



Zdravotně  
sociální fakulta  
Faculty of Health  
and Social Studies

Jihočeská univerzita  
v Českých Budějovicích  
University of South Bohemia  
in České Budějovice

## **Analýza vybraných chemických parametrů chladiva primárního okruhu Jaderné elektrárny Temelín**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Studijní program:

**OCHRANA OBYVATELSTVA**

**Autor:** Bc. Martin Řeháček

**Vedoucí práce:** doc. RNDr. Přemysl Záškodný, CSc.

**Odborný konzultant:** Ing. Miroslav Martykán

České Budějovice 2019

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci s názvem „**Analýza vybraných chemických parametrů chladiva primárního okruhu Jaderné elektrárny Temelín**“ jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejich internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 13. května 2019

.....  
Bc. Martin Řeháček

## **Poděkování**

Mé poděkování patří doc. RNDr. Přemyslu Záškodnému, Csc. za odborné vedení, ochotu a neocenitelné rady zejména při zpracování statistické části práce.

# **Analýza vybraných chemických parametrů chladiva primárního okruhu Jaderné elektrárny Temelín**

## **Abstrakt**

Cílem práce bylo vymezit význam radiochemických procesů odehrávajících se v chladivu primárního okruhu jaderné elektrárny a popsat způsob měření chemických parametrů. Druhým cílem bylo vymezení významu rozpuštěného vodíku pro kompenzaci vlivů na korozi ohrožujících korozi bezpečný provoz elektrárny a popsat způsob generování vodíku amoniakem. Třetím cílem bylo šetření časových průběhů koncentrací čpavku a vodíku v rámci obou výrobních bloků. Posledním cílem práce bylo zkoumání jednostranné závislosti mezi koncentracemi čpavku a vodíku.

První dva cíle byly splněny použitím systémové analýzy chemických parametrů chladiva, způsobů jejich měření a probíhajících radiochemických procesů v chladivu. Na základě výsledků analýzy byly vybrány k hlubšímu šetření čpavek a vodík. Ke splnění dalších dvou cílů byly zformulovány hypotézy H1, H2 a H3. Hypotézou H1 byla empirická distribuce měření koncentrací čpavku a vodíku ověřovaná pomocí neparametrického testování normality. Hypotézou H2 byla zkoumána časová závislost koncentrací čpavku a vodíku pomocí regresní analýzy. V případě ověřování hypotézy H3 byla použita metoda regresní a korelační závislosti.

Ověřením hypotéz bylo prokázáno, že empirické rozdělení měření koncentrací vodíku a čpavku je většinou blízké teoretické normální distribuci. Dále bylo ověřeno, že lineární regresní funkce časové závislosti měření koncentrací čpavku a vodíku je v průběhu palivové kampaně blízká rovnoběžce s časovou osou. Lineární regresní a korelační analýzou bylo ověřeno, že korelace mezi koncentracemi vodíku a čpavku je na obou blocích obdobná a blízká silné pozitivní korelaci.

Za praktický přínos lze považovat prověření potřebné regresní a korelační vazby mezi čpavkem a generovaným vodíkem.

## **Klíčová slova**

Čpavek; vodík; jaderná elektrárna; regrese; korelace; reaktor; koncentrace

# **Analysis of selected chemical parameters of coolant of the primary circuit of the Temelín Nuclear Power Plant**

## **Abstract**

The aim of the thesis was to define the meaning of radiochemical processes which take place in coolant of the primary circuit of the Nuclear Power Plant; and to describe the way of measurement of chemical parameters. The second aim was to define the significance of dissolved hydrogen to compensate for corrosion-threatening corrosion-safe operation of plant and to describe the method of generating hydrogen by ammonia. The third aim was to investigate the time courses of ammonia and hydrogen concentrations within the two production units. The last aim was to investigate unilateral dependence between ammonia and hydrogen concentrations.

The first two aims were met by using system analysis of coolant chemical parameters, methods of measuring them, and ongoing radiochemical processes in the coolant. Ammonia and hydrogen were selected for deeper investigation, because of the results of the analysis. H1, H2 and H3 hypotheses have been formulated to meet the other two aims. The H1 hypothesis was used to verify the empirical distribution of ammonia and hydrogen concentration measurements by non-parametric normality testing. Hypothesis H2 investigated the time dependence of ammonia and hydrogen concentrations by regression analysis. In case of verification of H3 hypothesis the method of regression and correlation dependency was used.

The verifying of hypothesis has shown that the empirical distribution of the measurement of hydrogen and ammonia concentrations is more closely related to the theoretical normal distribution. Furthermore, it was verified that the linear regression function of the time dependence of ammonia and hydrogen concentration measurements is close to the parallel to the timeline during the fuel campaign. Linear regression and correlation analysis confirmed that the correlation between hydrogen and ammonia concentrations is similar on both blocks and close to strong positive correlation. Verification of required regressive and correlative bending between ammonia and generated hydrogen can be understood as a practical contribution.

## **Keywords**

Ammonia; hydrogen; nuclear power plant; regression; correlation; reactor; concentration

# OBSAH

1	TEORETICKÁ ČÁST .....	11
1.1	Funkční popis jaderného reaktoru VVER 1000 .....	11
1.2	Proces vytvoření a udržování řetězové štěpné reakce .....	12
1.3	Všeobecný popis systému primárního okruhu .....	13
1.4	Hlavní cirkulační potrubí .....	13
1.4.1	Kompenzátor objemu .....	14
1.4.2	Barbotážní nádrž .....	14
1.4.3	Parogenerátor .....	15
1.4.4	Primární okruh – materiálové složení .....	16
1.5	Požadavky na chemický režim chladiva primárního okruhu .....	16
1.6	Chemické požadavky .....	17
1.6.1	Kyselina boritá .....	17
1.6.2	Amoniak .....	18
1.6.3	Rozpuštěný kyslík .....	19
1.6.4	Rozpuštěný vodík .....	19
1.6.5	Draslík, lithium a sodík .....	20
1.6.6	pH chladiva primárního okruhu .....	20
1.6.7	Příprava a skladování reagentů .....	22
1.7	Dávkování reagentů do chladiva .....	23
1.8	Radiochemické procesy a interakce v chladivu .....	24
1.8.1	Radiolýza vody a chemických látek .....	24
1.8.2	Jaderné aktivační reakce .....	26
1.8.3	Produkce tritia .....	26
1.8.4	Radioaktivní izotopy .....	28
1.8.5	Produkce uhlíku $^{14}\text{C}$ .....	28
1.8.6	Interakce chladiva a pokrytí paliva .....	29
1.8.7	Negativní vliv vodíku .....	32
1.8.8	Negativní vliv kyslíku .....	33
1.8.9	Nízkoteplotní oxidace – koroze .....	33
1.8.10	Vysokoteplotní oxidace – transformace .....	34
1.8.11	Koroze konstrukčních materiálů .....	34
1.8.12	Normy chemického režimu .....	35

1.9	Měření koncentrace chemických složek v chladivu.....	37
1.9.1	Měření čpavku, draslíku a lithia .....	38
1.9.2	Měření rozpuštěného vodíku .....	39
1.9.3	Měření kyslíku .....	40
1.9.4	Měření kyseliny borité .....	40
2	CÍL PRÁCE A HYPOTÉZY .....	41
2.1	Cíle práce .....	41
2.2	Hypotézy .....	41
3	METODIKA VÝZKUMU.....	43
3.1	Sběr naměřených dat .....	43
3.1.1	Příprava naměřených dat .....	43
3.2	Metody deskriptivní statistiky.....	44
3.2.1	Formulace statistického šetření.....	44
3.2.2	Škálování .....	45
3.2.3	Měření .....	47
3.2.4	Elementární statistické zpracování .....	48
3.3	Metody matematické statistiky .....	53
3.3.1	Neparametrické testování .....	53
3.3.2	Měření statistických závislostí.....	56
4	VÝSLEDKY .....	59
4.1	Vyhodnocení cíle 1 .....	59
4.2	Vyhodnocení cíle 2 .....	60
4.3	Vyhodnocení cíle 3 .....	61
4.3.1	Formulace statistického šetření.....	61
4.3.2	Příprava dat .....	62
4.3.3	Škálování .....	63
4.3.4	Grafy a tabulky .....	65
4.3.5	Výpočty empirických parametrů .....	69
4.4	Ověření hypotézy H1 .....	71
4.5	Ověření hypotézy H2 .....	77
4.5.1	Regresní analýza pro SZ <sub>1</sub> a SZ <sub>2</sub> – HVB1 .....	78
4.5.2	Regresní analýza pro SZ <sub>3</sub> a SZ <sub>4</sub> – HVB2 .....	80
4.6	Vyhodnocení cíle 4 .....	83

4.6.1	Ověření hypotézy H3 pro HVB1 .....	83
4.6.2	Ověření hypotézy H3 pro HVB2 .....	85
5	DISKUSE.....	88
5.1	Příprava a výběr dat .....	88
5.2	Měření koncentrací chemických látek a jejich dávkování .....	89
5.3	Ověření hypotézy H1 .....	91
5.4	Ověření hypotézy H2 .....	92
5.5	Ověření hypotézy H3 .....	93
6	ZÁVĚR .....	94
7	POUŽITÉ ZDROJE.....	96
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK .....	103
9	SEZNAM PŘÍLOH.....	105
10	SEZNAM ZKRATEK .....	106



## ÚVOD

Základním a prvořadým požadavkem pro provoz jaderné elektrárny je jeho bezpečnost. Plnění tohoto požadavku je pro provozovatele elektrárny strategickým úkolem s ohledem na obyvatelstvo, jeho blízké i široké okolí a v neposlední řadě také pro obsluhující personál. Cílem bezpečného provozu je zajistit jadernou bezpečnost při provozu takovým způsobem, aby se zabránilo nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakci a úniku ionizujícího záření do životního prostředí.

K zajištění jaderné bezpečnosti se uplatňuje celá řada dílčích principů a zásad. Patří k nim např. vysoká úroveň kultury bezpečnosti, dodržování principů ochrany do hloubky, vysoká kvalita provozního personálu, zajištění jakosti pro jednotlivá zařízení, důsledné ověřování, hodnocení, kontrola a celá řada dalších povinností vyplývajících z atomového zákona.

Ke splnění podmínek bezpečného provozu elektrárny patří také ochrana základních fyzických bariér, které zamezují případnému úniku radioaktivních látek a ionizujícího záření mimo zónu primárního okruhu. Těmito bariérami jsou pokrytí palivových proutků, konstrukce primárního okruhu a kontejnment. Velký význam pro ochranu jmenovaných bariér, konkrétně pro pokrytí paliva a konstrukci primárního okruhu, má voda, přesněji řečeno její chemické složení. Ačkoliv to nemusí být na první pohled patrné, voda má zásadní vliv na životnost konstrukcí základních komponent. Z tohoto důvodu je nutné upravovat její vlastnosti pomocí dávkování chemických látek s ohledem na korozi konstrukčních materiálů.

V diplomové práci je pozornost zacílena na způsob vedení chemického režimu chladiva primárního okruhu s ohledem na korozi konstrukčních materiálů. Bude vymezen význam dávkovaných chemikálií a popsány základní radiochemické procesy, odehrávající se v extrémních podmínkách aktivní zóny reaktoru. Popsány budou chemické látky, které vznikají radiolytickým rozkladem a svými vlastnostmi mohou negativně ovlivňovat korozní děje v použitých konstrukčních materiálech komponentů primárním okruhu.

Pro účely diplomové práce bude pro bližší zkoumání z chemických složek chladiva primárního okruhu vybrány čpavek a vodík. Pro vodík, vyskytující se v chladivu primárního okruhu v rozpuštěné formě, bude vymezen jeho význam pro kompenzaci vlivů ohrožujících korozní děje vlivem radiolyticky vzniklého kyslíku. Význam čpavku,

dávovaného do primárního okruhu, tkví v jeho radiolytickém rozkladu v aktivní zóně reaktoru na vodík a dusík. Tímto procesem je tak dána jednostranná závislost mezi koncentracemi čpavku a vodíku.

Ke zkoumání bylo vybráno celé období palivové kampaně, na kterém byla pomocí statistického šetření hodnocena empirická distribuce časových měření koncentrací vodíku a čpavku v rámci obou výrobních bloků. Měření statistické závislosti koncentrací čpavku a vodíku bylo šetřeno formou regresní a korelační analýzy.

