

UKLÁDACÍ OBALOVÝ SOUBOR PRO VYHOŘELÉ JADERNÉ PALIVO V ČESKÉ REPUBLICĚ

M. Matulová, L. Hausmannová, J. Malina a L. Šatura

Praha, 2023

Obsah

1 Úvod	10
2 Okrajové podmínky pro UOS v hlubinném úložišti VJP.....	11
3 Požadavky pro návrh ukládacího obalového souboru.....	13
3.1 Životnost.....	14
3.2 Podkritičnost.....	14
3.3 Stínění.....	14
3.4 Pevnost – tlak a stříh.....	14
3.5 Teplota.....	15
4 Popis referenčního řešení UOS.....	16
4.1 Konstrukční řešení.....	16
4.2 Materiály.....	17
4.2.1 Vnější obal – uhlíková ocel	17
4.2.2 Vnitřní pouzdra – korozivzdorná ocel	18
4.2.3 Vestavba – korozivzdorná ocel	19
4.2.4 Tloušťka stěn VO a VP	19
4.2.5 Konstrukční řešení UOS pro palivo reaktoru VVER-440 (Dukovany)	19
4.2.6 Konstrukční řešení UOS pro palivo reaktoru VVER-1000 (Temelín)	21
4.3 Technologie výroby UOS.....	22
4.3.1 Výroba vnějšího obalu	22
4.3.2 Výroba vnitřního pouzdra.....	23
4.3.3 Svařování	23
4.4 Kontrola, značení a manipulace s obalovým souborem.....	23
5 Výpočty prokazující funkčnost navrženého referenčního řešení UOS	25
5.1 Životnost.....	25
5.2 Podkritičnost.....	26
5.3 Výpočty stínění.....	26
5.4 Pevnostní výpočty.....	27
5.4.1 Rovnoměrný tlak 20 MPa.....	28
5.4.2 Nerovnoměrný tlak.....	28
5.4.3 Střížné namáhání.....	29
5.5 Teplotechnické výpočty.....	30
Závěr	32
6 Reference	33
Příloha 1: Legislativa.....	35
Příloha 2: Kusovník UOS 440.....	37
Příloha 3: Výkres sestavy UOS pro tři soubory paliva VVER-1000	38
Příloha 4: Výkres sestavy UOS pro sedm souborů paliva VVER-440	39

Seznam použitých zkratk a jednotek

A.S.I.	Asociace strojních inženýrů ČR
AZ	Atomový zákon
ČSN	Česká technická norma
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany
ETE	Jaderná elektrárna Temelín
FEM	Metoda konečných prvků (MKP) (z angl. Finite Element Method)
GNS	Společnost pro jaderné služby (z něm. Gesellschaft für Nuklear-Service)
Gy/h	Jednotka dávkového příkonu (D) vyjadřuje přírůstek dávky za jednotku času, (Grey za hodinu)
hm. %	Hmotnostní procenta, vyjádření složení
HÚ	Hlubinné úložiště
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii (z angl. International Atomic Energy Agency)
KTA	Bezpečnostní standardy od německé Komise pro Standardy Jaderné Bezpečnosti (z něm. Kerntechnischer Ausschuss: Nuclear Safety Standards Commission)
MaCoTe	The Material Corrosion Test, mezinárodní projekt ve švýcarské podzemní laboratoři v Grimsel Test Site
MKP	Metoda konečných prvků
MPa	Jednotka tlaku, (Megapascal)
MSK-64	Medvěděvova-Sponheuerova-Kárníkova stupnice
mSv	Jednotka ekvivalentní dávky ionizujícího záření, (Millisievert)
NTD	Normativně technická dokumentace
N/mm ²	Jednotka minimální meze kluzu, (Newton na čtvercový milimetr)
PDE	Příkon dávkového ekvivalentu
PS	Palivový soubor
R _m	Mez pevnosti
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu (napětí, které způsobí trvalou deformaci o velikosti 0.2 %)
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
Sv/h	Jednotka příkonu dávkového ekvivalentu (H) vyjadřuje podíl přírůstku ekvivalentní dávky za jednotku času, (Sievert za hodinu)
TA ČR	Technologická agentura ČR
UOS	Ukládací obalový soubor
VJP	Vyhořelé jaderné palivo

VO	Vnější obal
VP	Vnitřní pouzdro
VVER	Tlakovodní vodou chlazený reaktor
WENRA	Západoevropská společnost (z angl. Western European Nuclear Regulators' Association)
W/m·K	Jednotka součinitele tepelné vodivosti, (Watt na metr na Kelvin)
σ	Napětí (MPa)
σ_{red}	Redukované napětí (MPa)
σ_s	Napětí von Mises (MPa)

Vysvětlení pojmů

Bezpečnostní funkce

Bezpečnostní funkce je činnost systému, konstrukce, komponenty nebo jiné součásti jaderného zařízení, která je významná pro zajišťování jaderné bezpečnosti jaderného zařízení.

Hlubinné úložiště (HÚ)

Hlubinným úložištěm se rozumí úložiště radioaktivního odpadu umístěné stovky metrů pod zemským povrchem a určené pro ukládání vysokoaktivního odpadu a vyhořelého jaderného paliva. Hlubinné úložiště je zde odlišeno od podzemního úložiště, které je definováno v § 2 vyhlášky č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, jako úložiště umístěné desítky metrů pod zemským povrchem a určené zejména pro ukládání nízkoaktivního a středněaktivního odpadu.

Mez kluzu

Mez kluzu je nejmenší napětí, při němž dochází k podstatné plastické deformaci. V případě, že lze tuto deformaci odečíst přímo z diagramu, jedná se o tzv. výraznou mez kluzu.

Jestliže se výrazná mez kluzu neprojeví je nutno stanovit smluvní mez kluzu, která je obecně definována jako napětí, při němž trvalá deformace dostoupí předepsané hodnoty. Praxe prokázala, že výrazné mezi kluzu z výpočtového hlediska odpovídá nejvíce mez trvalé deformace 0,2 %, tzv. $R_{p0,2}$.

Obalový soubor (OS)

Systém obalů nezbytných k úplnému uzavření/izolaci radioaktivního obsahu. Požadavky na obalový soubor dle předpokládaného použití stanoví vyhlášky č. 379/2016 Sb., o schválení typu některých výrobků v oblasti mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření a přepravě radioaktivní nebo štěpné látky. Přičemž typ D je primárně určený k ukládání vyhořelého nebo ozářeného jaderného paliva nebo radioaktivního odpadu vzniklého jeho zpracováním.

Tlumicí bariéra (angl. buffer)

Inženýrská bariéra v těsném okolí ukládacího obalového souboru sestávající z jílového materiálu s požadovanými vlastnostmi. Příkladem vhodného materiálu pro tlumicí bariéru je specifický typ jílu – bentonit. Tlumicí bariéra se od výplňového materiálu (vysvětlení viz níže) liší zejména svým technologickým zpracováním a způsobem aplikace v úložišti. V současné době je uvažováno použití tlumicí bariéry ve formě prefabrikovaných segmentů kompaktovaného bentonitu s definovanou suchou objemovou hmotností.

Ukládací obalový soubor (UOS)

Obalový soubor typu D, který je „určený pro ukládání vyhořelého nebo ozářeného jaderného paliva nebo radioaktivního odpadu vzniklého jeho zpracováním“ a není určen k přepravě dle vyhlášky č. 379/2016 Sb. Dříve byl také nazýván jako *úložný obalový soubor (ÚOS)*. V této zprávě se pod pojmem UOS rozumí výhradně obalový soubor pro ukládání VJP.

Vyhořelé jaderné palivo

Jaderné palivo, které bylo trvale vyjmuto z aktivní zóny jaderného reaktoru a původce ho označil za odpad. Před prohlášením za odpad se používá termín použité jaderné palivo.

Výplňový materiál (angl. backfill)

Inženýrská bariéra vyplňující přístupové (tzv. zavážecí) chodby k ukládacím vrtům, sestávající z jílového materiálu s požadovanými vlastnostmi. Předpokládá se použití stejného materiálu jako pro buffer – bentonitu. Forma bentonitu bude však rozdílná, nebude se jednat o prefabrikáty, ale o peletizovaný materiál, který bude na místo přímo aplikován.

Zátky v HÚ (angl. plugs, seals)

Inženýrské bariéry použité k uzavření prostor hlubinného úložiště (úložných vrtů, chodeb). Může se jednat o prosté betonové konstrukce s čistě mechanickou funkcí (např. uzavírací zátky úložných vrtů) nebo konstrukčně vícesložkové prvky s mechanickou a hydroizolační funkcí (např. utěšňovací zátky chodeb).

Seznam příloh

Příloha 1: Legislativa

Příloha 2: Kusovník UOS 440

Příloha 3: Výkres sestavy UOS pro tři soubory paliva VVER-1000

Příloha 4: Výkres sestavy UOS pro sedm souborů paliva VVER-440

Abstrakt

Tato zpráva popisuje referenční řešení ukládacích obalových souborů (UOS) pro vyhořelé jaderné palivo (VJP) na území České republiky (ČR). Oba uvažované materiály, uhlíková ocel (S355J2H+N) pro vnější obal (VO) i austenitická korozivzdorná ocel (EN 1.4404) pro vnitřní pouzdra (VP) jsou dobře známé a technologicky zvládnutelné. Oba materiály plní svou specificky definovanou funkci jak z pohledu mechanické odolnosti, tak z pohledu dlouhodobého korozního napadení. V případě obou materiálů použitých pro konstrukci UOS jsou v praxi úspěšně zvládnuté technologie jejich opracování, svařování atd. Celková životnost UOS dle všech zvažovaných korozních modelů byla navržena a následně vypočtena, nejen pro překonání doby 100 000 let, ale předběžně vypočtena i na dobu 1 000 000 let. V dalších fázích vývoje UOS bude na základě dalších dat z budoucích experimentů, životnost 1 000 000 let dále ověřována. V rámci konstrukčního řešení byly výpočetně ověřeny za pomoci pevnostních výpočtů, teplotních výpočtů, výpočtů podkritičnosti, výpočty stínění a výpočty stříhu (seismicity) ověřeny mnoha z klíčových parametrů.

Klíčová slova

Hlubinné úložiště, vyhořelé jaderné palivo, ukládací obalový soubor, koroze ukládacího obalového souboru, životnost ukládacího obalového souboru, inženýrské bariéry, konstrukční řešení ukládacího obalového souboru, UOS 440, UOS 1000

Abstract

This report provides a description of the first reference design for the waste disposal packages (WDP) to be used for the disposal of spent nuclear fuel (SNF) in the future Czech deep geological repository (DGR). Both of the materials considered for the construction of the WDPs, i.e. carbon steel (S355J2H+N) for the outer casing (OC) and austenitic stainless steel (EN 1.4404) for the inner casing (IC) are well known and technologically manageable. Both materials fulfil their defined functions in terms of their mechanical and long-term corrosion attack. With concern to both the materials proposed for the construction of the WDPs, the respective processing, welding, etc. techniques have been successfully proven in practice. The total service lifetime of the WDPs, calculated via a range of corrosion models, have been verified as exceeding 100,000 years and as likely to reach up to 1 million years. The subsequent phases of the development of the WDPs will concern their further verification of lifetime 1 million years based on the data obtained from ongoing and future experimental research. The determination of the reference design included the verification many of the key parameters via the use of detailed strength, thermo-technical, subcriticality, shielding and shear calculations (seismicity).

Keywords

Deep geological repository (DGR), spent nuclear fuel (SNF), waste disposal package (WDP), waste disposal package corrosion, waste disposal package lifespan, engineered barriers, waste disposal package design, WDP 440, WDP 1000

1 Úvod

Tato zpráva detailně popisuje návrh referenčního technického řešení a výpočtů prokazující funkčnost ocelového ukládacího obalového souboru (UOS), pro finální ukládání vyhořelého jaderného paliva (VJP) na území České republiky. Zpráva vychází ze závěrů technické zprávy SÚRAO (Forman et al., 2021), ze které byly také některé části převzaty.

