

# ZÁVĚREČNÁ TECHNICKÁ ZPRÁVA VÝZKUMNÁ ČÁST PROJEKTU:

Výzkum a vývoj ukládacího  
obalového souboru pro  
hlubinné ukládání vyhořelého  
jaderného paliva do stadia  
realizace vzorku

Autoři: Forman L., Pícek M.  
a kolektiv

Praha, 2021



**NÁZEV ZPRÁVY:** ZÁVĚREČNÁ TECHNICKÁ ZPRÁVA VÝZKUMNÁ ČÁST PROJEKTU  
Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného  
paliva do stadia realizace vzorku

**OZNAČENÍ ZPRÁVY:** TZ 544/2021

**NÁZEV PROJEKTU:** Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání  
vyhořelého jaderného paliva do stadia realizace vzorku

**IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU:**

Závěrečná zpráva

**ČÍSLO SMLOUVY (SÚRAO):** SO 2013 – 088

**ČÍSLO SMOUVY (ŠJS):** 88 – 43 479

**INTERNÍ OZNAČENÍ ZPRÁVY (ŠJS):** Ae 20443/Dok

**ŘEŠITELÉ:**

ŠKODA JS a.s.<sup>1</sup>, ÚJV a.s.<sup>2</sup>, VŠCHT<sup>3</sup>, Energovýzkum Brno<sup>4</sup>

**AUTORSKÝ KOLEKTIV:** Forman L.<sup>1</sup>, Pícek M.<sup>1</sup>, Dobrev D.<sup>2</sup>, Gondolli J.<sup>2</sup>, Mendoza Miranda  
A.N.<sup>2</sup>, Straka M.<sup>2</sup>, Kouřil M.<sup>3</sup>, Stoužil J.<sup>3</sup>, Matal O.<sup>4</sup>, Čermák J.<sup>4</sup>, Král L.<sup>4</sup>, Žaloudek J.<sup>4</sup>, Vávra M.<sup>4</sup>,  
Čupr M.<sup>4</sup>

Horní Indexy u jmen autorů odkazují na výčet institucí výše.

**BIBLIOGRAFICKÝ ZÁPIS:**

Forman L., Pícek M., Dobrev D., Gondolli J., Mendoza Miranda A.N., Straka M., Kouřil M.,  
Stoužil J., Matal O., Čermák J., Král L., Žaloudek J., Vávra M., Čupr M. (2021): ZÁVĚREČNÁ  
TECHNICKÁ ZPRÁVA VÝZKUMNÁ ČÁST PROJEKTU Výzkum a vývoj ukládacího obalového  
souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stadia realizace vzorku, Praha,  
ZZ 544/2021

Zdena Lahodová

Manažer projektu (SÚRAO)

11.10. 2021

Václav Valenta

Manažer projektu (ŠKODA JS a.s.)

11.10. 2021



Interní označení zprávy:



ŠKODA JS a.s.

Interní označení zprávy: Ae 20443/Dok Rev.01



Interní označení zprávy:






Interní označení zprávy: Ae 20443/Dok Rev.01

VÝZKUM A VÝVOJ UKLÁDACÍHO OBALOVÉHO  
SOUBORU PRO HLUBINNÉ UKLÁDÁNÍ  
VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA DO STÁDIA  
REALIZACE VZORKU

Počet stran:	145	Vydání:	české	Vydavatel:	Divize D1
--------------	-----	---------	-------	------------	-----------

ZÁVĚREČNÁ TECHNICKÁ ZPRÁVA ETAP 1; 2; 3;  
3+ (VÝZKUMNÁ ČÁST PROJEKTU)

	Funkce	Jméno	Podpis	Datum
Vypracoval:	Projektant	L. Forman a kolektiv		11.10.2021
Ověřil:	Projektant – specialista	M. Pícek		11.10..2021
Schválil:	Manažer zakázky	V. Valenta		11.10.2021

## Seznam revizí

Rev.	Datum Date	Kapitola Chapter	Popis změny / Change description
00	06.09.2021		První vydání
01	11.10.2021	5 5.4.2 5.5.3 7.1	Zpracování připomínek SÚRAO Revize Obr.56, 57, revize Tab.22 Zdůvodnění rozměru VP Revize zprávy Ae 16886/Dok Zhodnocení použitých přístupů (nová kapitola)

## Seznam příloh

Příloha Annex	Popis Definition
1	Atest materiálu S355J2H+N
2	Atest materiálu EN 1.4401

## Obsah

Seznam použitých zkratk: .....	5
Abstrakt .....	7
Klíčová slova .....	7
Abstract .....	7
Keywords.....	7
<b>Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>1 Vstupní podmínky pro návrh UOS.....</b>	<b>10</b>
1.1 Legislativa .....	10
1.2 Podmínky v HÚ .....	12
1.2.1 Souhrn vstupních okrajových podmínek pro výzkum a projekční práce.....	14
1.3 Materiály ukládacích obalových souborů .....	14
1.4 Děje poškozující UOS .....	15
1.4.1 Mechanické poškozující děje.....	15
1.4.2 Chemické poškozující děje.....	16
<b>2 Korozní chování materiálů pro UOS.....</b>	<b>20</b>
2.1 Výsledky projektu UOS (SÚRAO SO2013-088).....	20
2.1.1 Výsledky korozních experimentů v kompaktním bentonitu.....	21
2.1.2 Výsledky korozních experimentů v pórovém roztoku a bentonitových suspenzích 25	
2.1.3 Výsledky korozních experimentů s ionizujícím zářením.....	31
2.1.4 Galvanická koroze.....	36
2.1.5 Navodíkování materiálů.....	37
2.1.6 Nerovnoměrné formy koroze korozivzdorných ocelí .....	38
2.1.7 Vliv tepelného toku na rovnoměrnou korozi materiálů .....	39
2.1.8 Rovnoměrná koroze korozivzdorné oceli.....	39
2.2 Výsledky doplňujících projektů .....	43
2.2.1 Material Corrosion Test (MaCoTe) .....	44
2.2.2 Korozní produkty uhlíkové oceli.....	47
2.2.3 Mikrobiální koroze .....	50
<b>3 Současné závěry.....</b>	<b>55</b>
3.1 Souhrn výběru materiálu pro český koncept.....	55
3.1.1 Výběr materiálů pro koncept na základě korozních vlastností .....	55
3.1.2 Upřesnění nároků na kvalitu uhlíkové oceli .....	56

3.1.3	Grafický souhrn výběru materiálů .....	58
3.2	Modelování životnosti ukládacích obalových souborů .....	59
3.2.1	Přístup 1.....	59
3.2.2	Přístup 2.....	60
<b>4</b>	<b>Vývojové varianty UOS .....</b>	<b>71</b>
4.1	Varianta 1.....	71
4.2	Varianta 2.....	72
4.3	Varianta 3.....	72
4.4	Varianta 4.....	73
4.5	Varianta 5.....	74
4.6	Varianta 6.....	74
4.7	Varianta 7.....	75
4.8	Varianta 8.....	75
4.9	Varianta 9.....	76
4.10	Varianta 10.....	76
4.11	Varianta 11.....	77
4.12	Varianta 12.....	77
4.13	Varianta 13.....	77
4.14	Zdůvodnění výběru variant 11 a 12 .....	78
<b>5</b>	<b>Výsledná koncepce UOS .....</b>	<b>79</b>
5.1	Varianta 11 – UOS ŠKODA 1000/3.....	79
5.2	Varianta 12 – UOS ŠKODA 440/7 .....	80
5.3	Podrobné konstrukční řešení varianty 12 .....	80
5.4	Technologie výroby UOS .....	88
5.4.1	Technologie výroby vnějšího obalu .....	88
5.4.2	Technologie výroby vnitřního obalu .....	90
5.5	Výpočty prokazující funkčnost a bezpečnost UOS .....	91
5.5.1	Výpočty podkritičnosti.....	91
5.5.2	Výpočty stínění.....	93
5.5.3	Pevnostní výpočty .....	101
5.5.4	Výpočty střížných namáhání vyvolaných seismickou událostí .....	113
5.5.5	Teplotechnické výpočty .....	123
<b>6</b>	<b>Další výzkum ukládacích obalových souborů .....</b>	<b>128</b>
6.1	Výzkum koroze a životnosti .....	128



6.1.1	Projekt ARCHANALOG .....	128
6.1.2	Projekt RADMIC.....	129
6.1.3	Budoucí práce potřebné pro zpřesňování výpočtu životnosti ukládacích obalových souborů.....	129
6.2	Budoucí výzkum UOS .....	130
6.2.1	Projekt TAČR ORTEV .....	130
6.2.2	Detailní řešení sériové výroby UOS.....	130
6.2.3	Řešení zařízení horké komory HÚ ve vazbě na UOS .....	130
6.2.4	Hodnocení možných poškození a ovlivnění životnosti během manipulací s UOS 130	
6.2.5	Bezpečnostní hodnocení celého konceptu .....	131
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>132</b>
7.1	Zhodnocení použitých přístupů .....	133
7.1.1	Optimalizace navrhovaných materiálů UOS .....	133
7.1.2	Životnost UOS.....	135
7.1.3	Výpočtové zhodnocení návrhů UOS.....	136
7.1.4	Optimalizace rozměrů UOS.....	138
	<b>Reference .....</b>	<b>140</b>

## Seznam použitých zkratk:

A.S.I.	Asociace strojních inženýrů ČR
ČSN	česká technická norma
ČVUT	České vysoké učení technické
EDS	elektronově disperzní spektrometr
EDU	elektrárna Dukovany
EN	evropská norma
ETE	elektrárna Temelín
FJFI	Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
HPP	havarijní provozní podmínky
HÚ	hlubinné úložiště
ICP-MS	hmotnostní spektroskopie v indukčně vázaném plazmatu
ISO	International Organization for Standardization
IZ	ionizující záření
JE	jaderná elektrárna
KTA	Kerntechnischer Ausschuss – bezpečnostní standardy
MAG	metal active gas
MIC	mikrobiálně ovlivněná koroze
MIG	metal inert gas
MKP	metoda konečných prvků
NDT	nedestruktivní testování
ng	PDE – sekundární fotony [Sv/h]
NJZ	nový jaderný zdroj
nn	PDE – neutrony [Sv/h]
NTD	normativní technická dokumentace
OS	obalový soubor
PDE	příkon prostorového dávkového ekvivalentu
PVP	podzemní výzkumné pracoviště
pWPS	preliminary welding procedure specification
RAO	radioaktivní odpad
R <sub>p</sub>	polarizační odpor
SBPOW	syntetická bentonitová pórová voda
SEM	skenovací elektronový mikroskop
SGW	syntetická granitická voda
SRB	sulfát redukující bakterie
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
ŠJS	ŠKODA JS a.s.
ŠKODA VPVR/M	OS pro skladování a přepravu VJP z výzkumných reaktorů
TIE	Pevná vazba - Uzly prvků ležících na vázaném povrchu mají svoje stupně volnosti vázány pevně s řídicím povrchem
TIG	tungsten inert gas
TOO	tepelně ovlivněná oblast
tot	PDE – celková hodnota [Sv/h]
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu
UOS	ukládací obalový soubor
VaV	výzkum a vývoj
VJP	vyhořelé jaderné palivo

VO	vnější obal
VP	vnitřní pouzdro
VVER	vodo-vodní energetický reaktor
WIG	wolfram inert gas
WPQR	Welding procedure qualification report
XPS	rentgenová spektroskopie fotoelektronů
XRD	metoda rentgenové difrakce
ZL	zadávací list
ZM	základní materiál

## Abstrakt

Práce sumarizuje základní přístupy a výsledky výzkumu a vývoje ukládacího obalového souboru, který probíhal v pěti etapách. Stěžejním výzkumem bylo zkoumání a výběr vhodného materiálu pro ukládací obalový soubor. Výzkum staví na řadě korozních výzkumů, které proběhly pro různé podmínky a různá prostředí. Výběr materiálů pro ukládací obalový soubor přímo navazuje na koncepční řešení ukládacího obalového souboru. Celkem vzniklo v průběhu projektu 13 konstrukčních variant s různou skladbou materiálů. Z těchto variant byly podrobným hodnocením vybrány dvě favorizované varianty, přičemž jedna je určena pro ukládání 7 palivových souborů paliva VVER440 a druhá je určena pro ukládání 3 palivových souborů paliva VVER1000. Pro obě favorizované varianty bylo zpracováno podrobné konstrukční řešení. Tato řešení byla podrobena výpočtům pro ověření jejich funkčnosti a spolehlivosti. Dále byly provedeny výpočty životnosti obou variant, které jsou založeny na tří korozních modelech s různou mírou konzervatismu, přičemž všechny tři modely splňují požadovanou minimální životnost ukládacího obalového souboru 100 000 let.

## Klíčová slova

Hlubinné úložiště, bentonit, ukládací obalový soubor, vyhořelé jaderné palivo, koroze ukládacího obalového souboru, životnost ukládacího obalového souboru, inženýrské bariéry, konstrukční řešení ukládacího obalového souboru

## Abstract

This report provides a summary of the basic approaches to, and the results of the research and development of waste disposal packages; the project was divided into five stages. The main part of the research concerned the investigation and subsequent selection of suitable materials for the disposal package. The research builds on a number of corrosion studies that have been conducted for various conditions and disposal environments. The selection of the materials for the waste disposal package is directly related to its conceptual design. The project considered a total of 13 design options with various material compositions, of which two preferred options were selected following a detailed evaluation process, one for the disposal of 7 VVER440 fuel assemblies and the other for the disposal of 3 VVER1000 fuel assemblies. Detailed design solutions were developed for both the preferred options, following which they were subjected to detailed calculations aimed at verifying their functionality and reliability. Furthermore, service life calculations were performed for both options based on the research of three corrosion models with differing degrees of conservatism; all three models fully met the set minimum disposal package service life requirement of 100,000 years.

## Keywords

Deep geological repository, bentonite, waste disposal package, spent nuclear fuel, corrosion of waste disposal package, lifetime of waste disposal package, Engineered barrier, mechanical solution of waste disposal package

## Úvod

Ukládací obalový soubor je jednou z klíčových inženýrských bariér hlubinného úložiště. Tato závěrečná zpráva shrnuje výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru. Potřebu hlubinného úložiště definuje aktualizace státní koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v České republice (Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2019). UOS, jako inženýrská bariéra HÚ je nutná k zajištění jeho dlouhodobé bezpečnosti a to tak, že bude izolovat radionuklidy od životního prostředí po co nejdelší dobu.

Vývojem UOS se zabývá projekt Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku. Jmenovaný projekt byl původně rozdělen do čtyř etap (1; 2; 3 a 4), přičemž v průběhu prací byl ještě, především z důvodu nutnosti rozšíření korozních experimentů, rozšířen o etapu 3+. Celý projekt lze rozdělit na dvě fáze: část vývojovou (etapy 1; 2; 3; 3+) a část realizační (etapa 4). Vývojová část se zabývala výběrem vhodných materiálů, korozními testy vybraných materiálů a konstrukčním řešením UOS s ohledem na splnění všech požadavků na něj kladených. Tato Závěrečná technická zpráva shrnuje dosažené výsledky vývojové části projektu, tedy etap 1; 2; 3 a 3+.

Tato závěrečná technická zpráva sumarizuje přístupy řešitelů k problematice optimalizace projektových návrhů úložných obalových souborů a jejich mechanické a korozní odolnosti, přičemž vychází z obecně platných mezinárodních i tuzemských dokumentů aplikovaných na výsledky již provedených prací v této oblasti.

Předmětem etapy 1 (Kotnour et al., 2015) bylo definování všech okrajových podmínek, které budou mít vliv na funkci a bezpečnost UOS. Velká část jmenované etapy byla rešeršního charakteru. Popsány byly projektové požadavky na UOS a také na ostatní inženýrské bariéry. Specifikovány byly legislativní požadavky platné na území ČR v době realizace etapy 1, které byly kladeny na UOS (pozn.: k dnešnímu dni mohlo dojít k dílčím změnám těchto legislativních požadavků). Byly specifikovány zátěžové děje působící na UOS v různých dobách provozu HÚ a také byly specifikovány poškozující děje. S ohledem na stěžejní korozní děje byly definovány dvě hlavní koncepce UOS – korozně odolná a korozně přijatelná. Specifikován byl předpokládaný ukládací inventář radionuklidů a také předpokládaná podoba ukládacích prostor. Pro ukládací inventář byly definovány vlastnosti VJP a byly specifikovány děje, které budou probíhat uvnitř UOS. Proběhla první etapa výpočtů UOS – Výpočet podkritičnosti, výpočet dávkových příkonů, teplotnické výpočty a pevnostní výpočty, které určily základ pro další revize výpočtů, které probíhaly v etapách, které následovaly po etapě 1, přičemž potřeba nových revizí byla vyvolána novými poznatky, které v průběhu celého projektu vznikaly. Nakonec byly v etapě 1 vytipovány materiály, které by mohly být vhodné pro výrobu UOS a byla navržena metodika experimentů, na jejímž základě byly tyto materiály dále zkoumány a na základě výzkumů byl dále zužován jejich výběr až do finálně zvoleného materiálu.

Předmětem etapy 2 (Kotnour et al., 2016) bylo provedení korozních experimentů v aerobním a anaerobním prostředí a také provedení korozních experimentů v poli ionizujícího záření. Následovalo vyhodnocení některých korozních experimentů, přičemž všechny experimenty nebyly vyhodnoceny v rámci etapy 2, ale byly vyhodnoceny na začátku etapy 3. Vznikl také první návrh projektového řešení – výběr materiálu, který se v té době na základě aktuálních poznatků jevil jako nejvhodnější. Součástí projektového řešení bylo i prvotní konstrukční řešení UOS včetně návrhu zabezpečení manipulací s UOS. Došlo také k prvotnímu návrhu svařování. Jelikož v průběhu projektu docházelo k získávání nových poznatků a dalšímu vývoji, byla v dalším

průběhu většina z výše jmenovaných bodů přepracována. Takto vzniklý koncept byl ověřen výpočtovými zprávami (pevnost, radiační stínění, teplotnické výpočty, podkritičnost, ukládaný inventář, stříh).

Předmětem etapy 3 (Malina et al., 2017) bylo zhodnocení korozních experimentů, které nebyly vyhodnoceny v rámci etapy 2. Uvedeny jsou také výsledky mechanických zkoušek. Na základě získaných poznatků byla navržena nová vhodnější uhlíková ocel pro vnější obal UOS. Představeno a popsáno, zde bylo všech 13 navržených variant UOS, z nichž některé se liší například jen volbou polotovaru s jinou technologií výroby a některé se zcela liší koncepčně. Všechny představené varianty UOS byly zhodnoceny jak technicky, tak ekonomicky a na základě těchto hodnocení byly vybrány dvě koncepce UOS (jedna pro VJP z reaktorů VVER 440 a jedna pro VJP z reaktorů VVER 1000). Tyto koncepce se liší jen v délce a ve velikosti vnitřních pouzder. Zároveň byla vybrána jedna varianta jako záložní, která je sice s favorizovanými variantami, co se vlastností týče rovnocenná, nicméně v současné době pro ni neexistují vhodné polotovary, které by byly ekonomicky dosažitelné.

Předmětem etapy 3+ (Forman et al., 2020) bylo hlavně detailní konstrukční řešení favorizovaných variant UOS včetně všech výrobních výkresů pro variantu určenou pro VJP z reaktorů VVER440. Proběhlo také další kolo korozních experimentů pro finálně zvolenou uhlíkovou ocel vnějšího obalu S355J2H+N a jejich podrobné vyhodnocení. Dále byla rozpracována technologie výroby UOS včetně technologie svařování těl a vík vnějších obalů a vnitřních pouzder. Závěrem návrhu technologie svařování bylo vyhotovení zkušebních svarů VO a VP. Byla také provedena aktualizace všech výpočtových zpráv, tak aby korespondovaly s aktuálním navrženým konceptem UOS. Na základě detailně rozpracovaného návrhu UOS a také na základě výsledků korozních výzkumů byly navrženy tři korozní modely předpovídající životnost UOS. Tyto modely se liší mírou konzervatismu, avšak všechny modely včetně toho nejkonzervativnějšího splňují minimální životnost UOS, která je 100 000 let.

Etapa 4 v době vzniku zprávy teprve probíhá a po jejím ukončení bude vydána Závěrečná technická zpráva za etapu 4. Obsahem etapy 4 bude vytvoření technologického postupu výroby UOS a především výroba prezentačního vzorku UOS.

Do budoucna lze na poli budování hlubinného úložiště předpokládat další rozšiřující výzkumy ať už samotného UOS, nebo dalších zařízení nutných pro jeho provoz.

# 1 Vstupní podmínky pro návrh UOS

## 1.1 Legislativa

Základní rámec všem projekčně-konstrukčním návrhům uvedeným v tomto VaV projektu dává v současnosti platná legislativa, a to jak mezinárodní, tak i národní, které jsou vzájemně harmonizovány. Zároveň jsou v tomto projektu reflektovány závěry Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v České republice (aktualizovaná verze schválená vládou ČR usnesením č.597 ze dne 26. srpna 2019). Detailní konstrukční řešení UOS je pak založeno na v současnosti platných normativních, na aktuálním stavu techniky a také na dostupnosti materiálů.

Je třeba podotknout, že jak legislativní, tak i normativně-materiálový rámec je množinou, která doznává v čase změn, obecně daných vývojem.

Jako hlavní harmonizovaný zákon je uveden zákon **263/2016 Sb.** („atomový zákon“), který reflektuje příslušné předpisy EU včetně směrnice EU 2011/70/EUROATOM a který definuje povinnosti držitele povolení k nakládání s RAO, včetně povinnosti monitorování úložiště RAO po jeho uzavření.

Aktuální vyhlášky související s „atomovým zákonem jsou uvedeny níže.

**Vyhláška č. 21/2017 Sb.** – o zajišťování jaderné bezpečnosti jaderného zařízení

**Vyhláška č. 162/2002 Sb.** – o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona

**Vyhláška č. 329/2017 Sb.** – o požadavcích na projekt jaderného zařízení

**Vyhláška č. 360/2016 Sb.** – o monitorování radiační situace

**Vyhláška č. 361/2016 Sb.** – o zabezpečení jaderného zařízení a jaderného materiálu

**Vyhláška č. 377/2016 Sb.** – o požadavcích na bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem a vyřazování z provozu jaderného zařízení nebo pracoviště III. a IV. Kategorie

**Vyhláška č. 379/2016 Sb.** – o schválení typu některých výrobků v oblasti mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření a přepravě radioaktivní, nebo štěpné látky

**Vyhláška č. 422/2016 Sb.** – o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje

Pro úplnost jsou uvedeny i zákony a vyhlášky platné v době zpracování tohoto VaV projektu tzn. v období 2013-2020.

**Zákon č.18/1997 Sb.**

UOS je „obalový soubor pro ukládání jaderného materiálu a radioaktivních látek stanovených prováděcím právním předpisem“ podle **§23 zákona č.18/1997 Sb.** o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů (dále AZ).

**Vyhláška č.317/2002 Sb.**

Prováděcím předpisem je vyhláška **č.317/2002 Sb.** o typovém schvalování obalových souborů pro přepravu, skladování a ukládání jaderných materiálů a radioaktivních látek, o typovém

schvalování zdrojů ionizujícího záření a o přepravě jaderných materiálů a určených radioaktivních látek (o typovém schvalování a přepravě). Ve **Vyhl. 317/2002 Sb.** v příloze č. 1, části I odstavci 9. (231) je obalový soubor definován následovně: Obalovým souborem je soubor obalů nezbytných k úplnému uzavření radioaktivního obsahu. Přitom radioaktivním obsahem je štěpný materiál nebo radioaktivní látka se všemi kontaminovanými nebo aktivovanými pevnými látkami, kapalnými látkami a plyny uvnitř obalového souboru. Obalový soubor může sestávat z jednoho nebo více obalů, absorpčních materiálů, distančních konstrukcí, stínících prvků, pomocných zařízení pro plnění a vyprazdňování, větrání a snižování tlaku, zařízení pro chlazení, tlumičů nárazu, zařízení pro manipulaci a upevnění, tepelně izolačních prvků a rovněž ze zařízení k údržbě a opravám celého obalového souboru. Pro účely tohoto projektu jsou v konečném důsledku pro oblast typového schvalování uvažovány požadavky Vyhl. 379/2016 Sb. (náhrada původní Vyhl. 317/2002 Sb.) a to zejména §4 (5) - obalový soubor typu D k ukládání radioaktivní nebo štěpné látky a související požadavky Přílohy č.2 k této vyhlášce.

### **Vyhláška č.132/2008Sb.**

UOS je (dle kap.4.1.1 Přílohy **Vyhlášky č.132/08Sb.** o systému jakosti při provádění a zajišťování činností souvisejících s využíváním jaderné energie a radiačních činností a o zabezpečování jakosti vybraných zařízení s ohledem na jejich zařazení do bezpečnostních tříd) vybrané zařízení bezpečnostní třídy (BT) 2 pro ukládání vyhořelého jaderného paliva

Dle této vyhlášky je třeba naplnit požadavky dané:

§7 Požadavky na „Procesy“:

- Odst.(1) – proces navrhování výrobku
- Odst.(2) – proces výroby výrobku
- Odst.(3) – proces obstarávání výrobku
- Odst.(4) – procesy při dopravování, skladování a údržbě výrobku
- Odst.(5) – požadavky na další „procesy“

§10 Požadavky na „Program zabezpečování jakosti“(PZJ)

- Odst.(1) – dokumentování zavedeného systému jakosti
- Odst.(2) – obsah PZJ

### **Vyhláška č.309/2005Sb.**

Na UOS jako vybrané zařízení bezpečnostní třídy 2 (dle **Vyhlášky č.132/2008Sb.**) se vztahuje **Vyhláška č.309/2005Sb.** o zajišťování technické bezpečnosti vybraných zařízení.

Dle § 2 písm. b) je tlakovým zařízením speciálně navrhované vybrané zařízení namáhané tlakem provozního média, včetně prvků připojených k součástem vystaveným tlaku

*Poznámka 1: OS pro ukládání vyhořelého jaderného paliva (dále VJP) se musí pohlížet jako na tlakové zařízení pokud splňuje obě kritéria – je speciálně navrhovaným vybraným zařízením (tím je vždy dle V132) a je namáhané tlakem provozního média (dusíkem o tlaku 0,15 MPa v mezeře mezi vnitřním pouzdrem a vnějším obalem. Pokud se týká požadavku na materiály – celý bod 4. Přílohy č. 1V309 platí pro OS pro ukládání VJP i když není tlakovým zařízením (viz níže odpověď na 3. otázku), platí tedy i ustanovení bodu 4.1.7.1. A navíc se takový OS musí vyrábět v souladu s technickou dokumentací příslušného typu OS schváleného podle V317.*



Dle §3 odst. (1) f) UOS určen jako „Speciálně navrhované vybrané zařízení.“

#### §4 Technické požadavky

- Odst. (1) požadavky jsou stanoveny v příloze č.1 (odst.1 – všeobecné požadavky a odst. 5.2 Obalové soubory)
- Odst. (3) způsob výroby a ověřování za provozu zařízení a jeho částí dle přílohy č.2, část I. (požadavky na Technickou dokumentaci)
- Odst. (4) požadavky na kontroly jsou dané přílohou č.3 (všeobecné, po ukončení výroby, při provozu)
- Odst. (5) dokladování technické bezpečnosti dle požadavků přílohy č.2, část II. (požadavky na Průvodní technickou dokumentaci), dokládání jakosti provedení výroby „prohlášením o shodě“ dle přílohy č.2,část III. (náležitosti prohlášení o shodě)

#### §5 Posuzování shody

- Odst. (1) provádí se v souladu s (2), dle postupů v příloze č.4
- Odst. (2) c) -obalové soubory – postup posuzování shody F, dle přílohy č.4, část 5.

Výše uvedená legislativa je v tomto projektu VaV aplikována v rozsahu relevantním k návrhu UOS s hlavním zaměřením na splnění následujících požadavků:

- a) fyzikálně znemožnit vznik kritického a nadkritického stavu
- b) zajišťovat odvod vytvářeného tepla
- c) zajistit stínění a zabránit úniku radioaktivní látky a šíření ionizujícího záření do životního prostředí.
- d) zadržet odpad,
- e) izolovat odpad od dostupné biosféry

## 1.2 Podmínky v HÚ

Český koncept hlubinného úložiště (HÚ) je plánován v krystalinickém horninovém prostředí v hloubce – 500 m pod povrchem. Hlavní inženýrskou bariérou je kovový ukládací obalový soubor (UOS). Ten bude uložen v prstencích kompaktovaného bentonitu (tzv. buffer). Ten má za úkol primárně absorbovat mechanická stříhová pnutí horniny na UOS a jako sekundární funkci má sorpčně zpomalovat transport radionuklidů do prostředí, v případě ztráty těsnosti UOS. Další funkcí pak může být i omezení korozního napadení při použití jemného bentonitu omezujícího transport korozních produktů, použití bentonitu bez obsahu dusičnanů či kompaktizace na vysokou suchou hustotu, které omezí mikrobiální korozi. Suché objemové hmotnosti bentonitu nebyly zatím pro HÚ definitivně určeny, ale pravděpodobně se bude jednat o hodnoty 1600 kg.m<sup>-3</sup> a více, kvůli výše zmíněnému omezení mikrobiální aktivity (Taborowski 2019).

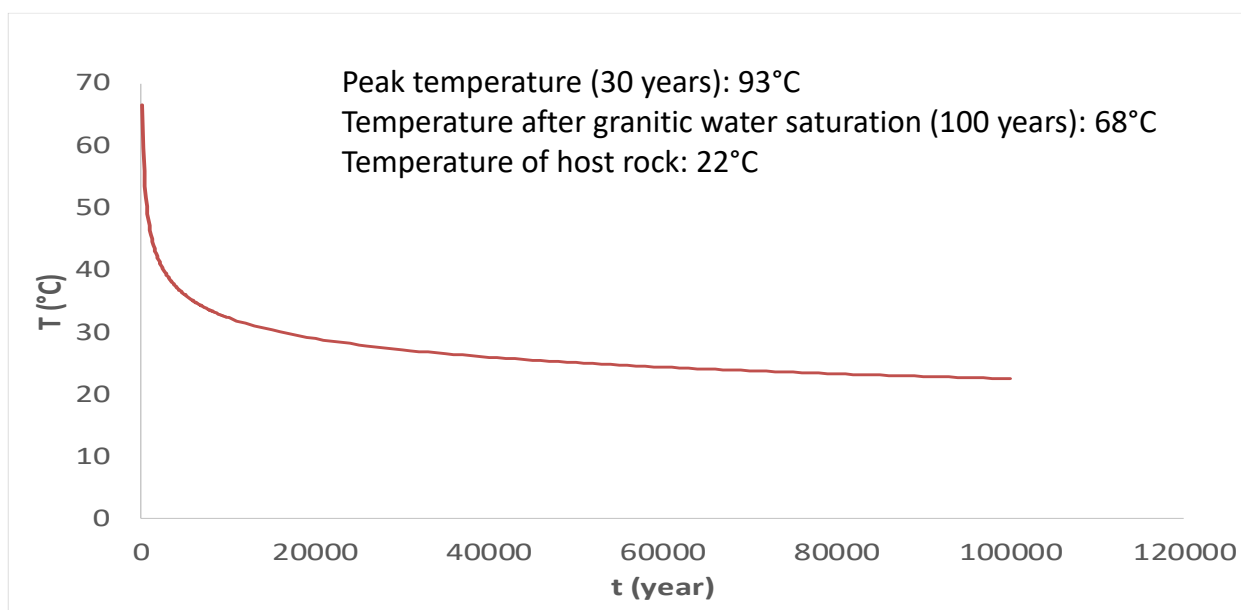
Celkový tlak okolí na UOS byl stanoven jako součet hydrostatického tlaku (5 MPa v hloubce 500 m), a maximální tlak bobtnání bentonitu (do 10 MPa). Zalednění povrchu není v podnebí

České republiky pravděpodobné ani v období glaciálu. Pro mechanické výpočty byla z výše uvedených důvodů nastavena konzervativní hodnota maximálního tlaku (návrhový tlak) na UOS na hodnotu 20 MPa.

Po uzavření budou v prostředí HÚ panovat aerobní podmínky. Tato perioda je časově zanedbatelná z hlediska následné dlouhodobé anaerobní fáze uložení, ale z hlediska korozního napadení UOS je třeba ji brát v úvahu. Na základě zahraničních literárních zdrojů (Landolt 2009, SKB 2006) byla stanovena přibližná doba do průniku okolní podzemní vody k UOS a k úplné saturaci bentonitu by mělo dojít v časovém horizontu do 100 let. Zde ovšem panuje nejistota a časy nasycení mohou být i nižší.

Před započítáním výzkumných prací byl vytvořen předběžný model vývoje teploty na povrchu UOS Obr. 1 a tepelného toku, aby bylo možné naplánovat experimenty (Kotnour 2015). Po 100 letech od uložení, po průniku podzemní vody k UOS, se teplota na povrchu UOS bude pohybovat okolo 68 °C. Ta pak postupně klesá k teplotě okolního masivu. Běžná teplota v českém krystaliniku v těchto hloubkách byla spočtena jako průměrná teplota na povrchu (10 °C) s přídavkem 3 °C/100 m hloubky, tedy 25 °C v 500 m. Maximální suchá teplota na povrchu UOS byla spočtena v původních výpočtech z počátku projektu na 93 °C (pozdější výpočty prokázaly i vyšší teploty viz konec zprávy). Pro experimenty tak byla brána teplota 90 °C jako hodnota pro krizové scénáře, a teploty 70 – 25 °C jako standardní po dobu expozice UOS. Maximální tepelný tok stěnou UOS byl v úvodních výpočtech na počátku projektu stanoven na 116 W.m<sup>-2</sup>.

Byl rovněž předběžně spočítán dávkový příkon gama záření na povrchu UOS na úrovni 0,34 Gy.h<sup>-1</sup>, jako vstupní hodnota pro experimenty (Lovecký; 2014b).



Obr. 1 – Vývoj teploty na povrchu UOS po saturaci bentonitu granitickou vodou

## 1.2.1 Souhrn vstupních okrajových podmínek pro výzkum a projekční práce

Jako vstupy do návrhu UOS a pro experimenty bylo zohledněno několik okrajových podmínek, jejichž výčet je popsán níže.

Lokalita	hypotetická
Hloubka umístění úložných prostor	- 500 m
Horninový masiv	krystalinické horniny
Suchá objemová hmotnost bentonitu	1600 kg.m <sup>-3</sup>
Tloušťka vrstvy bentonitu	0,7 m
Doba do úplné saturace bentonitu granitickou vodou	100 let
Teplota na povrchu UOS po saturaci	68 °C
Předpokládaná teplota horninového masivu	25 °C
Max. tepelný tok stěnou UOS	116 W.m <sup>-2</sup>
Předpokládaný maximální tlak okolního prostředí	20 MPa
VJP	z EDU, ETE a NJZ
Dávkový příkon na povrchu UOS	0,34 Gy.h <sup>-1</sup>
Vrty	velkoprofilové horizontální
Tlak He ve VP	0,1 MPa
Tlak N ve VO	0,15 MPa

## 1.3 Materiály ukládacích obalových souborů

Hlavní nárok na konstrukční materiál z hlediska dlouhodobé životnosti ukládacích obalových souborů (UOS) je jistota predikovatelnosti jeho chování. Proto je nezbytné, aby materiál z hlediska elektrochemického korodoval, buď ve stavu aktivity, nebo stabilní pasivity. V aktivním stavu (rovnoměrná koroze) koroduje uhlíková ocel nebo měď. Stabilní pasivní stav má od počátku expozice (aerobní podmínky a vysoká teplota) pouze titan. Korozivzdorné oceli nebo niklové slitiny by mohly za těchto podmínek podléhat nerovnoměrným formám koroze (štěrbínová koroze, bodová koroze či korozní praskání). Ty, ačkoli celkový úbytek materiálu je zanedbatelný, by měly za následek velmi rychlou penetraci skrz stěnu ukládacího obalového souboru. U těchto materiálů je možné očekávat stabilní pasivní stav až v anaerobním prostředí a za nižších teplot, nemohou být tedy použity pro vnější obal UOS.

Pro konstrukci UOS byly na počátku projektu uvažovány tyto materiály: uhlíková ocel, měď, korozivzdorné oceli (austenitická EN 1.4404 a dvoufázová EN 1.4462) a titanová slitina (Ti Gr.7). Titanová slitina obsahuje malé množství paladia (0,11 hm.%) za účelem zlepšení samopasivovatelnosti v anaerobním prostředí a zvýšení odolnosti k vodíkovému zkřehnutí. Z korozivzdorných ocelí má austenitická ocel absolutní odolnost vůči vodíkovému zkřehnutí, naopak dvoufázová ocel má výrazně vyšší mez kluzu a odolnost k bodové/štěrbínové korozi a koroznímu praskání.

Pro UOS byly v rámci řešení projektu uvažovány tyto kombinace materiálů (viz. Tab. 1). U kombinace č. 1 a 2 je celá životnost UOS zajištěna pouze vnějším obalem a vnitřní pouzdro má pouze mechanickou podpůrnou funkci. U kombinace č. 3 je životnost UOS rozložena na obě vrstvy. Vnější obal z uhlíkové oceli, který koroduje rovnoměrně v aktivním stavu a predikovatelně, má za úkol překlenout alespoň úvodní periodu a zajistit, že vnitřní pouzdro již bude korodovat v podmínkách stabilní pasivity (anaerobní prostředí a nízká teplota).

Tab. 1 – Možné kombinace materiálů pro české koncepty UOS

č.	Vnější obal	Vnitřní pouzdro
1	Měď	Uhlíková ocel
2	Titanová slitina	Uhlíková ocel
3	Uhlíková ocel	Korozivzdorná ocel

## 1.4 Děje poškozující UOS

Všechny níže uvedené poškozující děje ve výsledku končí mechanickým poškozením UOS, které vede ke ztrátě bariérové funkce UOS. Aby se zabránilo předčasné dezintegraci UOS, resp. ztrátě jeho integrity, je třeba volit konstrukční řešení takové, aby ve všech uvažovaných fázích vývoje HÚ ztráta materiálů UOS vlivem poškozujících dějů byla, pokud možno, téměř nulová či minimální v dané fázi. Předpokládá se, že chemické poškozující děje budou dominantní po celou dobu predikované životnosti UOS.

### 1.4.1 Mechanické poškozující děje

Mechanické poškozující děje je možno rozdělit na dvě skupiny. První skupina zahrnuje možné mechanické poškození před uložením UOS a druhá skupina zahrnuje děje po uložení UOS. První skupina zahrnuje rizika při výrobě, manipulaci a přepravě UOS, obecně jakékoliv mechanické operace s UOS, např. vznik vrypů v povrchu UOS při nesprávné manipulaci, deformace způsobené nevhodnou manipulací apod. Mechanické poškození před uložením UOS lze výrazně eliminovat důsledným dodržováním výrobních a manipulačních předpisů a dobře nastaveným systémem kontrol v jednotlivých fázích výroby a pozdějším nakládání s UOS. Při identifikaci mechanického poškození lze danou konstrukční část vyřadit nebo opravit.

Po uložení bude na UOS působit převážně hydrostatický tlak a bobtnací tlak bentonitu. Předpokládaný návrhový tlak by měl být max. 20 MPa (Vokál et al., 2011). Při správném návrhu konstrukčního řešení UOS by nemělo dojít k mechanickému poškození UOS až do doby, kdy bude jeho integrita výrazně narušena korozí.

K mechanickému poškození UOS po uložení by také mohlo dojít v několika následujících případech, jejichž pravděpodobnost výskytu je však velmi malá. Prvním případem je skrytý defekt UOS, který vznikl při výrobě, a při konstantním zatížení 20 MPa tento defekt způsobí porušení integrity UOS. Druhým případem je vnější zásah člověka po ukončení institucionální kontroly HÚ a to zejména průzkumným vrtem, při němž bude porušena integrita UOS. Posledním případem je možnost stříhu kontejneru (Lopaur, 2020), pokud by došlo vlivem zlomu k posunu horninového masivu.

## 1.4.2 Chemické poškozující děje

Chemickým poškozujícím dějem je koroze materiálů ukládacího obalového souboru. Korozní poškození materiálů může být rovnoměrné nebo může docházet k hůře predikovatelným nerovnoměrným formám koroze. Dále jsou diskutovány typy korozního poškození relevantní pro kombinaci materiálů a prostředí HÚ.

### 1.4.2.1 Rovnoměrné formy koroze

#### 1.4.2.1.1 Rovnoměrná koroze

Z hlediska elektrochemického, koroduje v tomto případě slitina v aktivním nebo stabilním pasivním stavu. Ačkoli koroze v aktivním stavu zní nebezpečně, skutečná korozní rychlost nemusí být v tomto případě z technického hlediska nepřijatelná. Obzvláště v anaerobním lehce alkalickém prostředí bentonitu s pomalou katodickou reakcí vývoje vodíku. V prostředí s výrazně omezeným transportem rozpuštěných kationtů slitiny pak dojde snadno k přesycení pórového roztoku u povrchu slitiny a precipitaci tuhých korozních produktů. Ty následně výrazně zpomalují další korozi bariérovým efektem. Korozní produkty slitin korodujících v aktivitě (uhlíková ocel, měď) jsou silné (min. jednotky  $\mu\text{m}$ ), porézní a krystalické. Koroze v pasivním stavu bývá řízena od začátku anodickou reakcí. Na povrchu slitiny (korozivzdorné oceli, titan, niklové slitiny) se vytváří přirozená pasivní vrstva, většinou oxidická. Tato vrstva se většinou tvoří přímo na povrchu přes gelovitou fázi a nedochází vůbec k rozpuštění kationtu kovu do roztoku. Typickými vlastnostmi této přirozené pasivní vrstvy je dokonalá kompaktnost, malá tloušťka (do 5 nm) a amorfní struktura.

Výhodou rovnoměrné koroze je její predikovatelnost s minimem nejistot.

Je na místě zde uvést také rovnoměrnou atmosférickou korozi kontejneru před uložením. Na základě dlouhodobých dat z poslední dekády lze odpovědně stanovit, že roční atmosférický korozní úbytek uhlíkové oceli v podmínkách ČR nepřekročí  $25 \mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$  (Kreislová 2017). Naopak je nutné zdůraznit, že jakákoli povrchová úprava by mohla vést po uložení k lokalizaci korozního napadení a zvýšit nejistotu v určení životnosti vnějšího obalu z uhlíkové oceli. Korozní úbytek vzniklý atmosférickou korozi je zanedbatelný a není nutné uvažovat o dočasných protikorozní ochraně v podobě povlaků či olejů. Jedinou vhodnou alternativou jsou prostředky preventivní konzervace v podobě kombinace neprodyšného obalu se sušidlem (silikagel), případně doplněné o výparný inhibitor. Ale i bez těchto dočasných protikorozních prostředků je z hlediska predikovatelnosti životnosti kontejneru lepší variantou ukládat kontejnery pokryté tenkou vrstvou korozních produktů než vnést do predikce výraznou nejistotu povlakováním kontejneru.

#### 1.4.2.1.2 Lokalizovaná rovnoměrná koroze

U slitin korodujících v aktivním stavu může docházet k lokalizaci rovnoměrné koroze. V tomto případě se však nejedná o bodovou či štěrbinovou korozi (kap. 1.4.2.2.1), což jsou typy napadení typické pro nestabilně pasivní slitiny. V případě lokalizace rovnoměrného napadení není potenciálový rozdíl mezi anodickým a katodickým místem na povrchu výrazný, a nedochází k tvorbě tzv. okludovaných roztoků, které mají u bodové/štěrbinové koroze za následek velmi rychlou penetraci korozního napadení skrz materiál.

Lokalizace rovnoměrné koroze může být v prostředí HÚ způsobena těmito faktory:

- heterogenita prostředí (rozdílná možnost transportu stimulatorů koroze k povrchu slitiny, jedná se zejména o chloridy a kyslík),
- heterogenní mikrostruktura (elektrochemicky jinak aktivní části mikrostruktury slitiny),
- heterogenní saturace bentonitu,
- heterogenní tepelný tok povrchem,
- mikrobiální koroze (viz kap. 1.4.2.2.4).

Lokalizace rovnoměrné koroze mírně zvyšuje nejistotu predikce životnosti.

### 1.4.2.1.3 Galvanická koroze

U tohoto typu korozního napadení dochází při spojení dvou slitin s různým samovolným korozním potenciálem ( $E_{KOR}$ ). Potenciály se přiblíží a u slitiny s nižším  $E_{KOR}$  korodující v aktivním stavu dojde k exponenciálnímu zvýšení korozní rychlosti. Na slitině s nižším  $E_{KOR}$  dojde k exponenciálnímu zrychlení katodické reakce. Toto spojení tedy může znamenat nebezpečí pro oba kovy, protože katodická reakce v anaerobním prostředí může být nebezpečná pro slitiny podléhající vodíkovému zkřehnutí (kap. 2.1.5).

V případě UOS přichází v úvahu několik scénářů, kdy se může galvanická koroze uplatnit:

- přirozená perioda u UOS se sdílenou životností mezi vnější obal a vnitřní pouzdro (uhlíková/korozivzdorná ocel), kdy vnější obal dokorodovává a už je částečně odhaleno podkladové vnitřní pouzdro
- technologická netěsnost svaru vnějšího obalu či mechanické poškození při uložení
- v případě horizontální uložení je možné použití vnějšího koše z uhlíkové oceli zajišťujícího soudržnost UOS, případný kontakt s tímto košem by mohl znamenat problém zejména pro vnější obal z titanové slitiny

### 1.4.2.2 Nerovnoměrné formy koroze

#### 1.4.2.2.1 Bodová/štěrbinová koroze

Jedná se o velmi nebezpečnou formu koroze, při které může dojít k penetraci stěny kontejneru v řádu několika dní. Podmínkám vzniku je nutné se při uložení důsledně vyhnout. Štěrbinová koroze iniciuje díky spotřebování kyslíku v malém objemu elektrolytu ve štěrbině. Štěrbina může být tvořena i částicemi bentonitu. Na slitině ve štěrbině dojde k depasivaci a následně začne převládat anodická reakce, zatímco katodická probíhá na pasivním povrchu vně štěrbině. Nerovnost náboje v objemu elektrolytu, způsobená velkým potenciálovým rozdílem mezi depasivovanou a pasivní částí povrchu, je kompenzována migrací iontů. Chloridové anionty migrují na anodické místo ve štěrbině, kde dojde k jejich výraznému zakoncentrování. Působí jako komplexanty a zrychlují anodickou reakci. Uvolněné kationty kovu pak působí hydrolyzu a následně pokles pH. Elektrolyt ve štěrbině se zvýšeným obsahem chloridů a sníženým pH se nazývá „okludovaný roztok“. Pokles pH je méně výrazný u pasivních uhlíkových ocelí, kde se rovnováha okludovaného roztoku ustálí na hodnotě 3 až 4. U korozivzdorných ocelí vlivem hydrolyzy způsobené  $Cr^{3+}$  kationty může pH okludovaného roztoku klesnout až na hodnotu 1,5. Korozní rychlost v tomto prostředí už je velmi rychlá a dochází k rychlé penetraci skrz materiál, přestože celkový úbytek materiálu na celé ploše nemusí být významný. Štěrbinová koroze iniciuje výhradně v aerobním prostředí, ale může probíhat na slitinách korodujících původně v pasivním i aktivním stavu.

Bodová koroze má velmi podobný mechanismus a od štěrbinové se liší pouze počátkem iniciace. Anodické místo vzniká na povrchu po rozpuštění pasivní vrstvy na slabším místě (v blízkosti inkluze MnS, karbidické částice nebo okuje po svařování). Další průběh je již stejný jako u štěrbinové koroze. Bodová koroze je tedy omezena na slitiny korodující v pasivním stavu, na druhou stranu může iniciovat i v anaerobním prostředí.

Podmínkám způsobující tento typ napadení je potřeba se důsledně vyhnout, zejména při použití korozivzdorných ocelí a niklových slitin. Tyto materiály nemohou být na povrchu UOS od začátku v aerobním prostředí, které by způsobilo štěrbinovou korozi. Ale i v anaerobní fázi uložení je potřeba exponovat tyto slitiny až po dosažení teploty nižší než kritická teplota pro iniciaci bodové koroze.

#### **1.4.2.2 Korozní praskání**

K tomuto typu napadení dochází při synergickém působení kombinace slitiny, konkrétního prostředí a mechanického namáhání s tahovou složkou. Mechanické namáhání může být způsobeno vnějšími vlivy (tlak okolí, samotná váha UOS) či vnitřním pnutím (např. ve svarech). Přesný mechanismus korozního praskání se výrazně mění v závislosti na povaze prostředí, kovové slitině a úrovni mechanického namáhání. V prostředí H<sub>2</sub> představují hlavní nebezpečí z hlediska možného výskytu korozního praskání zejména chloridy (korozivzdorné oceli) a sulfan produkovaný sulfát redukujícími bakteriemi (uhlíkové oceli).

#### **1.4.2.3 Vodíkové zkřehnutí**

Pokud na povrchu slitiny vzniká atomární vodík, může tento být absorbován do mřížky kovu a difundovat skrze ni. Vodík rozpuštěný jako intersticiální atom v tuhém roztoku může výrazně omezit pohyb dislokací v mřížce a způsobit zkřehnutí materiálu. Na místech krystalografických poruch se vodík shromažďuje (tzv. vodíkové pasti) a může zrekombinovat na plynný H<sub>2</sub>. Tyto tlaky mohou být extrémní a mohou materiál mechanicky poškodit. Další možností je reakce vodíku s materiálem za tvorby hydridů. Hydridy bývají velmi křehké a mají větší objem než původní kov, což vede po dosažení určité tloušťky vrstvy hydridu k jejímu odprýsknutí. Pokud je vodík pouze rozpuštěný v tuhém roztoku, může ještě dojít k desorpci a tento děj je tedy vratný. Pokud dojde k rekombinaci na H<sub>2</sub> či tvorbě hydridů je tento děj nevratný, a tedy z hlediska životnosti UOS výrazně nebezpečnější.

Možnými zdroji atomárního vodíku na povrchu jsou v prostředí H<sub>2</sub>:

- katodická reakce v anaerobním prostředí spojená se samovolnou korozi
- katodická reakce v anaerobním prostředí urychlená na katodě v galvanickém článku
- katodická reakce v místě výstupu katodického bludného proudu
- atomární vodík vznikající při radiolýze vody

#### **1.4.2.4 Mikrobiální koroze**

Bakterie mohou být v prostředí přítomny jako volné nebo navázané na povrchu v tzv. biofilmu. Volné bakterie mohou ovlivnit prostředí produkty svého metabolismu (pH, tvorba agresivních aniontů) nebo usnadňovat redukci/oxidaci korozních produktů. Změny oxidačního stavu korozních produktů mají za následek změny objemu a zvýšení porozity či praskání vrstvy a její horší ochranný (bariérový) účinek. Na povrchu kovu se mohou bakterie usadit v biofilmu, díky produkci tzv. „extracellular polymeric substances“ (EPS), které pomáhají lepší adhezii k povrchu. EPS mohou být všechny druhy organických dlouhých molekul, jako polysacharidy, lipidy, proteiny

apod. V případě biofilmu je možné ovlivnění korozních dějů následujícími základními mechanismy:

- vliv makročlánků s diferenční aerací
- tvorba okludovaných roztoků metabolitů pod biofilmem na povrchu
- lokalizace anody
- tvorba dalšího povrchu pro katodickou reakci
- urychlení katodické reakce, zejména v případě schopnosti přímého odběru elektronů z povrchu slitiny

V prostředí HÚ představují z hlediska dlouhodobé bezpečnosti hlavní nebezpečí anaerobní bakterie, vzhledem k omezené kapacitě kyslíku po uzavření. S ohledem na doposud provedené experimenty, simulující podmínky v HÚ v ČR, se jako nejvýznamnější bakterie z hlediska koroze jeví železo redukující (IRB), sulfát redukující (SRB) a denitrifikující (NRB) bakterie.



## 2 Korozní chování materiálů pro UOS

Tato část je souhrnem získaných poznatků a neobsahuje detailní výsledky všech experimentů. Ty jsou popsány v jednotlivých technických zprávách. Tento souhrn uvádí pouze nejdůležitější výsledky, klíčové pro výběr materiálu a konceptu UOS, případně byla data z nich použita pro modely dlouhodobé životnosti. Zahrnuti jsou i výsledky doprovodných projektů zaměřených na užší problematiku. Některé části již byly publikovány v odborných periodikách, nebo jako technické zprávy SÚRAO s důležitým obsahem pro tuto zprávu, a v těchto případech jsou uvedeny pouze závěry a je uvedena citace dané publikace přímo na relevantním místě v textu.

### 2.1 Výsledky projektu UOS (SÚRAO SO2013-088)

Pro experimenty byl použit český vápenato-hořečnatý bentonit BaM. V experimentech s kompaktovaným bentonitem bylo pro sycení použito syntetické granitické vody (SGW), jejíž složení je uvedeno v Tab. 2. Pro experimenty v roztoku a pro míchání suspenzí byla použita syntetická bentonitová pórová voda (SBPOW), jejíž složení je uvedeno v Tab. 3.

Červinka R., Gondolli J. Modelování pórové vody kompaktovaného bentonitu BaM, Technická zpráva ÚJV 14407, 2015. (v češtině)

Tab. 2 – Složení syntetické granitické vody (SGW)

Ion	Obsah [mol dm <sup>-3</sup> ]
Na <sup>+</sup>	4,52 x 10 <sup>-4</sup>
K <sup>+</sup>	4,62 x 10 <sup>-5</sup>
Mg <sup>2+</sup>	2,88 x 10 <sup>-4</sup>
Ca <sup>2+</sup>	4,75 x 10 <sup>-4</sup>
Cl <sup>-</sup>	9,46 x 10 <sup>-4</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,88 x 10 <sup>-4</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4,98 x 10 <sup>-4</sup>

Tab. 3 – Složení syntetické bentonitové pórové vody (SBPOW)

Ion	Obsah [mol dm <sup>-3</sup> ]
Na <sup>+</sup>	1,88 x 10 <sup>-2</sup>
K <sup>+</sup>	2,38 x 10 <sup>-3</sup>
Ca <sup>2+</sup>	3,49 x 10 <sup>-4</sup>
Mg <sup>2+</sup>	1,11 x 10 <sup>-2</sup>

Ion	Obsah [mol dm <sup>-3</sup> ]
Cl <sup>-</sup>	7,88 x 10 <sup>-3</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,21 x 10 <sup>-2</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,09 x 10 <sup>-2</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,06 x 10 <sup>-3</sup>

V průběhu projektu bylo postupně využito několika typů uhlíkových ocelí: litá ocel ČSN 42 2707.9, tvářená ocel ČSN 12 022 a tvářená ocel S355J2H+N. Důvody vývoje specifikace uhlíkové oceli jako materiálu pro vnější obal UOS jsou shrnuty v kap. 3.1.

Pro všechny experimenty byly povrchy slitin broušeny na papíře zrnitosti P80. Tato hrubost povrchu odpovídá běžně průmyslově opracovanému povrchu.

V následujících kapitolách je vynechán detailní popis experimentů a je nahrazen úspornou informací ve formě tabulky s klíčovými informacemi o průběhu experimentu.

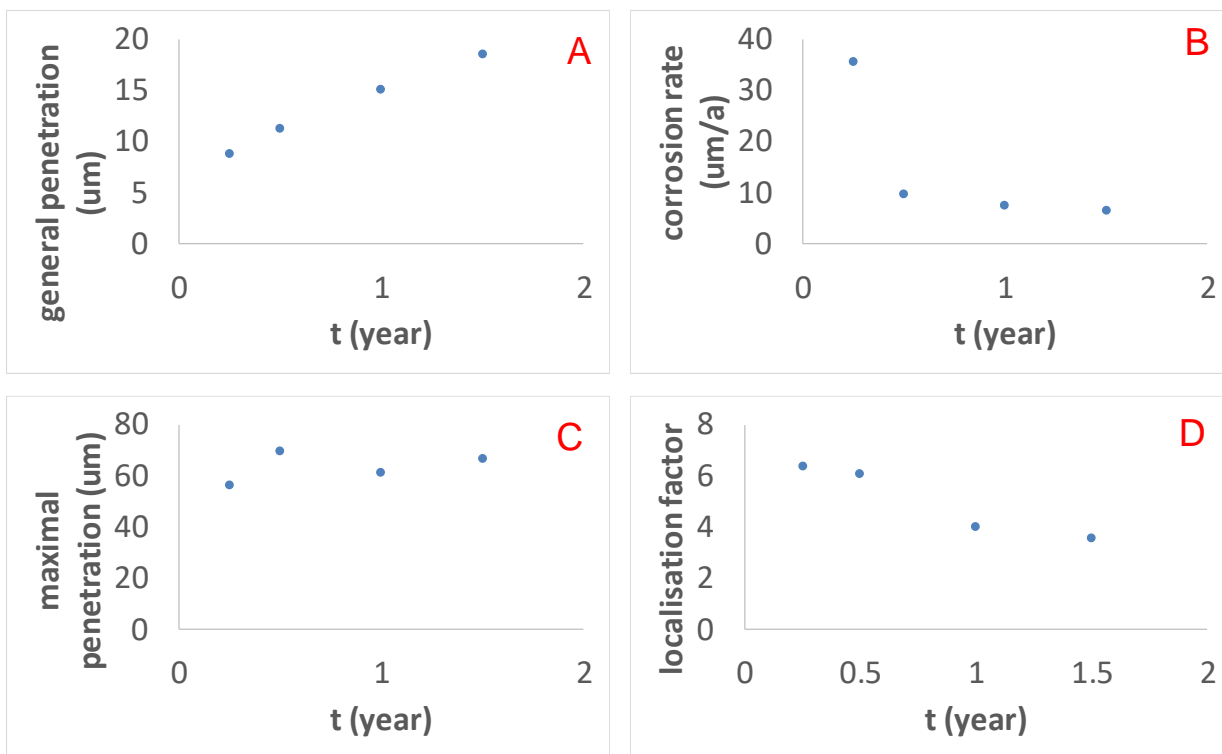
### 2.1.1 Výsledky korozních experimentů v kompaktném bentonitu

Tab. 4 – Specifikace parametrů experimentů v kompaktném bentonitu

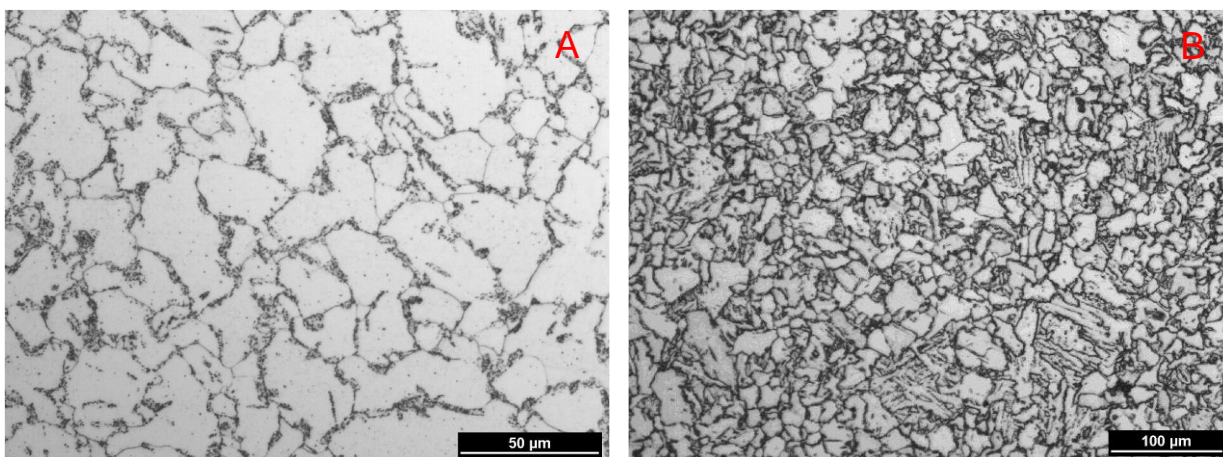
Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřicí techniky
bentonit BaM (kompaktizace 1600 kg.m <sup>-3</sup> ) sycení pomocí SGW pod tlakem 5 MPa argonu	uhlíková ocel ČSN 422707.9 Cu-OF Ti-Pd	70 °C	ANO (Ar)	0,25; 0,5; 1 a 1,5 roku	gravimetrie metalografie XRD SEM/EDS

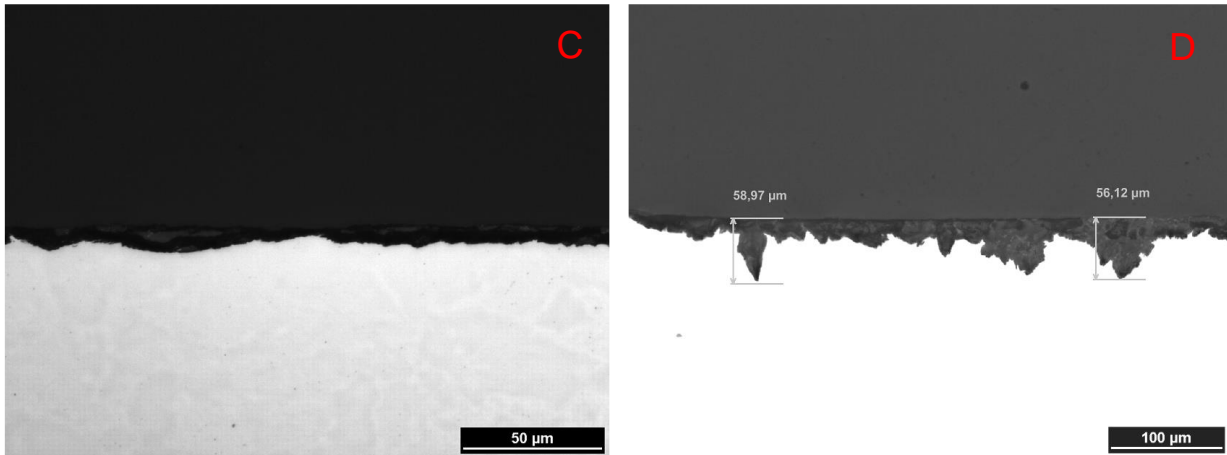
Výsledky pro uhlíkovou ocel jsou uvedeny na Obr. 2. Graf A) uvádí integrální hodnotu průměrné korozní penetrace do materiálu stanovenou pomocí gravimetrie (hmotnostní úbytek). Tato varianta je výhodná pro modelování životnosti a umožňuje snadno zahrnout faktor lokalizace napadení, proto bude v této souhrnné zprávě preferována. Na části B) je uvedena diferenciální hodnota korozní rychlosti s odečtem předchozí periody. Z obou grafů je patrné, že korozní napadení v čase výrazně zpomaluje. Parabolická závislost naznačuje transportní řízení korozního děje. V části C) jsou uvedeny maximální lokální penetrace na vzorcích, stanovené metalograficky na kolmých výbrusech. K lokalizaci evidentně dochází, nicméně v čase v podstatě zůstává konstantní. Toto se projevuje na lokalizačním faktoru, který se v čase snižuje, jak je patrné v části D). Obdobné výsledky pozoroval i španělský tým (Madina et al., 2002). Maximální penetrace se zastavila na hloubce 98 μm. V případě českých výsledků byla maximální penetrace pozorována na úrovni 74 μm. V případě odkorodování tloušťky oceli 50 – 100 μm je evidentně uvolněno dostatečné množství kationtů železa, aby došlo v omezeném objemu pórového roztoku k precipitaci korozních produktů, které dále blokují korozní napadení. Významný vliv omezení transportu v bentonitu oproti roztoku a parabolický vývoj hloubky důlků v čase publikovali i britští autoři (Marsh a Taylor, 1988).

Na lokalizaci rovnoměrné koroze má pravděpodobně významnou úlohu litá nehomogenní mikrostruktura uhlíkové oceli. Na Obr. 3 je vidět, že v místech s výrazně zvýšeným výskytem katodických karbidických částic (B a D) jsou tyto galvanické mikročlánky schopné výrazně urychlit v počáteční fázi rozpouštění železa z oceli.



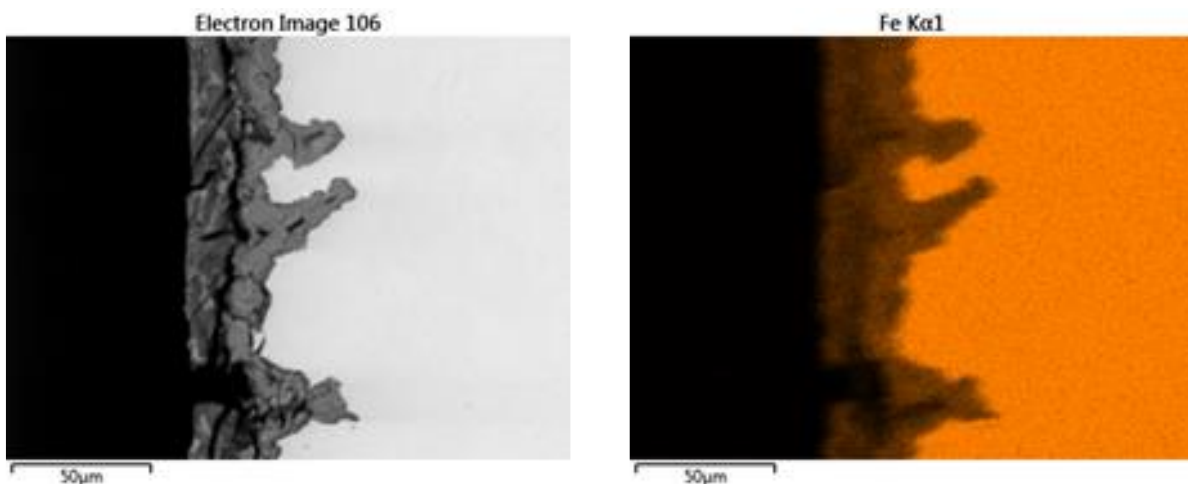
Obr. 2 – Výsledky expozice uhlíkové oceli ČSN 42 2707.9 v kompaktním bentonitu BaM: A) průměrná penetrace (hmotnostní úbytek); B) přepočtená diferenciální korozní rychlost; C) maximální penetrace (kolmý řez); D) lokalizační faktor

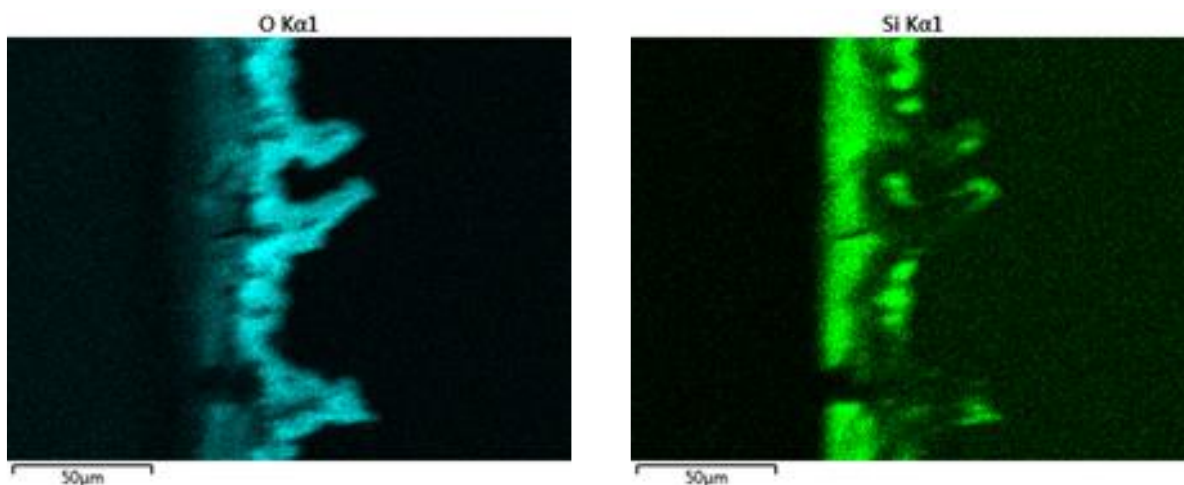




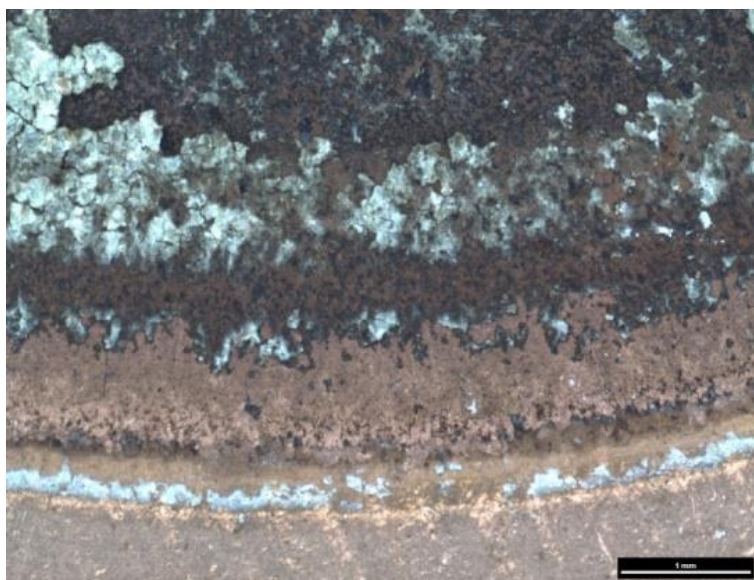
Obr. 3 – Kolmé výbrusy po půlroční expozici uhlíkové oceli ČSN 42 2707.9 v kompaktovaném bentonitu BaM: A) místo s minimem karbidických částic (mikrostruktura); B) místo s maximem karbidických částic (mikrostruktura); C) místo s minimem karbidických částic (kolmý řez); D) místo s maximem karbidických částic (kolmý řez)

Na vzorcích byly stanovovány korozní produkty metodou rentgenové difrakce (XRD). Jako hlavní fáze korozních produktů byly stanoveny siderit ( $\text{FeCO}_3$ ) a chukanovit ( $\text{Fe}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ). Kromě toho byly studovány i kolmé řezy vzorků s korozními produkty. Ty ukázaly zajímavý výskyt křemičitanů na rozhraní s kovem. Vrstva korozních produktů má dvě části (viz Obr. 4). Vnější část, ve které jsou korozní produkty výrazně promísены s částicemi bentonitu. Ve vnitřní části jsou potom hlavně korozní produkty železa, ale lokálně v těsné blízkosti rozhraní s kovem je znatelné výrazné nabohacení o křemík. Na rozdíl od vnější části bentonitových částic, které obsahují i hliník (hlinito-křemičitany), tyto částice jsou čistě křemičitanové a pravděpodobně nově vzniklé při korozním procesu.





Obr. 4 – SEM/EDS obrázky a analýzy kolmých výbrusů po půlroční expozici uhlíkové oceli ČSN 42 2707.9 v kompaktném bentonitu BaM



Obr. 5 – Obrázek z optického mikroskopu povrchu Cu-OF po roční expozici v kompaktném bentonitu BaM

Hmotnostní úbytky na mědi a titanu nebyly stanovitelné. A to i přesto, že na mědi byly patrné korozní produkty, které se i podařilo stanovit jako kuprit ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ). Na Obr. 5 z optického mikroskopu jsou ovšem patrné i zelené korozní produkty mědi. Jejich množství bylo však pod mezí detekce XRD. Nicméně podobné korozní produkty se podařilo stanovit v jiné práci po expozicích v bentonitových suspenzích jako malachit ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ).

Stoulil, J.; Kouřil, M.; Dobrev, D., Exposure tests of copper foils in a slurries of different bentonites. *Koroze a ochrana materialu* 2019, 63 (1), 19-22. (v angličtině)

## 2.1.2 Výsledky korozních experimentů v pórovém roztoku a bentonitových suspenzích

Tyto experimenty díky jednoduššímu uspořádání umožnily studium ve variabilnějším prostředí, co se týče složení a teploty.