Při zpracování teoretické části budou pomocí systémové analýzy probíhajících procesů v chladiči primárního okruhu formulovány hypotézy, které budou následně ověřovány statistickými metodami. Po vymezení metodiky práce budou vybraná data podrobena statistickému zkoumání a prezentovány jeho výsledky. V rámci diskuse bude provedeno zhodnocení výsledků stanovených cílů a ověřovaných hypotéz. V závěru práce bude provedeno celkové shrnutí výsledků včetně uvedení praktických a teoretických přínosů.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

Při výrobě elektrické energie probíhá na jaderné elektrárně celá řada procesů přeměny energie. Na počátku procesu je energie jaderná, která se postupně mění probíhajícími fyzikálními procesy na energii elektrickou. Důležitou roli má zde voda, která má celou řadu funkcí. Plní zde funkci zpomalovače rychlých neutronů, které jsou potřebné pro štěpení uranu. Voda je přenašečem energie z primárního okruhu na sekundární okruh. Ve formě páry roztáčí turbínu, ke které je připojen turbogenerátor vyrábějící elektřinu. Odvádí přebytečné teplo z chladicích okruhů. Voda a zejména příměsi v ní obsažené mají řadu vlastností, které komplikují provoz elektrárny a tyto nevýhody je nutné co nejvíce eliminovat. Toho se dosahuje vhodnou modifikací chemického režimu vod s ohledem na její funkci v technologických celcích a především také s ohledem na životnost systémů elektrárny (Hanus, 2011). Použití vody je tedy doprovázeno problémy, kdy je nutné najít kompromis s ohledem na konstrukční materiály. Potlačení korozivních nebo inkrustačních vlastností vody patří na elektrárně k důležitým úkolům oddělení chemických režimů. Za tímto účelem se do vody dávkuje různé chemikálie tak, aby její složení bylo co nejvhodnější (Zach et al., 2016).

## 1.1 Funkční popis jaderného reaktoru VVER 1000

Jaderný heterogenní, tlakovodní lehkovodní reaktor VVER 1000 – typ V 320 je určen pro výrobu elektrické energie, jehož jmenovitý tepelný výkon je 3120 MWt. Tepelná energie je zde získávána řetězovou štěpnou reakcí. Jako palivo je používán štěpný materiál obohacený o  $^{235}\text{U}$  ve formě oxidu uraničitého. K tomu, aby došlo ke kontrolované štěpné reakci, je potřeba zpomalit, resp. zachytit uvolněné neutrony. Ke zpomalení neutronů na tzv. tepelné neutrony zde slouží moderátor, kterým je chemicky čistá voda. Za účelem pohlcení přebytečných neutronů se do této vody dávkuje kyselina boritá. Roztok kyseliny borité je tedy ve své podstatě moderátorem, absorbátorem a chladičem aktivní zóny jaderného reaktoru zároveň (Kolát a Tomášek, 2012).

Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, tepelná energie je v aktivní zóně reaktoru získávána štěpnou reakcí. Při štěpení uranu ( $^{235}\text{U}$ ) dochází po absorpci tepelného neutronu k rozdělení jeho jádra na dvě nebo více částí (tzv. štěpné trosky) a zároveň se uvolní dva až tři neutrony spolu s doprovodným ionizujícím zářením. Tyto produkty štěpení dále

předávají svoji kinetickou energii okolním atomům, které tímto rozkmitávají. Důsledkem tohoto procesu je zvýšení teploty okolního materiálu, resp. pokrytí jaderného paliva. Zahřáté palivové články jsou následně ochlazovány cirkulující chladicí vodou, jež je dále vedena do parogenerátoru, kde předává část své tepelné energie sekundární vodě, kterou mění v páru. V další fázi přeměny energie tato pára pohání turbogenerátor, ve kterém se tepelná energie mění na kinetickou (otáčení generátoru) a následně na energii elektrickou (Blažek et al., 2017). V tabulce 1 jsou pro přehled uvedeny základní technické parametry jaderného reaktoru JE Temelín.

**Tabulka 1 – Technické parametry reaktoru**

<b>Technické parametry reaktoru</b>	
Výška tlakové nádoby	10,9 m
Vnitřní průměr tlakové nádoby	4,1 m
Vnější průměr tlakové nádoby	4,5 m
Celková síla stěny válcové části nádoby	200 mm
Tloušťka výstelky z austenitické oceli	7 mm
Celková výška horního bloku	19,1 m
Celková hmotnost	cca 800 t
Výška horního bloku	8,2 m

*Zdroj: (ČEZ, 2019)*

## **1.2 Proces vytvoření a udržování řetězové štěpné reakce**

Proces řetězové štěpné reakce je výsledkem dělení jaderného paliva (těžkých atomových jader izotopu uranu  $^{235}\text{U}$ ) a spontánního rozpadu zbytků štěpení v aktivní zóně reaktoru, při kterém se objevují volné tzv. rychlé neutrony (10 MeV). Tyto rychlé neutrony jsou zpomaleny moderátorem (voda), přičemž mu odevzdávají část své energie a mění se tak na tzv. tepelné neutrony (0,025 MeV). Právě tyto tepelné neutrony mají schopnost štěpit jádra uranu  $^{235}\text{U}$  způsobují a zakončují proces štěpné řetězové reakce. Výsledkem řetězové reakce jsou opět nově generované rychlé neutrony, jež jsou výše pospaným způsobem přeměňovány na tepelné neutrony a účastní se dalšího štěpení (Blažek et al., 2017). Při štěpení jader uranu  $^{235}\text{U}$  se uvolní průměrně  $2,5 \pm 0,1$  nových neutronů. Na každý neutron účastníci se štěpení vzniká tedy průměrně 2,5 nových neutronů. Reálně je

počet uvolněných neutronů vždy rovný nule nebo celému číslu, avšak v průměru být celým číslem být nemusí. (Glasstone a Edlung, 1952). Aby nedošlo k exponenciálnímu nárůstu počtu štěpení, přidává se do chladiva primárního okruhu bór ve formě kyseliny borité. Atomy bóru (izotop  $^{10}\text{B}$ ) mají schopnost absorbovat přebytečné neutrony. Pro rychlé odstavení reaktoru, respektive štěpné jaderné reakce, se používají tzv. regulační tyče obsahující atomy bóru či kadmia, které pohlcují uvolňované neutrony, čímž zastavují řetězovou štěpnou reakci (Adair, 2007).

### **1.3 Všeobecný popis systému primárního okruhu**

Na zařízení jaderného reaktoru, ve kterém v aktivní zóně probíhají štěpné reakce, navazují další zařízení, která jsou součástí primárního okruhu. Funkcí těchto součástí je odvod tepelné energie. Vzniklá tepelná energie je odváděna pomocí čtyř cirkulačních smyček o světlosti DN 850. Na horkou větev, která vede ohřátou vodu z aktivní zóny reaktoru je napojen parogenerátor. V parogenerátoru posléze na teplosměnných plochách dochází k přenosu tepla vodě sekundárního okruhu. Takto ochlazená voda se vrací studenou větví směrem k hlavnímu cirkulačnímu čerpadlu, které vodu čerpají zpět do reaktoru (Blažek et al., 2017).

### **1.4 Hlavní cirkulační potrubí**

Jak již bylo naznačeno v předchozí kapitole hlavní cirkulační potrubí tvoří čtyři smyčky. Každá smyčka je tvořena třemi částmi (Blažek et al., 2017):

- horká větev – vedoucí od horkého nátrubku reaktoru k nátrubku horkého kolektoru parogenerátoru;
- studená větev – vedoucí od nátrubku studeného kolektoru parogenerátoru k nátrubku na sání hlavního cirkulačního čerpadla;
- studená větev – vedoucí od nátrubku na výtlačku hlavního cirkulačního čerpadla ke studenému nátrubku reaktoru.

Materiálově je hlavní cirkulační potrubí tvořeno legovanou ocelí 10GN2MFA, přičemž je její vnitřní část tvořena dvouvrstvou výstelkou tvořenou austenitickou korozivzdornou ocelí 08CH18N10T. Jednotlivé části jsou pospojovány svařováním. Na jednotlivých

smyčkách jsou navařeny nátrubky pro připojení dalších navazujících systémů (Blažek et al., 2017).

#### ***1.4.1 Kompenzátor objemu***

Kompenzátor objemu slouží k vytváření tlaku v primárním okruhu a jeho regulaci. Při najíždění reaktoru do provozu se v kompenzátoru objemu vytváří potřebný tlak vháněním dusíku do prostoru nad hladinou a při provozu pomocí parního polštáře. Takto se kompenzuje tlak při ohřívání a ochlazování chladiva uvnitř kompenzátoru. Kompenzátor objemu je připojen ke čtvrté horké větvi. Pro snížení tlaku v primárním okruhu je kompenzátor objemu vybaven odlehčovacím ventilem a dvěma pojistnými ventily. Tyto ventily jsou vyústěny do společného výfukového potrubí, ústící pod hladinou barbotážní nádrže (Blažek et al., 2017).

Ve spodní části kompenzátoru objemu jsou zabudovaná topná tělesa. V jeho horní části je umístěný sprchovací systém, do kterého je přiváděna ochlazená voda ze studené větve. Pro přívod dusíku jsou na jeho horní straně (např. měřicí) umístěny nátrubky (Blažek et al., 2017).

#### ***1.4.2 Barbotážní nádrž***

Barbotážní nádrž je určena pro příjem plynů a par odpouštěných z kompenzátoru objemu přes odlehčovací a pojistné ventily. Je to válcová horizontálně orientovaná nádoba, která je vybavena barbotážním a ochlazovacím systémem a pojistnými membránami. Uvnitř nádoby je ochlazovací trasa tvořená trubkovým hadem, ve kterém proudí chladicí voda vloženého okruhu chlazení. Pod hladinou je zaústěno potrubí vedoucí od výfuku pojistných ventilů v kompenzátoru objemu. Další nátrubky jsou součástí této nádrže např. pro přívod vody k zaplnění nádrže, vypouštění kondenzátu, přívod dusíku, odvzdušnění, měření hladiny apod. (Blažek et al., 2017).

### 1.4.3 Parogenerátor

Parogenerátor je horizontálně orientovaná tlaková nádoba. Jak vyplývá už z jeho názvu, je určen k výrobě páry, která pohání turbogenerátor. Dochází zde k přenosu tepelné energie z primárního do sekundárního okruhu. Je svařena ze čtyř částí, dvou kroužků a dvou eliptických den. Do parogenerátoru je zaústěno hlavní cirkulační potrubí primárního okruhu. V parogenerátoru jsou umístěny kolektory, do kterých je připojeno a zatěsněno válcováním a svarem 10 000 teplosměnných trubiček. Trubičky jsou z oceli 08CH18N10T o průměru  $16 \times 1,5$  mm (Blažek et al., 2017).

V tabulce 2 jsou uvedené základní parametry parogenerátoru použitého na JE Temelín. Tabulka 3 znázorňuje orientační chemické složení trubkového systému parogenerátoru a většiny ostatních zařízení, jež jsou včleněna do primárního okruhu.

**Tabulka 2 – Parogenerátor**

<b>Parogenerátor</b>	
Počet na blok	4
Vstupní/výstupní teplota na primární straně	320/290 °C
Vstupní/výstupní teplota na sekundární straně	220/278,5 °C
Tlak	6,3 MPa
Množství vyrobené páry	1 470 t/h
Objem primární/sekundární strany	21/66 m <sup>3</sup>
Maximální délka tělesa parogenerátoru	4,1 m
Hmotnost parogenerátoru	416 t

*Zdroj: (ČEZ, 2019)*

**Tabulka 3 – Chemické složení trubek parogenerátoru (v %)**

<b>Parametr</b>	<b>C</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ti</b>	<b>Cu</b>
08CH18N	<0,0	<0,0	<0,0	<0,7	<2,0	10-11	17-19	<0,0	<0,6	<0,3

*Zdroj: (Zach et al., 2016)*

#### 1.4.4 Primární okruh – materiálové složení

Primární okruh, respektive jeho materiálové složení, je významně ovlivňováno prostřednictvím chladicí vody. Primární okruh, především však plochy pokrytí paliva a teplosměnné trubky v parogenerátorech patří k nejdůležitějším plochám z hlediska posuzování korozivních vlastností chladiva. Materiály těchto zařízení zde čelí extrémním teplotám při přenosu tepla, kterým jsou vystaveny prostřednictvím jaderných reakcí v aktivní zóně reaktoru. Na povrchu primárního okruhu, včetně povrchu pokrytí paliva, rovněž dochází k úsadám pevných částic a tvorbě radiačních polí od aktivovaných korozních produktů (Zach et al., 2016). Pokrytí jaderného paliva použitého na Jaderné elektrárně Temelín je vyrobeno ze slitiny E110, jejíž chemické složení je uvedeno v tab. 4.

Tabulka 4 – Chemické složení E110 (v %)

Parametr	Nb	Sn	Fe	Cr	Ni
E110	0,9 ÷ 1,1	0,05	0,07	0,02	0,02

Zdroj: (Zach et al., 2016)

#### 1.5 Požadavky na chemický režim chladiva primárního okruhu

Jak již bylo uvedeno v úvodu práce, základním úkolem chladiva primárního okruhu je zajištění odvodu tepla z aktivní zóny reaktoru a jeho přenos prostřednictvím parogenerátoru do sekundárního okruhu. Zároveň tato voda plní funkci moderátora rychlých neutronů a je rovněž nosným médiem pro rozpustné látky, které distribuují do celého primárního okruhu. Je tedy patrné, že voda použitá jako chladivo s sebou nese řadu problémů, které vyžadují mnohá kompromisní řešení ve vztahu k použitým materiálům v primárním okruhu (Zach et al., 2016).