Česká republika má v čase vypracování této zprávy (5/2023) vybrány čtyři potenciální lokality – Březový potok, Horka, Hrádek a Janoch (Vondrovic et al., 2020), ze kterých bude vybrána jedna finální a jedna záložní lokalita pro umístění hlubinného úložiště (HÚ). V současné době ještě nebyly zahájeny průzkumné práce v daných lokalitách, proto zatím nejsou známy detailní geologické, geochemické, geomechanické, geotermální a hydrogeologické podmínky v lokalitách budoucího HÚ, od kterých se budou následně odvíjet fyzikálně-chemické podmínky ovlivňující životnost UOS. Z tohoto důvodu jsou na začátku této zprávy přiblíženy rámcové okrajové podmínky pro realizaci trvalého ukládání VJP na území České republiky (viz kapitola 2). Tyto okrajové podmínky jsou klíčové jak pro možnost provedení prvotní studie proveditelnosti, tak pro následný definování klíčových jevů, kterým musí UOS odolat, jakož i seznam všech možných významných událostí, které mohou v HÚ v budoucnu nastat a mohou ovlivnit životnost UOS.

Samotné požadavky na UOS, o kterých blíže pojednává kapitola 3, vycházejí z aktuálně platné legislativy a respektují současné mezinárodní zkušenosti v rámci přípravy HÚ. Technický popis referenčního řešení a technologie výroby UOS je shrnut v kapitole 4. Tento popis je zároveň doplněn o výpočty (mechanické, tepelné, životnosti, stínění a podkritičnosti) (viz kapitola 5), díky nimž je doložena vhodnost řešení UOS pro podmínky českého hlubinného úložiště.

2 Okrajové podmínky pro UOS v hlubinném úložišti VJP

V rámci všech čtyř potenciálních lokalit pro český koncept hlubinného úložiště (HÚ) je umístění plánováno v krystalinickém horninovém prostředí v hloubce **přibližně 500 m pod zemským povrchem**. Detailní geologické a geochemické podmínky finálního úložiště budou dostupné až po dokončení průzkumů všech čtyř lokalit. Navržený koncept počítá s uložením ocelového ukládacího obalového souboru (UOS) v kompaktovaném bentonitu – tzv. bufferu. Bližší popis HÚ a jeho komponent je shrnut v rámci zprávy od Dohnálková et al., (2022).

Prostředí v okolí UOS bude silně ovlivňováno bufferem, a to zejména jeho složením a chováním v daném prostředí. Mezi jeho významné funkce bude patřit mimo jiné zpomalení korozní rychlosti UOS díky omezení kontaktu s vodou a korozi-aktivními látkami horninového prostředí (např. chloridy, sulfidy). Vysoká hustota (**objemová hmotnost sušiny výplně okolo 1600 kg/m³**) bufferu zabraňuje aktivitě mikrobů, a tím mikrobiální korozi UOS (Dohnálková et al., 2022).

Klíčovou veličinou, ovlivňující chemické, fyzikální a biologické děje v blízkosti UOS je teplota. Její průběh v čase vychází ze zbytkového tepelného výkonu VJP po uložení do ukládacích vrtů, z charakteru uspořádání UOS v rámci HÚ (horizontální/vertikální), vzdálenosti (rozteče) jednotlivých vrtů, tepelnou vodivostí hostitelské horniny a v neposlední řadě i na počáteční teplotě v hostitelské hornině. Projekt v současné době vychází z koncepce, která předpokládá že maximální přípustná **teplota na povrchu UOS nepřesáhne 95 °C** (Dohnálková et al., 2022). Tato teplota byla určena s cílem zabránit potenciální alteraci bentonitu při 100 °C. Navzdory tomu v současné době probíhají výzkumné práce, které si kladou za cíl ověření této hypotézy a prozkoumání možnosti ukládání v podmínkách, kdy teplota na povrchu UOS překročí 100 °C¹. V tomto případě by bylo možné zmenšit rozteče mezi vrty, a tím i zmenšit rozlohu HÚ.

Dalším parametrem, který bude v HÚ působit, bude mechanická zátěž. Může se jednat o tlak způsobený hydrostatickým tlakem v hloubce HÚ, tak o tlak bentonitu. Současně zde existuje určitá pravděpodobnost stříhového namáhání daného případným posunem horniny v rámci případné tektonické události. Celkový tlak je tedy součtem bobtnacího tlaku bentonitu, hydrostatického tlaku vody v hloubce HÚ a tlaků indukovaných termální expanzí (Hasal et al., 2019). Bobtnací tlak českého bentonitu pro objemovou hmotnost sušiny 1600 kg/m³ se pohybuje pod 10 MPa (Hausmannová et al., 2018), hydrostatický tlak v hloubce 500 m je okolo 5 MPa a tlaky indukované termální expanzí se pohybují pod 0,5 MPa (Hasal et al., 2019). Aktuální uvažovaná maximální hodnota tlaku působícího na UOS tak činí 15,5 MPa. Pro vlastní mechanické výpočty, byla zvolena konzervativní hodnota maximálního tlaku (návrhový tlak) na UOS, která činí **20 MPa** (Forman et al., 2021).

U střížného napětí dosud nebyly určeny konkrétní hodnoty, jelikož nejsou zatím známa data z konkrétní lokality. Pro předběžné posouzení bylo zvoleno posunutí **50 mm a rychlost 1 m/s ve střížné rovině**, což odpovídá zemětřesení v mezích 7. – 8. stupně Medvěděvovy-Sponheuerovy-Kárníkovy stupnice (MSK-64) (POSIVA a SKB, 2017).

Z pohledu přítomnosti vzduchu, budou v okamžiku krátce po uzavření úložiště panovat v okolí UOS **aerobní podmínky**. Tento časový interval lze z hlediska provozní doby úložiště považovat za velmi krátkou periodu v porovnání s anaerobními podmínkami. Na druhou stranu, z hlediska korozního napadení UOS je nezbytné toto období brát v úvahu. Po uplynutí krátkodobé aerobní fáze, nastane **dlouhodobá anaerobní fáze**, přičemž k úplné saturaci bentonitu by mohlo dojít přibližně za 100 let nebo i více (Landolt, 2009; SKB, 2006).

¹ viz např. práce Lotz et al. (2020), kde byla zkoumána koroze oceli v bentonitu MX80 při 120 °C

Předběžně spočítaný dávkový příkon gama záření na povrchu UOS byl stanoven **na úrovni 0,34 Gy/h**, což je také hodnota, která byla použita i jako vstupní hodnota pro prováděné výpočetní experimenty (Lovecký, 2014).

3 Požadavky pro návrh ukládacího obalového souboru

Požadavky na UOS jsou detailně shrnuty ve zprávě SÚRAO (Pospíšková et al., 2022). V této zprávě jsou popsány bezpečnostní funkce úložiště vyplývající z české legislativy, především z atomového zákona a souvisejících vyhlášek (Příloha 1: Legislativa) i mezinárodních doporučení (např. WENRA, 2014; IAEA, 2011). Bezpečnostní funkce a s nimi spojené následné požadavky na UOS jsou shrnuty v Tab. 1.

V hlubinném úložišti zajišťuje plnění bezpečnostních funkcí celý systém – jak přírodní (hostitelská hornina), tak inženýrské bariéry (UOS, buffer a backfill). Při popisu jednotlivých bariér je nezbytné specifikovat, jak bude daná bariéra přispívat k naplnění požadovaných bezpečnostních funkcí. Na základě toho je možné definovat požadavky pro danou bariéru, a následně proběhne samotný technický návrh bariér. Konkrétní požadavky na UOS, ve spojitosti s bezpečnostními funkcemi, jsou shrnuty v tabulce níže.

Tab. 1 - Požadavky na UOS vztažené k bezpečnostním funkcím HÚ (Pospíšková et al., 2022)

	Bezpečnostní funkce	Požadavek na UOS
1	Fyzikálně znemožnit vznik kritického a nadkritického stavu	UOS musí svým konstrukčním řešením vyloučit vznik kritického stavu (geometrie uspořádání VJP v UOS, rozměry). Viz kapitola 3.2
2	Zajišťovat odvod vytvářeného tepla	Materiálové vlastnosti UOS musí zabránit kumulaci generovaného tepla a negativnímu ovlivnění uloženého VJP a retardačních schopností okolních bariér. Viz kapitola 3.5
3	Zadržet radioaktivní odpad v obalovém souboru	UOS musí odolávat mechanické zátěži v HÚ po definovanou dobu (druh materiálu a jeho mechanické vlastnosti). Viz kapitola 3.4 Korozní odolnost použitých materiálů musí zajistit izolační funkci UOS po definovanou dobu (druh materiálu, jeho chemické vlastnosti, tloušťka stěny). Viz kapitola 3.1 Konstrukční řešení musí omezit možný vznik korozních procesů (jednoduchý design, způsob uzavření). Viz kapitola 4.1
4	Zpomalit migraci radionuklidů od radioaktivního odpadu do životního prostředí	Materiálové řešení UOS musí být kompatibilní s okolním prostředím, aby nedošlo ke snížení účinnosti ostatních bariér.
5	Izolovat odpad od okolního životního prostředí, událostí a procesů probíhajících na povrchu, a podstatně snížit pravděpodobnost a důsledky neúmyslného proniknutí člověka k radioaktivnímu odpadu	<i>Požadavky na tuto funkci jsou pro UOS obdobné jako pro funkci 3.</i>
6	Kontrolovat expozici člověka a životního prostředí	<i>Uvedená funkce je kontrolou zajištění vrcholových bezpečnostních funkcí 1-5.</i>

Požadavky z Tab. 1 jsou detailněji popsány v následujících podkapitolách, kde jsou již uvedeny i konkrétní číselné údaje.

3.1 Životnost

Hlavním účelem HÚ a zejména UOS je zadržení nebezpečných radionuklidů pocházejících z vyhořelého jaderného paliva (VJP). Klíčovým pro bezpečnost je, aby žádný UOS nebyl porušen v době vysoké aktivity štěpných produktů VJP, ale životnost není s touto dobou v jasné korelaci. Tato doba, tj. doba životnosti UOS, se k času psaní této zprávy uvažuje **1 000 000 let** pro program ukládání VJP v České republice. Životnost UOS se hodnotí zejména na základě požadavku, že při očekávaném vývoji hlubinného úložiště nedojde k většímu ozáření reprezentativní osoby, než je dáno dávkovou optimalizační mezí (0,25 mSv za kalendářní rok; zákon č. 263/2016 Sb., par. 82, bod (1)).

3.2 Podkritičnost

Legislativní požadavek SÚJB limitující hodnotu koeficientu násobení je podle § 13 vyhlášky č. 329/2017 Sb., o požadavcích na projekt jaderných zařízení, následující:

"(2) Projekt jaderného zařízení musí v oblasti požadavků na plnění principů bezpečného využívání jaderné energie při manipulaci s čerstvým a ozářeným jaderným palivem a jeho skladování zajistit

f) podkritičnost uskladněného jaderného paliva prostorovým rozmístěním jaderného paliva nebo jinými fyzikálními prostředky a postupy stanovenými při použití konzervativního přístupu tak, aby nedošlo k překročení hodnoty:

- 1. **0.95 efektivního koeficientu násobení neutronů při provozních stavech a předpokládaných podmínkách základní projektové nehody, nebo***
- 2. **0.98 efektivního koeficientu násobení neutronů v podmínkách optimální moderace.**"*

3.3 Stínění

Ukládací obalový soubor je podle české legislativy OS typu D, pro který nejsou stanoveny limity dávkového příkonu a příkonu dávkového ekvivalentu (PDE). Přesto jsou ověřeny 3 limity:

- limit 1 Sv/h na povrchu UOS na rozhraní VO a bentonitu (Werme et al., 2002 a Raiko, 2005), aby nedocházelo k alteraci bentonitu vlivem radiolýzy vody, přičemž momentálně probíhá experimentální ověřování,
- limit 2E-03 Sv/h na povrchu UOS v oblasti víka, přepravní limit PDE podle vyhlášky č. 379/2016 Sb. je zvolen z důvodu manipulace UOS před uložením v HÚ,
- limit 1E-04 Sv/h ve vzdálenosti 2 m od UOS v oblasti víka, přepravní limit PDE podle vyhlášky č. 379/2016 Sb. je zvolen z důvodu manipulace UOS před uložením v HÚ. Konzervativně je vnější povrch dopravního prostředku v přepravním limitu PDE nahrazen povrchem UOS.