Tab. 5 – Specifikace parametrů experimentu v pórovém roztoku syntetické bentonitové vody s přidavky agresivních aniontů

Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřicí techniky
<b>Experiment A.</b> SBPOW s přidavky agresivních aniontů	uhlíková ocel ČSN 422707.9  Cu-OF	40; 70 a 90 °C	ANO (N <sub>2</sub> nebo N <sub>2</sub> +3%CO <sub>2</sub> )	2 h	polarizační odpor  potenciodynamické křivky

První sada experimentů měla za cíl studium vlivu zakoncentrování agresivních aniontů (chloridů a síranů) a obsahu uhličitánových specií na korozní rychlost. Zakoncentrování může být způsobeno v HÚ vlivem tepelného toku a odparu vody z pórového roztoku bentonitu.

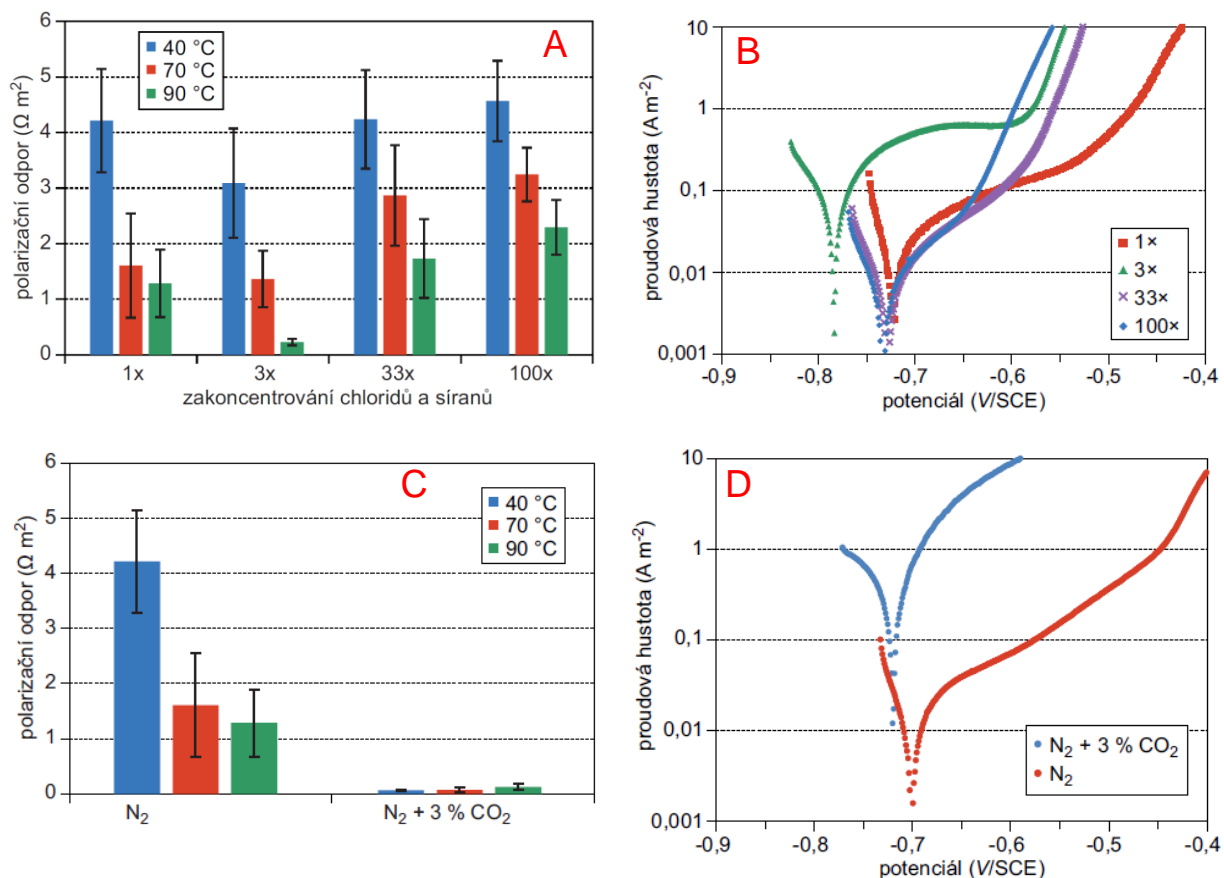
Tato práce byla publikována.

Novikova, D.; Kouřil, M.; Msallamová, Š.; Stoužil, J.; Strnadová, N., Korozní chování oceli ČSN 422707.9 v zahuštěné syntetické pórové vodě bentonitu. *Koroze a ochrana materiálu* 2016, 60 (3), 68-73. (v češtině)

Výsledky jsou sumarizovány na Obr. 6. Při zvýšení obsahu chloridů a síranů na 3-násobek původní koncentrace roztoku SBPOW ( $2,36 \times 10^{-2}$ , resp.  $3,63 \times 10^{-2}$  mol.dm<sup>-3</sup>) dochází k destabilizaci vrstvy na povrchu a ta má potom horší ochranný charakter jak ukazují snížené hodnoty polarizačního odporu i vyšší proudová hustota v „pasivitě“ na potenciodynamické křivce. Další výrazné zvýšení obsahu agresivních aniontů vedlo k opětovné stabilizaci vrstvy na povrchu, přestože zvýšený obsah aniontů vedl k posunu průřezového potenciálu do nižších hodnot. Pokud bylo odvzdušnění provedeno směsí dusíku s oxidem uhličitým, došlo k výraznému poklesu polarizačního odporu, a rovněž ke změně tvaru potenciodynamické křivky. Absence plata na potenciodynamické křivce, spojeného s omezenou rozpustností vrstvy korozních produktů, naznačuje aktivní a rychlé rozpouštění kovu.

V prostředí bentonitu se železo rozpouští přes hydrogenuhličitánový komplex Fe(HCO<sub>3</sub>)<sup>+</sup> (Castro et al., 1986; Castro et al. 1991; Jeannin et al., 2011; Lee et al., 2006a; Lee et al., 2006b; Valentini a Moina 1985; Zerbino et al., 1981).). Následně vznikají tzv. uhličitánové „green rusts“ a z nich pak uhličitánové korozní produkty (Refait, 2012). Odvzdušnění směsí s CO<sub>2</sub> vede k nárůstu hydrogenuhličitánových aniontů a poklesu pH z hodnoty 8 na 6,5. Anodická reakce železa tak může probíhat s neomezeným rozpouštěním s tvorbou hydrogenuhličitánových komplexů.

Naopak přítomnost relativně vysokého množství chloridových aniontů (3 mol.dm<sup>-3</sup>) vůči menšímu množství hydrogenuhličitánových aniontů (0,2 mol.dm<sup>-3</sup>) vede v anaerobním prostředí ke kompetitivní adsorpci a přímé tvorbě magnetitu, namísto uhličitánové řady korozních produktů (Lee 2006a).



Obr. 6 – Výsledky elektrochemických měření na uhlíkové oceli v prostředí SBPOW se zvýšeným obsahem chloridů a síranů (A a B) a v prostředí odvzdušňované směsi dusíku s oxidem uhlíčitým (C a D)

Tab. 6 – Specifikace parametrů experimentu v suspenzi pórového roztoku syntetické bentonitové vody a bentonitu BaM

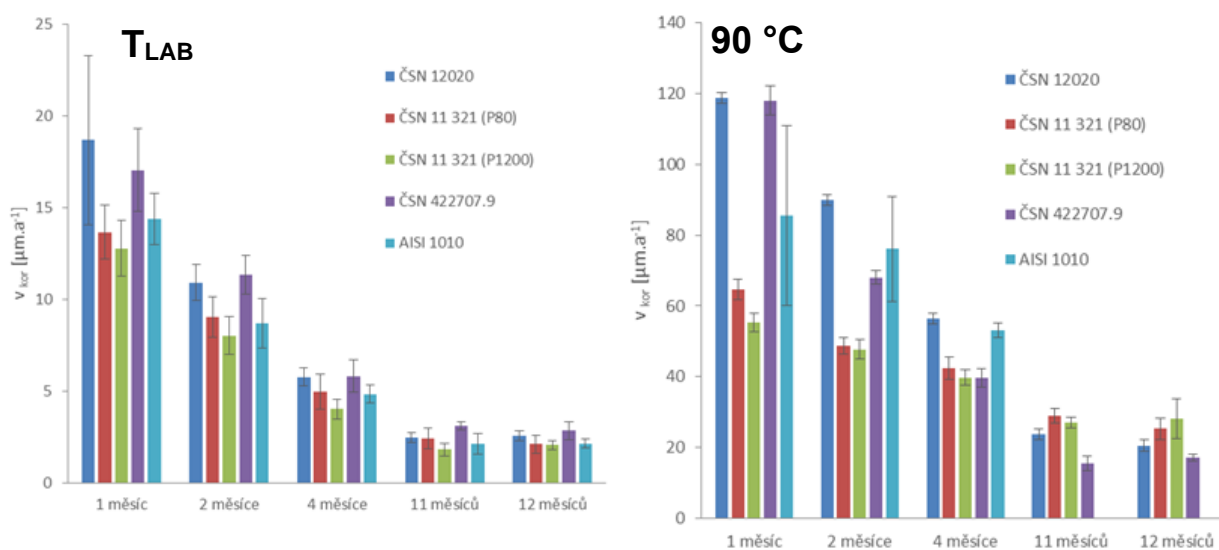
Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřicí techniky
<b>Experiment B.</b> suspenze bentonitu BaM a SBPOW v hmotnostním poměru 1:1	uhlíkové oceli ČSN 422707.9 ČSN 11321 ČSN 12020 AISI 1010 Cu-OF Cu-DHP	T <sub>LAB</sub> a 90 °C	ANO (N <sub>2</sub> )	1; 2; 4; 11 a 12 m	gravimetrie metalografie

Následující experimenty měly ověřit vliv obsahu legujících prvků a drsnosti povrchu na průběh korozního napadení v bentonitové suspenzi za extrémních teplot 90 °C a T<sub>LAB</sub>. Část výsledků týkající se uhlíkové oceli ČSN 42 2707.9 již byla publikována v rámci následujícího článku:

Pospiskova, I.; Dobrev, D.; Kouril, M.; Stoužil, J.; Novikova, D.; Kotnour, P.; Matal, O., Czech National Programme and Disposal Canister Concept. Corrosion Engineering, Science and Technology 2017, 52 (S1), 6-10. (v angličtině)

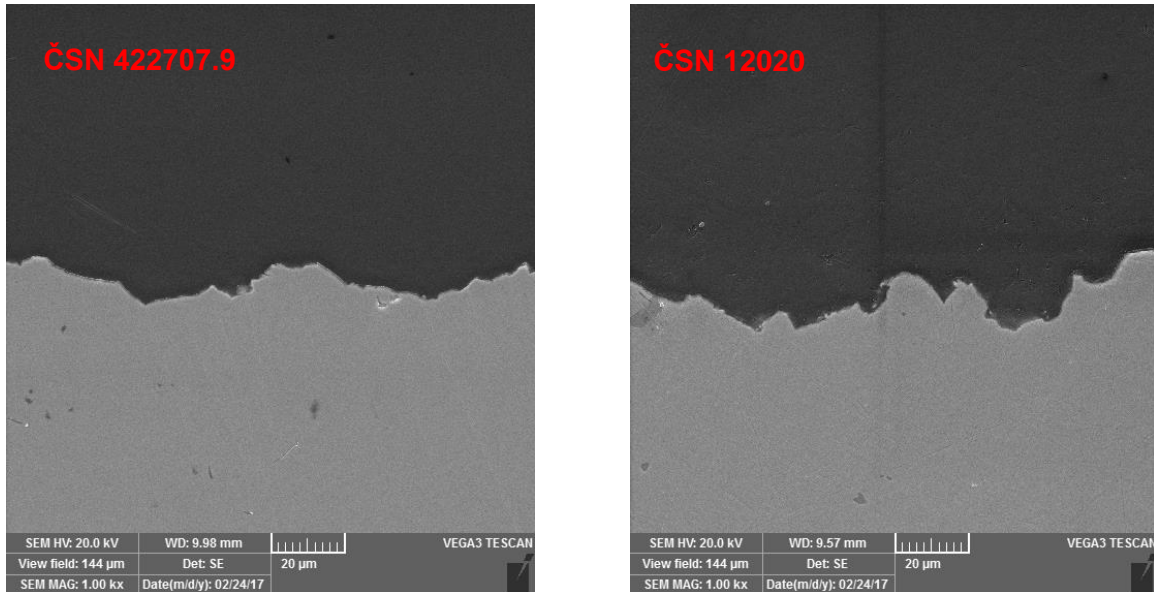
Přehled kompletních výsledků je uveden dále. Z uhlíkových ocelí byly testovány kromě dříve použité lité oceli ČSN 42 2707.9 s nevyhovující heterogenní mikrostrukturou i další typy: nízkonákladová varianta ČSN 11 321, tvářená ocel ČSN 12 020 s přesněji definovaným chemickým složením a tenké folie oceli AISI 1010, které jsou používány pro rezistometrické sondy (kap. 2.2.3 nebo Stoužil 2013). Nízkonákladová varianta ČSN 11 321 byla zkoušena i ve stavu jemně broušeného povrchu (P1200). Ostatní varianty pouze s hrubým povrchem broušeným papírem zrnitosti P80. Při laboratorní teplotě není významný rozdíl v korozních rychlostech jednotlivých materiálů (Obr. 7). Při teplotě 90 °C má dokonce nízkonákladová varianta ČSN 11 321 nižší korozní rychlost než dražší varianty uhlíkové oceli, ale tento rozdíl se s dobou expozice vytrácí. Počáteční drsnost povrchu nemá v dlouhodobém horizontu žádný vliv na korozní rychlost oceli.

Nebyl zjištěn ani rozdíl mezi původně použitou litou ocelí ČSN 42 2707.9 a typem ČSN 12 020, co se týče lokalizace rovnoměrné koroze (Obr. 8). Ani typ ČSN 12 020 nemá totiž definovaný obsah karbidotvorných prvků.



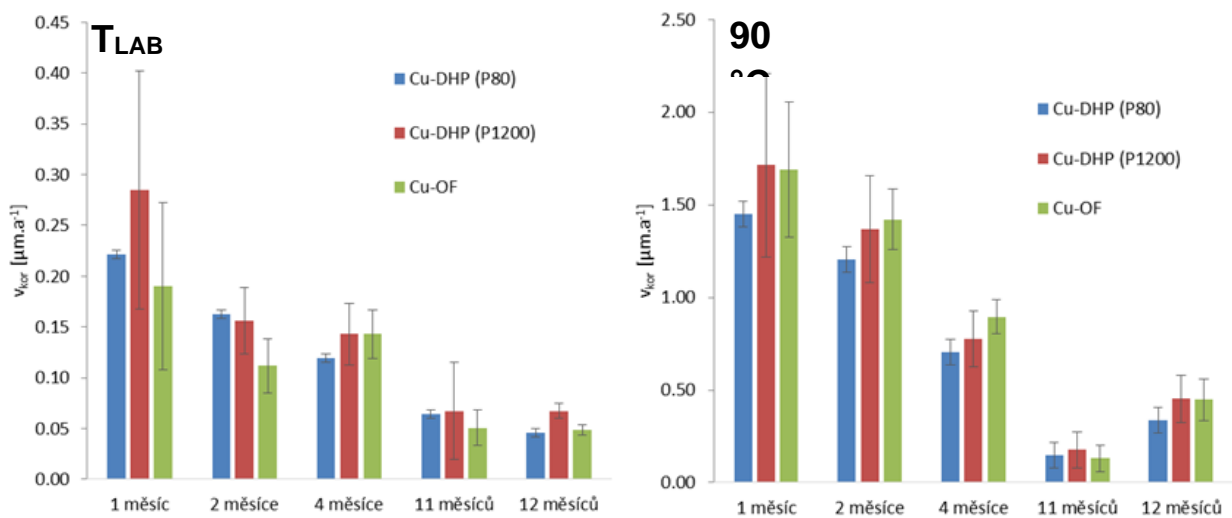
Obr. 7 – Výsledky expozičních testů uhlíkových ocelí v prostředí bentonitové suspenze





Obr. 8 – Kolmé řezy po expozičních testech v prostředí bentonitové suspenze

Obdobně nebyl pozorován žádný významný vliv chemického složení mědi ani hrubosti povrchu (Obr. 9). Rozdíly ve výsledcích jsou víceméně v rámci statistické odchylky.

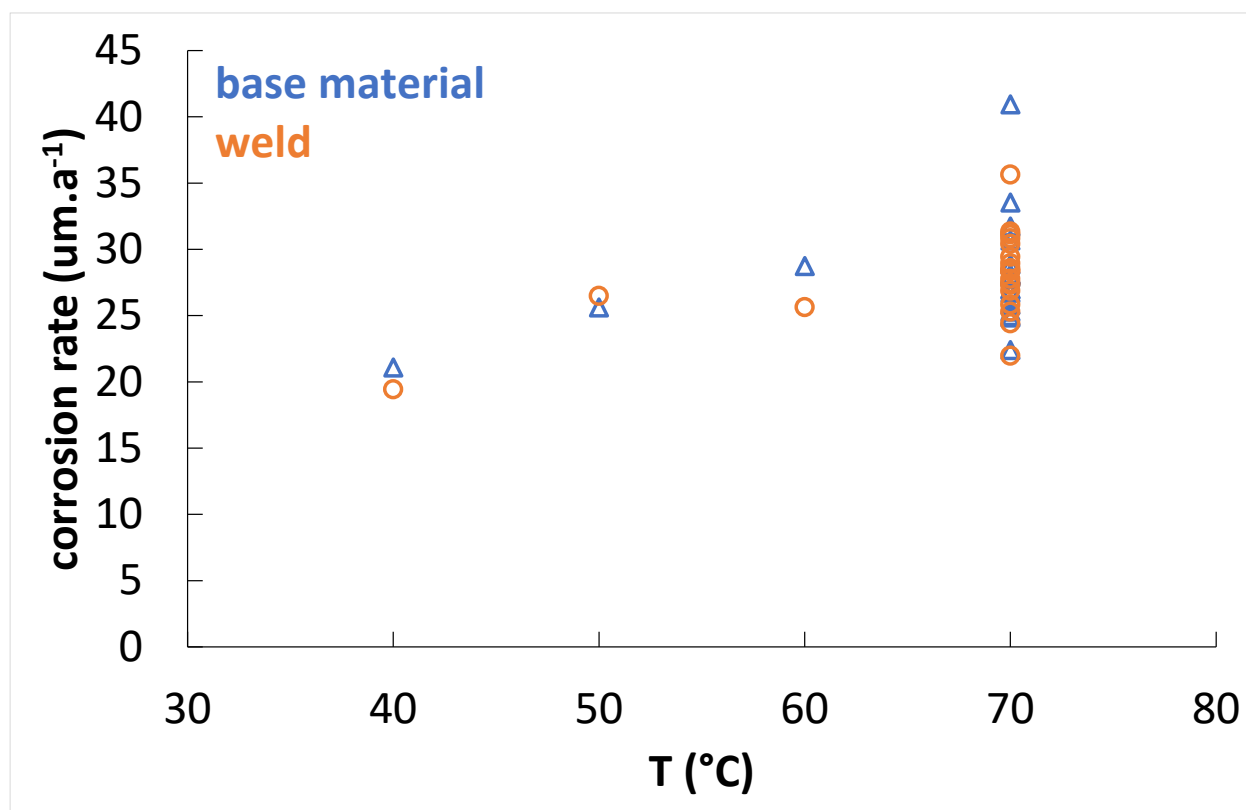


Obr. 9 – Výsledky expozičních testů mědi v prostředí bentonitové suspenze

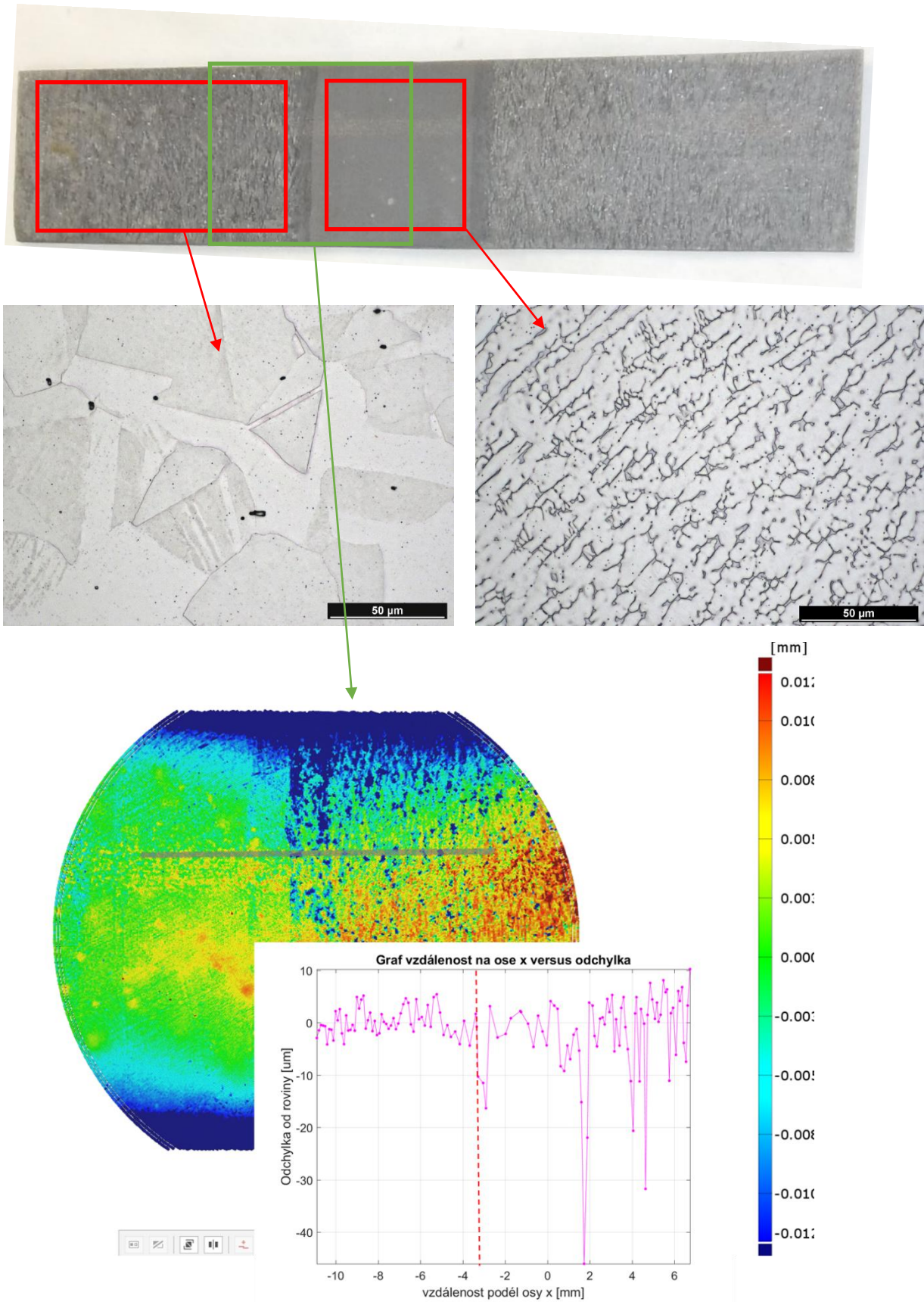
Tab. 7 – Specifikace parametrů experimentu v suspenzi bentonitu BaM a syntetické pórové bentonitové vody

Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřicí techniky
<b>Experiment C.</b> suspenze bentonitu BaM a SBPOW v hmotnostním poměru 1:1	uhlíková ocel S355J2H+N  korozivzdorná ocel EN 1.4404	40; 50; 60 a 70 °C	ANO (N <sub>2</sub> )	0.5 roku	gravimetrie metalografie

V další fázi projektu (Etapa 3+) byla pro experimenty využita tvářená uhlíková ocel S355J2H+N s nízkým obsahem karbidotvorných prvků, aby byla omezena lokalizace rovnoměrného korozního napadení. V tomto případě již byla testována technologie svařování materiálu a vliv svarového kovu na korozní rychlost. Výsledky půlročních expozičních testů v bentonitové suspenzi jsou sumarizovány na Obr. 10. V celkové korozní rychlosti stanovené metodou hmotnostního úbytku nejsou výrazné rozdíly mezi svarovým kovem a základním materiálem. Nicméně u tohoto velmi čistého materiálu s minimem cizorodých částic dochází k paradoxní situaci a tou je lokalizace rovnoměrného napadení v základním materiálu, které je vyšší než ve svarovém kovu. Důvodem je jemnozrnnější struktura svarového kovu oproti základnímu materiálu. Ukázky profilometrického měření a metalografických výbrusů jsou uvedeny na Obr. 11. Jako hlavní korozní produkt byl detekován pomocí XRD siderit ( $\text{FeCO}_3$ ). Minoritními korozními produkty byly mackinawit ( $\text{FeS}$ ) a cronstedtit ( $\text{Fe}_2^{2+}\text{Fe}^{3+}(\text{Si,Fe}^{3+})_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ).

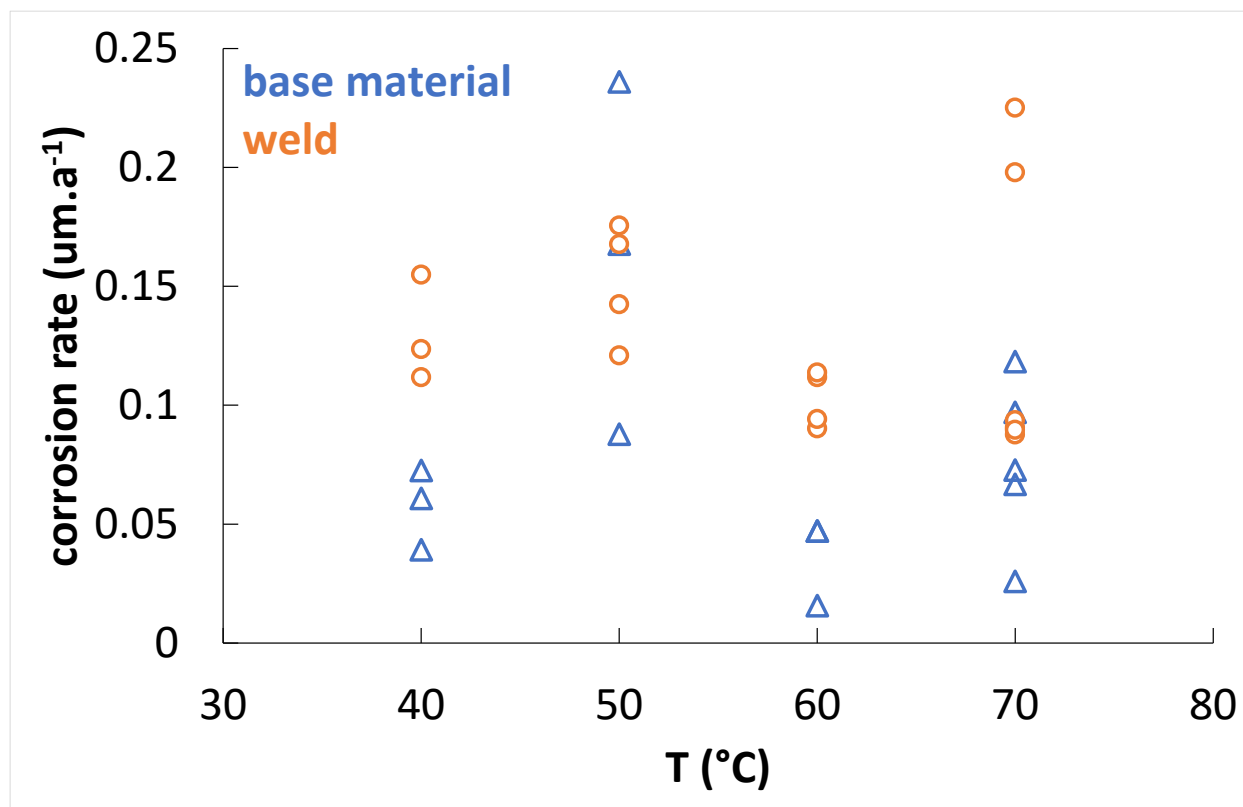


Obr. 10 – Výsledky půlročních expozičních testů uhlíkové oceli S355J2H+N v prostředí bentonitové suspenze



Obr. 11 – Povrch vzorku se svarem po půlroční expozici uhlíkové oceli S355J2H+N v prostředí bentonitové suspenze (nahore), metalografické výbrusy (uprostřed) a profilometrie vzorku (dole)

Výsledky na korozivzdorné oceli (EN 1.4404) ukázaly v průměru vyšší korozní rychlost na svarovém kovu oproti základnímu materiálu (Obr. 12). Svarový kov pravděpodobně obsahuje vnitřní pnutí, které mírně destabilizuje pasivní vrstvu. Na vzorcích svarového kovu i základního materiálu byla pozorována bodová koruze po expozici při teplotě 70 °C. Přítomnost ojedinělých důlků na povrchu však nezvyšovala stanovený hmotnostní úbytek vůči ostatním vzorkům bez pozorovaného napadení bodovou korozí.



Obr. 12 – Výsledky půlročních expozičních testů korozivzdorné oceli EN 1.4404 v prostředí bentonitové suspenze

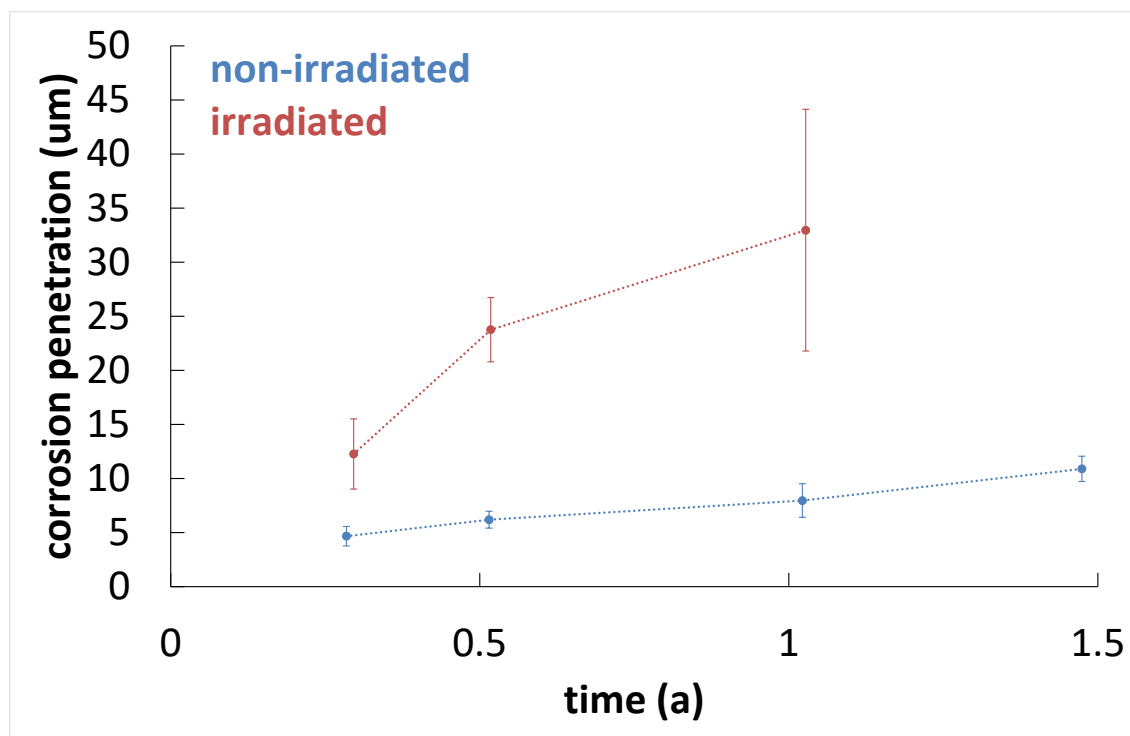
### 2.1.3 Výsledky korozních experimentů s ionizujícím zářením

Tab. 8 – Specifikace parametrů experimentu syntetické pórové bentonitové vodě s gama zářením

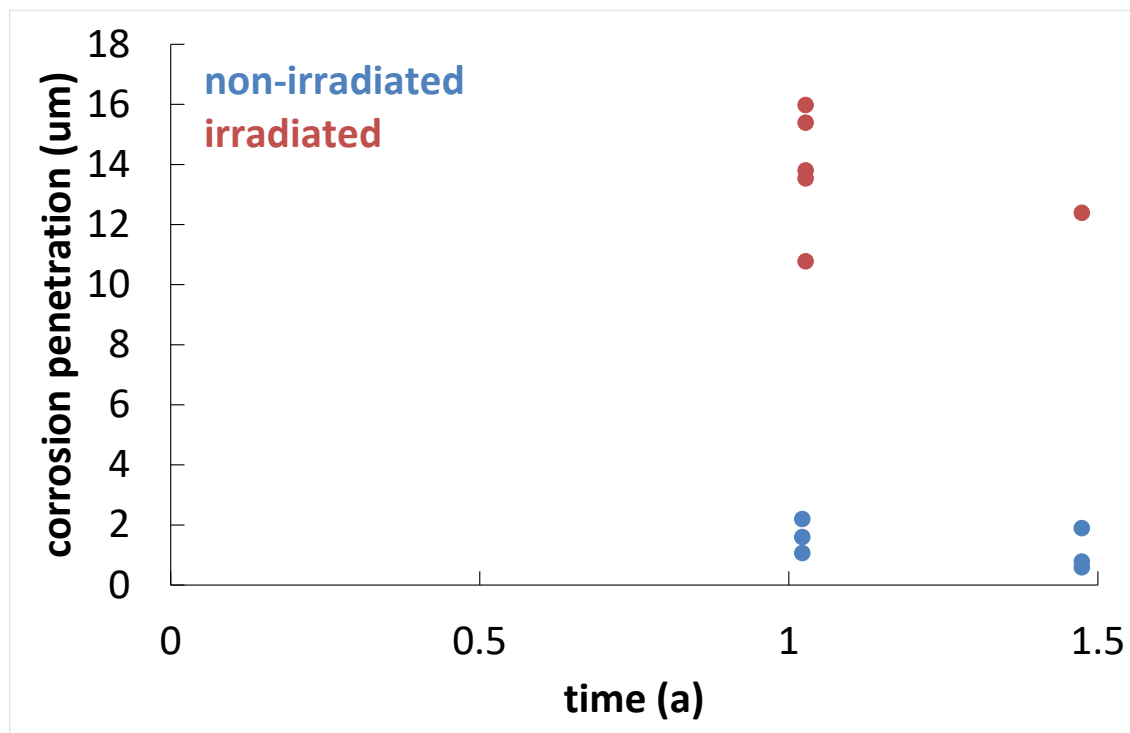
Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřicí techniky
Experiment A. SBPOW s gama zářením 0,5 Gy.h <sup>-1</sup>	uhlíková ocel ČSN 422707.9 Cu-OF	90 °C	ANO (Ar)	0,25; 0,5; 1 a 1,5 roku	gravimetrie metalografie

Nejprve bylo testováno chování lité uhlíkové oceli (ČSN 42 2707.9) a mědi v extrémních podmínkách 90 °C, pórový roztok SBPOW a gama záření o dávkovém příkonu ~ 0,5 Gy.h<sup>-1</sup>. Na ozařovaných vzorcích došlo k degradaci polymerních těsnění cel a nelze tedy u testu s gama zářením zaručit plně anaerobní podmínky po celou dobu experimentu. Na obou materiálech vedla

přítomnost produktů radiolýzy k výraznému několikanásobnému urychlení korozního napadení (Obr. 13 a Obr. 14).



Obr. 13 – Výsledky expozičních testů uhlíkové oceli ČSN 422707.9 v prostředí SBPOW s gama zářením  $0,5 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$

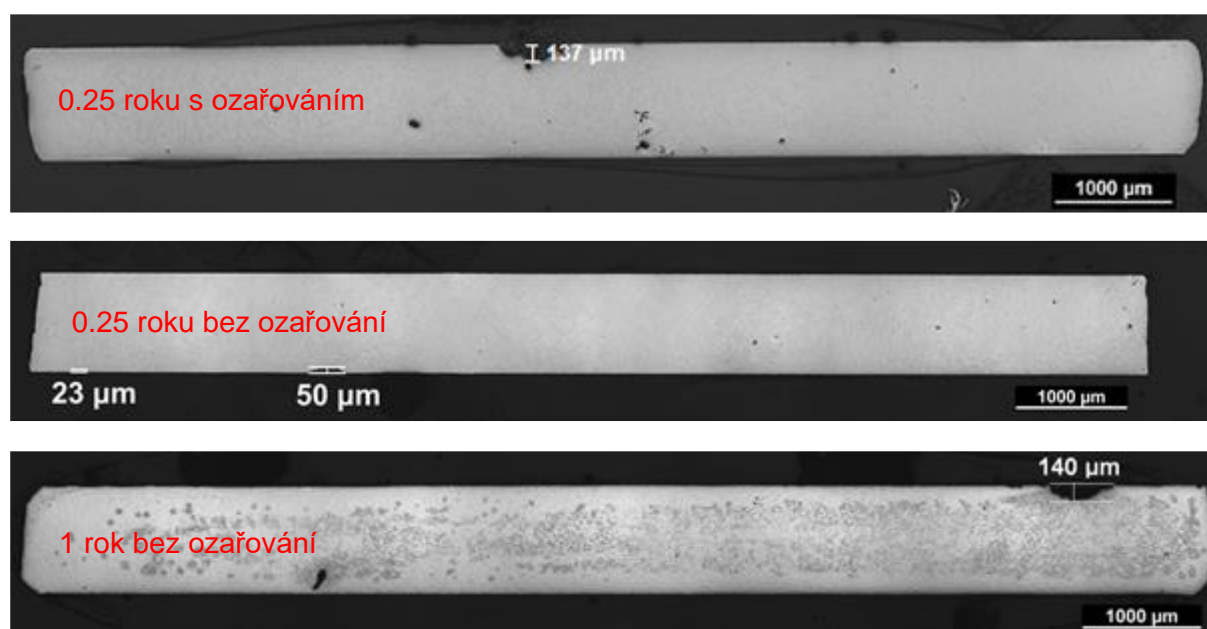


Obr. 14 – Výsledky expozičních testů mědi Cu-OF v prostředí SBPOW s gama zářením  $0,5 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$

Zvýšení korozní rychlosti s gama zářením v prostředí roztoků publikovali i jiní autoři na mědi (Bjorkbacka 2013, 2015, 2016) i uhlíkové oceli (Marsh a Taylor, 1988, Smart a Rance, 2005) nicméně všechny týmy pracovali s výrazně vyššími dávkovými příkony. Naopak francouzský tým (Fenart, 2020) nepozoroval na uhlíkové oceli vliv gama záření s dávkovým příkonem do  $20 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ . U mědi bylo nicméně prokázáno, že tloušťka vznikajícího oxidu je přímo úměrná celkové absorbované dávce, a přitom je nezávislá na použitém dávkovém příkonu (Soroka a Jonsson, 2020).

Na mědi nebyla pozorována po experimentu žádná lokalizace rovnoměrného napadení. Na uhlíkové oceli lokalizace pozorována byla (Obr. 15). Stejně intenzity lokalizace je dosaženo na povrchu uhlíkové oceli za 0,25 roku na ozařovaném vzorku, jako za 1 rok na vzorku srovnávacím.

Je nutné však znovu zdůraznit, že se jedná o experimenty v pórovém roztoku, ve kterém na rozdíl od kompaktovaného bentonitu není omezení transportu produktů radiolýzy k povrchu ani rozpuštěných kationtů železa od povrchu.



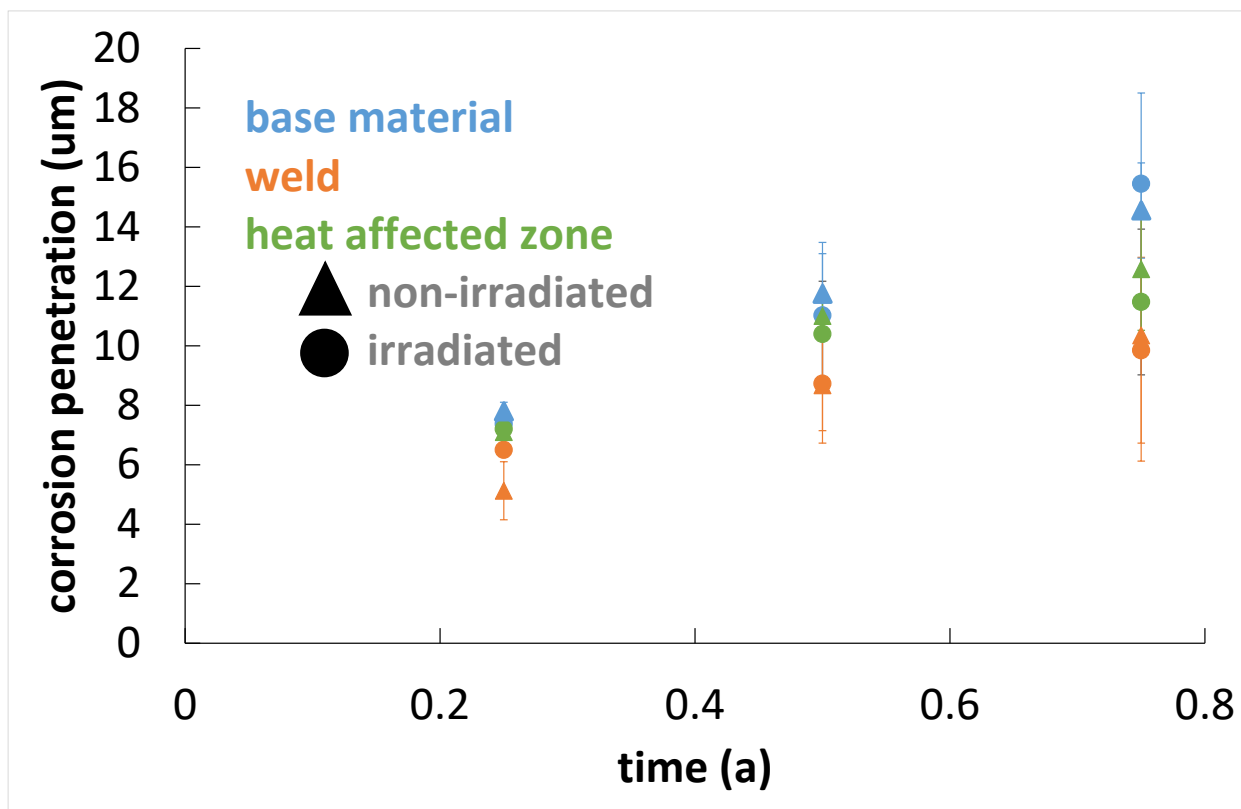
Obr. 15 – Metalografické výbrusy po expozičních testech uhlíkové oceli ČSN 42 2707.9 v prostředí SBPOW s gama zářením  $0,5 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$

Tab. 9 – Specifikace parametrů experimentů v prostředí kopaktovaného bentonitu a bentonitové suspenze s gama zářením

Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřicí techniky
<b>Experiment B.</b> bentonit BaM (kompaktizace 1600 kg.m <sup>-3</sup> ) sycení pomocí SGW pod tlakem 5 MPa argonu dávkový příkon 0,5 Gy.h <sup>-1</sup>	uhlíková ocel S355J2H+N	90 °C	ANO (Ar)	0,25; 0,5 a 0,75 roku	gravimetrie metalografie XRD
<b>Experiment C.</b> suspenze bentonitu BaM + umělé korozní produkty (magnetit+siderit) + SBPOW (3:1:4) dávkový příkon 0,5 Gy.h <sup>-1</sup>	korozivzdorná ocel EN 1.4404	60 °C	ANO (Ar)	0,25; 0,5 a 0,75 roku	gravimetrie metalografie

V další fázi již byly ověřovány finální materiály pro konstrukci českého UOS v reálnějším prostředí kopaktovaného bentonitu a bentonitové suspenze s gama zářením. Opět byly testovány i svary obou materiálů. (Protože v čase startu tohoto experimentu již byly známy výsledky časově předchozích experimentů uvedených v kap. 2.1.6, byla teplota experimentu pro korozivzdornou ocel snížena na 60 °C. Pro uhlíkovou ocel zůstala kvůli porovnatelnosti na teplotě 90 °C, jako v Experimentu A. této kapitoly.)

U korozivzdorné oceli nebylo možné stanovit hmotnostní úbytky a na povrchu nebyla pozorována bodová koroze. Podmínky: anaerobní kopaktovaný bentonit, 60 °C a gama záření do 0,5 Gy.h<sup>-1</sup>, jsou evidentně přijatelné pro dlouhodobou stabilitu a pomalou korozi v pasivním stavu.

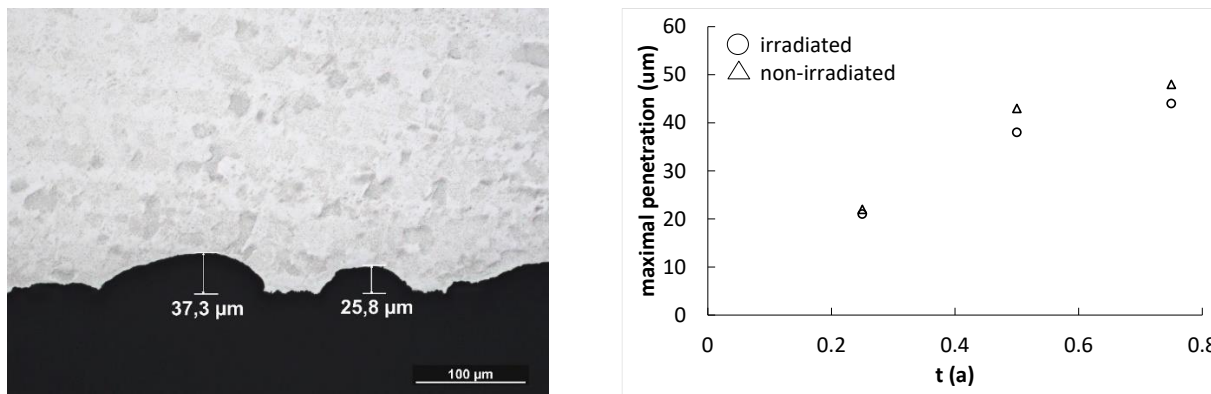


Obr. 16 – Souhrnné výsledky expozičních testů uhlíkové oceli S355J2H+N v prostředí kompaktovaného bentonitu BaM ( $1600 \text{ kg.m}^{-3}$ ) s gama zářením  $0,5 \text{ Gy.h}^{-1}$

Souhrn výsledků pro uhlíkovou ocel je uveden na Obr. 16. Podobně jako u experimentů v kap. 2.1.2 se choval trochu hůře základní materiál v porovnání s tepelně ovlivněnou zónou a svarovým kovem. Vliv radiolýzy se v kompaktovaném bentonitu v pozorovaném čase výrazněji neprojevil. Pomalejší transport specií v bentonitu oproti roztoku omezuje i vývoj lokalizace rovnoměrného napadení. Jak je patrné z Obr. 17 jsou maximální penetrace mírně vyšší u vzorků neozařovaných.

Jako hlavní korozní produkty byly identifikovány pomocí XRD siderit a chukanovit. Absence korozních produktů ve vyšším oxidačním stavu svědčí pro omezený přístup produktů radiolýzy k povrchu kovu skrze kompaktovaný bentonit.





Obr. 17 – Výsledky expozičních testů uhlíkové oceli S355J2H+N (ozářený vzorek po 0,5 roce) v prostředí SBPOW s gama zářením  $0,5 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$

## 2.1.4 Galvanická koroze

V této části práce byl ověřován vliv galvanického článku mezi konstrukčními materiály kontejneru na korozní děje. Cílem bylo stanovit zvýšení korozní rychlosti anodického materiálu a změnit probíhající proudové hustoty v galvanickém článku pro katodické materiály podléhající navodíkování.

Tab. 10 – Specifikace parametrů experimentů galvanické koroze v prostředí syntetické pórové bentonitové vody a v prostředí kompakovaného bentonitu

Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřící techniky
<b>Experiment A.</b> SBPOW	uhlíková ocel ČSN 422707.9	$T_{\text{LAB}}$ , 40; a 70 °C	ANO (N <sub>2</sub> )	1 a 4 h	potenciodynamické křivky; zero resistance ammetry (ZRA)
	korozivzdorná ocel EN 1.4462 Cu-OF				
<b>Experiment B.</b> bentonit BaM (kompaktizace 1600 kg.m <sup>-3</sup> ) přírozené sycení destilovanou vodou	Ti-Pd			106 dní	konduktometrie

Výsledky této části práce byly publikovány.

Stoulil, J.; Kouřil, M.; Pavlova, L.; Dobrev, D.; Gondolli, J., 1D simulation of canister galvanic corrosion in saturated compacted bentonite. *Materials and Corrosion* 2018, 69 (9), 1163-1169. (v angličtině)

Dosah galvanického článku i v kompaktovaném bentonitu může být v řádu jednotek centimetrů. Nicméně vliv na zvýšení korozní rychlosti uhlíkové oceli je malý a dosahuje maximálně 2,2 násobku samovolné korozní rychlosti, a to bez uvažování omezení transportu vznikajících korozních produktů a jejich bariérového efektu.

### 2.1.5 Navodíkování materiálů

Tato část projektu byla zaměřena na ověření možností navodíkování materiálů (dvoufázové korozivzdorné oceli a titanové slitiny), zejména při zapojení v galvanickém článku či absorpcí vodíkových atomů vzniklých radiolýzou pórového roztoku.

Tab. 11 – Specifikace parametrů experimentů navodíkování materiálů v prostředí konaminované syntetické pórové bentonitové vody a v prostředí syntetické pórové bentonitové vody s gama zářením

Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřicí techniky
<b>Experiment A.</b> SBPOW SBPOW kontaminovaná HS <sup>-</sup> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	korozivzdorná ocel EN 1.4462  Ti-Pd	T <sub>LAB</sub> , 40; a 70 °C	NE	1 den až 3 měsíce	galvanostatická polarizace (0.2, 10 a 100 A.m <sup>-2</sup> );  TDS; XRD; mikrotvrdost; SSRT; rázová houževnatost
<b>Experiment B.</b> SBPOW s gama zářením 0,5 Gy.h <sup>-1</sup>	Ti-Pd	T <sub>LAB</sub> a 70 °C	ANO (Ar)	1 rok	TDS

Výsledky této části práce byly publikovány.

Stoulil, J.; Kouřil, M.; Carreno, Y. R.; Dobrev, D.; Gondolli, J.; Nová, K., Hydrogen Embrittlement of Duplex Stainless Steel 2205 and TiPd Alloy in a Synthetic Bentonite Pore Water. Corrosion 2019, 75 (4), 367-376. (v angličtině)

Vodíkové zkřehnutí vede u slitiny Ti-Pd k tvorbě křehkého hydridu (TiH<sub>2</sub>), který ve výsledku způsobí kompletní dezintegraci materiálu. Pokud bychom vzali v úvahu výsledky pozorované japonským týmem (Nakayama, 2004), kdy k dezintegraci nedojde najednou, ale postupně vždy po dosažení tloušťky hydridu cca 10 μm, pak se životnost Ti v českých podmínkách dokonce sníží z řádu 10<sup>4</sup> na 10<sup>2</sup> let. Dále bylo pozorováno, že nízké proudové hustoty mohou vést paradoxně k rychlejší absorpci vodíku. Radiolýza vody při dávkovém příkonu do 0,5 Gy.h<sup>-1</sup> nezpůsobuje navodíkování titanu.

Kinetika navodíkování dvoufázové korozivzdorné oceli je rychlejší než u titanu. A přestože se jedná, na rozdíl od titanu, o vratný děj, hrozí u dvoufázové oceli výrazné snížení lomové práce a rázové houževnatosti. Tento pokles je díky nižší rozpustnosti vodíku výraznější při nižších teplotách.

## 2.1.6 Nerovnoměrné formy koroze korozivzdorných ocelí

Cílem této části projektu bylo ověřit možnost vzniku napadení vnitřního pouzdra z korozivzdorné oceli bodovou/šterbinovou korozí či korozním praskáním a stanovit kritické podmínky, kterým je z hlediska těchto typů korozního napadení nutné se vyhnout.

Tab. 12 – Specifikace parametrů experimentů nerovnoměrné formy koroze korozivzdorných ocelí v prostředí syntetické pórové bentonitové vody se zvyšujícím se obsahem chloridů, v prostředí syntetické pórové bentonitové vody se zvýšeným obsahem chloridů a v prostředí suspenze bentonitu a syntetické pórové bentonitové vody s přidavkem práškového Fe

Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřicí techniky
<b>Experiment A.</b> SBPOW se zvyšujícím se obsahem chloridů	EN 1.4404 (AISI 316L) EN 1.4462 (2205)	90 °C	ANO (N <sub>2</sub> ) / NE	až 3 h	potenciostatická metoda
<b>Experiment B.</b> SBPOW se zvýšeným obsahem chloridů		90 °C	ANO (N <sub>2</sub> ) / NE	až 5 dní	SSRT
<b>Experiment C.</b> suspenze bentonitu BaM a SBPOW (hmotnostní poměr 1:1) + přidavek práškového Fe		40; 50; 60; 70 a 90 °C	ANO (N <sub>2</sub> )	4 až 9 m	gravimetrie metalografie U-bend

Výsledky této části práce byly publikovány.

Stoulil J.; Pavlova, L.; Kouřil, M., Localised corrosion of stainless steels 316L and 2205 in synthetic bentonite pore water and bentonite slurry. *Acta Metallurgica Slovaca* 2019, 25 (1), 24-32. (v angličtině)

Oba typy korozivzdorné oceli nepodléhají bodové korozi v prostředí pórového roztoku až do teploty 90 °C. V prostředí bentonitové suspenze byla bodová koroze detekována za teploty 90 °C. Při teplotě 70 °C byly oba materiály v suspenzi bez napadení bodovou korozí. Korozní praskání nebylo prokázáno ani v extrémních podmínkách 90 °C, 100-násobném zakoncentrování chloridových aniontů (v roztoku SBPOW) a tepelném toku 11,6 kW.m<sup>-2</sup> (100-násobně vyšší v porovnání s maximálním tepelným tokem skrz stěnu kontejneru) s dynamickým průtahem metodou SSRT.

## 2.1.7 Vliv tepelného toku na rovnoměrnou korozi materiálů

Cílem práce bylo ověření vlivu tepelného toku na korozní děje v pórovém roztoku i bentonitové suspenzi.

Tab. 13 – Specifikace parametrů experimentu vlivu tepelného toku na rovnoměrnou korozi materiálů

Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřicí techniky
SBPOW suspenze bentonitu BaM a SBPOW (hmotnostní poměr 1:1)	uhlíková ocel ČSN 422707.9 EN 1.4404 (AISI 316L) EN 1.4462 (2205) Cu-OF TiPd	40 a 70 °C	ANO (N <sub>2</sub> )	4 h	EIS

Výsledky této části práce byly publikovány.

Stoužil, J.; Carreno, Y. R.; Pavlova, L.; Kouřil, M.; Dobrev, D., Influence of heat transfer on corrosion behaviour of materials for radioactive waste canisters in synthetic bentonite pore water and bentonite suspension. *Koroze a ochrana materialu* 2016, 60 (5), 139-143. (v češtině)

Tepelné toky v rozmezí 1,4 až 6,9 kW.m<sup>-2</sup> neprokázaly žádný vliv na anodické chování všech materiálů, ani korodujících v aktivitě (uhlíková ocel, měď), ani korodujících v pasivitě (titanová slitina, korozivzdorné oceli).

## 2.1.8 Rovnoměrná koroze korozivzdorné oceli

Tab. 14 – Specifikace parametrů experimentů rovnoměrné koroze korozivzdorné oceli v prostředí suspenze bentonitu BaM a syntetické pórové bentonitové vody a v prostředí syntetické pórové bentonitové vody

Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřicí techniky
<b>Experiment A.</b> SBPOW suspenze bentonitu BaM a SBPOW (hmotnostní poměr 1:1)	EN 1.4404 (AISI 316L)	25; 30; 40; 50; 60 a 70 °C	ANO (N <sub>2</sub> )	až 30 d	potenciostatická metoda (+0.3 V/E <sub>oc</sub> )

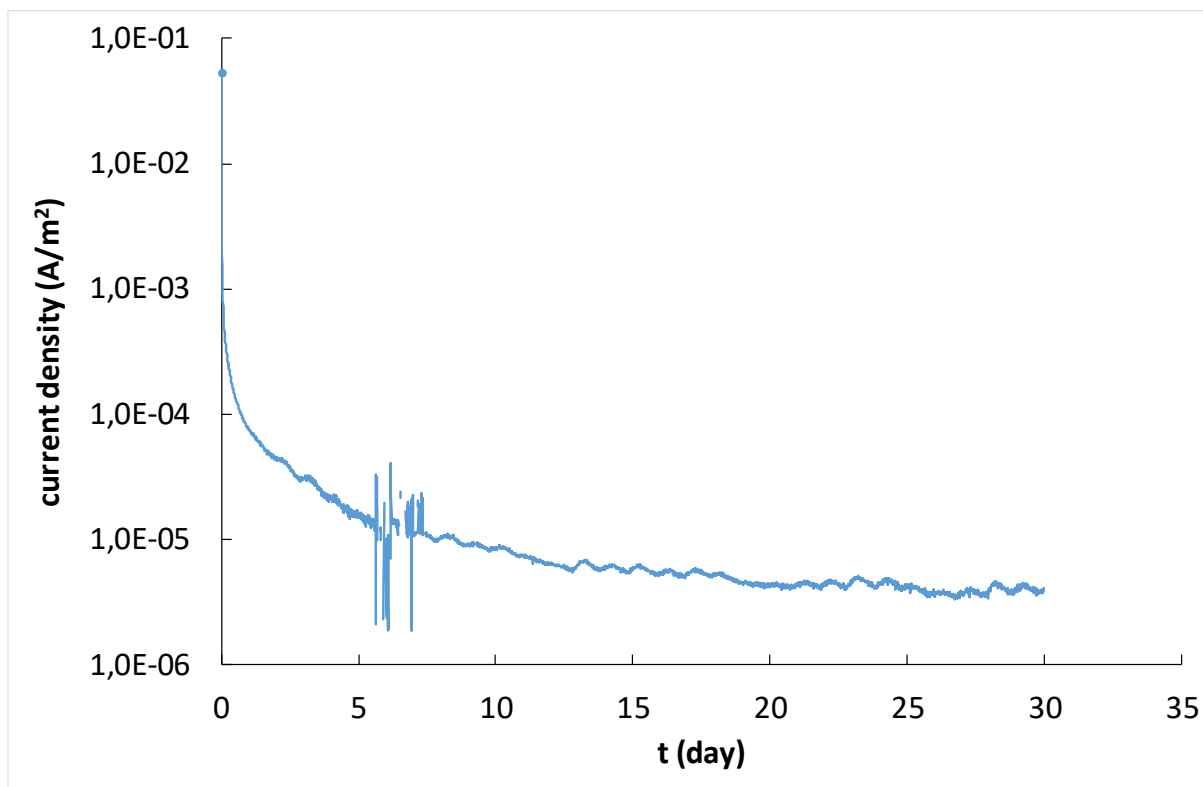
Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřicí techniky
Experiment B. SBPOW		T <sub>LAB</sub> a 70 °C	NE	30 a 120 d	ICP-MS

Z důvodu nízké korozní rychlosti korozivzdorné oceli v pórovém roztoku bentonitu je velmi obtížné její stanovení standardní gravimetrickou metodou. V přechozích experimentech (kap. 2.1.2, 2.1.3 a 2.1.6) bylo gravimetrické stanovení rovnoměrné korozní rychlosti ve stabilním pasivním stavu úspěšné pouze v kap. 2.1.3., zatímco neúspěšné v kap. 2.1.2 a 2.1.6. Gravimetrická metoda navíc neumožňuje plně kontinuální záznam korozní rychlosti, který je v případě korozivzdorné oceli klíčový pro extrapolaci a predikce životnosti. Byla proto využita alternativní elektrochemická potenciostatická metoda. Jako doplňkový ověřující experiment byla použita expoziční zkouška v pórovém roztoku s následnou citlivou analýzou rozpuštěných kationtů Fe a Cr metodou hmotnostní spektroskopie v indukčně vázaném plazmatu (ICP-MS). Tato doplňující zkouška byla provedena ve zjednodušeném uspořádání v uzavřených plastových zkumavkách. Přestože byly zkumavky plněny v anaerobním boxu pod dusíkovou atmosférou, při další expozici probíhala již na vzduchu a prostředí uvnitř zkumavek tak nelze označit jako plně anaerobní.

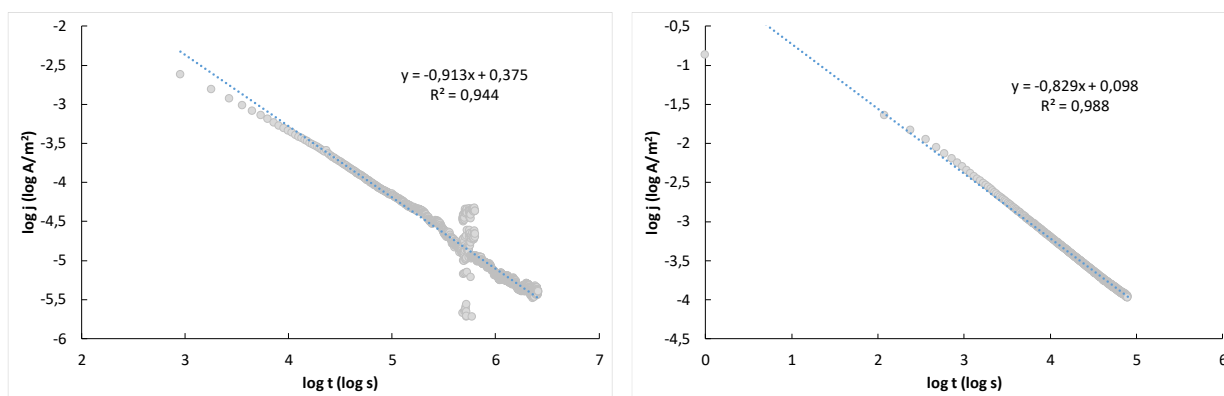
Křivky elektrochemické potenciostatické metody mají standardně hyperbolický tvar, jak je uveden příklad nejdelší 30denní expozice na Obr. 18. Analýzy rentgenové spektroskopie fotoelektronů (XPS) prokázaly, že z materiálu se rozpouští méně termodynamicky stabilní Fe a povrch i oxidická pasivní vrstva se obohacuje o Cr, což zvyšuje stabilitu pasivní vrstvy. Rychlost rozpouštění kovu pak není ovlivněna aktivačním řízením, ale je řízena chemickým rozpouštěním pasivní vrstvy na bázi Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> do roztoku. Po 30 dnech určitě není dosaženo rovnováhy a ustálení korozní rychlosti, ale spíše narážíme na citlivost metody, kdy je přirozený rozptyl signálu měření srovnatelný s chybou přístroje (pohybujeme se v proudech na úrovni nA).

Hyperbolická závislost se dá převést v bilogarithmických souřadnicích na lineární závislost a vyhodnotit směrnici poklesu proudové hustoty s časem, tedy kinetiku dosažení ustáleného stavu. Ukázky vyhodnocení směrnic jsou uvedeny na Obr. 19. Souhrnný graf všech směrnic 22 h experimentů je uveden na Obr. 20. Kinetika selektivního rozpouštění železa z oceli a dosažení stabilní pasivní vrstvy není při potenciostatické polarizaci ovlivněna významně teplotou. Pokud existuje nějaká lehká závislost, pak je schována v přirozeném rozptylu výsledků.

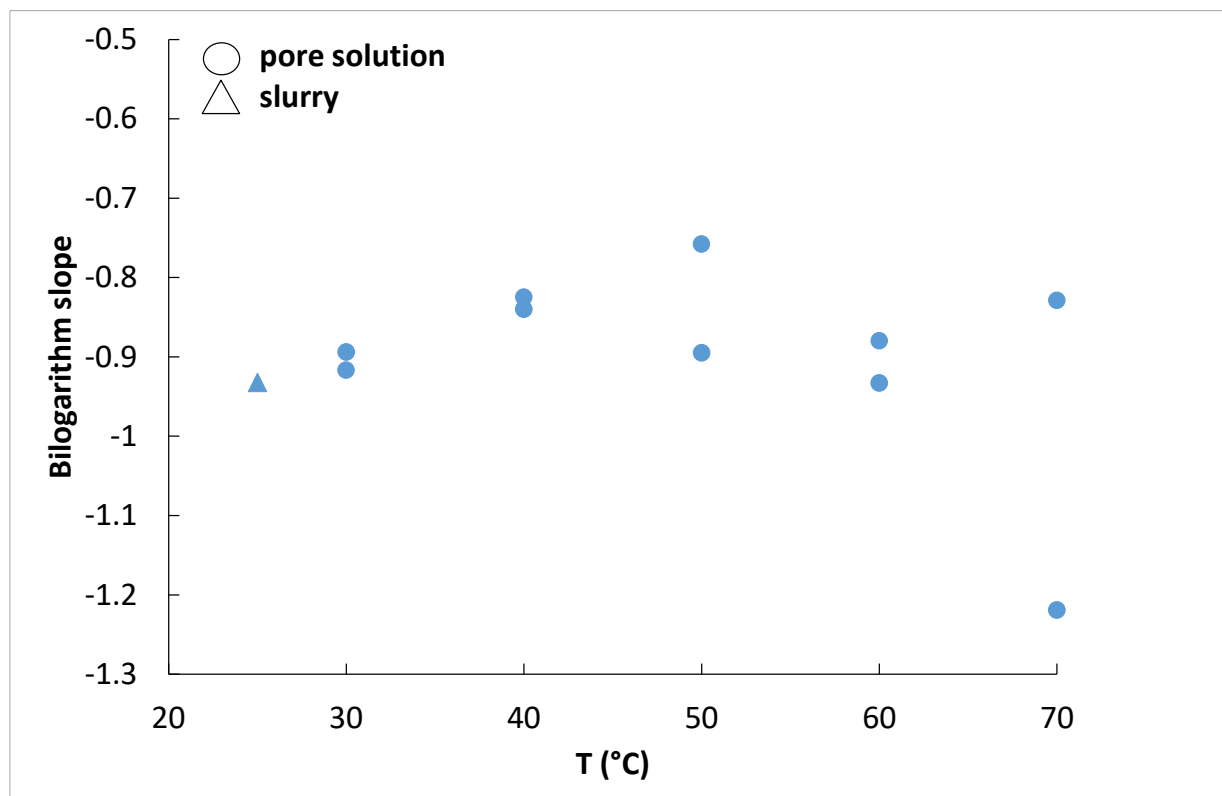
I konečné hodnoty proudových hustot na konci experimentu, souhrnně uvedené na Obr. 21, nevykazují výraznou závislost na teplotě. Proudové hustoty se pohybují v rozmezí 2 řádů. Samozřejmě 22h experimenty jsou dále od své ustálené hodnoty korozní rychlosti než experimenty 30denní. Ty také nejsou na definitivní ustálené hodnotě, ale je to maximum, které jsme schopni přístrojově dosáhnout. Průměrné hodnoty proudové hustoty (v obrázku jako oranžové body) dopovídají korozní rychlosti 3,8 nm.a<sup>-1</sup> (která byla dále použita pro modely životnosti ukládacích obalových souborů v následující kap. 3). Jedná se o srovnatelnou hodnotu k pravděpodobně nejpřesněji stanovené hodnotě japonským týmem (Sakuragi a spol., 2016) pomocí objemové metody uvolněného vodíku. Ti stanovili při 35 °C počáteční hodnotu korozní rychlosti na 20 nm.a<sup>-1</sup> a 0,4 nm.a<sup>-1</sup> v ustáleném stavu.



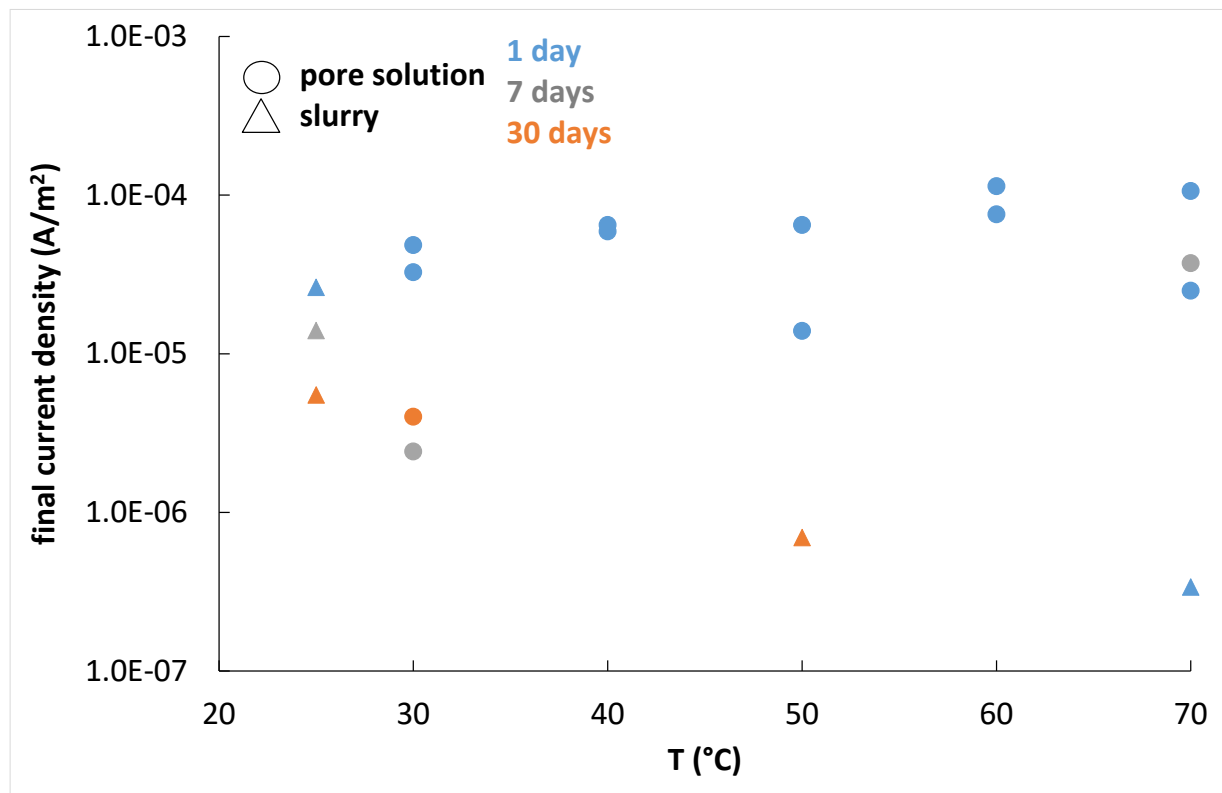
Obr. 18 – Záznam potenciostatického měření v SBPOW při 30 °C po dobu 30 dní.



Obr. 19 – Příklady záznamu testu v bilogarithmických souřadnicích; expozice v SBPOW při 30 °C/30 dní (vlevo), při 70 °C/22 h (vpravo)



Obr. 20 – Hodnoty lineárních směrnic stanovených v bilogarithmických souřadnicích na vzorcích polarizovaných shodně 22 h



Obr. 21 – Hodnoty konečných hodnot proudové hustoty na konci testu v SBPOW (s různou dobou trvání testu)

Paralelní expoziční experiment byl jen ověřovací, kolik se reálně rozpustí klíčových prvků (Fe a Cr) bez polarizace vzorku na vyšší potenciály. Z křivky 30denního elektrochemického měření na Obr. 18 vidíme, že materiál se rozpouští velmi rychle hlavně na počátku expozice. Pokud křivku zintegrujeme a přepočteme na malý objem elektrolytu použitý pro expoziční zkoušku (5 ml), dostáváme přibližný obsah rozpuštěných iontů oceli na úrovni  $10\,704\ \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ , které by pro rovnoměrné rozpouštění legur mělo kopírovat složení oceli, a obsahy klíčových prvků by měly být  $7\,279\ \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$  Fe a  $1\,927\ \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$  Cr.