Svémi chemickými vlastnostmi ovlivňuje chladivo provoz reaktoru a primárního okruhu těmito způsoby (Zach et al., 2016):

- a) vytváří a udržuje podmínky pro regulaci neutronového toku v aktivní zóně při provozu reaktoru a zamezuje samovolnému spuštění řetězové štěpné reakce během odstávky;



- b) zásadním způsobem ovlivňuje integritu bariér, tzn. pokrytí palivových proutků a hranice primárního okruhu;
- c) ovlivňuje zásadním způsobem tvorbu radiačních polí mimo aktivní zónu reaktoru.

Pro optimální provoz systémů primárního okruhu musí chladivo splňovat tyto požadavky (Zach et al., 2016):

- zamezovat selektivní korozi;
- způsobovat minimální úbytky konstrukčních materiálů zařízení;
- minimalizovat tvorbu nánosů a usazenin na teplosměnných plochách;
- neobsahovat absorbatory neutronů, které jsou nežádoucí;
- umožňovat regulaci výkonu reaktoru pomocí bóru;
- minimalizovat transport korozních produktů a jejich aktivaci v aktivní zóně a potlačovat kontaminaci primárního okruhu;
- minimalizovat obsah nečistot, které se svou aktivací stávají významnými radionuklidy;
- potlačovat koncentraci kyslíku, který vzniká v aktivní zóně reaktoru radiolytickým rozkladem vody;
- umožnit odstranění štěpných produktů z primárního okruhu v případě porušení pokrytí palivových proutků.

## 1.6 Chemické požadavky

V následujících kapitolách budou podrobněji rozebrány základní požadavky na chemické složení chladiva. Bude zde rovněž rozebrán vliv a důsledky použití vody jako chladiva a dávkovaných chemikálií, jež určují vlastnosti vody v podmínkách primárního okruhu.

### 1.6.1 Kyselina boritá

Kyselina boritá ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) má v chladivu primárního okruhu zásadní úlohu při provozu bloku. Pomocí kritické koncentrace kyseliny borité v chladivu je reaktor provozován na ustáleném výkonu a během kampaně se její koncentrace postupně snižuje.

Při provozu reaktoru jsou udržovány tři významné koncentrace kyseliny borité v chladivu primárního okruhu (Zach et al., 2017):

- kritická koncentrace – zajišťuje a odpovídá kritickému stavu reaktoru;
- odstavná koncentrace – zajišťuje podkritičnost aktivní zóny v podkritických režimech bloku;
- odstavná koncentrace – zajišťuje podkritičnost aktivní zóny při výměně paliva.

Kyselina boritá není silnou kyselinou, nepříznivě však ovlivňuje korozní rychlost konstrukčních materiálů použitých v primárním okruhu. Kyselost, kterou vnáší do chladiva je proto nutné kompenzovat přidáváním dalších chemických látek. Těmito látkami jsou draslík a čpavek. Tyto dvě složky tedy kompenzují aciditu kyseliny borité a upravují hodnotu pH chladiva na optimální úroveň. Bór se v přírodě vyskytuje ve směsi izotopů  $^{10}\text{B}$  a  $^{11}\text{B}$ , v poměrovém zastoupení  $^{10}\text{B}$   $19,9 \pm 7 \%$  (Haynes a Lide, 2011). Izotop bóru  $^{10}\text{B}$  je právě tím, který dokáže absorbovat přebytečné neutrony při regulaci neutronového toku (Zach et al., 2016).

### ***1.6.2 Amoniak***

Amoniak ( $\text{NH}_3$ ) se do chladiva primárního okruhu dává ve formě hydroxidu amonného ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) především za účelem generování vodíku. Účinek amoniaku na pH chladiva je závislý na teplotě chladiva. Při vysokých teplotách má velmi slabé alkalizační účinky, a naopak při nižších teplotách má nezanedbatelný vliv na hodnotu pH chladiva (Zach et al., 2016). Proces generování vodíku, respektive vzájemný vztah mezi amoniakem a vodíkem, bude popsán v dalších kapitolách.

**Jedním z hlavních úkolů strategie při řízení chemického režimu chladiva primárního okruhu je udržování zajištění takové koncentrace amoniaku, která zajistí optimální koncentraci vodíku v primárním okruhu (Zach et al., 2016).**

### ***1.6.3 Rozpuštěný kyslík***

Kyslík ( $O_2$ ) obsažený v chladivu primárního okruhu je nežádoucí z hlediska jeho korozivních vlastností. Způsobuje korozní praskání pod napětím a plošnou korozi austenitických nerez ocelí. Je příčinou také koroze materiálu pokrytí palivových proutků.

Minimalizace koncentrace kyslíku je dosahováno prostřednictvím odplynění doplňované vody a také pomocí hydrazinu ( $N_2H_4$ ) při najíždění bloku. Při najetí reaktoru na výkon je kyslík odstraňován pomocí dávkování amoniaku (Zach et al., 2016).

**Minimalizace koncentrace kyslíku v chladivu primárního okruhu a v doplňované vodě patří k hlavním požadavkům udržování chemického režimu chladiva primárního okruhu** (Zach et al., 2016).

### ***1.6.4 Rozpuštěný vodík***

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách pojednávajících o amoniaku a kyslíku, je nutné při provozu reaktoru na výkonu udržovat potřebnou koncentraci vodíku. Vodík ( $H_2$ ) je generován radiolytickým rozkladem amoniaku a rychlost jeho generace je závislá na koncentraci amoniaku v chladivu primárního okruhu a výkonu reaktoru. Skutečnost, že není znám obecný vztah (korelace) mezi koncentrací amoniaku (jeho radiolytickým rozkladem) a výkonem reaktoru, je překážkou při zajišťování potřebné koncentrace amoniaku. Z provozních zkušeností vyplývá, že k udržení potřebné koncentrace vodíku na různých blocích je koncentrace amoniaku různá. Problémem jsou i přechodové režimy a stavy, kdy nelze přesně determinovat potřebné množství dávkovaného amoniaku. Je však potřebné zajistit minimální koncentraci vodíku z důvodu zajištění maximální povolené koncentrace kyslíku v primárním okruhu. Zároveň je však stanovena maximální koncentrace vodíku, jelikož vodík způsobuje hydrogenaci slitin zirkonia a existuje riziko nežádoucího hromadění vodíku v systémech primárního okruhu (Zach et al., 2016).

**Jedním z hlavních úkolů při řízení chemického režimu chladiva při nominálním provozu reaktoru je udržování optimální koncentrace vodíku.**

Riziko vzniku výbušné koncentrace vodíku se vzduchem (kyslíkem) při odstavování bloku je nutné minimalizovat stanovením odstavné koncentrace vodíku. Tato koncentrace

byla stanovena na 20 % teoretické rozpustnosti vodíku při teplotě pod 60 °C. Její hodnota byla stanovena na 3,2 Nml/l. Při odstavení reaktoru a jeho dehermetizování však stále existuje riziko vzniku výbušné koncentrace směsi vodíku a vzdušného kyslíku (Houser et al., 2012). Bylo proto konzervativně stanoveno, že při odstavování reaktoru a jeho následném dochlazování a roztěsnění bude v provozu odplyňování chladiva, jehož úkolem je snížit koncentraci rozpuštěného vodíku pod hodnotu 1 Nml/l (Zach et al., 2016).

#### ***1.6.5 Draslík, lithium a sodík***

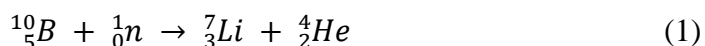
Dalšími chemickými složkami obsaženými v chladivu primárního okruhu, které ovlivňují pH chladiva jsou alkalické ionty draslíku, lithia a sodíku. Jejich koncentrace v chladivu udržují mírně zásaditý charakter chladiva primárního okruhu, který je z hlediska rychlosti koroze konstrukčních materiálů nejvýhodnější. Draslík se do primárního okruhu dává ve formě hydroxidu draselného (KOH). Lithium a sodík se dostávají do chladiva jako nečistoty obsažené v jiných chemikáliích nebo vznikají (lithium) jadernými reakcemi z jiných složek ( $H_3BO_3$ ). V chladivu reaktorů typu VVER jsou koncentrace lithia a sodíku menší než 1 mg/l. Maximální celkový obsah těchto alkálií (draslík, lithium, sodík) je stanoven na 0,5 mmol/l. Z hlediska minimalizace tvorby radiačních polí v okolí zařízení primárního okruhu od aktivovaných korozních produktů byl zaveden modifikovaný chemický režim chladiva, který zajistí optimální hodnoty vysokoteplotního  $pH_{300}$ . Pro reaktor VVER-1000 je jeho hodnota stanovena a udržována v rozmezí  $7,1 \pm 0,1$  při jejich maximální koncentraci (Zach et al., 2016).

**Udržování koncentrace alkalických iontů draslíku, lithia a sodíku, která zajistí optimální hodnotu vysokoteplotního  $pH_{300}$ , je jedním z hlavních úkolů chemického režimu chladiva primárního okruhu (Zach et al., 2016).**

#### ***1.6.6 pH chladiva primárního okruhu***

Důležitým a základním parametrem chladiva primárního okruhu je jeho pH, které má vliv na řadu dějů v primárním okruhu. Na pH primárního okruhu působí z větší či menší míry chemické látky, které jsou obsaženy v chladivu. Kyselina boritá, dávovaná do chladiva

je velmi slabou kyselinou, jejíž kyselost ještě klesá se vzrůstající teplotou. Další dávkovanou chemikálií je hydroxid draselný, který zvyšuje pH chladiva v celém rozsahu sledovaných teplot (nad 250 °C). Podobně jako kyselina boritá má na pH vliv také amoniak, kdy se vzrůstající teplotou klesá jeho disociace a tím i jeho schopnost zvyšovat hodnotu pH. Vedle výše zmíněných faktorů ovlivňujících pH je i několik dalších prvků či sloučenin, avšak jejich vliv je prakticky zanedbatelný. To se ovšem netýká dvou prvků, jimiž jsou sodík a lithium. Jejich teplotní závislost je velmi podobná draslíku. Vzhledem k tomu, že na začátku kampaně hrají významnou roli v ovlivňování pH chladiva především kyselina boritá a hydroxid draselný, jejichž koncentrace jsou relativně vysoké, je vliv sodíku a draslíku nevýrazný díky jejich menším koncentracím. V průběhu kampaně se však koncentrace kyseliny borité a hydroxidu draselného postupně snižují. Na konci kampaně se zvyšuje role především lithia, které se v chladivu tvoří jadernou reakcí s bórem, kdy lithium vzniká při zachytu neutronu atomem bóru ( $^{10}\text{B}$ ) (Zach et al., 2016). Reakce bóru s neutronem je znázorněna rovnicí (1).



Ačkoliv by tedy měla být koncentrace lithia v chladivu závislá na koncentraci bóru, není tomu tak, neboť v průběhu kampaně dochází ke kumulaci lithia v chladivu, a to do té míry, že se jeho koncentrace dokonce zvyšuje. Tato skutečnost značně komplikuje situaci při posuzování vlivu jednotlivých činitelů na pH při řízení pH prostřednictvím koncentrace hydroxidu draselného (Zach et al., 2016).

Z výše uvedených skutečností vyplývá, že existuje značný rozdíl v hodnotách pH chladiva ve studeném a horkém stavu. Z tohoto důvodu nelze brát v potaz při řízení chemického režimu hodnotu pH naměřenou v laboratorních podmínkách (při 25 °C). V reálných podmínkách provozu reaktoru však dosahuje teplota chladiva až 320 °C. Při takovém rozdílu teplot může být rozdíl mezi hodnotou naměřenou v laboratoři a skutečnou hodnotou až několik jednotek. Tento rozdíl vede až k řádovým chybám při stanovení koncentrací jednotlivých reagentů v chladivu. K určení skutečné hodnoty pH v reálných podmínkách byla stanovena veličina „vysokoteplotní pH“ (pH<sub>300</sub>). Jelikož tuto hodnotu nelze v extrémních teplotních podmínkách měřit, získává se tato hodnota

složitým výpočtem na základě znalosti koncentrace jednotlivých složek (Zach et al., 2016).

### ***1.6.7 Příprava a skladování reagentů***

Pro udržení požadovaného chemického složení se dávkuje chemické složky do chladiwa primárního okruhu. K tomuto účelu slouží na jaderné elektrárně systém nádrží a reagentů skládající se ze tří navzájem nezávislých subsystémů 1,2TB10, 1,2TB20 a 1,2TB30, přičemž každý z těchto subsystémů má rozdílnou funkci (Capůrka et al., 2016).