3.4 Pevnost – tlak a stříh

Dle okrajových podmínek v HÚ (viz kapitola 2) je zřejmé, že konstrukce UOS musí odolat vnějšímu zatížení – tlaku a stříhu. Pro mechanické výpočty byla zvolena konzervativní hodnota maximálního tlaku (návrhový tlak) na UOS 20 MPa, která musí být v budoucnu přezkoumána (Forman et al., 2021).

3.5 Teplota

Maximální teplota pokrytí palivových elementů paliva typu VVER je 350 °C na základě maxima hodnoty teploty, která nezpůsobuje změnu vlastností materiálu pokrytí (GNS, 2002). Za maximální teplotu prvků komponent vnitřní vestavby UOS lze považovat teplotu tání materiálu OS pro přepravu a skladování CASTOR® 440/84M. Limitní teplota na rozhraní VO a bentonitu byla uvažována 95 °C, viz kapitola 2.

4 Popis referenčního řešení UOS

Dle platné legislativy (vyhl. č. 358/2016 Sb.) se v případě **UOS pro ukládání VJP v České republice jedná o tlakové zařízení**, z tohoto důvodu aktuálně musí obalový soubor splňovat legislativní podmínky i pro tlakové zařízení. V rámci projektu *Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku* (Forman et al., 2021) byla zvolena okrajová kritéria pro konstrukci ukládacího obalového souboru, vycházející z okrajových podmínek (kapitola 2) podle předpokládaných podmínek v prostředí hlubinného úložiště a z požadavků na UOS (kapitola 3). Z jednotlivých výstupů, které vznikly v průběhu projektu, bylo navrženo konstrukční řešení UOS pro vyhořelé jaderné palivo z českých jaderných elektráren (EDU, ETE a plánované 3 NJZ), které zajistí bezpečné uložení VJP po celé požadované období. Na začátku vývoje bylo navrženo celkem 13 variant, které byly posuzovány jak z hlediska materiálů, tak pro různé uspořádání a jejich mechanickou a korozní odolnost. Jednotlivé varianty byly zhodnoceny po bezpečnostní, technické i ekonomické stránce. V rámci projektu docházelo s ohledem na dosažené výsledky a výstupy projektu k redukci počtu uvažovaných variant řešení, až byly vybrány celkem 2 nejvhodnější varianty designů UOS, pro každý typ paliva jedna varianta. Jedna varianta pro rozměrnější palivo reaktoru VVER-1000 a jedna pro subtilnější palivo reaktoru VVER-440. Tyto UOS jsou značeny jako: **UOS 440 a UOS 1000**. Referenční variantou je dvouplášťový systém postavený na korozně odolných vnitřních pouzdrech a ochranném vnějším obalu.

V případě, že UOS bude nevyhovující je také počítáno se záložním technickým řešením, které je založeno na stejném dvouplášťovém principu za použití stejných materiálů, jediný rozdíl je v konstrukčním řešení vnitřního pouzdra. Tato varianta má také vnější obal z uhlíkové oceli a vnitřní pouzdro z korozivzdorné oceli, s vnitřní vestavbou z korozivzdorné oceli pro vložení a zajištění vzájemné polohy palivových souborů (Pospíšková et al., 2022).

4.1 Konstrukční řešení

Konstrukce UOS se skládá z vnějšího obalu, vnitřních pouzder a vestavby, která zajišťuje polohu pouzder uvnitř UOS.

Konstrukční řešení UOS je ve dvou provedeních dle typu VJP, které se z konstrukčního hlediska liší rozměry palivových souborů. Palivový soubor (PS) VVER-1000 (ETE) má délku 4520 mm a průměr 234 mm (Westinghouse Nuclear [online], 2022). PS VVER-440 (EDU) má délku 2601,5 mm a průměr 144 mm (TVEL [online], 2022). Počet palivových šestiúhelníkových souborů v jednom UOS se liší v případě VVER-440 a VVER-1000. UOS byl navržen na základě rozměrů palivových souborů paliva pro ETE, respektive EDU, a také jejich výkonu, respektive teploty, která je na povrchu UOS limitována (viz kapitola 2).

Vnější průměr obou typů UOS byl v rámci vývoje unifikován (Forman et al., 2021). K sjednocení vnějších průměrů bylo přistoupeno s cílem dosáhnout stejných průměrů ukládacích vrtů a tím úspoře provozních nákladů díky unifikaci manipulačních a jiných prostředků, a také možného zjednodušení a zmenšení výdajů pro výrobu. Lze předpokládat, že s sjednocením průměrů VO nedojde jen k hypotetickému zlevnění zařízení HÚ, ale i ke zefektivnění samotné výroby a tím snížení celkových výdajů jako např. dodávaných polotovarů, jelikož pro VO bude poptáván a vyráběn pouze jediný polotovar, který bude pouze dělen na patřičné délky dle příslušné varianty. Je zcela pravděpodobné, že kdyby varianty neměly stejný průměr, stoupla by také cena dodávaných polotovarů.

Zásadním parametrem při návrhu konstrukčního řešení UOS byla tloušťka stěn, která je klíčová při prokazování funkčnosti navrženého konstrukčního řešení (viz kapitola 5).

4.2 Materiály

Hlavním nárokem na budoucí konstrukční materiál, z hlediska dlouhodobé životnosti ukládacích obalových souborů, je jistota predikovatelnosti jeho chování. Proto je nezbytné, aby materiál korodoval z hlediska elektrochemického buď ve stavu tzv. aktivity nebo stabilní pasivity. V aktivním stavu, kdy dochází k rovnoměrné korozi, koroduje z uvažovaných materiálů uhlíková ocel a měď. Stabilní pasivní stav má od počátku expozice (v aerobních podmínkách a za vysoké teploty) z uvažovaných materiálů pouze titan. V případě titanu však nelze v podmínkách HÚ vyloučit, že nedojde k navodíkování (sorpce vodíku) a tvorbě hydridů, což by vedlo ke křehnutí materiálu. Naproti tomu v případě korozivzdorných ocelí je možné očekávat stabilní pasivní stav až v anaerobním prostředí a za nižších teplot (Novák, 2011). Jak naznačují dosavadní, zatím nepublikované výsledky experimentů na korozivzdorné oceli, kritická teplota (mezi 40 až 50 °C) snižuje rovnoměrnost koroze, resp. dojde k lokalizaci koroze tvorbou důlků. Kvůli snížené predikovatelnosti chování korozivzdorné oceli za zvýšené teploty, není korozivzdorná ocel vhodná jako materiál pro vnější obal UOS (v počáteční fázi těsně po uložení UOS do HÚ kdy teplota na povrchu přesahuje požadovanou hodnotu by mohlo docházet na povrchu korozivzdorné oceli k bodové korozi). Na druhou stranu uhlíková ocel koroduje predikovatelně a proto se spolu s mědí jeví jako vhodný materiál pro vnější obal UOS.

Z pohledu celkové korozní rychlosti je chování mědi příznivější než uhlíkové oceli. Ale vezmeme-li v úvahu i lokalizaci napadení, jsou vlastnosti uhlíkové oceli a mědi srovnatelné, přestože v kompaktovaném bentonitu ztrácí lokalizace rychle význam. Na základě výsledků projektu MaCoTe (Dobrev et al., 2021), je maximální penetrace na kolmém řezu pro uhlíkovou ocel a pro měď řádově srovnatelná. Na druhou stranu třeba podotknout, že mezi mědí použitou v experimentech MACOTE a mědí použitou pro mědění UOS (např. ve Finsku a Švédsku) jsou zcela jasné odlišnosti. Z hlediska bezpečnosti se jeví výhodné, postavit životnost UOS nikoliv na jednom, ale na dvou materiálech. Tato skutečnost hrála významnou roli při volbě dvou plášťového řešení. Vnější materiál (uhlíková ocel) aktivně koroduje a umožní přijatelnou předvídatelnost životnosti na počátku uložení. Následně vnitřní materiál (korozivzdorná ocel) již bude korodovat ve stabilně pasivním stavu v anaerobních podmínkách a za teplot pod 40 až 50 °C.

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

- dostupnost materiálu v širokém sortimentu a se širší možnou škálou dodavatelů
- lépe prozkoumané technologie zpracování
- větší množství archeologických analogů, jako jediných skutečně dlouhodobých dat a z nich vycházející větší množina použitelná pro destruktivní analýzy
- cena materiálu/zpracování/výroby

Vnitřní pouzdro UOS se napustí heliem a vnější obal dusíkem (Forman et al., 2021). Jedná se o inertní plyny, které budou také chránit UOS do určité míry před případnou oxidací a tím pádem i korozi. Helium má také vyšší tepelnou vodivost než vzduch, a tak lépe odvede vytvářené teplo.

4.2.1 Vnější obal – uhlíková ocel

Jako materiál pro vnější obal UOS byla vybrána uhlíková ocel, která díky svým specifickým vlastnostem ochrání vnitřní pouzdro po dobu, než budou podmínky v HÚ příznivé pro maximální životnost materiálu vnitřních pouzder.

Materiál vnějšího obalu UOS má přísně definované chemické složení s jasně definovanými limity obsahu nečistot (viz Tab. 2). Dále musí splňovat požadavky na homogenitu mikrostruktury materiálu z hlediska prostorového rozložení jednotlivých fází (Forman et al., 2021).

Ocelí použitou v rámci výzkumného projektu UOS (Etapa 3+) na vnější obal byla **uhlíková ocel S355J2H+N**, jejíž přesné chemické složení je uvedeno v Tab. 2. Výhodou této oceli je minimální obsah karbidotvorných prvků, což omezuje lokalizaci rovnoměrného korozního napadení (bodová koroze) v porovnání s ostatními materiály, které byli v užším výběru vyhodnocování ocelí pro VO UOS.

Tab. 2 - Složení uhlíkové oceli pro výrobu vnějšího obalu UOS (Forman et al., 2021)

Ocel/označení	Obsah prvku [hm. %]												
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	V	Mo	Cu	Ti	W	Al
S355J2H+N dle normy EN 10219-1 (normované složení)	max. 0,22	max. 1,60	max. 0,55	max. 0,030	max. 0,030	-	-	-	-	-	-	-	-
S355J2H+N (skutečné složení)	0,16	1,53	0,2	0,011	0,001	0,05	0,05	0,004	0,01	0,04	0,01	-	0,038

Označení uhlíkové oceli S355J2H+N (1.0576) dle ČSN EN 10219-1:

S – ocel pro konstrukce pro všeobecné použití

355 – minimální mez kluzu v N/mm² (MPa)

J2 – hodnota vrubové houževnatosti (jakostní stupeň)

H – dutý profil (Hollow Section)

+N – normalizačně žíhané

Materiál vnějšího obalu musí dále splnit minimální požadavek na hodnotu meze kluzu 350 MPa. Součinitel tepelné vodivosti pro ocel je 32,2 W/m·K při 176 °C.

4.2.2 Vnitřní pouzdra – korozivzdorná ocel

Pro konstrukci vnitřního pouzdra byla vybrána korozivzdorná ocel. Přednosti této oceli budou maximálně využity po snížení teploty VP UOS pod kritickou hodnotu (40–50 °C), což je při současně známých datech přibližně 10 000 let (Forman et al., 2021). Pod kritickou teplotou se již korozivzdorná ocel nachází ve stavu tzv. elektrochemické pasivity, kdy po etapě predikovaného působení koroze na vnější obal a jeho následném mechanickém kolapsu, zajistí plnění bezpečnostních funkcí VP po celé definované období.

