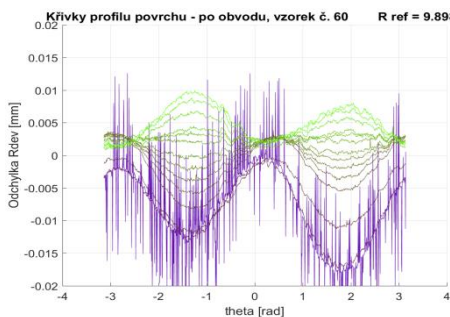
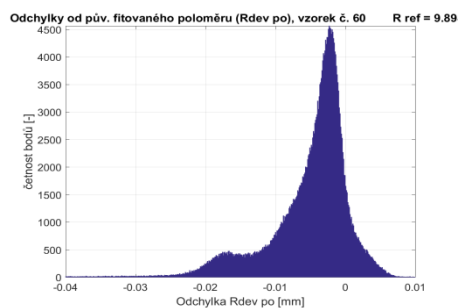
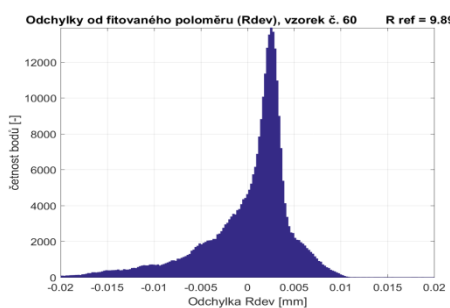
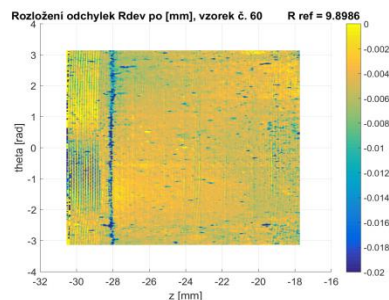
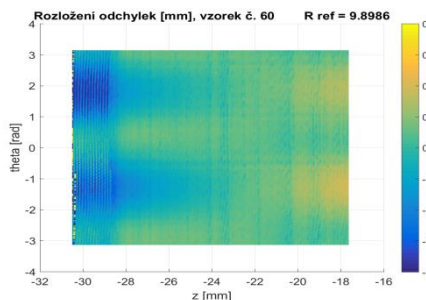
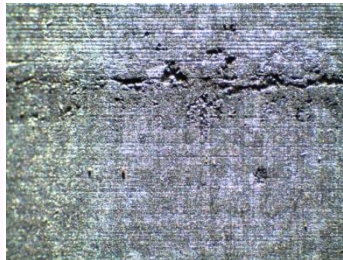
**Obr. 129 Vzorek 58 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu**