#### **Systém 1,2TB10**

Tento systém slouží k vytvoření zásoby a skladování bórového koncentrátu v zásobních nádržích ve formě vodného roztoku kyseliny borité o koncentraci cca 40 g/kg. Tento bórový koncentrát se do nádrží přivádí dvěma způsoby (Capůrka et al., 2016):

- čerpadly z čisticí stanice bórových vod (systém SVO6);
- čerpadly ze systému přípravy kyseliny borité (systém 0TB65).

V prvním výše uvedeném případě se jedná o systém regenerace kyseliny borité, kdy se na čisticí stanici regeneruje již použitý roztok kyseliny borité, jenž je odváděný do sběrných nádrží organizovaných úniků. V druhém případě jde o nově vyrobený koncentrát, který se připravuje v systému přípravy kyseliny borité, který je umístěný v budově pomocných aktivních provozů. V případě potřeby doplnění bórového koncentrátu se nádrže přednostně plní ze systému regenerace kyseliny borité (Capůrka et al., 2016).

V případě nově připravovaného vodného roztoku kyseliny borité o potřebné koncentraci se používají nádrže 0TB60B01, B02, ve kterých se mícháním rozpouští kyselina boritá, která je dodávána v krystalickém stavu. Po jejím dokonalém rozmíchání a provedené chemické analýze se roztok přečerpá do zásobních nádrží 0TB65B01, B02, ve kterých se opět roztok promíchá recirkulačními čerpadly. Po ukončení míchání se provede chemická analýza a jsou-li výsledky vyhovující, je obsah v případě potřeby přečerpán dále do navazujících systémů (Kibus et al., 2016).

## **Systém 1,2TB020**

Systém slouží, stejně jako v předešlém případě, k vytvoření zásoby a skladování chemických reagentů v zásobních nádržích 1,2TB21B01, 1,2TB22B01 a 1,2TB23B01. které se používají k úpravě chemického režimu chladiva primárního okruhu. Jde o vodné roztoky hydrazinu ( $N_2H_4$ ), čpavkovou vodu ( $NH_4OH$ ) a hydroxidu draselného (KOH). Tyto chemikálie se do zmíněných nádrží čerpají z nádrží systému přípravy reagentů subsystémů 0TB50, 80, 90 umístěných v budově pomocných aktivních provozů. Nádrže 1,2TB21B01 se plní 4–6% roztokem hydroxidu amonného, nádrže 1,2TB22B01 2–4,9% roztokem hydrazinu a nádrže 1,2TB23B01 2–4% roztokem hydroxidu draselného. Tyto nádrže jsou připravené k dávkování reagentů do chladiva primárního okruhu (Capúrka et al., 2016).

### **1.7 Dávkování reagentů do chladiva**

Chemikálie připravené v nádržích jsou dle potřeby dávkovány do chladiva primárního okruhu automaticky nebo v případě potřeby také „ručně“.

#### **Dávkování bórového koncentrátu do chladiva**

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, kyselina boritá je dávkována do chladiva primárního okruhu za účelem regulace tepelných neutronů jejich absorpcí (bórová regulace). Vhodnou koncentrací tak reguluje počet neutronů, které se zúčastňují štěpné reakce a udržuje štěpnou reakci na kritickém stavu. Na začátku palivové kampaně je koncentrace kyseliny borité v chladivu cca 6 g/kg a na konci se hodnota koncentrace blíží nule. Z toho vyplývá, že se její koncentrace ředěním postupně snižuje z důvodu vyhořívání jaderného paliva. Na konci palivové kampaně se po odstavení reaktoru kyselina boritá dávkuje na hodnotu koncentrace cca 14 g/kg. Takto vysoká koncentrace tak brání nekontrolovanému rozboji štěpné reakce (Capúrka et al., 2016).

#### **Dávkování chemických reagentů do chladiva**

Potřeba doplňování chemických reagentů vyplývá z potřeby udržování potřebného chemického režimu, z důvodu jejich ztrát při odplyňování chladiva v odplyňovači doplňování, při odpouštění chladiva do nádrží nečistého kondenzátu při vodovýměnách a při organizovaném i neorganizovaném úniku chladiva.

Roztok hydroxidu draselného se dávkuje do chladiva k udržení optimální hodnoty pH média, k omezení korozivních účinků chladiva na konstrukční materiál primárního okruhu. Její dávkování je závislé na koncentraci kyseliny borité. Nejvíce se KOH dávkuje na začátku kampaně a na konci kampaně při provozu reaktoru na výkonový efekt. Roztok čpavku je dávkován za účelem udržení bezkyslíkatého režimu chladiva, kdy radiolýzou čpavku vzniklý vodík eliminuje korozivní účinky radiolytického kyslíku na konstrukční materiál. Roztok hydrazinu se dávkuje ze stejného důvodu jako čpavek. Na rozdíl od čpavku však hydrazin reaguje s kyslíkem za nižších teplot bez potřeby účinku radiace. Dávkuje se tak při do nedostatečně odplyněného chladiva při jeho ohřevu před uvedením reaktoru do výkonového stavu a jeho koncentrace se udržuje ve 2–3násobném přebytku vzhledem k aktuální koncentraci kyslíku.

Dávkování uvedených reagentů závisí přímo na provozních režimech bloku a je vázán na systém 1,2TK. Doplnění se realizuje pomocí nízkotlakých nebo vysokotlakých čerpadel, která jsou napojena na sání čerpadel systému 1,2TK. Při potřebě korekce chemického režimu chladiva se nastaví trasa zvolené nádrže s reagentem k čerpadlu 1,2TK. Doba sání je potom závislá na činnosti doplňovacích čerpadel, která jsou ovládána dálkově operátorem primárního okruhu z blokové dozorny. Po dosažení požadovaného chemického složení chladiva se dávkování reagentu ukončí. Potřebné množství dávkované chemikálie nebo udržení potřebné koncentrace reagentu v chladivu určuje technolog chemických režimů (Capůrka et al., 2016).

## **1.8 Radiochemické procesy a interakce v chladivu**

V následujících kapitolách budou popsány některé důležité radiochemické procesy, kterým dávkované chemikálie podléhají při provozu reaktoru v extrémních podmínkách aktivní zóny reaktoru. Zmíněny budou i některé další důležité chemické procesy z hlediska interakcí chladiva s materiály použitými v zařízeních primárního okruhu.

### ***1.8.1 Radiolýza vody a chemických látek***

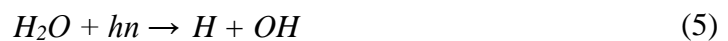
V extrémních podmínkách aktivní zóny reaktoru je chladivo, a látky v něm obsažené, vystaveno velice silnému neutronovému toku a radiaci. Dochází zde proto k celé řadě



radiolytických reakcí, které vedou k rozkladu vody a některých dalších v ní obsažených látek. Reaktivita takto vzniklých produktů je natolik velká, že by mohla velmi negativně ovlivnit stabilitu konstrukčních materiálů. Toto nebezpečí je nejvyšší zejména pro použité materiály v aktivní zóně, tedy v místech, která jsou nejbližší rozkladným procesům. Komplex reakcí radiolytického rozkladu vody je znázorněn rovnicemi (2, 3 a 4) (Zach et al., 2016).



Jak je z výše uvedených rovnic patrné, výsledkem těchto reakcí je vznik oxidačních radikálů a kyslíku, jejichž nepříznivý účinek je nutné účinně potlačit. Toho se dosahuje zajištěním přebytku volného vodíku v chladivu primárního okruhu. V předešlých kapitolách jsme si vysvětlili, které chemikálie a z jakého důvodu se do chladiva přidávají a víme tedy, že pro odstranění kyslíku se do chladiva primárního okruhu v reaktorech typu VVER dávkuje amoniak, který stejně jako voda podléhá radiolytickému rozkladu v aktivní zóně reaktoru. Probíhající rozkladné reakce jsou orientačně popsány v rovnicích (5, 6, 7 a 8) (Zach et al., 2016).



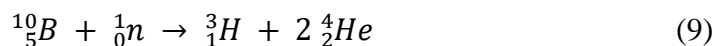
### 1.8.2 Jaderné aktivační reakce

Tak jako některé chemické sloučeniny podléhají rozkladným procesům, které byly popsány v předešlé kapitole, způsobuje silný neutronový tok v aktivní zóně reaktoru vznik mnoha nových nuklidů, z nichž jsou některé radioaktivní. Neutrony nemají žádný náboj, tudíž mohou snadno pronikat do jader atomů. Jednoduchou neutronovou reakcí je radiační záchyt neutronu jádrem atomu prvku (radiační fúze). Při této jaderné reakci neutron zůstává v jádře atomu. Do vzniklého nového jádra vnáší neutron svou kinetickou energii, díky níž je jádro v excitovaném stavu. Při deexcitaci jádro následně emituje foton  $\gamma$ . Tuto jadernou reakci zapisujeme jako  $(n, \gamma)$ . Často také takové nové jádro (izotop prvku) vykazuje radioaktivitu  $\beta^-$ . Neutrony však mohou vyvolat i další reakce, při kterých se emitují další částice. Tyto reakce probíhají zvláště při vysokých kinetických energiích neutronů. K takovým reakcím patří například  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, d)$  případně také  $(n, 2p)$  (Ullmann, 2009). Některé aktivační reakce probíhající v aktivní zóně reaktoru si uvedeme v následujících kapitolách.

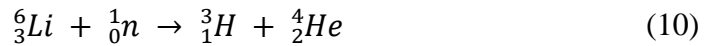
### 1.8.3 Produkce tritia

Na jaderné elektrárně je tritium ( $^3\text{H}$ ) generováno následujícími několika způsoby jaderných reakcí atomů s neutrony (Zach et al., 2016; Vácha, 2013).

Tritium vzniká v chladivu primárního okruhu v aktivní zóně reaktoru zejména absorpcí neutronu izotopem bóru ( $^{10}\text{B}$ ). Tato reakce je znázorněna následující rovnicí (9).



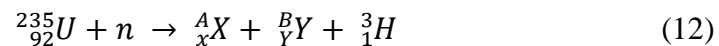
Dalším prvkem, který svou přítomností v chladivu podléhá reakci s neutrony je izotop lithia ( $^6\text{Li}$ ). Lithium se dostává do chladiva jako nečistota přítomná v jiných dávkovaných chemikáliích a také dle výše popsané reakce (1) reakcí neutronu s bórem. Rovnice (10) znázorňuje reakci lithia s neutronem za vzniku tritia a jádra helia.



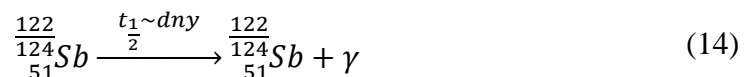
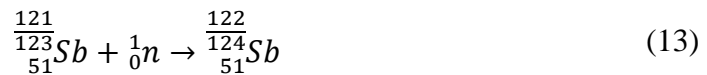
Zdrojem tvorby tritia (11) je také deuterium ( ${}^2\text{H}$ ), které však přispívá k produkci tritia velmi málo (cca 1 %).



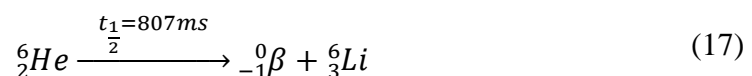
Zmíníme zde také tzv. trojné štěpení (12), které však nepřispívá k celkové produkci tritia v chladivu. Probíhá totiž přímo v palivu a v případě těsnosti pokrytí palivových proutků tak neprojde přes tuto bariéru do chladiva (Andrieu et al., 2005).



Na produkci tritia se nemalou měrou podílejí také sekundární neutronové zdroje, jejichž možný příspěvek do nedávné doby nebyl znám. Hypotézu, že právě sekundární neutronové zdroje jsou příčinou zvýšené produkce tritia na jaderné elektrárně Temelín potvrdil svými výpočty Vácha (2013). Tyto sekundární zdroje obsahují směs 50/50 antimón-berylliových tablet, které podléhají jaderným reakcím s rychlými neutrony. Reakce jsou níže znázorněny vztahy (13, 14 a 15).



Beryllium  ${}^9\text{Be}$ , obsažené v sekundárních zdrojích podléhá reakcím (16, 17 a 18), při kterých vzniká lithium  ${}^6\text{Li}$ . Jak jsme se již zmínili na začátku této kapitoly, právě z lithia  ${}^6\text{Li}$  vzniká významné množství tritia.





Skutečnost, že antimon-berylliové pelety jsou pórovité a vzniklé tritium se dostává do styku s pokrytím, jež je z nerezové oceli, tak umožňuje tritium pronikat bez obtíží do chladiva primárního okruhu (Van Engen a Ainsworth, 1983).