Jako nejvhodnější materiály v rámci výzkumu a vývoje (Forman et al., 2021) byly vytipovány a porovnány dva typy korozivzdorných ocelí – dvoufázová ocel EN 1.4462 a austenitická ocel EN 1.4404.

Dvoufázová ocel EN 1.4462 byla vybrána pro její vyšší obsah Cr a Mo, které lépe přispívají ke korozní odolnosti. Dále byla zvolena austenitická ocel EN 1.4404 vykazující též vysokou korozivzdornost.

Přestože má dvoufázová ocel EN 1.4462 vyšší obsah Cr a Mo, byla pozorovaná náchylnost obou ocelí k bodové korozi v podmínkách HÚ přibližně stejná (Stoulil et al., 2019). Kvůli náchylnosti dvoufázové oceli k navodíkování, a s tím spojené ztrátě mechanické odolnosti, se ukázala **austenitická ocel EN 1.4404** (viz Tab. 3) jako výhodnější, protože je vůči navodíkování imunní (Forman et al., 2021).

Tab. 3 - Složení austenitické oceli pro výrobu vnitřního pouzdra UOS podle ČSN

Ocel/označení	Obsah prvku [hm. %]												
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	V	Mo	Cu	Ti	W	N
1.4404 dle normy EN 10297-2 (normované složení)	0,030	2,00	1,00	0,045	0,015	max 18,5	max 14,5	-	max 2,5	-	-	-	0,11

4.2.3 Vestavba – korozivzdorná ocel

Pro vnitřní vestavbu UOS je plánováno využití stejného typu oceli jako v případě vnitřní pouzdra, tedy korozivzdorné austenitické oceli **EN 1.4404** (viz Tab. 3).

4.2.4 Tloušťka stěn VO a VP

Při stanovení tloušťky stěny UOS byla určena nejprve vhodná tloušťka použitých materiálů s ohledem na mechanickou stabilitu v podmínkách HÚ, k níž byl přidán tzv. korozní přírůstek. Tento proces lze také popsat tak, že tloušťka stěn jak VO, tak VP byla stanovena tak, aby i po odkorodování určité části byly obě části mechanicky stabilní při působení mechanického zatížení. Tloušťka korozní vrstvy v 3D modelu (Tab. 4) byla stanovena na 15 mm pro uhlíkovou ocel a 5 mm pro korozivzdornou ocel (Forman et al., 2021). **Tloušťka stěny VO je pro obě varianty 65 mm a tloušťka stěny VP pro VVER-440 je 36 mm a pro VVER-1000 40 mm.** Rozdíl tloušťky stěny u VP pro různé palivo je způsobeno jinou velikostí palivového souboru zejména jejím průměrem, tím pádem i jinými mechanickými vlastnostmi a ideálním rozvržením uvnitř UOS.

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.

4.2.5 Konstrukční řešení UOS pro palivo reaktoru VVER-440 (Dukovany)

Obalový soubor pro VJP z reaktorů typu VVER-440 je určen pro sedm palivových souborů. Skládá se z vnějšího obalu (VO), vnitřních pouzder (VP) a vnitřní vestavby. Průměr UOS je 914 mm a délka 3790 mm, viz Obr. 1 a Obr. 2.

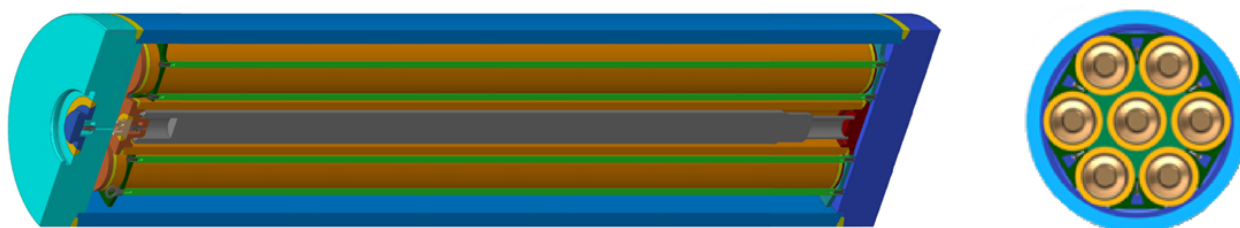
VO je tvořen válcovou částí s přivařeným dnem a víkem. Tloušťka válcové části je 65 mm, víka 200 mm a dna 200 mm. Víko je navíc vybaveno rychlospojkou, která je překryta zátkou VO, přivařenou k víku UOS. Rychlospojka slouží k řízení plynného prostředí v prostoru UOS, resp. VO. Prostor uvnitř vnějšího obalu je vyplněn dusíkem (0,15 MPa).

VP je tvořeno stejně jako VO válcovou částí, ke které je přivařeno dno a víko VP. Tloušťka válcové části je 36 mm, víka 130 mm a dna 75 mm. Víko je stejně jako u VO vybaveno rychlospojkou,

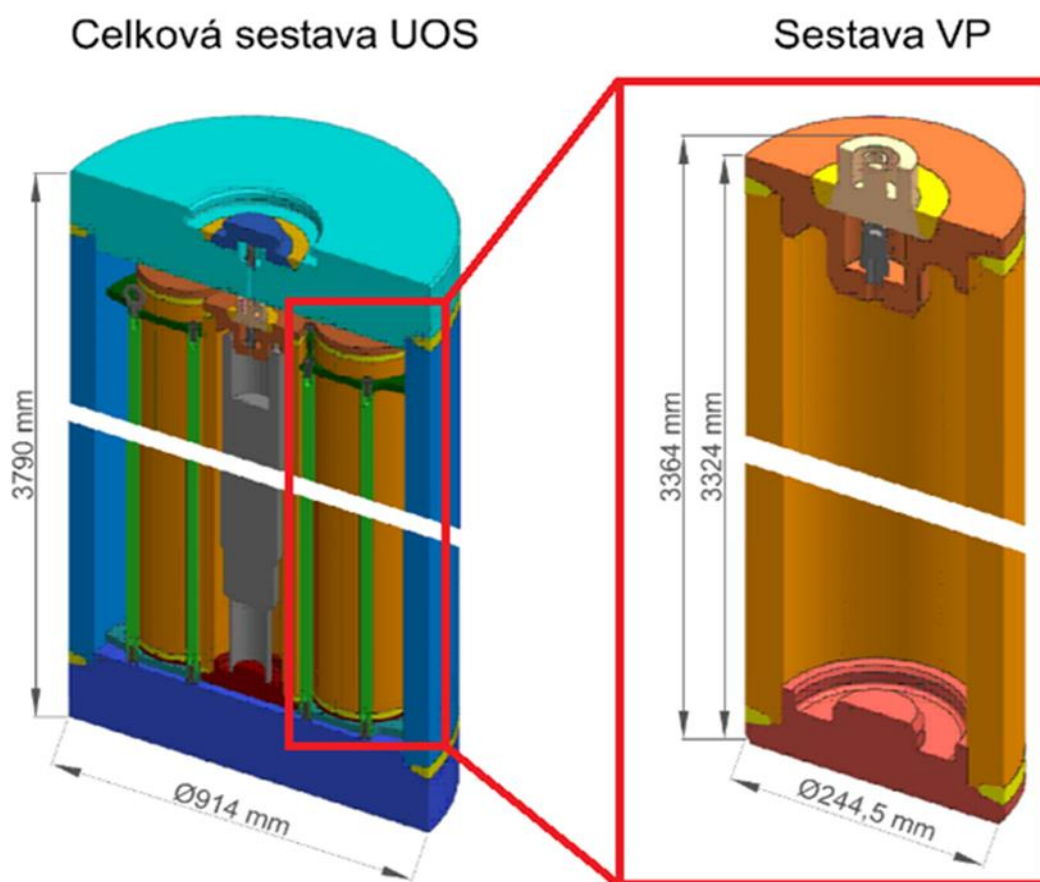
která je překryta zátkou VP, přivařenou k víku VP. Délka VP je 3364 mm, viz Obr. 2. Prostor vnitřního pouzdra je vyplněn heliem (0,1 MPa).

Uvnitř UOS 440 je vestavba, která zajišťuje fixaci VP a jejich rozložení v požadované geometrii, a nemá korozní ani pevnostní funkci.

Zmenšený výkres této sestavy UOS je v Příloha 4: Výkres sestavy UOS pro sedm souborů paliva VVER-440 a 3D vizualizace je zobrazena na Obr. 2. V rámci vývojového projektu UOS byl zhotoven i reálný model UOS blízky prototypu. Výroba je popsána ve zprávě od Forman a Picek (2021). Fyzický model byl vyroben kratší a s vyříznutým otvorem, a to z důvodu jeho lepší vizuální názornost (viz Obr. 3). Jednotlivé díly UOS pro VVER-440 i s jejich rozměry, typem slitiny a normy jsou uvedeny níže (viz Příloha 2: Kusovník UOS 440).



Obr. 1 - Vizualizace sestavy UOS pro palivo VVER-440 (celková délka UOS – 3790 mm; celkový průměr UOS – 914 mm)



Obr. 2 - Detailní vizualizace sestavy UOS pro palivo VVER-440



Obr. 3 - Vlevo: Fyzický model UOS pro VVER-440, vpravo: detail vnitřního prostoru UOS s vnitřními pouzdry a palivovým souborem

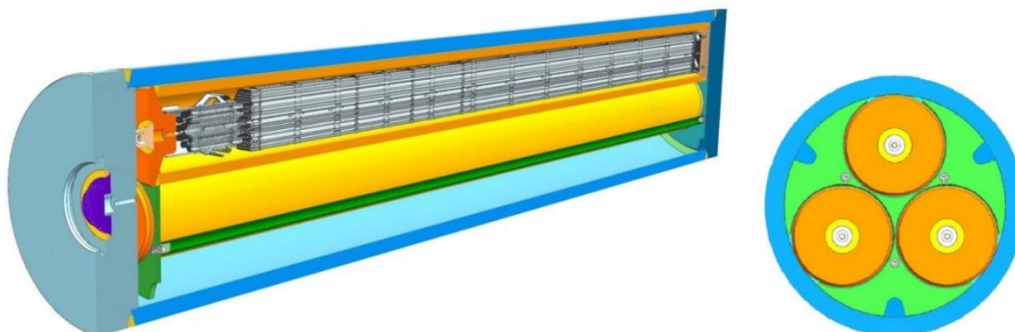
4.2.6 Konstrukční řešení UOS pro palivo reaktoru VVER-1000 (Temelín)

Obalový soubor pro VJP z reaktorů typu VVER-1000 je určen pro tři palivové soubory. Skládá se z vnějšího obalu (VO), vnitřních pouzder (VP) a vnitřní vestavby. Průměr UOS je 914 mm a délka 5205 mm (viz Obr. 4). Návrh sestavy UOS pro palivo typu VVER-1000 je zobrazen na Obr. 4 a zmenšený výkres této sestavy viz Příloha 3: Výkres sestavy UOS pro tři soubory paliva VVER-1000 této zprávy.

VO je tvořen válcovou částí s přivařeným dnem a víkem. Tloušťka válcové části je 65 mm, víka 200 mm a dna 200 mm. Víko je navíc vybaveno rychlospojkou, která je překryta zátkou VO, přivařenou k víku UOS. Prostor uvnitř vnějšího pláště je vyplněn dusíkem (0,15 MPa).

VP je tvořeno stejně jako VO válcovou částí, ke které je přivařeno dno a víko VP. Tloušťka válcové části je 40 mm, víka 140 mm a dna 75 mm. Víko je stejně jako u VO vybaveno rychlospojkou, která je překryta zátkou VP, přivařenou k víku VP. Délka VP je 4779 mm. Prostor vnitřního pouzdra je vyplněn heliem (0,1 MPa).

Uvnitř UOS 1000 je vestavba, která zajišťuje fixaci VP a jejich rozložení v požadované geometrii, a nemá korozní ani pevnostní funkci.



