

# **SPECIFIKA MODELOVÁNÍ SYSTÉMŮ TECHNICKÉ VODY DŮLEŽITÉ NA JE DUKOVANY S OHLEDEM NA ZMĚNY HYDRAULIKY V DŮSLEDKU JEJICH ZANÁŠENÍ**

## **SPECIFICS OF MODELLING OF ESSENTIAL SERVICE WATER CIRCUITS AT DUKOVANY NPP WITH REGARD TO CHANGES IN THEIR HYDRAULICS CAUSED BY FOULING PROCESS**

Martin Blaha a Tomáš Růžička

TES s.r.o.

### **Abstrakt**

System technické vody důležité (TVD) slouží na jaderných blocích k odvodu tepla ze zařízení a systémů důležitých z pohledu jaderné bezpečnosti při normálním provozu i v havarijních stavech, kdy zajišťuje odvod zbytkového tepla. V souvislosti s projekty zvyšování výkonu a prodloužení životnosti JE Dukovany provedli experti firmy TES s.r.o. v posledních letech řadu bezpečnostních termo-hydraulických výpočtů systému TVD. Článek shrnuje zkušenosti expertů firmy TES s.r.o. s modelováním okruhů TVD a s validací výpočtových modelů TVD s ohledem specifika jejich modelování, mezi které patří také zanášení (fouling).

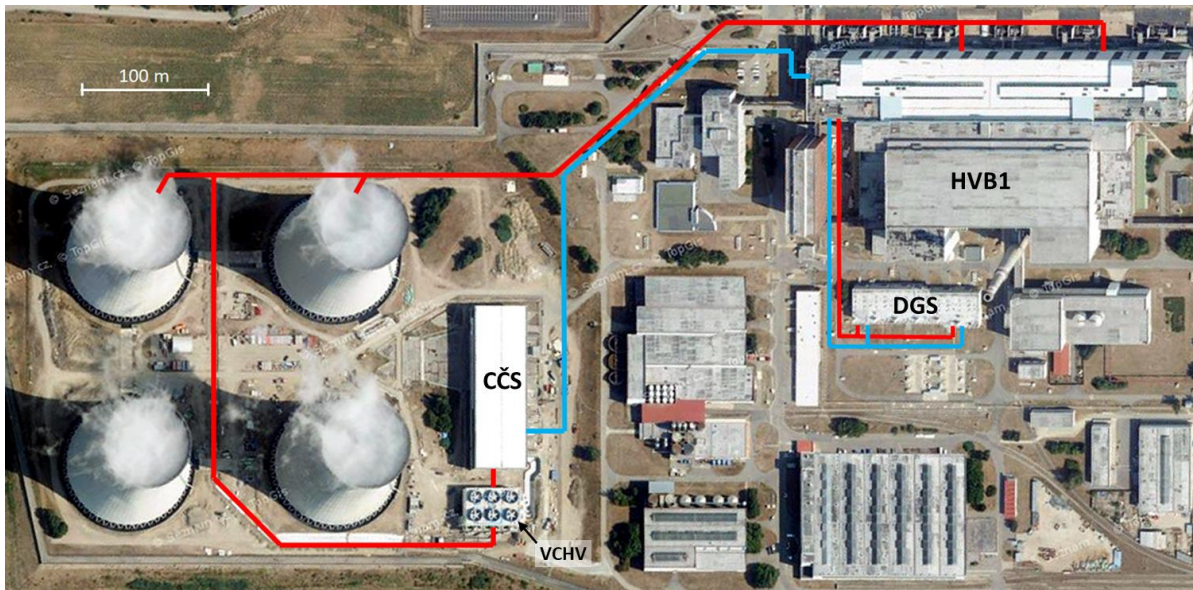
### **Abstract**

The Essential Service Water (ESW) system is designed to remove heat from nuclear safety related equipment and systems of nuclear power plants during normal plant operation as well as during an accident when residual heat is removed from reactor via ESW. Experts from TES s.r.o. Company performed a number of safety thermal-hydraulic calculations of the ESW system at Dukovany NPP in frame of power up-rating and LTO projects. The article summarizes the experience of TES s.r.o. experts with modelling of ESW circuits and with validation of ESW models with regard to the specifics of their modelling, which include also fouling process.