#### 1.8.4 Radioaktivní izotopy

Neutronovými reakcemi vzniká celá řada dalších radioaktivních izotopů s krátkým, středním a dlouhým poločasem rozpadu. Vznikají jadernými reakcemi především typu (n,  $\gamma$ ) a (n, p). Následně se takto vzniklé izotopy přeměňují jadernými přeměnami na jiné radioaktivní nebo stabilní izotopy, které jsou doprovázeny emisí různých druhů částic (např.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , n, ...). Výskyt těchto produktů jaderných reakcí je monitorován a na základě jejich přítomnosti v chladivu se hodnotí stav pokrytí paliva, funkčnost čistících systémů a vedení chemického režimu.

Uvádíme zde některé zástupce radioaktivních izotopů dle poločasu jejich rozpadu (Zach et al., 2016):

- dlouhodobé (roky) –  ${}^{41}\text{Ca}$ ,  ${}^{59}\text{Ni}$ ,  ${}^{60}\text{Co}$ ,  ${}^{90}\text{Sr}$ ,  ${}^{94}\text{Nb}$ ,  ${}^{129}\text{I}$ ,  ${}^{137}\text{Cs}$ ,  ${}^{239,240}\text{Pu}$ ,  ${}^{241}\text{Am}$ ;
- střednědobé (dny až měsíce) –  ${}^{131}\text{I}$ ,  ${}^{133}\text{Xe}$ ,  ${}^{51}\text{Cr}$ ,  ${}^{54}\text{Mn}$ ,  ${}^{57}\text{Co}$ ,  ${}^{58}\text{Co}$ ,  ${}^{59}\text{Fe}$ ,  ${}^{95}\text{Zr}$ ,  ${}^{95}\text{Nb}$ ,  ${}^{124}\text{Sb}$ ;
- krátkodobé (sekundy až hodiny) –  ${}^{16}\text{N}$ ,  ${}^{134}\text{I}$ ,  ${}^{87}\text{Kr}$ ,  ${}^{135}\text{Xe}$ ,  ${}^{24}\text{Na}$ ,  ${}^{42}\text{K}$ .

Pro úplnost zde uvádíme také významné štěpné produkty, jejichž výskyt v chladivu slouží jako indikátor těsnosti pokrytí paliva. Patří k nim tyto dvě skupiny sledovaných izotopů:

- jód –  ${}^{131-135}\text{I}$ ;
- vzácné plyny –  ${}^{85\text{m}, 87, 88}\text{Kr}$ ,  ${}^{133, 135}\text{Xe}$ .

#### 1.8.5 Produkce uhlíku ${}^{14}\text{C}$

Izotop uhlíku  ${}^{14}\text{C}$  vzniká v jaderném reaktoru reakcemi neutronů s izotopy prvků obsaženými v palivu, konstrukčním materiálu a chladicí vodě primárního okruhu. Vzniká absorpcí neutronů v uhlíku, dusíku a kyslíku (Wallace, 1977; IAEA, 2004):

- $^{16}\text{O} (n, ^3\text{He}) ^{14}\text{C}$  – reakce s nízkým účinným průřezem ( $5,0 \cdot 10^{-8}$  barnů);
- $^{15}\text{N} (n, d) ^{14}\text{C}$  – reakce s nízkým účinným průřezem ( $2,5 \cdot 10^{-7}$  barnů);
- $^{13}\text{C} (n, \gamma) ^{14}\text{C}$  – reakce s velmi nízkým účinným průřezem ( $0,9 \cdot 10^{-13}$ );
- $^{17}\text{O} (n, \alpha) ^{14}\text{C}$  – reakce se záchytem tepelných neutronů s vysokým účinným průřezem (0,24 barnu);
- $^{14}\text{N} (n, p) ^{14}\text{C}$  – reakce s velmi vysokým účinným průřezem (1,84 barnu).

V údajích publikovaných v odborné literatuře se uvádí (EPRI, 2010; IAEA, 2004), že radioaktivní izotop uhlíku  $^{14}\text{C}$  se v tlakovodních jaderných reaktorech produkuje především jadernými reakcemi na dusíku  $^{14}\text{N}$ , kdy dochází k reakcím s dusíkem obsaženým v chladivu primárního okruhu, který se do něj dostává jako nečistota nebo zde vzniká jako produkt radiolytického rozkladu dávkovaného amoniaku. V přírodě se dusík nachází ve dvou stabilních izotopech  $^{14}\text{N}$  a  $^{15}\text{N}$  v poměru 99,634 / 0,336 % (King, 2005; Cotton a Wilkinson, 1980), z čehož vyplývá, že izotop  $^{14}\text{N}$  výrazně převládá a přispívá tak k produkci uhlíku  $^{14}\text{C}$  významnou měrou. K reakcím na kyslíku  $^{17}\text{O}$  dochází přímo v palivu, kde se kyslík nachází ve formě oxidu uraničitého  $\text{U}_2\text{O}$  a také v chladivu, ve kterém je kyslík přítomen (voda, kyselina boritá). Ve velmi malé míře vzniká také trojným štěpením v palivu, kdy se uran  $^{235}\text{U}$  a plutonium  $^{239}\text{Pu}$  štěpí na dvě těžké a jednu lehkou částici (IAEA, 2004). Hlavním zdrojem produkce uhlíku  $^{14}\text{C}$  v lehkovodním tlakovodním reaktoru je aktivace kyslíku  $^{17}\text{O}$  v molekule vody a dusíku  $^{14}\text{N}$ , rozpuštěné v chladivu primárního okruhu reaktoru (Vance et al., 1995).

### ***1.8.6 Interakce chladiva a pokrytí paliva***

K základním úkolům řízení chemického režimu chladiva primárního okruhu patří zamezení poškození pokrytí paliva vlivem interakce chladiva s pokrytím palivových proutků. Jak bylo již uvedeno v kapitole 1.4.4 (tab. 4) je pokrytí paliva tvořeno slitinou E110, jejíž dominantní složkou je zirkonium (Zach et al., 2016). Pokrytí paliva tedy chrání samotné palivo před účinky vnějšího prostředí a zabraňuje úniku produktů štěpení z palivového článku do chladiva. Musí mít též schopnost odolávat mechanickému namáhání při objemovém růstu palivových tablet v silném radiačním prostředí až do teplot kolem 800 °C (Raček, 2009). Ačkoliv je zirkonium velmi stabilní prvek, jsou vlastnosti jeho slitiny ovlivněny přísadkami legujících prvků, jejichž odolnost není

v extrémních podmínkách aktivní zóny reaktoru neomezená. Na rozhraní povrchu slitiny dochází k řadě procesů, které vedou k degradaci materiálu a ve svém důsledku mohou vést až k poruše celistvosti bariéry vedoucí úniku štěpných produktů do chladiva. Chladivem je potom tato kontaminace roznášena po celém primárním okruhu do všech jeho součástí. (Zach et al., 2016).

Korozním procesům může podléhat rovnoměrně celý povrch povlaku paliva nebo může docházet k modulární korozi, jež je omezená pouze na určitá místa. Produktem oxidace zirkonia, který podléhá působení vody, je oxid zirkonia  $ZrO_2$  (Zach et al., 2016). Na povlakový materiál působí v aktivní zóně reaktoru velmi nepříznivé vlivy (např.  $T \sim 320$  °C,  $P \sim 15,5$  MPa a silná radioaktivita) (Sialini a Saidl, 2014). Odolnost slitiny zirkonia je způsobena vznikem ochranné oxidické vrstvy na povrchu materiálu palivového pokrytí. Rychlost tvorby této oxidické vrstvy ( $ZrO_2$ ), a tím i rychlost koroze slitiny, způsobuje dominantním způsobem několik faktorů (Zach et al., 2016):

- provozní teplota;
- přítomnost lokálního povrchového svaru;
- hodnoty působení tlaku a teploty;
- radiace;
- a chemické složení chladiva, které může korozní procesy urychlovat nebo naopak zpomalovat.

Zirkonium se liší svým vnitřním uspořádáním. V první modifikaci je za nízkoteplotní fáze  $\alpha$ -Zr uspořádáno v hexagonální mřížce a ve druhé modifikaci ve vysokoteplotní fázi  $\beta$ -Zr je její uspořádání tvořeno kubickou, prostorově centrovanou mřížkou. K alotropní přeměně struktury dochází při 826 °C. K tání zirkonia dochází při teplotě 1850 °C, do této teploty je vysokoteplotní fáze stabilní. Zirkonium se vyznačuje svou chemickou stálostí a korozní odolností, kdy odolává působení minerálních kyselin a alkalických hydroxidů. Vykazuje také vysokou afinitu k vodíku, kyslíku a dusíku, kdy je při teplotách 300–1000 °C do struktury absorbován vodík, který zvyšuje tvrdost a zároveň způsobuje nežádoucí zvýšení jeho křehkosti (Periodická tabulka, 2009-2017; Emsley, 1998).

Slitiny zirkonia se používají při výrobě pokrytí paliva v drtivé většině jaderných reaktorů ve světě. Tyto materiály mají velmi dobrou schopnost odolávat koroznímu působení vody a mají také malý účinný průřez pro záchyt tepelných neutronů, které jsou klíčové pro

štěpnou reakci. K jejich nedostatkům však patří vlastnost, kdy při vysokých teplotách (nad 700 °C) velmi ochotně reagují s vodou, přičemž dochází k rozkladu na vodík a kyslík. Při této reakci dochází kromě rizika exploze vodíku (JE Fukušima) také k degradaci povlaku paliva a tím i k narušení jeho funkce (Atom.info, 2018).

Na materiál použitý k výrobě povlaku paliva, s ohledem na licenční požadavky pro nový typ jaderného paliva, jsou kladeny Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB) přísné požadavky již v oblasti projektu paliva. Je určena celá řada kritérií veličin týkající se poškození palivového systému a porušení palivového proutku. Mezi ně patří např. deformace povlaku palivového článku, napětí, únava a vibrace, axiální růst a celá řada dalších veličin. K důležitým veličinám však z hlediska chemického režimu patří především splnění kritérií oxidace a hydridace povlaku palivového proutku (SÚJB, 2005).

Korozi materiálu povlaku paliva způsobují procesy oxidace a hydridace. Oba procesy jsou negativně ovlivňovány přítomností pevných nerozpuštěných látek, které se mohou usazovat na vnějším povlaku palivových proutků. Těmito látkami jsou oxidy kovů, které pocházejí z konstrukčních materiálů primárního okruhu. Usazování těchto látek na povrchu povlaku má za následek zhoršení přenosu tepla z paliva do chladiva (Zach et al., 2016).

Reakce zirkonia s vodou je znázorněna rovnicí (19).



Korozní procesy lze ovlivnit řízením chemického režimu chladiva, a to dvěma způsoby (Zach et al., 2016):

- přímým vlivem – jednotlivé složky chladiva se podílejí na reakcích s materiálem povlaku;
- nepřímým vlivem – kdy chemické složení chladiva ovlivňuje schopnost pevných částic obsažených v chladivu se usazovat.

### **1.8.7 Negativní vliv vodíku**

Mechanické vlastnosti pokrytí paliva pomocí zirkoniových slitin mohou být oslabeny v důsledku absorpce vodíku do povrchu pokrytí. Tento proces hydridace je v úzké souvislosti se vznikem oxidické vrstvy na povrchu pokrytí. Kvalita a tloušťka této vrstvy značně ovlivňuje množství vodíku, které pronikne až do materiálu pokrytí. Část takto absorbovaného vodíku se v materiálu rozpustí a část zreaguje za vzniku hydridů. Tyto hydridy ve struktuře krystalizují a způsobují tím nehomogenitu materiálu a snižují tak jeho mechanickou odolnost. Projevem hydridace je křehnutí materiálu a zvyšuje se tak vznik tzv. „křehkého lomu“. Na křehnutí materiálu se podílí významnou měrou také ozařování materiálu rychlými neutrony. Negativně tak ovlivňuje chování a stav palivových elementů při provozu reaktoru, ale také při transportu, manipulacích a skladování palivových souborů (Zach et al., 2016).

V předchozím odstavci jsme se zmínili o procesu vnější hydridace povrchu materiálu pokrytí paliva. Pro úplnost je však třeba uvést, že stejnému procesu hydridace může za jistých podmínek podléhat pokrytí také z jeho vnitřní strany. Rozeznáváme primární a sekundární hydridace (IAEA, 2010; Garzarolli et al., 1979).

#### **Primární hydridace**

Primární hydridace je způsobena vnitřní zbytkovou vlhkostí v palivových peletkách. Jde v podstatě o výrobní vadu, kdy se do tabletek dostane voda při výrobním postupu jako např. při mokřém broušení. Při tomto procesu se do peletek dostává voda vlivem pórovitosti jejich povrchu. Vlhkost může do peletek proniknout také vlivem vlhkosti pracovního prostředí při manipulaci s nimi a při skladování. (Garzarolli et al., 1979). Příčinou hydridace mohou být také organické sloučeniny (kapičky oleje, těsnění z organického materiálu), které kontaminují materiál peletek. Při radiolýze se z nich může uvolnit vodík způsobující hydridace. Efektivní se ukázalo vysoušení peletek (při 150 °C), které sníží vlhkost peletek až o cca 60 % (IAEA, 2010).