Obr. 4 - Vizualizace sestavy UOS pro palivo VVER-1000 (celková délka UOS – 5205 mm; celkový průměr UOS – 914 mm)

4.3 Technologie výroby UOS

Technologie výroby UOS 440 a UOS 1000 musí být dobře prostudována, finančně přijatelná, dosahovat nejvyšší možné bezpečnosti a odzkoušená. Aktuální stav technologie výroby pro vnější a vnitřní obal a metody svařování jednotlivých komponentů UOS vyplynuly v rámci projektu *Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva* (Forman et al., 2021) a jsou popsány v následujících kapitolách.

4.3.1 Výroba vnějšího obalu

Materiál VO je v rámci referenčního řešení navržen z uhlíkové oceli S355J2H+N. Obal se bude skládat z těla, dna a víka, dohromady svařenými obvodovým svarem. Polotovarem pro tělo VO je uvažována ideálně bezešvá normalizačně žíhaná trubka o vnějším průměru 914 mm, tloušťce stěny trubky 65 mm (vnitřní průměr 784 mm) a o celkové délce 12000 mm (Forman et al., 2021).

Z pohledu technologie výroby polotovaru, se pro zhotovení tělesa VO uvažuje primárně o využití bezešvé ocelové trubky z jemnozrnné oceli pro tlakové účely vycházejících z požadavků normy EN 10216-3 a z ní vycházejícího označení. Materiálový stav, ve kterém je uvažováno dodání je stav normalizačně žíhaný. Variantně lze uvažovat také o polotovaru dodávaném ve formě svařovaného dutého profilu, případně ve formě výkovku.

Materiál dna a víka byl navržen ze stejného typu oceli jako v případě VO. Oba díly byly navrženy z normalizačně žíhané uhlíkové oceli (S355J2H²) a v rámci realizace demonstračního modelu UOS bylo ověřeno zavaření vnějšího obalu, dna a víka.

Materiálová specifikace pro zhotovení dna a víka VO bude primárně vycházet z požadavků na ocelové výkovky pro tlakové účely ze svařitelné jemnozrnné oceli s vyšší mezí kluzu ve stavu normalizačně žíhaném. Variantně je možné uvažovat i o za tepla válcovaném plechu v normalizačně žíhaném stavu, případně o jiné variantě plnící všechny materiálové a korozní požadavky.

² V případě materiálu dna a víka nebyl přesný požadavek na normalizační vyžehání oceli, v tomto stádiu vývoje tedy je materiál záměnný za S355J2H+N.

4.3.2 Výroba vnitřního pouzdra

VP budou vyráběna z korozivzdorné oceli EN 1.4404. Formálně lze pouzdro také rozdělit na tělo, dno a víko. V případě UOS 440 je tělo VP zhotoveno z bezešvé trubky o vnějším průměru 244,5 mm a o tloušťce stěny 36 mm (vnitřní průměr 172,5 mm). V případě UOS 1000 je typ polotovaru shodný, také se jedná o bezešvou trubku lišící se pouze v tloušťce stěny 40 mm a vnějším (355,6 mm) a vnitřním (283,6 mm) průměru. Vzájemné spojení jednotlivých dílů bude zajišťovat obvodový svar.

V případě těla vnitřního pouzdra bude materiálová specifikace zohledňovat požadavky norem pro bezešvé ocelové trubky pro tlakové nádoby. Dno a víko bude vycházet z požadavků na tyče z korozivzdorné oceli pro tlakové účely. V obou případech (tělo, resp. víko/dno) projde procesem rozpouštěcího žhání.

4.3.3 Svařování

Pro účely svařování byla úspěšně využita metoda **s netavnou wolframovou elektrodou svařování (tzv. metoda 141)**. Tato metoda byla vybrána s ohledem na její **vhodnost pro automatizované svařování** (Forman et al., 2021), které bude v budoucnu nezbytné pro zajištění svařování v horké komoře. Principem této metody svařování je hořící elektrický oblouk mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Jako ochranné plyny se používají argon, helium nebo jejich směsi. Netavící se elektroda se nejčastěji vyrábí z čistého wolframu

V technické zprávě Malina et al., (2017) je uvedeno, že musí dojít k ověření možnosti aplikace úzko mezerového 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 následující pokračování vývoje takové technologie by bylo zcela nad rámec dosavadního projektu a vyžadovalo by projekt zcela separátní, zaměřený pouze na vývoj úzko mezerového U svaru. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto o použití v praxi běžně používaného V svaru, neboť tato technologie je zcela osvojena a technologie úzko mezerového U svaru pro použití na UOS byla opouštěna. Tato změna nebude mít na funkci ani bezpečnost UOS vliv.

4.4 Kontrola, značení a manipulace s obalovým souborem

Kontrola svarů se bude provádět v horké komoře automatizovanou analýzou zbytkových napětí v oblastech svarů a těsnosti VP a VO standardními metodami (např. metody využívající ultrazvuk nebo rentgen).

Po vlastním uzavření VJP do UOS a před samotným uložením UOS do HÚ bude docházet k manipulačním operacím s UOS, v rámci činností nezbytných k zavezení UOS na definovanou pozici v ukládacích chodbách HÚ. Jednou z variant je, že pro tyto manipulace bude UOS vybaven manipulačními prvky (úchytky, kotvy apod.), které zajistí efektivní, bezpečný a nedestruktivní průběh těchto operací. Současné referenční řešení tyto manipulační prvky neobsahuje, a bude na posouzení z hlediska výzkumu a vývoje manipulace, jestli budou manipulační prvky pro UOS potřebné.

Dále se uvažuje se zajištěním systému předcházení vzniku defektů vlivem manipulačních operací dle příslušných požadavků na technologii výroby a zpracování UOS, aby nedošlo ke snížení požadované životnosti, nebo k zanesení systematické nejistoty do predikovatelnosti životnosti. Pro zajištění maximální míry bezpečnosti je nutné zdroje všech možných defektů eliminovat.

Pro účely evidence UOS vyplývající z legislativy bude zaveden i systém značení UOS. Značení UOS musí být provedeno takovým způsobem, aby naplňovalo legislativní požadavky vyplývající zejména z vyhlášky č. 377/2016 Sb., tj. aby trvanlivost tohoto značení byla dostatečná po celou dobu nutnou pro evidenci a kontrolu stavu UOS před uzavřením HÚ, ale současně, aby nebyly ohroženy bezpečnostní funkce UOS.

5 Výpočty prokazující funkčnost navrženého referenčního řešení UOS

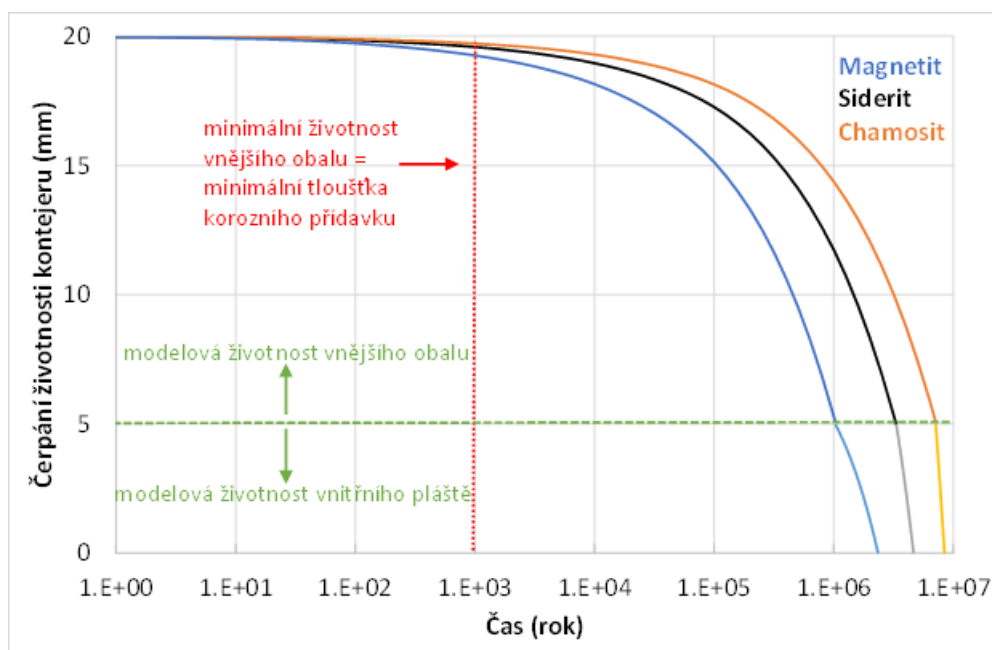
Nezbytným krokem, předcházejícím budoucí realizaci navrženého UOS, je prokázání jeho funkčnosti v rámci definovaných parametrů. Soubor požadavků na UOS, musí být nejprve výpočetně ověřen za pomoci ověřených výpočetních modelů. V rámci projektu *Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva* (Forman et al., 2021) byly nejprve identifikovány klíčové parametry mající zásadní vliv na bezpečnost a životnost navrženého řešení a následně bylo výpočetně ověřeno, že navržený řešení UOS těmto požadavkům vyhovuje. Dosavadní výpočetní a vývojové práce (Kotnour et al., 2016) ukazují, že navrhovaný UOS všechny identifikované parametry plní a z pohledu budoucí požadované funkce se jeví jako vyhovující.

5.1 Životnost

Pro výpočet životnosti UOS byl využit korozně transportní 3D model s proměnnou geometrií. U výpočtů dlouhodobé životnosti bylo nutné do výpočetního modelu zahrnout i precipitaci korozních produktů v pórovém systému kompaktovaného bentonitu, přispívající k omezení difuze kationtů železa. Kromě fitování experimentálních dat spojených se vznikem sideritu, lze v rámci výpočetního modelu simulovat i vznik alternativních korozních produktů, jako je magnetit (vyskytující se jako hlavní korozní produkt u archeologických analogů) nebo jako jsou hlinito-křemičitany, které přicházejí v úvahu pro dlouhodobé uložení, přestože nebyly experimentálně jednoznačně prokázány. Výsledky výpočetních modelů jsou znázorněny číselně v Tab. 4 a graficky na Obr. 5. Při výpočtech životnosti UOS se v rámci návrhu uvažuje s odkorodováním korozního přídavek, který činí v případě uhlíkové oceli 15 mm a v případě korozivzdorné oceli 5 mm.

Tab. 4 - Životnosti UOS při uvažování různých korozních produktů v 3D modelu (Forman et al., 2021)

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
siderit	3 320 423	1 315 789	4 636 212
chamosit	7 098 938	1 315 789	8 414 727



Obr. 5 - Vyčerpání životnosti UOS při uvažování různých korozních produktů uhlíkové oceli (Forman et al., 2021)

5.2 Podkritičnost

Požadavky na podkritičnost jsou dány příslušnou legislativou, viz kapitola 3.2. Vypočtená limitní hodnota koeficientu násobení neutronů musí být menší než 0.95. Tato hodnota je složena z konzervativní hodnoty koeficientu násobení a neurčitosti (dané např. výpočetním modelem, použitou metodou řešení, použitou knihovnou dat účinných průřezů, kolísáním obohacení paliva, výrobní neurčitostí atd.).

Výpočet podkritičnosti **byl doposud proveden pouze pro UOS s palivem z VVER-440**. Vstupní parametry byly voleny velmi konzervativně, a to pro čerstvé palivo s maximálním obohacením 5.0 hm. % U-235, bez vyhořívajícího absorbátoru, navíc za havarijních podmínek zaplavení UOS vodou (Lovecký, 2020a). Jako moderátor je uvažována čistá voda uvnitř UOS i vně UOS, bentonit a žulový masiv jsou konzervativně nahrazeny moderátorem. Vše je detailně popsáno ve zprávě Lovecký (2020a).

Z výpočtů vychází, že limitní hodnota koeficientu násobení je 0.71675, **tato hodnota splňuje legislativní limit 0.95 s výraznou rezervou 0.23**.

V rámci budoucích prací bude nezbytné doplnit výpočty UOS pro palivo z VVER-1000.