Výsledky analýz vzorků po expozici bez polarizace jsou uvedeny v Tab. 15. Z výsledků je patrné, že železo se skutečně selektivně rozpouští přednostně, kdežto Cr zůstává v pasivní vrstvě a rozpouští se minoritně. Ovšem i železo se samovolně rozpouští méně (max.  $363\ \mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ ), ve srovnání s elektrochemicky polarizovaným vzorkem. Polarizace vzorku urychluje rozpouštění pasivní vrstvy, přestože metodou XPS bylo prokázáno, že neovlivňuje ani složení, ani tloušťku pasivní vrstvy. Rozdílem u potenciostatické metody je i výrazně větší objem elektrolytu (200 ml), který je nutné nasytit ve srovnání s objemem elektrolytu pro expoziční zkoušku (5 ml). Velký rozptyl výsledků ukazuje na značný vliv počáteční kvality povrchu vzorku. Stejně jako potenciostatické testy i analýzy po expozici ukazují zanedbatelný vliv teploty na kinetiku rozpouštění, kdy možný nárůst v čase je rovněž schován v rozptylu daném počáteční kvalitou povrchu. A stejně tak vliv času, který je rovněž neprokazatelný a potvrzuje, že nejrychleji se materiál rozpouští na počátku expozice, pak se rozpouštění výrazně zpomaluje.

Tab. 15 – ICP-MS analýza Cr a Fe po expoziční zkoušce

T (°C)	Expozice (den)	Vzorek č.	Cr ( $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ )	Fe ( $\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ )
25	30	1	9,2	363,2
		2	3,8	348,5
	120	1	4,0	202,0
		2	3,9	344,8
70	30	1	7,8	250,1
		2	porušení cely a odpar roztoku	
	120	1	4,0	154,0
		2	6,6	320,3

## 2.2 Výsledky doplňujících projektů

V této kapitole jsou shrnuty výsledky dosažené v rámci dalších externích projektů zabývajících se touto problematikou, které mají přímý vztah k vyhodnocovaným výsledkům a měly vliv na rozhodování o konceptu UOS.



## 2.2.1 Material Corrosion Test (MaCoTe)

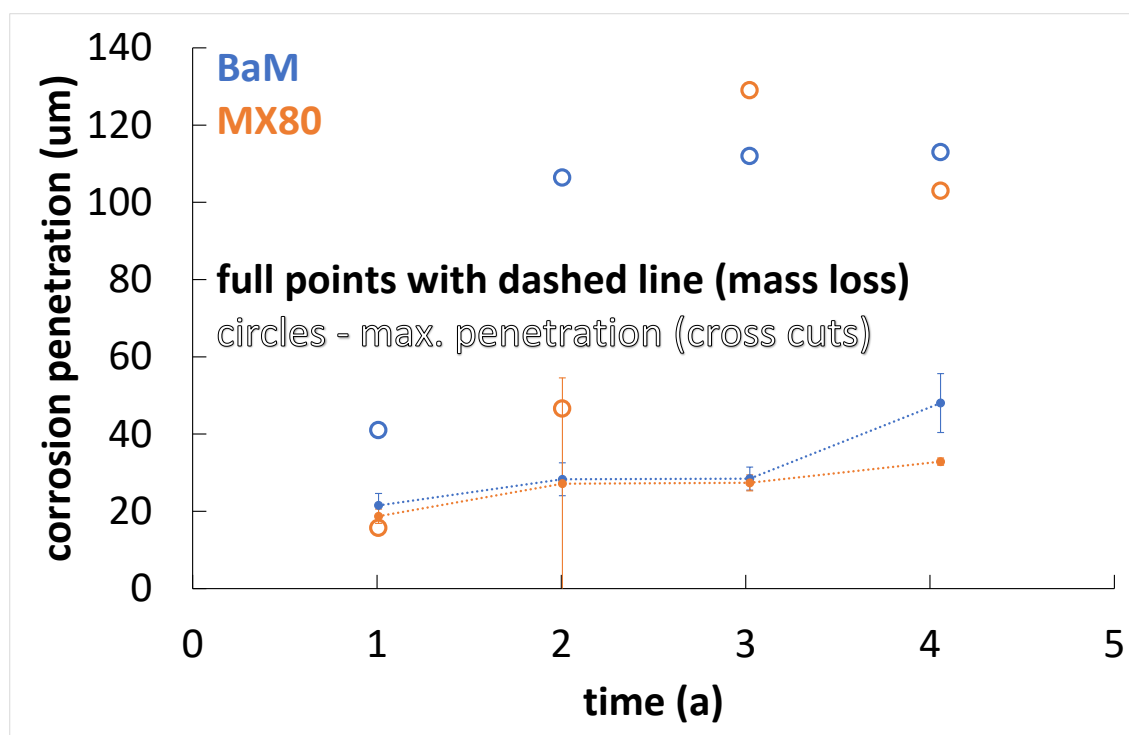
Tab. 16 – Parametry experimentu MaCoTe

Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřicí techniky
bentonit BaM a MX80 (kompaktizace 1500 kg.m <sup>-3</sup> )	uhlíková ocel ČSN 12022  Cu (galvanicky vyloučená)	70 °C	ANO (Ar)	1; 2; 3 a 4 roky	gravimetrie metalografie

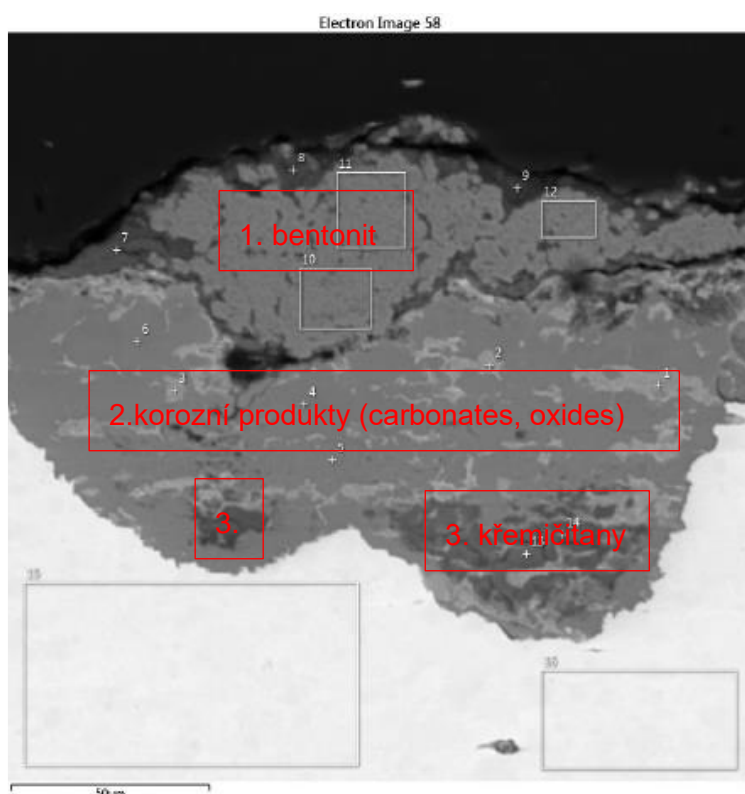
V této kapitole jsou uvedeny dosavadní výsledky mezinárodního projektu Material Corrosion Test (MaCoTe), který probíhá ve švýcarské podzemní laboratoři v Grimsel Test Site.

Dobrev D., Mendoza Miranda A.N., Steinová J., Zuna M. Korozní zkouška v přírodním granitoidním prostředí, Technická zpráva SÚRAO 194/2017 Rev3, 2020. (v češtině)

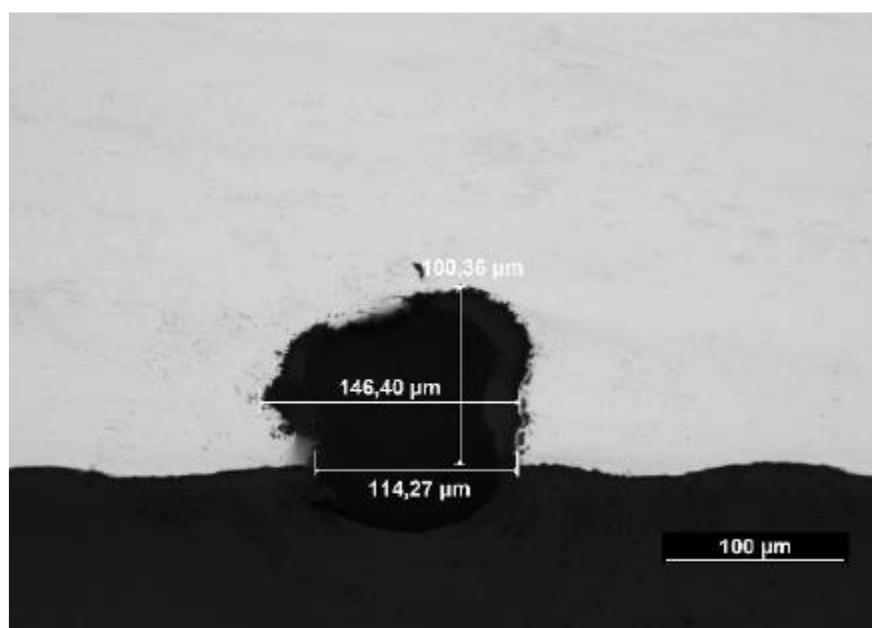
Výsledky experimentů na uhlíkové oceli jsou uvedeny na Obr. 22. Rozdíly mezi oběma použitými bentonitami nejsou velké, co se týče rovnoměrného korozního napadení (hodnoceného hmotnostním úbytkem), ani v případě maximální lokalizace rovnoměrného napadení, které stejně jako v předchozích případech limituje po krátké době ke svému maximu. Jako korozní produkty byly v obou bentonitech identifikovány siderit a chukanovit. I v tomto případě byly v důlcích lokalizovaného rovnoměrného napadení na rozhraní s kovem detekovány křemičitanové částice (pravděpodobně croenstedtit jako při podobném experimentu v kap. 2.1.2), viz Obr. 23.



Obr. 22 – Souhrn výsledků z projektu MaCoTe



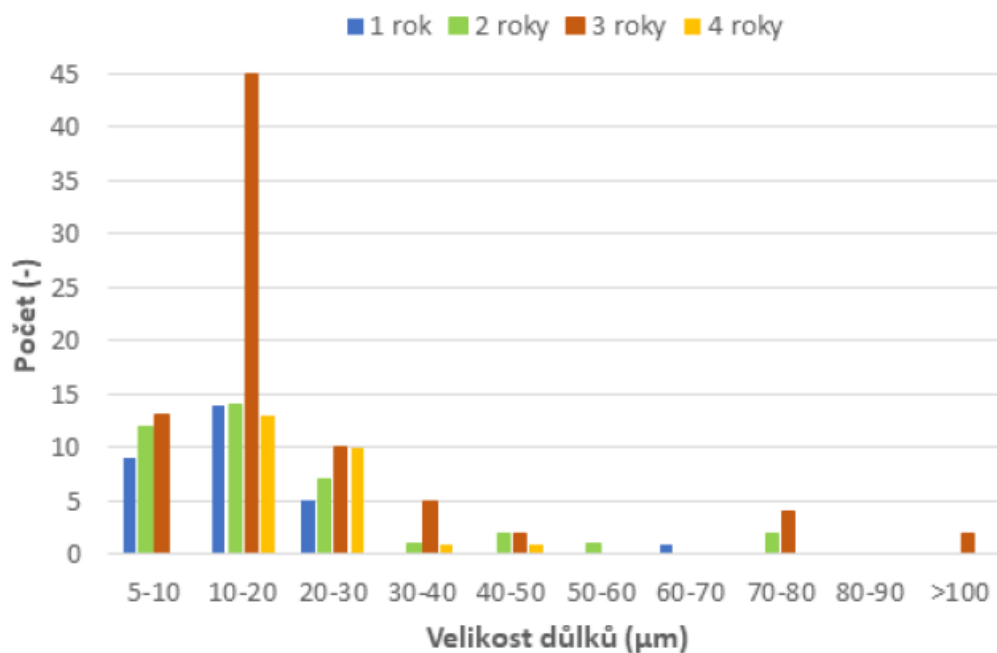
Obr. 23 – SEM/EDS analýza příčného řezu vzorkem uhlíkové oceli po 3-leté expozici v podzemní laboratoři Grimsel



Obr. 24 – Příklad lokalizace korozního napadení na mědi po 2-leté expozici v podzemní laboratoři Grimsel

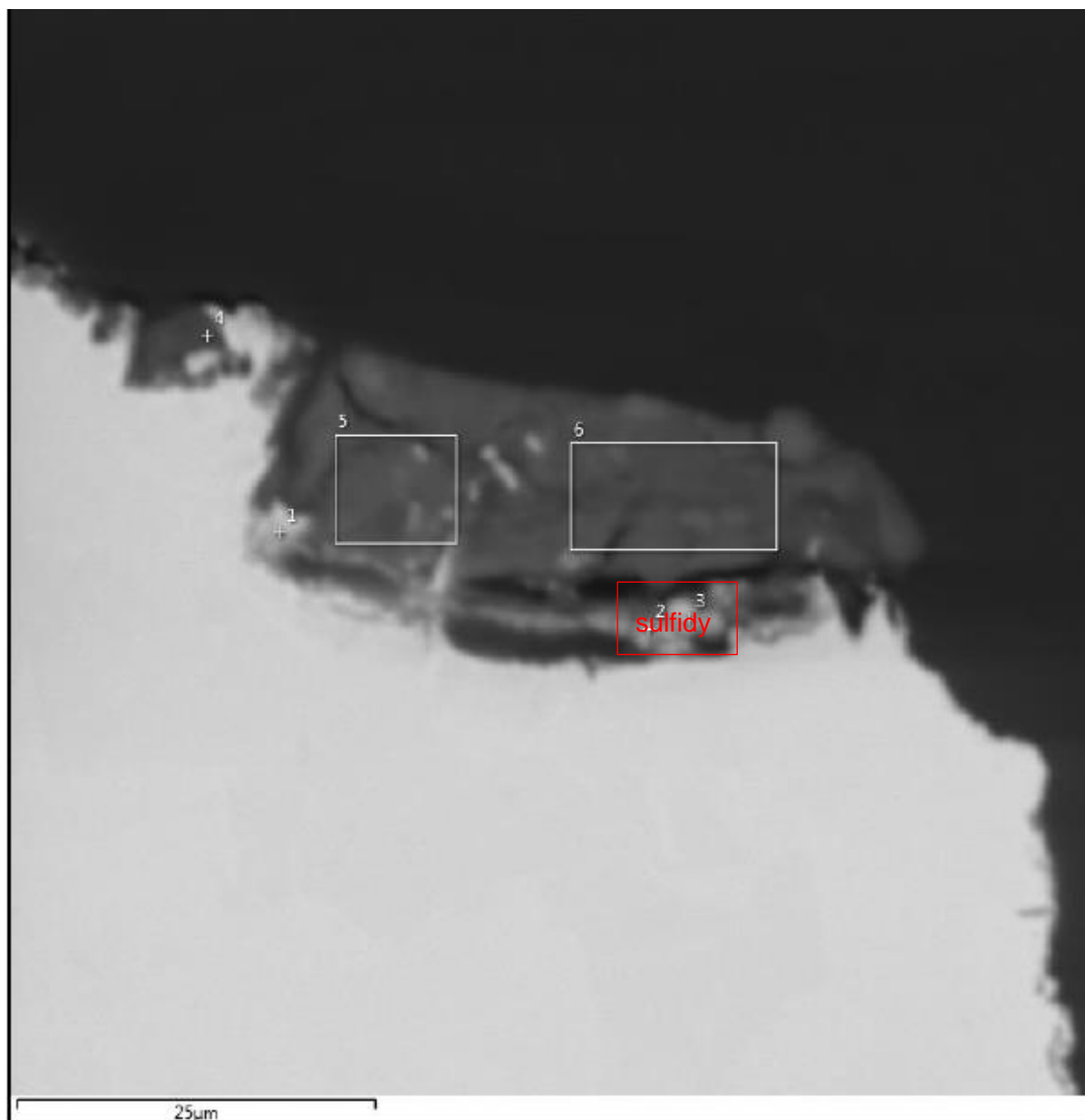
Na mědi opět nebyl korozní úbytek stanovitelný metodou hmotnostního úbytku, stejně jako v předchozím experimentu v kap. 2.1.1. Nicméně, na rozdíl od laboratorních podmínek, v podmínkách podzemní laboratoře bylo pozorováno lokalizované napadení (viz Obr. 24). Souhrn četnosti velikosti důlků (průměry důlků) stanovených pomocí SEM na jednotkovou plochu je

uveden na Obr. 25. Počet důlků v čase roste, ale hloubka důlků je přibližně konstantní (cca 100  $\mu\text{m}$ ) a není pozorována její výrazná závislost na době expozice.



Obr. 25 – Souhrnný histogram velikosti důlků lokalizovaného korozního napadení na mědi po expozici v podzemní laboratoři Grimsel, velikost zde představuje průměr důlků

Hloubka lokalizované koroze nemusí být primárně funkcí času. V důlcích byly identifikovány pomocí metody EDS částice s obsahem síry, ale s absencí kyslíku. S největší pravděpodobností se jedná o sulfidy, konkrétně mackinawit ( $\text{FeS}$ ). Podobné napadení, až do hloubky 57  $\mu\text{m}$  při nižší teplotě do 30  $^{\circ}\text{C}$ , a se stejným výsledkem EDS analýz bylo pozorováno i ve švédském 20-letém experimentu v podzemní laboratoři (Johansson, 2020). Nejpravděpodobnějšími původci tohoto napadení by mohly být identifikované sulfát-redukující bakteriální kmeny. Ve vzorcích byly nejhojněji zastoupeny *Desulfitobacter*, *Desulfofundulus* a *Desulfosporosinus*. Abundance v celkové biomase není vysoká, ale to nevylučuje lokální působení.



Obr. 26 – SEM/EDS analýza důlku korozního napadení na mědi po 4-leté expozici v podzemní laboratoři Grimsel

## 2.2.2 Korozní produkty uhlíkové oceli

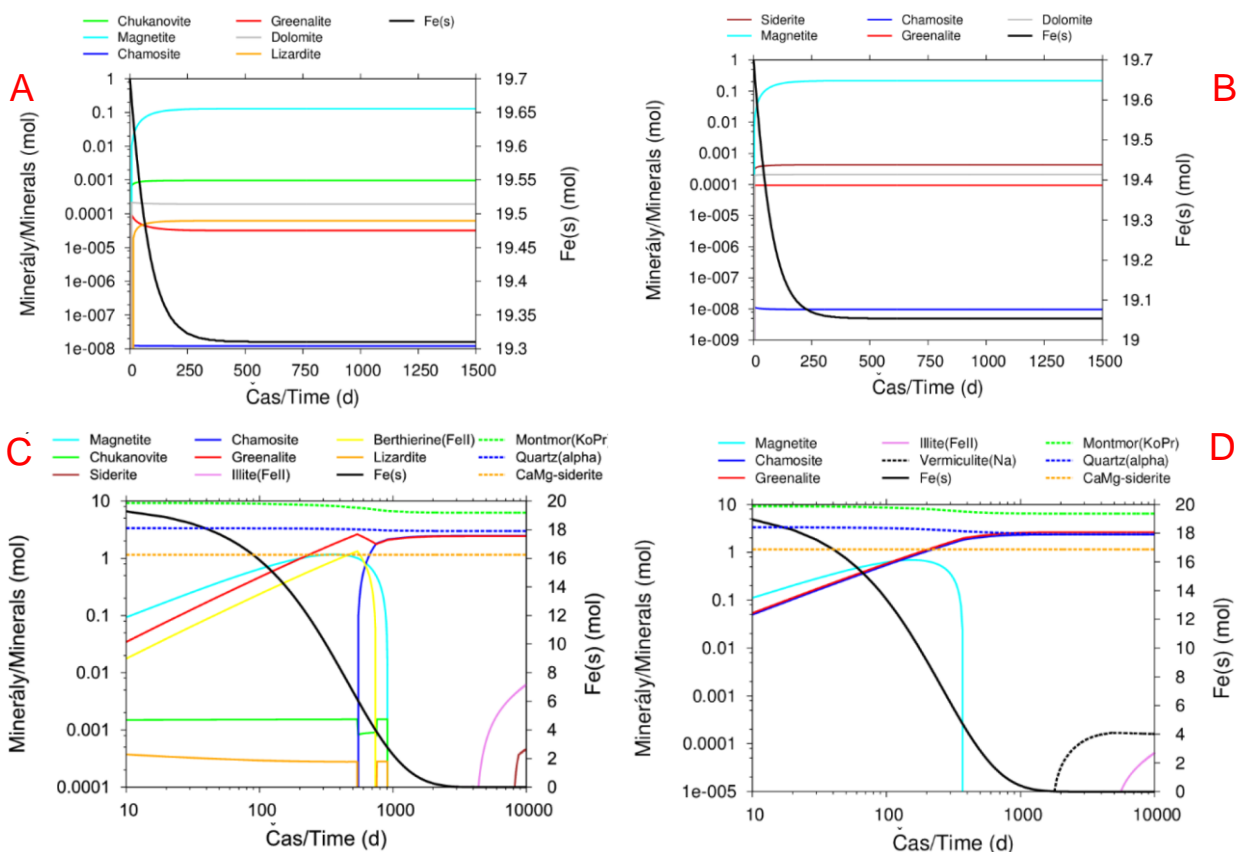
V této kapitole jsou shrnuty výsledky projektu „Chování UOS pro VJP a RAO / Korozní produkty“ (PB-2016-ZL-U0145-025). Cílem projektu bylo stanovení složení korozních produktů vzniklých při krátkodobých experimentech, interakce uvolněných kationtů železa s jílovými minerály, modelování nejstabilnějších fází a predikce pro dlouhodobé uložení kontejneru. Výsledky jsou uvedeny v technické zprávě SÚRAO.

Gondolli J., Dobrev D., Klajmon M., Mendoza A., Černoušek T., Kouřil M., Stoužil J. Corrosion Products – Final Report, SÚRAO Technical Report 329/2018/ENG. (v angličtině)

Tab. 17 – Parametr experimentu Chování UOS pro VJP a RAO / Korozní produkty

Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřicí techniky
bentonit BaM (kompaktizace 1600 kg.m <sup>-3</sup> )	práškové Fe	T <sub>LAB</sub> , 40 a 70 °C	ANO (Ar)	0,5; 1 a 1,5 roku	SEM XRD Raman Moessbauer

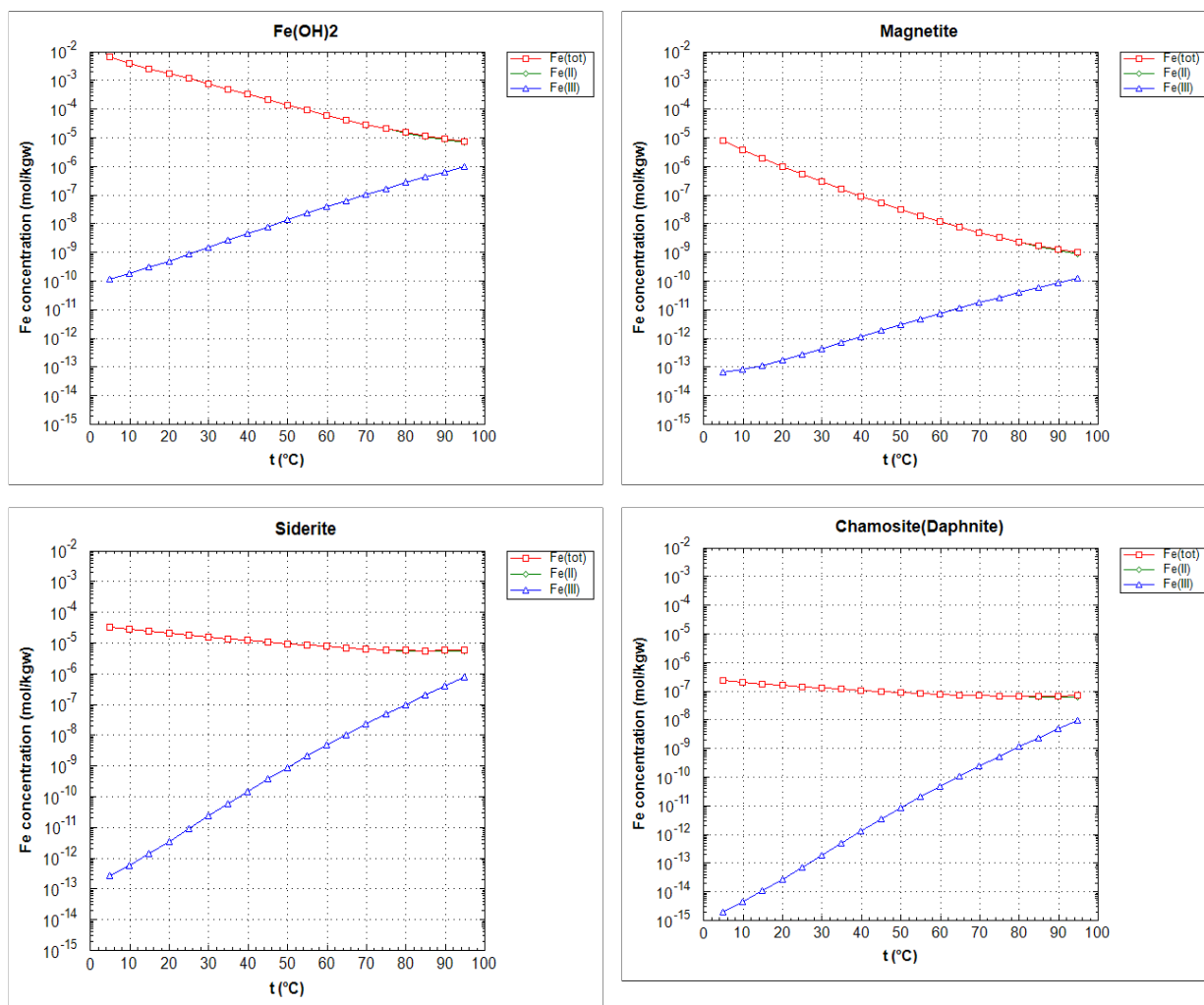
V projektu byly experimentálně stanovovány korozní produkty v kompaktní směsi bentonitu BaM s práškovým železem. Velký povrch homogenně rozmístěného železa umožnil rychlé dosažení rovnovážného stavu a utěsnění pórového systému bentonitu korozními produkty. Jako korozní produkty byly pomocí rentgenové difrakce (XRD) stanoveny chukanovit při laboratorní teplotě (T<sub>LAB</sub>) a 40 °C, zatímco při 70 °C byly korozní produkty tvořeny směsí magnetitu a chukanovitu. Byla rovněž stanovena distribuce velikosti pórů v korozních produktech (401 ± 257 nm) a počet pórů na jeden mezičásticový prostor mezi částicemi bentonitu. Ten se pohyboval od 0 do 10 s průměrem 4,16 póru na jeden mezičásticový prostor.



Obr. 27 – Kinetické výpočty vývoje složení korozních produktů: A) systém Fe/pórový roztok při 25 °C; B) systém Fe/pórový roztok při 70 °C; C) systém Fe/pórový roztok/bentonit při 25 °C; D) systém Fe/pórový roztok/bentonit při 70 °C

Byly rovněž provedeny termodynamické výpočty rovnovážných fází v systému Fe/pórový roztok a Fe/pórový roztok/bentonitové částice v software PHREEQC. Jako nejstabilnější fáze byl stanoven hlinito-křemičitan chamosit ( $\text{Fe}_4\text{MgAl}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ ). To je v souladu s literárními

zdroji, kdy hlinito-křemičitany jsou z termodynamického hlediska nejstabilnější fázi (Wilson, 2015), i když tento autorský kolektiv uvažoval vznik křemičitanových fází se železem jako následek transformace bentonitu reakcí s kationty železa a nikoli tvorbu nově vyprecipitovaných částic z rozpuštěných kationtů i aniontů. Křemičitanové korozní produkty byly pozorovány jako nově vzniklé korozní produkty po 4-leté expozici uhlíkové oceli ve francouzské podzemní laboratoři (Schlegel 2016).



Obr. 28 – Rovnovážné koncentrace rozpuštěných kationtů v pórovém roztoku bentonitu BaM v závislosti na teplotě

Při zahrnutí kinetiky jsou již výsledky komplikovanější. Souhrn lze vidět na Obr. 27. Z modelů pro systém Fe/pórový roztok byl vyloučen  $\text{Fe(OH)}_2$ , který se tvoří velmi rychle, ale je velmi metastabilní a z praktického hlediska nemá význam. Stabilní fázi v tomto systému je pak magnetit a jako další fáze je přítomen na 25 °C chukanovit, zatímco na 70 °C siderit. U systému zahrnující částice (a základní minerály bentonitu) je již situace jiná. Magnetit je již metastabilní fáze, která přechází na křemičitany (croenstedtit, greenalit, berthierin) a později i na hlinito-křemičitan chamosit. Při 70 °C je přechod na greenalit a chamosit paralelní a dochází k ní již po 200 dnech. K pozorování křemičitanu (croenstedtit) docházelo prokazatelně při experimentu v kap. 2.1.2C, kdy byl potvrzen pomocí XRD. V ostatních případech byly křemičitany pozorovány pouze lokálně (kap. 2.1.1 a 2.2.1) pomocí SEM/EDS. Podobné rozložení křemičitanových korozních produktů v důlcích na rozhraní s kovem pozoroval i francouzský tým (Schlegel, 2016). Jako možný

mechanismus vzniku byl navržen pokles pH zapříčiněný hydrolyzou  $\text{Fe}^{3+}$  kationtů spojenou se zbytkovým kyslíkem. Posun pH umožní zvýšení obsahu volného  $\text{CO}_2$ , který je klíčový pro vznik křemičitanových fází na úkor sideritu.

Byly spočteny rovněž rozpustnosti korozních produktů (ukázka na Obr. 28) jako podklad pro transportní modely v kap. 3.2.

### 2.2.3 Mikrobiální koroze

Cílem projektu byla analýza anaerobních mikrobiálních konsorcií v prostředí českého podzemí, ověření kritických podmínek pro proliferaci mikroorganismů a stanovení vlivu mikrobiálních společenstev na korozní děje.

Tab. 18 – Parametry experimentů s mikrobiální korozí pro přírodní podzemní vodu a syntetickou pórovou bentonitovou vodu

Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřicí techniky
<b>Experiment A.</b> natural groundwater VITA	uhlíková ocel ČSN 422707.9	$T_{\text{LAB}}$	ANO (Ar)	240 d	EIS metalografie Raman qPCR
<b>Experiment B.</b> SBPOW + VITA (objemový podíl 9:1)				26 m	gravimetrie metalografie Raman qPCR

Tab. 19 – Parametry experimentů s mikrobiální korozí pro přírodní podzemní vodu a syntetickou pórovou bentonitovou vodu

Prostředí	Materiály	Teploty	Anaerobní	Doba expozice	Měřicí techniky
<b>Experiment C.</b> SBPOW + VITA (objemový podíl 9:1)	uhlíková ocel ČSN 422707.9	$T_{\text{LAB}}$	ANO (Ar)	85 až 120 d	gravimetrie rezistometrie XRD
<b>Experiment D.</b> SBPOW SBPOW bez dusičnanů SBPOW bez dusičnanů a sírany nahrazené $\text{HS}^-$	uhlíková ocel ČSN 422707.9 Cu-OF			4 h	polarizační odpor

V rámci aktivit zaměřených na mikrobiální korozi jsou zde uvedeny výsledky dvou projektů. První je mezinárodní evropský projekt MIND (Microbiology In Nuclear waste Disposal) financovaný ve výzvě Euratom pod č. 661880. Druhým je projekt SÚRAO „Chování ÚOS pro VJP a RAO / Mikrobiální koroze“ (PB-2015-ZL-S1411-020-MIC).

Černoušek T., Kokinda J., Vizelková K., Shresta R., Ševců A. Anaerobic microbial corrosion of canister material, MIND deliverable 2.13, 2019. (v angličtině)

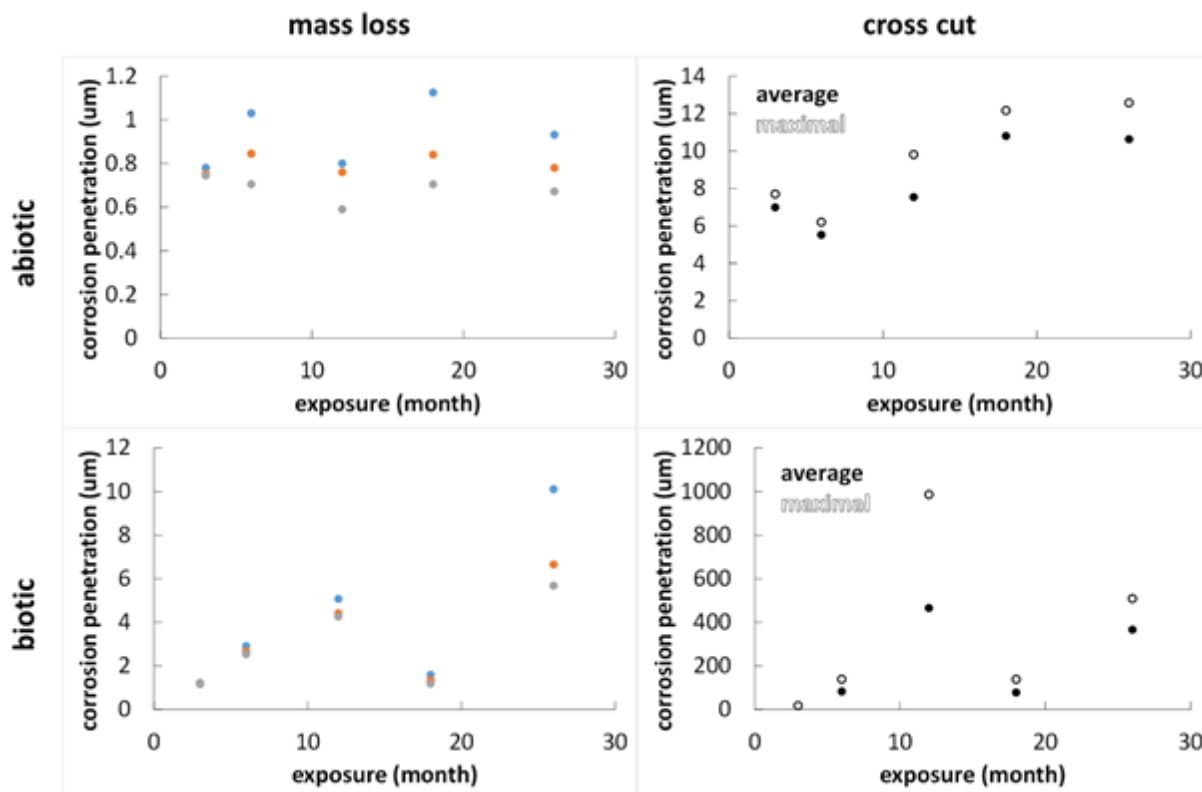
Černík M., Steinová J., Mikeš J., Špaček P., Dobrev D., Černoušek T., Stoužil J. Microbial corrosion under the conditions of a deep geological repository for the concept of steel UOS/compacted bentonite - final report, SÚRAO Technical Report 403/2019, 2019. (v angličtině)

V experimentech A, B a C byla použita voda z podzemní laboratoře Josef, a je označována jako VITA (viz výše zmíněná zpráva Černík a spol. 2019). Jedná se o bohatý zdroj anaerobních mikroorganismů, ve kterém dominují sulfát-redukující bakterie. Pokud je ale smíchána s pórovým roztokem bentonitu nebo přímo bentonitem BaM (testovaná šarže bohatá na dusičnany viz Tab. 3), hlavním typem v konsorciu se stanou denitrifikační bakterie. V rámci tohoto projektu byly rovněž provedeny první testy limitních podmínek pro životaschopnost mikroorganismů. V prostředí pórového roztoku byla jako limitující faktor určena hodnota pH prostředí na úrovni 10. V kompaktovaném bentonitu se ukázala jako prokazatelně inhibiční suchá objemová hmotnost bentonitu  $2000 \text{ kg.m}^{-3}$ . Jako nejodolnější se v kompaktovaném bentonitu ukázaly denitrifikační bakterie typu *Pseudomonas*. Limitujícím faktorem pro proliferaci s kompaktizací bentonitu je pravděpodobně zmenšení pórů kompaktovaného bentonitu a nikoli botnací tlak, protože v prostředí pórového roztoku nebyla ovlivněna proliferace až do maximální hodnoty tlaku (použité v této práci) 7 MPa.

Český CaMg bentonit má horší botnací schopnost oproti sodnému typu MX-80. Přesto při hodnocení životaschopnosti SRB bakterií švédským týmem (Taborowski, 2019) byla hodnota limitní kompaktizace příbuzného českého bentonitu Rokle nižší ( $1670\text{-}1692 \text{ kg.m}^{-3}$ ) v porovnání s MX-80 ( $1750\text{-}1847 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Autoři však uvádějí mnohem vyšší obsahy inhibujících kationtů uvolňovaných do pórového roztoku z českého bentonitu, takže inhibujících koncentrací dosáhne pórový roztok v českém bentonitu již při nižší kompaktizaci. Limit pro životaschopnost SRB v bentonitu MX-80 publikoval i švýcarský tým (Smart, 2017) na úrovni kompaktizace  $1250\text{-}1450 \text{ kg.m}^{-3}$ . Finský tým pozoroval po 18-ti leté expozici v podzemní laboratoři v bentonitu MX-80 bakterie SRB, a dokonce houby, při kompaktizaci  $1500 \text{ kg.m}^{-3}$  (Vikman, 2018).

Inhibiční efekt zvýšeného pH na proliferaci, podobný českým výsledkům, pozoroval finský (Rajala, 2017) i francouzský (Diler, 2020) tým. Zvýšení pH například pomocí směsí s cementem není řešením pro dlouhodobé uložení. Směs bude v prostředí H<sub>2</sub> s vyšším obsahem CO<sub>2</sub> v podzemní atmosféře velmi rychle karbonatovat, a pH se rychle sníží na původní hodnoty pH 8 - 8,5. Dále hrozí při počátečním zvýšení pH zapasivování uhlíkové oceli a iniciace bodové koroze, se vznikem okludovaného roztoku a rychlou penetrací korozního napadení. To je stav, kterému se právě použitím aktivně a rovnoměrně korodujícího vnějšího obalu z uhlíkové oceli snažíme na počátku uložení zabránit.





Obr. 29 – Výsledky expozic uhlíkové oceli ve směsi podzemní vody VITA a SBPOW

Výsledky z experimentů v čisté podzemní vodě VITA, kdy jsou hlavními bakteriemi SRB, jsou shrnuty v následujícím článku. Přítomnost SRB vedla k lokalizaci korozního napadení.

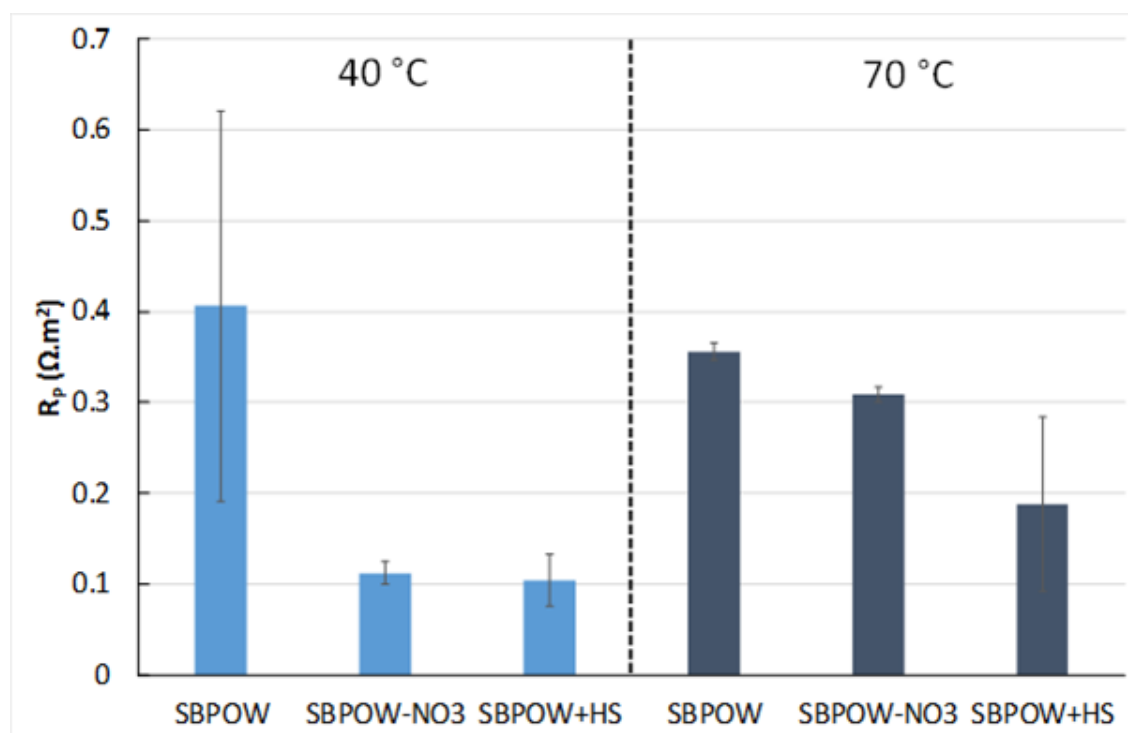
Černoušek, T.; Shrestha, R.; Kovářová, H.; Špánek, R.; Ševců, A.; Sihelská, K.; Kokinda, J.; Stoužil, J.; Steinová, J., Microbially influenced corrosion of carbon steel in the presence of anaerobic sulphate-reducing bacteria. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 2020, 55 (2), 127-137. (v angličtině)

Jak už bylo popsáno výše, v podmínkách českého bentonitu jsou dominantní denitrifikační bakterie. Výsledky ze směsi vody VITA a SBPOW jsou z hlediska českého konceptu velmi významné a v současnosti je ve finálním stádiu příprava publikace. Souhrn nejvýznamnějších výsledků korozního napadení je uveden na Obr. 29.

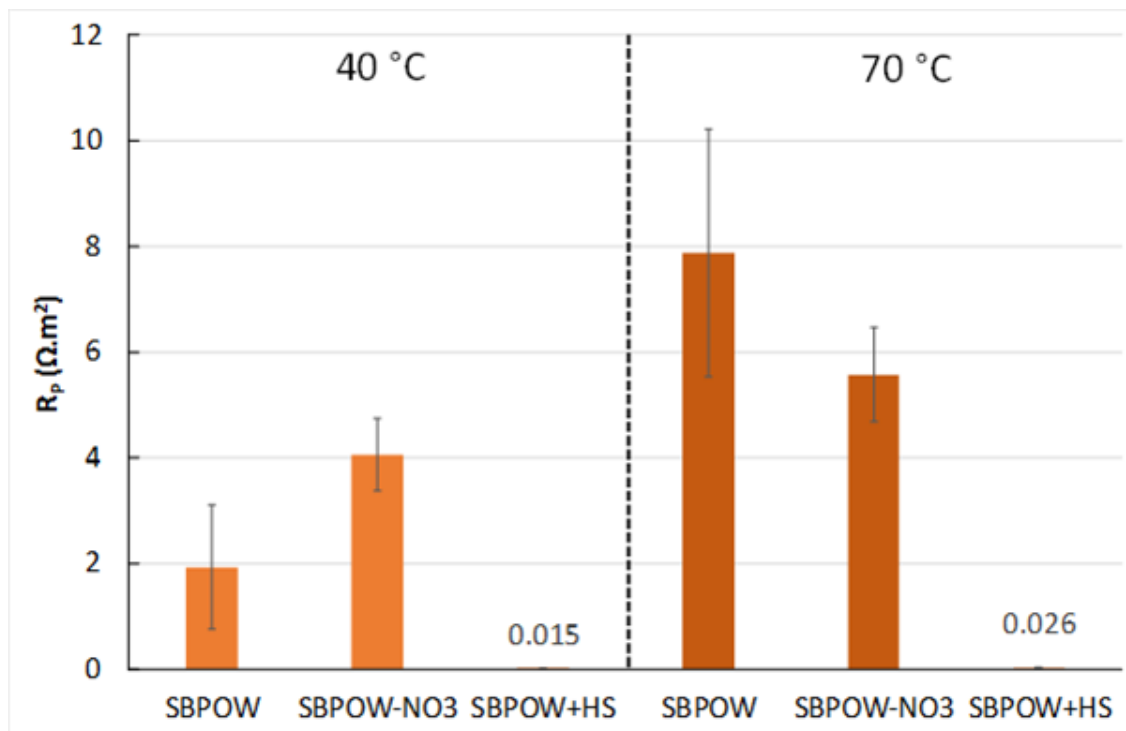
Biotický vzorek má v čase zvyšující se rozdíl rovnoměrné korozní penetrace oproti abiotickému systému až na zhruba desetinásobek po 26 měsících. Zrychlení korozního napadení je dáno v biotickém systému přítomností bakterií. Na Obr. 29C je patrný výkyv po 18 měsících, ve kterém bylo zachyceno kvalitativně jiné mikrobiální společenstvo (konkrétně chyběla bakterie *Methyloversatilis*, naopak oproti ostatním vzorků byl přítomen *Achromobacter*). Ještě výraznější je faktor lokalizace napadení, který je u abiotického vzorku na úrovni 10, ale u biotického vzorku stoupá až na úroveň 200 pro vzorky po 12 měsících. Vyšší penetrace lokálního napadení byla výrazně závislá na obsahu denitrifikačních bakterií typu *Methyloversatilis*, který pravděpodobně ve svém metabolismu využívá jako donor elektronů i kovové železo.

Tyto výsledky jsou všechny z experimentů v pórových roztocích. Z praktického hlediska jsou důležitější experimenty v kompaktním bentonitu, který může výrazně ovlivnit transport a následně korozní kinetiku. Tyto experimenty musí být v budoucnu doplněny.

V rámci experimentů D byl zkoušen vliv SRB na uhlíkovou ocel i měď. Při předchozích experimentech C byla doba expozice příliš krátká, aby denitrifikační bakterie dokázaly kompletně spotřebovat dusičnany v pórovém roztoku, a mohlo tak dojít k rozvoji SRB využívajících méně termodynamicky výhodný akceptor – sírany. Proto byla provedena modelová měření v roztoku, do kterého nebyly v první fázi přidány dusičnany (simulující kompletní zmetabolizování na dusík denitrifikačními bakteriemi) a následně v roztoku bez dusičnanů, ve kterém byly sírany nahrazeny hydrogensulfidy (simulující situaci pod biofilmem SRB, kde by taková kompletní transformace mohla proběhnout). Koncentrace  $\text{HS}^-$  tak odpovídá původní koncentraci síranů  $1.21 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Hodnocení proběhlo pomocí polarizačního odporu ( $R_p$ ). Jak je patrné, je u uhlíkové oceli změna  $R_p$  se změnou prostředí vzhledem k rozptylu zanedbatelná. Naproti tomu u mědi, je pokles  $R_p$  v roztoku s  $\text{HS}^-$  o 2 řády. Přeneseně řečeno se jedná o přibližně 100-násobné zvýšení korozní rychlosti mědi.



Obr. 30 – Výsledky měření polarizačního odporu na uhlíkové oceli v syntetickém pórovém roztoku (SBPOW), ve stejném roztoku bez přídavku dusičnanů (SBPOW-NO3) a SBPOW bez dusičnanů a se sírany zaměněnými za hydrogensulfidy (SBPOW+HS)



Obr. 31 – Výsledky měření polarizačního odporu na mědi v syntetickém pórovém roztoku (SBPOW), ve stejném roztoku bez přídavku dusičnanů (SBPOW-NO3) a SBPOW bez dusičnanů a se sírany zaměněnými za hydrogensulfidy (SBPOW+HS)

Mikrobiální koroze vnáší do predikce životnosti kontejneru nejvýraznější nejistotu, a to jak pro uhlíkovou ocel (denitrifikující a sulfát redukující bakterie), tak pro měď (sulfát redukující bakterie). Korozní rychlost se může vlivem bakterií lokálně zvýšit až o 2 řády. Zatím není známý mechanismus zbrzdění tohoto vlivu omezením transportu v kompaktovaném bentonitu, ten je potřeba ještě experimentálně ověřit.

Pro inhibici působení bakterií na korozi kontejneru je vhodné použít zmenšení pórů bentonitu kompaktizací na vysokou suchou hustotu (až  $2\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Zvyšování pH pórového roztoku bentonitu přídavkem cementu není vhodné, protože vede k lokalizaci korozního napadení.

## 3 Současné závěry

### 3.1 Souhrn výběru materiálu pro český koncept

#### 3.1.1 Výběr materiálů pro koncept na základě korozních vlastností

Navodíkování a tvorba hydridů vyloučily z výběru koncept titanová slitina/uhlíková ocel (kap. 2.1.5). Přestože není v současnosti jisté, jestli by byl ukládací obalový soubor (UOS) při horizontálním ukládání opatřen vnějším košem z uhlíkové oceli (který by mohl s titanovou slitinou tvořit galvanický článek) a bludné proudy doposud měřené v českém podzemí jsou nižší (Bárta 2010) než experimentálně ověřované proudy galvanického článku, jeví se použití titanové slitiny jako příliš riskantní a je zatíženo výraznou nejistotou.

Uhlíková ocel i měď mají velmi podobné nejistoty. Radiolýza zvyšuje korozní rychlost hlavně v prostředí pórového roztoku, kde není omezen transport, ale na uhlíkové oceli bylo ukázáno (kap. 2.1.3), že v kompaktovaném bentonitu nemá při dávkových příkonech do  $0,5 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$  na korozní rychlost v pozorovaném čase vliv. Pro měď byl prokázána švédským týmem (Soroka, 2019) lineární závislost korozní rychlosti mědi na celkové dávce a nezávislá na dávkovém příkonu. Švédský (Lilja 2010) i kanadský tým (Hall, 2021) referují příspěvek radiolýzy jako zanedbatelný oproti mikrobiální korozi.

Lokalizace rovnoměrného napadení byla na uhlíkové oceli v kompaktovaném bentonitu pozorována v rámci tohoto projektu (kap. 2.1.1 a 2.1.3) i španělským týmem (Madina 2002). Na mědi byla lokalizace pozorována v rámci projektu MaCoTe (kap. 2.2.1) i v rámci dlouhodobého švédského experimentu (Johansson 2020). Lokalizace se však v čase jednoznačně snižuje vlivem vyplnění pórového systému bentonitu korozními produkty a omezením transportu.

Lokalizaci rovnoměrného napadení mohou ovlivňovat faktory zmíněné v kap. 1.4.2.1.2. Z tohoto výčtu lze na základě experimentů vyloučit vliv heterogenní saturace bentonitu, vliv zbytkového kyslíku a vliv tepelného toku. Lokalizace byla pozorována i v experimentech s bentonitovou suspenzí, ve kterých byl v anaerobním boxu nejprve odkysličen roztok i bentonit. Míchání probíhalo rovněž uvnitř boxu a suspenze byla vždy dokonale promíchána. Přesto byla lokalizace pozorována i v těchto experimentech (kap. 2.1.2). To vylučuje jednoznačně vliv heterogenní saturace. Vliv zbytkového kyslíku v experimentech s kompaktovaným bentonitem vyloučit nelze, a může ovlivňovat rovnováhu tvorby korozních produktů ve prospěch křemičitanů (viz kap. 2.2.2), ale přítomnost lokalizace i v kompletně anaerobních experimentech se suspenzí vliv kyslíku minimalizuje. Vliv tepelného toku byl vyloučen v kap. 2.1.8 a rovněž faktem, že lokalizace je pozorována v experimentech topených z vnějšku cely (kap. 2.1.1, 2.1.2 a 2.1.3) i zevnitř (2.2.1). Významným a experimentálně potvrzeným faktorem je mikrostruktura materiálu a mikrobiální koroze. Vliv mikrostruktury (obsah katodických karbidických částic a jejich distribuce) byl experimentálně potvrzen u uhlíkové oceli (kap. 2.1.1, 2.1.2 a 2.1.3). Vliv mikrobiální koroze byl potvrzen u uhlíkové oceli (kap. 2.2.3) a je pravděpodobný i u mědi (kap. 2.2.1).

Celková korozní rychlost je určitě vyšší u uhlíkové oceli než u mědi. Vezmeme-li v úvahu lokalizaci napadení, ta je už srovnatelná pro uhlíkovou ocel i měď, přestože v kompaktovaném bentonitu ztrácí lokalizace rychle význam. Srovnáme-li výsledky projektu MaCoTe (2.2.1), je maximální penetrace na kolmém řezu pro uhlíkovou ocel  $\sim 135 \mu\text{m}$  a pro měď  $\sim 100 \mu\text{m}$ . Z tohoto úhlu pohledu jsou oba materiály z konstrukčního hlediska porovnatelné. Z hlediska bezpečnosti

se navíc jeví výhodné, postavit životnost ne na jednom, ale na dvou materiálech. Aktivně korodující materiál, který umožní přijatelnou predikovatelnost životnosti (uhlíková ocel) na počátku uložení a následně korozivzdorná ocel, korodující již ve stabilně pasivním stavu v anaerobních podmínkách a za teplot pod 60 °C.

Použití uhlíkové oceli jako vnějšího obalu oproti mědi má i několik dalších praktických výhod:

- dostupnost materiálu v širokém sortimentu a se širší možnou škálou dodavatelů
- lépe známé technologie zpracování
- cena
- větší množství archeologických analogů, jako jediných skutečně dlouhodobých dat a z nich větší množina použitelná pro destruktivní analýzy
- snazší případný přechod na variantu vysokoteplotního uložení (Lotz 2020)

Porovnání obou typů korozivzdorných ocelí (EN 1.4404 a 1.4462), pro konstrukci vnitřního pouzdra UOS, vyznívá pro austenitickou ocel EN 1.4404. Přestože dvoufázová ocel EN 1.4462 má vyšší obsah Cr a Mo, je pozorovaná náchylnost obou ocelí k bodové korozi v podmínkách HÚ přibližně stejná (kap. 2.1.6). Kvůli náchylnosti dvoufázové oceli k navodíkování, a s tím spojené ztrátě mechanické odolnosti (kap. 2.1.5), se tak jeví austenitická ocel jako výhodnější, protože je vůči navodíkování imunní.

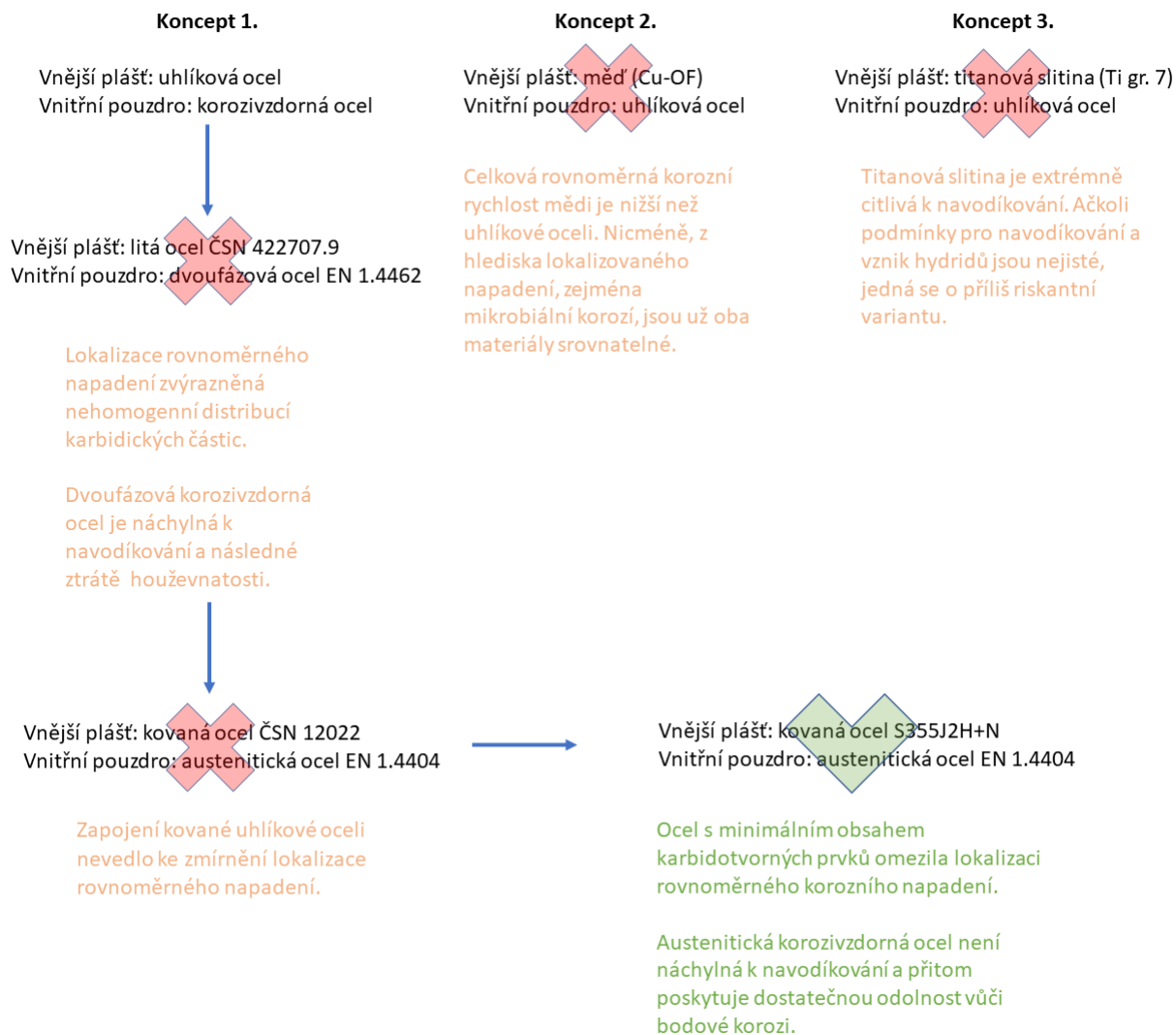
### 3.1.2 Upřesnění nároků na kvalitu uhlíkové oceli

V experimentální části projektu byla nejprve zkoušena ocel ČSN 42 2707.9 pro odlitky. Výroba litím by mohla UOS výrazně zlevnit. Přestože se jedná o relativně čistou ocel s nízkým obsahem legur (viz Tab. 20), technologie lití má za následek výraznou nehomogenitu distribuce karbidických částic ve struktuře oceli. Toto se při experimentech ukázalo, jako jeden z významných faktorů ovlivňujících lokalizaci rovnoměrného napadení oceli. Pro následující experimenty tak byla využívána ocel ČSN 12 022, která je tvářená a její mikrostruktura je mnohem homogennější. Nicméně i tato ocel má vysoký obsah karbidických částic, což se rovněž projevilo při experimentech lokalizací rovnoměrného napadení. Navíc norma neomezuje obsah významných karbidotvorných prvků (Ti, Mo, V), jak je patrné ze složení v Tab. 20. V rámci hledání standardu oceli, který by dostatečně limitoval obsah nebezpečných příměsí, byla vytipována ocel X65MS (dle ISO 3183), jejíž směrné složení je uvedeno v Tab. 20. Tuto třídu oceli však nebylo možné koupit v požadovaném polotovaru pro provozní technologické zkoušky svarů, a proto byl stanoven následující postup. **Pro materiál vnějšího obalu UOS je přijatelný ten, který splní minimální požadavek na hodnotu meze kluzu 350 MPa a zároveň splní přísné maximální limity na obsah nečistot: 0,02% P, 0,002% S, 0,3% Cr, 0,1% V, 0,15% Mo, 0,06% Ti, 0,06% Al, 0,22% Ni a 0,1% Cu.** Tyto limity kopírují zmíněnou ocel X65MS (dle ISO 3183), s výjimkou mědi. Limit pro měď je ještě zpřísněn, vzhledem k možnosti segregace a vysokému výkonu jako katodické částice. Výše zmíněný přístup k volbě materiálu je dostatečně určující z hlediska konstrukce a životnosti, a na druhou stranu není omezující pro nákup materiálu v současnosti, ani v budoucnu, kdy se mohou typy a třídy ocelí lišit. Pro finální kolo experimentů tak byla pořizena ocel S355J2H+N, která obě podmínky splňuje, a byla k dispozici v požadovaném polotovaru. I u této oceli se však v základním materiálu projevila při korozních experimentech nehomogenita mikrostruktury v podobě perlitických pásů po tvářením. Byl proto přidán ještě další požadavek na konstrukční ocel. **Vstupní materiál vnějšího obalu musí mít maximálně homogenní mikrostrukturu z hlediska prostorové distribuce jednotlivých fází, bez výrazné anizotropie či lokálního nahromadění fází.**

Tab. 20 – Složení ocelí použitých pro experimenty a uvažovaných pro konstrukci UOS

Ocel/označení	Obsah prvku [hm.%]													
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	V	Mo	Cu	Ti	W	Al	Ce
ČSN 42 2707.9 (normované složení)	max. 0,12	1,0 ÷ 1,6	0,2 ÷ 0,5	max. 0,025	max. 0,020	max. 0,3	max. 0,4	max. 0,3	max. 0,15	max. 0,3	max. 0,05	max. 0,7	-	max. 0,44
ČSN 422707.9 (skutečné složení)	0,11	1,33	0,34	0,007	0,005	0,08	0,36	0	0,14	0,16	0	-	-	0,41
ČSN 12 022 (normované složení)	0,13 ÷ 0,20	0,6 ÷ 0,9	0,15 ÷ 0,40	max. 0,040	max. 0,040	max. 0,25	max. 0,3	-	-	max. 0,3	-	-	-	-
X65MS (normované složení)	max. 0,1	max. 1,6	max. 0,45	max. 0,02	max. 0,002	max. 0,3	max. 0,22	max. 0,1	max. 0,15	max. 0,35	max. 0,06	-	max. 0,06	-
S355J2H+N dle normy EN 10219-1 (normované složení)	max. 0,22	max. 1,60	max. 0,55	max. 0,030	max. 0,030	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>S355J2H+N</b> (skutečné složení)	<b>0,16</b>	<b>1,53</b>	<b>0,2</b>	<b>0,011</b>	<b>0,001</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,004</b>	<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>	-	<b>0,038</b>	-

### 3.1.3 Grafický souhrn výběru materiálů



## 3.2 Modelování životnosti ukládacích obalových souborů

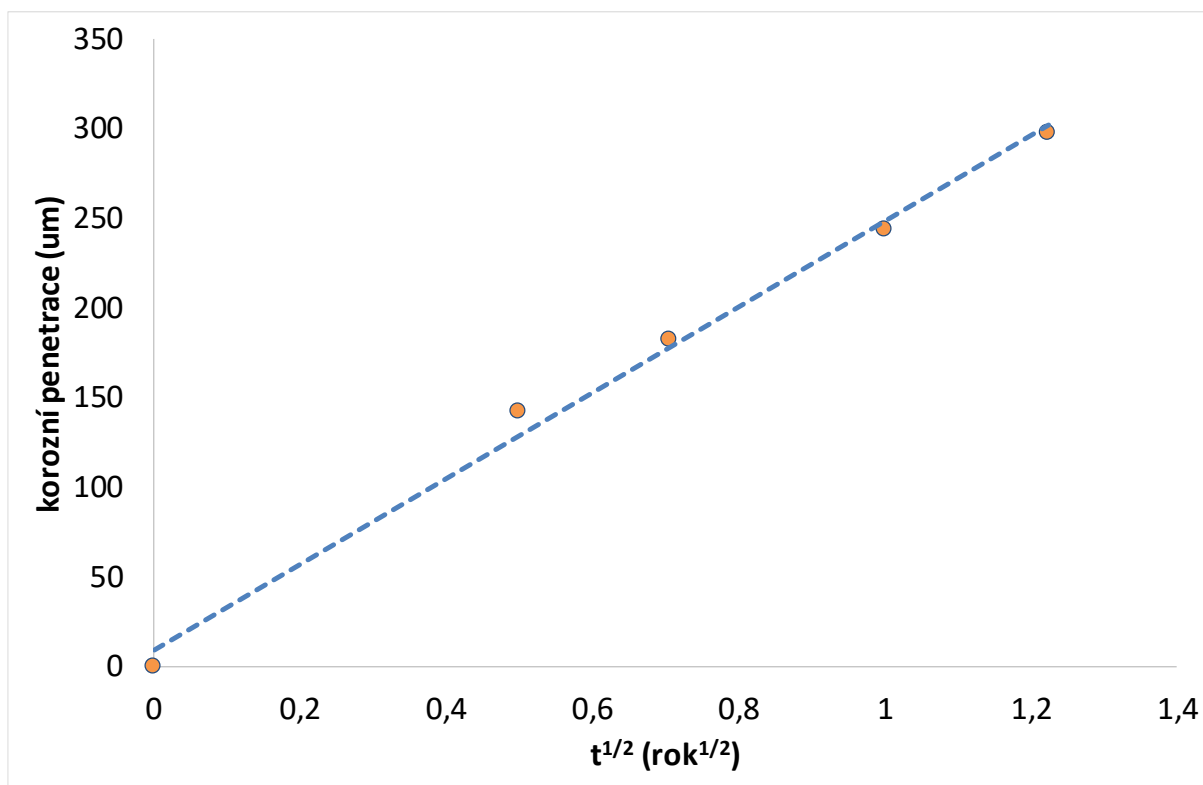
### 3.2.1 Přístup 1

Jedná se o nejkonzervativnější přístup k hodnocení životnosti ukládacího obalového souboru z roku 2017, kdy proběhlo hodnocení jednotlivých variant kontejneru (viz kap. 4). Pro stanovení životnosti byly využity průměrné hodnoty korozní rychlosti pro litou ocel ČSN 42 2707.9 (ocel S335J2H+N byla v roce 2017 teprve ve stádiu nákupu vzorku), ale násobené maximálním stanoveným lokalizačním faktorem. Tímto lokalizačním faktorem je násobena průměrná korozní rychlost po celý čas a nezohledňuje fakt, že lokalizace v čase vymizí. Výsledky vykazují parabolickou závislost na čase, což značí, že korozní děj je řízen transportem iontů železa od rozhraní s kovem. Závislost je jednoduše extrapolována na dlouhé časy a v každém kroku je přepočtena korozní rychlost se snižujícím se trendem způsobeným poklesem teploty v čase (Obr. 32). Pro přepočet je využito Arrheniova vztahu,

$$v_k = A \cdot \exp(-Q/RT)$$

( $v_k$ -korozní rychlost;  $A$ -předexponenciální faktor;  $Q$ -aktivační energie;  $R$ -univerzální plynová konstanta;  $T$ -termodynamická teplota) s aktivační energií  $18 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , což je nejnižší literární údaj (Tewari, 1979) a konzervativně je tak vliv snižující se teploty na pokles korozní rychlosti nejmenší.

Pro korozní rychlost korozivzdorné oceli byla v tomto modelu použita konzervativní hodnota  $0,1 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$  stanovená na základě literárních údajů (Roy, 1995; He, 2011; Sakuragi 2016). Stejná hodnota byla použita i pro hodnocení životnosti titanové slitiny.



Obr. 32 – Parabolická závislost korozní penetrace na čase pro litou ocel ČSN 42 2707.9



Tento přístup k hodnocení životnosti jak vnějšího obalu, tak případně vnitřního pouzdra, je extrémně konzervativní a z hlediska bezpečnosti nemá žádné další doporučení nejistoty. Tento přístup byl použit pro hodnocení jednotlivých konceptů v kap. 4. V době hodnocení ještě nebyly použity průběžné výsledky projektu MaCoTe, a proto byly využity pouze výsledky tohoto projektu (kap. 2.1.1). V těchto experimentech nebyla pozorována lokalizace rovnoměrné koroze mědi, a proto nebyla zahrnuta formou lokalizačního faktoru do hodnocení, tak jako u uhlíkové oceli.

## 3.2.2 Přístup 2

### 3.2.2.1 2D transportní model lokalizace rovnoměrného napadení

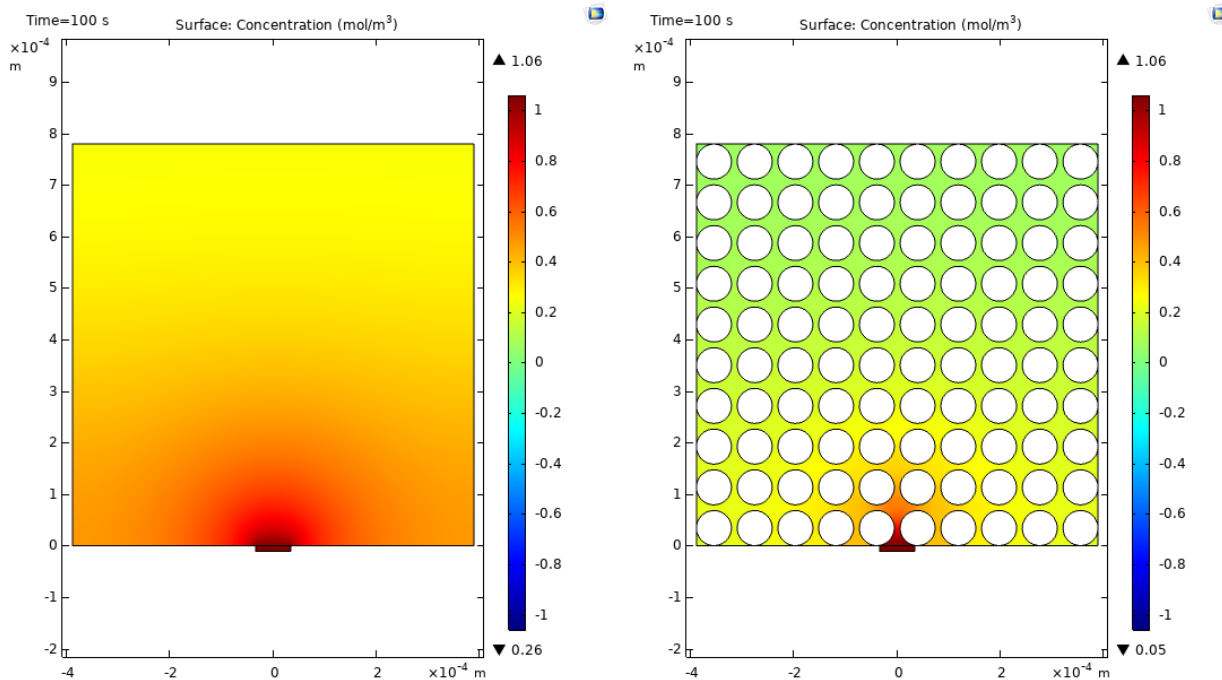
V této části práce byl ověřován transportní model lokalizovaného rovnoměrného napadení s pomocí software COMSOL Multiphysics. Pro model byl použit model sférických inertních částic bentonitu o průměrné velikosti 68  $\mu\text{m}$  (stanoveno na základě histogramu velikosti částic bentonitu BaM). Mezičásticová vzdálenost 11  $\mu\text{m}$  byla zvolena s ohledem na nutnost dodržet porozitu 0,42 odpovídající suché objemové hmotnosti bentonitu 1600  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , používané v rámci experimentů. Z kolmých řezů vyplynulo (kap. 2.1.1), že důlky mají běžně šířku srovnatelnou se vzdáleností mezi spodky částic, tedy s vlastním průměrem částice 68  $\mu\text{m}$ . Proto byla pro transport zvolena jako zdroj (rozpuštěných se) železnatých kationtů plocha s tímto průměrem.