#### **Sekundární hydridace**

V případě porušení pokrytí palivového proutku vniká chladivo dovnitř, kde způsobuje sekundární hydridace. Sekundární hydridace může způsobit kterýkoliv defekt, ať už jím je interakce paliva s pokrytím (bobtnání peletek), otěr palivového proutku o distanční mřížku nebo výrobní vada. Voda, která vnikne do palivového proutku, se mění v páru,



dokud není tlak uvnitř palivového proutku v rovnováze s tlakem primárního okruhu. Vzniknuvší pára podléhá radiolýze a ve směsi vzniklého plynu tak přibývá vodík. V případě, že koncentrace vodíku dosáhne kritické hodnoty, dojde k absorpci do materiálu pokrytí a způsobuje jeho křehnutí (IAEA, 2010).

#### ***1.8.8 Negativní vliv kyslíku***

Jedním z nejvýznamnějších faktorů, které ovlivňují korozní děje na slitině zirkonia E110 je kyslík. V chladiivu výrazně ovlivňuje korozi slitiny E110 společně s vysokými teplotami a radiací. Je tedy velmi žádoucí udržovat koncentraci volného kyslíku v chladiivu na co nejnižší úrovni. (Zach et al., 2016). Při výrobě zirkonia není prakticky technicky možné ho vyrobit v takové čistotě, aby neobsahoval kyslík. Při zpracování zirkonia se do slitiny dostává další množství kyslíku. Kyslík má také vliv na mechanické vlastnosti slitin zirkonia, kdy zvyšuje jeho tvrdost a pevnost, kterou vykazuje při nízkých i vysokých teplotách (Koutský a Kočík, 1994).

#### ***1.8.9 Nízkoteplotní oxidace – koroze***

Za nízkých teplot dochází k oxidaci reakcí vody s povrchem palivového pokrytí paliva, přičemž vzniká vrstva oxidu zirkoničitého  $ZrO_2$ . Disociovaný kyslík může touto vrstvou procházet až na její rozhraní s kovem, kdy část molekul kyslíku může difundovat do slitiny a jiné molekuly kyslíku reagují s oxidickou vrstvou  $ZrO_2$ , kdy dochází ke zvýšení tloušťky této vrstvy. Vrstva oxidu zirkonia je velmi porézní a její poréznost se směrem k povrchu materiálu slitiny zvětšuje. Póry ve vrstvě jsou orientovány paralelně s povrchem pokrytím palivového proutku. Na povrchu slitiny tvoří tento oxid kompaktní vrstvu, která chrání povrch pokrytí a vytváří tak bariéru, díky které se snižuje rychlost koroze (Grandjean a Hache, 2008). Tato vrstva, přesněji její oblast rozhraní oxid/kov hraje velmi důležitou roli v mechanismu oxidace zirkonia, jelikož právě v této oblasti probíhá difúze kyslíku a vodíku (Huang et al., 2015). Charakteristika této oblasti oxidické vrstvy tak významně ovlivňuje rychlost koroze slitiny (Kurpaska et al., 2016).

### ***1.8.10 Vysokoteplotní oxidace – transformace***

Rozdíl mezi nízkou a vysokoteplotní oxidací je v morfologii těchto vzniklých oxidů. Na rozdíl od nízkoteplotní oxidace mají póry sloupcovou strukturu. Oxidická vrstva vzniklá za nízkých teplot se rozpouští vlivem vysokých teplot a dochází k prudkému zvýšení difúze kyslíku do slitiny, přičemž do ustanovení nové rovnováhy kov-oxid veškerý kyslík difunduje do slitiny, aniž by vznikla nová vrstva oxidu (Vrtílková et al., 2006). Při zvyšování teploty se množství absorbovaného kyslíku zvyšuje a zároveň dochází k transformaci nízkoteplotní morfologie  $\beta$ -Zr na vysokoteplotní  $\beta$ -Zr (Gosset et al., 2012).

### ***1.8.11 Koroze konstrukčních materiálů***

V reaktorech typu VVER se jako konstrukční materiál používají austenitické oceli 08CH18N10T a 08CH19N10G. Tyto materiály vykazují velmi dobrou odolnost proti korozi rovnoměrné a rovněž proti napadení důlkovou korozí nebo koroznímu praskání při provozních teplotách. S ohledem zejména na korozní praskání je nutné udržovat v chladivu primárního okruhu minimální koncentraci kyslíku a halogenidů. Rychlost koroze těchto konstrukčních materiálů je závislá především na (Zach et al., 2016):

- hodnotě pH,
- termodynamické stabilitě,
- teplotě,
- a povrchové úpravě materiálu.

Vytvoří-li se na povrchu materiálu pasivační ochranná vrstva, klesá tak rychlost koroze. Takto vzniklé korozní vrstvy, jež mají částečně ochranný charakter, tvoří bariéru pronikajícím iontům. Při konstantní teplotě tak koroze probíhá stále pomaleji a má parabolický charakter. Při změně mezi korozemi za nízkých a vysokých teplot lze pozorovat kubickou závislost (Černý, 1984).

V kyslíkovém prostředí dochází k oxidaci železa za vzniku korozních produktů, které se skládají ze tří oxidů. Rozhraní kov/vrstva tvoří wüstit ( $\text{FeO}$ ), střed vrstvy je tvořen magnetitem ( $\text{Fe}_3\text{O}_2$ ) a na vnější straně se nachází hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (Černý, 1984).

Je známo, že v primárním okruhu lehkodrodních jaderných reaktorů existují tři hlavní mechanismy radioaktivního znečištění (Choppin et al., 1995):

- štěpné produkty uvolňované z netěsných palivových článků;
- aktivace chemických složek chladiva primárního okruhu;
- aktivace různých korozních produktů.

Pokud nedojde při provozu reaktoru k poruše pokrytí paliva, a tím k uvolnění štěpných produktů do chladiva, jsou zdrojem radioaktivity především aktivované korozní produkty. Tyto radionuklidy způsobují až 90 % radiační zátěže obsluhujícího personálu (Zach et al., 2016). K nejvýznamnějším radionuklidům dle Vargy (2001) patří především izotopy kobaltu  $^{58}\text{Co}$  ( $T^{1/2} \approx 70,9$  dne) a  $^{60}\text{Co}$  ( $T^{1/2} \approx 5,27$  let) (Magil, 2019). Tyto dva izotopy kobaltu jsou dominantními kontaminanty, přičemž kobalt  $^{60}\text{Co}$  má zvláštní význam tím, že emituje vysokoenergetické gama fotony (1,17 a 1,33 MeV). K dalším radionuklidům patří chrom  $^{51}\text{Cr}$ , mangan  $^{54}\text{Mn}$ , železo  $^{59}\text{Fe}$  a stříbro  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ . Tvorba a hromadění kobaltu na povrchu konstrukčního materiálu primárního okruhu je předmětem zvýšeného zájmu z důvodu vysoké radiační zátěže a je tudíž důležitým aspektem řízení chemického režimu chladiva s ohledem na vypracování účinnějších postupů, prevence nebo dekontaminace povrchů materiálu. (Magil, 2019; Varga et al., 2001).

Z výše uvedeného vyplývá, že hlavní úlohou chemického režimu je minimalizace tvorby aktivovaných korozních produktů transportovaných v primárním okruhu a omezení tvorby úsad na povrchu materiálů primárního okruhu (Zach et al., 2016).

### ***1.8.12 Normy chemického režimu***

Při tvorbě zásad norem chemického režimu je potřeba přihlížet na základní vlastnosti parametrů chemických látek, které způsobují degradaci materiálu zařízení (koroze, eroze). Tyto negativní dopady se projevují až po delším časovém období, přičemž proběhlé změny jsou většinou nevratné a ve svém důsledku mohou vést až k havarijnímu poškození a značným ekonomickým ztrátám. Aby bylo možno v maximální míře předejít těmto jevům a provozovat reaktor a navazující zařízení v optimálních mezích co nejdéle,

byly stanoveny dvě skupiny chemických parametrů dle jejich důležitosti (Zach et al., 2016):

- řídící parametry – jsou základními parametry chemického režimu chladiva a řídí se jimi a koriguje chemický režim v návaznosti na integritu pokrytí paliva, integritu materiálu a roli při formování radiačních polí. Měření probíhá zpravidla kontinuálně, případně opakovaně ve stanovených časových intervalech;
- diagnostické parametry – tyto parametry poskytují doplňující informace v případě odchylky řídicího parametru a pomocí nichž lze indikovat příčinu narušení chemického režimu chladiva.

Pro potřeby sledování řídicích parametrů byly stanoveny tzv. akční úrovně, pro něž jsou nastaveny časy a činnosti vedoucí k odstranění poruchy. Signalizují nám tedy úrovně, při kterých se včasným zásahem při poruše dá předejít tomu, aby se rozvinula v havárii nebo dlouhodobým působením poškodí zařízení. V případech, kdy nelze použít akční úrovně (např. při přechodových stavech, odstávka bloku) se k limitování hodnot parametrů stanovují tzv. inicializační úrovně (Zach et al., 2016):

- normální hodnota – hodnota, jejímž udržováním lze s velkou jistotou minimalizovat degradaci zařízení vlivem koroze;
- akční úroveň 1 (AÚ1) – nastává, kdykoliv je měřená hodnota parametru mimo rozsah normálních hodnot. Při dlouhodobém působení překročené hodnoty AÚ1 může dojít k negativnímu ovlivnění spolehlivosti zařízení;
- akční úroveň 2 (AÚ2) – při překročení této úrovně lze podle inženýrského posudku předpokládat, že by během krátké doby mohlo dojít k významnému poškození systému;
- akční úroveň 3 (AÚ3) – tato hodnota reprezentuje limit, pro který experimentální data nebo inženýrský posudek předpokládají, že při jejich překročení je další provoz systému nežádoucí;
- inicializační úroveň (IÚ) – při překročení hodnoty stanoveného limitu je nutné provést opatření vedoucí k nápravě stavu do normálních hodnot.

## 1.9 Měření koncentrace chemických složek v chladivu

Znalost koncentrací chemických látek v chladivu primárního okruhu a v nádržích pomocných systémů je velmi důležitá pro udržování správného chemického režimu. Interními dokumenty jsou stanoveny normované koncentrace korekčních chemických látek potřebných pro udržování optimálního chemického režimu. Těmito provozními předpisy jsou stanoveny maximální přípustné koncentrace nežádoucích chemických příměsí.

Měření koncentrace chemických látek se na jaderné elektrárně provádí v zásadě dvěma způsoby. Kontinuálně, kdy je analyzátor umístěn v obestavbě kontejnmentu a k němu je přivedena vzorkovací trasa odbočkou ze studené větve chladiva primárního okruhu, nebo měřením ručně odebraných vzorků, které je realizováno v radiochemické laboratoři umístěné v budově pomocných aktivních provozů, případně obojím způsobem. K důležitým chemickým parametrům chladiva, jejichž koncentrace jsou měřeny výše uvedenými způsoby patří (Zach et al., 2016):

- koncentrace kyseliny borité – měření je realizováno kontinuálně spolu s periodickým měřením ručně odebraných vzorků;
- draslík – kontinuálně a ručně;
- čpavek – kontinuálně a ručně;
- lithium – kontinuálně a ručně;
- pH – kontinuálně a ručně;
- kyslík – kontinuálně;
- vodík – kontinuálně;
- chloridy, fluoridy, sírany, dusičnany – ručně;
- železo – ručně;
- sodík – ručně.

Pro účely této práce budou v následujících kapitolách popsány způsoby kontinuálního měření čpavku, draslíku, lithia a vodíku.

### **1.9.1 Měření čpavku, draslíku a lithia**

Tyto analyty se při ručním měření stanovují v laboratoři metodou kapilární elektroforézy. Pro kontinuálním měření se používá metoda iontové chromatografie.

#### **Metoda kapilární elektroforéza – ruční měření**

Metoda kapilární elektroforézy patří mezi elektromigrační separační metody. Principem této metody je migrace elektricky nabitých částic v kapiláře, jejichž pohyb je způsoben vložení konstantního stejnosměrného vysokého napětí mezi elektrody (10–30 kV). Kapilára je vyrobena z křemenného skla a její délka se pohybuje v rozmezí 25–100 cm. K zajištění elektrické vodivosti v měřeném prostředí je kapilára naplněna elektrolytem, do kterého je v určitém místě tlakově dávkován vzorek měřeného média v objemu cca 10–100 nl (Klouda, 2003). Působením vloženého napětí dochází k pohybu kationtů k zápornému pólu a aniontů ke kladnému pólu, přičemž se neutrální molekuly či částice nepohybují. Vlivem rozdílné rychlosti (elektrické afinitě) jednotlivých složek se analyty rozdělují a vytvářejí tak oddělené zóny jednotlivých analytů. Tyto zóny jsou zaznamenávány detektorem. Z naměřeného záznamu lze určit z polohy píku kvalitu, z plochy a výšky píku potom kvantitu (Štulík, 2004). Kapilární elektroforézou se v radiochemických laboratoři měří koncentrace kationtů draslíku  $K^+$ , čpavku  $NH_4^+$ , lithia  $Li^+$  a také aniontů chloru  $Cl^-$ , fluoru  $F^-$ , síranu  $SO_4^{2-}$  a dusičnanu  $NO_3^-$ .