5.3 Výpočty stínění

Požadavky na stínění UOS vycházejí z požadavků na bezpečnost zejména pracovníků při provozu. Byly ověřeny 3 limity příkonu dávkového ekvivalentu (PDE), které jsou blíže popsány v kapitole 3.3.

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

Cílem výzkumu bylo určení příkonu dávkového ekvivalentu na povrchu UOS a v jeho okolí v čase uložení UOS do HÚ. Výpočet je důležitý zejména kvůli činnostem v rámci transportu a manipulacemi v HÚ.

Dle výpočtů, lze shrnout, že stínění je pro oba typy UOS dosaženo s výraznou rezervou. V Tab. 5 jsou pro názornost uvedena procenta, z nichž je daný limit čerpán.

Tab. 5 - Vypočtené hodnoty dávkového příkonu a PDE v 3 různých vzdálenostech od paliva, včetně definovaných limitů

Limity dávkového příkonu a PDE	PDE palivo VVER-440		PDE palivo VVER-1000	
	Sv/h	Limit čerpání [%]	Sv/h	Limit čerpání [%]
1 Sv/h na povrchu UOS na rozhraní obálka-bentonit, aby ke změnám bentonitu nedošlo	2,70E-01	27,0	2,30E-01	23,0
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	1,64E-05	0,8	4,74E-05	2,4
1E-04 Sv/h ve vzdálenosti 2 m od UOS v oblasti víka, přepravní limit PDE podle Vyhlášky č. 379/2016 Sb. volen z důvodu manipulace UOS před uložením v HÚ	1,49E-06	1,5	2,14E-06	2,1

5.4 Pevnostní výpočty

Pevnostní výpočet patří ke klíčovým výpočtům, neboť dohromady s korozními modely je zásadním podkladem pro stanovení tloušťky VO a VP. Celý pevnostní výpočet je blíže 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 rámci konstrukce UOS dosahují podlimitní hodnoty. Tím přirozeně dojde k tomu, že střední hodnota napjatostí má dostatečnou rezervu vůči limitní hodnotě.

Metodika pevnostního vyhodnocení obou variant UOS 440 a UOS 1000, 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 VO a 5 mm VP. To znamená, že se UOS nachází na konci své projektové životnosti a prokazujeme, že stále konstrukčně odolá vnějším zatížením uvažovaným při uložení v HÚ. Z tohoto důvodu lze konstatovat, že se již nejedná o návrhový počáteční stav, ale o stav, kdy jsou již mechanické vlastnosti materiálu plně využívány. Z tohoto důvodu je k hodnocení UOS přistoupeno stejně jako při hodnocení konstrukce UOS při havarijních provozních podmínkách. Z tohoto hlediska 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. 6 a Tab. 7). Metodicky uvažujeme, že svar má stejné nebo lepší mechanické vlastnosti než základní materiál. To dokládají provedená experimentální měření mechanických vlastností (Jeník, 2020). Z tohoto důvodu je pro hodnocení svaru použit limit základního materiálu. Stanovený limit pro svar a tepelně ovlivněnou oblast převyšuje řádově o 20 % limit pro základní materiál.

Při pevnostních výpočtech byly simulovány různé zatěžovací stavy, které jsou společně s dosaženými výsledky, popsány níže.

5.4.1 Rovnoměrný tlak 20 MPa

Prvním stavem, který byl ve výpočtech simulován, byl rovnoměrný tlak 20 MPa (viz kapitola 3.4) na VO a VP. Výsledné hodnoty jsou popsány níže pro každý typ UOS zvlášť:

UOS 440

- střední hodnoty napjatosti na tělo VO a VP činí 219 MPa (VO), resp. 100 MPa (VP)
- špičkové hodnoty napjatosti **372 MPa (VO)** jsou dosahovány v místech dotyku válcového pláště se dnem a víkem, resp. **194 MPa (VP)** v oblasti kořene svaru, a to jak u víka, tak u dna VP
- samotné víko včetně zátky a dno rovněž vykazují napjatosti do 218 MPa (VO).

UOS 1000

- střední hodnoty napjatosti na tělo VO a VP dosahují 242 MPa (VO), resp. 100 MPa (VP)
- špičkové hodnoty napjatosti **413 MPa (VO)**, jsou dosahovány v místech dotyku válcového pláště se dnem a víkem, resp. **195 MPa (VP)**. Tyto hodnoty byly zjištěny v rámci simulačního modelu v oblasti kořene svaru, a to jak u víka, tak u dna VP
- samotné víko (a to i včetně zátky) a dno rovněž vykazují napjatosti do 250 MPa.

Pro vyhodnocení byly porovnány špičkové hodnoty s limitními hodnotami dle KTA (již sníženými o bezpečnostní rezervu), toto porovnání je uvedeno v Tab. 6. Všechny výsledné hodnoty se nachází bezpečně pod stanovenými limitními hodnotami.

Tab. 6 - Materiálové limitní hodnoty napětí stanovené dle KTA 3201.2 a jejich porovnání s vypočtenými špičkovými hodnotami při rovnoměrném zatížení tlakem

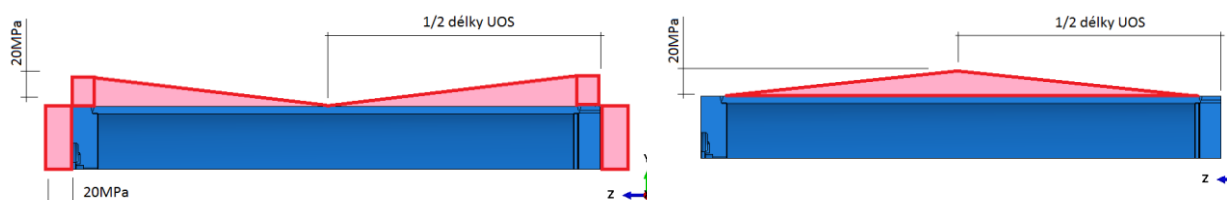
Materiál	R _m [MPa]	Limit dle KTA R _m / 1,1 [MPa]	Špičkové hodnoty pro UOS 440 [MPa]	Špičkové hodnoty pro UOS 1000 [MPa]
VO S355J2H	470	427	372	413
VP 1.4404	490	445	194	195

*R_m – Mez pevnosti

5.4.2 Nerovnoměrný tlak

Tato kapitola je zaměřena na nerovnoměrné rozložení návrhového tlaku po celé délce UOS. Zatížení UOS vlivem nerovnoměrného bobtnacího tlaku bentonitu, by mohlo vést k lokálnímu ohybovému zatížení UOS.

Výpočet se zaměřuje na dva mezní stavy. První varianta (viz varianta 1 na Obr. 6) popisuje namáhání UOS rotačně symetrickou okrajovou podmínkou, kdy je uvažováno zatížení víka a dna VO vnějším přetlakem 20 MPa. V osové směru UOS tento tlak klesá a v polovině délky UOS je nulový. Od poloviny délky zatížení opět lineárně roste, až do hodnoty 20 MPa, které je dosaženo na opačném konci UOS. Jako druhá mezní varianta byla zvolena situace (viz varianta 2 na Obr. 6), kdy v polovině délky VO UOS dochází k působení 20 MPa.



Obr. 6 - Rotačně symetrické okrajové podmínky nerovnoměrně rozloženého vnějšího návrhového tlaku na VO pro obě varianty UOS, vlevo varianta 1, vpravo varianta 2 (Forman et al., 2021)

Výsledné vypočtené hodnoty napětí (špičkového = maximálního), ověřené pro obě zatěžovací varianty jsou znázorněny v Tab. 7, společně s limitními hodnotami. Při porovnání výsledných a limitních hodnot je zřejmé, že oba typy UOS jsou dostatečně odolné vůči výše popsaným nerovnoměrným zatížením od návrhového tlaku.

Tab. 7 - Materiálové limitní hodnoty napětí stanovené dle KTA 3201.2 a jejich porovnání s vypočtenými špičkovými hodnotami při nerovnoměrném zatížení tlakem 20 MPa

Materiál	R_m [MPa]	Limit dle KTA $R_m / 1,1$ [MPa]	VAR. 1- Špičkové hodnoty pro UOS 440 [MPa]	VAR. 2- Špičkové hodnoty pro UOS 440 [MPa]	VAR. 1- Špičkové hodnoty pro UOS 1000 [MPa]	VAR. 2- Špičkové hodnoty pro UOS 1000 [MPa]
VO S355J2H	470	427	376	180	387	183

* R_m – Mez pevnosti

Pevnostní výpočet pro VP bude součástí navazujících prací.

5.4.3 Střížné namáhání

Požadavek na odolnost vůči střížnému tlaku je uvedeno v kapitole 3.4. Střížné tlaky vznikají jako důsledek seismické události a jsou definovány posuvem a rychlostí ve střížné rovině. Výpočet byl proveden pro obě varianty UOS 440 a UOS 1000.

Výpočet MKP (Metody konečných prvků) mechanické odolnosti UOS vůči střížným tlakům (Lopaur, 2020) byl proveden při uvažovaném posunutí skalního masivu o 50 mm se smykovou (střížnou) rovinou kolmou na osu UOS v polovině jeho výšky (což odpovídá nejhorší možné variantě). Kontrola celistvosti byla provedena na základě vyhodnocení kritického místa, kterým byla oblast přivaření víka UOS, a to pomocí skupin kategorií napětí pro seismické zatížení dle Normativně technické dokumentace Asociace strojních inženýrů (NTD A.S.I.). Pro vlastní FEM (Metoda konečných prvků, z anglického Finite Element Method) model byla použita nejhorší varianta (materiál bentonitu M1, přičemž vlastnosti bentonitu M1 jsou popsány ve Forman et al., (2021) a modelovaná trhлина, a to jak pro variantu UOS 440 tak UOS 1000 (Tab. 8)). Kontrola výpočtu byla alternativně provedena také dle KTA 3201.2 (Tab. 9). V hladké části těla VO UOS dochází k překročení meze kluzu. Tato skutečnost, ale nemá dopad na narušení celistvosti UOS. Dojde pouze k jeho dílčí plastické deformaci, celková těsnost UOS tak zůstává zajištěna.

Výpočetně tak byla prokázána seismická odolnost 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 navázán s konkrétní lokalitou umístění hlubinného úložiště a výpočet odolnosti VP.

Tab. 8 – Vyhodnocení dle skupin kategorií napětí řezu v místě přivaření víka VO UOS

Redukované napětí			Limit	
Skupina kategorie	UOS 440 [MPa]	UOS 1000 [MPa]	-	[MPa]
$(\sigma_s)_1$	136,3	127,6	1,4 $[\sigma]$	253,1
$(\sigma_s)_2$	324,1	307,5	1,8 $[\sigma]$	325,4
$(\sigma_s)_2$	215,0	205,6		

Tab. 9 - Vyhodnocení stříhu dle KTA 3201.2

UOS varianta	σ_{red} [MPa]	Limit [MPa]
UOS 440	325,4	427
UOS 1000	307,5	427

5.5 Teplotechnické výpočty

Zpráva Šik (2020) obsahuje výsledky teplotních analýz UOS 440 a UOS 1000 v okamžiku po zavezení do hlubinného úložiště. Účelem analýz bylo teplotní ověření navrženého konstrukčního řešení UOS s cílem ověřit, že nedojde k překročení limitní teploty 95 °C uvedené v kapitole 3.5.

Teplota v UOS a jeho okolí je přímo závislá na zbytkovém výkonu jaderného paliva. Ten byl stanoven v Lovecký (2015a), a Lovecký (2015b) v rozmezí 0 - 1 milion let (nulu představuje zavezení UOS do HÚ, tj. 65 let po konci ozařování v reaktoru). V případě ukládání UOS 440 je za limitní hodnotu považován výkon 655 W, pro UOS 1000 1125 W (Pospíšková et al., 2022). Uvedené hodnoty tedy odpovídají výkonům uvažovaným při teplotním dimenzování HÚ podle zprávy Kobyłka (2019). Pro vlastní tepelný výpočet UOS byly nicméně převzaty konzervativnější hodnoty pro zbytkový výkon, pro PS VVER-440 138,140 W (**UOS 440 = 7*138,140 = 966,98 W**) a pro PS VVER-1000 450,758 W (**UOS 1000 = 3*450,758 = 1352,274 W**) (Kobyłka, 2019).