Kovové železo se rozpouští velmi rychle za tvorby komplexu  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)^+$ , který je ve vodném prostředí s obsahem hydrogenuhličitanů stabilní a umožňuje velmi rychlý přechod z kovové formy do rozpustné formy (Castro 1986). Ke kinetice rozpouštění byly zvoleny 2 konzervativní přístupy:

- železo se zpočátku rozpouští nejvyšší možnou rychlostí 528  $\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$  ( $2,34\times 10^{-6}$   $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) stanovenou elektrochemicky na 70 °C v SBPOW v kap. 2.1.4
- zdroj kationtů je nekonečný, ale je omezen maximální koncentrací 1,06  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $1,06\times 10^{-3}$   $\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ ), která odpovídá celkové rovnovážné koncentraci  $\text{HCO}_3^-$  v pórovém roztoku bentonitu BaM

Pro výpočet difúzního koeficientu byla vzata hodnota  $7,20\times 10^{-10}$   $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  pro teplotu 25 °C (Lide, 1994). Aktivační energie 23,2  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  byla stanovena na základě experimentů v kap. 2.2.2. Předexponenciální faktor  $D_0$  by tak byl roven  $8,40\times 10^{-6}$   $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  a difúzní koeficient při 70 °C by odpovídal hodnotě  $2,50\times 10^{-9}$   $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ . Nejprve byl stanoven difúzní tok v malém objemu pórového roztoku bentonitu a srovnán s difúzním tokem v pórovém systému s částicemi bentonitu v krátkém časovém intervalu 100 s (Obr. 33). V tomto pórovém systému se původní difúzní koeficient  $\text{Fe}^{2+}$  ve vodném roztoku změní na efektivní difúzní koeficient na úrovni  $7,67\times 10^{-11}$   $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  v pórovém systému bentonitu. Tato hodnota je pak použita pro hodnocení maximálního šíření důlku řízeného transportem  $\text{Fe}^{2+}$  v bentonitové vrstvě nad UOS (šířka 5 m a výška 0,7 m). Celkový pohled i koncentrační gradienty po 0,25 a 1,5 roce jsou uvedeny na Obr. 34. Na Obr. 34 A a B je uveden model s konstantním zdrojem kationtů ( $2,34\times 10^{-6}$   $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Rychlost difúze není dostatečná, aby odváděla vznikající kationty železa, a dochází tak k nárůstu koncentrace na povrchu až na úroveň 7,85  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$ . Tato hodnota už překračuje výrazně rovnovážné koncentrace z Obr. 28 na str. 49 i rovnovážnou koncentraci hydrogenuhličitanových aniontů. Druhá varianta (Obr. 34 C a D) je také velmi konzervativní a je nastavena na předpokladu zpožděné precipitace korozních produktů a možnosti rozpuštění železa na hydrogenuhličitanový komplex v maximální koncentraci 1,06  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$ . Třetí varianta (Obr. 34 E a F) je obohacena o možnost vzniku preferenční cesty v bentonitu. Přestože je vznik takových cest v bentonitu velmi málo pravděpodobný a byl by spíše spojen s vysycháním bentonitu, které by znemožnilo i korozní

napadení. Pro geometrii trhliny byl využit článek (Liu, 2019). Na obrázcích v článku byla provedena digitální analýza obrazu a byly stanoveny přibližné šířky trhlin v rozmezí 0,1 až 1,5 mm. Hodnota 1,5 mm byla vzata jako rozměr trhliny pro model. Výška trhliny byla přes celou tloušťku vrstvy bentonitu (0,7 m).

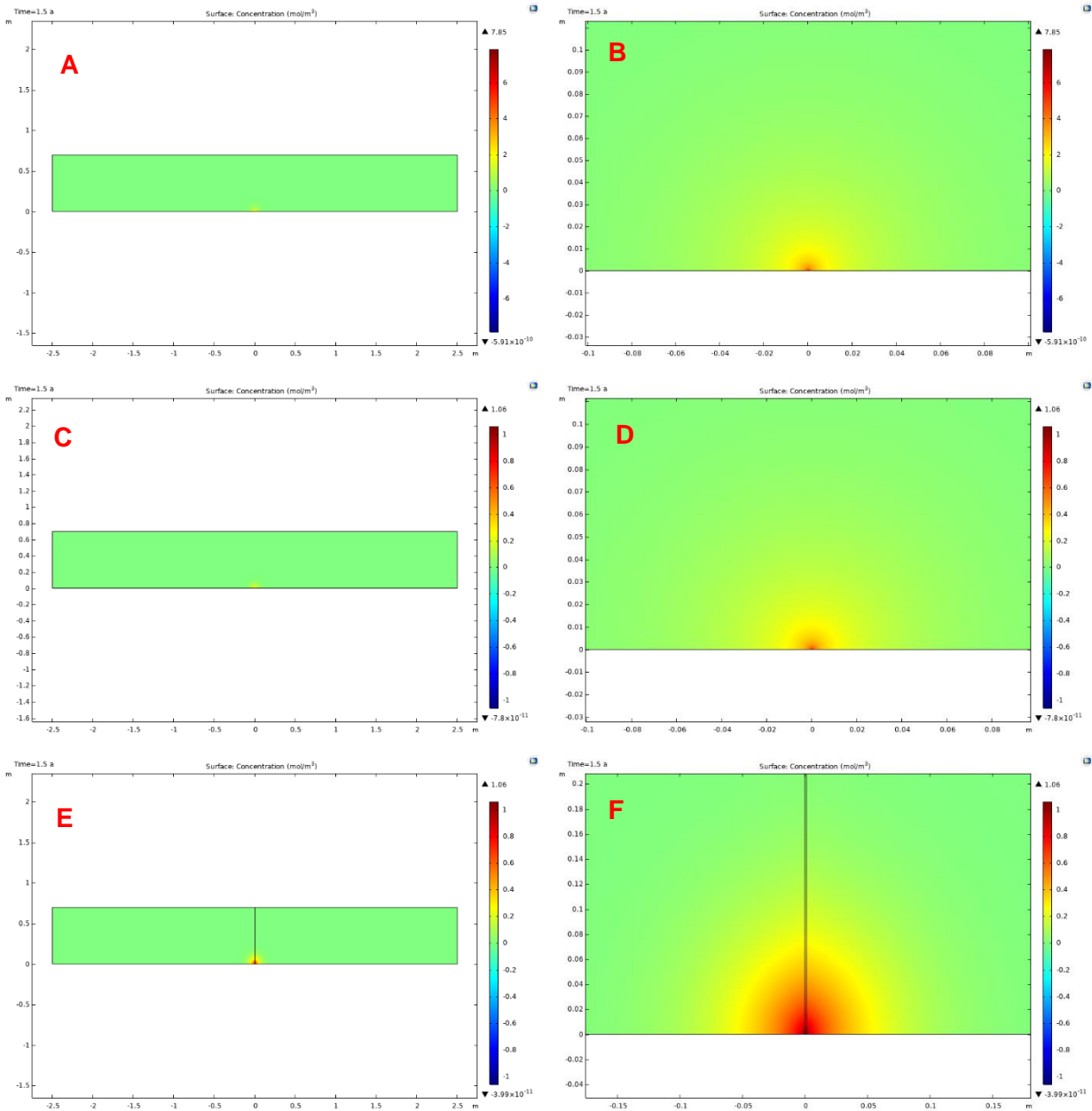


Obr. 33 – Porovnání transportu v pórovém roztoku (vlevo) a v kompaktním bentonitu (vpravo)

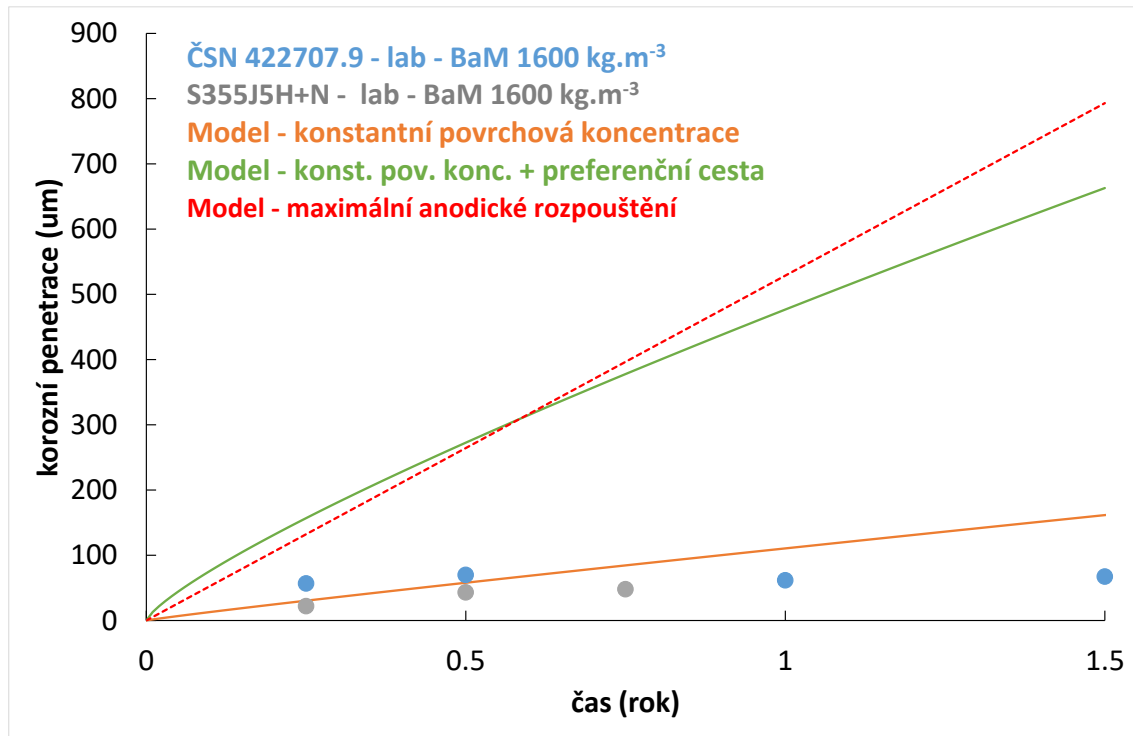
Tento 2D transportní model nezohledňuje následné brždění difúze vlivem precipitace korozních produktů a dalšího snížení efektivního difúzního koeficientu. Jen ukazuje maximální možnou kinetiku šíření korozního důlku. Všechny 3 varianty modelu jsou porovnány na Obr. 35 s maximálními penetracemi zjištěnými na kolmých řezech pro oba materiály: litou ocel ČSN 42 2707.9 (kap. 2.1.1) i nový typ čisté tvářené oceli S335J2H+N (kap. 2.1.3) s minimálním obsahem nečistot. Z navržených variant 2D transportního modelu tedy relativně přesně popisuje lokální rozpouštění železa varianta 2 s konstantně nastavenou povrchovou koncentrací rozpuštěných kationtů železa. Varianty s konstantním zdrojem iontů a s konstantní povrchovou koncentrací s preferenční cestou jsou příliš rychlé.

Na Obr. 36 je již ukázán detail ideální varianty (konstantní koncentrace na rozhraní bez preferenční cesty, Obr. 34 C a D) a porovnání nejen s výsledky tohoto projektu, ale i projektu MaCoTe. Je patrné, že reálné rozpouštění čisté oceli S335J2H+N, která se dá chápat jako téměř čisté železo, je samozřejmě o něco pomalejší než model, a po půl roce už začíná být výrazně bržděna precipitujícími korozními produkty. Litá ocel ČSN 42 2707.9 obsahuje značnou část nekovových vměstků v kritických částech, kde převážně dochází k lokalizaci korozního napadení vlivem mikročlánků mezi feritickou fází a karbidickými částicemi. Na stejné množství rozpuštěného železa, je růst korozního důlku do hloubky materiálu v objemu materiálu s vysokým obsahem karbidických částic mnohem rychlejší. Proto se jeví penetrace koroze do lité oceli ČSN 42 2707.9 jako rychlejší než teoreticky možná daná difúzí. Nicméně vliv zbylých fází, které jako nerozpuštěné vedou k omezení transportu  $Fe^{2+}$  a urychlení precipitace korozních produktů, způsobuje zastavení lokálního napadení již po 0,25 roce a penetrace je od této doby již konstantní. Lokální rovnoměrné napadení na uhlíkové oceli ČSN 12 022 po expozicích v rámci

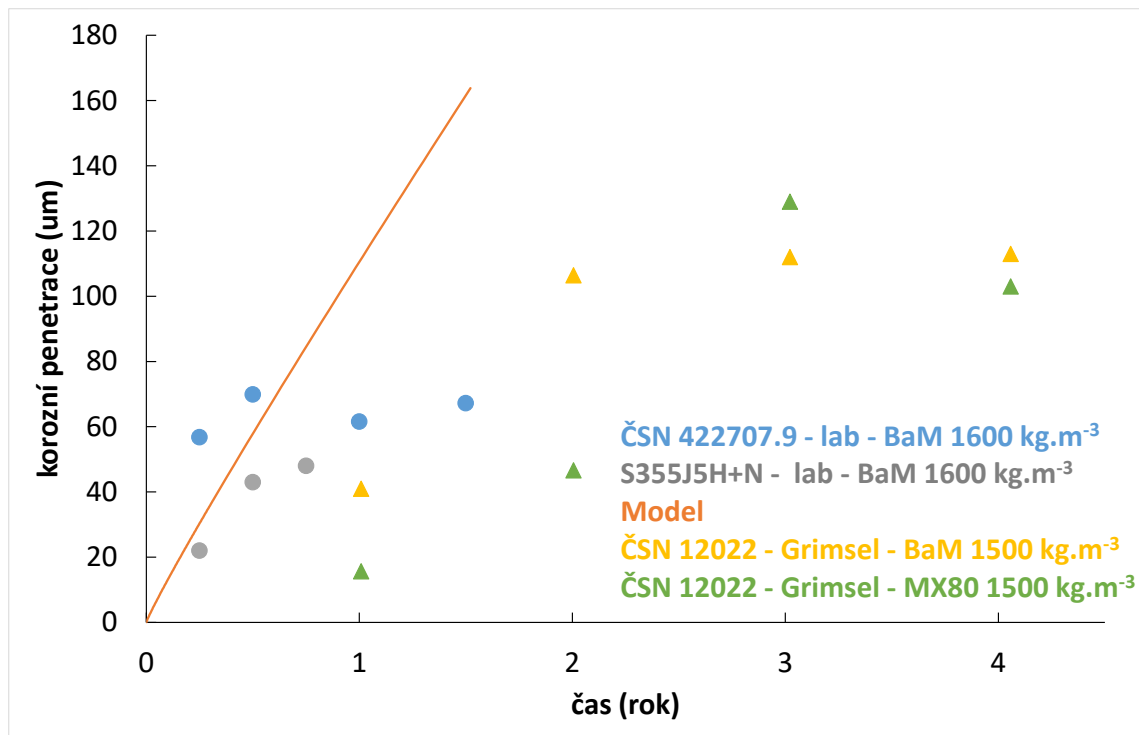
projektu MaCoTe se rozvíjí pomaleji, do větší hloubky a limitace dosahuje později. Důvodem může být nižší suchá hustota bentonitu, která méně omezuje transport a blokuje korozní napadení. Podobné výsledky publikoval i švýcarský tým (Reddy, 2020), který pozoroval snížení korozní rychlosti při použití kompaktovaného bentonitu oproti bentonitovým peletám.



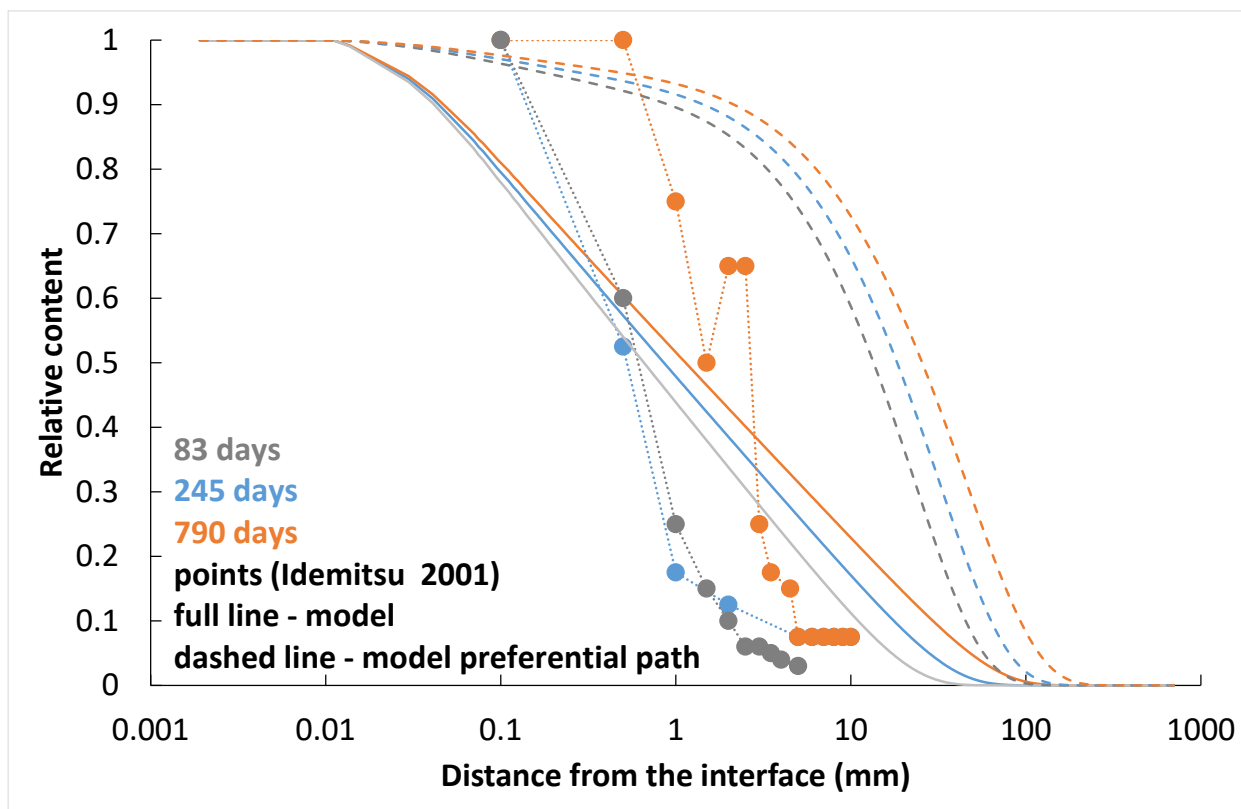
Obr. 34 – Modely extrémního lokálního rozpouštění oceli z důlku o průměru 68  $\mu$ m skrze vrstvu saturevaného bentonitu o tloušťce 0,7 m (maximální rychlost rozpouštění A a B; konstantní koncentrace na rozhraní C a D; konstantní koncentrace na rozhraní s preferenční cestou E a F)



Obr. 35 – Porovnání 3 variant 2D transportního modelu lokálního rozpouštění s experimentálními daty maximálních lokalizovaných penetrací do materiálu



Obr. 36 – Porovnání modelu s experimentálními daty maximálních lokalizovaných penetrací do materiálu pro tento projekt i projekt (Lab) i in-situ data projektu MaCoTe (Grimsel)



Obr. 37 – Porovnání koncentračních profilů z modelu s daty Idemitsu 2001

Difúzní koeficienty uvažované pro tyto modely jsou vysoké, tedy velmi konzervativní. Je totiž uvažována nebrzděná difúze v roztoku ( $2,50 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), případně zpomalená přítomností částic bentonitu ( $7,67 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Částice bentonitu jsou uvažovány jako inertní. V experimentech na stanovení sorpčních vlastností bentonitu jsou pozorovány difúzní koeficienty Fe na úrovni  $10^{-15}$  až  $10^{-16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  (Muurinen 2014). Ty ovšem používají velmi zředěné roztoky Fe a jsou výrazně ovlivněny adsorpcí. U korozních experimentů, které poskytují na povrchu kovu dostatek kationtů, je možné adsorpci zanedbat. Studii s pozorováním průniku kationtů korodujícího železa do bentonitu publikoval japonský tým (Idemitsu 2001). Autoři pracovali za laboratorní teploty a výsledky úspěšně fitovali analytickým řešením se dvěma členy, první tvořený preferenčními cestami s rychlou difúzí a malou kapacitou ( $2,00 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), a druhý tvořený kompaktním bentonitem s pomalou difúzí a velkou kapacitou ( $7,30 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Na Obr. 37 jsou data japonského týmu porovnána s předchozími modely po přepočtení na laboratorní teplotu  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  (difúzní koeficient v bentonitové trhlině  $7,20 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , resp. v pórovém systému bentonitu  $2,25 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Model s preferenční cestou lépe odpovídá tvaru koncentračního profilu stanovenému japonským týmem, ale šířka profilu modelu je výrazně vyšší. Stejně jako u českých experimentálních výsledků, jsou i japonské výsledky ovlivněny precipitací korozních produktů a omezení difúze Fe kationtů. Efektivní difúzní koeficienty publikované japonským týmem obsahují i dodatečné omezení transportu precipitací korozních produktů. Bohužel autoři nezahrnuli do experimentů fázovou analýzu vznikajících korozních produktů.

### 3.2.2.2 Dlouhodobý 3D korozně-transportní model s proměnnou geometrií

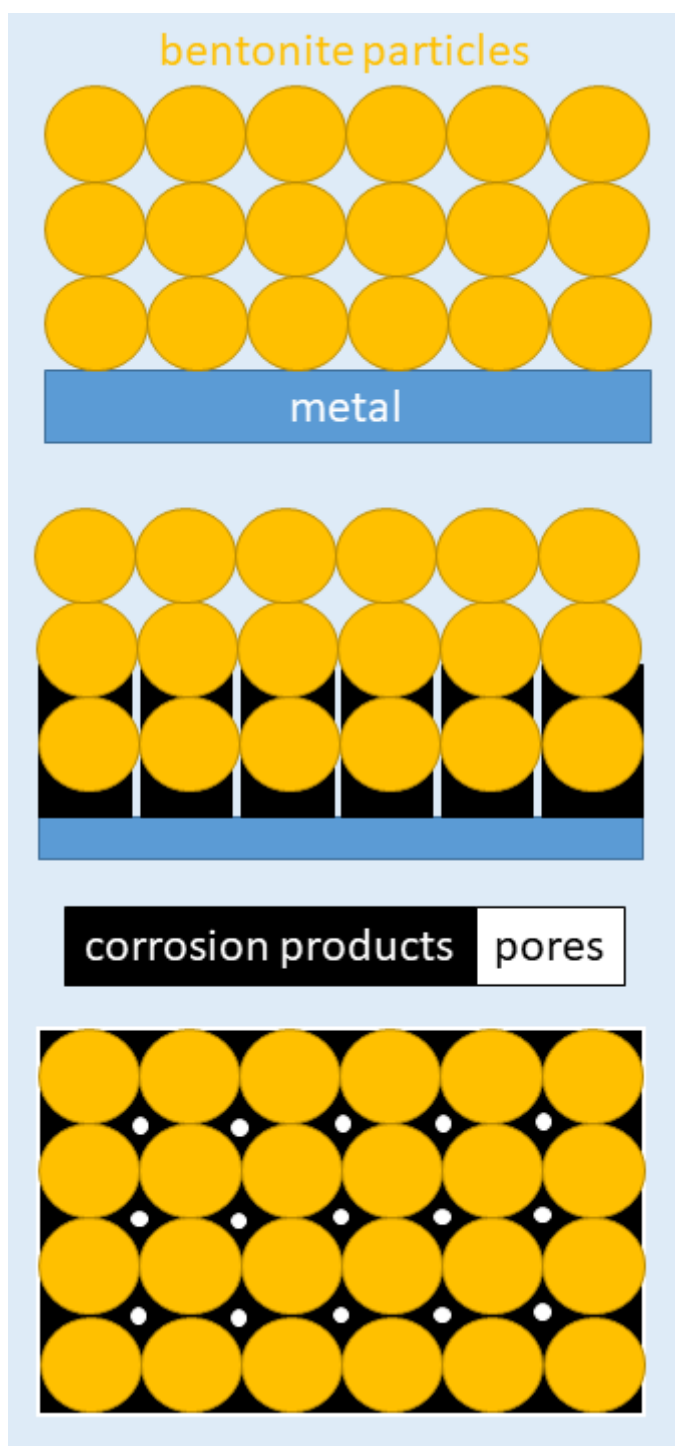
Modelování lokalizace rovnoměrného napadení prokázala smysluplnost použité geometrie i nastavených parametrů difúze. Z hlediska dlouhodobé životnosti je však potřeba zahrnout do modelu i precipitaci korozních produktů v pórovém systému kompaktovaného bentonitu a tím další omezení difúze kationtů železa. Zajímavý model byl vytvořen španělským týmem (Pena, 2008), kteří postavili transportní omezení na vzniku neporézní vrstvy magnetitu a difúzi  $\text{Fe}^{2+}$  po hranicích magnetitových zrn. Model je velmi dobře zpracován, nicméně zahrnuje diskutabilní hodnoty difúzního koeficientu po hranicích zrn, které jsou pro model klíčové a obtížně experimentálně ověřitelné. Vzhledem k výsledkům experimentů v kap. 2.2.2., kdy homogenně distribuované částice železného prášku umožňují velmi rychlé přesycení celého pórového systému bentonitu a vyplnění korozními produkty, jeví se v českém konceptu jako klíčová porozita korozních produktů. Použití konzervativní hodnoty difúzního koeficientu v pórovém roztoku, umožňuje jako klíčový parametr zahrnout objem vznikajících korozních produktů a jejich porozitu. Kromě fitování experimentálních dat spojených se vznikem sideritu, tak lze modelovat i vznik alternativních korozních produktů, jako magnetit (vyskytující se jako hlavní korozní produkt u archeologických analogů) nebo hlinito-křemičitany, které přicházejí v úvahu pro dlouhodobé uložení, přestože nebyly ještě jednoznačně experimentálně prokázány.

U tohoto 3D modelu již dochází ke změně geometrie systému po každém časovém kroku. Software COMSOL Multiphysics bohužel neumožňuje řešit systémy s komplikovanou a proměnlivou 3D geometrií. Model byl tedy řešen velkým množstvím následných kroků v programu Excel. Jednotlivé výpočetní kroky jsou prováděny v logaritmické škále, s 10 kroky na dekádu. Každý časový krok zahrnoval:

1. Přepočítání teploty a s ní souvisejícího difúzního koeficientu. Předexponenciální faktor  $D_0 = 8,40 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  a aktivační energie  $23,2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ .
2. Ustálenou difúzi iontů  $\text{Fe}^{2+}$  skrz póry v korozních produktech.
3. Precipitaci nových korozních produktů v prostoru po odkorodované oceli a v mezičásticovém prostoru bentonitu.
4. Změnu geometrie systému pro další časový krok.

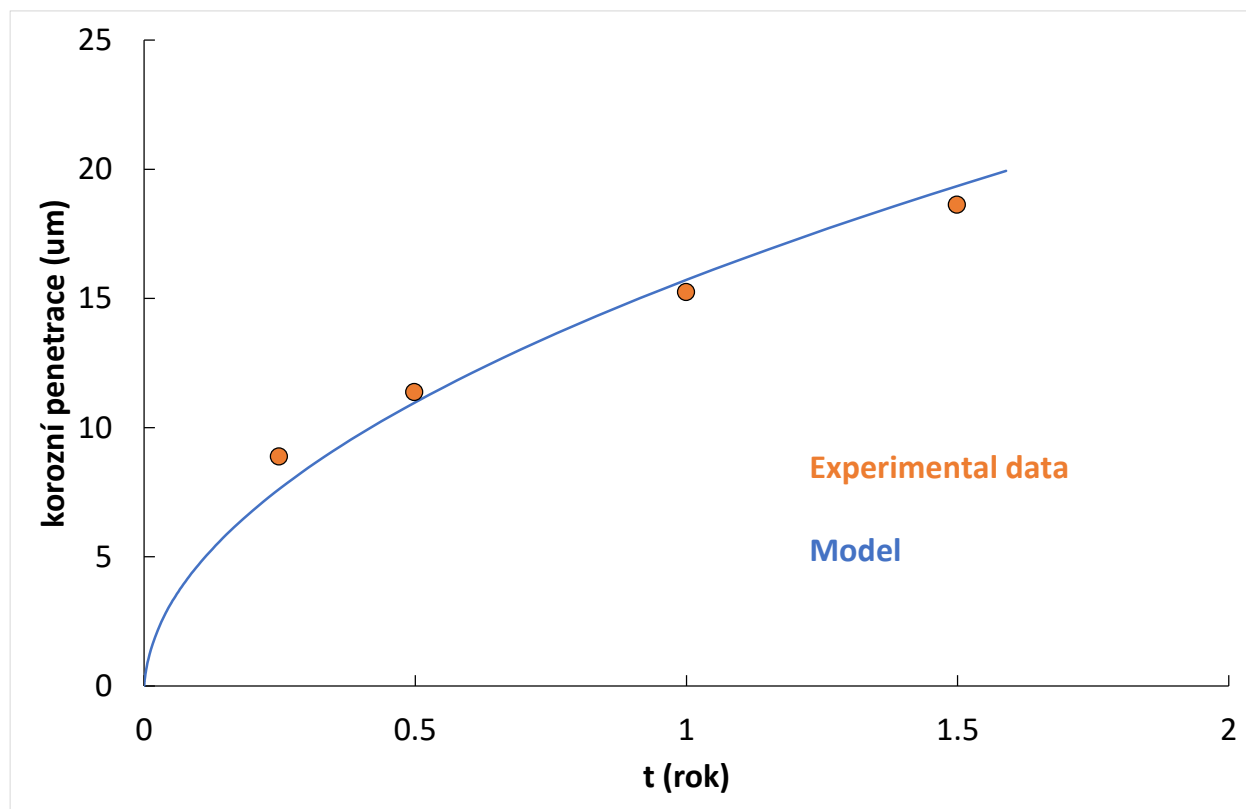
Geometrie 3D systému je znázorněna na Obr. 38. Jedná se o kulovité částice o rozměru  $68 \mu\text{m}$ . I pokud jsou kulové částice v těsném uspořádání, má systém ve 3D geometrii porozitu 0,48, korozní produkty tak musí vyplnit větší volný prostor než v bentonitu o suché hmotnosti  $1600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (porozita 0,42) a řešení je tak o něco konzervativnější. Povrchová koncentrace  $\text{Fe}^{2+}$  je nastavena stejně jako v předchozím 2D modelu  $1,06 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Jedinou volnou proměnnou byla velikost póru. Ta umožnila validovat model na experimentální data při konstantní teplotě  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Na Obr. 39 a Obr. 40 je uveden fit modelu na experimentální data v podobě průměrných korozních penetrací s přídatkem  $2\sigma$ , aby data statisticky odpovídala hladině spolehlivosti 95 %. Velikost pórů odpovídá pro litou ocel ČSN 42 2707.9 průměru  $2,9 \mu\text{m}$  a pro ocel S335J2H+N průměru  $3,4 \mu\text{m}$ .

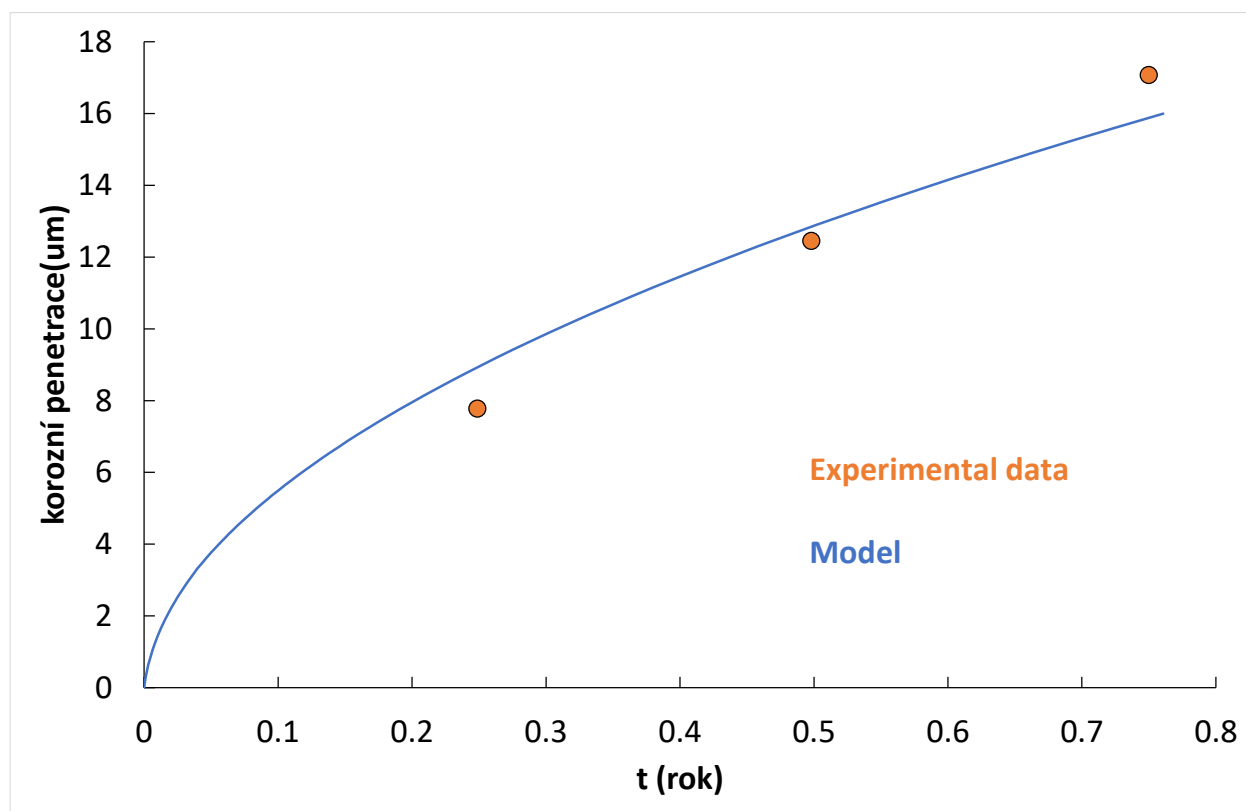


Obr. 38 – Geometrie transportně-reakčního modelu a jeho změna s korozním napadením

V rámci projektu Korozní produkty (kap. 2.2.2) byla pro železný prášek stanovena průměrná velikost póru korozních produktů na  $0,401 \pm 0,257 \mu\text{m}$  a průměrný počet pórů v jednom mezičásticovém prostoru bentonitu na 4,16 (rozmezí počtu pórů na mezičásticový prostor se pohybovalo 0 až 10). Pokud vezmeme průměr póru  $+ 2\sigma$ , vynásobíme průměrným počtem pórů, po přepočtu na jeden pór dostaneme průměr póru  $1,9 \mu\text{m}$ . Když porovnáme tuto hodnotu s hodnotami v předchozím odstavci, ačkoli se nejedná o přesnou shodu, je patrné, že nezávislá data z projektu Korozní produkty (kap. 2.2.2) podporují správnost modelu.



Obr. 39 – Fit modelu na experimentální data lité oceli ČSN 42 2707.9 při 70 °C

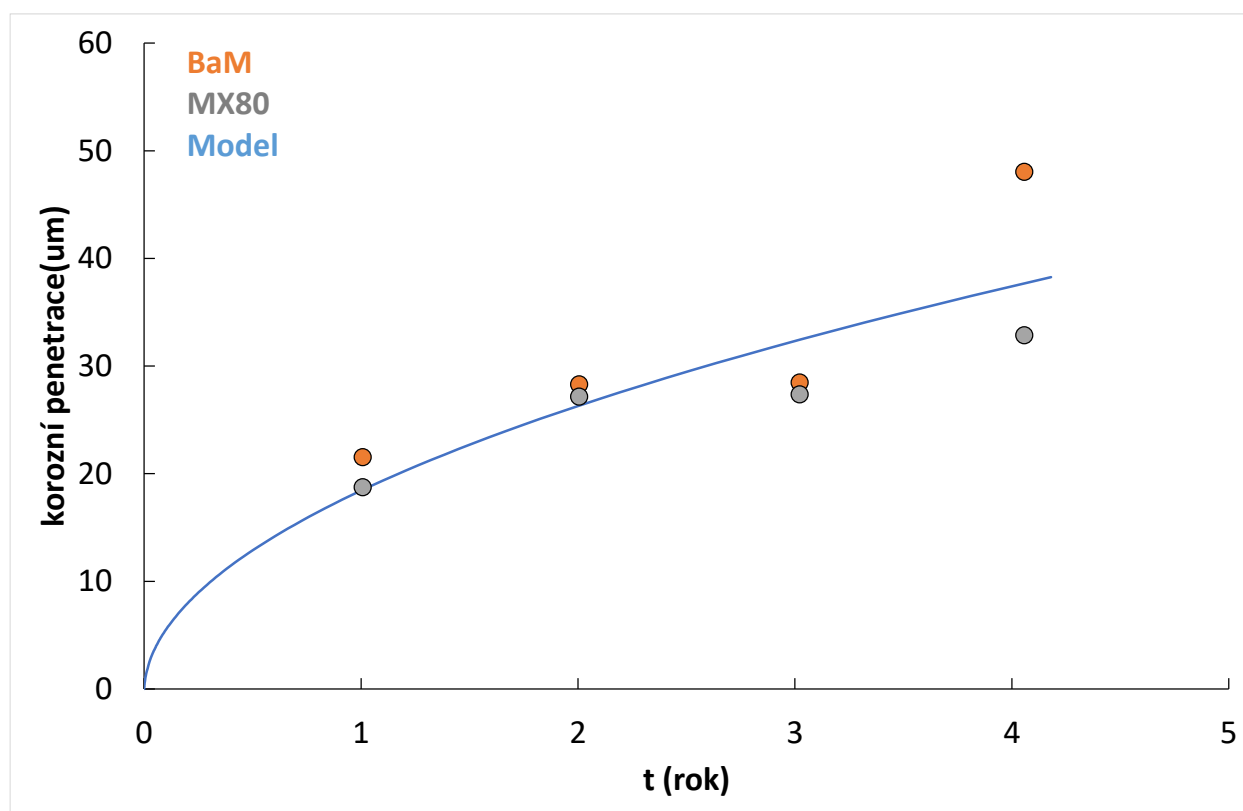


Obr. 40 – Fit modelu na experimentální data oceli S335J2H+N při 70 °C



Předchozí fit používá jako korozní produkt siderit. Ověření modelu bylo provedeno na výsledcích z projektu MaCoTe (Obr. 41). Pro experimenty byl použit bentonit o nižší suché hustotě ( $1500 \text{ kg.m}^{-3}$ ; přibližná porozita 0,45), ale použitá porozita modelu 0,48 je pořád dostatečně konzervativní.

Hlavní model hodnocení životnosti ukládacího obalového souboru uvažuje jako korozní produkt siderit ( $\text{FeCO}_3$ ), který byl prokázán v experimentech s kompaktovaným bentonitem a má oproti původní oceli přibližně 4,2x větší objem (hustota  $3870 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) má menší nárůst objemu ve srovnání s původní ocelí cca 2,2x (hustota  $5000 \text{ kg.m}^{-3}$ ), vyplňuje pórový systém bentonitu s nejnižší efektivitou. Magnetit je nejčastějším korozním produktem stanovovaným v rámci projektu TAČR Théta Archeologické analogy (kap. 6.1.1). Hlinitokřemičitan chamosit ( $\text{Fe}_4\text{MgAl}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ ) je teoretický korozní produkt, který by měl být termodynamicky nejstabilnější a jeho objem je oproti původní oceli větší asi 7x (hustota  $3400 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Vyplňuje pórový systém velmi efektivně a působí značné zpomalení korozní rychlosti. Model s chamositem je jen čistě teoretický a zatížený velikou nejistotou, protože experimentální ověření přítomnosti hlinitokřemičitanových korozních produktů bude experimentálně velmi obtížné. Model s chamositem uvažuje velmi konzervativně všechen chamosit jako nově vyprecipitovaný z roztoku. Ve skutečnosti však bude většina chamositu vznikat přeměnou z původních jílových minerálů, jejich reakcí z rozpuštěnými ionty železa, takže objemová změna v systému nemusí být tak výrazná.



Obr. 41 – Ověření modelu na datech z projektu MaCoTe pro bentonity MX-80 a BaM

Pro hodnocení životnosti vnitřního pouzdra z korozivzdorné oceli je použita konstantní, experimentálně stanovená hodnota korozní rychlosti  $3,8 \text{ nm.a}^{-1}$  (viz kap. 2.1.8). Předpokládá se, že při tak nízké korozní rychlosti budou všechny vznikající kationty kovů bez problémů transportovány do objemu bentonitu a nebude docházet ke vzniku korozních produktů. Korozní

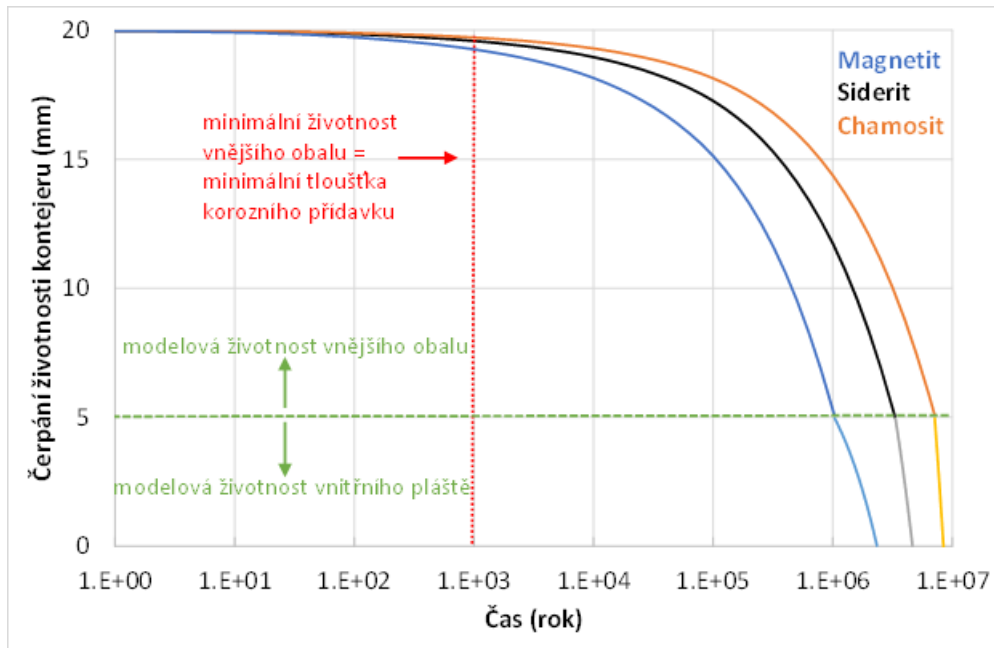
bez brzdění transportem způsobeným precipitací korozních produktů je sice velmi konzervativní přístup, ale v současnosti jediný možný. Precipitace korozních produktů pomalu korodující korozivzdorné oceli není možné experimentálně ověřit v reálném čase a byl by tak zatížen značnou nejistotou.

Tab. 21 shrnuje životnost ukládacího obalového souboru s vnějším obalem z oceli S335J2H+N a vnitřním pouzdem z korozivzdorné oceli EN 1.4404, pro jednotlivé varianty korozních produktů uhlíkové oceli. Protože se tloušťka korozního přídávku (část tloušťky stěny kontejneru, která neplní funkci na mechanickou pevnost, ale je k dispozici pro odkorodování) neustále mění, se zpřesňujícími se údaji podmínek uložení a okolního prostředí i se změnou konstrukce kontejneru apod., byly korozní přídávky obou částí kontejneru zafixovány pro účely modelování na minimální korozní přídavek vnějšího obalu z uhlíkové oceli 15 mm a vnitřního pouzdra z korozivzdorné oceli 5 mm. (Aby byla zachována platnost modelů, jsou tyto korozní přídávky garantovány konstrukcí jako minimální. Pokud by v budoucnu došlo ke zvýšení zatížení UOS a korozní přídávky by se snížily pod tyto hodnoty a tím by došlo k dřívějšímu kolapsu UOS a tím snížení životnosti, bude změněna konstrukce a zvýšena tloušťka stěn vnějšího i vnitřního pouzdra, aby korozní přídávky opět byly minimálně na těchto hodnotách a byla garantována minimální životnost s dostatečně konzervativní rezervou.)

Hlavní variantou je model se sideritem. Pro překlenutí periody 1000 let, kdy dojde ke spotřebování kyslíku a teplota klesne na úroveň 50 °C (pokles teploty na 50 °C za 1000 let viz Obr. 1), a vnitřní pouzdro již může korodovat ve stabilním pasivním stavu, stačí dle modelu 0,42 mm korozního přídávku vnějšího obalu z uhlíkové oceli (bez započtení několika desetin milimetru nutných pro kompenzaci lokalizace rovnoměrného napadení na počátku expozice). Pro srovnání uvádí japonský tým (Idemitsu, 2001) hodnotu korozní penetrace 0,9 mm za 1000 let. Chamosit je pouze nepotvrzená teoretická varianta a varianta s magnetitem slouží pro porovnání s archeologickými analogy. Všechny varianty jsou znázorněny jako čerpání životnosti UOS na Obr. 42.

Tab. 21 – Životnosti UOS při použití různých korozních produktů v 3D modelu

korozní produkt uhlíkové oceli	minimální životnost (rok)		
	vnější obal ( korozní přídavek 15 mm)	vnitřní pouzdro ( korozní přídavek 5 mm)	celkem
magnetit	1 026 109	1 315 789	2 341 898
<b>siderit</b>	<b>3 320 423</b>	<b>1 315 789</b>	<b>4 636 212</b>
chamosit	7 098 938	1 315 789	8 414 727



Obr. 42 – Čerpání životnosti UOS při uvažování různých korozních produktů uhlíkové oceli

## 4 Vývojové varianty UOS

V průběhu projektu bylo vytvořeno celkově 13 variant UOS (Malina et al., 2017). Z těchto variant pak byly vybrány dvě nejlepší varianty, které budou popsány dále, a které byly finálně podrobně rozpracovány.

Důležité je také poznamenat, že ačkoli se u jednotlivých variant objevují poznámky o ekonomické nevýhodnosti, je nutné brát v úvahu rozdíl mezi současnými cenami polotovarů a budoucími skutečnými cenami v případě, že budou řešeny tisíce kusů UOS. Jelikož součástí zadání byla i stanovená maximální cena UOS vztažená na jeden uložený PS, bylo potřeba současné odhady cen v hodnocení zahrnout, ačkoli z pohledu roku 2065, zřejmě nemusí být relevantní. Navíc ceny jsou stanoveny pouze pro jeden vyrobený kus UOS, nikoli pro sériovou výrobu tisíců kusů, protože se nepodařilo od dodavatelů získat ceny polotovarů odpovídající sériové výrobě. Stejně platí i pro technologii výroby. Uvedené ceny tedy slouží pouze pro porovnání jednotlivých variant, ale neodpovídají reálným cenám při sériové výrobě.

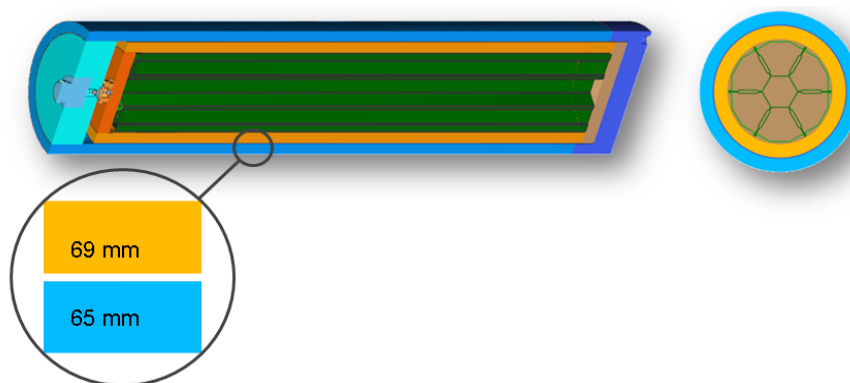
Proto je také závěrem výběru variant zmíněna i varianta 2, technicky rovnocenná k variantám 11 a 12, nicméně v průběhu projektu dostaly přednost varianty 11 a 12 především z důvodu lepší dostupnosti polotovarů na vnitřní pouzdra a výhodám spojeným s uložením každého PS zvlášť.

Z výše popsaných důvodů ani není zcela možné a relevantní porovnávání cen konceptů různých zemí. Například porovnání ceny skandinávského celoměděného UOS s naším UOS z uhlíkové oceli by narazilo na problém, jelikož skandinávský koncept je ve vývoji značně dále a tak se cena za celoměděný UOS bude mnohem více blížit finální ceně ze sériové výroby.

### 4.1 Varianta 1

(VO - trubka 795/65mm mat. X65MS (1.8767), VP – výkovek 658/69mm mat. 1.4404)

Tato varianta je tvořena následujícími funkčními celky: vnějším obalem z uhlíkové oceli, vnitřního pouzdra z korozivzdorné oceli a vnitřní vestavby z korozivzdorné oceli. Vnější obal (VO) plní korozní a pevnostní funkci. Materiál VO X65MS (1.8767) je ocel standardně používaná pro výrobu svařovaných trubek velkého průměru. Tloušťka stěny VO je navržena tak, aby nedošlo k porušení hermetičnosti dříve než za 1000 let. Tato doba byla základní podmínka viz Obr. 1 pro zaručení spolehlivé funkce VP. Skutečná životnost VO je dle současných poznatků až o tři řády vyšší. Po uplynutí 1000 let je spotřebován kyslík, poklesne teplota na povrchu UOS pod 50 °C a sníží se IZ do té míry, že může být s výhodou použita korozivzdorná ocel vnitřního pouzdra (VP) aniž by u ní docházelo k bodové korozi. Vnitřní pouzdro z výkovku z korozivzdorné oceli tak plní korozně odolnou a pevnostní funkci. Po ztrátě hermetičnosti vnějšího obalu je úniku radionuklidů do okolí zamezeno vnitřním pouzdem.

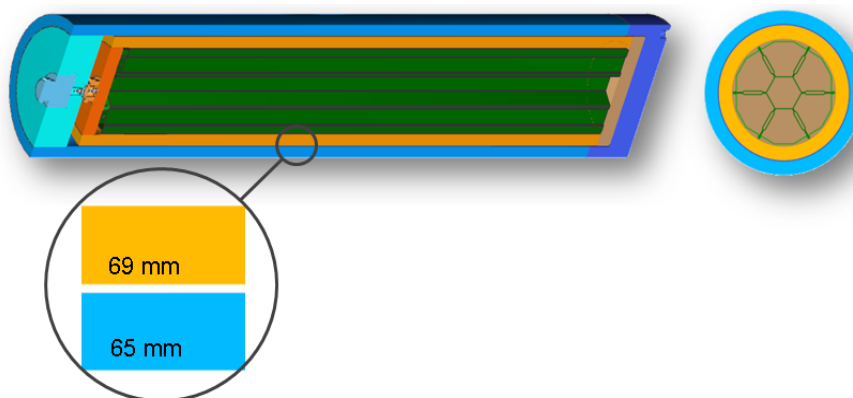


Obr. 43 – UOS varianta 1

## 4.2 Varianta 2

(VO - trubka 795/65mm mat. X65MS (1.8767), VP – trubka 658/67mm mat. 1.4404)

U této varianty bylo uvažováno s nahrazením výkovek korozivzdorné oceli (ve variantě 1) VP, polotovarem - trubkou. V tomto případě je třeba si uvědomit, že trubky požadovaných rozměrů a zejména požadované tloušťce stěny jsou nenormalizované a v současné době se komerčně nevyrábí (ISO 4200). V případě použití tohoto řešení by bylo nutné, nejprve vyvolat jednání s výrobcem a prosadit zavedení výroby trubek s požadovanými nenormalizovanými rozměry. Stejně jako u varianty 1 vnitřní pouzdro z výkovek z korozivzdorné oceli plní korozně odolnou a pevnostní funkci.



Obr. 44 – UOS varianta 2

## 4.3 Varianta 3

(VO – návar nebo návlek 672/7mm mat. X65MS (1.8767) VP – výkovek 658/67 mm mat. 1.4404)

Varianta 3 vychází z varianty 1, ale odlišuje se použitým vnějším obalem, který je tvořen pouze tenkou vrstvou uhlíkové oceli nanesenou na vnější povrch vnitřního pouzdra. Tento vnější obal může být také vytvořen navlečením tenké trubky nebo návarem. Pevnostní funkci obalového

souboru plní od samého počátku kované vnitřní pouzdro. Vnější obal chrání vnitřní pouzdro z korozivzdorné oceli do doby, než v hlubinném úložišti nastanou podmínky vhodné k použití korozivzdorné oceli jako korozní bariéry, tj. po dobu 1000 let. Tloušťka stěny VO splňuje tuto podmínku při uvažování modelové nekonzervativní rychlosti koroze.

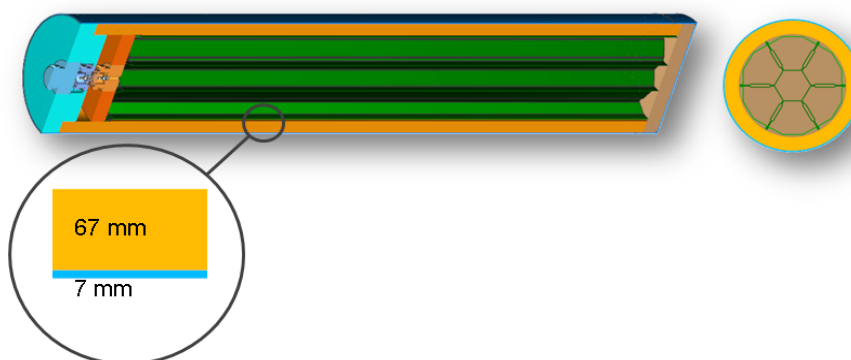


Obr. 45 – UOS varianta 3

#### 4.4 Varianta 4

(VO – návar /návlek 672/7mm mat. uhlíková ocel(1.8767), VP – trubka 658/67mm mat. 1.4404)

Varianta 4 vychází z varianty 3, ale odlišuje se nahrazením výkovek VP z korozivzdorné oceli, polotovarem - trubkou. VO je stejně jako u var. 3 tvořen pouze tenkou vrstvou uhlíkové oceli nanesenou na vnější povrch vnitřního pouzdra. Tento vnější obal může být vytvořen navlečením tenké trubky nebo návarem. Pevnostní funkci obalového souboru plní od samého počátku vnitřní pouzdro. Vnější obal chrání korozivzdorné vnitřní pouzdro do doby, než v hlubinném úložišti nastanou podmínky vhodné k použití korozivzdorného materiálu jako korozní bariéry, tj. po dobu nejméně 1000 let. V tomto případě, stejně jako ve variantě 2, je třeba si uvědomit, že trubky požadovaných rozměrů a zejména požadované síle stěny jsou nenormalizované a v současné době se komerčně nevyrábí (ISO 4200). V případě použití tohoto řešení by bylo nutné, nejprve vyvolat jednání s výrobcem a prosadit zavedení výroby trubek s požadovanými, nenormalizovanými rozměry.

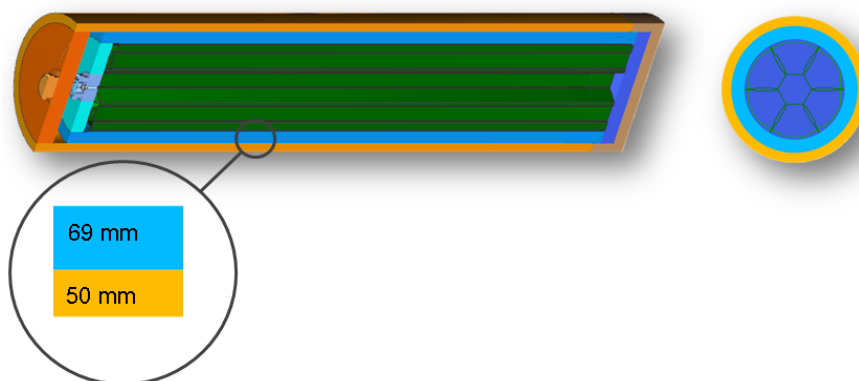


Obr. 46 – UOS varianta 4

## 4.5 Varianta 5

(VO - výkovek 758/50 mm mat. Cu-OF , VP – trubka 658/69mm mat. X65MS (1.8767))

UOS ve variantě 5 se od předchozích variant odlišuje záměnou materiálů, ze kterých jsou vyrobeny jeho jednotlivé hlavní části. Vnější obal je vyroben z výkovku z mědi a vnitřní pouzdro z oceli uhlíkové. Vnější výkovek měděného přebalu zajišťuje korozní funkci ukládacího obalového souboru po celou dobu jeho plánované životnosti.

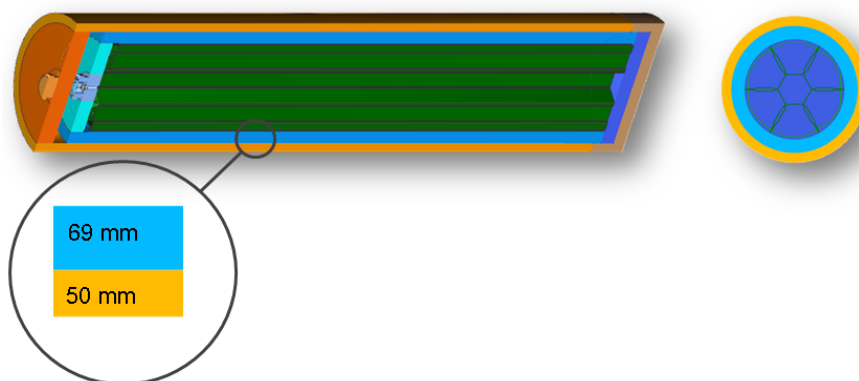


Obr. 47 – UOS varianta 5

## 4.6 Varianta 6

(VO - odlitek 758/50mm mat. Cu-OF , VP – trubka 658/69mm mat. X65MS (1.8767))

Tato varianta je koncepčně shodná s variantou 5, pouze jako polotovár vnějšího obalu je uvažován měděný odlitek. (U této varianty by bylo zajímavé zjistit výrobní cenu trubek z CU-OF u SKB/POSIVY za použití technologie protlačování.)

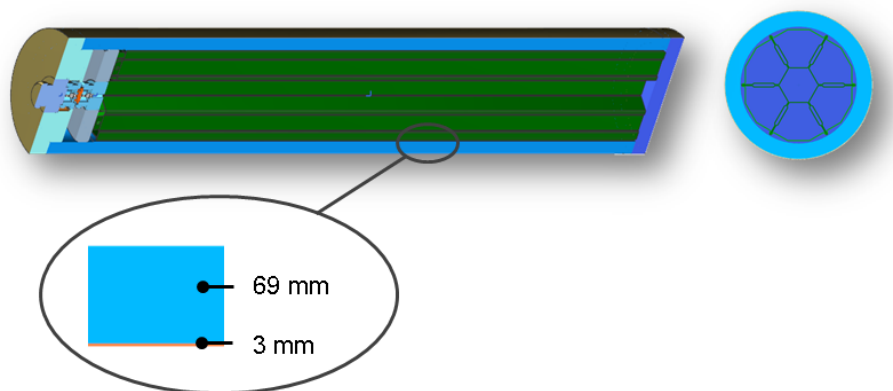


Obr. 48 – UOS varianta 6

## 4.7 Varianta 7

(Vnější přebal – návar / nástřík 3mm mat. Cu-OF, VP – trubka 658/69mm X65MS (1.8767))

Tato varianta se od předcházejících variant 5 a 6 odlišuje vytvořením vnějšího měděného obalu pomocí měděného nástříku přímo naneseného na vnitřní pouzdro z uhlíkové oceli. Tato varianta je závislá na potvrzení velmi malé korozní rychlosti použitého materiálu VP v podmínkách hlubinného úložiště.

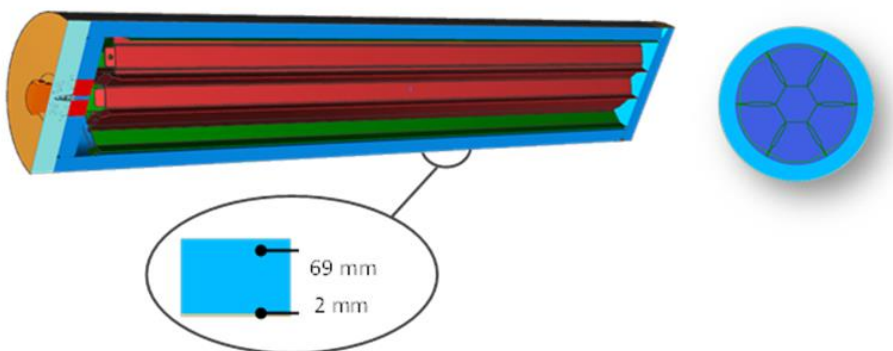


Obr. 49 – UOS varianta 7

## 4.8 Varianta 8

(Vnější přebal – návar / nástřík 2mm mat. Ti-Pd Gr.7, VP – trubka 658/69mm X65MS (1.8767))

Tato varianta vychází z předchozí varianty 7, kde je jako materiál vnějšího přebalu použit nástřík z titanu Gr.7. Tato korozně odolná vrstva je přímo nanesena na povrch vnitřního pouzdra z uhlíkové oceli. Tato varianta je závislá na potvrzení velmi korozní odolnosti použitého materiálu VP v podmínkách hlubinného úložiště.



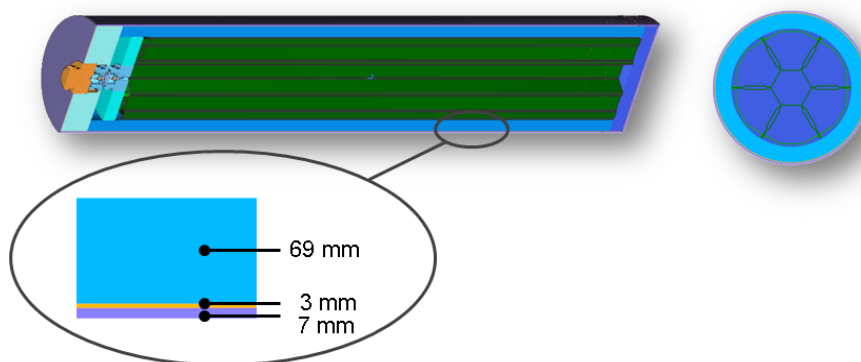
Obr. 50 – UOS varianta 8



## 4.9 Varianta 9

(Vnější přebal – návar / nástřik 678/7mm X65MS (1.8767), VP – trubka 658/69mm X65MS (1.8767) + návar / nástřik 3mm 1.4404)

UOS ve variantě 9 se vyznačuje kompozitní skladbou více vrstev různých materiálů. Každý materiál zajišťuje korozní odolnost v době, kdy může nejlépe odolávat korozním podmínkám nastalým v hlubinném úložišti a chrání tak před korozí podkladové vrstvy. Pevnostní funkci zajišťuje vnitřní pouzdro z uhlíkové oceli, na které je přímo nanesen nástřik korozivzdorné oceli. Tato vrstva z korozivzdorné oceli je poté ještě chráněna vrstvou uhlíkové oceli nanesenou nástřikem. Z pohledu technologie výroby se jedná o velmi náročné řešení.

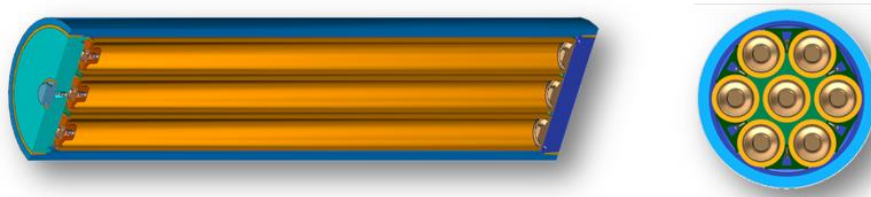


Obr. 51 – UOS varianta 9

## 4.10 Varianta 10

(VO – trubka 813/60 mm mat.X65MS (1.8767), VP – 7x trubka 219,1/22,2 mm mat. 1.4404)

UOS ve variantě 10 je tvořen vnějším obalem z uhlíkové oceli, sedmi vnitřními pouzdry z korozivzdorné oceli a vestavbou taktéž z korozivzdorné oceli zajišťující vzájemnou polohu vnitřních pouzder. Tato varianta je určena výhradně pro vyhořelé palivové soubory z VVER 440. Vnější obal má pevnostní i korozní funkci, čímž zajišťuje ochranu vnitřních pouzder před vnějším prostředím do doby, než v HÚ nastanou podmínky vhodné pro použití korozivzdorné oceli jako vnější bariéry. Každý palivový soubor je uzavřen ve vlastním vnitřním pouzdře. Polotovarem vnitřních pouzder může být vzhledem k menšímu průměru normalizovaná trubka. Vnitřní pouzdra jsou korozně odolná a mají i pevnostní funkci.



Obr. 52 – UOS varianta 10

## 4.11 Varianta 11

(VO – trubka 914/65 mm mat. S355J2H+N, VP – 3x trubka 355,6/40 mm mat. 1.4404)

Jelikož je varianta 11 spolu s variantou 12 favorizovaná varianta její popis je uveden v kapitole 5.1. Zde jsou uvedeny jen proto, aby byla zachována logičnost řazení variant tak, jak byly očíslovány během projektu.

## 4.12 Varianta 12

(VO – trubka 914/65 mm mat. S355J2H+N , VP – 7x trubka 244,5/36 mm mat. 1.4404)

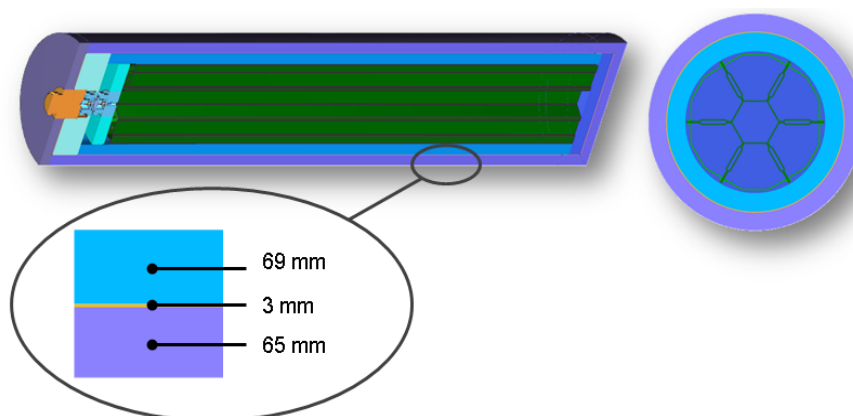
Jelikož je varianta 12 spolu s variantou 11 favorizovaná varianta její popis je uveden v kapitole 5.1. Zde jsou uvedeny jen proto, aby byla zachována logičnost řazení variant tak, jak byly očíslovány během projektu.

## 4.13 Varianta 13

(VO - návlek 788/65mm X65MS (1.8767), VP – trubka 658/69mm X65MS (1.8767) + návar / nástřik 3mm 1.4404)

Ukládací obalový soubor ve variantě 13 se vyznačuje kompozitní skladbou více vrstev různých materiálů. Každý materiál zajišťuje korozní odolnost v době, kdy může nejlépe odolávat korozním podmínkám nastalým v hlubinném úložišti a chrání tak před korozí podkladové vrstvy. Pevnostní funkci zajišťuje vnitřní pouzdro z uhlíkové oceli, na které je přímo nanesen nástřik / návar z korozivzdorné oceli. (Terminologie nástřik / návar vycházející z použité technologie. Principiálně je možné pro nanesení vrstvy nového materiálu na substrát použít technologii navařování i žárového nástřiku.) Toto vnitřní pouzdro je poté chráněno tlustostěnným vnějším obalem z uhlíkové oceli. Mechanické zatížení vnějšího obalu od přetlaku je zachycováno vnitřním pouzdrem, na které se toto zatížení přenáší. Z pohledu technologie výroby se jedná o velmi náročné řešení.

Varianta 13 je uvažována s ohledem na smluvní požadavek SÚRAO, který vyžaduje i zohlednění varianty žárových nástřiků. Varianta 13 tedy patří mezi jedno z uvažovaných technických řešení, které je vhodné v rámci projektového návrhu vhodné zohlednit. Nicméně s ohledem na technickou náročnost tohoto řešení je při současném stavu techniky tato varianta obtížně realizovatelná. Nicméně vývoj nových technických řešení, ke kterým může v budoucnu dojít, může zajistit uplatnitelnost i této koncepce.



Obr. 53 – UOS varianta 13

#### 4.14 Zdůvodnění výběru variant 11 a 12

Postup výběru, a zdůvodnění proč byly vybrány varianty 11 a 12, obsahuje závěrečná zpráva za etapu 3 (Malina et al., 2017).

Hodnoceno bylo celkem pět parametrů: technologičnost výroby VO, technologičnost výroby VP, životnost, cena a náročnost operací v HK. Každé kritérium mělo svou váhu a byly k nim přiřazovány body. Favorizovány poté byly varianty, které dosáhly nejvyššího součtu počtu bodů. Některé informace obsažené ve výběru ze zprávy (Malina et al., 2017) jsou poplatné době, ve které etapa běžela, a některé poznatky jsou dnes již doplněny či překonány dalšími výzkumy, které od té doby proběhly.

## 5 Výsledná koncepce UOS

Jak plyne z předchozí kapitoly 4.14 jako favorizované varianty byly na základě výběru provedeného touto tabulkou vybrány varianty 11 a 12.

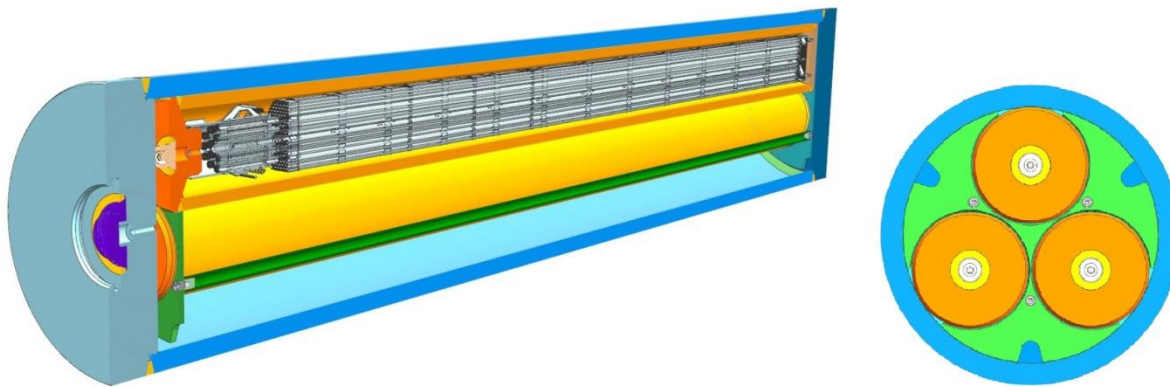
Důvod vzniku varianty 12, ještě vedle varianty 10, je sjednocení průměrů VO varianty 11 a varianty určené pro palivo reaktorů VVER440, což varianta 10 nespĺňovala. Ke sjednocení vnějších průměrů bylo přistoupeno po úvaze, že se tím dosáhne zároveň sjednocení průměrů ukládacích vrtů a tím hypotetické úspore provozních nákladů díky možné unifikaci manipulačních a jiných prostředků, a také možného zjednodušení a zlevnění výroby. Lze předpokládat, že sjednocením průměrů VO nedojde jen k hypotetickému zlevnění zařízení HÚ, ale i ke zefektivnění samotné výroby a tím jejímu zlevnění a zlevnění dodávaných polotovarů, jelikož pro VO bude poptáván a vyráběn pouze jediný polotovar, který bude pouze dělen na patřičné délky dle příslušné varianty. Pakliže by varianty neměly stejný průměr, stoupla by také i cena dodávaných polotovarů.

Z výběru varianty uvedeného v závěrečné zprávě z etapy 3 (Malina et al., 2017) není patrné, že pro palivo VVER440, je z čistě technického pohledu možné prohlásit, že i varianta 2 je rovnocenná k variantám 10 a 12. Varianty 10 a 12 však počítají pro VP s využitím normalizovaných běžně vyráběných trubek, jelikož každý PS je uložen ve vlastním VP, zatímco pro variantu 2, která má jedno VP pro všechny uložené PS trubky takovýchto rozměrů běžně vyráběny nejsou. V případě použití tohoto řešení by bylo nutné, nejprve vyvolat jednání s výrobcem a prosadit zavedení výroby trubek s požadovanými, nenormalizovanými rozměry, což však v budoucnu při dostatečné poptávce nemusí být nutně problém. Kvůli absenci normalizovaných polotovarů a sjednocení vnějších průměrů VO byla v rámci projektu dána přednost variantám 11 a 12.