### **Úvod**

System technické vody důležité (TVD) je bezpečnostní systém klíčový nejenom pro zajištění odvodu tepla ze spotřebičů JE důležitých z pohledu jaderné bezpečnosti při normálním a abnormálním provozu, ale zejména z pohledu zajištění pohavarijního odvodu zbytkového tepla z jaderného bloku po odstavení reaktoru, a to jak z paliva v aktivní zóně, tak i z paliva v bazénu skladování použitého paliva. System TVD zajišťuje transport tepla z jaderného bloku do koncového jímače tepla a přímé zajištění základní bezpečnostní funkce (ZBF) „Odvod tepla při havarijních podmínkách“. Nepřímo je systém TVD důležitý i pro zajištění ZBF „Zamezení únikům“, protože zachování integrity ochranné obálky je v případě úniků do ochranné obálky závislé na zajištění dostatečného odvodu tepla. Na JE Dukovany (EDU) je systém TVD řešen dvoublokově. TVD jako bezpečnostní systém má redundanci 3 x 100 %, jednotlivé divize (TVD1, TVD2, TVD3) jsou vzájemně nezávislé, včetně nouzového elektrického napájení a fyzicky oddělené. Při nominálním provozu je odvod tepla ze systému TVD zajištěn procesem výměny vody. Do systému TVD je doplňována chladná surová voda z gravitačního vodojemu a přebytek oteplené TVD přetéká do jímek cirkulační chladicí vody (CCHV) na centrální čerpací stanici (CCS). Tímto způsobem je za nominálního provozu dvou bloků na hlavním výrobním bloku (HVB) odváděno cca 18 MW tepla sumárně ze všech tří divizí TVD. Gravitační vodojem je doplňován čerpadly z čerpací stanice Jihlava neupravenou surovou vodou z vodní nádrže Mohelno. V případě výpadku doplňování surové vody nebo v případě výrazného zvýšení tepelného výkonu odváděného systémem TVD (např. po LOCA havárii na jednom z bloků) je odvod tepla z TVD zajišťován přes ventilátorové chladicí věže (VCHV) přímo do atmosféry. Standardní odvod tepla ze systému TVD doplňováním neupravené surové vody s sebou nese

i problémy typu zanášení potrubních systémů a výměníků TVD (fouling), které mají dopad na hydrauliku celého systému TVD.



Obr. 1: Dispozice venkovních potrubních tras TVD1 na HVB1 JE Dukovany

### Specifika modelování systému TVD

V souvislosti se stress testy a projekty zvyšování výkonu a prodloužení životnosti JE provedli experti firmy TES s.r.o. v posledních letech řadu bezpečnostních termo-hydraulických výpočtů systému TVD pro JE Dukovany. Při vývoji výpočtových modelů systému TVD, při prováděných výpočtech, ale zejména při validaci výpočtových modelů se ukázalo, že systém TVD má řadu specifík, která je nutné zohlednit při jejich modelování a při interpretaci naměřených hodnot. Mezi hlavní specifika při modelování systému TVD patří:

- velké dopravní zpoždění v okruhu TVD,
- silná závislost na parametrech vnějšího prostředí,
- vysoká komplexnost systému a režimů TVD,
- nedostatek dat pro nastavení a validaci modelů,
- zanášení potrubí a výměníků (fouling).