Koncept uvažovaný v rámci výpočtu:

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 vrtu zavést. Tyto údaje byly zvolené pro možnost provedení vlastního výpočtu, nicméně v budoucnu musí být tato skutečnost ještě předmětem dalších zkoumání.

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. Byly vypočteny teploty na jednotlivých komponent UOS, kterých dosáhne právě při dosažení teploty bentonitu 95 °C, jsou shrnuty v Tab. 10.

Tab. 10 - Vypočtené maximální teploty komponent UOS

Komponent	Maximální teplota [°C] UOS 440	Maximální teplota [°C] UOS 1000
pokrytí palivových elementů	174,1	193,0
vnitřní pouzdro	162,4	177,4
vnější obal	108,6	110,4

Tepelným výpočtem bylo prokázáno, že konstrukce UOS 440 a UOS 1000 splňuje podmínky pro dodržení limitních teplot pokrytí paliva i komponent UOS za předpokladu, že do HÚ je vkládáno nepoškozené palivo, které bylo skladováno 65 let v meziskladu vyhořelého jaderného paliva od konce ozařování v reaktoru, se zbytkovými výkony uvedenými výše. Tepelná vodivost uvažované vzduchové mezery (0,01 m) by měla také zajistit nepřekročení teploty bentonitu nad 95 °C.

Závěr

Tato zpráva prezentuje výsledky SÚRAO, které byly získány zejména v rámci projektu *Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stádia realizace vzorku* (Forman et al., 2021). Ve zprávě bylo představeno referenční řešení ukládacích obalových souborů (UOS) pro vyhořelé jaderné palivo (VJP) na území České republiky. Byl navržen unikátní typ UOS, u kterého vnější obal (VO) i vnitřní pouzdra (VP) plní funkci korozní i mechanické odolnosti. Každá část UOS je tedy schopna poskytovat maximální odolnost a plnění bezpečnostních funkcí v jiné fázi uložení. Oba materiály, uhlíková ocel (S355J2H+N) i austenitická korozivzdorná ocel (EN 1.4404), jsou známé a snadno dostupné. Životnost VO z uhlíkové oceli s korozním přídatkem 15 mm bude dle dosavadních experimentů s bezpečnou rezervou dostatečná pro eliminaci nejistot pro správnou funkci VP. Eliminací nejistot je spotřeba kyslíku v HÚ a pokles teploty pod 50 °C. Celková životnost UOS dle všech zvažovaných korozních modelů byla ověřena nejen pro překonání doby 100 000 let, ale předběžně napočítána i na dobu 1 000 000 let. V budoucích fázích vývoje UOS v ČR bude na základě rozsáhlejších dat z dalších experimentů ověřována životnost 1 000 000 let.

U obou materiálů použitých pro konstrukci UOS jsou také dobře rozvinuté technologie zpracování, zejména pak svařování. Referenční řešení, které uvažuje pro každý palivový soubor vlastní VP, má jako hlavní výhodu velmi snadnou manipulovatelnost v horké komoře. Ze třinácti kandidátních konstrukčních variant byly vybrány dvě varianty UOS pro ukládání paliva typu VVER-440 a VVER-1000. UOS 440 pojme sedm palivových souborů paliva VVER-440 a UOS 1000 pojme tři palivové soubory paliva VVER-1000. Tyto dvě varianty mají sjednocený vnější průměr, přičemž tato vlastnost by do budoucna mohla přinést ušetření nákladů na polotovary na výrobu UOS. Konstrukční řešení byla výpočetně ověřena pomocí pevnostních výpočtů, teplotních výpočtů, výpočtů podkritičnosti, výpočtů stínění a výpočtů stříhu (seismicita). Tyto výpočty byly prováděny v několika iteracích, vždy spolu s konstrukční změnou tak, aby bylo dosaženo optimálních výsledků konstrukce. Na teplotní výpočty v současnosti navazuje dotační projekt Technologické agentury ČR Optimalizace roztečí a předběžný teplotní výpočet hlubinného úložiště vyhořelého jaderného paliva (TA ČR ORTEV), jehož cílem bylo vyvinout software umožňující další optimalizaci, zejména optimalizaci kapacity HÚ z pohledu vývinu tepla tak, aby stále byla zachována maximální možná bezpečnost HÚ.

6 Reference

- DOBREV D., MENDOZA MIRANDA A.N., STEINOVÁ J., BURKATOVÁ K., ZUNA M. (2021): Korozní zkouška v přírodním granitoidním prostředí. SÚRAO, TZ 194/2017, Praha.
- DOHNÁLKOVÁ M., VONDROVIC L., HAUSMANNOVÁ L. (2022): Technické řešení hlubinného úložiště 2022. – MS SÚRAO, TZ 580/2022, Praha.
- FORMAN L., PICEK M., DOBREV D., GONDOLLI J., MENDOZA MIRANDA A.N., STRAKA M., KOUŘIL M., STOULIL J., MATAL O., ČERMÁK J., KRÁL L., ŽALOUDEK J., VÁVRA M., ČUPR M. (2021): Závěrečná technická zpráva výzkumné části projektu: Výzkum a vývoj ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva do stadia realizace vzorku. ZZ 544/2021, Praha.
- FORMAN L., PICEK M. (2021): PRŮBĚŽNÁ TECHNICKÁ ZPRÁVA 4. ETAPA Výroba vzorku UOS. TZ 568/2021, Praha.
- GINCELOVÁ K. (2020): Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Výpočet stínění pro palivo VVER-1000. Zpráva ŠKODA JS a.s. Ae 15994/Dok Rev. 3, SÚRAO, TZ 507/2020 Plzeň.
- GNS (2002): Bezpečnostní zpráva pro typové schválení – sklad. Obalový soubor pro přepravu a skladování CASTOR® 440/84M. Teplotní výpočet. GNS B 049/2002, Rev. 2.
- HASAL M., MICHALEC Z., BLAHETA R. (2019): Provedení předběžného výpočtu tlaku na UOS. - MS SÚRAO, TZ 388/2019, Ostrava.
- HAUSMANNOVÁ L., HANUSOVÁ I., DOHNÁLKOVÁ M. (2018): Shrnutí výzkumu českých bentonitů pro hlubinné úložiště – do roku 2018. MS – SÚRAO, TZ 309/2018, Praha.
- IAEA (2011): Disposal of radioactive waste, specific safety requirements. SSR-5, Vienna.
- IAEA (2020): Development of a common framework for addressing climate and environmental change in post-closure radiological assessment of solid radioactive waste disposal. International Atomic Energy Agency. IAEA TECDOC series no. 1904. ISSN 1011–4289, Vienna.
- 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, SÚRAO, TZ 504/2020, Praha.
- Kerntechnischer Ausschuß (KTA 3201.2) (2017): Components of the Reactor Coolant Pressure Boundary of Light Water Reactors Part 2: Design and Analysis.
- KOBYLKA D. (2019): Optimalizace vzájemné vzdálenosti ÚOS. MS – SÚRAO, TZ 135/2017, Praha.
- 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.
- LOPAUR J. (2020) Výpočet mechanické odolnosti UOS střížnými tlaky. ŠKODA JS a.s., Ae 16886/Dok, Plzeň.
- LANDOLT D., DAVENPORT A.J., PAYER J., SHOERMITH 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.

- LOTZ H., CARRIERE 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. (2014): Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Výpočet stínění pro palivo Gd-2M. Zpráva ŠKODA JS a.s. Ae 15516/Dok Rev. 0.
- LOVECKÝ M. (2015a): Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Výpočet podkritičnosti pro palivo VVER-440. Zpráva ŠKODA JS a.s. Ae 15990/Dok Rev. 0, Plzeň.
- LOVECKÝ M. (2015b): Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Výpočet podkritičnosti pro palivo VVER-1000. Zpráva ŠKODA JS a.s. Ae 15991/Dok Rev. 0, Plzeň.
- LOVECKÝ M. (2020a): Výpočet podkritičnosti UOS ŠKODA 440/7 SÚRAO TZ 574/2021, Praha.
- LOVECKÝ M. (2020b): Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Výpočet stínění pro palivo VVER-440. SÚRAO TZ 506/2021, Praha.
- MALINA J., KŘÍŽOVSKÝ 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. SÚRAO 411/2019, Plzeň.
- NOVÁK P. (2011): Koroze kovů, in Konzervování a restaurování kovů, kap. 3, 136-198, TM Brno, AMG ČR, (monografie).
- POSIVA, SKB (2017): Posiva SKB Report 01 Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository, Report 01, ISSN 2489-2742.
- POSPÍŠKOVÁ I., DOBREV D., FRÝBORT J., HAVLOVÁ V., VAŠÍČEK R., KOBYLKA D., BÍLÝ T., RATAJ J., FRÝBORTOVÁ L., HOFFMANOVÁ E., VEČERNÍK P., VOZÁR M., FIEDLER F., SVOBODA J. (2022): Analýza FEPs UOS s VJP. MS SÚRAO 617/2022, Praha.
- RAIKO H. (2005): Disposal Canister for Spent Nuclear Fuel – Design Report. POSIVA 2005-02, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland, str. 71.
- STOULIL J., PAVLOVA L., KOUŘIL M., (2019) Localised corrosion of stainless steels 316L and 2205 in synthetic bentonite pore water and bentonite slurry. *Acta Metallurgica Slovaca*, 25 (1), 24-32.
- ŠIK J. (2020) Ukládací obalový soubor pro hlubinné úložiště. Tepelný výpočet, ŠKODA JS a.s., Ae 16093/Dok, SÚRAO, TZ 509/2020, Plzeň.
- TVEL [online] (2022): ЭНЕРГИЯ РОСТА - ENERGIYA ROSTA. [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://www.tvcl.ru/upload/iblock/3ff/3ff2896a9172663b99d2a71ff5a57d3e.pdf>
- VONDROVIC L., et al. (2020): Výběr potenciálních lokalit hlubinného úložiště v ČR pro navazující etapu prací po roce 2020. – MS SÚRAO, TZ465/2020, Praha.
- WENRA (2014): WGWD Report: Waste And Spent Fuel Storage Safety Reference Levels, SRL DI-38, 28 April 2014.
- 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.
- Westinghouse Nuclear [online] (2022): VVER-1000 Fuel Products. [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: https://www.westinghousenuclear.com/Portals/0/flysheets/VVER-1000_181121.pdf

Příloha 1: Legislativa

Příloha shrnuje aktuálně platný atomový zákon a jeho prováděcí vyhlášky relevantní pro UOS shrnuté níže v Tab. 11.

Ve smyslu § 4 odst. 2 písm. b) bodu 3. zákona č. 263/2016 Sb., atomový zákon (dále jen AZ) je UOS obalovým souborem pro „ukládání štěpných látek nebo radioaktivních látek“ a dle § 136 písm. b) také souborem „konstrukčních dílů nezbytných k úplnému uzavření radioaktivního obsahu“, přičemž pod radioaktivním obsahem se dle § 136 písm. m) rozumí „radioaktivní látka se všemi kontaminovanými nebo aktivovanými pevnými látkami, kapalnými látkami a plyny uvnitř obalového souboru“. Vlastnosti UOS jsou důležité z pohledu Vyhlášky č. 422/2016 Sb., jmenovitě pro zajištění bezpečných limitů efektivních dávek záření. V současnosti platná legislativa tedy upravuje vybrané aspekty, které musí UOS pro zajištění bezpečnosti splňovat, a to jak ve stádiu vývoje a procesu licencování, tak při samotném plnění a ukládání ve stádiu provozu HÚ.