Jelikož je nyní po výběru dvou variant možné opustit současné označování plynoucí ze všech 13 variant budou se dále v textu objevovat následovně: varianta 12 jako UOS ŠKODA 440/7 a to proto, že je to varianta určená pro 7 PS vyhořelého jaderného paliva z reaktorů VVER440 a varianta 11 jakožto UOS ŠKODA 1000/3 protože se jedná o variantu určenou pro 3 PS vyhořelého jaderného paliva z reaktorů VVER 1000.

### 5.1 Varianta 11 – UOS ŠKODA 1000/3

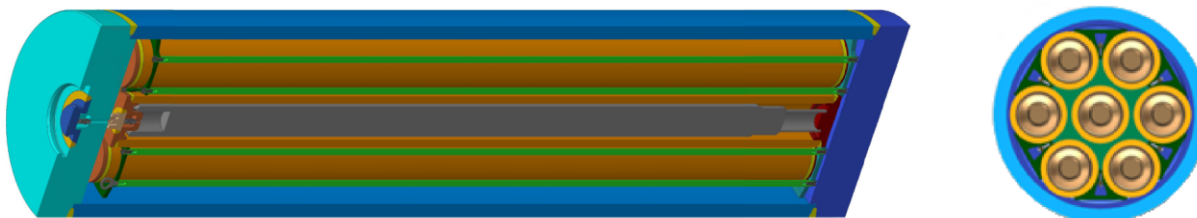
Tato varianta (Obr. 54) ukládacího obalového souboru je koncepčně shodná s variantou 10, která byla navržena jako jedna z variant UOS, ale na rozdíl od ní, je tato určena pro vyhořelé palivové soubory z reaktorů VVER 1000. Varianta byla zpracována pouze z důvodu ověření možnosti použití tohoto koncepčního řešení i pro palivo z reaktorů VVER 1000, které má větší půdorys i celkovou délku. V rámci dalšího hodnocení je potřeba na tuto skutečnost brát zřetel. Z důvodu větších rozměrů palivových souborů pro reaktory VVER 1000 obsahuje jeden ukládací obalový soubor 3 vnitřní pouzdra.



Obr. 54 – UOS ŠKODA 1000/3 (celková délka UOS – 5205 mm; celkový průměr UOS – 914 mm)

## 5.2 Varianta 12 – UOS ŠKODA 440/7

Ukládací obalový soubor varianta 12 (Obr. 55) je optimalizovaný návrh vycházející z varianty 10. UOS varianta 12 je tvořena vnějším obalem z uhlíkové oceli, sedmi vnitřními pouzdry z korozivzdorné oceli a vestavbou zajišťující vzájemnou polohu vnitřních pouzder. Polotovarem vnitřních pouzder je normalizovaná trubka. Vnitřní pouzdra jsou korozně odolná a mají pevnostní funkci. Pevnost vnitřních pouzder je konzervativně prokázána na rovnoměrný vnější přetlak 20 MPa a pevnostní výpočty jsou shrnuty v kapitole 5.5.3.



Obr. 55 – UOS ŠKODA 440/7 (celková délka UOS – 3790 mm; celkový průměr UOS – 914 mm)

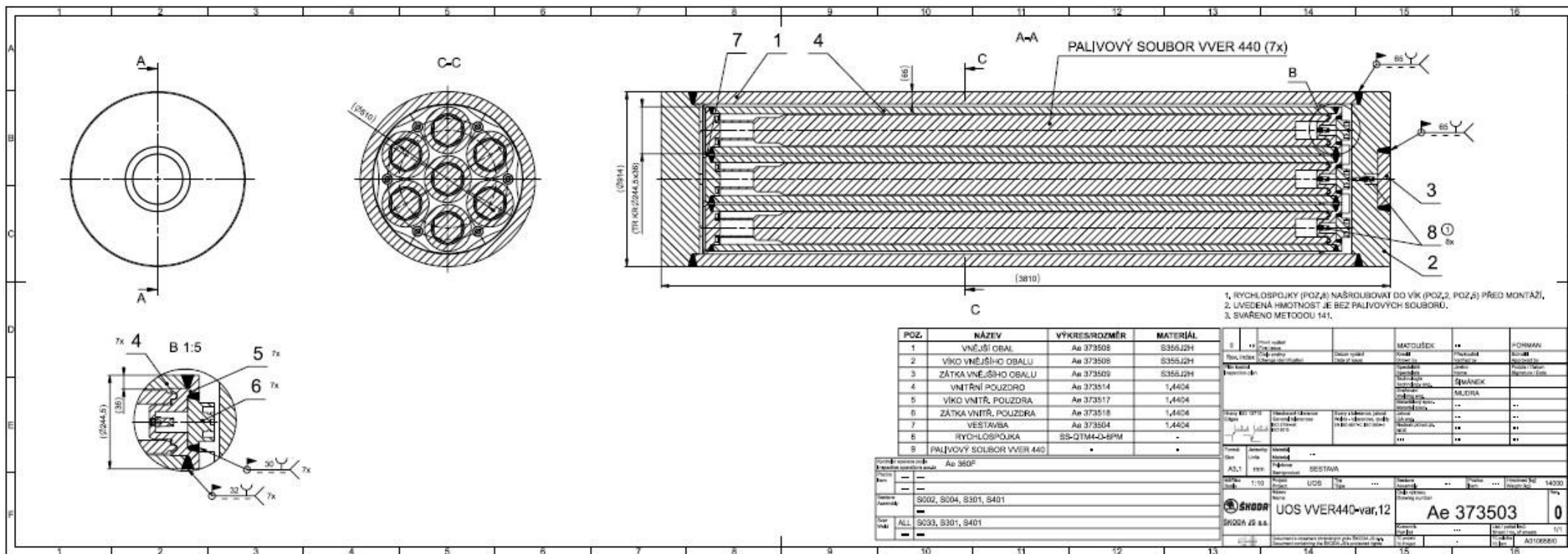
## 5.3 Podrobné konstrukční řešení varianty 12

Protože zadání projektu počítalo s variantou UOS pro VJP z reaktorů VVER440 byla dopodrobna zpracována hlavně varianta 12 tj. UOS ŠKODA 440/7. Pro variantu UOS ŠKODA 1000/7 v době psaní zprávy byl vypracován 3D model, výkres sestavy s kusovníkem a byla podrobena výpočtům. Výrobní výkresy jednotlivých dílů UOS ŠKODA 1000/3 nebyly zatím vypracovány na rozdíl od UOS ŠKODA 440/7. Právě pro variantu UOS ŠKODA 440/7 byla podrobně zpracována dokumentace v podobě výkresu sestavy a kusovníku, výrobních výkresů a byly zpracovány výpočtové zprávy, které prokazují funkčnost a bezpečnost UOS.

Základem konstrukčního řešení UOS ŠKODA 440/7 je výkres sestavy a kusovník, který vychází z 3D modelu. Tento výkres odkazuje na výrobní výkresy jednotlivých dílů UOS,

přičemž výrobní výkresy dílů nejsou v této zprávě uvedeny. 3D model byl dále použit pro výpočty.

Zmenšený výkres sestavy následuje na další stránce jako Obr. 56. Po něm následuje kusovník jako Tab. 22. Dále byl vypracován méně detailní návrh varianty pro palivo VVER 1000, UOS ŠKODA 1000/3 jehož výkres sestavy je na Obr. 57.

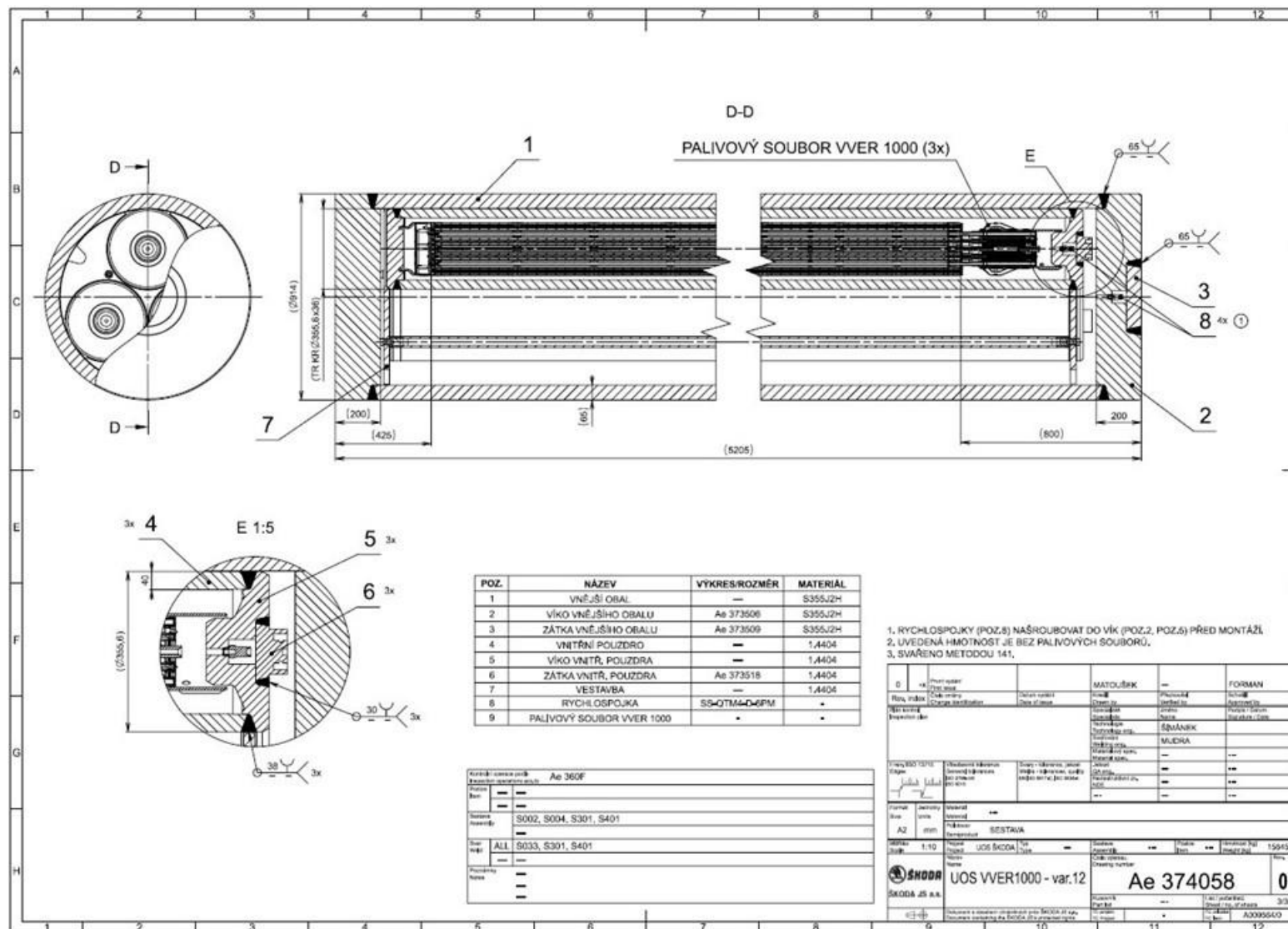


Obr. 56 – Výkres sestavy UOS ŠKODA 440/7

Tab. 22 – Kusovník UOS ŠKODA 440/7

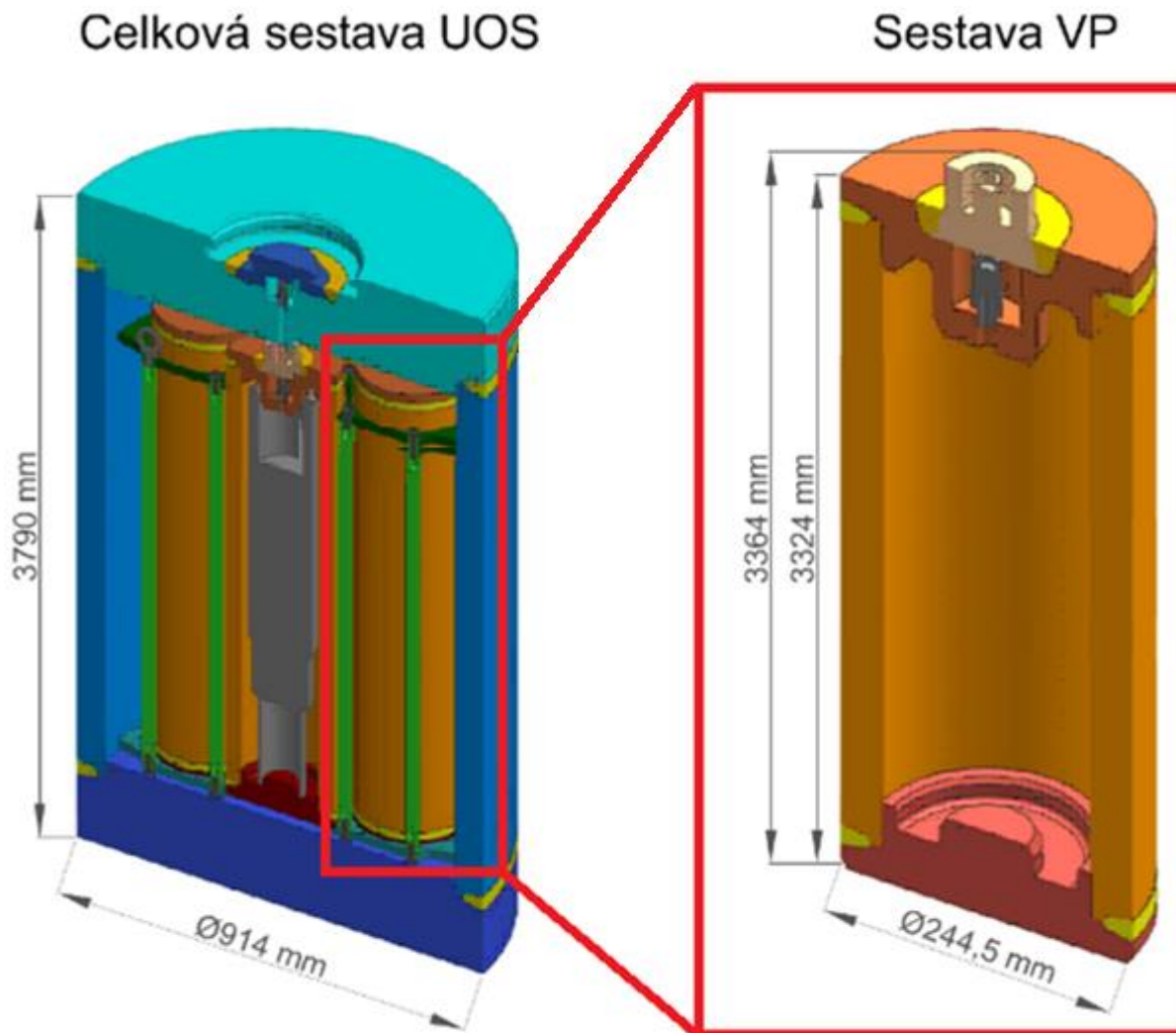
Pozice	Název	Typ	Množství	Výkres	Rozeř	Materiál	Roz. norma	TDP	Dokument kontroly	Výrobce Dodavatel
1	UOS ŠKODA 440/7	SESTAVA	1	Ae 373503						
1/1	VNĚJŠÍ OBAL	PODSESTAVA	1	Ae 373508						
1/1/1	DNO VNĚJŠÍHO OBALU		1	Ae 373505	P210 – KR950	S355J2H		EN 10137-1	EN 10204-3.1	
1/1/2	TĚLO VNĚJŠÍHO OBALU		1	Ae 373507	VÝKOVEK KR924/774-3490	S355J2H		EN 10222-1	EN 10204-3.1	
1/2	VÍKO VNĚJŠÍHO OBALU		1	Ae 373506	P210 – KR950	S355J2H		EN 10137-1	EN 10204-3.1	
1/3	ZÁTKA VNĚJŠÍHO OBALU		1	Ae 373509	P70 – KR310	S355J2H		EN 10137-1	EN 10204-3.1	
1/4	VNITŘNÍ POUZDRO	PODSESTAVA	7	Ae 373514						
1/4/1	DNO VNITŘNÍHO POUZDRA		7	Ae 373515	KR250 - 80	1.4404		EN 10272	EN 10204-3.1	
1/4/2	TĚLO VNITŘNÍHO POUZDRA		7	Ae 373516	TR KR244,5x36 - 3340	1.4404		EN 10297-2	EN 10204-3.1	
1/5	VÍKO VNITŘNÍHO POUZDRA		7	Ae 373517	KR250 - 140	1.4404		EN 10272	EN 10204-3.1	
1/6	ZÁTKA VNITŘNÍHO POUZDRA		7	Ae 373518	KR140 - 75	1.4404		EN 10272	EN 10204-3.1	
1/7	VESTAVBA	PODSESTAVA	1	Ae 373504						
1/7/1	DESKA SPODNÍ		1	Ae 373536	P20 - 788x788	1.4404		EN 10028-7	EN 10204-3.1	
1/7/2	DESKA HORNÍ		1	Ae 373537	P20 - 788x788	1.4404		EN 10028-7	EN 10204-3.1	
1/7/3	VODÍCÍ TYČ		12	Ae 373527	KR30 - 3255	1.4404		EN 10272	EN 10204-3.1	
1/7/4	PODLOŽKA		21		17	A2	ISO 7092		EN 10204-2.1	
1/7/5	ŠROUB		21		M16x40	A2	DIN 6912		EN 10204-2.1	
1/7/6	ZÁVĚSNÝ ŠROUB		3		M16	A2	ISO 3266		EN 10204-2.1	
1/8	RYCHLOSPOJKA		8		SS-QTM4-D-6PM					SWAGELOK





Obr. 57 – Výkres sestavy UOS ŠKODA 1000/3

Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly, základem pro všechny další práce je vyhotovený 3D model UOS. 3D model byl zpracován pro obě varianty jak UOS ŠKODA 440/7 tak UOS ŠKODA 1000/3. Následující Obr. 58 představuje zkrácenou ilustraci celé sestavy UOS ŠKODA 440/7 a detail sestavy jeho VP spolu se základními rozměry.



Obr. 58 – 3D model UOS ŠKODA 440/7 (rozměry bez měřítka)



Oproti maketě UOS, která je předmětem plnění etapy 4, která je v době psaní zprávy stále v běhu, je zde zobrazený 3D model a výkres sestavy v provedení s manipulační drážkou, tzv. „uchopovacím hříbkem“ v jeho horním víku. V rámci etapy 4 bylo na přání SURAO rozhodnuto o odstranění této drážky a víčko překrývající plnicí ventil ve víku UOS bylo změněno tak, že nyní tvoří s víkem UOS jedolitou plochu bez drážek. Koncepce manipulací platná v době etapy 4 s využitím manipulačních drážek nepočítá. Nový design víka UOS, který bude součástí makety je ukázán na Obr. 59.



Obr. 59 – Realistická vizualizace provedení víka UOS

Spolu s rozměry dávají dobrou představu o velikosti UOS hmotnosti jednotlivých dílů i celkové sestavy. Hmotnosti jsou následně velmi důležité pro návrh manipulací s UOS v HÚ. Hmotnosti jednotlivých dílů jsou uvedeny v Tab. 23.

Tab. 23 – Hlavní rozměry hmotnosti jednotlivých dílů UOS, rozměry uvedené v mm, hmotnosti v tabulce jsou v kilogramech, ale pro přehlednost jsou uvedeny bez jednotky

NÁZEV UOS	UOS ŠKODA 1000/3	UOS ŠKODA 440/7
Hlavní rozměry	(VO 914/65; 3xVP 355,6/40; délka UOS 5205 mm)	(VO 914/65; 7xVP 244,5/36; délka UOS 3790 mm)
Náhled – příčný řez UOS		
<b>VNĚJŠÍ OBAL</b>	<b>10092</b>	<b>6473</b>
TĚLO	7550	5466
DNO	1300	1007
VÍKO	1190	965
ZÁTKA	10	10,4
SVARY	42	42
<b>VNITŘNÍ POUZDRO</b>	<b>1579</b>	<b>621,2</b>
TĚLO	1495	609,8
DNO	45	11,8
VÍKO	30	11
VÍČKO, VENTIL	2	10,8
SVARY	7	5
<b>Σ VNITŘNÍCH POUZDER</b>	<b>1579 x 3 ks = 4737</b>	<b>621,2 x 7ks = 4348,4</b>
<b>VNITŘNÍ VESTAVBA</b>	<b>300</b>	<b>247,9</b>
<b>PALIVOVÉ SOUBORY</b>	<b>750 x 3 ks = 2250</b>	<b>(Gd-2M+) 225,4 x 7 ks = 1577,8</b>
<b>Σ UOS+PS</b>	<b>17379 [kg]</b>	<b>12135 [kg]</b>

## 5.4 Technologie výroby UOS

### 5.4.1 Technologie výroby vnějšího obalu

Vnější obal bude vyráběn z uhlíkové oceli S355J2H+N. Skládat se bude z těla a víka, dohromady svařenými obvodovým svarem. Polotovarem pro tělo vnějšího obalu je podélně svařovaná trubka s vnějším průměrem 914 mm a vnitřním průměrem 784 mm, z čehož vyplývá tloušťka stěny trubky 65 mm, a o délce 12000 mm. Atest polotovaru z daného materiálu je uveden v této zprávě jako příloha 1.

Polotovary svařovaných trubek z materiálu S355J2H o průměru 914 mm jsou normalizovány a jejich tloušťky stěny jsou od tloušťky 40 mm odstupňovány po 5 mm. Podle původního odhadu tloušťky stěny, s ohledem na všechny vlastnosti (pevnost, koroze apod.), byla vybrána tloušťka stěny 65 mm. Ačkoli je tato tloušťka normalizována dle ČSN ISO 4200, není běžně prodávána. Aby bylo možné koupit polotovar tloušťky 65 mm, tak by musela být objednána trubka v celé délce 12 m, což nebylo v rámci projektu možné realizovat z ekonomických důvodů. Potřeba byla mnohem kratší délka polotovaru a projekt s nedostupností polotovarů kratších délek na začátku nepočítal. Do budoucna pro výrobu většího množství UOS délka polotovarů nebude podstatná. Z toho důvodu byla objednána trubka o tloušťce stěny 50,8 mm, jejíž kus, kratší než 12 m byl u dodavatele k dispozici. Všechny tloušťky stěny dostupné pro průměr trubky 914 mm viz Tab. 24.

Tab. 24 – Normalizované tloušťky stěny trubek dle ČSN ISO 4200

tloušťka stěny [mm]	4	4,5	5	5,4	5,6	6,3	7,1	8	8,8	10	11	12,5	14,2	16
hmotnost 1 m trubky [kg]	89,8	101	112	121	125	141	159	179	196	223	245	278	315	354
tloušťka stěny [mm]	17,5	20	22,2	25	28	30	32	36	40	45	50	55	60	65
hmotnost 1 m trubky [kg]	387	441	488	548	612	654	696	780	862	964	1065	1165	1264	1361

Z hlediska korozních vzorků se jedná o stejný materiál, vyráběný stejnou technologií, a tak tloušťka stěny nemá žádný vliv na výsledky korozních testů.

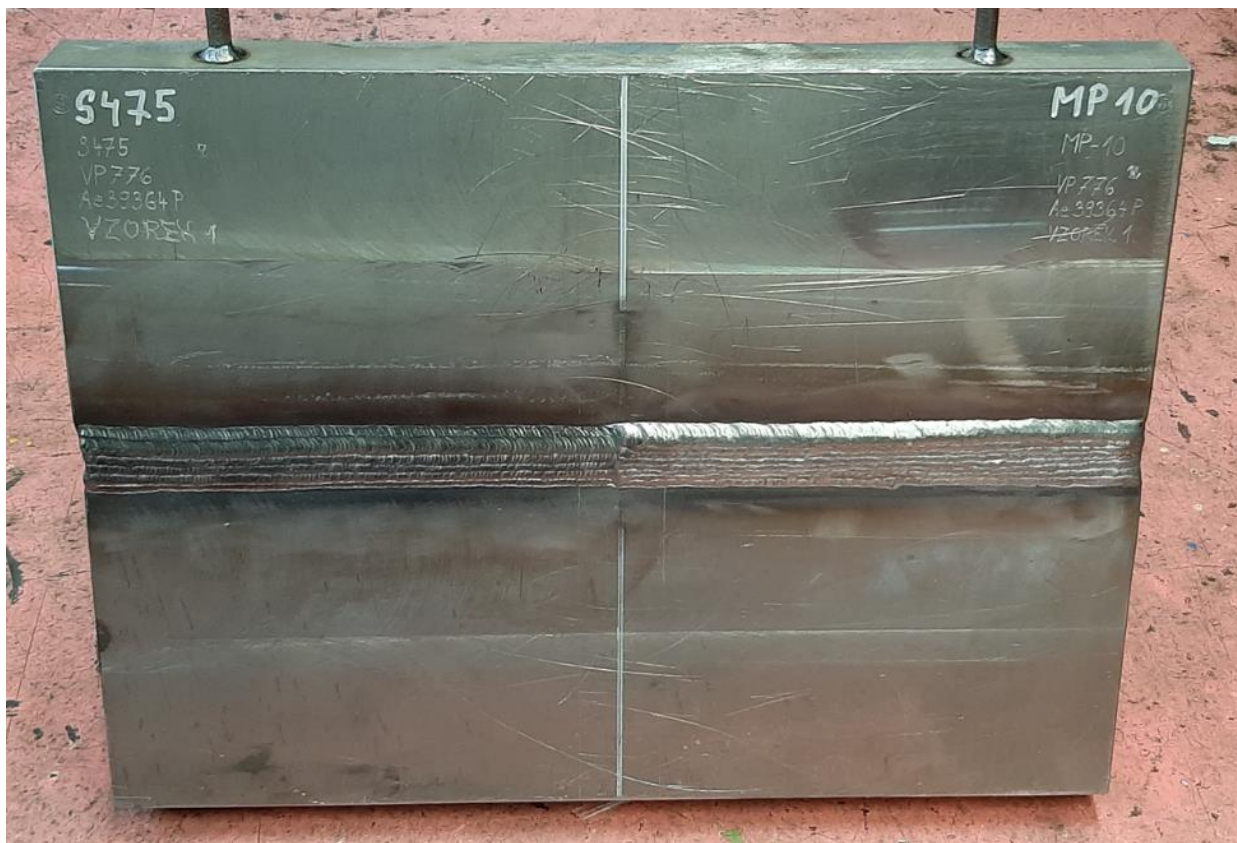
V rámci návrhu svařování vnějšího obalu byl vyroben zkušební vzorek svaru, který je téměř totožný s finálním svarem, který bude spojoval dno vnějšího obalu a tělo vnějšího obalu. Oba svařované díly jsou ze základního materiálu S355J2H.

Bylo rozhodnuto, že bude použita metoda 141 (svařování netavnou wolframovou elektrodou), jelikož je tato metoda vhodná i pro automatizované svařování, které je do budoucna z hlediska svařování v horké komoře nutné. V závěru průběžné technické zprávy za etapu 3 (Malina et al., 2017) je uvedeno, že musí dojít k ověření možnosti aplikace úzkomezerového U svaru, který byl v počátcích projektu pro svařování těla a víka UOS zvažován. Jelikož tato technologie byla teprve vyvíjena, tak v dalším průběhu vývoje se ukázalo, že další pokračování vývoje takové technologie by bylo zcela nad rámec dosavadního VaV projektu a vyžadovalo by projekt zcela separátní, zaměřený pouze na vývoj úzkomezerového U svaru. Z tohoto důvodu bylo ve ŠKODA JS a.s. rozhodnuto o použití v praxi běžně používaného V svaru, neboť tato technologie je ve ŠKODA JS a.s. zcela osvojena a technologie úzkomezerového U svaru pro použití na UOS byla opuštěna. Tato záměna nebude mít na funkci ani bezpečnost UOS vliv. Zkušební svar (Obr. 60

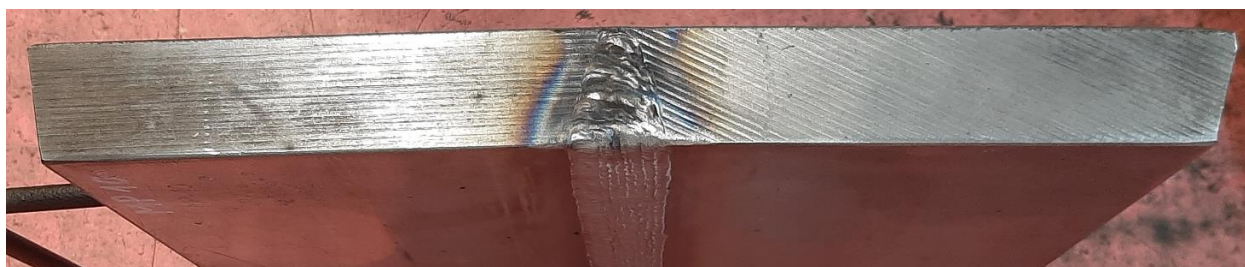
a Obr. 61) byl v tomto případě proveden ručně. Poloha svařování byla vodorovná shora. Svářeči a svářečští operátoři byli kvalifikováni podle EN ISO 9606-1.

Vlastní zkušební svar byl zjednodušen a vyhotoven na rovinných deskách. Aby byly získány rovinné desky, došlo k obrobení válcového polotovaru, a proto mají samotné desky tloušťku 40 mm. Vlastní svar byl pak vyhotoven v hloubce 35 mm.

Pro ověření technologie výroby bude vydána WPQR, která je dle normy ČSN EN ISO15614-1 použitelná pro hloubky svaru od 17,5 do 70 mm. Dle této normy tak lze technologii svařování ověřit na tloušťce materiálu 40 mm a hloubce samotného svaru 35 mm, která přímo neodpovídá finální tloušťce stěny UOS, která je 65 mm.



Obr. 60 – Vyhotovený vzorek svaru vnějšího obalu



Obr. 61 – Vyhotovený vzorek svaru vnějšího obalu

## 5.4.2 Technologie výroby vnitřního obalu

Vnitřní pouzdra budou vyráběna z korozi-vzdorné oceli 1.4404. Skládat se budou, obdobně tak jako vnější obal z těla a víka, které budou dohromady svařeny obvodovým svarem. Polotovarem pro těla vnitřních pouzder je bezešvá trubka o vnějším průměru 244,5 mm a vnitřním průměru 172,5 mm, z čehož vyplývá tloušťka stěny 36 mm. Protože tento rozměr trubky nebyl u žádného dodavatele k dispozici byla zakoupena pro účely tohoto projektu trubka (dutá tyč) ze stejného materiálu a s podobnými rozměry (240/170 mm, tloušťka stěny 35 mm). Atest tohoto polotovaru je uveden v této zprávě jako příloha č. 2.

V rámci návrhu svařování vnitřního obalu byl vyroben zkušební vzorek svaru znázorňující svar mezi dnem vnitřního pouzdra a tělem vnitřního pouzdra. Oba svařované díly jsou ze základního materiálu 1.4404.

V případě svařování vnitřního pouzdra UOS bylo rozhodnuto, že bude použita metoda 141 (svařování netavnou wolframovou elektrodou) a to ze stejného důvodu jako v případě svařování VO viz kapitola 5.4.1. Poloha svařování byla vodorovná shora. Pro svaření zkušebních svarů (Obr. 62 a Obr. 63) bylo v tomto případě užito svařovacího automatu.



Obr. 62 – Vyhotovený vzorek svaru vnitřního pouzdra



Obr. 63 – Vyhotovený vzorek svaru vnitřního pouzdra

## 5.5 Výpočty prokazující funkčnost a bezpečnost UOS

### 5.5.1 Výpočty podkritičnosti

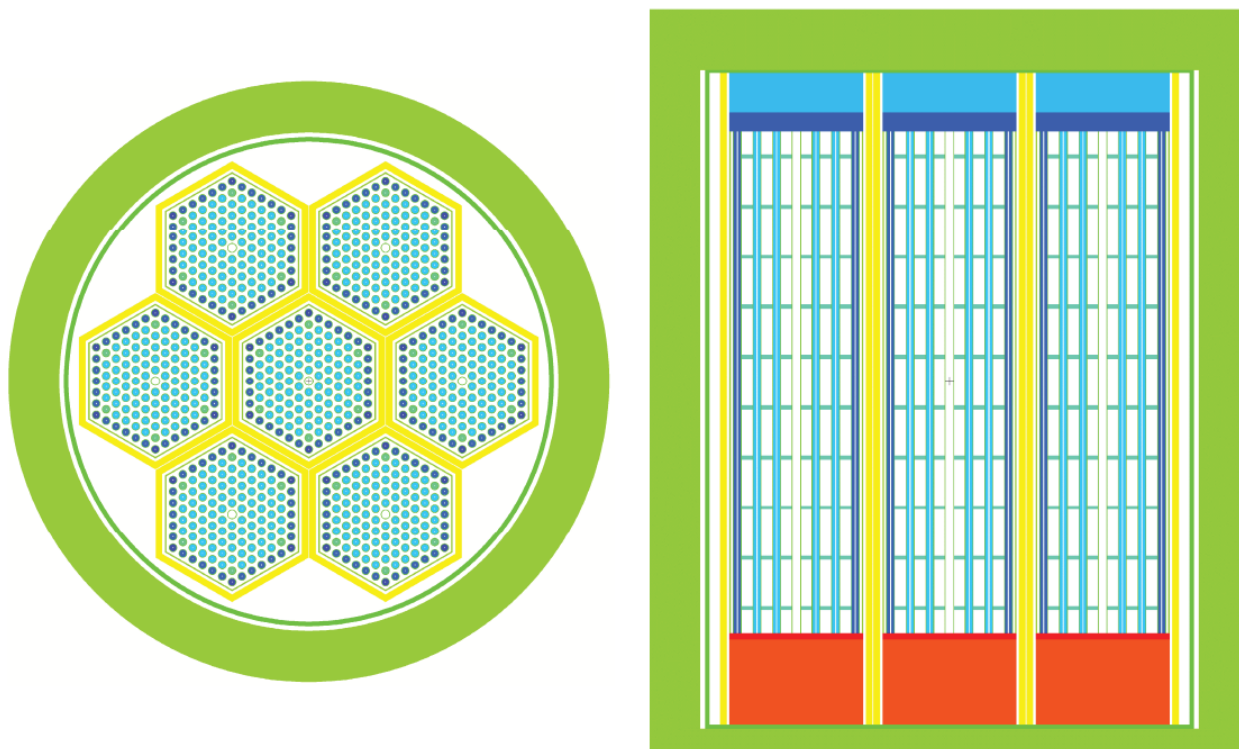
Výpočty podkritičnosti byly zpracovány v rámci etapy 1 ve zprávě (Lovecký, 2014a). Ačkoli od té doby doznal UOS zásadních změn, je stále možné zprávu (Lovecký, 2014a) považovat za relevantní pro prokázání bezpečné podkritičnosti paliva uloženého v UOS. Důvody pro tento předpoklad jsou popsány v následujících odstavcích.

Zpráva uvažovala palivo Gd-2M, které je z paliv pro reaktory VVER440 za podmínek HÚ nejreaktivnější. Konzervativní palivo Gd-2M má střední obohacení 4,38 wt%, palivové proutky s roztečí 1.23 cm jsou čtyř typů s maximálním obohacením 4,6 wt%. V případě BUC bylo uvažováno 25000 MWd/MTU, později bez BUC (Lovecký, 2020b).

Nejdůležitějším faktem, proč lze jmenovanou zprávu stále považovat za relevantní je, že výpočet byl proveden pro předpoklad havarijní situace, kdy dojde k zaplavení HÚ vodou za současného porušení vnějšího obalu, přičemž nedojde k porušení uspořádání vnitřních částí UOS.

Vnitřní uspořádání UOS, které bylo uvažováno ve výpočtové zprávě je vyobrazeno na Obr. 64. Z obrázku je patrné, že tento koncept UOS nepočítal s použitím vnitřního pouzdra z korozivzdorné oceli pro každý PS zvlášť. Vnější průměr takového UOS byl 650 mm oproti současným 914 mm.





Obr. 64 – Vnitřní uspořádání UOS použitého při výpočtech podkritičnosti

Z výše popsaného je vidět, že současná koncepce UOS počítá s větší roztečí mezi jednotlivými PS. Současná rozteč jednotlivých PS je 260 mm a původní ve výpočtové zprávě uvažovaná rozteč PS byla 166 mm.

Pro současnou zachování předpokladů původní zprávy, která uvažuje poškození vnějšího obalu a zaplavení samotných PS vodou, je potřeba v tomto případě uvažovat i porušení hermetičnosti vnitřních pouzder (jelikož v současné koncepci má každý PS svoje VP – je tento předpoklad v praxi krajně nepravděpodobný). Původní zpráva zároveň předpokládala, že vlastní vnitřní geometrie uložení PS se nezmění. Pro samotnou nezměněnou geometrii PS, předpokládanou v původní výpočtové zprávě, lze konstatovat, že VP sice ztratí svou hermetičnost, avšak nedojde zcela k jejich rozpadu.

Z výše uvedených odstavců vyplývá, že hlavní rozdíl mezi současnou koncepcí UOS a koncepcí UOS, pro kterou byl řešen výpočet podkritičnosti je hlavní rozdíl mezi roztečí jednotlivých PS. Ta je v současnosti větší, a tak by výpočet posunula jen na stranu bezpečnosti. Jako další posun na stranu bezpečnosti lze chápat samotná VP jako další dodatečné stínění mezi jednotlivými PS. Z těchto důvodů je možné i v době psaní této zprávy považovat výpočtovou zprávu (Lovecký, 2014a) stále za relevantní.

Použito bylo dvou přístupů. Prvním byl přístup pro čerstvé palivo a druhým byl tzv. Burnup-credit. Legislativní limity jsou splněny pro minimální vyhoření 25000 MWd/MTU (pro Gd-2M+ se středním obohacením 4.38 wt% U-235). V případě nevyužití BUC je požadavek na bórování oceli 5.0 wt% B-nat (nyní už můžeme BUC uvažovat jako schůdný). Toto je výsledek etapy 1 (Kotnour et al., 2015). Ověření finální varianty (Lovecký, 2020b) ukazuje, že podkritičnost vyhovuje i pro čerstvé palivo (0 MWd/MTU) pro uniformní obohacení 5.0 wt% U-235.

## 5.5.2 Výpočty stínění

Výpočty stínění jsou provedeny pro účely ověření koncepce ukládacího obalového souboru pro hlubinné úložiště. Navazují na zprávu (Lovecký, 2014b) provedenou v etapě 1, která popisuje výpočet stínění pro palivo typu Gd-2M a doplňují ji o palivo Gd-2M+.

Výpočet stínění byl proveden pro palivo VVER-440 (Lovecký, 2020a) a VVER-1000 (Gincelová, 2020), pro reaktory VVER-1200 (zvažované ve výpočtu stínění jako referenční pro NJZ) je palivo téměř shodné, proto lze výsledky bez výrazných změn aplikovat i na nové jaderné zdroje.

Cílem bylo určení příkonu dávkového ekvivalentu na povrchu UOS a v jeho okolí v čase uložení UOS do HÚ.

Výpočet stínění byl proveden kódem MCNP6.1 s bodovou knihovnou účinných průřezů ENDF/B-VII.1. Kód MCNP6.1 byl v letech 2012 a 2015 standardizován podle směrnice VDS 030.

UOS pro hlubinné úložiště je určený pro uložení vyhořelého jaderného paliva, které po celou dobu uložení emituje fotony a neutrony. Fotonový a neutronový zdroj ozařuje materiály UOS a ovlivňuje jejich vlastnosti.

Na základě předchozí zprávy výpočtu stínění (Lovecký, 2014) jsou provedeny výpočty stínění pouze v okamžiku uložení UOS do HÚ, časový průběh poklesu PDE je dán poklesem neutronového a fotonového zdroje podle inventáře paliva (Lovecký, 2015a) a (Lovecký, 2015b). Fotonový zdroj z aktivace hlavic a patic je zanedbán, protože jeho vliv na PDE je zanedbatelný (Lovecký, 2014), důvodem je výrazný pokles vydatnosti zdroje Co-60 s poločasem rozpadu 5,27 let během uvažované doby skladování paliva v SVP (65 let).

Ukládací obalový soubor je podle české legislativy OS typu D, pro který nejsou stanoveny limity PDE. Přesto jsou ověřeny 3 limity PDE:

1. limit 1 Gy/h na povrchu UOS na rozhraní obálka-bentonit (Werme, 1998), (Raiko, 2005), aby nedocházelo k radiolýze vody ani ke změnám bentonitu (výpočty PDE uvedeny v jednotkách Sv/h; které jsou pro spektrum zdrojů pro UOS konzervativní).
2. limit 2E-03 Sv/h na povrchu UOS v oblasti víka, přepravní limit PDE podle Vyhlášky č. 379/2016 Sb. volen z důvodu manipulace UOS před uložením v HÚ.
3. limit 1E-04 Sv/h ve vzdálenosti 2 m od UOS v oblasti víka, přepravní limit PDE podle Vyhlášky č. 379/2016 Sb. je volen z důvodu manipulace UOS před uložením v HÚ. Konzervativně je vnější povrch dopravního prostředku v přepravním limitu PDE nahrazen povrchem UOS.

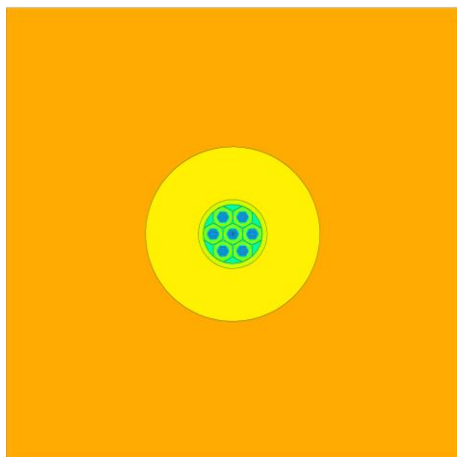
Výpočet stínění UOS ŠKODA-440/7 s palivem Gd-2M+ s vyhořením 65000 MWd/MTU metodicky navazuje na výpočet stínění UOS ŠKODA-440/7 pro palivo Gd-2M (Lovecký, 2014), vstupem pro výpočty je inventář UOS (Lovecký, 2015a) a výpočetní model analogický výpočtu podkritičnosti UOS (Lovecký, 2015c).

Výpočet stínění UOS ŠKODA-1000/3 s palivem TVSA-T s obohacením 5,0 wt% U-235 a vyhořením 65000 MWd/MTU metodicky navazuje na výpočet stínění UOS ŠKODA-440/7 pro palivo Gd-2M+ (Lovecký, 2014), vstupem pro výpočty je inventář UOS (Lovecký, 2015b) a výpočetní model analogický výpočtu podkritičnosti UOS (Lovecký, 2015d).

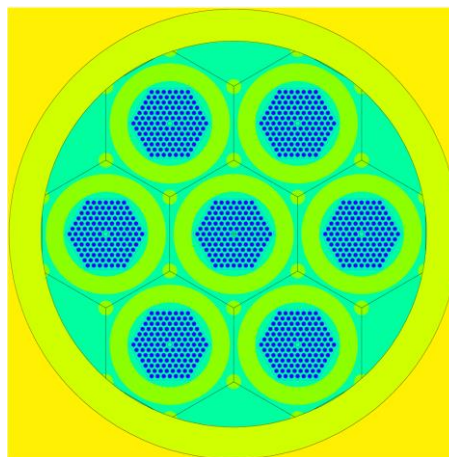
### 5.5.2.1 Výpočetní model stínění

Kapitola obsahuje popis UOS ŠKODA-440/7 a UOS ŠKODA 1000/3, které vstupují do výpočtů stínění. Výpočet řeší situaci v ukládacím vrtu HÚ, nikoliv v rámci transportu a manipulace v HÚ (Lovecký, 2014b) (Lovecký, 2020).

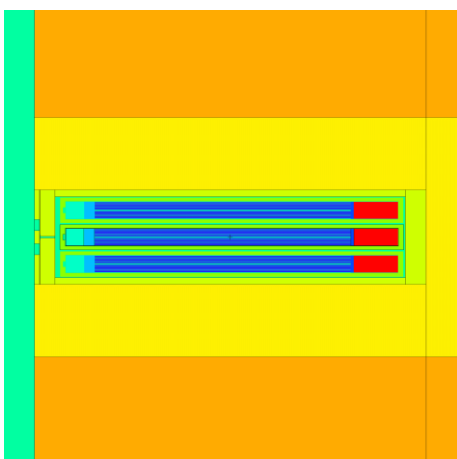
Výpočtové modely obou variant vychází ze sestav viz Obr. 56 a Obr. 57. Průřezy 3-D výpočtovými modely v osách xy a xz viz Obr. 65 a Obr. 66. Zrcadlová hraniční podmínka ve vzdálenosti 300 cm od osy OS modeluje umístění nekonečné mříže UOS s roztečí horizontálních chodeb 6 m. Během ukládání v masivu z granitu je UOS obklopen cylindrickou vrstvou z bentonitu tloušťky 70 cm. Při horizontálním uložení je za dnem UOS modelováno 70 cm bentonitu (dostačující pro rozptylové reakce zdrojových částic při výpočtu stínění), před víkem UOS je konzervativně uvažován pouze vzduch. Ve skutečnosti bude při horizontálním ukládání před víko umístěna zátka. Vnitřní vestavba tělesa UOS dále pak dno, víko a stěna tělesa UOS jsou modelovány zjednodušeně tj. bez oříznutí, úchytů, šroubů a svarů.



a) rovina xy, celý model



b) rovina xy, detail UOS

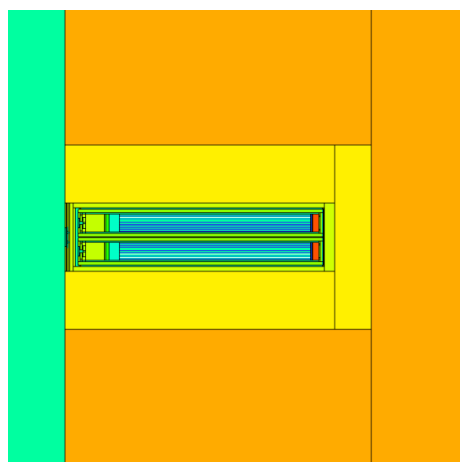
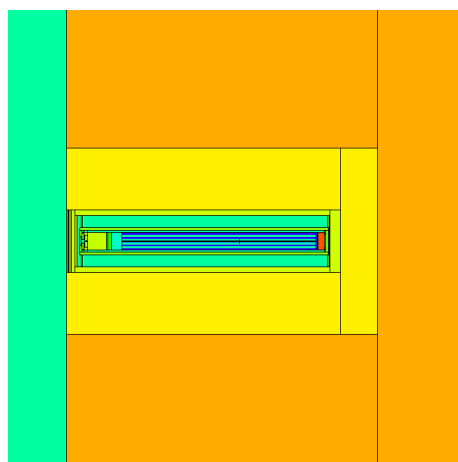
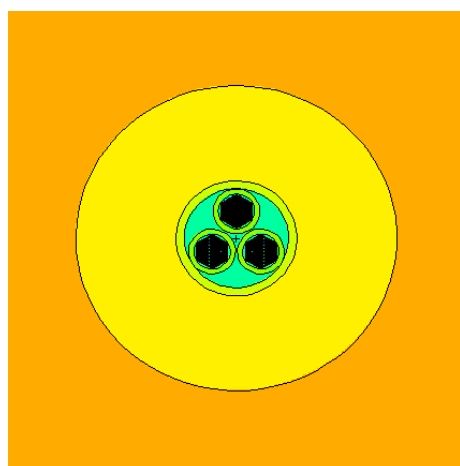
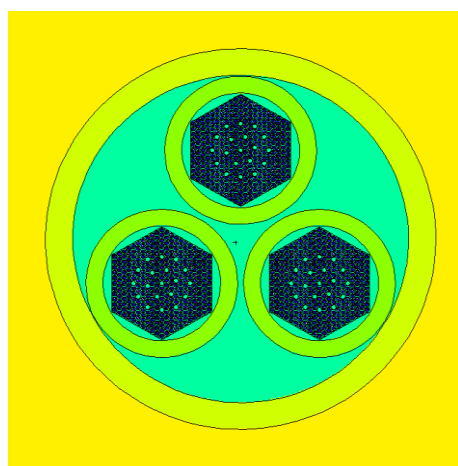


c) rovina xz

Obr. 65 – Výpočetní model stínění UOS ŠKODA 440/7, kód MCNP6.1

Tab. 25 – Geometricko-materiálové charakteristiky UOS ŠKODA 440/7

Parametr	Hodnota
Rozteč PS v UOS [cm]	26,0
Vnitřní průměr trubky [cm]	17,25
Vnější průměr trubky [cm]	24,45
Vnitřní průměr vnější obálky [cm]	78,4
Vnější průměr vnější obálky [cm]	91,4
Průměr rozhraní granit-bentonit [cm]	231,4
Rozteč mezi UOS [cm]	600,0
Výška UOS [cm]	379,0
Tloušťka dna UOS [cm]	20,0
Tloušťka víka UOS [cm]	20,0

a) rovina xz ( $y = -10,65 \text{ cm}$ )b) rovina xz ( $y = 21,30 \text{ cm}$ )c) rovina xy ( $z = 150 \text{ cm}$ )d) rovina xy ( $z = 150 \text{ cm}$ )

Obr. 66 – Výpočetní model stínění UOS ŠKODA 1000/3, kód MCNP6.1

Tab. 26 – Geometricko-materiálové charakteristiky UOS ŠKODA 1000/3

Parametr	Hodnota
Vnitřní průměr vnitřního pouzdra [cm]	27,56
Vnější průměr vnitřního pouzdra [cm]	35,56
Výška vnitřního pouzdra [cm]	471,9
Vnitřní průměr vnější obálky [cm]	78,4
Vnější průměr vnější obálky [cm]	91,4
Průměr rozhraní granit-bentonit [cm]	161,4
Rozteč mezi UOS [cm]	600,0
Výška PS [cm]	457,0
Výška UOS [cm]	520,5
Tloušťka dna vnitřního pouzdra [cm]	7,5
Tloušťka víka vnitřního pouzdra [cm]	14,00
Tloušťka dna UOS [cm]	20,0
Tloušťka víka UOS [cm]	20,0

Axiální a radiální průběhy PDE ve vyšetřovaných bodech formou grafů v přehledné tabulce pro obě varianty UOS viz Tab. 31. Hodnoty PDE ve vybraných bodech pro variantu UOS ŠKODA 440/7 viz Tab. 27 a pro variantu UOS ŠKODA 1000/3 viz Tab. 28, s výjimkou výpočetních bodů ve vzduchu (tj. nad víkem UOS) jsou dominantní složkou PDE primární fotony (gg) a neutrony (nn), sekundární fotony (ng) jsou zanedbatelné.

Výpočetní body důležité z hlediska porovnání s limity definovanými v úvodní kapitole viz Tab. 29 pro variantu UOS ŠKODA 440/7 a Tab. 30 pro variantu UOS ŠKODA 1000/3.

Výpočet stínění obou variant UOS je proveden na základě velmi konzervativních předpokladů. Vyjádření výsledků na více platných ciferech je provedeno z důvodu srovnání výpočtů s předchozími analýzami a jinými typy paliva. Statistická nejistota Monte Carlo výpočtu se v oblasti maximálních hodnot PDE pohybuje na úrovni okolo 1 % a ve srovnání s hlavní výpočetní nejistotou, neurčitostí jaderných dat, je zanedbatelná. V rámci validace výpočetního kódu MCNP6.1 byla pro různé typy úloh ověřena shoda mezi benchmarkovými experimenty a výpočty do 20 % (neurčitost pro úlohy stínění akceptovaná NRC). Mezi výrobní neurčitosti, které mají vliv na výpočet stínění, patří především tloušťka stěny UOS, která je navrhována s ohledem na pevnostní a životnostní charakteristiky UOS, při výrobě nebudou dovoleny tolerance pro nižší tloušťku a výpočet proto zůstane konzervativní. Každých 5 mm tloušťky stěny UOS sníží PDE na povrchu UOS o cca 30 %. Největší nejistota výpočtu je zahrnuta ve vydatnosti fotonového zdroje, který je závislý na dosaženém vyhoření paliva a reálné době chlazení. Výpočet je velmi konzervativně proveden pro vyhoření 65000 MWd/MTU, většina zaváženého paliva bude mít vyhoření okolo 50000 MWd/MTU, tj. zdroj o cca 25 % nižší. Vliv doby chlazení je závislý na způsobu provozu HÚ. V závislosti na rychlosti ukládání paliva do HÚ se bude měnit doba chlazení paliva před jeho vložením do HÚ. Když bude v jednom roce zavezeno všechno palivo do HÚ, bude doba chlazení paliva nižší, než když palivo do HÚ bude zaváženo postupně (třeba od paliva s nejnižším tepelným výkonem). Až do doby chlazení 150 let se vydatnost fotonového zdroje snižuje každých pět let o cca 10 %. Pro vyšší doby chlazení je pokles méně výrazný.

Tab. 27 – PDE UOS ŠKODA-440/7 ve vybraných bodech

Radiální pozice	Axiální pozice	gg [Sv/h]	nn [Sv/h]	ng [Sv/h]	tot [Sv/h]
Osa UOS	Dno UOS (spodní hrana)	4,936E-07	7,909E-07	1,793E-08	1,302E-06
	Dno UOS (horní hrana)	6,480E-03	3,170E-06	1,167E-08	6,483E-03
	Maximum	2,320E+02	3,347E-04	1,158E-06	2,320E+02
	Víko UOS (spodní hrana)	1,074E-02	4,446E-06	1,764E-08	1,075E-02
	Víko UOS (horní hrana)	1,580E-05	6,181E-07	9,351E-10	1,642E-05
	2 m od UOS	9,894E-07	4,406E-08	4,923E-10	1,034E-06
Vybrání pro čep víka	Povrch víka UOS	9,076E-06	1,012E-06	1,880E-09	1,009E-05
	2 m od UOS	8,593E-07	3,644E-08	3,245E-10	8,961E-07
Rozhraní obálka-bentonit	Dno UOS (spodní hrana)	3,651E-07	2,446E-07	1,044E-08	6,202E-07
	Dno UOS (horní hrana)	1,709E-05	1,191E-06	2,324E-08	1,830E-05
	Maximum	2,698E-01	6,130E-05	1,106E-06	2,699E-01
	Víko UOS (spodní hrana)	1,071E-04	1,216E-06	3,383E-08	1,083E-04
	Víko UOS (horní hrana)	2,320E-06	2,229E-07	6,110E-09	2,549E-06
	2 m od UOS	1,468E-06	1,706E-08	1,240E-09	1,486E-06
Maximum Obálka UOS (vnitřní průměr)	Polovina výšky UOS	2,185E+02	3,380E-04	2,354E-06	2,185E+02
		7,288E+00	9,554E-05	3,529E-07	7,289E+00
		2,698E-01	6,130E-05	1,106E-06	2,699E-01
Rozhraní bentonit-granit		3,212E-05	1,884E-08	1,860E-08	3,216E-05
Maximum Obálka UOS (vnitřní průměr)	Víko UOS (horní hrana)	1,580E-05	6,181E-07	9,351E-10	1,642E-05
		3,829E-07	3,599E-07	1,930E-09	7,448E-07
		2,920E-06	2,172E-07	5,070E-09	3,142E-06
Rozhraní bentonit-granit		2,144E-07	1,180E-09	7,892E-10	2,163E-07

Tab. 28 – PDE UOS ŠKODA 1000/3 ve vybraných bodech,

Radiální pozice	Axiální pozice	gg [Sv/h]	nn [Sv/h]	ng [Sv/h]	tot [Sv/h]
Osa UOS	Dno UOS	6,483E-08	4,602E-04	1,062E-05	4,709E-04
	Maximum	1,516E+01	6,057E-02	1,480E-04	1,522E+01
	Víko UOS (spodní hrana)	8,929E-04	2,637E-04	1,339E-06	1,158E-03
	Víko UOS (horní hrana)	2,808E-06	4,448E-05	7,727E-08	4,736E-05
	2 m od UOS	2,554E-08	9,424E-10	1,028E-09	2,751E-08
Rozhraní obálka-bentonit	Dno UOS	9,323E-06	1,846E-04	7,778E-06	2,017E-04
	Maximum	2,147E-01	1,542E-02	2,130E-04	2,303E-01
	Víko UOS (spodní hrana)	4,278E-06	9,802E-05	2,410E-06	1,047E-04
	Víko UOS (horní hrana)	3,828E-08	1,666E-05	3,550E-07	1,705E-05
	2 m od UOS	8,170E-09	2,097E-06	3,137E-08	2,137E-06

Radiální pozice	Axiální pozice	gg [Sv/h]	nn [Sv/h]	ng [Sv/h]	tot [Sv/h]
Maximum	Polovina výšky UOS	1,089E+02	7,656E-02	2,283E-04	1,090E+02
Vnitřní obálka UOS (vnitřní průměr)		6,024E+00	3,827E-04	1,065E-04	6,024E+00
Rozhraní obálka-bentonit		1,905E-01	2,068E-04	2,060E-04	1,909E-01
Rozhraní bentonit-granit		2,995E-05	4,221E-04	4,217E-04	8,737E-04
Obálka UOS (vnitřní průměr)	Víko UOS (horní hrana)	1,532E-08	2,976E-07	1,069E-07	4,198E-07
Rozhraní obálka-bentonit		3,352E-08	2,063E-07	3,453E-07	5,851E-07
Rozhraní bentonit-granit		3,060E-09	8,548E-09	4,770E-08	5,931E-08

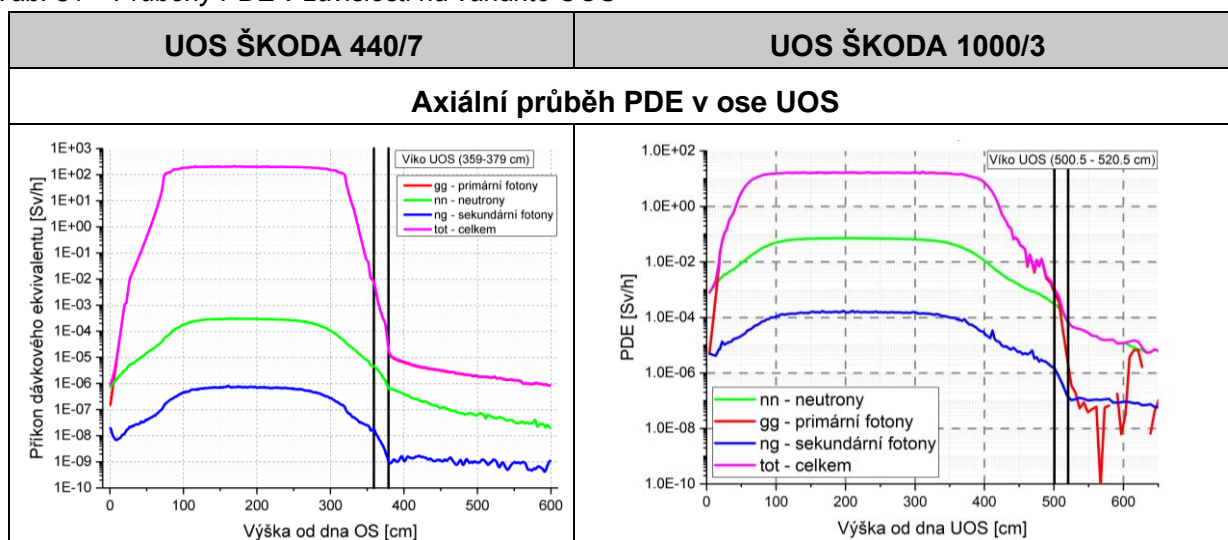
Tab. 29 – UOS ŠKODA 440/7 příkon dávkového ekvivalentu a čerpání limitů.

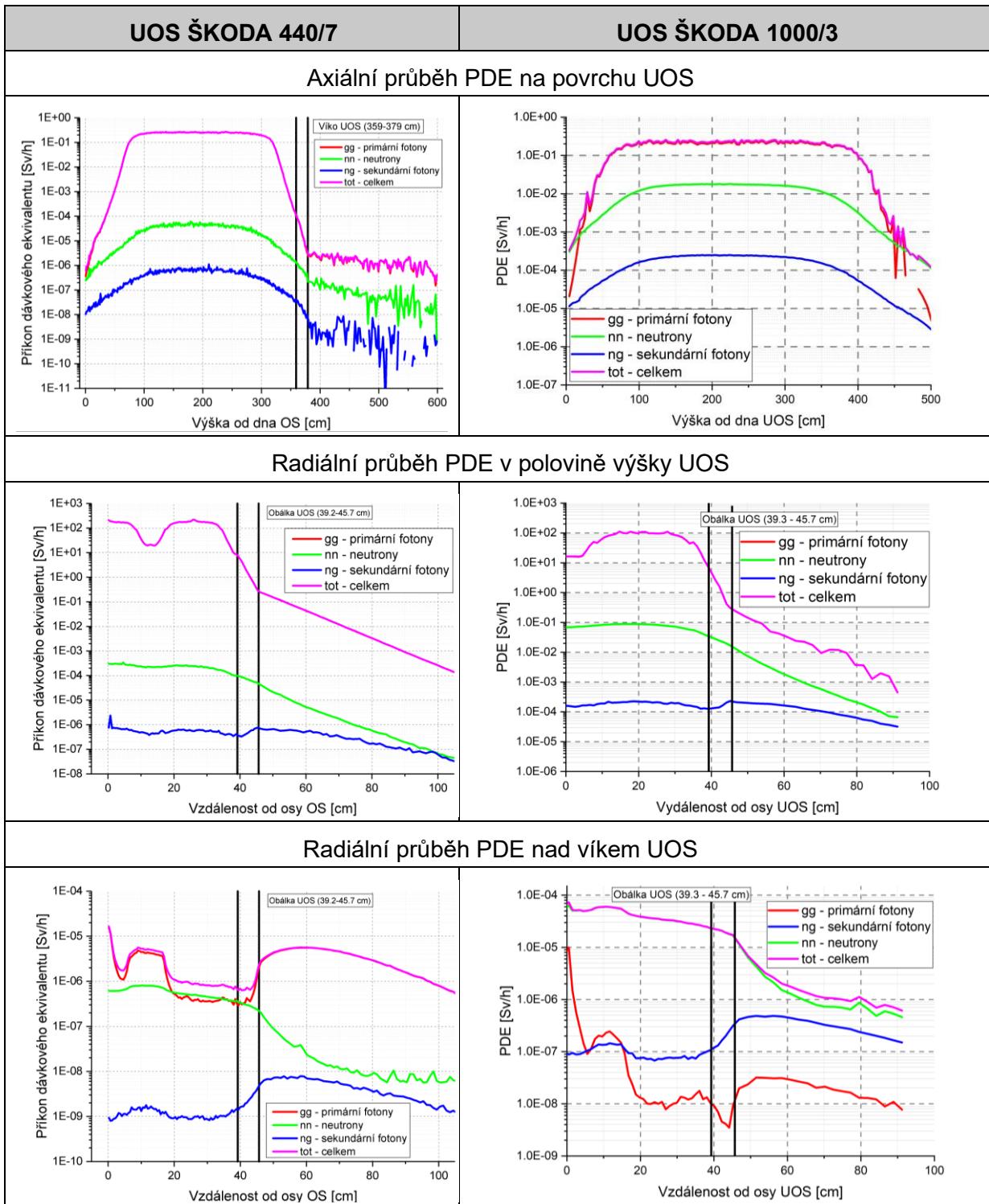
Radiální pozice	Axiální pozice	PDE [Sv/h]	Limit [Sv/h]	PDE [% limitu]
Osa UOS	Povrch víka UOS	1,642E-05	2,0E-03	0,8
Rozhraní obálka-bentonit	Maximum	2,699E-01	1,0E+00	27,0
Rozhraní obálka-bentonit	2 m od UOS	1,486E-06	1,0E-04	1,5

Tab. 30 – UOS ŠKODA 1000/3 příkon dávkového ekvivalentu a čerpání limitů.

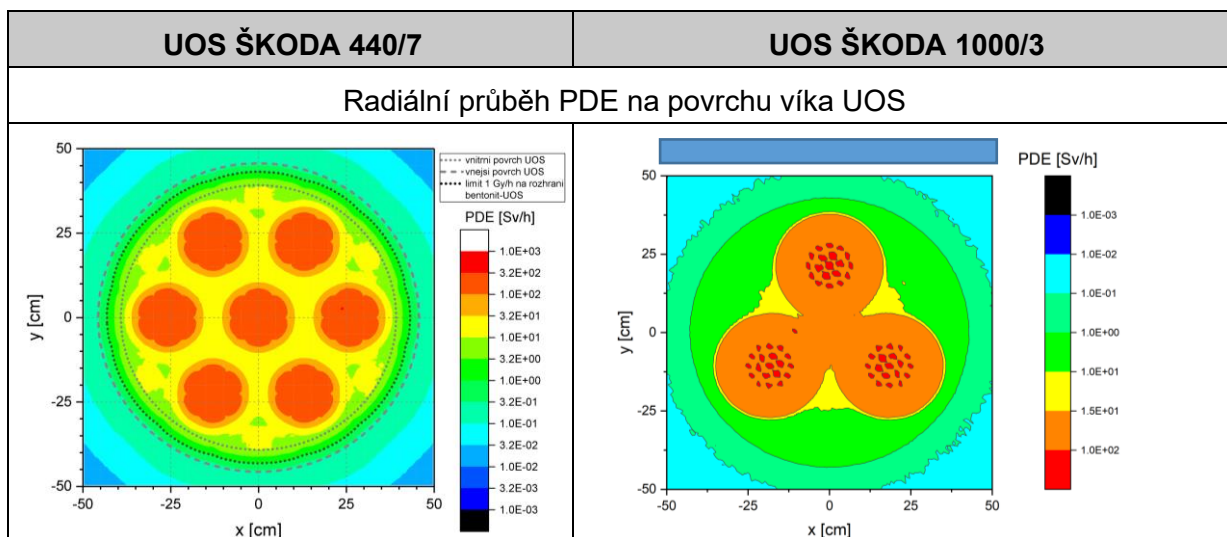
Radiální pozice	Axiální pozice	PDE [Sv/h]	Limit [Sv/h]	PDE [% limitu]
Osa UOS	Víko UOS (horní hrana)	4,736E-05	2,000E-03	2,37
Rozhraní obálka-bentonit	Maximum	2,303E-01	1,000E+00	23,03
Rozhraní obálka-bentonit	2 m od UOS	2,137E-06	1,000E-04	2,14

Tab. 31 – Průběhy PDE v závislosti na variantě UOS









### 5.5.2.2 Závěr výpočtů stínění

Ve zprávě je proveden výpočet stínění paliva VVER-440 a VVER-1000 pro ukládací obalové soubory pro hlubinné úložiště UOS ŠKODA 440/7 a UOS ŠKODA 1000/3. Výpočty byly provedeny kódem MCNP6.1. Konzervativně jsou provedeny pro palivo VVER-440 s obohacením 4,38 wt% a pro palivo VVER-1000 s obohacením 5,0 wt% se zdroji pro vyhoření 65000 MWd/MTU po předchozím chlazení 65 let. Doba chlazení odpovídá času uložení UOS do HÚ.

Časový průběh poklesu PDE během uložení paliva v UOS je dán poklesem neutronového a fotonového zdroje podle inventáře paliva (Lovecký, 2015a) a (Lovecký, 2015b). Inventář paliva Gd-2M+ je konzervativní variantou i pro budoucí paliva EDU s vyšším obohacením za předpokladu, že dosažené vyhoření bude pod uvažovanou hodnotou 65000 MWd/MTU. Inventář paliva VVER-1000 typu TVSA-T je konzervativní variantou i pro budoucí paliva ETE.

Ukládací obalový soubor je podle české legislativy OS typu D, pro který nejsou stanoveny limity PDE. Přesto byly ověřeny 3 limity PDE.

Pro UOS ŠKODA 440/7:

Výpočet stínění, splňuje limity na povrchu UOS a ve vzdálenosti 2 m od povrchu. Na povrchu UOS je  $1,642\text{E}-05$  Sv/h a limit je čerpán z 0,8 %, ve 2 m od UOS je  $1,486\text{E}-06$  Sv/h a čerpání limitu je 1,5 %. Na rozhraní obálka-bentonit, kde je ověřován limit 1 Gy/h pro zabránění radiolýzy vody, je hodnotou  $2,699\text{E}-01$  Sv/h limit čerpán z 27 %, což je stále s výraznou rezervou bezpečně pod cílovým limitem.

Pro UOS ŠKODA 1000/3:

Výpočet stínění splňuje limity na povrchu UOS a ve vzdálenosti 2 m od povrchu. Na povrchu víka v ose UOS je  $4,736\text{E}-05$  Sv/h a limit je čerpán z 2,37 %, ve 2 m od UOS na rozhraní obálka-bentonit je  $2,137\text{E}-06$  Sv/h a čerpání limitu je 2,14 %. Na rozhraní obálka-bentonit, kde je ověřován limit 1 Gy/h pro zabránění radiolýzy vody, je hodnotou  $2,303\text{E}-01$  Sv/h limit čerpán z 23,03 %, což je stále s výraznou rezervou bezpečně pod cílovým limitem.

### 5.5.3 Pevnostní výpočty

Pevnostní výpočet je jedním z nejdůležitějších provedených výpočtů, neboť dohromady s korozními modely umožňuje odhad životnosti UOS. Celý pevnostní výpočet je popsán ve zprávě (Jeník, 2020).

Vzhledem k neurčitosti vnějších vlivů, kterým bude UOS vystaven je vhodné přistoupit k návrhu konstrukce tak, že špičkové hodnoty napjatostí kdekoli v konstrukci UOS jsou v rozumné vzdálenosti pod limitní hodnotou. Čímž přirozeně dojde k tomu, že střední hodnota napjatostí má dostatečnou rezervu vůči limitní hodnotě. K optimalizaci tloušťky konstrukčních materiálů je doporučeno přistoupit pouze v případech, kdy budou známy přesné zatěžovací vlivy po celou dobu životnosti sledované konstrukce a v neposlední řadě bude znám detailní materiálový popis podložený experimenty, a to i s ohledem na životnost.

Co se stanovení tloušťky stěny UOS týče, nejprve byla stanovena vhodná tloušťka použitých materiálů s ohledem na mechaniku bez korozního přídávku, avšak s ohledem na realizaci nákupu finálního polotovaru, následně byl přidán korozní přídavek.

#### 5.5.3.1 Materiálové parametry vnějšího obalu

Model UOS obou variant vstupující do výpočtů je hodnocen z hlediska pevnostní odolnosti ve stavu po odkorodování 15 mm povrchové vrstvy VO a 5 mm povrchové vrstvy VP. Proto lze konstatovat, že se nejedná o návrhový, počáteční stav ale o stav, kdy již mechanické vlastnosti materiálu jsou plně využívány. Z tohoto důvodu je k hodnocení UOS přistoupeno z hlediska kolapsu s uvážením elasto-plastického chování použitého materiálu.

Pro tento účel byl stanoven a experimentálně ověřen model plasticity a model tvárného porušení základního materiálu S355J2H a jeho svarového spoje. Tyto související realizované experimenty, provedené ve fázi přípravy dat pro výpočetní model, bylo účelné provést pro získání popisu plasticity a plochy poškození pro oblast svarového spoje, přechodové oblasti a základního materiálu. V rámci těchto činností byl proveden návrh zkušebních těles. Návrh byl proveden s ohledem na tvar zkoušené oblasti svarového spoje. Tvar zkušebních těles byl navržen tak, aby byl vhodný pro popsání a vyhodnocení akumulované intenzity plastické deformace při porušení, v závislosti na hodnotě triaxility a na Lodeho parametru. Výše zmíněné činnosti byly provedeny ve čtyřech etapách.