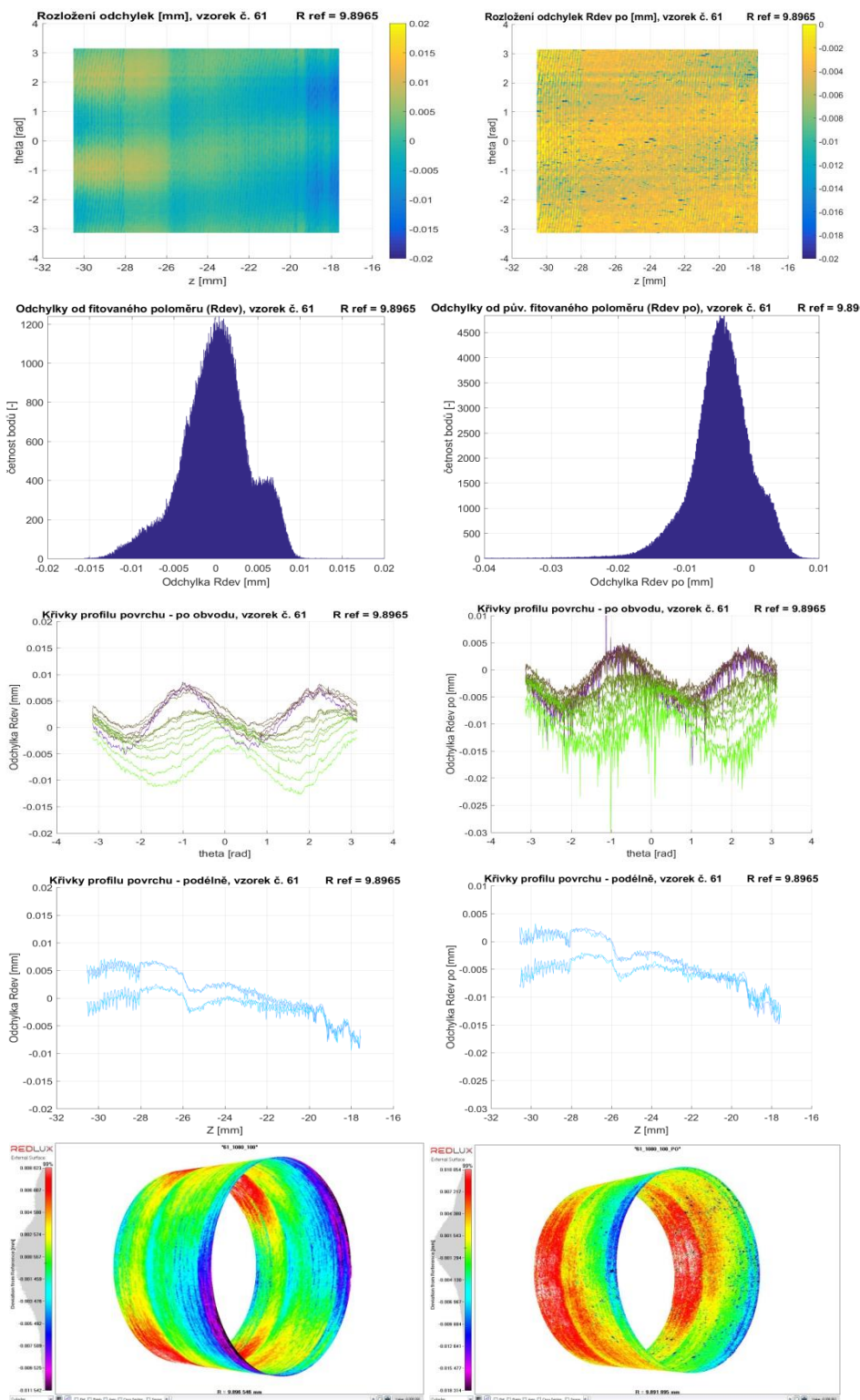
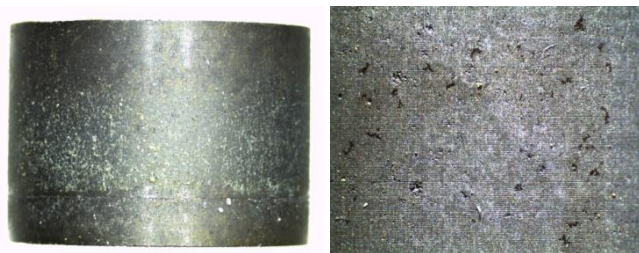