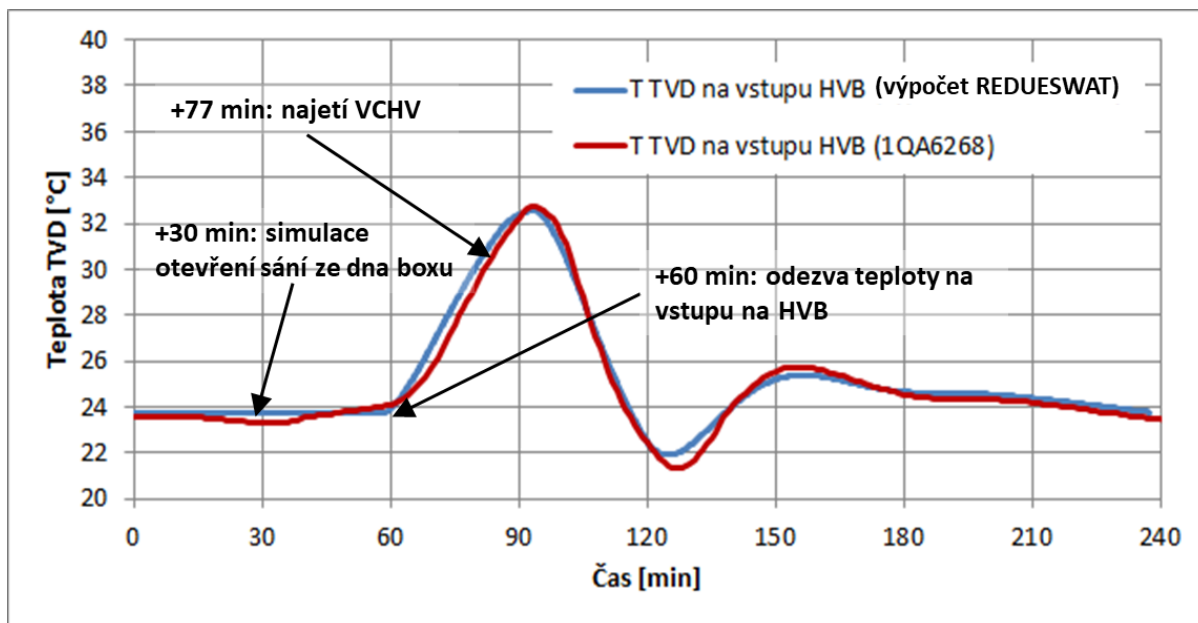
Proces postupné degradace hydrauliky systému TVD v důsledku zanášení (fouling) má přímou vazbu na životnost JE, proto je mu v tomto příspěvku věnována větší pozornost.

#### Dopravní zpoždění v okruhu TVD

Potrubní trasy systému TVD, zejména trasy mimo hlavní výrobní blok, mají značnou délku až kolem 1 km (viz dispozice potrubních tras TVD1 na HVB1 na obr. 1). Dopravní zpoždění v tomto okruhu je proto značné a v závislosti na průtoku může dosahovat řádově až desítky minut. Trvá cca 25 až 30 minut než oteplená voda od výměníku TQ oběhne celý okruh a projeví se na teplotě TVD na vstupu na blok (viz obr. 2). To klade značné nároky na výpočtový model a rovněž i na interpretaci získaných výsledků, protože např. časové průběhy teplot mohou být v důsledku značného a s časem proměnného dopravního zpoždění značně zkresleny.

Faktor velkého dopravního zpoždění musí být uvážěn už ve fázi výběru výpočtového programu (ne všechny výpočtové programy umožňují uspokojivě modelovat dopravní zpoždění) a potom rovněž při návrhu diskretizace potrubních tras ve výpočtovém modelu. Ve firmě TES s.r.o. byl výpočtový model systému TVD HVB1 JE Dukovany s názvem REDUESWAT vytvořen v prostředí výpočtového programu RELAP5/MOD3.3. Na základě nodalizační citlivostní studie byla ve finální verzi modelu zvolena poměrně jemná nodalizace s průměrnou délkou jednoho objemu potrubní trasy mezi 5 ÷ 6 m. Výpočtový model jedné divize TVD v rozsahu

celého HVB na JE Dukovany má sumárně přes tisíc objemů a komponent. Takto velký model se nám nepodařilo zakomponovat do stávajících výpočtových modelů I.O a II.O JE Dukovany, byl proto vytvořen jako samostatný model s tím, že výpočet např. události LOCA potom probíhá metodou externího couplingu. Při této metodě probíhá výpočet celého bloku na třech výpočtových modelech: Model I.O a II.O v prostředí RELAP5, model TVD v prostředí RELAP5 a model kontejnmentu v prostředí MELCOR. Pomocí externích skriptů je při výpočtu zprostředkován automatický přenos dat mezi těmito modely. Tento iterační výpočet je časově mimořádně náročný – např. výpočet dvou hodin reálného času při analýze události LOCA trvá cca 24 hodin, než je dosaženo uspokojivé konvergence.