Tab. 11 - Prováděcí vyhlášky atomového zákona relevantní pro ukládací obalový soubor

Číslo prováděcí vyhlášky	Název vyhlášky
Vyhláška č. 358/2016 Sb.	<i>o požadavcích na zajišťování kvality a technické bezpečnosti a posouzení a prověřování shody vybraných zařízení</i>
Vyhláška č. 359/2016 Sb.	<i>o podrobnostech k zajištění zvládnutí radiační mimořádné události</i>
Vyhláška č. 377/2016 Sb.	<i>o požadavcích na bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem a o vyřazování z provozu jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo IV. kategorie</i>
Vyhláška č. 379/2016 Sb.	<i>o schválení typu některých výrobků v oblasti mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření a přepravě radioaktivní nebo štěpné látky</i>
Vyhláška č. 408/2016 Sb.	<i>o požadavcích na systém řízení</i>
Vyhláška č. 422/2016 Sb.	<i>o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje</i>
Vyhláška č. 21/2017 Sb.	<i>o zajišťování jaderné bezpečnosti jaderného zařízení</i>
Vyhláška č. 162/2017 Sb.	<i>o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona</i>
Vyhláška č. 329/2017 Sb.	<i>o požadavcích na projekt jaderného zařízení</i>

Schválení obalových souborů pro přepravu, skladování nebo ukládání radioaktivní nebo štěpné látky se v současnosti řídí dle § 137 odst. 1 AZ a § 11 odst. 1 Vyhlášky č. 379/2016 Sb. Obalový soubor, který je „určený pro ukládání vyhořelého nebo ozářeného jaderného paliva nebo radioaktivního odpadu vzniklého jeho přepracováním“ se dle § 11 odst. 1 písm. e) výše zmíněné vyhlášky řadí mezi obalové soubory typu D. UOS není určen k přepravě a jeho schvalovatelem je Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) ve smyslu § 137 odst. 1 písm. a) a odst. 6 AZ, dále pak § 208 písm. b) AZ a § 11 odst. 1 písm. e) Vyhlášky č. 379/2016 Sb.

Dle požadavků na systém řízení se ve smyslu Vyhlášky č. 408/2016 Sb. na UOS jako vybrané zařízení bezpečnostní třídy 2 vztahuje Vyhláška č. 358/2016 Sb. Zde dle § 2 písm. a) je „tlakovým zařízením vybrané zařízení namáhané tlakem pracovního média s nejvyšším pracovním tlakem přesahujícím 0,05 MPa, včetně prvků připojených k součástem vystaveným tlaku, bezpečnostní a tlakové výstroje a jiné výstroje, která zajišťuje jeho funkčnost.“

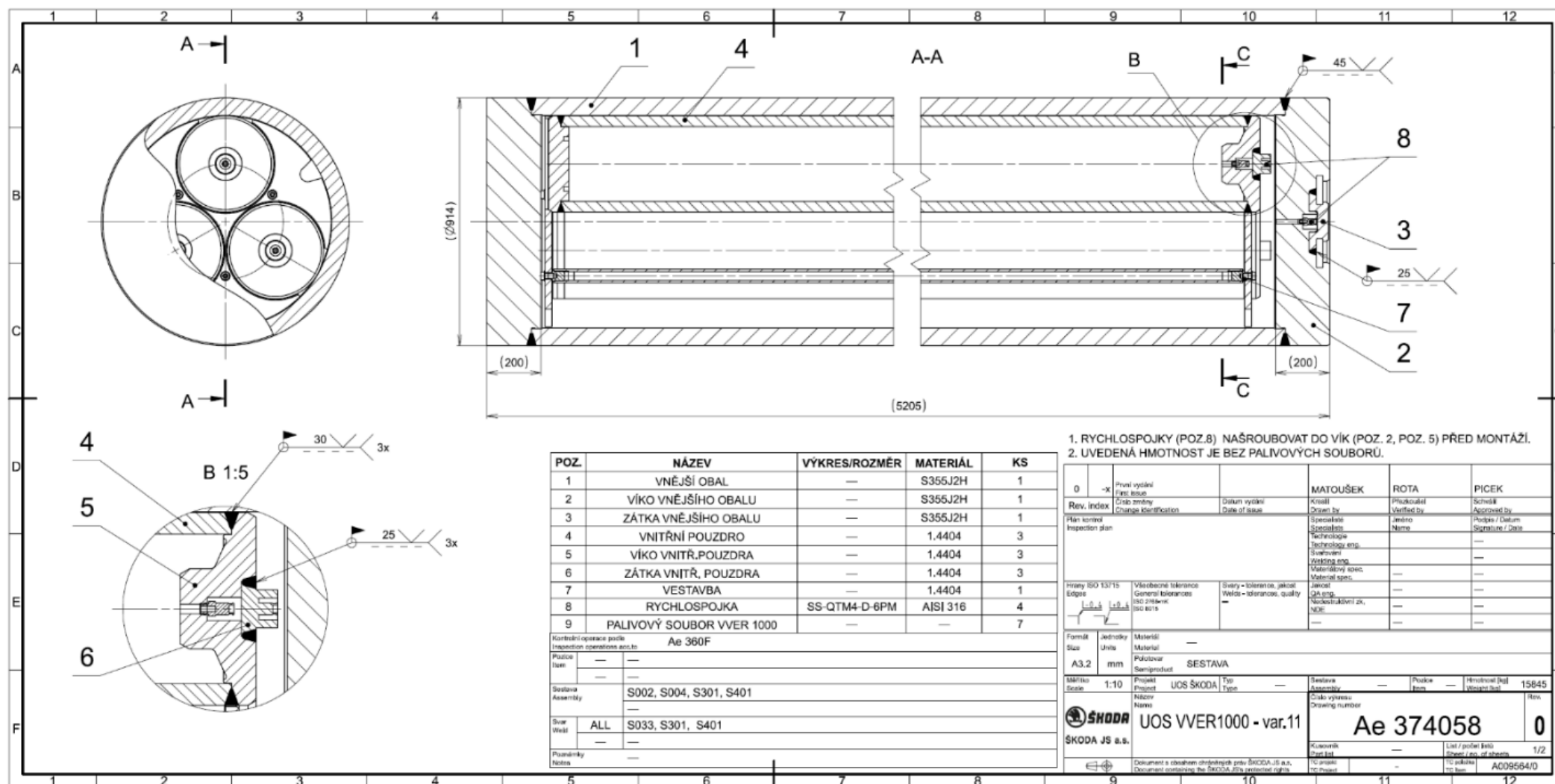
Vyhláška č. 377/2016 Sb. stanovuje důležité požadavky na UOS, zejména na značení (§ 2), plnění a manipulace (§ 5), samotné ukládání (§ 8), dokumentace (§ 9) a evidence (§ 10) obalových souborů.

Poškození obalového souboru s jaderným materiálem se pak dle § 6 ods. 2 písm. f) *Vyhlášky č. 21/2017 Sb.* kategorizuje jako významná provozní událost ve smyslu AZ. Veličiny nebo skutečnosti vztahující se k obalovému souboru jsou v případě vzniku mimořádné události zkoumány pro zjištění vzniku této události dle § 6 odst. 2 písm. a) *Vyhlášky č. 359/2016 Sb.* Legislativním podkladem pro požadavky na periodické hodnocení bezpečnosti budoucího provozu HÚ je *Vyhláška č. 162/2017 Sb.*

Příloha 2: Kusovník UOS 440

Pozice	Název	Typ	Množství	Rozměr	Materiál	Rozměrová norma	TDP
1	UOS 440	SESTAVA	1				
1/1	VNĚJŠÍ OBAL	PODSESTAVA	1				
1/1/1	DNO VNĚJŠÍHO OBALU		1	P210 – KR950	S355J2H		EN 10137-1
1/1/2	TĚLO VNĚJŠÍHO OBALU		1	VÝKOVEK KR924/774-3490	S355J2H		EN 10222-1
1/2	VÍKO VNĚJŠÍHO OBALU		1	P210 – KR950	S355J2H		EN 10137-1
1/3	ZÁTKA VNĚJŠÍHO OBALU		1	P70 – KR310	S355J2H		EN 10137-1
1/4	VNITŘNÍ POUZDRO	PODSESTAVA	7				
1/4/1	DNO VNITŘNÍHO POUZDRA		7	KR250 - 80	1.4404		EN 10272
1/4/2	TĚLO VNITŘNÍHO POUZDRA		7	TR KR244,5x36 - 3340	1.4404		EN 10297-2
1/5	VÍKO VNITŘNÍHO POUZDRA		7	KR250 - 140	1.4404		EN 10272
1/6	ZÁTKA VNITŘNÍHO POUZDRA		7	KR140 - 75	1.4404		EN 10272
1/7	VESTAVBA	PODSESTAVA	1				
1/7/1	DESKA SPODNÍ		1	P20 - 788x788	1.4404		EN 10028-7
1/7/2	DESKA HORNÍ		1	P20 - 788x788	1.4404		EN 10028-7
1/7/3	VODÍCÍ TYČ		12	KR30 - 3255	1.4404		EN 10272
1/7/4	PODLOŽKA		21	17	A2	ISO 7092	
1/7/5	ŠROUB		21	M16x40	A2	DIN 6912	
1/7/6	ZÁVĚSNÝ ŠROUB		3	M16	A2	ISO 3266	
1/8	RYCHLOSPOJKA		8	SS-QTM4-D-6PM			

38



Technical drawing of the PALIVOVÝ SOUBOR VVER 440 (7x) fuel assembly, showing a cross-section (A-A) and a detail view (B 1:5).

The main drawing (A-A) shows the fuel assembly with dimensions (3790) and (Ø914). It includes a detail view (B 1:5) showing the internal structure and dimensions (25, 30, 7x).

Legend:

- 1: VNĚJŠÍ OBAL
- 2: VÍKO VNĚJŠÍHO OBALU
- 3: ZÁTKA VNĚJŠÍHO OBALU
- 4: VNITŘNÍ POUZDRO
- 5: VÍKO VNITŘ. POUZDRA
- 6: ZÁTKA VNITŘ. POUZDRA
- 7: VESTAVBA
- 8: RYCHLOSPojKA
- 9: PALIVOVÝ SOUBOR VVER 440

Technical specifications and drawing data:

POZ.	NÁZEV	VÝKRES/ROZMĚR	MATERIÁL
1	VNĚJŠÍ OBAL	Ae 373508	S355J2H
2	VÍKO VNĚJŠÍHO OBALU	Ae 373506	S355J2H
3	ZÁTKA VNĚJŠÍHO OBALU	Ae 373509	S355J2H
4	VNITŘNÍ POUZDRO	Ae 373514	1.4404
5	VÍKO VNITŘ. POUZDRA	Ae 373517	1.4404
6	ZÁTKA VNITŘ. POUZDRA	Ae 373518	1.4404
7	VESTAVBA	Ae 373504	1.4404
8	RYCHLOSPojKA	SS-QTM4-D-6PM	-
9	PALIVOVÝ SOUBOR VVER 440	-	-

Control and inspection operations according to Ae 360F:

POZICE	Item	Inspection operations acc.to
1	—	—
2	—	—
3	—	—
4	—	—
5	—	—
6	—	—
7	—	—
8	—	—
9	—	—

Assembly and welding information:

POZICE	Item	Assembly	Weld
1	—	—	—
2	—	—	—
3	—	—	—
4	—	—	—
5	—	—	—
6	—	—	—
7	—	—	—
8	—	—	—
9	—	—	—

Drawing data and revision history:

Rev.	index	Číslo změny	Change identification	Datum vydání	Date of issue	MATOUŠEK	FORMAN
0	-X	První vydání	First issue	—	—	—	—
1	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—

Formal drawing information:

Formát	Size	Jednotky	Units	Materiál	Material	Palivovar	Semiproduct	SESTAVA	Project	UOS	Typ	Type	Sestava	Assembly	Podpis	Signature	Hmotnost [kg]	Weight [kg]	12000
A3.2	mm	mm	mm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

SKODA JS a.s. UOS VVER440-var.12 Ae 373503 0



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST

info@surao.cz | www.surao.cz