Obr. 130 Vzorek 59 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

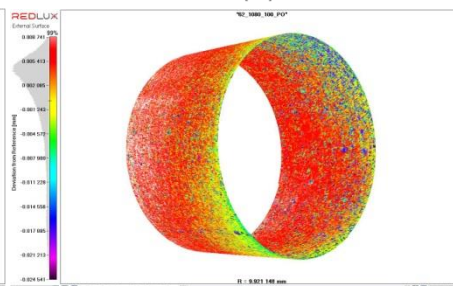
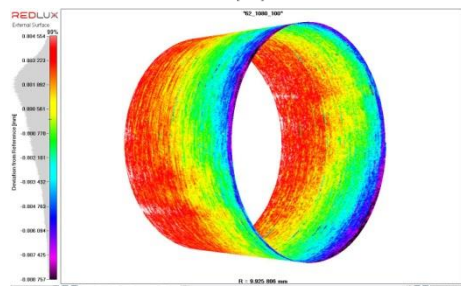
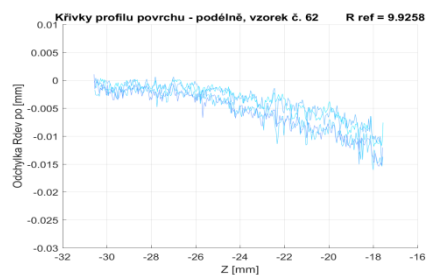
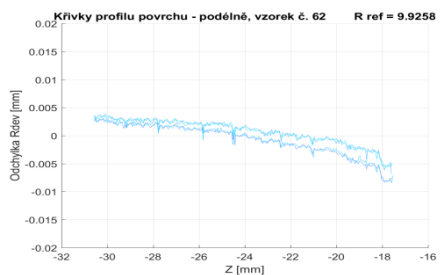
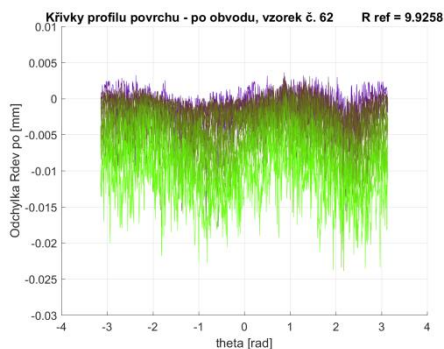
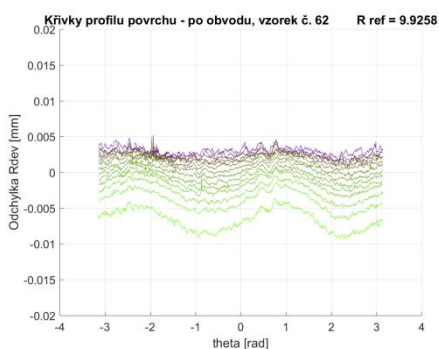
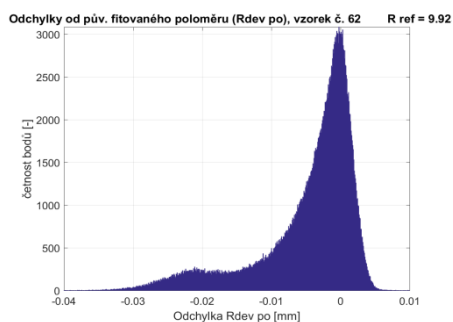
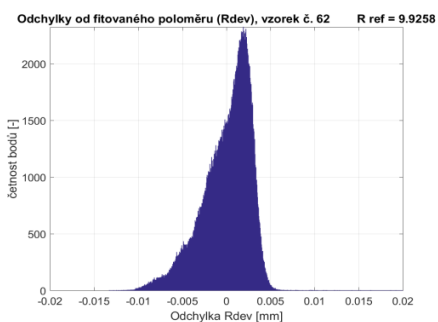
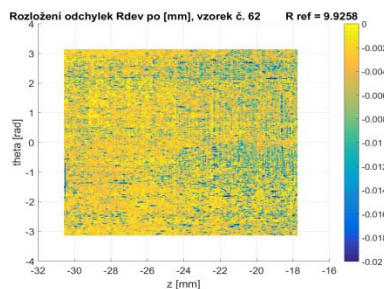
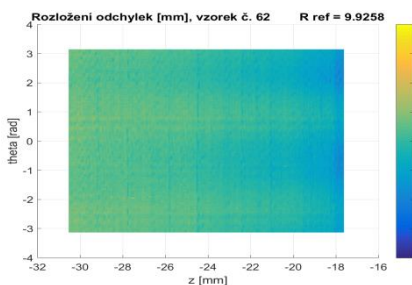
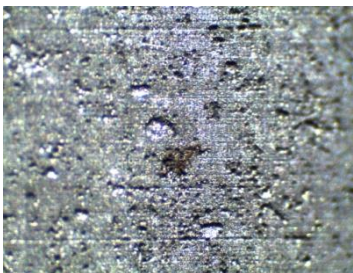