#### **Kapalinová iontová chromatografie – kontinuální měření**

Pro kontinuální měření kationtů v chladivu se využívá metoda vysokotlaké iontové chromatografie (HPIC). Princip metody chromatografie spočívá v separaci složek vzorku, kdy se vzorek vnese mezi dvě rozdílné fáze – stacionární a mobilní. Vzorek se umístí na začátek stacionární fáze (kolony) a pomocí mobilní fáze je vzorek unášen přes stacionární fázi. Tímto pohybem jsou jednotlivé složky vzorku postupně zachycovány ve stacionární fázi. Vlivem rozdílné afinitě ke stacionární fázi dochází k separaci složek. Znamená to, že jako první se zdržují látky, které se váží ke stacionární fázi silněji a na konci této fáze se zachycují méně zadržované složky. Pomocí elučního činidla (eluent, mobilní fáze) se separované složky vyplaví ze stacionární fáze, jejichž pohyb je zaznamenán vhodným detektorem. V závěru analýzy se naměřené záznamy kvalitativně a kvantitativně vyhodnotí plochy nebo výšky píků. O vyhodnocení těchto záznamů se postará ovládací software (Klouda, 2003; Pacáková a Štulík, 1986).

Na jaderné elektrárně Temelín se ke kontinuálnímu měření kationtů metodou kapalinové chromatografie používají on-line analyzátory vyrobené firmou DIONEX model DX-800 a Integral PA umožňující kontinuální provoz měření. Kromě potřebných komponent jako jsou dávkovací čerpadla eluentu a činidel se používají pro stacionární fázi kolony DIONEX typu IonPac CS18 a CS19. Tyto kolony zajišťují dobrou detekci potlačenou vodivostí pro analýzy anorganických kationtů (čpavek, draslík, lithium ...) K měření signálu jsou používány detektory měřící vodivost. (Thermo Scientific, 2014). Nedílnou součástí přístroje je jeho softwarové vybavení. Tím je pokročilá aplikace Chromeleon PA, která zajišťuje ovládání analyzátoru, přijímání a posílání dat pomocí univerzálního softwarového rozhraní, které umožňuje vzdálené sledování analyzátoru, zpracování alarmů a hlášení naměřených výsledků (Thermo Fisher Scientific, 2008).

V přístrojích je také integrován odběrový systém umožňující odběr vždy nového reprezentativního vzorku chladiwa. Vzorek je veden přes chladič a redukční ventil, které upraví jeho parametry na správnou teplotu, tlak a průtok až k analyzátoru. Měření probíhá kontinuálně jednou za 20 minut (Pláteník a Trégl, 2018).

### ***1.9.2 Měření rozpuštěného vodíku***

Měření koncentrace rozpuštěného vodíku probíhá kontinuálním způsobem. Jak bylo již vysvětleno v kapitole 1.6.4, koncentrace rozpuštěného vodíku patří k důležitým měřeným parametrům. Vzhledem k tomu, že je vodík vysoce hořlavý plyn a spolu se vzduchem tvoří výbušnou směs (meze výbušnosti 4–74 % obj.), (Linde, 2016), je jeho koncentrace monitorována nejen v chladiwu v jeho rozpuštěné formě, ale také v dalších navazujících systémech. Pro účely měření rozpuštěného vodíku v primárním okruhu se používá přístroj ORBISPHERE model 511 s vodivostní sondou. Rozsah měření sondy je při teplotě 25 °C v rozmezí 0–2 ppm (Hach, 2016).

Vzorky jsou z odběrových míst vedeny přes chladič k on-line panelu, kde je redukčním ventilem upraven na vhodný tlak a potřebný průtok přes měřicí sondu. Měření probíhá kontinuálně v intervalu 1/20 s. Naměřené hodnoty jsou on-line přenášeny do systému UIS (Informační systém bloku – Unit information systém) (Pláteník a Trégl, 2018).

### **1.9.3 Měření kyslíku**

Měření kyslíku probíhá obdobným způsobem jako výše uvedené měření vodíku s periodou jednou za 20 minut. K měření se používá rovněž přístroj ORBISPHERE model 511 (Pláteník a Trégl, 2018).

### **1.9.4 Měření kyseliny borité**

Stanovení koncentrace kyseliny borité je zajišťováno při ručním odběru v radiochemické laboratoři a při kontinuálním měření pomocí analytické metody potenciometrické titrace. K určení bodu ekvivalence se využívá potenciometrie (měření pH). Do roztoku o známém složení se přidává titrační činidlo o přesně známém množství a koncentraci. Titračním činidlem je zde hydroxid sodný (NaOH). Graficky znázorněná titrační křivka vyjadřuje závislost pH (napětí) měřeného vzorku na množství dávkovaného činidla. Z titrační křivky se určí graficky nebo výpočtem bod ekvivalence, který je dán inflexním bodem. Následným výpočtem se stanoví přesná koncentrace kyseliny borité (Křížek a Šíma, 2015).

#### **Potenciometrická titrace:**

- Ruční – při ručním měření přesné koncentrace kyseliny borité se používá titrátor firmy METTLER TOLEDO. Koncentrace měřených vzorků se pohybují v rozmezí 0–80 g/kg. Takto se stanovují koncentrace ve všech systémech primárního okruhu včetně havarijních nádrží s obsahem bóru. Měření se provádí pravidelně nebo operativně dle požadavků technologů chemických režimů nebo personálu blokové dozorny.
- Kontinuální – kontinuální měření probíhá v systémech primární části bloku. Jsou jimi horká a studená větev hlavního cirkulačního potrubí (vstup a výstup z/do reaktoru), kompenzátor objemu, systém doplňování a nádrže systému 1,2TQ10, 20, 30. Měření je zajištěno třemi titračními analyzátory. Způsob přípravy vzorků je obdobný jako v případě výše uvedeného měření kationtů metodou iontové chromatografie (Pláteník a Trégl, 2018).



## **2 CÍL PRÁCE A HYPOTÉZY**

Diplomová práce byla zaměřena na analýzu vybraných chemických parametrů v chladivu primárního okruhu na obou výrobních blocích HVB1 a HVB2 jaderné elektrárny Temelín.

### **2.1 Cíle práce**

Prvním cílem práce bylo vymezit význam chemických procesů odehrávajících se v chladivu primárního okruhu pro bezpečný provoz jaderné elektrárny, popsat způsob měření identifikovaných chemických komponent a vybrat vhodné chemické komponenty k hlubšímu šetření.

Druhým cílem práce bylo vymezit význam rozpustného vodíku pro kompenzaci vlivů ohrožujících korozi provoz jaderné elektrárny (zvláště vliv radiolyticky vzniklého kyslíku) a popsat generování vodíku amoniakem.

Třetím cílem práce se na základě vybraného období bylo věnovat šetření časových průběhů koncentrací čpavku a vodíku v rámci HVB1 a HVB2 jaderné elektrárny.

Posledním cílem práce se na základě generování vodíku čpavkem stalo zkoumání jednostranné závislosti mezi koncentracemi čpavku a vodíku.

### **2.2 Hypotézy**

Na základě aplikovaného kvantitativního výzkumu, o němž podává zprávu předkládaná diplomová práce, byly na základě systémové analýzy chemických procesů probíhajících v chladivu primárního okruhu a provedené v rámci teoretické části upřesněny formulace hypotéz. Původní teoretické hypotézy byly převedeny do operacionalizované podoby následujícím způsobem:

H1: Empirická distribuce časových měření koncentrací vodíku a čpavku v rámci HVB1 a HVB2 bude blízká teoretické normální distribuci.

H2: Regresní zkoumání časových závislostí koncentrací čpavku a vodíku v rámci HVB1 a HVB2 povede k lineární regresní funkci s grafem blízkým rovnoběžce s časovou osou.

H3: V případě stejné technologie a vedení stejného chemického režimu na obou výrobních blocích HVB1 a HVB2 je korelace mezi koncentrací amoniaku a vodíku v chladiči primárního okruhu obdobná a blízká silné pozitivní korelaci.

### 3 METODIKA VÝZKUMU

V následujících kapitolách bude popsán postup získání potřebných dat a jejich úprava včetně použitých statistických metod.

#### 3.1 Sběr naměřených dat

Pro účely výzkumu byly použita data z kontinuálního měření koncentrací amoniaku a vodíku v chladiivu primárního okruhu obou výrobních bloků. Data z měření koncentrací předmětných chemických parametrů byla získána z aplikace CHEMIS (Chemický informační systém) ve formě datového souboru (.csv). Tento soubor bylo nutné zpracovat v tabulkovém procesoru Microsoft Excel. Pro účely statistického zpracování byla vybrána data z uceleného období předchozích palivových kampaní obou bloků. V případě prvního reaktorového bloku byla k výzkumu použita data z 16. kompletní kampaně za období 28. 2. 2018 – 28. 2. 2019. V případě druhého reaktorového bloku se jednalo také o předchozí ucelené období, konkrétně 15. palivové kampaně za období 27. 7. 2017 – 29. 6. 2018. Takto získaná data v „surové“ podobě bylo potřeba zpracovat pro potřeby statistického zpracování. Způsob jejich přípravy bude uveden v následující kapitole.

Upravená data byla zpracována pomocí deskriptivní statistiky a předpokládané hypotézy pomocí matematické statistiky – dvojvýběrové parametrické testování, neparametrické testování, regresní a korelační analýza.

##### 3.1.1 Příprava naměřených dat

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, získaná data bylo nutné upravit pro potřeby statistických výpočtů tak, aby případné nevěrohodné hodnoty, způsobené chybným měřením analyzátorů nebo přechodnými výkonovými změnami reaktoru, nevnikly do výpočtů objektivní chybu. Z tohoto důvodu byla ze souboru dat vyloučena data naměřená na začátku kampaně, kdy ještě není provoz výrobního bloku na ustálených parametrech a koncentrace chemických látek se ještě nenachází v rovnovážném stavu. Vyloučena byla také naměřená data z konců palivových kampaní, při kterých byly oba výrobní bloky provozovány na tzv. „výkonový efekt“. V tomto provozním režimu, při nulové

koncentraci kyseliny borité v chladivu, sníženém výkonu a za snížené teploty chladiva, dochází ke zlepšení neutronové bilance a reaktor tak lze ještě cca 14 dní provozovat (Sklenka, 2001).

Vyloučeny byly rovněž všechny hodnoty, které na první pohled svými odlehlými výsledky vykazovaly silné pochybnosti o správnosti měření přístrojů kontinuálního měření. Tato domněnka byla podpořena zřetelnými skokovými změnami naměřených koncentrací zkoumaných analytů, přičemž se tyto změny vyskytovaly v krátkých časových úsecích (v řádu hodin) pouze u jednoho měřeného parametru. Po zásahu techniků chemického měření, kteří po opravě přístroje a jeho kalibraci uvedli přístroj do provozuschopného stavu, se sledované hodnoty vrátily zpět k očekávaným hodnotám. Ke kontrole správnosti (věrohodnosti) kontinuálního měření v případě koncentrace čpavku slouží ruční odběry vzorku a stanovení koncentrace technikem chemické kontroly v radiochemických laboratořích. V poslední fázi přípravy dat bylo nutné zredukovat počet hodnot takovým způsobem, aby k jednomu datu a času měření byly přiřazeny právě dvě hodnoty (čpavek a vodík).

## **3.2 Metody deskriptivní statistiky**

Po úpravě naměřených dat bylo potřebné validovaná data pro účely této práce vhodně zpracovat. Po etapě získávání dat popsané v kap. 3.1, jejich kontrole a verifikace popsané v kap. 3.1.1, bylo potřebné data zpracovat následujícími statistickými metodami.

### **3.2.1 Formulace statistického šetření**

K formulaci statistického šetření je potřeba definovat a pojmenovat dle Záškodného et al. (2016) následující základní pojmy:

- *Hromadný náhodný jev* – jde o jev, který je charakterizován tím, že za určitých podmínek může nastat, ale také nastat nemusí. Výskyt takového jevu tedy nelze předem před provedením měření predikovat. Například v případě většího množství opakovaného měření sledované veličiny nelze předem s jistotou určit, jakou hodnotu naměříme.