Obr. 2: Validace modelu – test najetí dochlazování na RB1 EDU dne 31. 1. 2016

### Silná závislost na parametrech vnějšího prostředí

Teplota z okruhu TVD je na EDU při provozu bloku na nominálním výkonu odváděna doplňováním surové vody do jímek TVD a odpouštěním oteplené vody do systému cirkulační vody. V letech 2014 ÷ 2016 byly do okruhů TVD na EDU doplněny ventilátorové chladicí věže (VCHV) výrobce REKO (viz dispozice HVB1 EDU na obr. 1), které automaticky najíždějí od zvýšení teploty TVD na vstupu na blok. Teplota doplňované surové vody z vodní nádrže Jihlava i parametry okolního vzduchu se mění jak dlouhodobě v průběhu roku (teplota surové vody i parametry vzduchu), tak i krátkodobě v průběhu dne (teplota, tlak a vlhkost vzduchu). Nastavení systému TVD i jeho parametry se v průběhu ročního období významně mění. Zkušenosti s výpočty TVD v podmínkách extrémních klimatických podmínek ukázaly, že je nezbytné mít výpočtový model VCHV validován i v této oblasti parametrů (extrémní teplota v lokalitě EDU:  $T = 46,3 \text{ °C}$  /  $RH = 24 \%$ ). Nastavení modelu VCHV v modelu REDUESWAT bylo provedeno na základě referenčních křivek dodavatele VCHV REKO a.s. [1] pro rozsah teplot vzduchu –  $5 \text{ °C} \div 40 \text{ °C}$  a relativních vlhkostí  $20 \div 80 \%$ .

### Vysoká komplexnost systému TVD a režimů TVD

Při modelování systému TVD se ukázaly být velmi důležité následující faktory, které se vztahují k vysoké komplexnosti systému TVD a režimů provozu TVD:

- Systém TVD je společný pro dva bloky:
  - Může dojít k libovolné kombinaci provozních režimů obou bloků,
  - Pro analýzy byly vybrány typické kombinace režimů, kdy je průtokové a/nebo tepelné zatížení TVD nejvyšší – R1/R1, R1/R4, R1/R7.

- Byly identifikovány odchylky mezi oběma HVB na EDU – např. trasy na DGS.
- Systém TVD je tvořen 3 divizemi TVD – jsou odchylky mezi trasami a spotřebiči.
- Vysoký počet stupňů volnosti při nastavování spotřebičů na divizích a blocích.
- Automatické přejíždění spotřebičů a tras (po ÚZNVŠ, po LOCA, ...).

### **Nedostatek provozních dat pro nastavení a validaci výpočtových modelů**

Při zjišťování skutečného stavu systému TVD pro nastavení modelu a jeho validaci se ukázala být jako značný problém nedostatečná instrumentace systému TVD. Rozsah standardních měřících míst na systému TVD je nedostačující pro zjištění skutečného stavu hydrauliky tak složitého systému, což je navíc komplikováno „zarůstáním“ odběrových tras a poměrně častými výpadky některých měření. Aplikaci (již tak „řidkých“) dat z technologického archívu EDU dále komplikuje i nedostatečná dokumentace konfigurace tras a spotřebičů TVD, kdy není zřejmé, kdy byly které spotřebiče TVD najety, případně jak byl zregulován průtok TVD na tyto spotřebiče.

### **Fouling v modelování systému TVD**

Obecně je fouling definován jako zanášení, ukládání a hromadění nežádoucího materiálu na pracovní plochy provozovaného zařízení, což způsobuje jeho nesprávnou funkci nebo v extrémním případě může vést i k jeho úplnému vyřazení z provozu. Je to nežádoucí jev, který je třeba zohlednit již ve fázi projektování zařízení a při jeho provozu potom minimalizovat.

#### **Mechanismy foulingu**

Literatura zmiňuje velké množství mechanismů zanášení. V tomto článku se nebudeme zabývat detailním rozбором a klasifikací jednotlivých mechanismů zanášení, ale soustředíme se na následující mechanismy a faktory, které se ukázaly být jako stěžejní při praktickém modelování systémů TVD na EDU:

- precipitace – vodní kámen,
- usazování – kal,
- koroze – potrubní trasy, škrťací a měřící clony,
- biologické zanášení – škeble, řasy.

#### **Hodnocení dopadu foulingu na parametry systému TVD**

Zanášení způsobené výše uvedenými mechanismy se projevuje degradací hydraulických charakteristik okruhu a degradací přestupu tepla na výměnících chlazených systémem TVD.