Obr. 131 Vzorek 60 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu

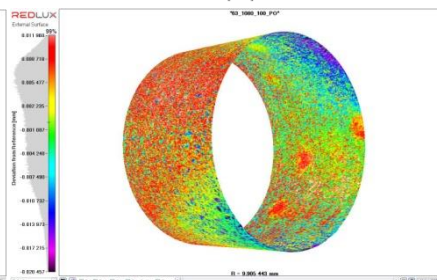
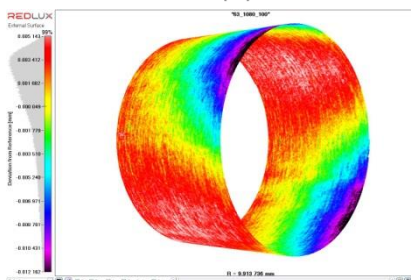
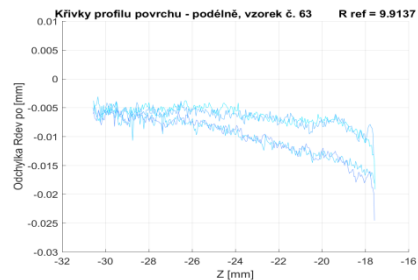
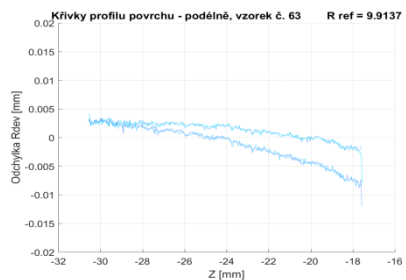
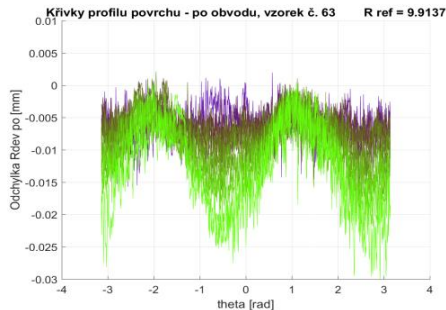
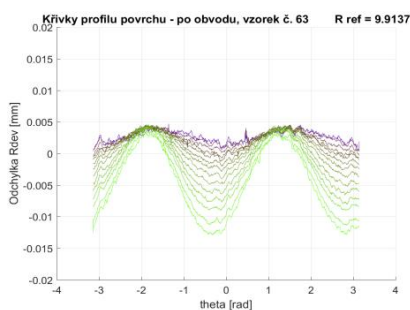
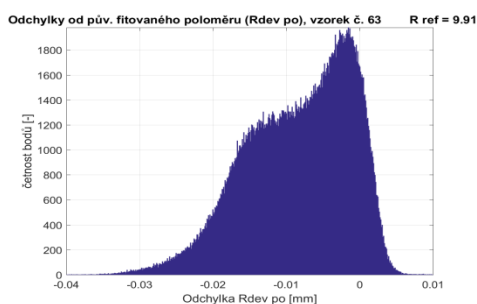
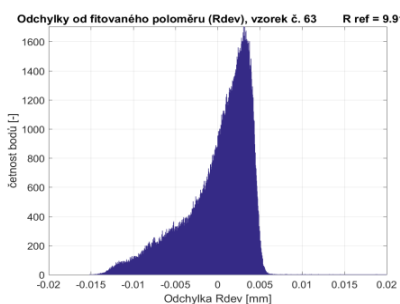
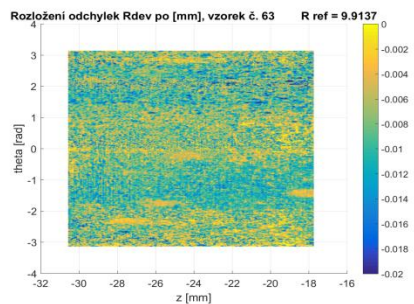
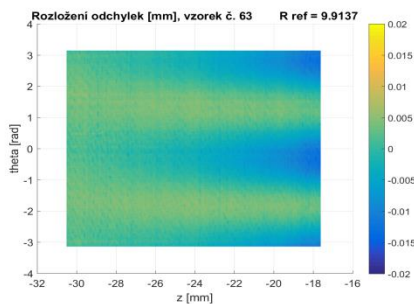
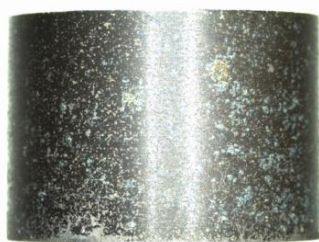


*Obr. 132 Vzorek 61 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu*



Obr. 133 Vzorek 62 – Povrch před a po odmoření, profilometrie před a po experimentu





Obr. 134 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)