- I. Návrh zkušebních těles
- II. Metalografická analýza svarového spoje
- III. Měření mechanických vlastností
- IV. Návrh materiálového modelu

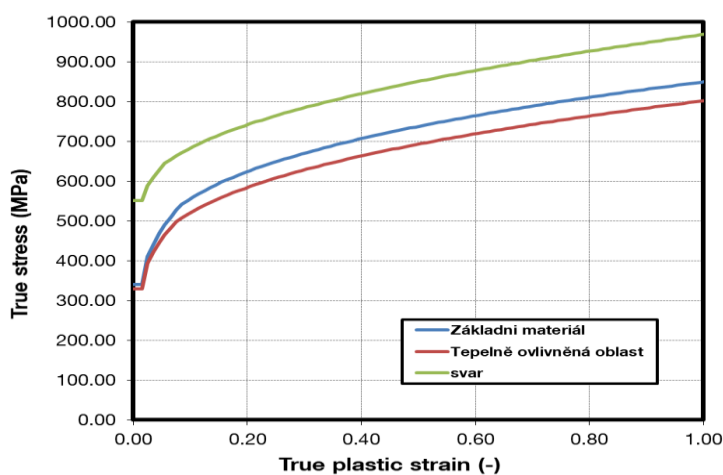
Byl proveden návrh zkušebních těles, jejichž tvar a velikost byly navrženy s ohledem na zkoušené oblasti základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti v blízkosti svaru a vlastního svaru. Pro vlastní měření materiálových vlastností byly navrženy speciální mikro vzorky, se kterými byl sledován krom jiného i vliv anizotropie materiálu. Zároveň byly připraveny i makro vzorky základního materiálu, které byly použity pro ověření získaných mechanických vlastností z mikro vzorků.

Účelem provedení metalografické analýzy, bylo stanovit rozsah tepelně ovlivněné oblasti v blízkosti svarového spoje. Dalším důležitým důvodem metalografické analýzy bylo proměření

tvrdosti celého svarového spoje, a to včetně tepelně ovlivněné oblasti a včetně přilehlé oblasti, svarem neovlivněného, základního materiálu.

Na základě metalografické analýzy byla zkontrolována a upravena poloha zkušebních těles tak, aby jejich poloha splňovala požadavek odebrání ze základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarové kovu. Na zkušebních vzorcích odebraných z těchto pozic byly vyhodnoceny mechanické vlastnosti.

Výstupem z provedených experimentálních materiálových měření jsou průběhy závislosti změřené napjatosti v MPa a poměrné deformace v %, pro jednotlivé skupiny vzorků. Na základě těchto naměřených hodnot byly sestaveny průběhy závislosti skutečné napjatosti na skutečné poměrové deformaci, které již vstupují do výpočetních analýz. Tyto závislosti byly sestaveny jak pro základní materiál, tak pro tepelně ovlivněnou oblast a v neposlední řadě pro vlastní svar, viz Obr. 67. Pro sestavení materiálového kritéria pro vyhodnocení výpočtových simulací byly uvažovány hodnoty meze kluzu a meze pevnosti dle Tab. 32.



Obr. 67 – Z měření odvozená závislost skutečného napětí na skutečné deformaci

Tab. 32 – Materiálové parametry materiálu S355J2H určeného pro vnější obal

	E [MPa]	Poissonova konstanta	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]
základní materiál	210 000	0,3	320	470
svar + tepelně ovlivněná oblast	210 000	0,3	530	580

### 5.5.3.2 Materiálové parametry vnitřního pouzdra

Vnitřní pouzdra jsou vyrobena z materiálu 1.4404. Jelikož se jedná o austenitický materiál, byly jeho mechanické vlastnosti stanoveny podle normativní materiálové dokumentace. Konkrétně se jedná o EN-10216-5 a hodnoty, které vstupovaly do výpočtů, jsou uvedeny v Tab. 33.

Tab. 33 – Materiálové parametry materiálu 1.4404 určeného pro vnitřní pouzdra

	E [MPa]	Poissonova konstanta	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]
základní materiál svar + tepelně ovlivněná oblast	210 000	0,3	190	490	40

### 5.5.3.3 Metodika pevnostního vyhodnocení

Metodika pevnostního vyhodnocení obou variant UOS – UOS ŠKODA 440/7 a UOS ŠKODA 1000/7, a to jak VP tak i VO, vychází z předpokladu, že předmětem výpočtu je model UOS, který je ve fázi, kdy již proběhlo odkorodování 15 mm povrchové vrstvy vnějšího obalu a 5 mm vnitřního pouzdra. To znamená, že UOS se nachází na konci své projektové životnosti a prokazujeme, že stále konstrukčně odolá vnějším zatížením uvažovaných při uložení v HÚ. Proto lze konstatovat, že se nejedná o návrhový, počáteční stav ale o stav, kdy jsou již mechanické vlastnosti materiálu plně využívány. Z tohoto důvodu je k hodnocení UOS přistoupeno jako při hodnocení konstrukce UOS při havarijních provozních podmínkách. Z tohoto hlediska tak lze úspěšně aplikovat metodu kolapsu s uvažováním elasto-plastického chování použitého materiálu. Tento způsob hodnocení je popsán například normativem KTA 3201.2. Z tohoto normativního dokumentu rovněž vyplývá i použití bezpečnostního koeficientu 1,1 a lze definovat mezní hodnoty povolené napjatosti pro použité materiály, viz Tab. 34. Metodicky uvažujeme, že svar má stejné nebo lepší mechanické vlastnosti než základní materiál, to dokládají provedená experimentální měření mechanických vlastností. Proto je pro hodnocení svaru použit limit základního materiálu. Stanovený limit pro svar a tepelně ovlivněnou oblast převyšuje řádově o 20% limit pro základní materiál.

Tab. 34 – Materiálové limitní hodnoty napětí stanovené dle KTA 3201.2.

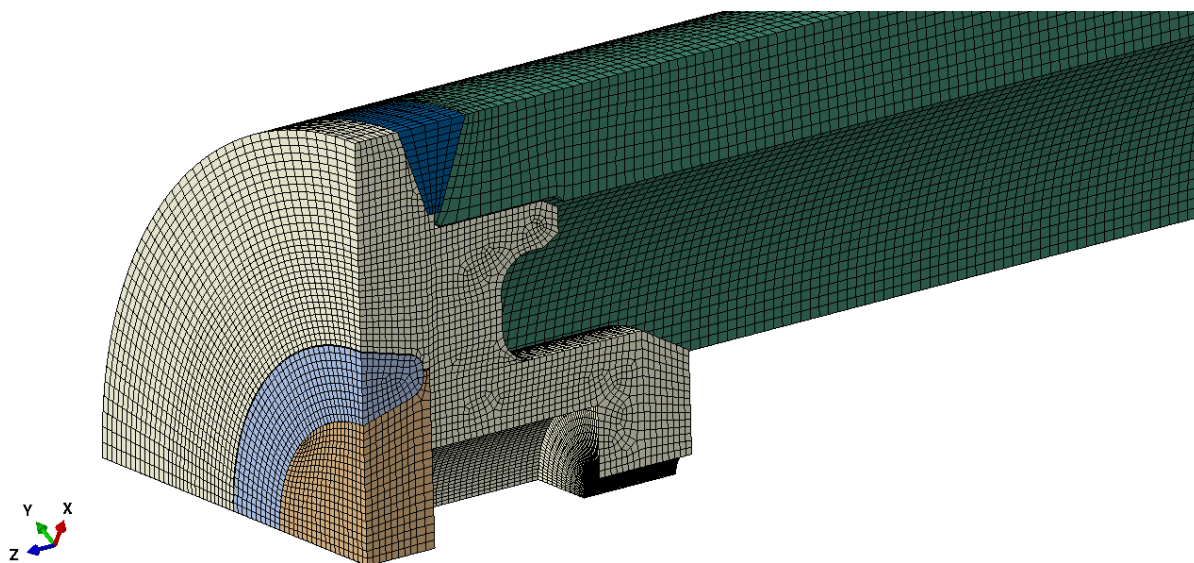
Materiál	Oblast použití	R <sub>m</sub> [MPa]	Limit dle KTA R <sub>m</sub> / 1,1 [MPa]
S355J2H	základní materiál	470	<b>427</b>
	svar, tepelně ovlivněná oblast	580	<b>527</b>
1.4404	základní materiál,	490	<b>445</b>
	svar, tepelně ovlivněná oblast		

### 5.5.3.4 Modely určené pro výpočet a výpočetní síť

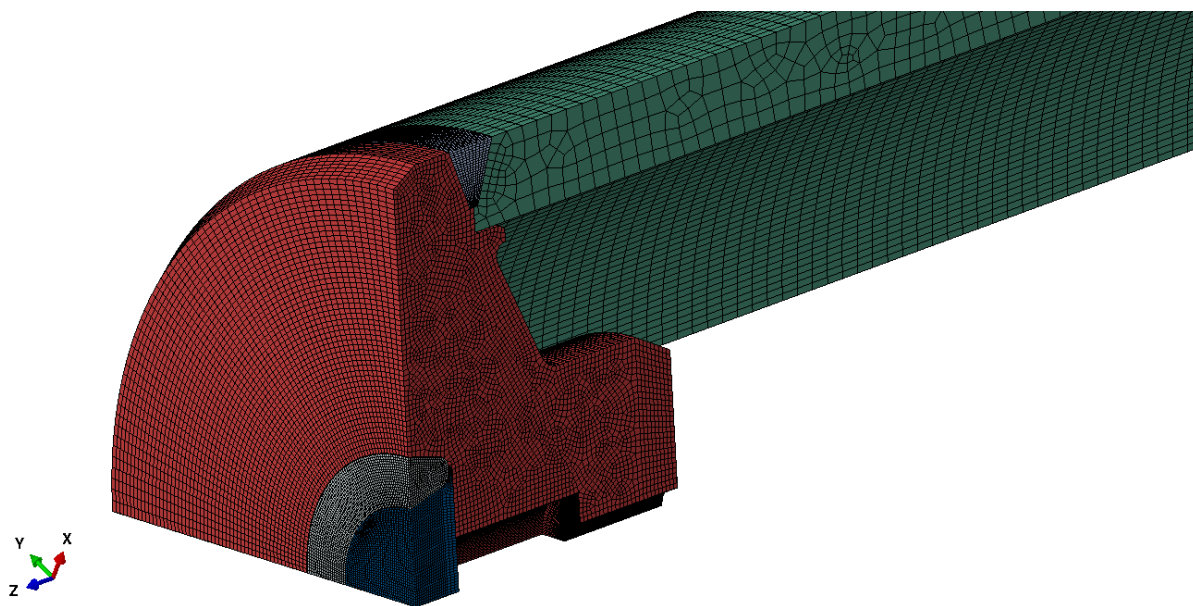
Modely vnitřních pouzder, pro UOS ŠKODA 440/7 a UOS ŠKODA 1000, obsahují detailní provedení všech konstrukčních vnějších prvků včetně detailu všech svarových spojů. Z důvodu prostorové symetrie byly modelovány pouze čtvrtinové výřezy.

Výpočetní síť modelů VP byla sestava z objemových, lineárních, osmi uzlových elementů v systému Abaqus označených jako C3D8R. Oblasti svarů byly pokryty zvlášť jemnou sítí, která

v těchto důležitých uzlech zajišťuje věrohodný popis rozložení napjatostí. Příklady použitých výpočtových sítí, v detailu víka se svarovými spoji, jsou uvedeny na následujících obrázcích. Pro VP UOS ŠKODA 440/7 Obr. 68 a pro VP UOS ŠKODA 1000/3 Obr. 69.



Obr. 68 – Výpočetní síť VP UOS ŠKODA 440/7

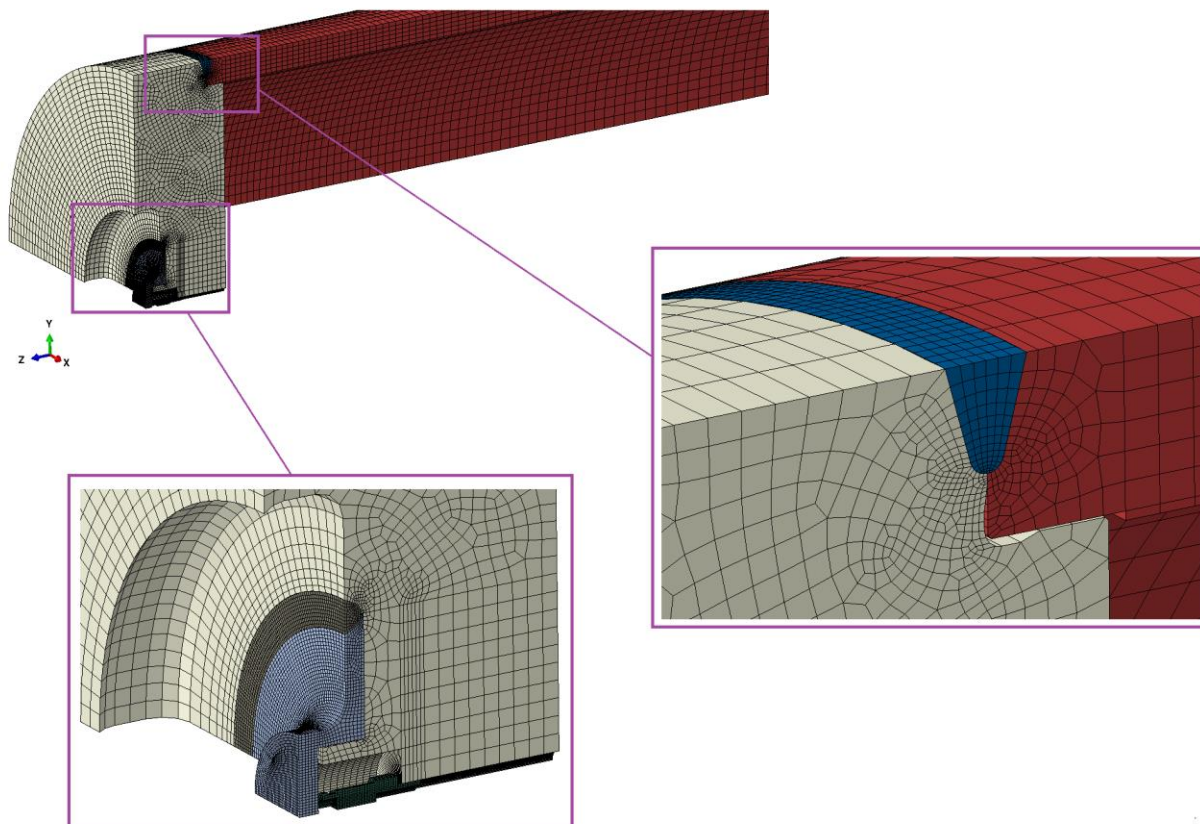


Obr. 69 – Výpočetní síť VP UOS ŠKODA 1000/3

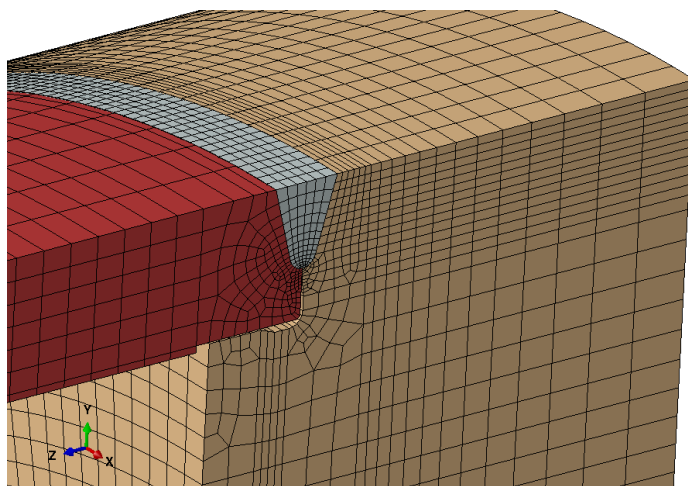
Modely vnějších obalů, pro UOS ŠKODA 440/7 a UOS ŠKODA 1000, obsahují detailní provedení všech konstrukčních vnějších prvků včetně detailu všech svarových spojů. Z důvodu prostorové symetrie byly modelovány pouze čtvrtinové výřezy.

Výpočetní síť modelů VO byla sestava z objemových, lineárních, osmi uzlových elementů v systému Abaqus označených jako C3D8R. Oblasti svarů byly pokryty zvláště jemnou sítí, která v těchto důležitých uzlech zajišťuje věrohodný popis rozložení napjatostí. Příklady použitých výpočtových sítí, v detailu víka se svarovými spoji, jsou uvedeny na následujících obrázcích.

Jelikož mají VO obou variant shodné rozměry až na délku jsou zde uvedeny obrázky pouze z varianty UOS ŠKODA 1000/3 a to Obr. 70 pro oblast víka a Obr. 71 pro oblast dna.



Obr. 70 – Výpočetní síť VO UOS ŠKODA 1000/3, detail víka a jeho svaru s tělem VO



Obr. 71 – Výpočetní síť VO UOS ŠKODA 1000/3, detail dna a jeho svaru s tělem VO

### 5.5.3.5 Okrajové podmínky a vazby pevnostního výpočtu

Okrajové podmínky byly v simulacích VP shodné pro obě varianty UOS. Vždy se jednalo o zatížení celkového vnějšího povrchu statickým tlakem 20 MPa. Jak už bylo zmíněno v předešlém textu, z důvodu geometrické symetrie byla modelována vždy čtvrtina celkové

geometrie. Na příslušných plochách tak bylo nutno definovat okrajovou podmínku, příslušnou k danému směru globálního souřadného systému.

V modelech VP obou variant UOS byly použity vazby v místech dotyku svarů a přilehlých konstrukčních dílů. V místě dosednutí víka i dna k trubkovému plášti VP a v místě kontaktu zátky s víkem VP nebyly konzervativně uvažovány ani pevné vazby a ani kontakty.

Okrajové podmínky byly v simulacích VO shodné pro obě varianty UOS. Vždy se jednalo o zatížení celkového vnějšího povrchu statickým tlakem 20 MPa. Jak už bylo zmíněno v předešlém textu, z důvodu geometrické symetrie byla modelována vždy čtvrtina celkové geometrie. Na příslušných plochách tak bylo nutno definovat okrajovou podmínku, příslušnou k danému směru globálního souřadného systému.

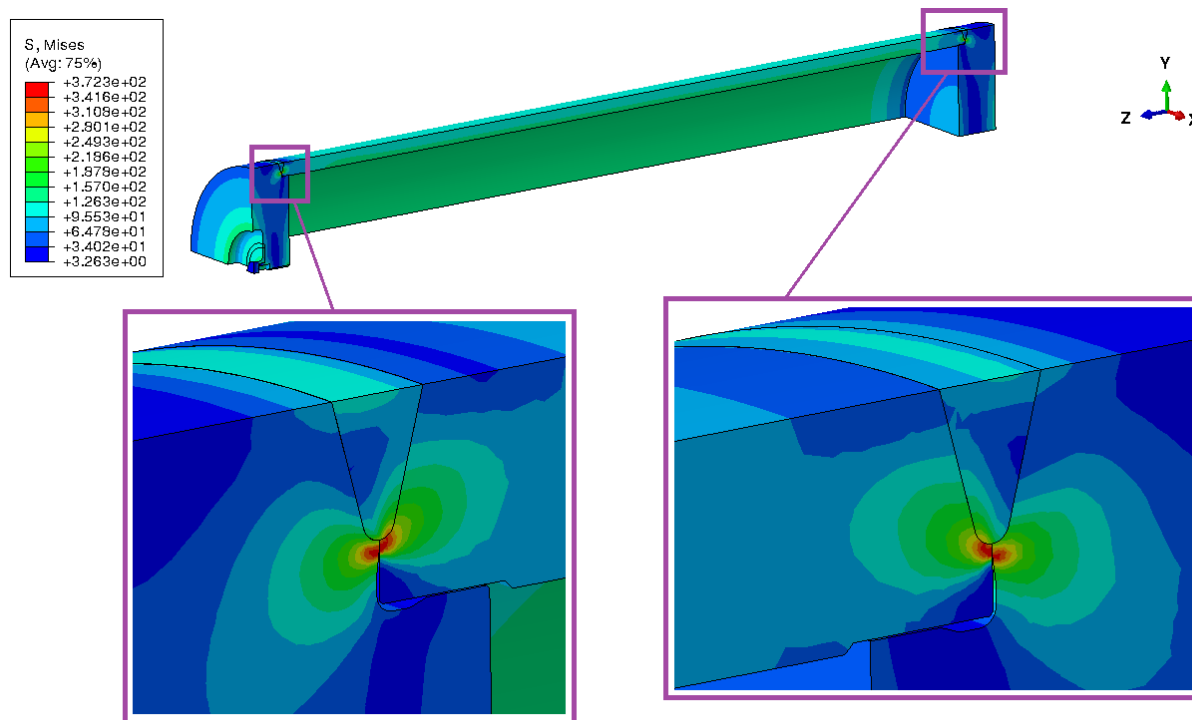
V modelech VO obou variant UOS byly použity vazby v místech kontaktu svarů a přilehlých konstrukčních dílů. Dále byly vazby použity v místě dosednutí víka i dna k válcovému plášti VO. Ve skutečnosti na těchto plochách dochází pouze ke kontaktu, ale při simulovaném statickém zatížení na těchto ploškách dochází k dosednutí a tlakovému zatížení bez prokluzu. Z tohoto důvodu je přijatelné na těchto ploškách uvažovat lineární vazbu v podobě pevného spojení.

#### 5.5.3.6 Metodika řešení pevnostních výpočtů

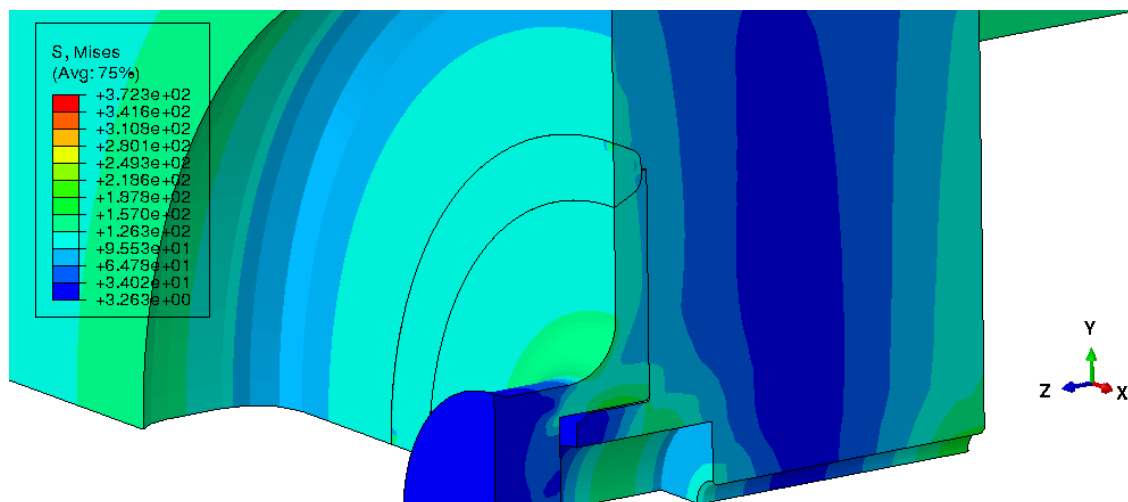
Z hlediska metodiky řešení MKP úloh UOS ŠKODA 440/7 a UOS ŠKODA 1000/3 se jednalo o statické výpočetní simulace, bez uvažování kontaktů, s elasto-plastickým materiálovým modelem. V rámci odladění výpočetních modelů bylo provedeno posouzení vlivu velikosti MKP sítě na výsledné rozložení napjatostí. Rovněž bylo provedeno výpočetní porovnání úloh s definovanými kontaktními plochami a s úlohami, kde tyto kontaktní plochy byly nahrazeny vazbou. Výsledky z těchto předběžných analýz vedly k definici finálních výpočtových modelů, které jsou předmětem tohoto dokumentu.

#### 5.5.3.7 Výsledky VO UOS ŠKODA 440/7

V následující části jsou uvedeny Obr. 72 a Obr. 73 rozložení Mises napjatostí v zatížené konstrukci VO. Na první pohled je dobře patrné, že střední hodnoty Mises napjatostí na válcovém plášti dosahují 219 MPa a leží tak hluboko pod limitní hodnotou 427 MPa pro kolaps. Špičkové hodnoty Mises napjatosti 372 MPa jsou dosahovány v místech dotyku válcového pláště se dnem a víkem. Tato napětí rovněž nedosahují limitní hodnoty a opět se jedná výhradně tlaková napětí, viz Obr. 72. Samotné víko včetně zátky a dno rovněž vykazují napjatosti do 218 MPa, což je více než přijatelné v porovnání s limitní dovolenou hodnotou napětí, viz Obr. 73.



Obr. 72 – Rozložení Mises napětí v MPa, VO UOS ŠKODA 440/7, detail na oblast svarů válcového obalu.

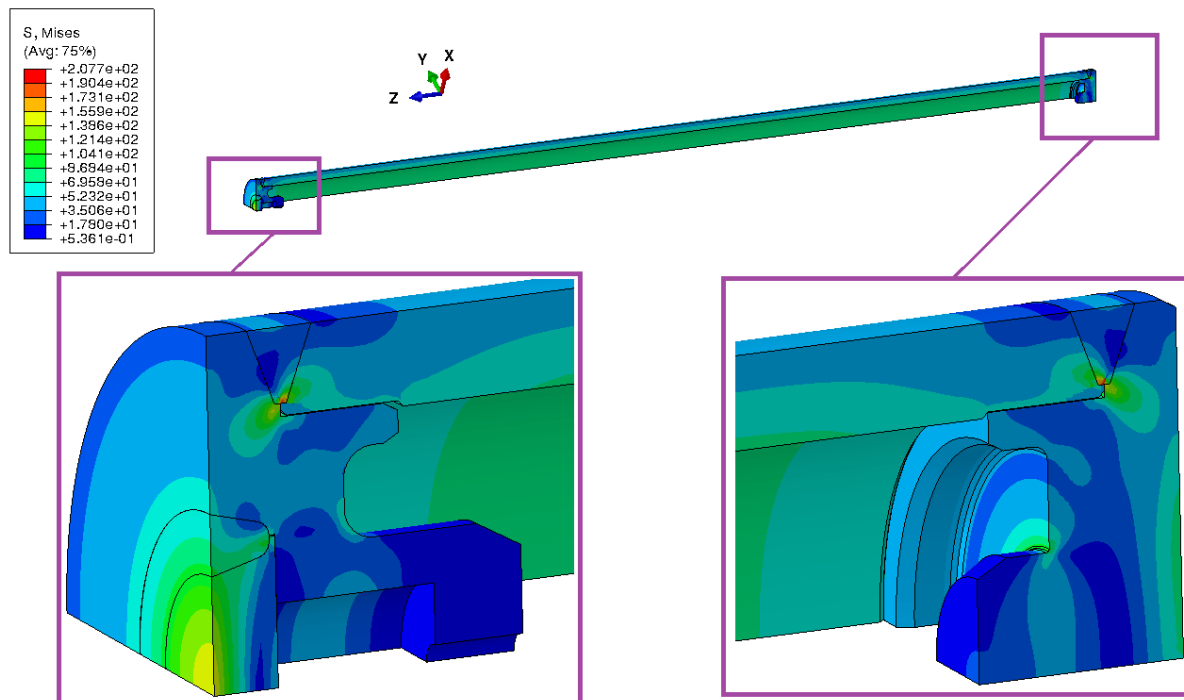


Obr. 73 – 5 Rozložení Mises napětí v MPa, VO UOS ŠKODA 440/7, detail na oblast svaru zátky a víka.

### 5.5.3.8 Výsledky VP UOS ŠKODA 440/7

Na dalším Obr. 74 je uvedeno rozložení Mises napjatostí v zatížené konstrukci VP UOS ŠKODA 440/7. Na válcovém plášti opět střední hodnota Mises napětí nepřesahuje 100 MPa. Špičkové hodnoty Mises napětí 194 MPa jsou v modelu dosažené v oblasti kořene svaru a to jak u víka, tak u dna VP. Opět lze konstatovat, že se jedná výhradně o tlaková zatížení. Limitní hodnota pro austenitický materiál byla stanovena na 445 MPa. Z uvedeného tady vyplývá, že VP s velkou rezervou odolá simulovanému zatížení a ke kolapsu konstrukce nemůže ani v tomto případě dojít.

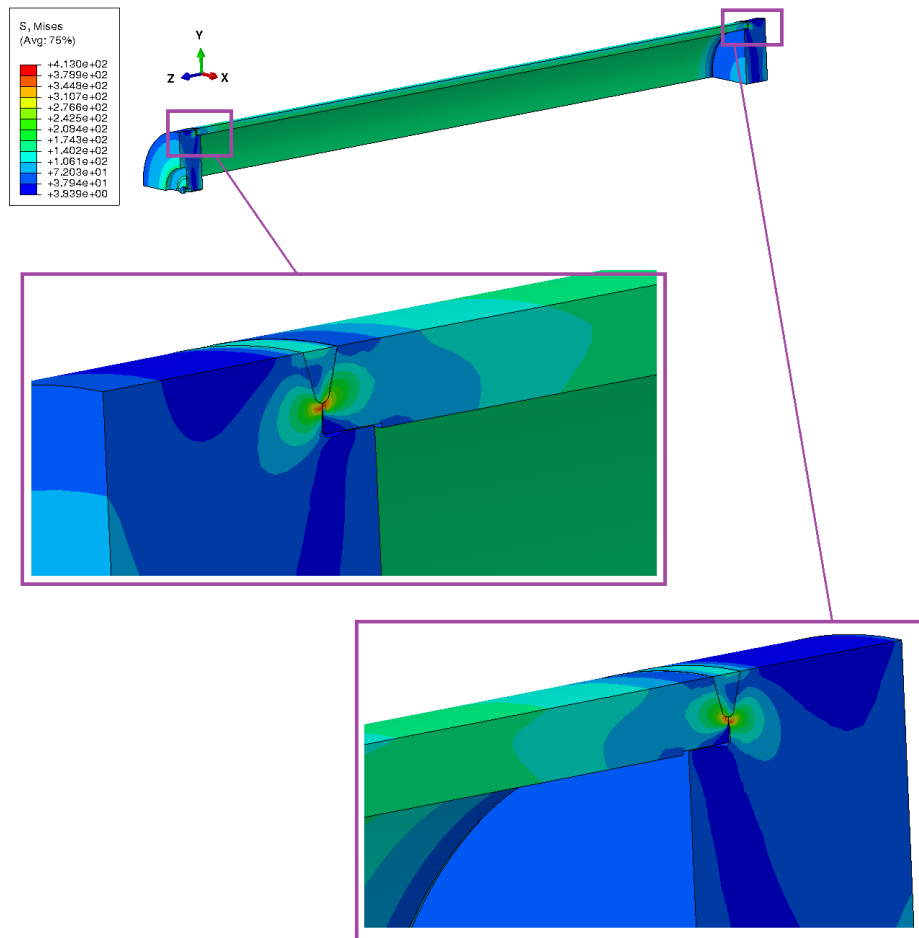




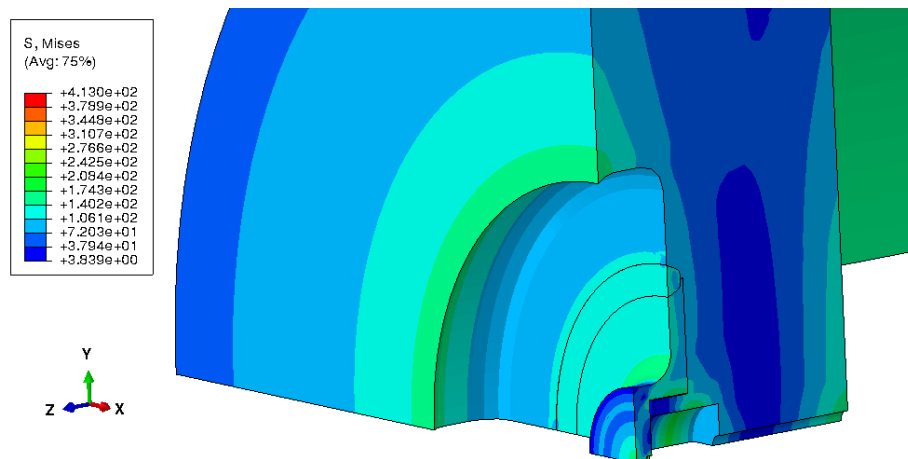
Obr. 74 – Rozložení Mises napětí v MPa, VP UOS ŠKODA 440/7, detail na oblast svarů.

### 5.5.3.9 Výsledky VO UOS ŠKODA 1000/3

Na následujících Obr. 75 a Obr. 76 jsou uvedeny rozložení Mises napjatostí v zatížené konstrukci VO UOS ŠKODA 1000/3. Hned na první pohled je dobře patrné, že střední hodnoty Mises napjatosti na válcovém plášti dosahují 242 MPa a leží tak hluboko pod limitní hodnotou 427 MPa pro kolaps. Špičkové hodnoty Mises napjatosti 413 MPa, jsou dosahovány v místech dotyku válcového pláště se dnem a víkem. Tato napětí rovněž nedosahují limitní hodnoty, a navíc jsou výhradně tlaková, viz Obr. 75. Samotné víko včetně zátky a dno rovněž vykazují napjatosti do 250 MPa, což je více než přijatelné, v porovnání s limitní dovolenou hodnotou napětí, viz Obr. 76.



Obr. 75 – Rozložení Mises napětí v MPa, VO UOS ŠKODA 1000/3, detail na oblast svarů válcového obalu.

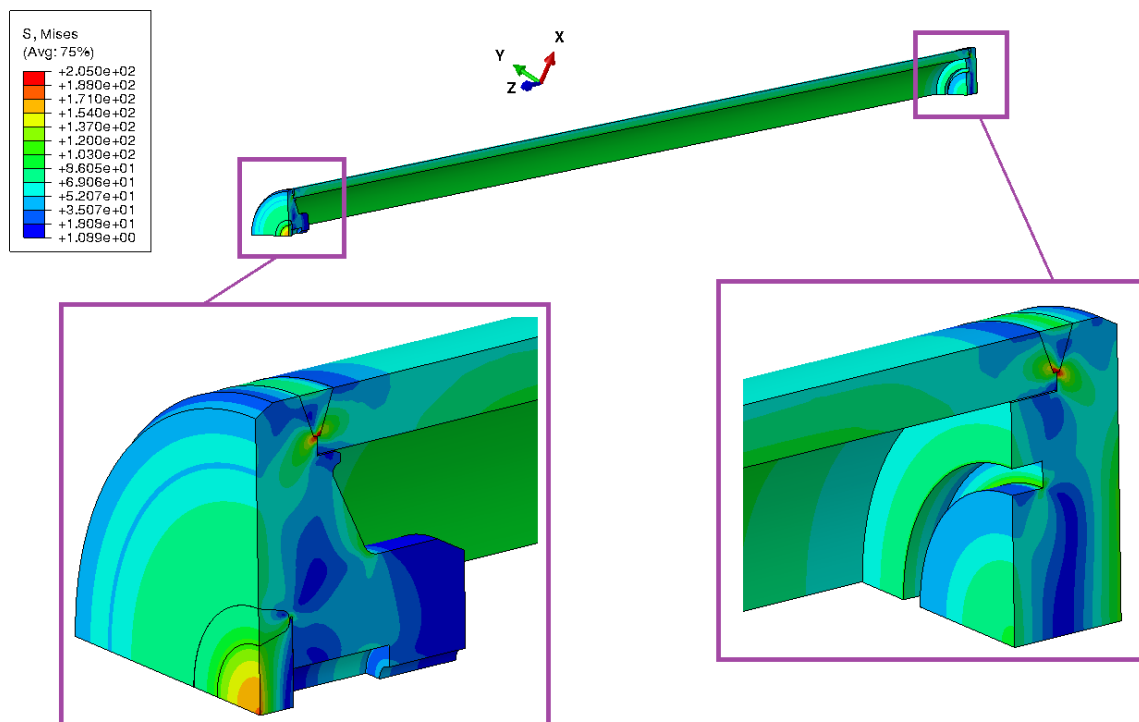


Obr. 76 – Rozložení Mises napětí v MPa, VO UOS ŠKODA 1000/3, detail na oblast svaru zátky a víka.

### 5.5.3.10 Výsledky VP UOS ŠKODA 1000/3

Na následujícím obrázku, viz Obr. 77, je uvedeno rozložení Mises napjatostí v zatížené konstrukci VP UOS ŠKODA 1000/3. Na válcovém plášti střední hodnota Mises napětí nepřesahuje 100 MPa. Špičkové hodnoty Mises napětí 195 MPa jsou v modelu dosažené v oblasti kořene svaru, a to jak

u víka, tak u dna VP. Opět se jedná výhradně o tlaková zatížení. Limitní hodnota pro austenitický materiál byla stanovena na 445 MPa, a proto lze konstatovat, že VP s velkou rezervou odolá simulovanému zatížení a ke kolapsu konstrukce nemůže v tomto případě dojít. Ke kolapsu konstrukce obecně dojde, pokud nastanou vhodné kombinace výrazného překročení meze kluzu v klíčových nosných uzlech sledované konstrukce. Předmětem výpočtu UOS nebyla primárně úloha kolapsu. Výsledkem je prokázání skutečnosti, že od tohoto nežádoucího stavu existuje ještě dostatečná rezerva.

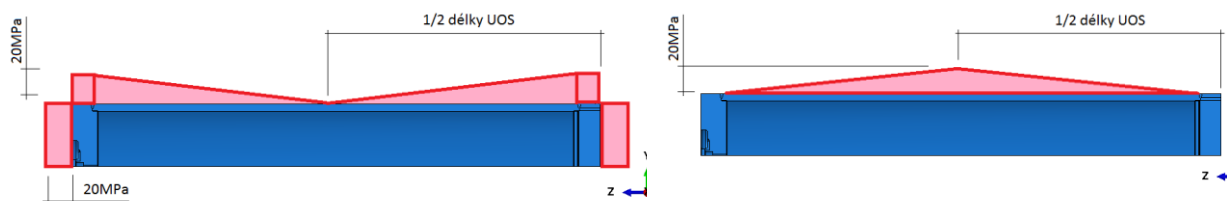


Obr. 77 – Rozložení Mises napětí v MPa, VP UOS ŠKODA 1000/3, detail na oblast svarů.

### 5.5.3.11 Posouzení UOS z hlediska zatížení od nerovnoměrného tlaku

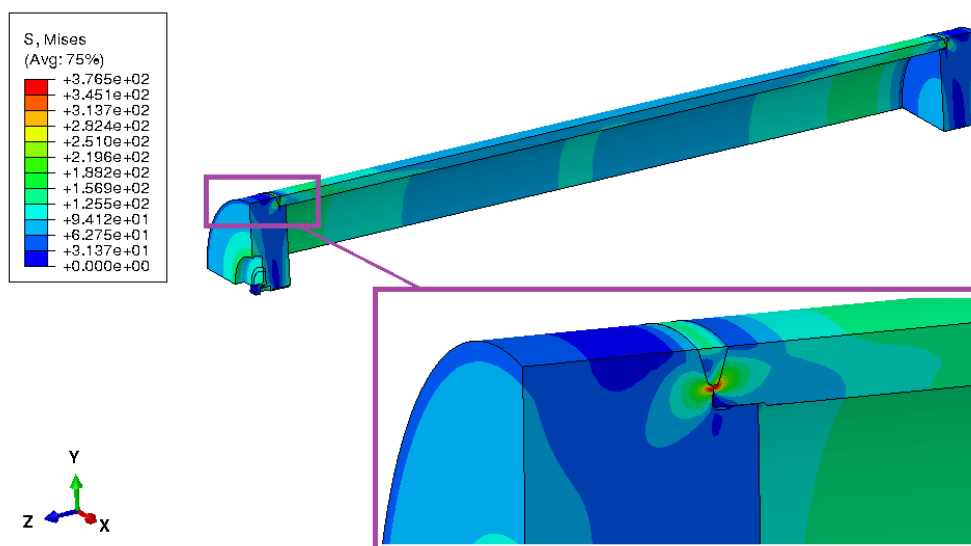
Zatížení UOS vlivem nerovnoměrného bobtnacího tlaku bentonitu vede na lokální ohybová zatížení VO UOS. Tato kapitola je zaměřena na nerovnoměrné rozložení návrhového tlaku po délce UOS. Extrémním případem lokálního ohybového zatížení UOS je bezesporu stříhové zatížení obalové vrstvy bentonitu v důsledku posuvu okolních horninových vrstev. Tento stav je detailně rozebrán ve zprávě (Lopaur 2020)., popisující hypotetické seismické účinky na uložený UOS, v rámci kterých se takovéto zatížení uvažuje a simuluje.

Dále se tedy tato kapitola zaměřuje na dva mezní stavy. První popisuje namáhání UOS rotačně symetrickou okrajovou podmínkou, kdy je uvažováno zatížení víka a dna VO vnějším přetlakem 20MPa. V osovém směrem UOS tento tlak klesá a v polovině délky UOS je nulový. Od poloviny délky opět lineárně roste až do hodnoty 20 MPa na opačném konci UOS. Za druhý mezní případ bylo považováno zatížení, kdy je dosaženo okolního přetlaku 20 MPa působícího na VO UOS v polovině jeho délky. Opět se jedná o rotačně symetrickou okrajovou podmínku, které lineárně klesá směrem ke dnu, respektive víku, UOS. Tyto okrajové podmínky nerovnoměrného tlakového zatížení byly uvažovány jak na pro variantu UOS ŠKODA 440/7, tak i pro UOS ŠKODA 1000/3. Schematicky jsou uvažované tlakové okrajové podmínky vykresleny na Obr. 78. Jelikož se jedná o schematické znázornění, tak platí pro obě varianty UOS.

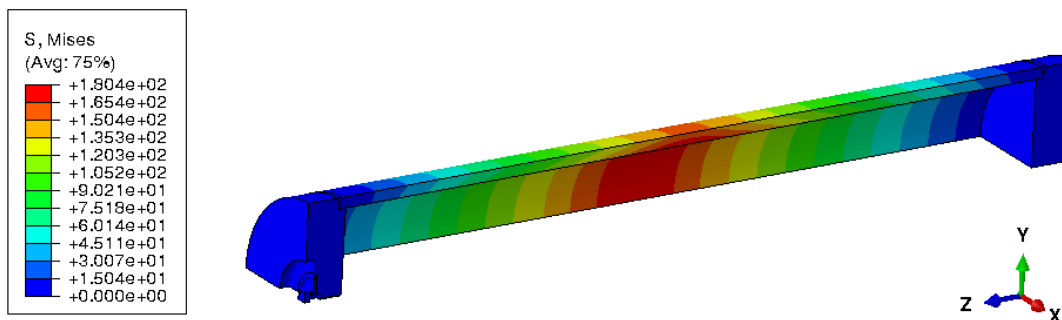


Obr. 78 – Rotačně symetrické okrajové podmínky nerovnoměrně rozloženého vnějšího návrhového tlaku na VO pro obě varianty UOS

Na Obr. 79 je uvedeno výsledné rozložení Mises napětí pro VO UOS ŠKODA 440/7, kde je uvažováno maximální zatížení návrhovým tlakem 20 MPa v oblastech dna a víka UOS. I zde jsou špičkové hodnoty Mises napětí 376 MPa dosaženy v oblasti kořene svarů. Tyto špičkové hodnoty jsou dostatečně vzdáleny pod limitní hodnotou 427 MPa, která je definovaná pro kolaps. Při zatížení návrhovým tlakem 20 MPa v polovině délky UOS je opět dosaženo nižších špičkových hodnot Mises napětí a to konkrétně 180 MPa, viz Obr. 80. Lze tedy shodně s předešlým textem konstatovat, že UOS ŠKODA 440/7 je dostatečně odolný výše popsaným nerovnoměrným zatížením od návrhového tlaku.

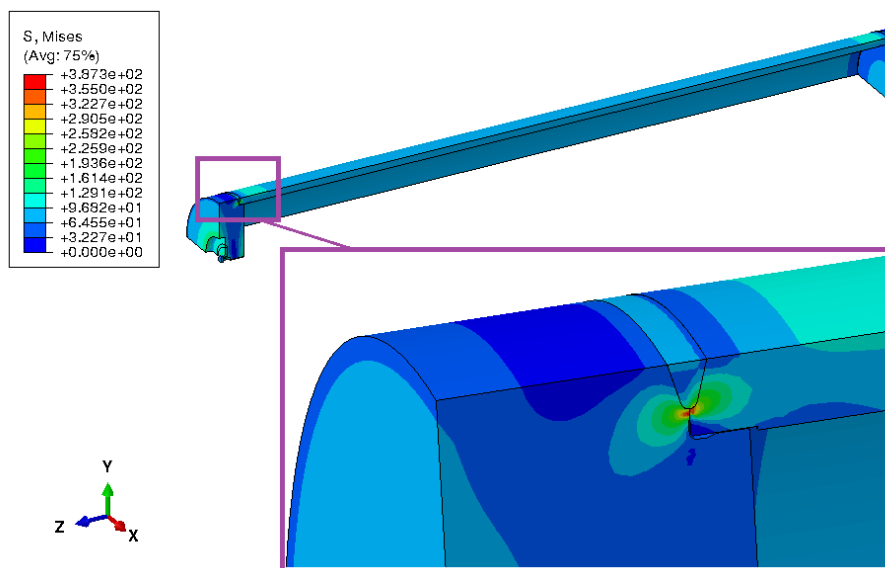


Obr. 79 – Rozložení Mises napětí v MPa, VO UOS ŠKODA 440/7, detail na oblast svarů pro nerovnoměrně rozložený návrhový tlak na VO UOS, maximum vnějšího přetlaku 20 MPa v oblasti dna a víka.

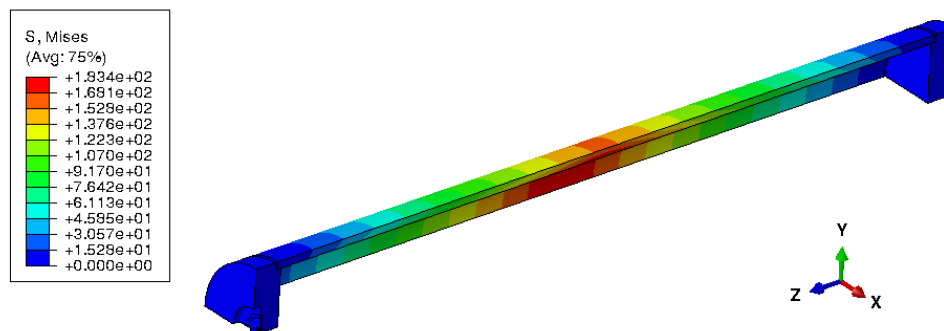


Obr. 80 – Rozložení Mises napětí v MPa, VO UOS ŠKODA 440/7, detail na oblast svarů pro nerovnoměrně rozložený návrhový tlak na VO UOS, maximum vnějšího přetlaku 20 MPa v oblasti dna a víka.

Výsledné rozložení Mises napětí pro UOS ŠKODA 1000/3 je uvedeno na Obr. 81, kde je uvažováno maximální zatížení návrhovým tlakem 20 MPa v oblastech dna a víka UOS. Špičkové hodnoty Mises napětí 387 MPa jsou dosaženy v oblasti kořene svarů. Tyto špičkové hodnoty jsou dostatečně vzdáleny pod limitní hodnotou 427 MPa, která je definovaná pro kolaps. Při zatížení návrhovým tlakem 20 MPa v polovině délky UOS je dosaženo ještě nižších špičkových hodnot Mises napětí a to 183 MPa, viz Obr. 82. Lze tedy konstatovat, že UOS ŠKODA 1000/3 je dostatečně odolný výše popsáním nerovnoměrným zatížením od návrhového tlaku.



Obr. 81 – Rozložení Mises napětí v MPa, VO UOS ŠKODA 1000/3, detail na oblast svarů pro nerovnoměrně rozložený návrhový tlak na VO UOS, maximum vnějšího přetlaku 20 MPa v oblasti dna a víka.



Obr. 82 – Rozložení Mises napětí v MPa, VO UOS ŠKODA 1000/3, detail na oblast svarů pro nerovnoměrně rozložený návrhový tlak na VO UOS, maximum vnějšího přetlaku 20 MPa v oblasti dna a víka.

### 5.5.3.12 Závěr z pevnostních výpočtů

Byly provedeny výpočetní simulace zatížení UOS ve dvou variantách tj. pro UOS ŠKODA 440/7 a UOS ŠKODA 1000/3. V obou případech byl předmětem výpočtu jak vnější obal, tak i vnitřní pouzdro. Modely byly posuzovány ve stavu po odkorodování vnější 15 mm vrstvy materiálu na VO a po odkorodování vnější 5 mm vrstvy materiálu na VP. Takto zeslabené stěny VO a VP byly zatíženy nejprve konstantním vnějším přetlakem a v následných simulacích, po délce VO UOS, nerovnoměrným návrhovým tlakem okolí. Toto nerovnoměrné zatížení vyvoluje ohybové napjatosti v VO. Extrémním případem lokálního ohybového zatížení UOS je bezesporu stříhové zatížení obalové vrstvy bentonitu v důsledku posuvu okolních horninových vrstev. Tento stav je detailně rozebrán ve zprávě (Lopaur, 2020), popisující hypotetické seismické účinky na uložený UOS, v rámci kterých se takovéto zatížení uvažuje a simuluje.

Posunutí horniny bylo domluveno během projektu se zadavatelem, z výsledků je patrné, že konstrukce byla na tuto hodnotu navržena a vyhovuje. Z hlediska konstrukce lze tedy konstatovat, že se jedná o limitní hodnotu. Z hlediska geologického je potřeba další geologický výzkum.

Jelikož se jedná o stav UOS, který lze považovat za havarijní, byla rozložení napjatostí hodnocena dle metodiky kolapsu, která je uvedena například v normativním dokumentu KTA 3201.2.

Výpočtové simulace obou variant UOS ve všech provedených simulacích prokázaly jejich odolnost proti kolapsu, neboť dosahované napětí s rezervou vyhovělo stanoveným limitním, dovoleným napětím.

Dále byla ve zprávě (Jeník, 2020) provedena kontrola z pohledu konstrukce a vlivu teplot se zohledněním rozdílných materiálových součinitelů teplotní roztažnosti. Bylo prokázáno, že navržená konstrukce UOS ŠKODA 440/7 i UOS ŠKODA 1000/3, je i z tohoto pohledu funkční a vyhovuje.

### 5.5.4 Výpočty střížných namáhání vyvolaných seismickou událostí

Pro hodnocení ukládacího obalového souboru (UOS) při seismické události se předpokládá jako nejhorší možné zatížení vzájemné posunutí masivu horniny. Uvažuje se posunutí 50 mm rychlostí 1 m/s ve střížné rovině.

Zpráva (Lopaur, 2020) obsahuje MKP výpočet mechanické odolnosti střížnými tlaky UOS, které vznikají jako důsledek seismické události a jsou definovány výše uvedeným posuvem a rychlostí ve střížné rovině. Výpočet byl proveden pro obě varianty UOS ŠKODA 440/7 a UOS ŠKODA 1000/3.

Pro získání vstupních materiálových parametrů bentonitu, byla provedena zkouška stříhem. Tato zkouška byla následně simulována MKP výpočtem. Materiálové charakteristiky bentonitu vstupující do výpočtu stříhové zkoušky byly optimalizovány tak, aby výsledná závislost střížné síly a posunutí odpovídaly měřeným hodnotám ze zkoušky stříhem vzorku bentonitu.

#### 5.5.4.1 Mechanické vlastnosti použitých materiálů

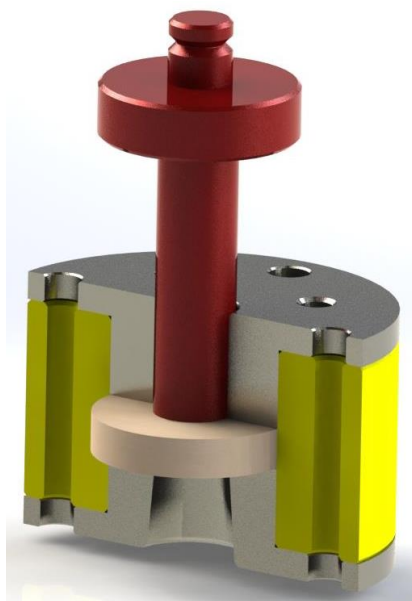
Výpočet zvažuje stříh VO tj. pro výpočet jsou potřeba mechanické vlastnosti materiálu S355J2H. Tyto mechanické vlastnosti viz kapitola 5.5.3.

#### 5.5.4.2 Vlastnosti bentonitu vstupující do výpočtu stříhu UOS

Pro získání alespoň základních materiálových vlastností bentonitu byla na několika vzorcích výlisků z bentonitu provedena zkouška stříhem (CEITEC, VUT). Tato zkouška byla poté simulována pomocí MKP a s využitím programu Isight byly naladěny parametry ideálně plastického materiálového modelu.

Zkouška stříhem byla provedena ve zvláště upraveném přípravku Obr. 83, který byl upraven pro lisování bentonitových vzorků, pro jejich saturaci vodou a také pro zkoušku stříhem. Zkouška byla provedena na šesti různých vzorcích, pro různé slisování vzorků a pro různý stav vzorku ohledně nasycení vodou. Parametry jednotlivých vzorků jsou uvedeny v Tab. 35. Veškeré hodnoty týkající se také vzorků a bentonitu jsou pak uvedeny ve zprávě (Matal, 2018).

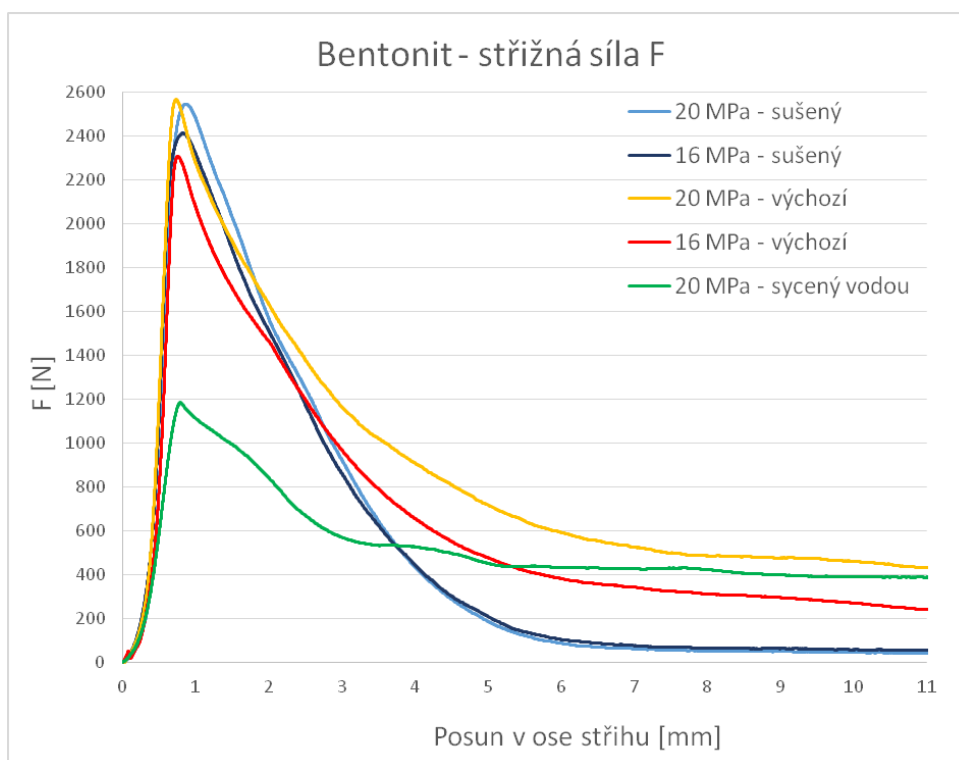
Výsledkem zkoušek byla závislost střížné síly na posuvu střížníku. Grafy průběhů střížné síly v závislosti na posuvu střížníku jsou zobrazeny na obrázku Obr. 84. Vzorek č. 6 nasycený vodou vykazoval nízkou sílu, proto není v grafech uveden.



Obr. 83 – Zkouška bentonitu stříhem

Tab. 35 – Parametry vzorků před zkouškou stříhem

Číslo vzorku	Popisek	Navážka [g]	Tlak – uniax. lis [MPa]	Výsledná tloušťka vzorku [mm]
1	Sušený	32	20	10,60
2	Sušený	32	16	10,75
3	Výchozí stav	35	20	10,00
4	Výchozí stav	35	16	10,30
5	Sycený vodou	35	20	10,30
6	(pře)sycený vodou	32	16	10,00



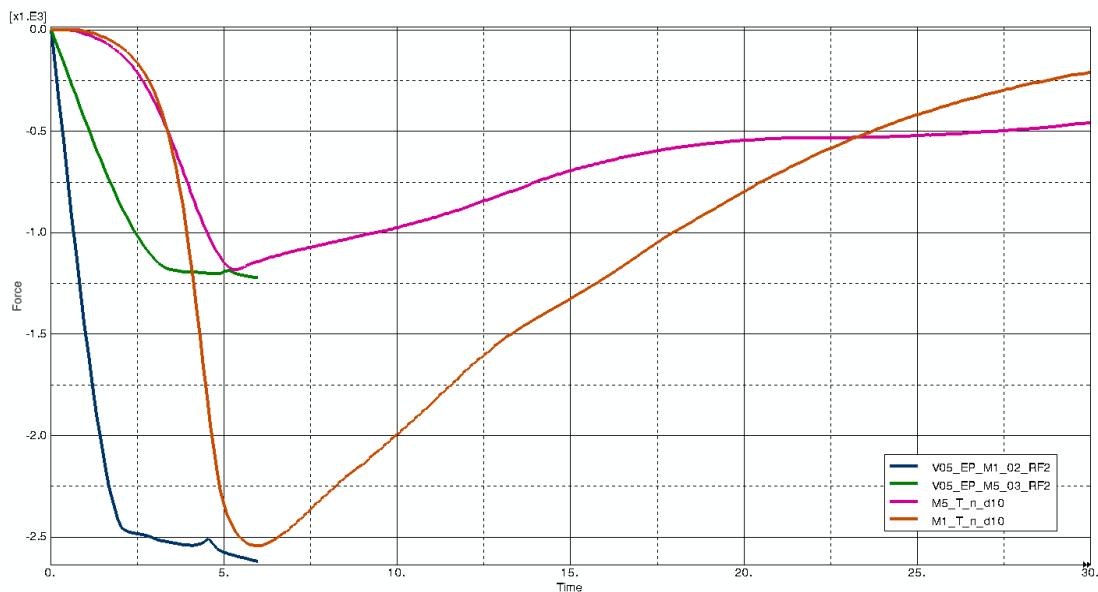
Obr. 84 – Změřené závislosti střížné síly a posuvu pro jednotlivé vzorky

Pro simulaci zkoušky stříhem byl vytvořen axisymetrický model, kde střížník a přípravek byly uvažovány jako tuhá tělesa. Zatížení bylo provedeno rovnoměrným svislým posuvem střížníku a vyhodnocován byl průběh síly na střížníku v závislosti na jeho posunutí.

Parametry materiálového modelu ( $E$ ,  $R_{p0,2}$ ) byly hledány tak, aby průběh síly (sklon) náběhu a maximální hodnota odpovídaly měření. Pro jednoduchost byl uvažován ideálně plastický materiálový model.

Na Obr. 85 je zobrazeno srovnání průběhu střížné síly z výpočtu a z měření pro vzorky č. 1 – materiál M1) a č. 5 – materiál M5 viz Tab. 35 pro nalezené optimální parametry ideálně plastického materiálového modelu bentonitu. Rozdíl průběhu síly z měření na začátku křivky je ovlivněn vůlemi a tuhostmi ve zkušebním zařízení, které MKP model nezohledňuje.



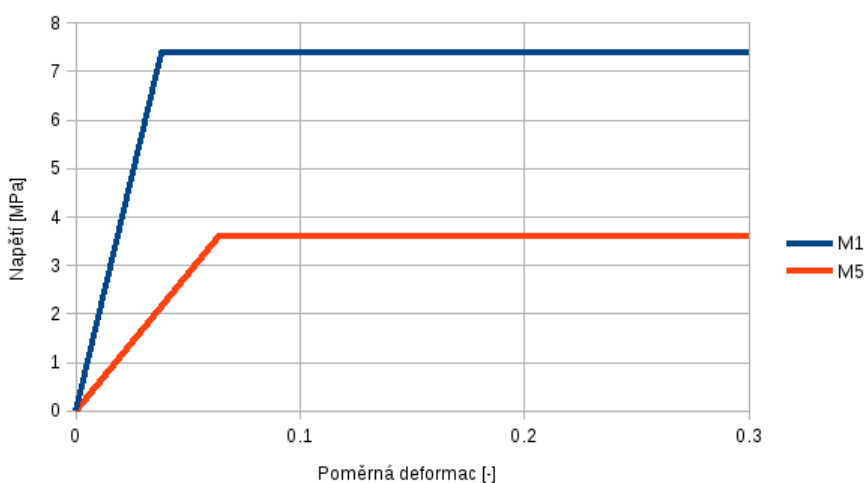


Obr. 85 – Průběh střížné síly – výpočet (M1-modrá, M5-zelená) a měření (M1-hnědá, M5-fialová) – materiál bentonitu M1 a M5

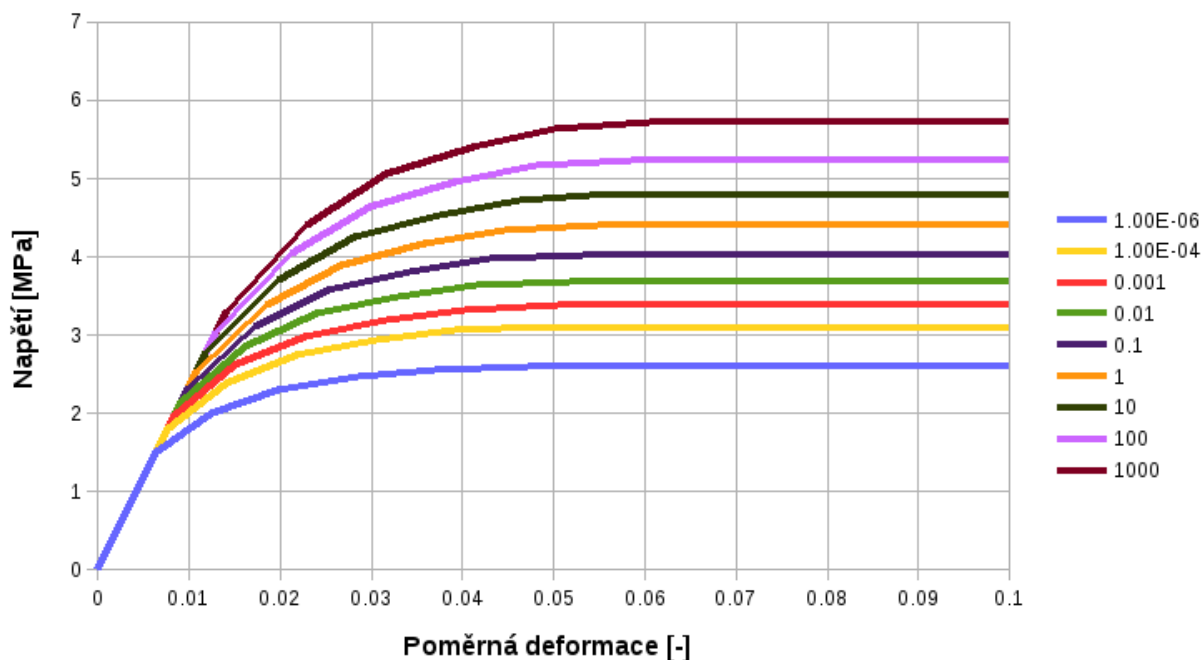
Pro materiál bentonitu byly uvažovány tři varianty, tj. parametry pro ideálně plastický materiálový model nalezené při MKP simulaci zkoušky stříhem vzorku č. 1 (M1) a vzorku č. 5 (M5) a dále, pro srovnání, také materiálové parametry pro elasto-plastický model se zadanou závislostí na rychlosti deformace bentonitu MX-80 dle (SKB, 2010).

Tab. 36 – Základní mechanické vlastnosti uvažovaných bentonitů

	M1	M5	MX-80
E [MPa]	193	56,34	233
$\nu$ [1]	0,49	0,49	0,49
$R_{p0,2}$ [MPa]	7,4	3,6	-



Obr. 86 – Závislost napětí na deformaci pro ideálně plastický model bentonitu M1 a M5



Obr. 87 – Závislost napětí na poměrné plastické deformaci pro různé rychlosti deformace [ $s^{-1}$ ] bentonitu MX-80

Výpočet byl proveden pro posunutí horniny o 50 mm při rychlosti 1 m/s. Tloušťka vrstvy bentonitu byla uvažována 700 mm. Rovina stříhu byla umístěna kolmo na osu UOS v jeho polovině.

Pro varianty UOS ŠKODA 440/7 a UOS ŠKODA 1000/3 bylo uvažováno ztenčení stěn (korozní přídavek) 15 mm.

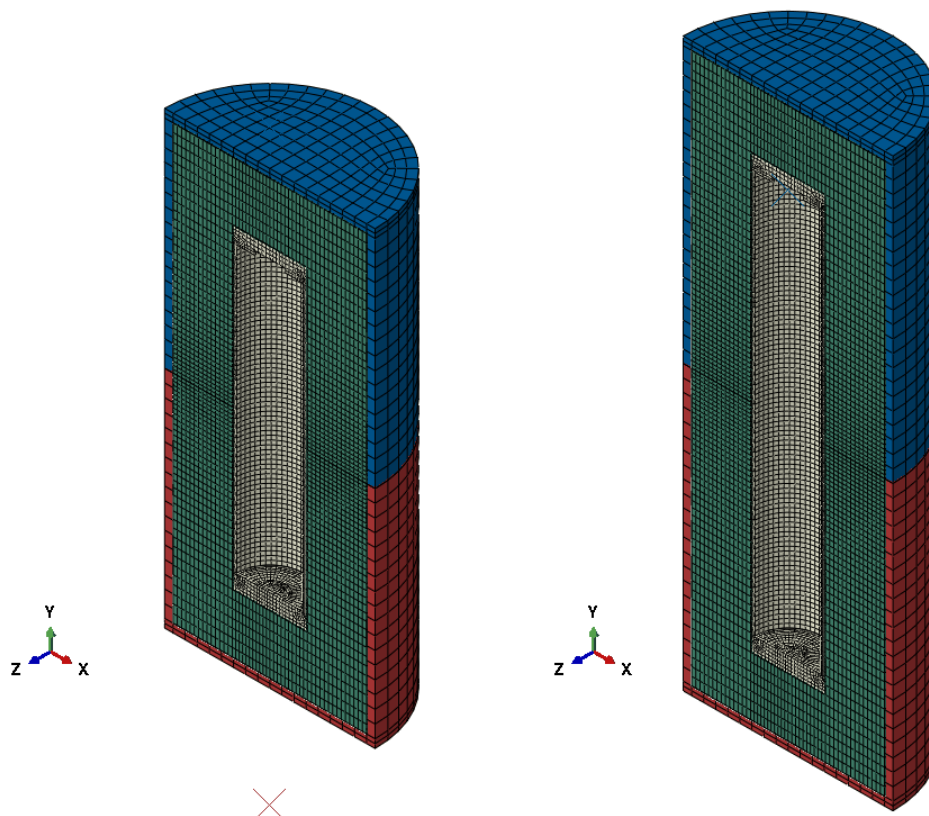
V požadavcích pro splnění životnosti UOS (kap. 1.2) je definován návrhový tlak 20 MPa. Tato hodnota byla zadána jako vnitřní tlak v bentonitu.

### 5.5.4.3 Výpočtový model

Model byl vytvořen jako 3D objemový s využitím symetrie. Skládá se z vlastního tělesa UOS, bentonitového obalu a skalního masivu, který je nahrazen dvěma tuhými tělesy.

Pro varianty UOS ŠKODA 440/7 a UOS ŠKODA 1000/3 byl použit model bentonitu ve variantě s rozdělením hmoty bentonitu (trhlinou) v rovině stříhu.

Konečně prvková síť byla tvořena kvadratickými šestistěnnými objemovými elementy s redukovanou integrací typu C3D20R (UOS), lineárními šestibokými objemovými hybridními elementy typu C3D8H (bentonit) a lineárními šestibokými objemovými prvky s redukovanou integrací typu C3D8R. Model sítě obou variant viz Obr. 88.



Obr. 88 – MKP model – UOS ŠKODA 440/7 (vlevo) a UOS ŠKODA 1000/3 (vpravo)

#### 5.5.4.4 Okrajové podmínky, vazby a kontakty

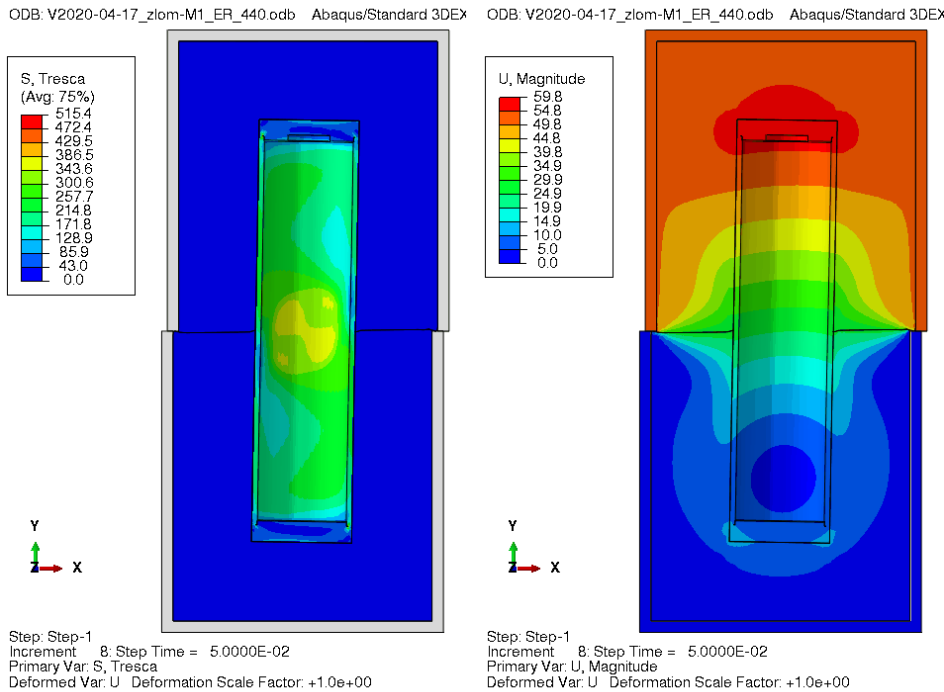
Na rovinu symetrie byla zadána podmínka symetrie  $U_Z=0$ . Tuhá tělesa (rigid body) nahrazující skalní masiv jsou svázána se svými referenčními body, na které jsou zadány okrajové podmínky. Pro spodní tuhé těleso je to fixní okrajová podmínka  $U_X=U_Y=U_Z=R_X=R_Y=R_Z=0$  a pro horní tuhé těleso je zadána okrajová podmínka posunutí  $U_X=50$  mm, ostatní posunutí a rotace jsou zakázány (fixována) tj.  $U_Y=U_Z=R_X=R_Y=R_Z=0$ .

Výpočet byl proveden ve dvou navazujících krocích. V prvním kroku výpočtu byl uvažován tlak v bentonitu 20 MPa (součtové zatížení vnějším hydrostatickým tlakem, bobtnacím tlakem bentonitu a tlakem okolních hornin). Ve druhém kroku bylo zadáno posunutí horního bloku o 50 mm. Rychlost posunutí je potom dána délkou trvání výpočtového stavu tedy  $t = 0,05$  s. Takto definované zatížení odpovídá silovým účinkům od maximálního výpočtového zemětřesení v mezích 7. – 8. stupně MSK-64.