Vlivem zanášení dochází ke zvyšování hydraulického odporu potrubních tras a výměníků systému TVD a tím ke snižování průtoků v systému TVD. Specifickým případem je dopad foulingu u škrťacích a měřících clon v systému TVD, kdy v důsledku zanášení může docházet ke snižování hydraulického odporu clon, což v některých případech může být podpořeno i korozí okrajů otvoru clony. Stěžejním problémem při vývoji a validaci výpočtového modelu TVD se ukázala být kvantifikace dopadu zanesení (stanovení redukce průtočného průřezu a kvality omočené plochy). Systém TVD tvoří rozsáhlé spektrum dimenzí potrubí od DN50 po DN1000 a různého stáří a tedy i zanesení, protože v minulosti byly části potrubních tras TVD na EDU již rekonstruovány. To se týká především potrubních tras TVD v kontrolovaném pásmu, tras na DGS a vratných tras TVD v oblasti CČS, VCHV a chladících věží. Aby mohl výpočtový model reprezentovat skutečný stav hydrauliky celého systému TVD, musel být jasně definován průtočný průřez a kvalita povrchu každého potrubního úseku a komponenty (výměníku, clony, armatury, ...) s ohledem na dobu provozu.

Korelace určující tloušťku nánosu (vrstvy rzi a vodního kamene) a kvalitu vnitřního povrchu potrubí v závislosti na jeho průměru byly odvozeny na základě archivních záznamů (především fotografií) potrubních úseků TVD na EDU, které byly v minulosti vyměněny. Přestože těchto záznamů bylo poměrně málo, výsledné korelace dávaly dobré výsledky při následné validaci

výpočtových modelů, kdy byla porovnáována naměřená a vypočtená data v různých režimech provozu systému TVD.

Skutečný stav zanesení (hydraulický odpor) klíčových výměníků chlazených TVD (výměník TQ a výměníky na DG) byl stanoven na základě nestandardních měření tlakových spádů a průtoků na vybraných částech potrubních tras s výměníky, které provedli pracovníci ČEZ a.s. Měření byla limitována nízkým počtem odběrových míst na které bylo možno připojit tlakoměry a také rovněž sníženou kvalitou měření průtoků prováděných ultrazvukovými průtokoměry v důsledku neznámé tloušťky a kvality nánosů na vnitřních površích měřeného potrubí. Při vyhodnocování těchto měření bylo možno vysledovat i závislost naměřeného hydraulického odporu na době měření v rámci periody čištění těchto výměníků, která probíhá v intervalech cca 1 x za 3 roky.

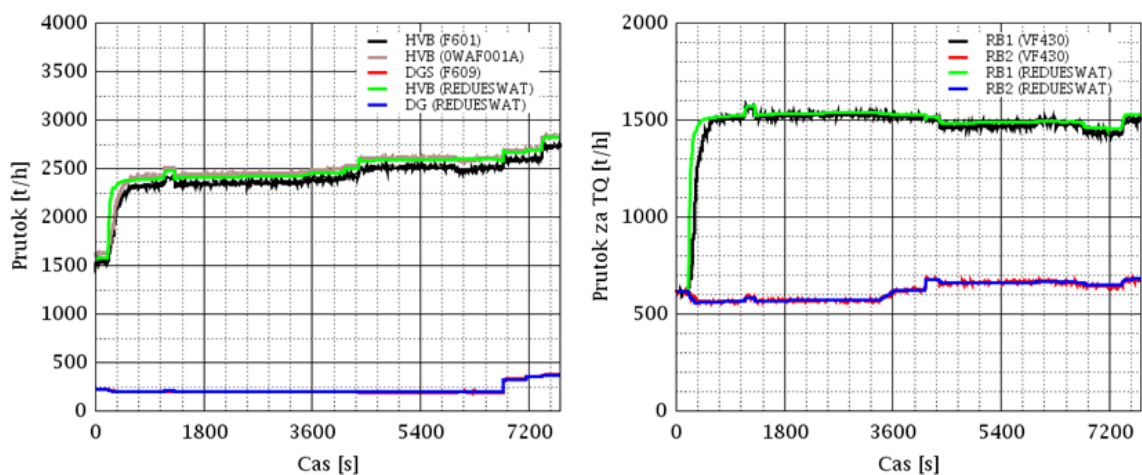
V důsledku zanášení potom dochází i k degradaci koeficientů přestupu tepla ve výměnících chlazených systémem TVD. Dopady zanášení klíčového TQ výměníku po straně TVD na přestup tepla byly analyzovány na VUT v Brně [2] a následně byly implementovány ve výpočtovém modelu systému TVD.

### **Výpočtový model REDUESWAT systému TVD**

Použitý výpočtový model REDUESWAT byl vyvinut ve firmě TES s.r.o. v prostředí RELAP5/MOD3.3 pro termo-hydraulické analýzy ustálených a přechodových procesů v systému TVD v projektových i rozšířených projektových podmínkách, včetně klimatických extrémů. Model reprezentuje všechny tři divize TVD v rozsahu HVB1, včetně vnějších rozvodů, VCHV a systému TVD na ČČS.