Mezi tuhá tělesa modelující skálu a mezi bentonit byla definována pevná vazba Tie. Pro ostatní části a jejich interakce byl zadán kontakt s uvažováním součinitele tření 0,3.

#### 5.5.4.5 Výsledky UOS ŠKODA 440/7 výpočtu střížných namáhání

Celková napětí vyvozená jak v UOS, tak v bentonitu jsou zobrazena na Obr. 89.



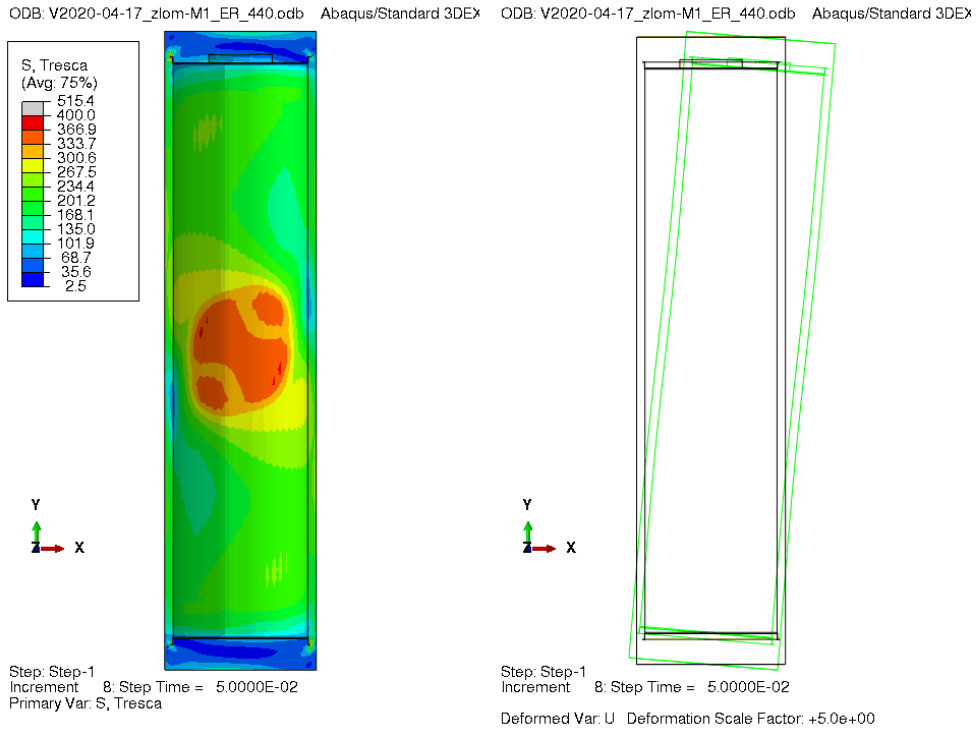
Obr. 89 – Výsledná napětí v sestavě UOS ŠKODA 440/7 – bentonit

Byla provedena kontrola napětí v oblasti svaru víka UOS pomocí skupin kategorií napětí dle metodiky NTD A.S.I. Sekce III. Kontrola byla provedena pro variantu s materiálem bentonitu M1 a s modelovanou trhlinou v bentonitu, která vykazovala největší spočtené napětí.

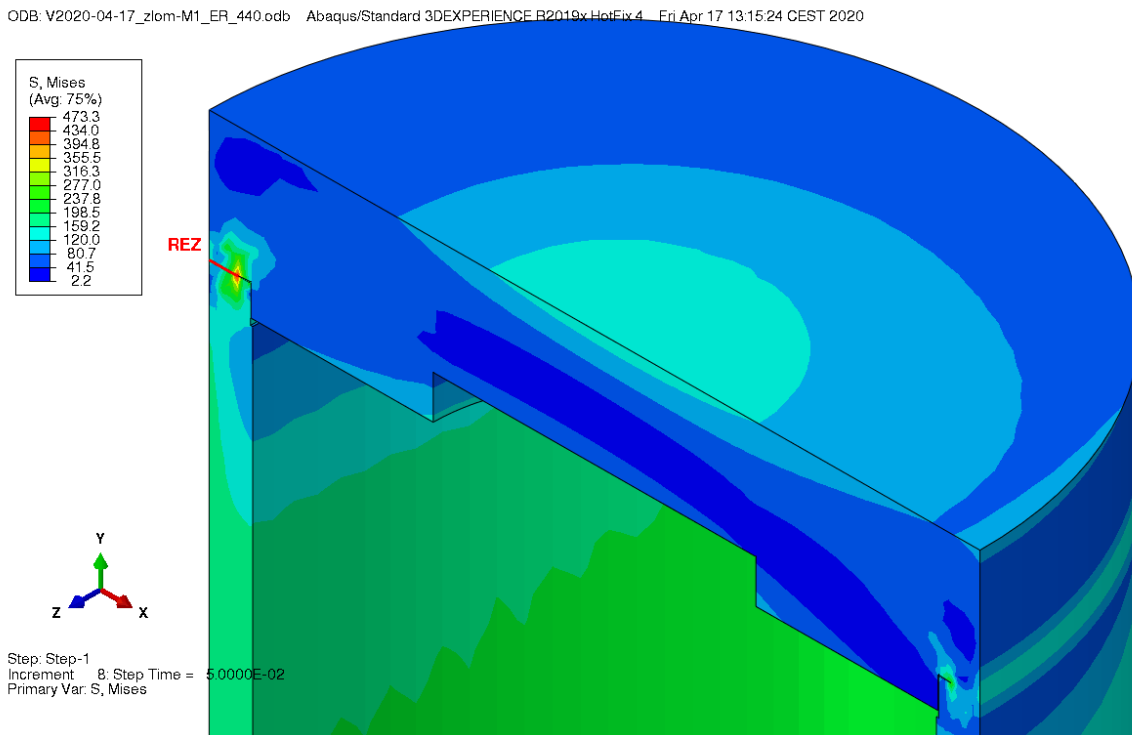
Pro vyhodnocení se dle NTD A.S.I. Sekce III určí jmenovité dovolené napětí  $[\sigma]$  ze vztahu:

$$[\sigma] = \max\left\{\frac{R_{p0,2}}{1,5}; \frac{R_m}{2,6}\right\}$$

Pak jsou určeny limitní hodnoty skupin kategorie napětí pro seismické zatížení. Vyhodnocení je uvedeno v tabulce Tab. 37.



Obr. 90 – Redukované napětí na UOS ŠKODA 440/7 a zobrazení deformace v rovině řezu

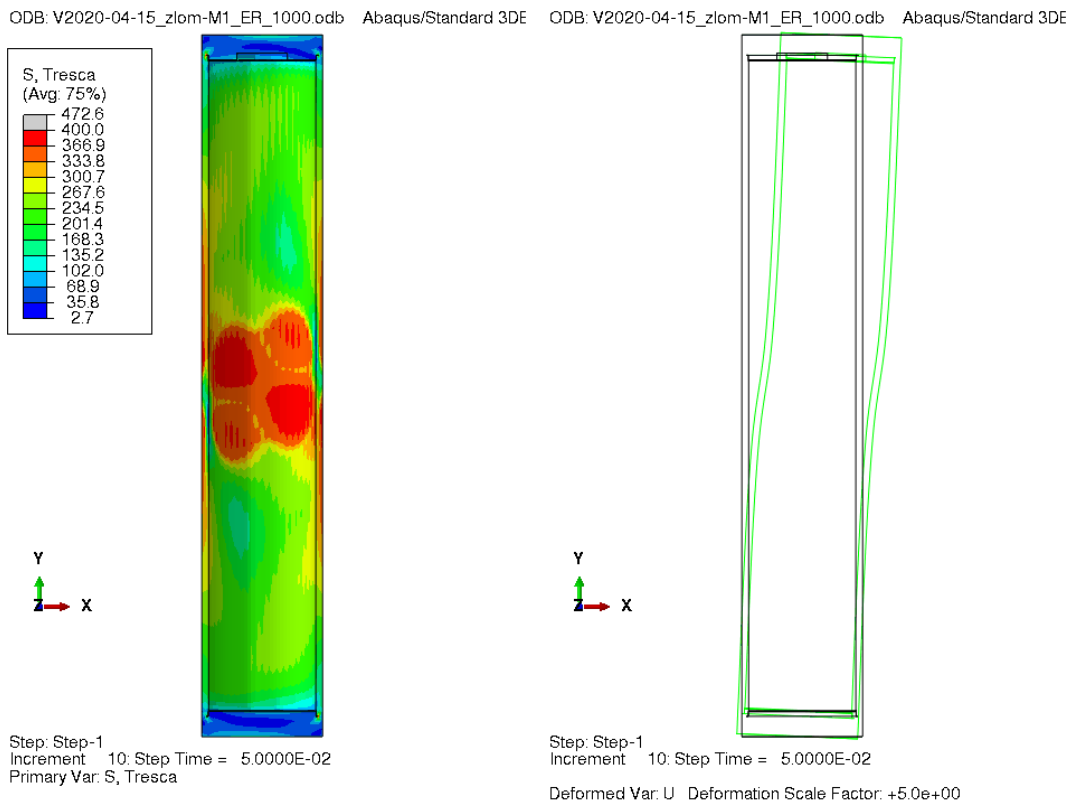


Obr. 91 – Kontrolovaný řez v místě přivaření víka UOS ŠKODA 440/7

Tab. 37 – Vyhodnocení dle skupin kategorií napětí řezu v místě přivaření víka UOS ŠKODA 440/7

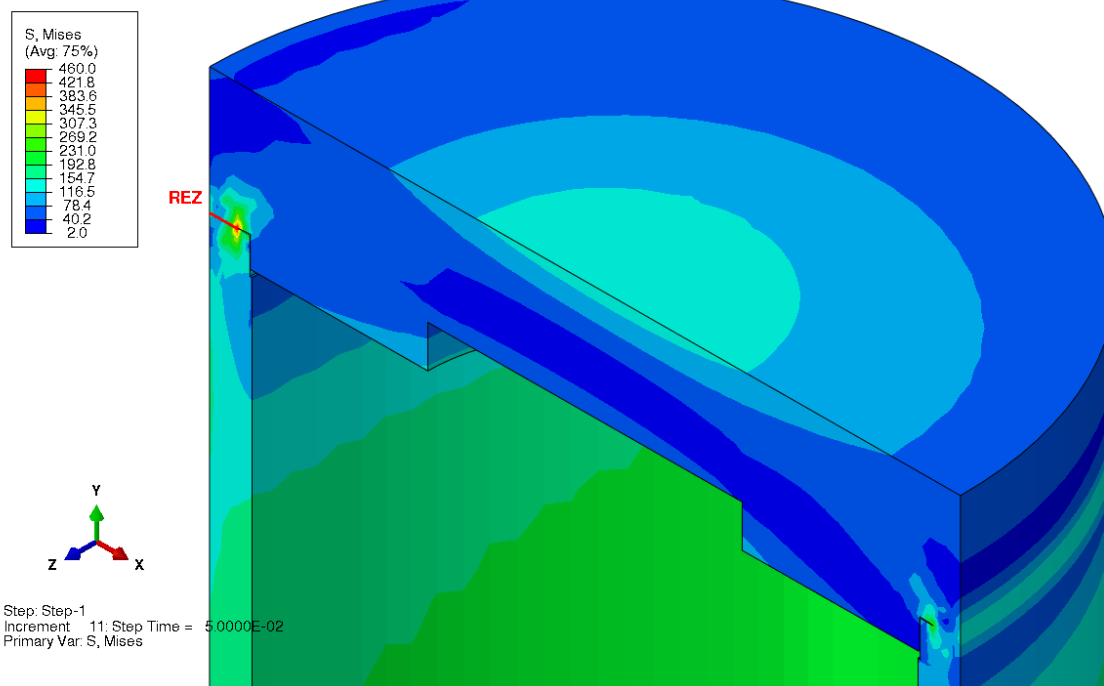
Redukované napětí		Limit		Vyhodnocení
Skupina kategorie	[ MPa ]	-	[ MPa ]	
$(\sigma_s)_1$	136,3	1,4 [σ]	253,1	Vyhovuje
$(\sigma_s)_2$	324,1	1,8 [σ]	325,4	Vyhovuje
$(\sigma_s)_2$	215,0			Vyhovuje

### 5.5.4.6 Výsledky UOS ŠKODA 1000/3 výpočtu střížných namáhání



Obr. 92 – Redukované napětí na UOS ŠKODA 1000/3 a zobrazení deformace v rovině řezu

ODB: V2020-04-17\_zlom-M1\_ER\_1000.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2019x HotFix 4 Fri Apr 17 10:48:08 CEST 2020



Obr. 93 – Kontrolovaný řez v místě přivaření víka UOS ŠKODA 440/7

Tab. 38 – Vyhodnocení dle skupin kategorií napětí řezu v místě přivaření víka UOS ŠKODA 1000/3

Redukované napětí		Limit		Vyhodnocení
Skupina kategorie	[ MPa ]	-	[ MPa ]	
$(\sigma_s)_1$	127,6	1,4 $[\sigma]$	253,1	Vyhovuje
$(\sigma_s)_2$	307,5	1,8 $[\sigma]$	325,4	Vyhovuje
$(\sigma_s)_2$	205,6			Vyhovuje

### 5.5.4.7 Kontrola napětí KTA

Metodika pevnostního vyhodnocení vychází z předpokladu, že předmětem výpočtu je model UOS, který je ve fázi, kdy již proběhlo odkorodování 15 mm povrchové vrstvy vnějšího obalu a 5 mm vnitřního pouzdra. To znamená, že UOS se nachází na konci své projektové životnosti a prokazujeme, že stále konstrukčně odolá vnějším zatížením uvažovaných při uložení. Proto lze konstatovat, že se nejedná o návrhový, počáteční stav ale o stav, kdy jsou již mechanické vlastnosti materiálu plně využívány. Z tohoto důvodu je k hodnocení UOS přistoupeno jako při hodnocení konstrukce UOS při havarijních provozních podmínkách. Z tohoto hlediska tak lze úspěšně aplikovat metodu kolapsu s uvážením elasto-plastického chování použitého materiálu. Tento způsob hodnocení je popsán například normativem KTA 3201.2. Z tohoto normativního dokumentu rovněž vyplývá i použití bezpečnostního koeficientu 1,1[-] a lze definovat mezní hodnoty povolené napjatosti pro použité materiály, viz Tab. 34 uvedená na stránce 103.

Tab. 39 – Vyhodnocení stříhu dle KTA 3201.2

UOS varianta	$\sigma_{red}$ [MPa]	Limit [MPa]	Hodnocení
UOS ŠKODA 440/7	325,4	427	Vyhovuje
UOS ŠKODA 1000/3	307,5	427	Vyhovuje

#### 5.5.4.8 Závěr z výpočtu stříhu

Byl proveden MKP výpočet mechanické odolnosti UOS střížnými tlaky při uvažovaném posunutí skalního masivu o 50 mm se smykovou (střížnou) rovinou kolmou na osu UOS (nejhorší případ) v polovině výšky UOS. Kontrola celistvosti byla provedena na základě vyhodnocení kritického místa přivaření víka UOS pomocí skupin kategorií napětí pro seismické zatížení dle NTD A.S.I. pro nejhorší případ (materiál bentonitu M1, modelovaná trhлина) Zejména pro varianty UOS ŠKODA 440/7 a UOS ŠKODA 1000/3. (Tab. 37 a Tab. 38). Kontrola byla alternativně provedena také podle KTA 3201.2 (Tab. 39). V části pláště UOS dochází k překročení meze kluzu, jedná se o hladké části UOS. Toto však neznamená porušení celistvosti UOS a tak zůstává zajištěna celková těsnost UOS.

Výpočty byly provedeny ve dvou navazujících krocích. V prvním kroku byl uvažován tlak v bentonitu 20 MPa. Tato hodnota představuje návrhové zatížení. Ve druhém kroku, který odpovídá silovým účinkům od maximálního výpočtového zemětřesení v mezích 7. – 8. stupně MSK-64, bylo zadáno posunutí horního bloku o 50 mm s rychlostí posunutí 1m/s.

Výpočtem tak byla prokázána seismická odolnost UOS a zajištění těsnosti na konci uvažované životnosti UOS. Tento výpočet je považován jako základní, prokazující schopnost UOS odolat obecně, projektově uvažovaným silovým účinkům. Na tento výpočet by v budoucnu měl navazovat zpřesňující výpočet seismické odolnosti UOS, který bude již svázán s konkrétní lokalitou umístění hlubinného úložiště.

#### 5.5.5 Teplotnické výpočty

Zpráva (Šik 2020) obsahuje výsledky teplotních analýz ukládacích obalových souborů s palivem VVER 440 a VVER 1000 po zavezení do hlubinného úložiště. Účelem analýz bylo teplotní ověření navržené koncepce ukládacích obalových souborů.

Po vyjmutí z reaktoru je vyhořelé jaderné palivo nejprve skladováno v BVP na elektrárně. Následuje suché skladování v obalovém souboru, který je umístěn ve skladu vyhořelého jaderného paliva rovněž v areálu elektrárny.

Tepelným výpočtem UOS je stanoveno rozložení teplot v systému UOS. Výsledky výpočtu mají potvrdit dodržení limitních teplot pro komponenty UOS, PS a bentonitu viz kapitola 5.5.5.5.

Pro výpočty teplotních polí byl použit program TEPL0, který řeší stacionární i nestacionární, lineární a nelineární, přímé a nepřímé úlohy vedení tepla metodou konečných prvků. Program TEPL0 je součástí systému FIESTA, který byl hodnocen dle Směrnice VDS030 SÚJB pod č.521.

##### 5.5.5.1 Zbytkový výkon v palivu

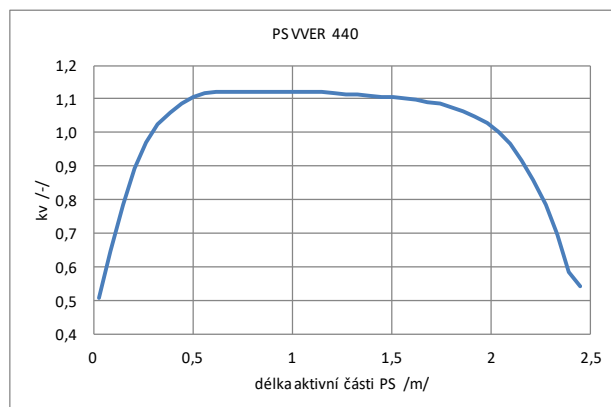
Zbytkový výkon vyhořelého jaderného paliva byl stanoven v (Lovecký, 2015a), a (Lovecký, 2015b) pro rozmezí 0 - 1 milion let (nulu představuje zavezení UOS do HÚ, tj. 65 let po konci ozařování v reaktoru). Pro tepelný výpočet UOS byly převzaty hodnoty pro okamžik zavezení do



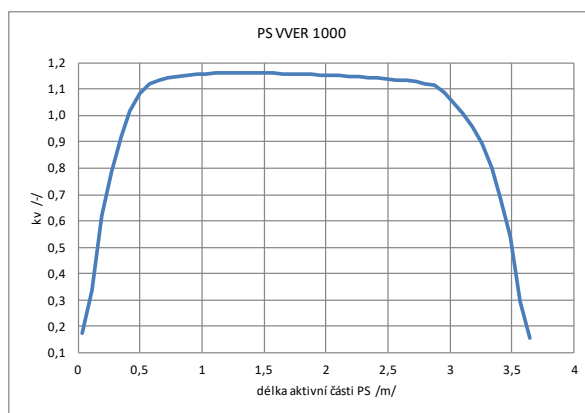
HÚ. Zbytkový výkon PS VVER 440 je pro tento časový okamžik 138,140 W a pro PS VVER 1000 je 450,758 W.

### 5.5.5.2 Axiální profil zbytkového výkonu v PS

Na Obr. 94 a Obr. 95 jsou znázorněny axiální průběhy zbytkového výkonu jednotlivých typů PS. Hodnota kv je definována jako poměr zbytkového výkonu na dané souřadnici ku střední hodnotě zbytkového výkonu v PS. Nulová hodnota délky palivové části představuje spodní okraj palivové části PS.



Obr. 94 – Axiální profil zbytkového výkonu PS VVER 440



Obr. 95 – Axiální profil zbytkového výkonu PS VVER 1000

### 5.5.5.3 Okrajové podmínky teplotního výpočtu pro jeden UOS

UOS je uložen v bentonitovém válci. Mezi UOS a bentonitem byla uvažována vzduchová mezera 0,01 m. Tato mezera byla zvolena na základě odborného odhadu. Mezera je zvažována jako technologicky nutná tak aby bylo možné UOS do vývrtní závěsné trubky zavést. Tyto údaje bylo nutné zvolit pro výpočet, nicméně do budoucna musí být tato skutečnost ještě předmětem dalších zkoumání. Skutečný UOS bude nakonec buď bentonitovými peletami, nebo bobtnáním spojen pevně s horninou a dojde tak k lepšímu sdílení tepla mezi horninou a bentonitem, přičemž teploty na povrchu UOS by měly být poté nižší, než ve výpočtu. Na vnějším povrchu UOS je uvažována okrajová podmínka teploty okolí 95 °C, což je limitní teplota bentonitu se součinitelem prostupu tepla vzduchovou mezerou. To znamená, že v rámci výpočtu nebude nikdy u bentonitu dosažena

vyšší teplota. Poté jsou ověřeny teploty na UOS, kterých UOS dosáhne právě při dosažení teploty bentonitu 95 °C. Aby nebylo 95 °C na bentonitu překročeno musí PS splnit zbytkové výkony popsané v kap. 5.5.5.1. Součinitel prostupu tepla vzduchovou mezerou zahrnuje paralelní přestup tepla vedením vzduchem bez vlivu konvekce a sáláním mezi povrchem UOS a bentonitu. Jeho hodnota byla vypočtena dle (SNTL, 1958) v závislosti na střední teplotě v mezeře a je uvedena v Tab. 40.

Tab. 40 – Součinitel prostupu tepla v mezeře mezi UOS a bentonitem

<b>Střední teplota v mezeře [°C]</b>	<b>Součinitel prostupu tepla [Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>]</b>
100	10,70
105	11,05
110	11,41
115	11,78

#### 5.5.5.4 Součinitele tepelné vodivosti

Součinitele tepelné vodivosti materiálů PS a komponent UOS jsou uvedeny v Tab. 2.2 a jsou převzaty z (Šik, 2014) a (GNB, 2002).

Teplotní závislost součinitele tepelné vodivosti helia, dusíku a vzduchu viz (Atomizdat, 1974).

Tab. 41 – Součinitele tepelné vodivosti materiálů uvažované nezávisle na teplotě

<b>Materiál</b>	<b>Součinitel tepelné vodivosti [Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]</b>
PS	0,67
Uhlíková ocel	40,00
Korozivzdorná ocel	15,00

#### 5.5.5.5 Limitní teploty

Maximální teplota pokrytí palivových elementů paliva typu VVER je 350 °C (GNB, 2002). Za maximální teplotu prvků komponent vnitřní vestavby UOS lze považovat teplotu tání daného materiálu. Limitní teplota na rozhraní bentonitu byla uvažována 95 °C viz kapitola 5.5.5.3.

#### 5.5.5.6 Výpočet

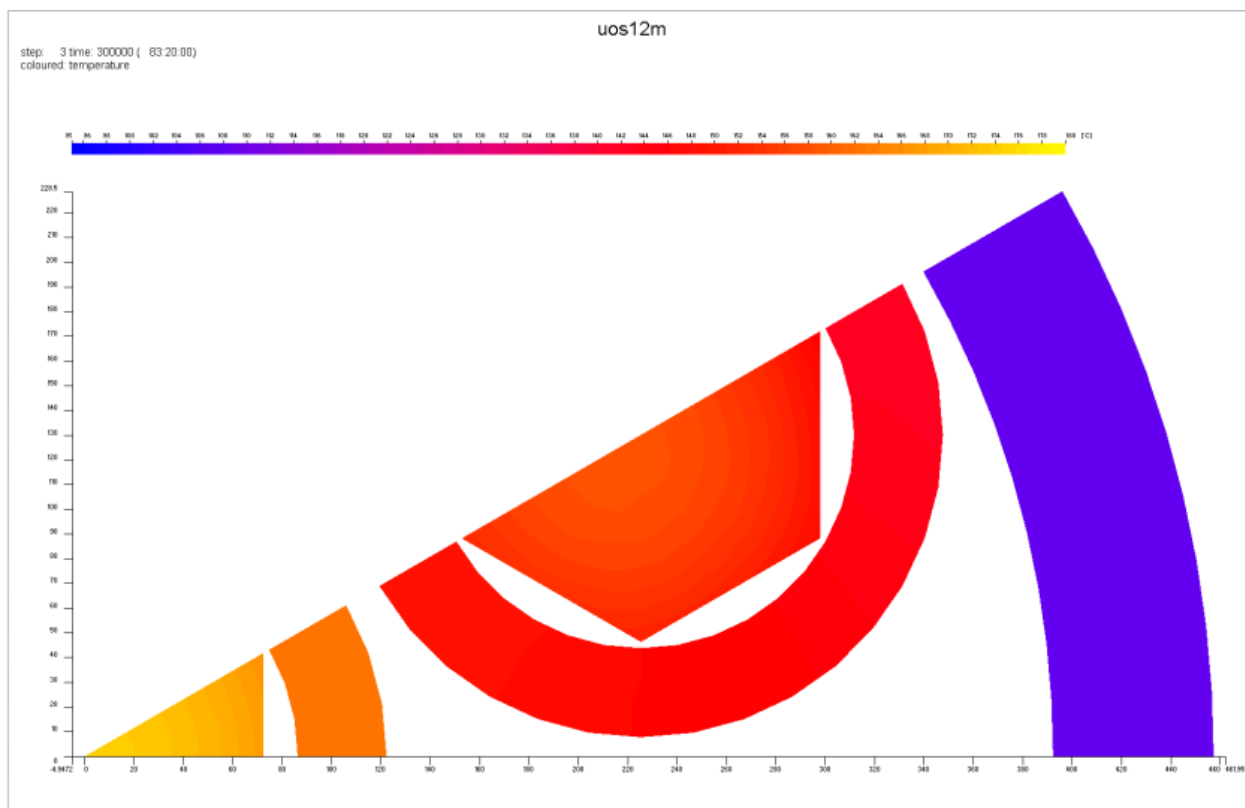
Výpočet teplotních polí v UOS byl proveden výpočtovým programem TEPL0. Program řeší rovnici vedení tepla ve dvourozměrné geometrii metodou konečných prvků. Programem je možno řešit úlohy stacionární a nestacionární, lineární a nelineární, přímé a nepřímé. Z nepřímých úloh jsou to úlohy geometrické a úlohy vnitřní a vnější.

Byla řešena stacionární rovinná úloha vedení tepla na modelu příčného řezu UOS v axiální úrovni maxima zbytkového výkonu. Geometrický model zahrnuje dle symetrie 1/12 (UOS ŠKODA 440/7) nebo 1/6 (UOS ŠKODA 1000/3) příčného řezu.

Prostor vnitřního pouzdra je vyplněn heliem, prostor vnějšího obalu dusíkem. V obou prostorech je modelováno vedení tepla plynem a sálání mezi povrchy komponent UOS a PS.

Výsledky výpočtu jsou nezávislé na poloze ukládání UOS do HÚ. Jsou tedy platné pro vertikální, horizontální i šikmé ukládání UOS do HÚ.

Na Obr. 96 je znázorněno teplotní pole v příčném řezu UOS ŠKODA 440/7 a v Tab. 42 jsou uvedeny maximální hodnoty komponent UOS a pokrytí paliva.

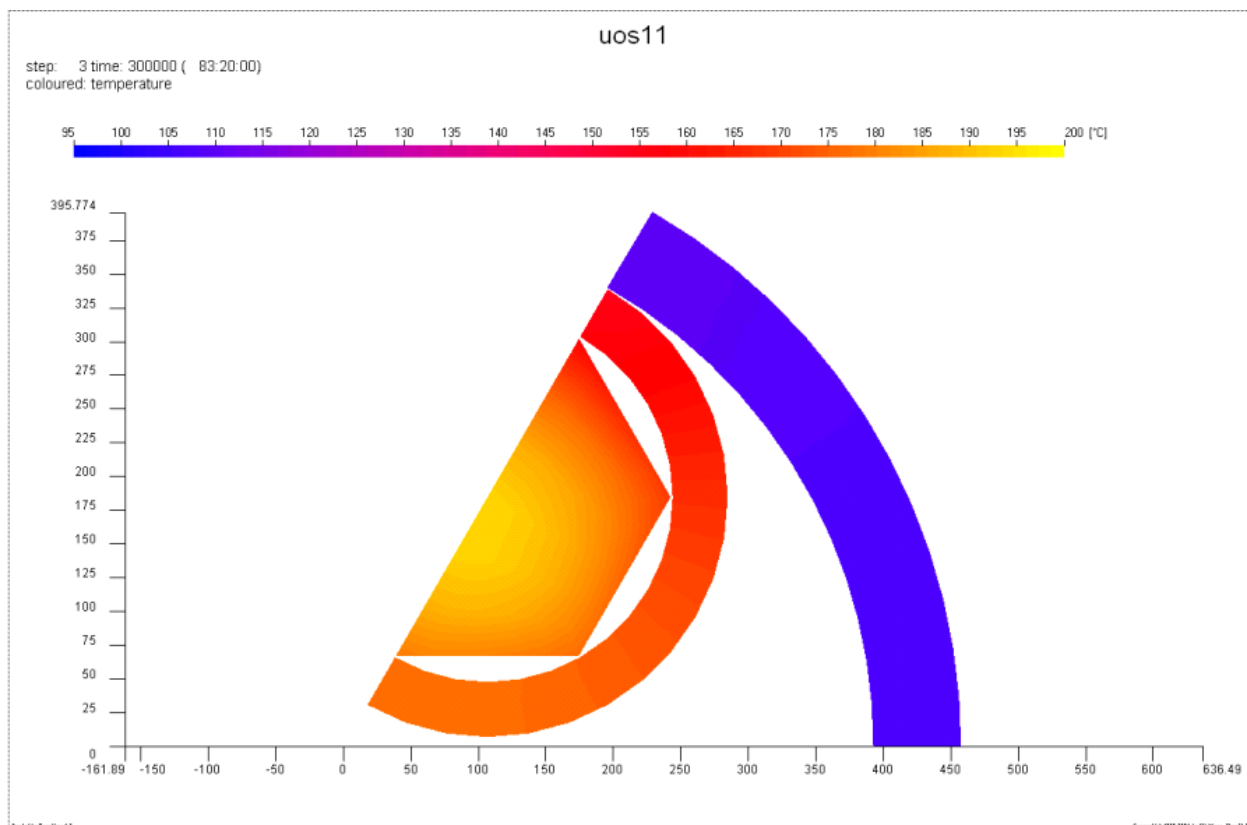


Obr. 96 – Teplotní pole v příčném řezu UOS ŠKODA 440/7

Tab. 42 – Maximální teploty komponent UOS ŠKODA 440/7

Komponenta	Maximální teplota [°C]
pokrytí palivových elementů	174,1
vnitřní pouzdro	162,4
vnější obal	108,6

Na Obr. 97 je znázorněno teplotní pole v příčném řezu UOS ŠKODA 1000/3 a v Tab. 43 jsou uvedeny maximální hodnoty komponent UOS a paliva.



Obr. 97 – Teplotní pole v příčném řezu UOS ŠKODA 1000/3

Tab. 43 – Maximální teploty komponent UOS ŠKODA 1000/3

Komponenta	Maximální teplota [°C]
pokrytí palivových elementů	193,0
vnitřní pouzdro	177,4
vnější obal	110,4

### 5.5.5.7 Závěr teplotních výpočtů

Tepelným výpočtem UOS bylo prokázáno, že konstrukce UOS pro palivo VVER440 a VVER1000 splňuje podmínky na dodržení limitních teplot pokrytí paliva a komponent UOS za předpokladu, že do HU je vkládáno palivo, které bylo skladováno 65 let od konce ozařování v reaktoru, se zbytkovými výkony viz kap. 5.5.5.1.

## 6 Další výzkum ukládacích obalových souborů

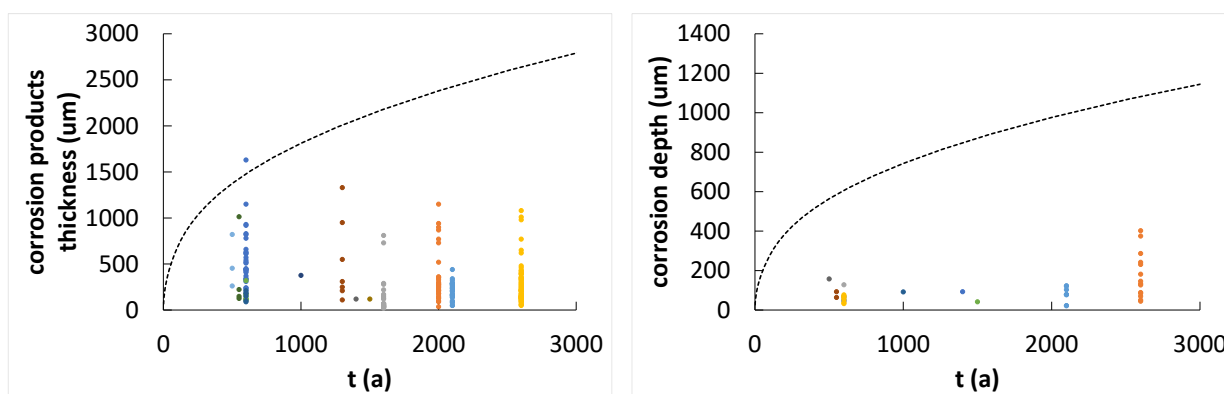
### 6.1 Výzkum koroze a životnosti

#### 6.1.1 Projekt ARCHANALOG

Protože experimenty s kovovými materiály v prostředí HÚ poskytují z hlediska celkové životnosti pouze krátkodobá data, řada týmů ve světě sbírá informace o korozní rychlosti a dlouhodobé životnosti kovových materiálů na základě archeologických analogů (Neff, 2006; Neff, 2010; Crossland, 2005; Smart, 2006a; Alexander, 2017). Projekt TAČR Théta „Archeologické analogy pro verifikaci modelů životnosti kontejneru pro hlubinná úložiště radioaktivního odpadu“ (TK01010040), probíhající v období 7/2018 až 6/2022, navazuje na tyto snahy a v rámci projektu je sbíráno velké množství dat z různých archeologických lokalit. Projekt cílí na lokality s vysokou mírou zavodnění (dna rybníků a delty potoků) a s jílovým podložím. Toto téměř anaerobní prostředí je velmi podobné podmínkám po uzavření úložiště.

Tloušťka vrstvy korozních produktů (smíšených s půdními částicemi) jsou hodnoceny pomocí rentgenové tomografie. Okolní jílová půda je podrobena detailní pedologické analýze. Je stanovována porozita, objemový obsah vody a hustota pevných částic. Z půdy je pod vysokým tlakem vytlačen pórový roztok, který je následně analyzován na pH a obsah aniontů. Historicky méně hodnotné artefakty jsou podrobeny destruktivní analýze. Je hodnocen obsah jednotlivých fází ve vrstvě korozních produktů smíšených s půdou pomocí rentgenové difrakce. Výsledky jsou následně ověřovány pomocí SEM/EDS map. Tloušťka korozních produktů je následně přepočítána na tloušťku zkorodovaného železa.

Na Obr. 98 je uvedeno předběžné srovnání 3D modelu s daty. Varianta vyhodnocení tloušťky směsi korozních produktů s částicemi půdy/jílu je z tomografických fotografií známa pro všechny hodnocené artefakty. Nicméně některé artefakty obsahují vyšší podíly půdy/jílu. Druhá varianta už je přesnější a ukazuje již přepočtenou tloušťku zkorodovaného kovu. Nicméně v tomto grafu je méně dat, protože není plně dokončeno XRD hodnocení složení směsi korozních produktů a půdy/jílu ze všech lokalit. 3D model s magnetitem ukazuje, že hodnocení životnosti je dostatečně konzervativní.



Obr. 98 – Porovnání 3D modelu s magnetitem s archeologickými daty: tloušťka korozních produktů a půdních/jílových částic (vlevo) a s přepočtenými korozními penetracemi (vpravo)

Do konce projektu budou nashromážděny vzorky z přibližně 20 lokalit a pro verifikaci modelů životnosti UOS bude k dispozici množina více než 200 dat s dobou expozice až 2600 let.

### 6.1.2 Projekt RADMIC

Projekt TAČR Théta „Vliv radiolýzy a bakteriálních extremofilů na životnost kontejneru pro hlubinné úložiště RAO“ (TK03010067), probíhající v období 9/2020 až 8/2023, se snaží doplnit neznámé informace o chování korozivzdorné oceli v prostředí HÚ. Navazuje na předchozí experimenty s elektrochemickou potenciostatickou technikou a analýzou rozpuštěných kationtů pomocí metody ICP-MS. Hlavním cílem je stanovení vlivu gama záření, které může přímo zvyšovat rozpustnost pasivní vrstvy ionizací kationtů nebo nepřímo vlivem vysoce oxidačních produktů radiolýzy (především  $H_2O_2$ ). Dalším úkolem je doplnění údajů o kritických podmínkách, kterým se musí vnitřní pouzdro vyhnout. Již byly stanoveny kritické podmínky pro iniciaci bodové koroze způsobené chloridy z pórového roztoku bentonitu, a je potřeba stanovit kritické podmínky pro thiosírany. Ty mohou vznikat působením sulfát redukujících bakterií, které produkují anionty  $HS^-$ , a mohou následně být zoxidovány produkty radiolýzy na  $S_2O_3^{2-}$ .

### 6.1.3 Budoucí práce potřebné pro zpřesňování výpočtu životnosti ukládacích obalových souborů

#### Dlouhodobé korozní testy v podzemní laboratoři

V současnosti startuje národní projekt, který navazuje na mezinárodní projekt MaCoTe (kap. 2.2.1). V rámci projektu budou testovány aktuální konstrukční materiály s českým hořečnatě-vápenatým bentonitem v podzemní laboratoři Bukov. Experimenty při 70 - 90 °C jsou plánované na 10 let s možným rozšířením o další sadu vzorků při jiné teplotě. Kromě stanovení korozních rychlostí vybraných materiálů a fázových analýz korozních produktů se plánuje i rozsáhlý výzkum v oblasti mikrobiálního osídlení systému.

#### Lokalizace korozního napadení

Je třeba rovněž prostudovat detailněji mechanismus lokalizace korozního napadení uhlíkové oceli a ověřit možnosti koncentračních změn v roztoku, způsobených heterogenitou prostředí či galvanickým článkem s vodivým korozním produktem. Termodynamické výpočty stability korozních produktů je třeba korelovat s případnými změnami chemického složení a pH roztoku na aktivních místech.

#### Mikrobiální koroze uhlíkové oceli

Dalším výrazným faktorem ovlivňujícím životnost UOS je mikrobiální koroze. Je potřeba detailně prostudovat kinetiku lokalizace korozního napadení uhlíkové oceli vlivem sulfát redukujících a denitrifikačních bakterií. Zejména je třeba se zaměřit na vliv kompaktizace bentonitu a vliv vznikajících bariér korozních produktů.

#### Hlinito-křemičitanové korozní produkty uhlíkové oceli

Z hlediska dlouhodobé životnosti je důležité rovněž ověřit možnost vzniku korozních produktů železa na bázi hlinito-křemičitanů. Tyto sloučeniny jsou termodynamicky nejstabilnější a velmi pravděpodobně budou konečným produktem transformací (Wilson, 2015). Ověřit jejich přítomnost v dlouhodobých vzorcích ze švédské Kiruny (projekt Kiruna Natural Analogue), kde je

v dlouhodobém kontaktu železná ruda a bentonit. Dále studovat možnosti vzniku hlinito-křemičitanů transformací bentonitu i precipitací z pórového roztoku. Dále by bylo vhodné ověřit možnosti porušení UOS tlakem vzniklých korozních produktů, přestože krátkodobá studie (Smart 2006b) ukázala malý vliv vznikajících korozních produktů. Dlouhodobé korozní produkty však mohou být kompaktnější. Hlinito-křemičitany jsou velmi objemné a krystalizační tlaky mohou být vysoké. Pro výpočet je nutné vedle stlačitelnosti bentonitu získat i data o mechanických vlastnostech dlouhodobých korozních produktů.

### **Experimenty v reálném měřítku**

Dalším nezbytným krokem je studium dějů v prostředí podzemní laboratoře v reálném měřítku. Kromě ověřování proveditelnosti ukládání je důležité i studium parametrů významně ovlivněných scale-efektem, jako teplotní spád, rovnoměrnost saturace a jiné.

## **6.2 Budoucí výzkum UOS**

### **6.2.1 Projekt TAČR ORTEV**

V souběhu s etapou 4 tohoto projektu začaly práce na projektu TAČR ORTEV jehož cílem je vyvinout uživatelsky přívětivý software pro výpočty sloužící k optimalizaci rozteče ukládacích míst HÚ. Tento software má být dostatečně jednoduchý na to, aby ho mohly jednoduše využívat subjekty státní správy v průběhu návrhu HÚ a během výběru vhodné lokality pro HÚ. Projekt běží ve spolupráci ČVUT FJFI a ŠKODA JS a.s. Aplikačním garantem projektu je SUJB.

### **6.2.2 Detailní řešení sériové výroby UOS**

V současném projektu je navržen zcela funkční UOS avšak pouze jako prototyp ve variantě pro výrobu 1 kusu. Je zřejmé, že pro výrobu tisíců kusů UOS bude potřeba technologii výroby optimalizovat, tak aby byla v dané době co nejefektivnější. Tato optimalizace ale bude předmětem zkoumání spíše v pozdějších fázích přípravy HÚ, neboť do té doby jistě dojde k vývoji výrobních technologií, cen apod.

### **6.2.3 Řešení zařízení horké komory HÚ ve vazbě na UOS**

Výsledkem projektu je detailní návrh samotného UOS včetně návrhu technologie výroby. Některé činnosti spojené s kompletací UOS a závázkou palivem však budou řešeny přímo v horké komoře HÚ za pomoci speciálních automatů. Takové automaty v současné době neexistují a tak bude potřeba provést jejich detailní návrh. Lze očekávat, že z průběhu vývoje těchto automatů vyplyne nutnost některých dílčích modifikací designu UOS.

### **6.2.4 Hodnocení možných poškození a ovlivnění životnosti během manipulací s UOS**

Jelikož s UOS budou ještě před samotným uložením probíhat náročné operace, existuje pravděpodobnost, že dojde k narušení povrchu. Samotný UOS bude také vystaven vzdušným vlivům. Obě možnosti mohou ve výsledku ovlivnit samotnou životnost UOS. Z tohoto důvodu je nutné do budoucna těmto možnostem věnovat pozornost a určit jakým způsobem mohou, nebo

nemohou životnost UOS ovlivnit. V současné době se předpokládá, že vhodnou eliminací nebezpečí od těchto vlivů je dostatečně předimenzovaná tloušťka stěny UOS.

### **6.2.5 Bezpečnostní hodnocení celého konceptu**

Pro prokázání bezpečné funkce celého konceptu v čele s navrženým UOS bude potřeba provést důkladné bezpečnostní hodnocení.



## 7 Závěr

Byl navržen unikátní typ ukládacího obalového souboru, u kterého vnější obal i vnitřní pouzdra plní funkci korozní i pevnostní odolnosti. Každá část UOS je tak schopna poskytovat maximální odolnost v jiné fázi uložení. Oba materiály, uhlíková ocel (jakýkoli typ splňující specifikace z kap. 3.1.2) i austenitická korozivzdorná ocel (EN 1.4404) jsou známé a snadno dostupné. Životnost vnějšího obalu z uhlíkové oceli s korozním přídatkem 15 mm bude dle dosavadních experimentů s bezpečnou rezervou dostatečná pro eliminaci nejistot pro správnou funkci vnitřních pouzder, eliminací nejistot je spotřeba kyslíku v HÚ a pokles teploty pod 50 °C (pokles teploty na 50 °C za 1000 let viz Obr. 1). Celková životnost UOS dle všech zvažovaných korozních modelů bezpečně překoná požadovanou životnost 100 000 let.

U obou materiálů jsou také dobře rozvinuté technologie zpracování. Rozpracovaný koncept, který uvažuje pro každý palivový soubor vlastní vnitřní pouzdro, má jako hlavní výhodu velmi snadnou manipulovatelnost v horké komoře. Přestože se nejedná o úplně ekonomickou variantu, jsou užité vlastnosti tohoto konceptu excelentní.

Pro výběr dvou variant UOS pro palivo VVER 440 a VVER1000 byla zohledněna řada parametrů, pomocí nichž byly z celkem třinácti zvažovaných variant vybrány dvě varianty později nazvané jako UOS ŠKODA 440/7 a UOS ŠKODA 1000/3. Varianta UOS ŠKODA 440/7 pojme sedm palivových souborů paliva VVER 440 a varianta UOS ŠKODA 1000/3 pojme 3 palivové soubory paliva VVER 1000. Tyto dvě varianty mají sjednocený vnější průměr, přičemž tato skutečnost by do budoucna mohla přinést zlevnění konceptu oproti dvěma rozdílným průměrům.

Z hlediska technologie výroby byly taktéž provedeny zkušební vzorky svarů s velmi dobrými výsledky a byla tak ověřena proveditelnost technologie svařování.

K oběma variantám byla vypracována podrobná projektová dokumentace na základě níž bude možné vyrobit budoucí prototypy UOS a poslouží taktéž jako podklad k výrobě prezentačního vzorku UOS, který bude dále vyroben v etapě 4 tohoto projektu.

Poslední fází bylo výpočetní ověření UOS, tak aby byla splněna maximální bezpečnost konceptu ze všech možných hledisek. Jednalo se zejména o pevnostní výpočty, teplotní výpočty, výpočty podkritičnosti, výpočty stínění a výpočty stříhu (seismicita). Tyto výpočty byly prováděny v několika iteracích vždy spolu s konstrukční změnou, tak aby bylo dosaženo optimálních výsledků. Na teplotní výpočty v současnosti navazuje dotační projekt TAČR ORTEV jehož cílem je vyvinout software umožňující další optimalizaci, zejména optimalizaci kapacity HÚ z pohledu vývinu tepla, tak aby stále byla zachována maximální možná bezpečnost HÚ.

Přestože již bude vyrobena první maketa UOS, je stále nezbytné dále pracovat na výzkumu a vývoji spojeném s UOS. Z hlediska konstrukce UOS se jedná zejména o detailní návrh manipulací s UOS v HÚ, na základě nichž, může být ještě mírně optimalizována geometrie UOS například přidáním manipulačních drážek. Spolu s manipulacemi v HÚ bude souviset i nutnost vývoje jednoúčelového svařovacího automatu vnějších obalů, jelikož současné svary VO jsou prováděny ručně právě z důvodu neexistence (důvodem jsou náklady na vývoj, které zcela převyšují možnosti tohoto projektu) takového zařízení. Z hlediska korozní odolnosti a životnosti UOS je potřeba doplnit zejména informace o dlouhodobých korozních produktech, vlivu radiolýzy a zejména mikrobiální koroze.

## 7.1 Zhodnocení použitých přístupů

Veškeré práce provedené v rámci tohoto projektu byly zaměřeny na základní tři oblasti:

- Optimalizovat navrhované materiály z hlediska koroze, technologie výroby a dostupnosti na trhu
- Dosáhnout zadaného kritéria minimální životnosti navrhovaného UOS na 10 000 let (s odhadem chování UOS až do řádu 100 000 let)
- Výpočtově ověřit optimalizované varianty UOS z pohledu podkritičnosti inventáře, stínících vlastností a mechanické odolnosti

Z pohledu kritériálního hodnocení UOS jsou obecně uvažovány dva základní koncepty:

- Koncept, kde životnost kontejneru zajišťuje pouze vnější obal
- Koncept, ve kterém je životnost zajišťována vnějším obalem i vnitřním pouzdem

Tento projekt rozpracovává druhý typ konceptu, kdy vnější obal UOS (z uhlíkové oceli) má základní funkci, kdy po stanoveném úbytku materiálu vlivem různých korozních mechanismů, musí v intervalu zadané životnosti udržet svoji integritu (zamezit případnému úniku radionuklidů). Vnitřní pouzdro (z korozivzdorné oceli) pak má funkci zejména těsnostní (těsnostní bariéra uloženého paliva) a v případě poškození vnějšího obalu opět funkci těsnostní a funkci korozní ochrany v anaerobním prostředí. Před uložením UOS plní i funkci stínící.

První typ konceptu – tzn. vnější obal z mědi nebo slitiny titanu je v tomto projektu uvažován jen okrajově (viz kap. 2.1.1 – Obr. 5) a do optimalizovaných variant UOS se nepromítnul.

### 7.1.1 Optimalizace navrhovaných materiálů UOS

V průběhu tohoto projektu byly analyzovány postupně následující materiály vnějšího obalu:

- Ocel ČSN 12020
- Litá ocel ČSN 42 27 07.9
- Ocel C16E+A dle EN 10084
- Ocel P285QH+QH dle EN 10222-4
- Ocel X65MS
- Ocel S355J2H+N

Podrobnosti viz zpráva 493/2020 (Ae 19562/Dok).

Jako optimální materiály (na základě výrobní dostupnosti a korozní odolnosti) byly zvoleny:

Vnější obal UOS: Ocel S355J2H+N

Vnitřní obal a vestavba: Korozivzdorná ocel 1.4404

Technické dodací podmínky pro tyto materiály jsou předběžně stanoveny v kusovníku pro UOS ŠKODA 440/7 (viz Tab. 22 této zprávy). Pro UOS ŠKODA 1000/3 kusovník (tudíž ani TDP) nejsou uváděny z důvodu, že jsou použity stejné materiály UOS ŠKODA 440/7 a ŠKODA 1000/3 (pouze rozdílné rozměry VP a délky VO).

Pozn.:

1.) V době reálné objednávky / dodávky materiálů UOS budou TDP přizpůsobeny aktuální situaci. V kusovníku (Tab. 22) jsou tudíž TDP uvedeny v obecném tvaru s tím, že požadované mechanické a chemické vlastnosti těchto materiálů budou domluveny v „Technických podmínkách na dodávku“ s výrobcem.

Atesty základních použitých materiálů UOS (VO + VP) jsou v Příloze č.1 a č.2 této zprávy.

Pevnostní hodnoty materiálu vnějšího obalu (Příloha č.1) a vnitřního pouzdra (Příloha č.2) jsou určující pro výpočty pevnosti UOS při následném zahrnutí standardně používaných experimentů a konzervativizmů.

Pro výrobu vzorku byly použity jednak materiály z Přílohy č.1 a 2, ale i materiály další (např. 1.4301) jejichž atesty přiloženy nejsou neboť do výpočtů reálného UOS vůbec nevstupují.

V současné době se na základě provedených experimentů předpokládá zhotovení tělesa vnějšího pláště z bezešvé ocelové trubky z jemnozrnné oceli pro tlakové účely vycházejících z požadavků EN 10216-3 (ocel P460N), přičemž by byla dodávána ve stavu normalizačně žíhaném.

Variantně lze uvažovat o polotovaru dodávaném ve formě svařovaného dutého profilu, případně ve formě výkovku.

Materiálová specifikace pro zhotovení dna a víka vnějšího pláště bude vycházet z požadavků na ocelové výkovky pro tlakové účely ze svařitelné jemnozrnné oceli s vyšší mezí kluzu ve stavu normalizačně žíhaném. Variantně je možné použití za tepla válcovaného plechu v normalizačně žíhaném stavu, případně jiná varianta plnicí všechny materiálové požadavky.

V případě vnitřního pouzdra bude materiálová specifikace zohledňovat požadavky norem pro bezešvé ocelové trubky pro tlakové nádoby. Dno a víko budou vycházet z požadavků na tyče z korozivzdorné oceli pro tlakové účely.

Konečná materiálová specifikace, která bude detailně specifikována v předvýrobní fázi realizace projektu UOS bude zohledňovat všechny budoucí výzkumné práce, dostupnost na trhu a hospodárnost daného řešení, To vše při dodržení požadavku na maximální bezpečnost UOS.

2.) Filosofie stanovení vstupních mechanických hodnot pro výpočty vychází z ověření těchto hodnot z přiložených atestů (Příloha č.1 a 2) reálnými experimenty a zavedením rutinních konzervativních přístupů.

Dochází tedy k situaci kdy mez kluzu materiálu vnějšího obalu z atestů je uváděna v hodnotách 360 až 510 MPa a mez pevnosti 460 až 620 MPa (viz též kap. 3.1.2 této zprávy) což jsou poměrně široké rozptyly, které vedly k tomu, že konkrétně použitý materiál byl paralelně podroben mechanickým zkouškám (viz zpráva Ae 19590/Dok, rev. 2), které upřesnily atestové hodnoty pro podmínky využití ve výpočtových zprávách. Došlo tedy k upřesnění atestových pevnostních hodnot na hodnoty meze kluzu 320 MPa a meze pevnosti 470 MPa, resp. 190 a 490 MPa (viz Tab.3.1, 3.2 zmíněné zprávy).

Pro metodiku elasto-plastického hodnocení pak byly tyto hodnoty upraveny dle KTA 3201.2 (viz Tab. 4.1 zmíněné zprávy).

## 7.1.2 Životnost UOS

Výše uvedené materiály jsou použity v návrhu UOS ŠKODA 440/7 (Varianta č. 12) a ŠKODA 1000/3 (Varianta č. 11). Detailní popis těchto variant viz. kapitola 4 této zprávy.

V průběhu projektu docházelo k postupné genezi hodnocení životnosti UOS. Detaily jednotlivých přístupů jsou uvedeny v průběžných nebo v této závěrečné zprávě projektu. V této kapitole pro přehlednost sumarizujeme jednotlivé výsledky přístupů hodnocení životnosti a jejich genezi v čase. Popisované přístupy jsou poplatné vždy údajům, faktům a předpokladům známým v dané době.

### 7.1.2.1 Nultý přístup k hodnocení

Toto byla první fáze hodnocení experimentálních dat v roce 2017 za použití původního typu lité oceli (ČSN 422707.9), který se ukázal jako nevhodný, kvůli extrémní lokalizaci korozního napadení. V této době byl navíc jako jediná bariéra zodpovědná za životnost UOS uvažován pouze vnější obal z uhlíkové oceli. Byly použity extrémně konzervativní hodnoty lineární korozní rychlosti 30 um/rok pro prvních 100 let uložení, zahrnující aerobní korozní napadení se započtením extrémní naměřené lokalizace po celou dobu trvání aerobní fáze uložení do kompletní saturace bentonitu podzemní vodou. I pro další, anaerobní fázi uložení pak byla uvažována experimentálně stanovená lineární hodnota ustálené korozní rychlosti 5 um/rok. Tyto hodnoty vedly ke stanovení životnosti pod požadovanou dobu 10 000 let. Tento přístup byl extrémně konzervativní a nezohledňoval rychlé omezení lokalizace napadení v čase, neustálé zpomalování korozní rychlosti v čase dané nepřetržitou precipitací korozních produktů a v neposlední řadě i postupný pokles teploty v HÚ. Tento přístup byl ihned opuštěn a nefiguroval v žádných dalších zprávách.

### 7.1.2.2 První přístup k hodnocení

Toto hodnocení bylo použito v roce 2018 pro hodnocení jednotlivých variant UOS a bylo jedním z kritérií pro výběr finálních variant. V tomto případě se již uvažovala životnost sdílená mezi vnější obal i vnitřní pouzdro pro varianty konceptů uhlíková ocel/korozivzdorná ocel. Pro každou variantu byl v ŠJS spočten korozní přídavek, tzn. tloušťka VO či VP, která může odkorodovat, než bude daný obal mechanicky poškozen. Pro mechanické výpočty byly uvažovány 3 úrovně vnějšího tlaku: 10, 15 a 20 MPa. Při výpočtu se vycházelo z předpokladu poškození při dosažení meze kluzu, tzn. první plastické deformace, což je velmi konzervativní přístup. Pro každou variantu tak byly k dispozici 3 hodnoty životnosti.

Tento přístup zahrnoval pro VO hodnocení a extrapolaci experimentálních dat (stále ještě na oceli ČSN 422707.9) s předpokladem transportního řízení korozního děje (parabolická závislost na čase). Jednotlivé časové úseky nebyly hodnoceny diskrétně za výpočtu diferenciální hodnoty korozní rychlosti, ale jako integrální vývoj korozní penetrace v čase, kdy ke zpomalování korozního děje dochází po celou dobu životnosti UOS. Navíc nově zahrnoval i vliv poklesu teploty s pomocí experimentálně stanovené hodnoty aktivační energie.

Hodnocení VP bylo v této době problematické. Z hodnocení hmotnostních úbytků nebylo možné stanovit smysluplná experimentální data. Hmotnostní úbytky korozivzdorné oceli jsou příliš nízké pro běžné analytické váhy (přesnost 0,0001 g), a při použití ultravah (přesnost 0,0000001 g) jsou

výsledky ovlivněné nezbytným mořením vzorků do té míry, že jsou nepřesné. Byla tedy provedena literární rešerše a z ní stanovena střední hodnota lineární korozní rychlosti 0,1 um/rok. Tato hodnota však byla ovlivněna započtením hodnot z experimentů, které rovněž obsahovaly výsledky z gravimetrie a byly evidentně zatíženy stejně extrémní chybou, jako v případě českých experimentů. Nicméně návrh, aby tyto hodnoty byly vyřazeny, a střední hodnota se tak posunula na smysluplnější hodnotu 0,02 um/rok, byl zamítnut. Výše zmíněná hodnota 0,1 um/rok tak byla při hodnocení variant použita pro korozivzdornou ocel i pro titan. V hodnocení tak docházelo k paradoxní situaci, že u některých variant byla životnost VO z uhlíkové oceli vyšší než u VP z korozivzdorné oceli. Tento fakt neodráží realitu, ale pouze tehdejší stav poznání a dat, které byly k dispozici.

### 7.1.2.3 Druhý přístup k hodnocení

Protože každá nová data či rozhodnutí ohledně konceptu HÚ měnila výrazně pevnostní výpočet korozního přídávku, byly v této fázi již byly pevně stanoveny minimální hodnoty korozního přídávku: 15 mm pro VO a 5 mm pro VP. Tyto hodnoty jsou dostatečně konzervativní a různé změny v konceptu by neměly vést po přepočtu pevnostních charakteristik k nižším hodnotám korozních přídávků, než jsou tyto dvě.

Tento přístup hodnocení životnosti VO, pro závěrečnou zprávu projektu v roce 2021, již zahrnoval vývoj zjednodušeného modelu zahrnujícího transport a precipitaci korozních produktů v pórovém systému bentonitu. Model byl korigován s dosaženými krátkodobými experimentálními daty na již reálném materiálu S355J2H+N za izotermních podmínek a následně rozveden na delší časy i s přihlédnutím k poklesu teploty v čase. Byly modelově simulovány 3 typy korozních produktů: magnetit, siderit a chamosit. Výsledky z modelu s reálně pozorovaným korozním produktem sideritem, pak byly použity pro hodnocení životnosti VO. Životnost VO v tomto typu modelu by byla 5,4 mil. let. Je důležité zde připomenout, že uvažování o životnosti UOS formou konstantní korozní rychlosti je velmi nepřesné. Jedná se o komplexní model, který se nedá aproximovat nejen konstantní hodnotou, ale ani jednou jednoduchou funkcí. Vždy je potřeba provést modelový výpočet pro konkrétní hodnotu korozního přídávku a stanovit přesný čas do porušení VO.

Pro hodnocení životnosti VP byla použita data z elektrochemických měření, která jsou přesnější než výše zmíněné hmotnostní úbytky, nicméně se pořád jedná o data, kdy je vnějším zdrojem materiál nucen k rozpouštění. Nebyla tedy k dispozici žádná přesnější data o skutečném průběhu vývoje korozní rychlosti v čase a na tehdejší úrovni poznání bylo možné využít jen hodnoty ustálené korozní rychlosti na konci krátkodobého měření. Použitá hodnota 4,46 nm/rok, je tak stále velmi konzervativní, přesto zaručuje experimentálně bezpečně ověřenou životnost minimálně na úrovni 1,1 mil. let.

### 7.1.3 Výpočtové zhodnocení návrhů UOS

V rámci tohoto projektu byly provedeny základní fyzikální a mechanické výpočty – viz seznam níže.

Zpráva	Ev. Číslo /akt. revize	Poznámka

Tepelný výpočet	Ae 15530/Dok, rev. 2	
Tepelný výpočet	Ae 16093/Dok, rev.4	
Podkritičnost	Ae 15515/Dok, rev.0	Palivo Gd-2M
Podkritičnost	Ae 15992/Dok, rev.0	Palivo AP 1000 a EPR-1600
Podkritičnost	Ae 15990/Dok, rev.0	Palivo VVER 440
Podkritičnost	Ae 15991/Dok, rev.0	Palivo VVER 1000
Podkritičnost	Ae 20777/Dok, rev.0	UOS ŠKODA 440/7
Stínění	Ae 15516/Dok, rev.2	Palivo Gd-2M
Stínění	Ae 15995/Dok, rev.2	Palivo AP-1000 a EPR-1600
Stínění	Ae 15993/Dok, rev.3	Palivo VVER 440
Stínění	Ae 15994/Dok, rev.3	Palivo VVER 1000
Inventář	Ae 15514/Dok, rev.0	Palivo Gd-2M
Inventář	Ae 15989/Dok, rev.0	Palivo AP 1000 a EPR-1600
Inventář	Ae 15987/Dok, rev.0	Palivo VVER 440
Inventář	Ae 15998/Dok, rev.0	Palivo VVER 1000
Korozní přídavky	Ae 17373/Dok, rev.0	Pro var. 10 a 11

Pevnost	Ae15478/Dok, rev.0	Základní dimenzování
Pevnost	Ae 16205/Dok, rev.0	Základní dimenzování VO
Pevnost	Ae 19590/Dok, rev.1	UOS ŠKODA 440 a 1000
Pevnost	Ae 16886/Dok, rev.2	Střížní tlaky

Poznámka: V dokumentu Ae16886/Dok, rev.2 je napětově hodnocen pouze VO (dle NTD-ASI i dle KTA).

Metodika řešení pevnostních výpočtů je stanovena v kap. 5.5.3.6 této zprávy. Z provedených výpočtů pak plyne, že ani špičková napětí (např. v místech dotyku válcového pláště UOS se dnem a víkem) nedosahují limitních hodnot napjatosti pro kolaps.

Pouze u výpočtů UOS na stříh dochází v části pláště VO k lokálnímu překročení meze kluzu, což však neznamená porušení integrity UOS.

Vnitřní pouzdra (VP) jsou hodnocena konzervativně tak, že silové poměry na VO jsou beze zbytku aplikovány na VP. Ani v tomto případě není dosaženo limitních hodnot napjatosti pro kolaps.

### 7.1.4 Optimalizace rozměrů UOS

Při návrhu geometrie částí UOS se vychází ve stadiu „Základní dimenzování“ z následujících vstupů:

- Geometrie palivového souboru
- Počet umístěných palivových souborů do UOS dle předběžného výpočtu podkritičnosti
- Dimenzování tloušťek materiálů s ohledem na hygienické limity (PDE) i s ohledem na pravděpodobné manipulace
- Konstrukční řešení umístění palivových souborů ve VP (potažmo ve VO) s ohledem na teplotní dilatace s cílem minimalizovat vůle mezi palivem a všemi navazujícími stěnami UOS
- Dostupnost navrhovaných materiálů na komerční bázi (nepředpokládají se vývojové práce na nových typech)

Již v této fázi se aplikuje úvaha o korozní degradaci materiálů (zejména VO), tudíž první návrhy UOS již obsahují jistý korozní přírůstek (odhadnutý z veřejně dostupných zdrojů).

Následně probíhá kontrola navrženého UOS na pevnost v konkrétních podmínkách (statický tlak, střih, zemětřesení apod.), přičemž UOS je hodnocen v nejnepříznivějším stavu, což znamená že je do výpočtu zahrnuta jeho tloušťka po odkorodování „korozního přírůstku“).

Po zpracování návrhu UOS dle výše uvedených zásad, dochází ke komplexní optimalizaci řešení (viz celkem 13 zpracovaných variant) a jejich vyhodnocení – viz Průběžná technická práva za etapu 3+.

Vybrané varianty (var. 11 UOS ŠKODA 1000/3 a var. 12 UOS VVER 440/7) jsou následně korigovány dle výsledků korozních analýz vybraných materiálů.

Konečný tvar UOS (jak pro VVER 440 tak i pro VVER 1000) je pak uveden v této zprávě (Obr. 56 a 57).

Konečné řešení geometrie UOS je tedy založeno na dostupném materiálu VO (v rozsahu rozptylu dodávaných tlouštěk materiálu – viz Tab. 24) a maximálně možným těsným uspořádáním VP uvnitř UOS.

Rozměry VP jsou určeny s ohledem na počet ukládaných palivových souborů, jejich rozměr a těsné uspořádání v UOS. Z těchto důvodů jsou tedy použity různé rozměry trubek VP (UOS ŠKODA 440/7 – rozměr 244,5/36 a UOS ŠKODA 1000/3 rozměr 355,6/40).

Zdá se tedy, že s ohledem na minimální korozní úbytky korozivzdorné oceli 1.4404, by se mohla navržená tloušťka stěny VP snižovat. Nicméně s ohledem i na stínící funkci pláště VP a na problémy, které by tato změna implikovala (např. zvětšení vůlí vnitřního uspořádání UOS a dopady do výpočtů) není tato quasi optimalizace předmětem tohoto projektu.

Manipulace s UOS při jeho transportu, plnění palivem a následném ukládání si mohou vyžádat některé úpravy navrhovaného řešení.



## Reference

### **Knihy, články, zahraniční zprávy:**

ALEXANDER, W., REIJONEN, H., MACKINNON, G., MILODOWSKI, A., PITTY, A. & SIATHAS, A. 2017. Assessing the Long-Term Behaviour of the Industrial Bentonites Employed in a Repository for Radioactive Wastes by Studying Natural Bentonites in the Field. *Geosciences*, 7, 1-30.

ATOMIZDAT, (1974) Těplohízičeskije svojstva materiálův jaděrnóv těchniki, Moskva

BÁRTA, J. 2010. The comparison of certain classical geotechnical terms for underground structures with terminology for deep radioactive waste repositories. A geophysicist's view. Conference on "Undeground Construction", Prague. Prague.

BJÖRKBACKA, Å., HOSSEINPOUR, S., JOHNSON, M., LEYGRAF, C. & JONSSON, M. 2013. Radiation induced corrosion of copper for spent nuclear fuel storage. *Radiation Physics and Chemistry*, 92, 80-86.

BJÖRKBACKA, Å., JOHNSON, C. M., LEYGRAF, C. & JONSSON, M. 2016. Role of the Oxide Layer in Radiation-Induced Corrosion of Copper in Anoxic Water. *The Journal of Physical Chemistry C*, 120, 11450-11455.

BJORKBACKA, A., YANG, M., GASPARRINI, C., LEYGRAF, C. & JONSSON, M. 2015. Kinetics and mechanisms of reactions between H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and copper and copper oxides. *Dalton Trans*, 44, 16045-51.

CASTRO, E. B., VALENTINI, C. R., MOINA, C. A., VILCHE, J. R. & ARVIA, A. J. 1986. The influence of ionic composition on the electrodisolution and passivation of iron electrodes in potassium carbonate/bicarbonate solutions in the 8,4-10,5 pH range at 25 °C *Corrosion Science*, 26, 781-793.

CASTRO, E. B., VILCHE, J. R. & ARVIA, A. J. 1991. Iron dissolution and passivation in K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-KHCO<sub>3</sub> solutions. Rotating ring disc electrode and XPS studies *Corrosion Science*, 32, 37-50.

CEITEC VUT, Protokol 388-717-6242, Zkouška ve stříhu výlisků z Bentonitu, Brno.

CROSSLAND, I. 2005. Long-term Corrosion of Iron and Copper *The 10th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management*. Glasgow, UK.

DILER, E., LEBLANC, V., GUEUNÉ, H., LARCHÉ, N., DEYDIER, V., LINARD, Y., CRUSSET, D. & THIERRY, D. 2020. Potential influence of microorganisms on the corrosion of carbon steel in the French high- and intermediate-level long-lived radioactive waste disposal context. *Materials and Corrosion*, 72, 218-234.

FÉNART, M., LAMEILLE, J. M., LE FLEM, M., LE TUTOUR, P. & FÉRON, D. 2020. Influence of irradiation on water-saturated corrosion of carbon steels at 80 °C. *Materials and Corrosion*, 72, 255-267.

- FORMAN L., PICEK M., DOBREV D., GONDOLLI J., MENDOZA MIRANDA A.N., STRAKA M., KOUŘIL M., STOULIL J. (2020): Průběžná technická zpráva 3+. etapa – ŠKODA JS a.s. Plzeň, SÚRAO 493/2020
- GINCELOVÁ K. (2020) Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Výpočet stínění pro palivo VVER-1000, Ae 15994/Dok, Rev.3, SÚRAO 507/2020
- GNB, (2002) Bezpečnostní zpráva pro typové schválení – sklad. Obalový soubor pro přepravu a skladování CASTOR® 440/84M. Teplotní výpočet. GNB B 049/2002, Rev. 2
- HALL, D. S., BEHAZIN, M., JEFFREY BINNS, W. & KEECH, P. G. 2020. An evaluation of corrosion processes affecting copper-coated nuclear waste containers in a deep geological repository. *Progress in Materials Science*. in press (DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100766)
- HE, X., AHN, T. & SIPPEL, T. 2011. Corrosion of borated stainless steel in water and humid air. Report of U.S. Nuclear Regulatory Commission (Contract NRC-02-07-006).
- IDEMITSU, K., YANO, S., XIAOBIN, X., INAGAKI, Y., ARIMA, T., MITSUGASHIRA, T., HARA, M. & SUZUKI, Y. 2001. Diffusion Behaviour of Iron Corrosion Products in Buffer Materials. *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXV*. Boston, USA.
- JEANNIN, M., CALONNEC, D., SABOT, R. & REFAIT, P. 2011. Role of a clay sediment deposit on the passivity of carbon steel in 0.1mol dm<sup>-3</sup> NaHCO<sub>3</sub> solutions. *Electrochimica Acta*, 56, 1466-1475.
- JENÍK J. (2020) Pevnostní výpočet ukládacího OS pro PS VVER 440 – Var.12 a VVER 1000 – Var.11, ŠKODA JS a.s., Ae 19590/Dok, Plzeň, SÚRAO 504/2020
- JOHANSSON, A. J., SVENSSON, D., GORDON, A., PAHVERK, H., KARLSSON, O., BRASK, J., LUNDHOLM, M., MALMSTRÖM, D. & GUSTAVSSON, F. 2020. Corrosion of copper after 20 years exposure in the bentonite field tests LOT S2 and A3. SKB TR-20-14.
- KOTNOUR P., MULLER J., LOVECKÝ M., ŠIK J., DOBREV D., GONDOLLI J., KÁRNÍK D., KOUŘIL M., STOULIL J., MACÁK P., MATAL O., ČERMÁK J., KRÁL L. (2015): Průběžná technická zpráva 1. etapa – ŠKODA JS a.s. Plzeň, SÚRAO 398/2019
- KOTNOUR P., PECHMANOVÁ E., MATOUŠEK J., LOVECKÝ M., ŠIK J., DOBREV D., GONDOLLI J., KÁRNÍK D., KOUŘIL M., STOULIL J., MACÁK P., MATAL O., ČERMÁK J., KRÁL L. ŽALOUDEK J., VÁVRA M., ČUPR M. (2016): Průběžná technická zpráva 2. etapa – ŠKODA JS a.s. Plzeň, SÚRAO 402/2019
- KREISLOVÁ, K., GEIPLOVÁ, H., BARTÁK, Z. & MAJTÁS, D. 2017. Atmospheric corrosion models. *Koroze a ochrana materialu*, 61, 59-66.
- LANDOLT, D., DAVENPORT, A. J., PAYER, J. & SHOESMITH, D. 2009. A Review of Materials and Corrosion Issues Regarding Canisters for Disposal of Spent Fuel and High-level Waste in Opalinus Clay, Nagra Technical Report 09-02.

- LEE, C. T., ODZIEMKOWSKI, M. S. & SHOESMITH, D. W. 2006b. An In Situ Raman-Electrochemical Investigation of Carbon Steel Corrosion in Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/NaHCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, and NaCl Solutions. *Journal of The Electrochemical Society*, 153, B33.
- LEE, C., QIN, Z., ODZIEMKOWSKI, M. & SHOESMITH, D. 2006a. The influence of groundwater anions on the impedance behaviour of carbon steel corroding under anoxic conditions. *Electrochimica Acta*, 51, 1558-1568.
- LIDE, D. R. & KEHIAIAN, H. V. 1994. *CRC Handbook of Thermophysical and Thermochemical Data*, Boca Raton, CRC Press.
- LILJA, C. 2010. Corrosion calculations report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-66.
- LIU, X., CAI, G., LIU, L., LIU, S. & PUPPALA, A. J. 2019. Thermo-hydro-mechanical properties of bentonite-sand-graphite-polypropylene fiber mixtures as buffer materials for a high-level radioactive waste repository. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 141, 981-994.
- LOPAUR J., (2020) Výpočet mechanické odolnosti UOS střížnými tlaky, ŠKODA JS a.s., Ae 16886/Dok, Plzeň
- LOTZ, H., CARRIÈRE, C., BATAILLON, C., GARDES, E., MONNET, I., FOY, E., SCHLEGEL, M. L., DYNES, J. J., NEFF, D., MERCIER-BION, F. & DILLMANN, P. 2020. Investigation of steel corrosion in MX80 bentonite at 120 °C. *Materials and Corrosion*, 72, 120-130.
- LOVECKÝ M. (2014a): Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Výpočet podkritičnosti pro palivo Gd-2M. Zpráva ŠKODA JS a.s. Ae 15515/Dok Rev. 0.
- LOVECKÝ M. (2014b): Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Výpočet stínění pro palivo Gd-2M. Zpráva ŠKODA JS a.s. Ae 15516/Dok Rev. 0.
- LOVECKÝ M. (2020a) Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Výpočet stínění pro palivo VVER-440, Ae 15993/Dok, Rev.3., SÚRAO 506/2020
- LOVECKÝ M. (2020b): Výpočet podkritičnosti UOS ŠKODA 440/7. Zpráva ŠKODA JS a.s. Ae 20777/Dok Rev. 0.
- LOVECKÝ M. (červenec 2015a) Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Výpočet inventáře pro palivo VVER-440, Ae 15987/Dok, Rev.0.
- LOVECKÝ M. (červenec 2015b) Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Výpočet inventáře pro palivo VVER-1000, Ae 15988/Dok, Rev.0.
- MADINA, V., INSAUSTI, M., AZKARATE, I. & CUÑADO, M. A. 2002. Materials for high level waste (HLW) containers: Corrosion in saturated bentonite. International Corrosion Congress, 2002 Granada (Spain).
- MALINA J., KRÍŽOVSKÝ M., PECHMANOVÁ E., KOTNOUR P., MATOUŠEK J., LOVECKÝ M., ŠIK J., DOBREV D., GONDOLLI J., KÁRNÍK D., KOUŘIL M., STOULIL J., MACÁK P., MATAL O., ČERMÁK J., KRÁL L. ŽALOUDEK J., VÁVRA M. (2017): Průběžná technická zpráva 3. etapa – ŠKODA JS a.s. Plzeň., SÚRAO 411/2019

- MARSH, G. P. & TAYLOR, K. J. 1988. An Assessment of Carbon Steel Containers for Radioactive Waste Disposal. *Corrosion Science*, 28, 289-320.
- MATAL O., (2018). Bentonit BaM a jeho některé vlastnosti, Energovýzkum, spol s.r.o.; CEITEC VUT v Brně; ŠKODA JS a.s.; SURAO. Bezpečnost jaderné energie 26(64), 2018 č. 1/2
- Ministerstvo průmyslu a obchodu 2019. Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v České republice
- MUURINEN, A., TOURNASSAT, C. & GRENECHE, J. M. 2014. Sorption and Diffusion of Fe(II) in Bentonite. Posiva WR 2014-04.
- NAKAYAMA, G., FUKAYA, Y., AKASHI, M., SAWA, S., AWANO, T., HIRANO, T., KANNO, T., OWADA, H., KAWAHARA, K. & ASANO, H. 2004. Hydrogen Induced Stress Corrosion Cracks Initiation to Propagation Process of Titanium Alloys under the Deep Underground Environments. *EUROCORR*. Nice, France.
- NEFF, D., DILLMANN, P., DESCOSTES, M. & BERANGER, G. 2006. Corrosion of iron archaeological artefacts in soil: Estimation of the average corrosion rates involving analytical techniques and thermodynamic calculations. *Corrosion Science*, 48, 2947-2970.
- NEFF, D., SAHEB, M., MONNIER, J., PERRIN, S., DESCOSTES, M., L'HOSTIS, V., CRUSSET, D., MILLARD, A. & DILLMANN, P. 2010. A review of the archaeological analogue approaches to predict the long-term corrosion behaviour of carbon steel overpack and reinforced concrete structures in the French disposal systems. *Journal of Nuclear Materials*, 402, 196-205.
- PEÑA, J., TORRES, E., TURRERO, M. J., ESCRIBANO, A. & MARTÍN, P. L. 2008. Kinetic modelling of the attenuation of carbon steel canister corrosion due to diffusive transport through corrosion product layers. *Corrosion Science*, 50, 2197-2204.
- RAIKO H. (2005), Disposal Canister for Spent Nuclear Fuel – Design Report. POSIVA 2005-02, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland, 71 str.
- RAJALA, P., BOMBERG, M., VEPSALAINEN, M. & CARPEN, L. 2017. Microbial fouling and corrosion of carbon steel in deep anoxic alkaline groundwater. *Biofouling*, 33, 195-209.
- REDDY, B., PADOVANI, C., SMART, N. R., RANCE, A. P., COOK, A., MILODOWSKI, A., FIELD, L., KEMP, S. & DIOMIDIS, N. 2020. Further results on the in situ anaerobic corrosion of carbon steel and copper in compacted bentonite exposed to natural Opalinus Clay porewater containing native microbial populations. *Materials and Corrosion*, 72, 268-281.
- REFAIT, P., BOURDOISEAU, J. A., JEANNIN, M., NGUYEN, D. D., ROMAINE, A. & SABOT, R. 2012. Electrochemical formation of carbonated corrosion products on carbon steel in deaerated solutions. *Electrochimica Acta*, 79, 210-217.
- ROY, A. K., HENSHALL, G. A. & MCCRIGHT, R. D. 1995. Electrochemical Corrosion Studies of Container Materials in Repository-Relevant Environments. Report of U.S. Department of Energy - Office of Scientific and Technical Information (No. UCRL-ID-122860).


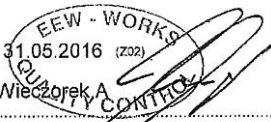
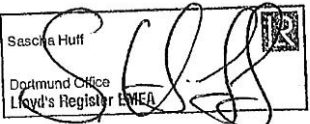
- SAKURAGI, T., YOSHIDA, S., KATO, O. & TATEISHI, T. 2016. Study of stainless steel corrosion by hydrogen measurement under deoxygenated, low-temperature and basic repository conditions. *Progress in Nuclear Energy*, 87, 26-31.
- SCHLEGEL, M. L., NECIB, S., DAUMAS, S., BLANC, C., FOY, E., TRCERA, N. & ROMAINE, A. 2016. Microstructural characterization of carbon steel corrosion in clay borehole water under anoxic and transient acidic conditions. *Corrosion Science*, 109, 126-144.
- SKB (2006), Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden, 613 str.
- SKB, (November 2010) Technical Report TR-10-33, Earthquake induced rock shear through a deposition hole,
- SMART, N. R. & ADAMS, R. 2006a. Natural analogues for expansion due to the anaerobic corrosion of ferrous materials. SKB TR-06-44.
- SMART, N. R. & RANCE, A. P. 2005. Effect of radiation on anaerobic corrosion of iron. SKB TR-05-05.
- SMART, N. R., RANCE, A. P. & FENNELL, P. A. H. 2006b. Expansion due to the anaerobic corrosion of iron. SKB TR-06-41.
- SMART, N. R., REDDY, B., RANCE, A. P., NIXON, D. J., FRUTSCHI, M., BERNIER-LATMANI, R. & DIOMIDIS, N. 2017. The anaerobic corrosion of carbon steel in compacted bentonite exposed to natural Opalinus Clay porewater containing native microbial populations. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 52, 101-112.
- SNTL, (1958) Základy sdílení tepla, Praha
- SOROKA, I. & JONSSON, M. 2019. Radiation induced corrosion of copper – an update on the mechanism. SKB DOC 1706535.
- STOULIL, J., KAŇOK, J., KOUŘIL, M., PARSCHOVÁ, H. & NOVÁK, P. 2013. Influence of temperature on corrosion rate and porosity of corrosion products of carbon steel in anoxic bentonite environment. *Journal of Nuclear Materials*, 443, 20-25.
- ŠIK J., (2020) Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Tepelný výpočet, ŠKODA JS a.s., Ae 16093/Dok, Plzeň., SÚRAO 509/2020
- ŠIK J., (září 2014) Ukládací obalový soubor v hlubinném úložišti. Tepelný výpočet, Ae 15530/Dok, Rev. 1.
- TABOROWSKI, T., BENGTSSON, A., CHUKHARKINA, A., BLOM, A. & PEDERSEN, K. 2019. Bacterial presence and activity in compacted bentonites. *EU Project Microbiology in Nuclear Waste Disposal (Horizon 2020; grant agreement: 661880) Deliverable D2.4, v2.*
- TEWARI, P. H. & CAMPBELL, A. B. 1979. Dissolution of iron during the initial corrosion of carbon steel in aqueous H<sub>2</sub>S solutions. *Canadian Journal of Chemistry*, 57, 188-196.


- VALENTINI, C. R. & MOINA, C. A. 1985. The electrochemical behaviour of iron in stagnant and stirred potassium carbonate-bicarbonate solutions in the 0-75 °C temperature range *Corrosion Science*, 25, 985-997.
- VIKMAN, M., MATUSEWICZ, M., SOHLBERG, E., MIETTINEN, H., JÄRVINEN, J., ITÄLÄ, A., RAJALA, P., RAULIO, M., ITÄVAARA, M., MUURINEN, A., TILJANDER, M. & OLIN, M. 2018. Long-term experiment with compacted bentonite. VTT TECHNOLOGY 332.
- WERME L. O., TAXÉN C., KARNLAND O., QUIRK G. (2002), In situ copper corrosion experiments in Äspö hard rock laboratory. WM'02 Conference, February 24-28, 2002, Tucson, Arizona, USA.
- WILSON, J. C., BENBOW, S., SASAMOTO, H., SAVAGE, D. & WATSON, C. 2015. Thermodynamic and fully-coupled reactive transport models of a steel–bentonite interface. *Applied Geochemistry*, 61, 10-28.
- ZERBINO, J. O., VILCHE, J. R. & ARVIA, A. J. 1981. Kinetics of the polycrystalline iron electrode in dilute acid and neutral aqueous electrolytes under complex fast potentiodynamic perturbations. *Journal of Applied Electrochemistry* 11, 703-713.

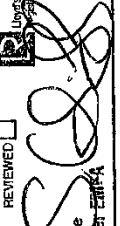
# Přílohy

## Příloha č. 1

657UBER4

Mark of Manufacturer (A04)  Sigle du producteur		ERNDTEBRÜCKER EISENWERK (A02) <b>ABNAHMEPRÜFZEUGNIS</b> <b>INSPECTION CERTIFICATE EN 10204 3.2</b> <b>CERTIFICAT DE RECEPTION DTM 1620701</b>				(A09) Werks-/Works No./Réf. usine <b>43.657</b> (A03) Zert-Nr. / Cert-No. 657uber4.xls / 32				
(A05) Besteller / Purchaser / Commetant: <b>Interfer Rohrunion GmbH</b>		(A07) Bestellnr. / Order No / No de Com.: <b>59023161.00</b>								
Project/Project/Projet: ---		(B1) Erzeugnisform: <b>Geschweißte Stahlrohre</b> Description of Products: <b>Welded Steel Pipes</b> Description du Produit: <b>Tubes d'acier sou dés</b>								
Anforderungen Requirements: <b>EN 10219 LATEST EDITION / NACE MR 0175</b>		Werkstoff (B2) Quality: <b>S355J2H + N</b>		Wallth. >= 25,4mm=Z35						
Pipe body outside - Transport protective coating: Riaqua 5025 K; ~ 50 µm. plate + weld consumables suitable for induction bending										
(B6)	(B7)	(B8)	(B9)	(B10)	(B11)					
Position Item Poste	Teil Part Item	Client Item	Anzahl No	inside, outside Durchmesser Diameter	Dicke Thickness Epais.	Länge Length Longueur	Schmelze Heat Coulée	Blechnr. Plate No Tole No	Blechnr. Plate Cert. Number de Tole Cert.	
03200	0001	320	1	914,0	812,4	50,8	12000	24644	674387 1	979079
03200	0002	320	1	914,0	812,4	50,8	12000	24644	674386 1	979079
Röntgenprüfung: (D01) X-ray Test: Test Radiogra.:		Results acc. to Spec without objections, detailed Report in annex			Mechan. & Chem. (C.) Tests / Essais:		Test Results acc. to Spec. detailed Test Report(s) in annex			
Ultraschallprüfg: (D02) Ultrasonic Test: Test Ultras:		Results acc. to Spec without objections, detailed Report in annex			Wärmebehandlg: (B04) Heat Treatmt.: Traitement Therm.:		Stress relief treated only pipes with cold forming ratio > 5% detailed Report in annex			
Restmagnetismus: Residual magnetism.:		max. 30 gauss (random check) Every 4 h. at one pipe, on both ends. Result: Without objection			(Z01) Es wird bestätigt, daß die Lieferung der ( den) oben genannten Lieferbedingung(en) entspricht. We certify, that above mentioned items have been delivered in accordance with terms of order. Nous attestons que les produits livrés sont conformes aux stipulations de la command.					
(A01) 57339 Erndtebrück, Im Grünewald 2 (A05) EEW-QC /		31.05.2016 (Z02)  Abnahmebeauftragter des Herstellers / Works Inspector / Expert de l'Usine		(Z03)		 Sascha Huff Dortmund Office Lloyd's Register EMEA				

	<b>ERNDTEBRÜCKER EISENWERK</b> <b>Maßkontroll- und Sichtprüfungsbericht</b> <b>Dimensional and Visual Control Report</b>	(A08) Werks-Nr./ Works No. <b>43.657</b> Zert-Nr. (A03) Cert-No. 657uber4.xls / Maßspr. / 32	(A07) Kundenbestellnummer / Client's Order No.: <b>59023161.00</b>								
(A06) Kunde / Client: <b>Interfer Rohrunion GmbH</b>		(A09) Fertigungsvorsch. / Requirements: <b>EN 10219 LATEST EDITION / NACE MR 0175</b>									
(B03.1) Formtoleranzen (s. a. unten) / Size Tolerances (s. a. below):		(D01.1) Sichtprüfung / Visual Examination: <b>keine Beanstandung without objections</b>									
(B03.1) Formtoleranzen (s. a. unten) / Size Tolerances (s. a. below):		Bemerkungen / Remarks									
Rohr-Nr. Pipe No	Durchm. / Diameter (mm) innen / inside, aussen / outside	Umfang / Circ. (mm) U <sub>1</sub> U <sub>M</sub> U <sub>2</sub>	Wandd. / Wallth. (mm)	Länge / Length (mm)	Ovalität / Ovality innen/inside 1 + 2	Geradht. Straigh.	Rundht. Roundn.	Kv. Rechth. Mm. Perpend.	Endenbearb. Endpr.	Schweißer Welder	Gewicht weight
	+ / - 1,6 mm from I.D.		WT<20mm= +/- 1,5 WT>20mm=-1,0/+1,5	- 0 / +200 mm	max. 1%	max.: 0,2%					kg
Pos./Item No	Nominal	D1	D2	Nom L	min. max. min. max.	0° 90°	S1 S2	S1 S2	S1 S2	in. out	
03200 0001	914,0	812,4	810,7	12000 12058	6	4 2	ok ok	ok ok	30° 30°	71 87	13048
03200 0002	914,0	812,4	810,7	12000 12075	4	4 1 2	ok ok	ok ok	30° 30°	22 40	13066

WITNESSED  
 REVIEWED  
  
 Sascha Huf  
 Dortmund Office  
 Lloyd's Register







**ERNDTEBRÜCKER EISENWERK**

**ULTRASCHALLPRÜFBERICHT**

**ULTRASONIC TEST REPORT**

Werks-Nr. / Works No.

**43.657**

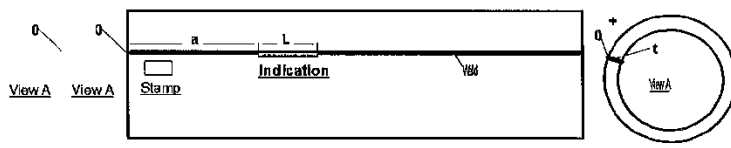
Zert-Nr. / Cert-No.

657uber4.xls / UT / 32

Kunde / Client <b>Interfer Rohrunion GmbH</b>	Product <b>Geschweißte Stahlrohre Welded Steel Pipes Tubes d'acier sou dés</b>	Projekt / Project ---
Nr. d. Kunden / Client's No. <b>69023161.00</b>		

Prüfanforderungen / Test Requirements Spec.: WP100, Rev.1/WP101, Rev. 0/API 5L Accep. Criteria: API 5L (N5-notch - max. 2mm) lam. acc. to 10893-8, Level U2; 10246-17	Durchm. / Diam.: <b>see</b>	Werkstoff / Material <b>see 3.2 cert.</b>
	Wandd. / Wallth.: <b>3.2</b>	Prüfoberfläche / Test surface <b>clean - as welded/ground</b>
Prüfmfang / Extend of Test <b>long. weld(s) 100% - pipe ends circ. 50 mm lam.</b>	Länge / Length : <b>cert.</b>	
	Breite / Width: ---	
	Schweißverf. / Weld. Techn. <b>SAW</b>	vor/before nach/after <b>ohne/without WB / Heat Treatm.</b>

Prüfergerät / Test Equipment <b>*1)=Echograph / *2)=Krautkrämer USM</b>		Ausrüstung + Justierung / Equipment + Adjustment <b>*1)=TS 10WB4C+STS20 / *2)=SWB+MWB+WB</b>		Koppelmittel / Couplant <b>*1) water / *2) Cellulose Gum</b>
Pk-Winkel Probe angle(s)	*1)+*2 45°	*2)=80 +70°	*1)=43° to 63°	Reg.-Grenze / Record. Level <b>100% DAC</b>
Pk-Frequ. (MHz) Probe Frequ.	2/4	2/4	2/4	Transfer Corr. <b>2dB</b>



Rohr-Nr Pipe-No	Anzeige(n) / Indication(s)							Prüfer Tester	Prüf- Test Dat.	Naht Weld	Beurteilung Evaluation		Lam. check
	Lage Position a (mm)	Echo Höhe Height	Tiefe Depth t (mm)	Länge Length L (mm)	Pk-/Probe Winkel Angle	Art Type (s.u.; s. below)	Erstprüf. First Test				nach/after Rep.		
03200 0001							Meier	13.05.	lw*2)	a		a	
03200 0002							Meier	13.05.	lw*2)	a		a	

WITNESSED: Sascha Huff  
REVIEWED: [Signature]  
Dortmund Office  
Lloyd's Register

<b>Anzeigenart / Indication Type</b>	<b>Bewertung / Evaluation</b>
<b>Aa</b> PORES POREN <b>Ab</b> WORM HOLE SCHLAUCHPORE <b>Ba</b> SLAG INCLUSION SCHLACKENEINSCHLUSS <b>Bb</b> SLAG LINE SCHLACKENZEILE <b>F</b> UNTERCUT EINBRANDKERBE <b>C</b> LACK OF FUSION BINDEFehler	<b>a</b> erfüllt acceptable <b>na</b> nicht erfüllt not acceptable <b>D</b> INCOMPLETE PENETRATION UNGENÜGENDE DURCHSCHW. <b>Eb</b> TRANSVERSE CRACK QUERRISS <b>Ea</b> LONGITUDINAL CRACK LÄNGSRISS

Bemerkungen / Comments: Die o.g. Schweißnähte entsprechen den Auftragsbedingungen. The welds named above fulfill the requirements of this order.

Name	Erstellt von Completed by <b>Möllers/Wetten</b>	Geprüft / genehmigt von Approved by <b>Wender</b>	Erstellt von Completed by <b>Riemer</b>
Firma / Company	<b>SOS System*2)</b>	<b>EEW</b>	<b>EEW (W*1)</b>
Datum / Date	<b>31.05.16</b>	<b>31.05.16</b>	<b>31.05.16</b>
Unterschrift / Signature	<b>Gottfeld W Services</b>	<b>I.A.</b>	



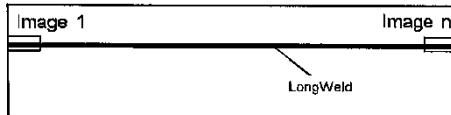
**ERNDTEBRÜCKER EISENWERK**  
**PRÜFBERICHT DIGITALE RADIOGRAPHIE**  
**DIGITAL RADIOGRAPHIC TEST REPORT**

Werks-Nr. / Works No.  
**43.657**  
 Zert-Nr. / Cert-No.  
 657uber4.xls / RS /32

Kunde / Client <b>Interfer Rohrunion GmbH</b>	Product <b>Geschweißte Stahlrohre Welded Steel Pipes Tubes d'acier sou dés</b>	Projekt / Project ---
Nr. d. Kunden / Client's No. <b>59023161.00</b>		

<b>Prüfbedingungen / Test Conditions</b>			
Prüfanforderungen / Test Requirements <b>WP 102, Rev.0/API 5L/EN 10893-7,Kl.; acc. to API 5L-45th Edition, Annex E/EN 10893</b>	Durchm. / Diam.: <b>see</b>	Werkstoff / Material <b>see 3.2 cert.</b>	
	Wandd. / Wallth.: <b>3.2</b>	Prüfoberfläche / Test surface <b>clean - as welded/ground</b>	
	Länge / Length: <b>cert.</b>		
	Breite / Width: <b>---</b>		
Prüfumfang / Extend of Test <b>pipe-ends min. 250 mm</b>	Schweißverf. / Weld. Techn. <b>SAW</b>	vor/before nach/after <b>WB / Heat Treatm.</b>	

Prüfgerät / Test Equipment <b>MXR 451 HP/11</b>	Röhrenstrom / Tube Current <b>4,7 mA</b>	Röhrensannung / Tube Voltage <b>315 kV</b>	Brennfleck / Focus <b>1,0</b>
	Detektor <b>YXS Y2520 Varian</b>	Aufnahmeanordnung und Betrachtung <b>n.EN 1435 / Einwand</b>	Penetrameter <b>2x10 FE EN</b>
Integration Zeit <b>24</b> sec.	Source to Objekt Distance		Abst. Focus/Detektor <b>800 mm</b> Source-Detector Dist



Sketch "Pipe View", only to demonstrate image No. Location



Rohr-Nr Pipe-No	Naht Weld	Image No	BZ  QI-Sens. (s.a.o.; s.a.ab.)	Anzeigen/Findings (in Image No.) Art s. unten / Type see below	Prüfer Tester	Prüf- Test Dat.	Beurteilung Evaluation		Rep.- Report No.
							Erstprüf. First Test	nach/after Rep.	
03200	0001	lw	1-5/64-68	W10	Reichow	13.05.	a		
03200	0002	lw	1-5/64-68	W10	Reichow	13.05.	a		

<b>Anzeigenart / Indication Type</b>	<b>Bewertung / Evaluation</b>
Aa PORES POREN	a erfüllt acceptable
Ab WORM HOLE SCHLAUCHPORE	na nicht erfüllt not acceptable
Ba SLAG INCLUSION SCHLACKENEINSCHLUSS	
Bb SLAG LINE SCHLACKENZEILE	
F UNTERCUT EINBRANDKERBE	
C LACK OF FUSION BINDEFEHLER	
D INCOMPLETE PENETRATION UNGENÜGENDE DURCHSCHW.	
Eb TRANSVERSE CRACK QUERRISS	
Ea LONGITUDINAL CRACK LÄNGSRISS	

Bemerkungen / Comments

**Die o.g. Schweißnähte entsprechen den Auftragsbedingungen.  
The welds named above fulfill the requirements of this order.**

Name	Erstellt von Completed by <b>Siegfried Riemer</b>	Geprüft / genehmigt von Approved by <b>Wendel</b>	WITNESSED <input type="checkbox"/> REVIEWED <input checked="" type="checkbox"/> Sascha Huff Dortmund Office Lloyd's Register 
Firma / Company	ISO 9712-Cert. EEW Z-SC 06439 ASNT Cert. No. EEW 001-3	<b>EEW - WORKS</b> QUALITY CONTROL	
Datum / Date	<b>31.05.2016</b>	<b>31.05.2016</b>	
Unterschrift / Signature		i.A.	

		<b>WÄRMEBEHANDLUNGSBERICHT</b> <b>HEAT TREATMENT REPORT</b>			BERICHT / CERT.NO / P.V.  <b>43657-09</b>	
		KOM. NO. ORDER NO. 43657-09 COMMANDE		SPEZIFIKATION SPECIFICATION NACE MR 175 ASME VIII/1, UCS-56		WERKSTOFF MATERIAL S355 MATERIAU J2H+N
POS. 03200 ITEM	ROHR PIPE <input checked="" type="checkbox"/> TUBE	BLECH PLATE <input type="checkbox"/> TÔLE	ABMESSUNGEN / DIMENSIONS			
		WDD WT 50,80 mm EPAISS.		DIA. 914 mm		
AUSRÜSTUNG EQUIPMENT EQUIPEMENT		OFEN CLOSED FURNACE <input checked="" type="checkbox"/> FOUR FERME	ÖRTLICHE WIDERSTANDSGLÜHUNG LOCAL RESISTANCE HEATING <input checked="" type="checkbox"/> TRAITEMENT LOCAL			
ART DER WÄRMEBEHANDLUNG TYPE OF TREATMENT TYPE DE TRAITEMENT THERMIQUE		<input type="checkbox"/> NORMALISIEREN / NORMALIZING / NORMALIZER <input type="checkbox"/> ANLASSEN / ANNEALING / REVENU <input checked="" type="checkbox"/> SPANNUNGSARM GLÜHEN / STRESS RELIEF / DETENSIONNEMENT <input type="checkbox"/> WARMNACHRUNDEN / WARM REROLLING / CALIBRAGE A CHAUD <input type="checkbox"/> WÄRMENACHBEHANDLUNG / POST WELD HEAT TREATMENT <input type="checkbox"/> (PWHT) TRAITEMENT THERMIQUE APRES SOUDAGE				
UNBESCHRÄNKTE AUFHEIZUNG BIS UNRESTRICTED RATE OF RISE TO MONTEE ILLIMITEE JUSQU'A 300 °C			EINGESCHRÄNKTE AUFHEIZRATE RESTRICTED RATE OF RISE MONTEE LIMITEE 111 °C PRO STUNDE / PER HOUR / PAR HEURE			
GLÜHTEMPERATUR SOAK TEMPERATURE TEMP. DE MAINTIEN 605 -10/+10 °C			HALTEZEIT SOAK TIME DUREE DE MAINTIEN 122 STUNDEN / MINUTEN HOURS / MINUTES HEURES / MINUTES			
EINGESCHRÄNKTE ABKÜHLRATE RESTRICTED COOLING DESCENTE LIMITEE 139 °C PRO STUNDE / PER HOUR / PAR HEURE		ABK AN RUHENDER LUFT COOLING IN STILL AIR <input checked="" type="checkbox"/> REFROID. A L'AIR CALME AB / FROM / A PARTIR DE below 300 °C	OFENAUSGANGSTEMPERATUR FURNACE EXIT TEMPERATURE TEMP. DE SORTIE DU FOUR 300 °C			
BEMERKUNGEN / COMMENTS / REMARQUES ITEM 03200 Pipe: 1 & 2 incl. PT						
DIAGRAMM BEIGEFÜGT / CHART ATTACHED / GRAPHIQUE INCLUS				JA YES <input type="checkbox"/> OUI	NEIN NO <input checked="" type="checkbox"/> NON	
		ERSTELLT DURCH COMPLETED BY ETABLI PAR	GENEHMIGT/GEPRÜFT APPROVED BY VERIFIE PAR	GENEHMIGT/GEPRÜFT APPROVED BY VERIFIE PAR	WITNESSED / REVIEWED	
FIRMA / COMPANY / FIRME UNTERSCHRIFT / SIGNATURE / VISA NAME / PRINT NAME / NOM DATUM / DATE / DATE		ERNDTBRÜCKER EISENWERK GmbH & Co KG 31.05.2016		Sascha Huf Dortmund Office Lloyd's Register 		

EEW-BERGROHR GMBH		Test Report Prüfbericht					Document No.: E2971-16 C Dokument Nr.: E2971-16 C				
LR DTM No.: 1620701							Page Seite	1 of 3 von 3			
EEW Ref.: 43657		Item No.: 03200	Pipe No.: 0002	Thickness: 50,8 mm	Heat No.: 24644	Plate No.: 674386-1	Material: S355J2H	Requirements: EN 10219 (2006)			
Sample No. Probe Nr.	M S FL WEZ 1)	Tensile test / Zugversuch					Position Lage	Location of fracture Bruchlage			
		Yield point Streckgrenze N/mm <sup>2</sup>	Tensile strength Zugfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	Re / Rm Streckgrenzen- verhältnis %	Gauge length Messlänge mm	Elongation Dehnung %					
	4) min. max.	390 510	460 620	0,85		22					
B7545 B7545	M S	360 -	529 550	0,68 -	50 -	50 -	transverse transverse	M			
		hardness test (see page 2)									
		macro = satisfactory (see page 3)									
Impact test / Kerbschlagbegeversuch											
Sample No. Probe Nr.	M S WEZ	Sample position Entnahmelage der Probe	Type Form	Position Lage	Test temp. Prüftemp. °C	Impact energy Kerbschlagarbeit			Shear area Scherbruchanteil		
						1 J	2 J	3 J	%	%	%
	4) min. average					30 40					
B7545 B7545 B7545	M S WEZ	- - -	Charpy-V Charpy-V Charpy-V	transverse transverse transverse	-40 -40 -40	161 117 166	162 128 167	176 138 220	100 100 100	100 100 100	100 100 100
Technological Test / Technologischer Versuch											
Sample No. Probe Nr.	Sample type Probentyp 2)	Bending angle ° Biege Winkel °	Bending mandrel Ø Biegedorn Ø	Position Lage	Result Befund 3)	Remark Bemerkung					
B7545 B7545	FBT RBT	180° 180°	4 x t 4 x t	transverse transverse	a a	- -					
1)	M FL	Material/Grundwerkstoff Fusion line/Schmelzlinie	S WEZ	Weld/Schweißnaht HAZ/Wärmeinflusszone							
2)	FBT SBT	Face bend test/Oberseitige Biegeprobe Side bend test/Seitenbiegeprobe	RBT	Root bend test/Wurzelseitige Biegeprobe							
3)	a	accepted/erfüllt	na	not accepted/nicht erfüllt							
4)	Requirements / Anforderungen										
EEW BERGROHR GMBH Date: 20.05.2016 Name: G. Schneider Signature:			Client's authorized inspector Date: Sascha Hoff Name: Edmund Ollrich Signature:			Approved: Date: Name: Signature:					



**BERGROHR GMBH**

**Härteprüfung an Schweißverbindungen**

hardness test on welding joints

<b>Auftrags-Nr.</b> Order-No.	43.657-3200	<b>Seite</b> Page	2 von 3
<b>Prüfer</b> Tester	Ch. Schneider	<b>Datum</b> Date	20.05.2016
<b>Werkstoff</b> Steel Grade	S 355 J2H		
<b>Abmessung</b> Dimension	t = 50,80 mm		

**Quality - Assurance**

**Macro - Hardness - Test**

PICTURE FROM:

NACE MR175/ISO 15156-2:2009

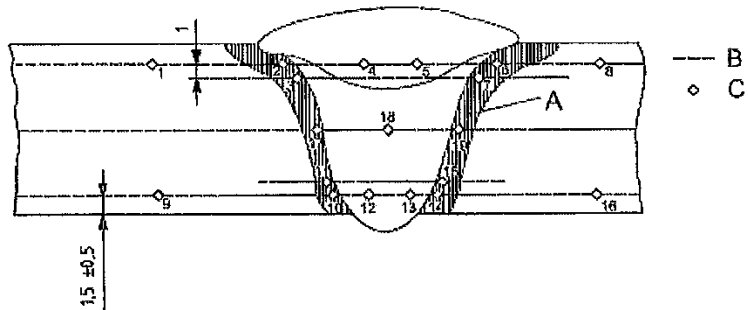
Probe Nr.: B 7545  
Sample NO:

Schmelze Nr.: 24644  
Heat NO:

Prüfverfahren: HV10  
Test Procedure:

Prüfmaschine: ATM Carat 930  
Testing Machine:

Anforderungen: max 250 HV10  
Requirements:



Nr.:	HV	Nr.:	HV
NO.:		NO.:	
1	161	12	223
2	219	13	220
3	234	14	234
4	222	15	230
5	216	16	162
6	225	17	210
7	229	18	216
8	169	19	223
9	161		
10	221		
11	227		

Nr.: 1,8,9 & 16	Grundwerkstoff Base Material
Nr.: 2,3,6,7 & 10	Wärmeeinflußzone Heat Affected Zone
Nr.: 4,5,12,13&18	Schweißnaht Weld Metal
Nr.: 11,14,15,17 & 19	Wärmeeinflußzone Heat Affected Zone

EEW-BERGROHR GmbH Test House:

Client's authorized Inspector

DATUM: 20.05.2016

DATE:

PRÜFER:  
TESTER:

UNTERSCHRIFT:  
SIGNATURE:



DATUM: Mische Auftr  
DATE: Dortmund Office  
STEMPEL: EEW's Register  
STAMP:

UNTERSCHRIFT:  
SIGNATURE:

DATUM:

DATE:

STEMPEL:  
STAMP:

UNTERSCHRIFT:  
SIGNATURE:



BERGROHR GMBH

### Makro der Schweißnaht

Macro of weld

Auftrags-Nr. Order-No.	43.657-3200	Seite Page	3 von of	3
Prüfer Tester	Ch. Schneider	Datum Date	20.05.2016	
Werkstoff Steel Grade	S 355 J2H			
Abmessung Dimension	t = 50,80 mm			

### Nahtbeurteilung Lagenversatz / Durchschweißung

Assessment of weld  
Misalignment / Full penetration of inside and outside weld

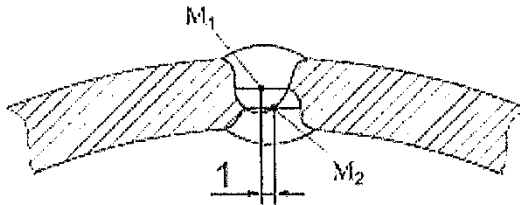
Sample No.: B 7645  
Proben-Nr.:

Figure 4

Heat No.: 24644  
Schmelzen-Nr.:

Heat treatment: no  
Wärmebehandlung:

Longitudinal weld  
Längsnaht



#### 10.2.5 Macrographic and metallographic tests

10.2.5.1 Except as allowed by 10.2.5.2, the alignment of internal and external seams of SAW and COW pipes [see Figure 4 d) and Figure 4 e)] shall be verified by macrographic testing.

- 1. KEINE RISSE / NO CRACKS
- 2. KEINE EINBRANDKERBEN / NO UNDERCUTS
- 3. KEINE BINDEFEHLER / NO LACK OF FUSION
- 4. LAGENVERSATZ / MISALIGNMENT OF WELD BEADS ≤ 3 mm
- 5. NÄHTE VOLLSTÄNDIG DURCHSCHWEISST / FULL PENETRATION OF INSIDE AND OUTSIDE WELD

EEW-BERGROHR GmbH:

Client's authorized inspector

DATUM: 20.05.2016

PRÜFER:  
TESTER:

UNTERSCHRIFT:  
SIGNATURE:



WITNESSED  REVIEWED

DATUM: DATE: Sascha Huff

STAMP: Lloyd's Register

UNTERSCHRIFT: SIGNATURE: [Signature]

DATUM: DATE:

STEMPEL: STAMP:

UNTERSCHRIFT: SIGNATURE:

CE

0038

**Erndtebrücker Eisenwerk GmbH & Co. KG**

Im Grünewald 2, 57339 Erndtebrück

09

0098-CPD-1017

EN 10219-1:2006

Kaltgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen  
und Feinkornbaustählen

Cold formed structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels

Schmelzanalyse /  
Heat Analysis

Zugversuch /  
Tensile Test

Kerbschlagbiegeversuch /  
Charpy-V-Test

Oberflächenbeschaffenheit und Maße /  
Visual and Dimensional Examination


ZfP der Schweißnaht /  
NDE of Weld Seam

Pipe S355 J2H+N - DIN-EN 10219-1



<b>Abnahmeprüfzeugnis 3.1</b> Inspection certificate 3.1 DIN EN 10204 (A02)		Nr./No. (A03) <b>979079</b> Seite/Page <b>1/6</b> Datum/Date <b>04.04.2016</b>
Nr. (A07) <b>95095102</b> Besteller <b>Salzgitter Mannesmann Stahlhandel</b> Purchaser <b>GmbH NL Gladbeck</b> (A06) <b>45955 Gladbeck</b>	<b>12.02.2016</b> Erzeugnis <b>Grobblech</b> Product <b>Heavy plate</b> (B01)	Nr. (A07) <b>43657-01 Rev. 2</b> Empfänger <b>Erndtebrücker Eisenwerk</b> Customer <b>GmbH &amp; Co. KG</b> (A06) <b>57335 Erndtebrück</b>
Werkstoff und Lieferbedingung <b>S355J2H Z35</b> Steel grade and terms of delivery <b>DIN EN 10219-1 07/06</b> (B02-E03) <b>MDS 43.657 Rev.0</b> <b>DIN EN 10029 C 02/11</b> <b>DIN EN 10163-2 B UG2 03/05</b> <b>43657</b>		Werksauftrags-Nr. <b>0000082963</b> Works order No. (A08) Lieferschein-Nr. <b>0086170857</b> Dispatch note No. <b>01.04.2016</b>  Abnahme <b>WS</b> Inspector (A09)
Kenzeichnung des Materials / Marking of the product (B06) Herstellerzeichen/Stahlsorte/Schmelzen-Nr./ Erzeugnis-Nr./Sachverständigenstempel Trademark/Steelgrade/Heat-No/Product-No/ Inspector's stamp		

Materialdaten / Material data (B01-B99)					
Fas. Item	Anzahl Quantity (B08)	Erzeugnis-Nr. Product No. (B07)	Schmelzen-Nr. Heat No. (B07)	Lieferzustand Cond. of delivery (B04)	Dicke x Breite x Länge Thickness x Width x Length (B09-B11)
33	1	674020 1	24644	N	50,80 x 2075,0 x 12220
33	1	674021 1	24644	N	50,80 x 2075,0 x 12220
34	1	674386 1	24644	N	50,80 x 2712,0 x 12220
34	1	674387 1	24644	N	50,80 x 2712,0 x 12220
33	2	Gewicht 20.774	kg	N: normalisiert/normalized	
34	2	Weight 27.183	kgs		
Σ	4	(B12) 47.957			
Maßprüfung und Sichtkontrolle auf äußere Beschaffenheit: ohne Beanstandung Dimensional check and visual examination of the surface condition: without objection					




Noted	
Reviewed	<input checked="" type="checkbox"/>
Verified	
Witnessed	
Approved	
DORMMUND	
Date/Signature	
<i>[Signature]</i>	


Page 1-6

Es wird bestätigt, daß die Lieferung den Anforderungen der Lieferbedingung entspricht.  
We hereby certify that the delivered material complies with the terms of the order.  
(Z01)

QM-System: Certification as per ISO 9001 since 28 February 1990

 Herstellerzeichen  
Trademark  
(A04)

Ilsenburger Grobblech GmbH  
Vackenstedter Weg 10  
D-36871 Ilsenburg  
(A01)

 Abnahmestempel  
Inspection Stamp  
(Z03)

Abnahmebeauftragter  
Inspector Representative  
(Z02)

Dieses durch ein geeignetes Datenverarbeitungssystem erstellte Bescheinigung ist gemäß EN 10 204, Abschnitt 5, ohne Unterschrift gültig.  
This certificate was prepared by a suitable data processing system and is valid without signature according to EN 10 204, sect on 5.


Cyron




<b>Abnahmeprüfzeugnis 3.1</b> Inspection certificate 3.1 DIN EN 10204 (A02)		Nr./No. (A03) 979079 Seite/Page 2/6 Datum/Date 04.04.2016
Nr. (A07) 95095102 Besteller Salzgitter Mannesmann Stahlhandel Purchaser GmbH NL Gladbeck (A06) 45955 Gladbeck	12.02.2016 Erzeugnis Grobblech Product Heavy plate (B01)	Nr. (A07) 43657-01 Rev. 2 Empfänger Erndtebrücker Eisenwerk Customer GmbH & Co. KG (A06) 57335 Erndtebrück
Werkstoff und Lieferbedingung S355J2H Z35 Steel grade and terms of delivery DIN EN 10219-1 C7/06 (B02-B03) MDS 43.657 Rev.C DIN EN 10029 C C2/11 DIN EN 10163-2 B UG2 03/05 43657	Werksauftrags-Nr. 0000082963 Works order No. (A08) Lieferschein-Nr. 0086170857 Dispatch note No. 01.04.2016 Abnahme WS Inspection (A05)	

Schmelzenanalyse / Ladle analysis (C70-C99)										
Herstellereingaben / Manufacturer standard										
Schmelzen-Nr. Heat No. (B07)	C %	Si %	Mn %	P %	S %	N %	Al %	Cu %	Cr %	Ni %
24644	0,16	0,20	1,53	0,011	0,001	0,004	0,038	0,04	0,05	0,05
Schmelzen-Nr. Heat No. (B07)	V %	Ti %	Nb %	Mo %	B %	EV1 1) %	EV2 2) %	EV3 3) %	Al/N	EV4 4) %
24644	0,004	0,01	0,02	0,01	0,0001	0,43	0,25	0,15	10	0,03
Schmelzen-Nr. Heat No. (B07)	Nb+V %									
24644	0,024									
1) EV1: CEV=C+Mn/6+Mo/5+Ni/15-Cr/5+V/3+Cu/15						3) EV3: Cr+Cu+Mo+Ni				
2) EV2: PCM=C+Mn/20+Mo/15-Ni/60+C/20+V/10+Cu/20+Si/30+5x3						4) EV4: V+Ni+Ti				
<b>Stahlherstellung: Sauerstoffaufblasverfahren</b> <b>Steel making: Basic oxygen process</b> (C70) <b>vollberuhigter Feinkornstahl</b> <b>Fully killed and fine grained steel</b>										

Es wird bestätigt, daß die Lieferung den Anforderungen der Lieferbedingung entspricht.  
 We hereby certify that the delivered material complies with the terms of the order.  
 (Z01)  
 QM-System: Certification as per ISO 9001 since 20 February 1990

 Herste lzerschei  
 Trademark  
 (A04)

Ilse nburger Grobblech GmbH  
 Veckinstädter Weg 10  
 D-38871 Ilse nburg  
 (A01)

 Abnahme stempel  
 Inspection Stamp  
 (Z03)

Abnahmebeauftragter  
 Inspection Representative  
 (Z02)

Diese durch ein geeignetes Datenverarbeitungssystem erstellte Bescheinigung ist gemäß EN 10 204, Abschnitt 5, ohne Unterschrift gültig.  
 This certificate was prepared by a suitable data processing system and is valid without signature according to EN 10 204, section 5.

Cyron

<b>Abnahmeprüfzeugnis 3.1</b>		Nr./No. (A03)	979079
<b>Inspection certificate 3.1</b>		Seite/Page	3/6
<b>DIN EN 10204</b>		Datum/Date	04.04.2016
(A02)			
Nr. (A07)	95095102	12.02.2016	Nr. (A07)
Besteller	Salzgitter Mannesmann Stahlhandel		Empfänger
Purchaser	GmbH NL Gladbeck		Customer
(A06)	45955 Gladbeck		(A06)
			43657-01 Rev. 2
			Erndtebrücker Eisenwerk
			GmbH & Co. KG
			57335 Erndtebrück
Erzeugnis	Grobblech	Werksauftrags-Nr.	0000082963
Product	Heavy plate	Works order No.	
(B01)		(A08)	
		Lieferschein-Nr.	0086170857
		Dispatch note No.	01.04.2016
Werkstoff und Lieferbedingung	S355J2H Z35	Abnahme	WS
Steel grade and terms of delivery	DIN EN 10219-1 07/06	Inspection	
(B02-B03)	MDS 43.657 Rev.0	(A05)	
	DIN EN 10029 C 02/11		
	DIN EN 10163-2 B UG2 03/05		
	43657		

**Stückanalyse / Check analysis (C73-C99)**

Proben-Nr. Specimen No. (C00)	Schmelzen-Nr. Heat No. (B07)	C %	Si %	Mn %	P %	S %	N %	Al %	Cu %
674020 674020	24644 24644	0,17 0,16	0,21 0,21	1,59 1,58	≤0,025 0,015 0,014	≤0,005 0,001 0,002	≤0,012 0,005 0,003	0,020-0,060 0,031 0,043	≤0,25 0,05 0,04
Proben-Nr. Specimen No. (C00)	Schmelzen-Nr. Heat No. (B07)	Cr %	Ni %	V %	Ti %	Nb %	Mo %	B %	EV 1) %
674020 674020	24644 24644	0,04 0,05	0,05 0,05	0,003 0,01	0,004 0,01	0,03 0,02	0,01 0,01	≤0,0005 0,0001 0,0004	≤0,45 0,45 0,44
Proben-Nr. Specimen No. (C00)	Schmelzen-Nr. Heat No. (B07)	EV2 2) %	EV3 3) %	Al/N %	EV4 4) %	Nb+V %			
674020 674020	24644 24644	0,26 0,26	0,15 0,15	≥2 14	≤0,15 0,04 0,04	0,033 0,033 0,030			

1) EV1: CEV=CrMn/SiMo/Si/Ni/15+Cr/5+V/S+Cu/16  
2) EV2: FCM=C/Mn/20+Mo/15+A/V6+Cr/20+V/10-Cu/23+Si/30+5x8  
3) EV3: Cr+Cu+Mo+Ni  
4) EV4: V+Nb+Ti

**Zugversuch / Tensile test (C10-C23)**

Proben-Nr. Specimen No. (C00)	Schmelzen-Nr. Heat No. (B07)	Ort Location (C01)	Richt. Direct (C02)	Zustand Cond. (B08)	Form Type (C10)	Dehngrenze Yield strength (C11) R <sub>T0,5</sub> N/mm <sup>2</sup> 330-510	Zugfestigkeit Tensile strength (C12) R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	R <sub>0,5</sub> /R <sub>m</sub> R <sub>0,5</sub> /R <sub>m</sub>	Bruchdehnung Elongation (C13) A <sub>5</sub> 7) %
674020 674020	24644 24644	K4G K4G	Q Q	N NS	P P	364 368	530 518	0,69 0,71	35 34


1) X: Kopf / Top  
2) 4: 1/4 Breite / 1/4 Width  
3) G: Erzeugnisdicke / Thickness of product  
4) Q: quer / transversal  
5) N: normalisiert / normalized  
NS: normal und sin. Wärmebehandlung / normal and sinul. heat treatment  
6) P: prismatisch / prismatic  
7) A<sub>5</sub>: L<sub>0</sub>-5,65 √S<sub>0</sub>

Es wird bestätigt, daß die Lieferung den Anforderungen der Lieferbedingung entspricht.


We hereby certify that the delivered material complies with the terms of the order.

(Z01)

QM-System: Certification as per ISO 9001 since 28 February 1990


 Herstellerzeichen  
 Trademark  
 (A04)

 Ilsenburger Grobblech GmbH  
 Veckenstedter Weg 10  
 C-3887 Ilsenburg  
 (A01)


 Abnahmestempel  
 Inspection Stamp  
 (Z03)

 Abnahmebeauftragter  
 Inspector Representative  
 (Z02)

 Diese durch ein geeignetes Datenverarbeitungssystem erstellte Bescheinigung ist gemäß EN 10 204, Abschnitt 5, ohne Unterschrift gültig.  
 This certificate was prepared by a suitable data processing system and is valid without signature according to EN 10 204, section 5.

Cyron

<b>Abnahmeprüfzeugnis 3.1</b>		<b>Nr./No. (A03)</b> 979079	
<b>Inspection certificate 3.1</b>		<b>Seite/Page</b> 4/6	
<b>DIN EN 10204</b>		<b>Datum/Date</b> 04.04.2016	
<small>[A02]</small>			
<b>Nr. (A07)</b> 95095102	12.02.2016	<b>Nr. (A07)</b> 43657-01 Rev. 2	
<b>Besteller</b> Salzgitter Mannesmann Stahlhandel		<b>Empfänger</b> Erndtebrücker Eisenwerk	
<b>Purchaser</b> GmbH NL Gladbeck		<b>Customer</b> GmbH & Co. KG	
<b>(A06)</b> 45955 Gladbeck		<b>(A06)</b> 57335 Erndtebrück	
<b>Erzeugnis</b> Grobblech		<b>Werksauftrags-Nr.</b> 0000082963	
<b>(B01)</b> Product Heavy plate		<b>Works order No. (A08)</b>	
<b>Werkstoff und Lieferbedingung</b> S355J2H Z35		<b>Lieferschein-Nr.</b> 0086170857	
<b>Steel grade and terms of delivery</b> DIN EN 10219-1 07/06		<b>Dispatch note No.</b> 01.04.2016	
<b>(B02-E03)</b> MDS 43.657 Rev.0		<b>Annahme</b> WS	
DIN EN 10029 C 02/11		<b>Inspection</b>	
DIN EN 10163-2 B UG2 03/05		<b>(A05)</b>	
43657			

Zugversuch Dickenrichtung / Through thickness tension test (C10-C29)							
Proben-Nr. Specimen No. (C00)	Schmelzen-Nr. Heat No. (B07)	Ort Location (C01)	Zustand Cond. (B05)	Bruchreinschnürung Reduction of area			
				1 %	2	3	MW 4) %
674020	24644	K4	N	72	72	72	72
674020	24644	K4	NS	70	67	71	69

1) K: Kopf / Top  
 2) 4: 1/4 Breite / 1/4 Width  
 3) N: normalisiert / normalized  
 3) NS: normal und sim. Wärmebehandlung / normal and simul. heat treatment  
 4) MW: Mittelwert / Average


Kerbschlagbiegeversuch / Impact test (C40-C49)										
Proben-Nr. Specimen No. (C00)	Schmelzen-Nr. Heat No. (B07)	Ort Location (C01)	Richt. Direct. (C02)	Zustand Cond. (B05)	Probenform Type of specimen (C40-C41)	Temperatur Temperature (C03)	Schlagarbeit Impact energy (C42-C43)			
							1	2	3	MW 6) J ≥40
674020	24644	K40	Q	N	Charpy V-notch	-050	112	124	86	107
674020	24644	K40	Q	NS	Charpy V-notch	-050	54	143	113	103


Proben-Nr. Specimen No. (C00)	Schmelzen-Nr. Heat No. (B07)	Ort Location (C01)	Richt. Direct. (C02)	Zustand Cond. (B05)	Probenform Type of specimen (C40-C41)	Temperatur Temperature (C03)	Zähbruchanteil Ductile fracture (C42-C43)			
							1	2	3	MW 6) % ≥50
674020	24644	K40	Q	N	Charpy V-notch	-050	90	95	85	90
674020	24644	K40	Q	NS	Charpy V-notch	-050	60	70	70	67

1) K: Kopf / Top  
 2) 4: 1/4 Breite / 1/4 Width  
 3) O: oberflächennah / near surface  
 4) Q: quer / transversal  
 5) N: normalisiert / normalized  
 5) NS: normal und sim. Wärmebehandlung / normal and simul. heat treatment  
 6) MW: Mittelwert / Average

Es wird bestätigt, daß die Lieferung den Anforderungen der Lieferbedingung entspricht.  
 We hereby certify that the delivered material complies with the terms of the order.  
 (Z01)  
 0M-System: Certification as per ISO 9001 since 28 February 1990

 Herstellerzeichen  
 Trademark  
 (A04)

Ilseburger Grobblech GmbH  
 Vackendörfer Weg 10  
 D-36871 Ilseburg  
 (A01)

 Abnahmestempel  
 Inspection Stamp  
 (Z03)

Abnahmebeauftragter  
 Inspection Representative  
 (Z02)

Diese durch ein geeignetes Datenverarbeitungssystem erstellte Bescheinigung ist gemäß EN 10 204, Abschnitt 5, ohne Unterschrift gültig.  
 This certificate was prepared by a suitable data processing system and is valid without signature according to EN 10 204, section 5.

Cyron

<b>Abnahmeprüfzeugnis 3.1</b> <b>Inspection certificate 3.1</b> <b>DIN EN 10204</b> (A32)		Nr./No. (A03) 979079 Seite/Page 5/6 Datum/Date 04.04.2016
Nr. (A07) 95095102 Besteller Salzgitter Mannesmann Stahlhandel Purchaser GmbH NL Gladbeck (A05) 45955 Gladbeck	12.02.2016 Empfänger Erndtebrücker Eisenwerk Customer GmbH & Co. KG (A06) 57335 Erndtebrück	Nr. (A07) 43657-01 Rev. 2
Erzeugnis Grobblech Product Heavy plate (B01)		Werksauftrags-Nr 0000082963 Works order No. (A08) Lieferschein-Nr. C086170857 Dispatch note No. 01.04.2016
Werkstoff und Lieferbezeichnung S355J2H Z35 Steel grade and terms of delivery DIN EN 10219-1 07/06 (B02-B03) MDS 43.657 Rev.0 DIN EN 10029 C 02/11 DIN EN 10163-2 B UG2 03/05 43657		Abnahme WS Inspection (A05)

**Probenabmessungen:**  
5,0 x 10 x 55mm (von 5,00mm bis 8,99mm Blechdicke)  
7,5 x 10 x 55mm (von 9,00mm bis 10,99mm Blechdicke)  
10 x 10 x 55mm (ab 11,00 mm Blechdicke)

**Specimen size:**  
5,0 x 10 x 55 mm (from 5,00 mm up to 8,99 mm plate thickness)  
7,5 x 10 x 55 mm (from 9,00 mm to 10,99 mm plate thickness)  
10 x 10 x 55 mm (from 11,00 mm plate thickness)

**Weitere Prüfungen / Other tests (C50-C69)**

Proben-Nr. Specimen No. (C00)	Schmelzen-Nr. Heat No. (B07)	Ort Location (C01)	Richt. Direct. (C02)	Zustand Cond. (B05)	Härteprüfung Hardness test (C30-C39) HV10 ≤ 200			
674020 674020	24644 24644	K4 K4		N NS	165 162			

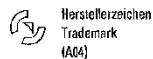
1) K: Kopf / Top  
2) A: 1/4 Breite / 1/4 Width  
5) N: normalisiert/normalized  
NS: normal. und sim. Wärmebehandlung / normal. and simul. heat treatment

Die Bleche wurden einer Ultraschallprüfung gemäß ISO 10893-9:2011 (Kanten- und Flächenprüfung) unterzogen. Sie entsprechen der Zulässigkeitsklasse U2.

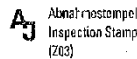
The plates have been ultrasonically tested in accordance with ISO 10893-9:2011 (edges and area testing). They meet the requirements of U2- class.

Unsere Produkte sind frei von radioaktiven Stoffen. Der Freigabegrenzwert von 100 Bq/kg, der die Einhaltung der Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) für die uneingeschränkte Freigabe von festen Stoffen (StrlSchV Anlage III, Spalte 5) für eisenverwandte Nuklide gewährleistet, wird nicht überschritten.

Es wird bestätigt, daß die Lieferung den Anforderungen der Lieferbedingung entspricht.  
We hereby certify that the delivered material complies with the terms of the order.  
(Z01)  
QM-System: Certification as per ISO 9001 since 28 February 1990



Ilseburger Grobblech GmbH  
Veckenstäder Weg 10  
D-38871 Ilseburg  
(A01)



Abnahmebeauftragter  
Inspection Representative  
(Z02)

Dieses durch ein geeignetes Datenverarbeitungssystem erstellte Bescheinigung ist gemäß EN 10 204, Abschnitt 5, ohne Unterschrift gültig.  
This certificate was prepared by a suitable data processing system and is valid without signature according to EN 10 204, section 5.

Cyron

<b>Abnahmeprüfzeugnis 3.1</b>		Nr./No. (A03)	979079
<b>Inspection certificate 3.1</b>		Seite/Page	6/6
<b>DIN EN 10204</b>		Datum/Date	04.04.2016
(A02)			
Nr. (A07)	95095102	12.02.2016	Nr. (A07)
Besteller	Salzgitter Mannesmann Stahlhandel		43657-01 Rev. 2
Purchaser	GmbH NL Gladbeck		Empfänger
(A06)	45955 Gladbeck		Erndtebrücker Eisenwerk
			GmbH & Co. KG
			Customer
			(A06)
			57335 Erndtebrück
Erzeugnis	Grobblech	Werkauftrags-Nr.	0000082963
Produkt	Heavy plate	Works order No.	
(B01)		(A08)	
Werkstoff und Lieferbedingung	S355J2H Z35	Lieferschein-Nr.	0086170857
Steel grade and terms of delivery	DIN EN 10219-1 07/06	Dispatch note No.	01.04.2016
(B02-B03)	MDS 43.657 Rev.0		
	DIN EN 10029 C 02/11	Abnahme-	WS
	DIN EN 10163-2 B UG2 03/05	Inspection	
	43657	(A05)	

Our products are free of radioactive substances and do not exceed the clearing limit value of 100 Bq/kg, which guarantees the compliance with limit values given in the Radiation Protection Ordinance (StrlSchV) for the unrestricted clearance of solid material (StrlSchV Annex III, Section 5) for ferrous nuclides.

Wärmebehandlung der Testcoupons: PWHT (S):  
 Temperatur: 605 +/-10°C  
 Haltezeit: 1h/inch (min 1h)  
 Danach Abkühlung an ruhender Luft.

Heat treatment of testcoupons: PWHT (S):  
 Temperature: 605 +/-10°C  
 Holding time: 1h/inch (min 1h)  
 Then cooling in still air.

Es wird bestätigt, daß die Lieferung den Anforderungen der Lieferbedingung entspricht.

We hereby certify that the delivered material complies with the terms of the order.

(Z01)

QMS-System: Certification as per ISO 9001 since 28 February 1990



Herstellerzeichen  
 Trademark  
 (A04)

Ilsenburger Grobblech GmbH  
 Vackensteiner Weg 10  
 D-38871 Ilsenburg  
 (A01)



Abnahmeempfang  
 Inspection Stamp  
 (Z03)

Abnahmebeauftragter  
 Inspection Representative  
 (Z02)

Dieses durch ein geeignetes Datenverarbeitungssystem erstellte Bescheinigung ist gemäß EN 10204, Abschnitt 5, ohne Unterschrift gültig.  
 This certificate was prepared by a suitable data processing system and is valid without signature according to EN 10204, section 5.

Cyron

## Příloha č. 2

(A01) **Salzgitter Mannesmann Stainless Tubes France SAS**  
 (A05) B.P.10 - F 21501 Montbard Cedex - FRANCE  
[www.mannesmann-stainless-tubes.com](http://www.mannesmann-stainless-tubes.com)



**INSPECTION CERTIFICATE**  
**Abnahmeprüfzeugnis**  
**Certificat de Réception**

(A02) EN 10204: 2004 TYPE 3.1

(A03) No. / Nr. / N° **3-18-01865-rev.01** Pag. 1 / 4

(A07) Customer Order No / Kundenauftragsnr. / N° Commande Client

22226

(A08) SMST-Tubes Order No / Auftragsnr. / N° Commande SMST

0000272466

SMST-Item

(A09) Part No / Teilenummer / Part number

0000272466-000021

(B01) (B02) (B04) **Product Description / Produkt Beschreibung / Description du Produit**

Seamless Stainless Steel Hot Finished Tubes Solution Annealed Free From Scale Plain Ends Square Cut Deburred  
 Rohre warmgefertigt nahtlos rostfreier Stahl lösungsgeglüht zunderfrei glatte Enden rechtwinklig gesägt entgratet  
 Tubes sans soudure Acier Inoxydable Fini à chaud Remis en solution Exempt de calamine Extrémités lisses coupées d'querre

**Specifications / Spezifikationen / Spécifications** A312M CHEM MECH TEST ONLY 17;EN 10216-5 CHEM MECH TEST ONLY 12.2013 TC1;EN 10294-2 08.2012;EN 10297-2 2006;HYDRO 70 BARS GUARANTEE; ANSI/NACE MR0103/ISO 17945 2015; ANSI/NACE MR0175/ISO 15156-3 2015

**Grade / Werkstoff / Nuance** 1.4401 VALIMA;1.4404 VALIMA;TP 316 VALIMA;TP 316L VALIMA;DMV 316LMC

**Tolerances / Toleranzen / Tolérances** STD OD-0+2%\_ID+0-2%\_MIN 1MM Eccentricity 10% max

(B03) **Supplementary Requirements / Zusatzanforderungen / Exigences Supplémentaires**

None / Keine / Aucune

(B06 - D01) **Marking of the Product / Kennzeichnung des Produkts / Marquage du Produit**

**Technical marking** DMV MANNESMANN - WO : \$ORDER\_ID\$ - DMV-F - EN 10294-2 / EN 10297-2 - DMV 316LMC - 1.4401 VALIMA / 1.4404 VALIMA / TP 316 VALIMA / TP 316L VALIMA - 240.00 MM x 170.00 MM - SML - HFD - \$HEAT\_NBR\$ - \$QUAL\_LOT\_NBR\$ - FRANCE

**Hard Stamping** IU

**Country of Origin of the tubes / Herstellungsland der Rohre / Pays d'origin des tubes** France / Frankreich / France

Quantity / Menge / Quantité						Dimensions / Abmessung / Dimensions			
(B07) Heat Schmelze Coulée	Quality Lot Qualitätslos Lot Qualité	SMST-Item	(B08) Pieces Stück Pièces	(B13) Weight Gewicht Poids	(B16) Length Länge Longueur	(B09) OD	(B14) ID	(B11) Ordered Length Auftragslänge Longueur commandée	
								min	max
I61981	QL30120654	000021	3	1512.00 kg	8.084 m	240.00 mm	170.00 mm	1500 mm	3000 mm
				3333.39 lbs	26.52 ft	9.449 "	6.693 "	4.92 ft	9.84 ft
			3	1512.00 kg	8.084 m				
			3	3333.39 lbs	26.52 ft				

**Heat Analysis / Schmelzanalyse / Analyse de Coulée**

		Request	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
		Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0150	16.5	10.0	2.0	0.00
		Max	0.030	1.0	2.0	0.040	0.0300	18.0	13.0	2.5	0.10
(B07) Heat Schmelze Coulée	Heat Origin Ursprung der Schmelze Origine de la Coulée	(C70) Melting Process Erschmelzung sart Procédé d'élaboration	%	%	%	%	%	%	%	%	%
I61981	Italy	EAF + AOD	0,014	0,42	1,48	0,030	0,0220	16,79	11,27	2,14	0,068

**INSPECTION CERTIFICATE**Abnahmeprüfzeugnis  
Certificat de Réception

(A02)

EN 10204: 2004 TYPE 3.1

(A03) No. / Nr. / N°

3-18-01865-rev.01

Pag.

2 / 4

**Tensile Test at Room Temperature / Zugversuch bei Raumtemperatur / Essai de traction à température ambiante**

EN 10002-1 // EN ISO 6892-1 // ASTM A 370

(C02) Direction: LONGITUDINAL

		(C11)	(C11)	(C12)	(C13)	(C13)
		YS 0.2%	YS 1%	U.T.S.	EL	EL
		Rp 0,2%	Rp 1%	Rm	50mm	5,65VSo
Request	Min	205	240	515	35.0	40.0
		Max		690		
Quality Lot Qualitätslos Lot Qualité	(C00) Sample	MPa	MPa	MPa	%	%
QL30120654	30366406	278	322	590	52.8	52.8

Sampling done on tubes in manufacturing length / Beprobung erfolgte an Rohren in Herstelllänge / Echantillonnage réalisé par longueur de fabrication

**(C30) Hardness Test / Härteprüfung / Essai de dureté**

NACE MR0175/ISO 15156-3 // ANSI/NACE MR0103/ISO 17945

		(C30) HRC			
		Request			22.0 max
Quality Lot Qualitätslos Lot Qualité	(C00) Sample	Result Ergebnis Resultat	(C31) Min	(C31) Max	(C32) Avg
QL30120654	30366406		< 18	< 18	< 18

Sampling done on tubes in manufacturing length / Beprobung erfolgte an Rohren in Herstelllänge / Echantillonnage réalisé par longueur de fabrication

**(C56) Ring Tensile Test / Ringzugversuch / Essai de traction sur anneau**

EN ISO 8496

Quality Lot Qualitätslos Lot Qualité	(C00) Sample	Result Ergebnis Resultat
QL30120654	30366406	OK

Sampling done on tubes in manufacturing length / Beprobung erfolgte an Rohren in Herstelllänge / Echantillonnage réalisé par longueur de fabrication

**Intergranular Corrosion Test / Prüfung der interkristallinen Korrosion / Essai de corrosion intergranulaire**

EN ISO 3651-2 METHOD A // ASTM A 262 PRACTICE E

		Request Max
		Unit
Quality Lot Qualitätslos Lot Qualité	(C00) Sample	Result Ergebnis Resultat
QL30120654	30366406	Satisfactory



**INSPECTION CERTIFICATE**  
**Abnahmeprüfzeugnis**  
**Certificat de Réception**

(A02) EN 10204: 2004 TYPE 3.1

(A03) No. / Nr. / N°

3-18-01865-rev.01

Pag.

3 / 4

**Other Tests and Declarations / Andere Prüfungen und Prüffeststellungen / Autres Tests et Déclarations**

QL30120654

Heat Treatment / Wärmebehandlung / Traitement thermique : ANNEALED BY DIRECT QUENCHING - Water  
Quenching off the extrusion press - Temperature : 1040°C (1904°F) min - 1100°C (2012°F) max

(D01)	Visual and dimensional inspection (VT) on 100% of tubes according to the order Besichtigung und Maßkontrolle von 100% der Rohre gemäß Auftrag Examen visuel et dimensionnel sur 100% des tubes selon la commande	Satisfactory Bestanden Satisfaisant
(D51)	Antimixing Check (PMI) on 100% of tubes Verwechslungsprüfung an allen Rohren mittels Spektralprüfung von 100% der Rohre Contrôle anti-mélange par PMI sur 100% des tubes	Satisfactory Bestanden Satisfaisant
(D52)	Hydro Pressure Test 5 sec. at 70.00 BAR EN 10216-5 Wasserdruckprüfung 5 sec. mit 70.00 BAR EN 10216-5 Épreuve hydraulique 5 sec. avec 70.00 BAR EN 10216-5  No Weld Repair Keine Reparaturschweißung Aucune réparation par soudure	Guaranteed test Prüfung gewährleistet Test garanti
(Z01)	SMST declares that the product is in compliance with the order. Die Erzeugnisse wurden bestellungsgemäß geprüft und für in Ordnung befunden SMST atteste que les produits livrés sont conformes aux stipulations de la commande	

Tubes are free from mercury contamination and from radioactive contamination  
Die Rohre sind frei von Quecksilberverunreinigungen und frei von radioaktiver Verunreinigung  
Les tubes sont exempts de contamination par le mercure et de contamination radioactive

The material is conforming to directive 2000/53/EC and 2011/65/EU  
Das Material entspricht den Anforderungen der Richtlinien 2000/53/EC und 2011/65/EU  
Le matériau est conforme aux directives 2000/53/EC et 2011/65/EU

Confirmation with reference to Pressure Equipment Directive 2014/68/EU:  
The works operates a quality management system that has undergone a specific assessment for materials for pressure equipment and is certified by a competent body (TÜV-SÜD-Cert.No: 05/2016/MAN)  
Bestätigung in Bezug auf Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU:  
Das Werk wendet ein Qualitätsmanagementsystem an, das in Bezug auf Werkstoffe für Druckgeräte einer spezifischen Bewertung unterzogen wurde und von einer zuständigen Stelle (TÜV-SÜD-Cert.No: 05/2016/MAN) zertifiziert ist.  
Confirmation concernant la Directive Equipements sous Pression 2014/68/EU:  
L'usine applique un système de management de la qualité qui a fait l'objet d'une évaluation spécifique pour les matériaux pour équipements sous pression et qui est certifié par un organisme compétent (TÜV-SÜD-Cert.No: 05/2016/MAN)

(Z02)	Mill's Inspector Werkssachverständiger Le Contrôleur usine	Florian Suillerot (IU)	Date of Edition Ausgabedatum Date d'Édition	23/02/2018
-------	--	------------------------	---	------------

This certificate is issued by SALZGITTER MANNESMANN STAINLESS TUBES via a computerized system bearing a traceable unique number. It is valid without signature. An intermediary may only pass on the original certificate without any alterations. Providing a copy of the original is only permitted subject to strict compliance with the prerequisites set out in § 6 of EN 10204:2004 i.e. traceability and availability of the original upon request. Any modification or alteration of the certificate or any copies are strictly prohibited. Any contravention of this notice or § 6 of EN 10204:2004 is illegal and will be prosecuted. Any falsification of a certificate e.g. by introducing false or fraudulent data for the purpose of promoting the sales of goods is a criminal offence under German law (and many other jurisdictions) punishable with fines and imprisonment. If an authentication is needed, please contact [info@mst.mannesmann.com](mailto:info@mst.mannesmann.com)

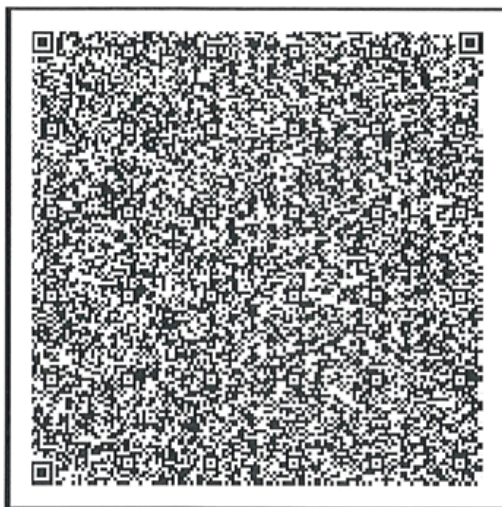
**Certificate anti counterfeiting check**  
**Prüfung der Zeugnisse gegen Fälschung**  
**Contrôle de la contrefaçon des certificats**





**INSPECTION CERTIFICATE**

**Abnahmeprüfzeugnis**  
**Certificat de Réception**



A set of information from the Inspection Certificate cover page are included in encrypted form in the above QR code.

By scanning it with your mobile device you can check if the Inspection Certificate is genuine.

Ein Teil der Informationen der ersten Zeugnis-Seite sind in verschlüsselter Form in dem oben dargestellten QR Code enthalten. Beim Scannen mit einem mobilen Gerät kann das Zeugnis auf Authentizität geprüft werden.

Une partie des informations contenues dans la première page de ce certificat d'inspection sont disponibles sous forme cryptée dans le "QR Code" ci-dessus. Lors de la lecture avec votre appareil mobile, vous pouvez vérifier l'authenticité du certificat d'inspection.





**SÚRAO**

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ  
RADIOAKTIVNÍCH  
ODPADŮ

NAŠE  
BEZPEČNÁ  
BUDOUCNOST

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