Vývoj výpočtového modelu REDUESWAT byl, zejména z důvodu nedostatku vhodných informací o skutečném aktuálním stavu systému TVD, dlouhodobý proces, který začal v roce 2017. Pro ověření a doladění skutečného stavu hydrauliky systému TVD byla nejprve používána data z komplexních měření systému TVD na HVB1 prováděných dle operativních programů OP115÷117/17. Výchozí verze modelu REDUESWAT byla postavena především na projektových datech a informacích z dostupné provozní a bezpečnostní dokumentace. Při srovnávacích výpočtech se ukázaly zásadní odchylky mezi vypočtenými a naměřenými daty a byla rovněž identifikována značná nekonzistence naměřených dat. Tyto srovnávací výpočty výraznou měrou přispěly k iniciaci dalších měření a kontrol při odstávkách, při kterých bylo mj. zjištěna značné korozní opotřebení některých měřících a škrtících clon v systému TVD a vyšší místní hydraulické odpory, než bylo předpokládáno projektem. Po výměně clon byla na všech divizích TVD na obou HVB znovu provedena komplexní měření dle OP141÷143/18 na HVB1 a OP151÷153/18 na HVB2, kdy byl mj. i hydraulicky simulován stav s únikem primárního chladiva (LOCA) na jednom z RB. Data z těchto komplexních měření se společně s řadou dílčích nestandardních měření hydraulických odporů v trasách TVD a vyvinutými korelacemi pro degradaci potrubních tras stala podkladem pro finální nastavení a validaci modelu REDUESWAT. Z výstupů validačních výpočtů (viz obr. 3) proti datům z měření dle OP141÷143/18 byla mj. i stanovena kombinovaná nejistota predikce průtokových parametrů v systému TVD po LOCA při použití modelu REDUESWAT-2.2.





Obr. 3: Validace modelu REDUESWAT-2.2 dle dat z VOP141/18 (TVD1 na HVB1)

Ve stávající verzi modelu REDUESWAT-2.2 je nastavena degradace průměrů a vnitřních povrchů odpovídající skutečnému stavu HVB1 v roce 2018, kdy byla provedena většina referenčních měření na systému TVD. Model umožňuje nastavit stav potrubních tras odpovídající libovolnému datu až do konce životnosti bloků EDU a lze tak s jeho pomocí provádět výpočtovou predikci stárnutí systému a dlouhodobé účinnosti nápravných opatření v celém tomto období.

## Shrnutí

System TVD je na EDU jedním z klíčových systémů na JE pro zajištění ZBF odvod tepla do koncového jímace tepla (atmosféry). Události ve Fukušimě, následné stress testy a zavedení nové jaderné legislativy, posilující kategorii rozšířených projektových podmínek a zvyšujících důraz na zajištění bezpečnostních funkcí systému TVD i v podmínkách klimatických extrémů, vedly k iniciaci vývoje nových výpočtových modelů TVD, se kterými bude možno provádět deterministické bezpečnostní analýzy i v těchto podmínkách. V článku byla diskutována hlavní specifika modelování systému TVD na JE na základě zkušeností, které získali experti firmy TES s.r.o. v rámci vývoje a validace výpočtových modelů TVD a provedených výpočtů tohoto systému v letech 2014-2019. Tyto zkušenosti mj. ukázaly, že při očekávané životnosti bloků 50 let hraje modelování systému TVD velkou roli časový faktor spojený s procesem postupného zanášení potrubních tras a výměníků TVD. S ohledem na požadavek prodlužování životnosti bloků EDU je proto klíčové monitorovat proces postupného zanášení systému TVD tak, abychom byli schopni aktualizovat výpočtové modely TVD a s nimi následně kvalifikovaně výpočtově predikovat další vývoj degradace hydrauliky systému TVD a ověřit efektivnost případných nápravných opatření a jejich dopad na plnění bezpečnostních funkcí tohoto systému až do doby konce životnosti JE.

## Literatura

- [1] Špírek, K. (2017): *Závěrečná zpráva*. REKO a.s., Praha.
- [2] Baláš, M. (2018): *Charakteristiky TQ výměníků tepla JE Dukovany*. Technická zpráva, VUT-FSI-EÚ-OEI 001/2018, Vysoké učení technické v Brně, FSI, Energetický ústav – Odbor energetického inženýrství, Brno.