- *Statistická jednotka* – prvek zkoumaného souboru, který je charakterizován stejnými vlastnostmi.
- *Statistický znak* – je charakterizován určitým stanoveným parametrem z odlišných vlastností zkoumané množiny prvků. V případě měření lze tímto znakem určit například koncentraci analytu ve zkoumaném roztoku.
- *Hodnota statistického znaku* – jednoznačné určení popisu statistického znaku, který podrobujeme statistickému výzkumu (např. hodnota koncentrace měřeného analytu).
- *Základní statistický soubor* – je dán celkovým rozsahem všech statistických jednotek zkoumaného souboru. V případě měření koncentrace analytu je základním statistickým souborem celkový počet uskutečněných měření.
- *Výběrový statistický soubor* – je dán vybranými statistickými jednotkami ze zkoumané množiny prvků základního statistického souboru.
- *Náhodný výběr* – náhodným výběrem docílíme omezení počtu statistických jednotek. Proces výběru musí být takový, aby vybraný vzorek vykazoval charakteristiky základního statistického souboru, tzn. musí být reprezentativní. Podle Vojtíška (2012) lze stanovení výběrového souboru provést dvěma základními metodami: Pravděpodobnostním (náhodným) výběrem nebo záměrným (nenáhodným) výběrem. Pravděpodobnostní výběr lze provést metodami prostého náhodného výběru (např. losování), systematického výběru (1. náhodná jednotka a dále každá  $n$ -tá), stratifikovaný výběr (podle klíče-skupiny) a vícestupňový náhodný výběr (několik kroků po sobě jdoucích náhodných výběrů).

### 3.2.2 Škálování

Proměnné charakteristiky zkoumaných prvků statistického souboru mohou nabývat různých hodnot. Pro účely jejich statistického zpracování je vhodné pomocí prvků škály vyjádřit jejich nabývané hodnoty. Podle Záškodného et al. (2016) rozlišujeme čtyři základní typy škál:

- *Nominální škála* – každá proměnná je klasifikována jako kategorie, přičemž kategorie tvoří prvky škály. Kategorizované proměnné zde nabývají kvalitativních hodnot, které jsou disjunktivní (navzájem se vylučují).
- *Ordinální škála* – zde lze nabývané proměnné řadit na stupnici a stanovit tak jejich pořadí. Podle této škály však nelze určit vzdálenost mezi statistickými jednotkami.
- *Kvantitativní metrická škála* – v této škále můžeme jednotlivé statistické jednotky seřadit do stupnice a určit vzdálenost mezi nimi. Jednotlivé proměnné jsou číselně vyjádřeny a tvoří prvky škály. Hodnoty statistického znaku nemusí mít nulový počátek škály, a tudíž mohou mít počátek v libovolném bodě stupnice.
- *Absolutní metrická škála* – tato škála je kvantitativní metrickou škálou, u které jsou jednotlivé body škály číselně vyjádřeny a počátek škály je charakterizován absolutní nulou.

Jednotliví autoři uvádí v literatuře různé druhy členění typů škál. Například podle Stevense (1946) rozlišujeme tyto druhy škál: nominální, ordinální, intervalová a poměrová. Svou podstatou jsou však rozdělení druhů škál obou autorů shodné.

Po určení vhodného typu škály je nutné sestavit intervalové rozložení četností tak, aby byl jejich počet (počet tříd) co nejlépe nastavený. Určíme-li počet intervalů, je třeba nastavit jejich vhodnou šíři. Je potřeba si uvědomit, že určení počtu a šíře intervalů je subjektivní záležitost. Zároveň je potřeba si uvědomit, že příliš široce nastavené intervaly snižují vypovídací hodnotu zkoumaného výběrového souboru (snižují kvalitu). Naopak příliš úzké intervaly zhoršují potřebnou přehlednost zvyšováním rozsahu tabulek a následných výpočtů.

Ve své publikaci uvádí Kladivo (2013) v principech třídění dat, jak rozdělit hodnoty statistického souboru podle určených kritérií. Zároveň dodává, že neexistují exaktní pravidla pro určení ideálního počtu intervalů. Uvedená kritéria a postupy jsou tedy pouze doporučením:

- vymezení každého intervalu přesně stanovenou hranicí;
- vymezení interval takovým způsobem, aby šlo jednoznačně zařadit každý prvek;
- zajistit, aby se hranice intervalů nepřekrývaly;
- šířka intervalů je stejná;
- zvolit optimální počet intervalů (ani málo, ani příliš).

Pro stanovení počtu intervalů a jejich šířky lze použít některou z matematických pomůcek (22, 23 a 24), přičemž počet intervalů se doporučuje stanovit v rozmezí 5–20. Vhodnou a velmi často používanou pomůckou pro určení počtu tříd je tzv. Sturgesovo pravidlo (21) (Škrášek a Tichý, 1990).

$$k \approx 1 + 3,3 \times \log_{10} n \quad (21)$$

$$k \approx \frac{8}{100} \times (x_{\max} - x_{\min}) \quad (22)$$

$$k \approx \sqrt{n} \quad (23)$$

$$h \approx \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k} \quad (24)$$

kde:

$n$  ... je rozsah výběrového statistického souboru,

$k$  ... počet intervalů,

$h$  ... délka intervalu.

### 3.2.3 Měření

V procesu měření je každá statistická jednotka přiřazena právě jednomu z prvků škály. Měřením tak docílíme výsledku, že prvek škály byl naměřen  $n$  krát a následným součtem všech hodnot prvků škály  $n_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, k$ ) získáme tzv. *absolutní četnost*. Součet takových hodnot musí být vždy roven celkovému rozsahu výběrového statistického souboru (Záškodný et al., 2016).

Dalším důležitým pojmem v procesu měření je tzv. *relativní četnost*. Relativní četnost vyjadřuje, s jakou statistickou pravděpodobností nastanou naměřené výsledky. Je dána poměrem absolutní četnosti  $n_i$  zjištěných hodnot prvku škály a absolutní četnosti součtu všech prvků škály. Provedený součet všech relativních četností se musí rovnat 1 (Záškodný et al., 2016).

Dalším pojmem je *kumulativní četnost*. Kumulativní četnost  $\sum n_i/n$  vyjadřuje pravděpodobnost, s jakou bude daná hodnota naměřena menší nebo rovná hodnotě  $x_i$ . Je

zjevné, že ze své podstaty se kumulativní četnosti mohou zjišťovat pouze u kvantitativních metrických a absolutních metrických škál (Záškodný et al., 2016).

Použité metody měření se liší s ohledem na předmět zkoumané oblasti, resp. na vymezený zkoumaný výběrový statistický soubor. Každá použitá metoda měření však musí splňovat jisté podmínky. Je potřeba splnit podmínku validity (ověření, zda naměřené hodnoty jsou platné), reliabilitu (opakovatelnost měření) a objektivnost (tj. každý posuzovatel měří stejným způsobem) (Záškodný et al., 2016).

### 3.2.4 Elementární statistické zpracování

V rámci deskriptivní statistiky můžeme elementární statistické zpracování považovat za jakési završení, kdy předchozími uvedenými metodami dojde k uspořádání výsledků měření, jejich grafickému vyjádření a charakterizovat je pomocí empirických parametrů. Výsledkem zpracování zkoumaného výběrového statistického souboru je jeho celkový empirický obraz. Výše uvedené elementární zpracování lze vyjádřit třemi základními způsoby – pomocí empirických rozdělení (grafů), tabulek a empirickými parametry (Záškodný et al., 2016).

#### Tabulka

Pomocí tabulky lze vhodnou formou docílit přehledného uspořádání naměřených výsledků. Znázorněná tabulka 5 je uspořádána do osmi sloupců, z nichž první čtyři obsahují data uspořádání výsledků měření, která slouží ke grafickému znázornění empirického rozdělení. Další čtyři sloupce jsou pomocná data, která lze užít k snadnějšímu a rychlejšímu výpočtu empirických parametrů. Počet řádků tabulky je určen počtem stanovených prvků škály. Poslední řádek slouží ke kontrolním součtům provedených výpočtů. Popis jednotlivých sloupců tabulky je uveden v tabulce 6.

Tabulka 5 – Uspořádání výsledků měření

$x_i$	$n_i$	$n_i/n$	$\sum ni/n$	$x_i n_i$	$x_i^2 n_i$	$x_i^3 n_i$	$x_i^4 n_i$
-------	-------	---------	-------------	-----------	-------------	-------------	-------------

Zdroj: Vlastní



**Tabulka 6 – Popis sloupců výsledků měření**

Označení sloupce	Popis sloupce
$x_i$	prvky škály
$n_i$	absolutní četnost
$n_i/n$	relativní četnosti prvků škály
$\sum n_i/n_i$	kumulativní četnosti
$x_i n_i$	součin tabulkových parametrů
$x_i^2 n_i$	součin tabulkových parametrů
$x_i^3 n_i$	součin tabulkových parametrů
$x_i^4 n_i$	součin tabulkových parametrů

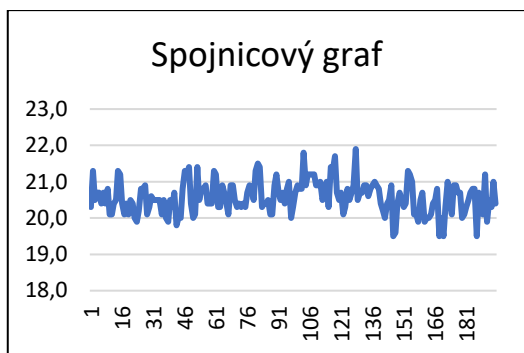
*Zdroj: (Záškodný et al., 2016)*

### **Empirické rozdělení četností**

Podle Záškodného et al. (2016) rozlišujeme dva základní druhy empirického rozdělení četností. V obou případech přiřazujeme na osu  $x$  prvky škály. U prvního druhu poté přiřazujeme na osu  $y$  jejich absolutní četnosti  $n_i$ , v druhém případě relativní četnosti  $\sum n_i/n$ . Pomocí rovinného souřadnicového systému tak lze jednorozměrný statistický soubor zobrazit graficky. Tato forma zobrazení empirického rozdělení nám poskytne okamžitou možnost posoudit, kterému teoretickému rozdělení můžeme zkoumaný soubor přiřadit. Význam můžeme také spatřovat v okamžitém přibližném hodnocení parametrů polohy, šikmosti, špičatosti a variability.

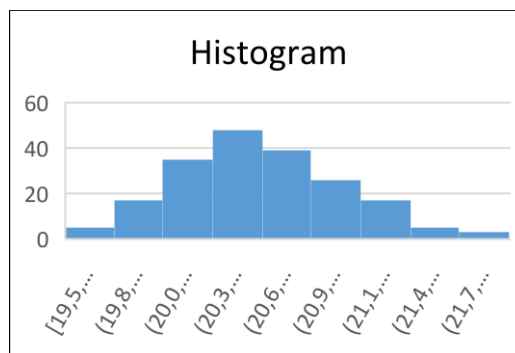
Grafického vyjádření četností (obr. 1 a 2) lze docílit různými způsoby. Jedním způsobem je vyjádření pomocí polygonu, který lze sestavit pomocí úseček spojující jednotlivé nanesené body. Získáme tak tzv. „polygon absolutních četností“ (obr. 3), „polygon relativních četností“ a polygon kumulativních četností (obr. 4). Vedle tohoto způsobu je možné grafické vyjádření pomocí sloupcových diagramů, sloupcové grafy (histogram) či výsečové grafy a mnoha dalšími.

Pro účely této práce bude grafické znázornění absolutních, relativních a kumulativních četností zkonstruováno pomocí polygonů.



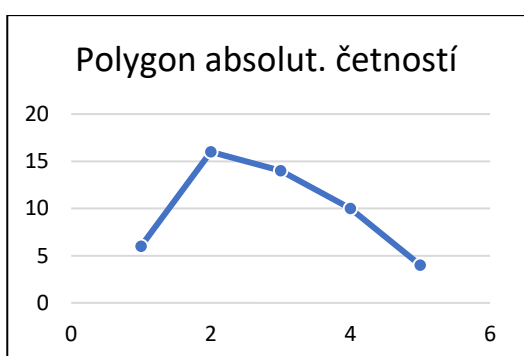
**Obrázek 1 – Spojnicový graf**

*Zdroj: Vlastní*



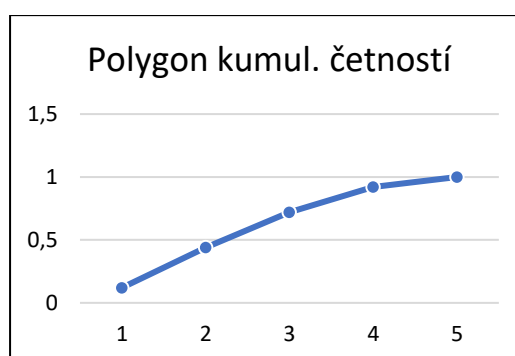
**Obrázek 2 – Histogram**

*Zdroj: Vlastní*



**Obrázek 3 – Polygon absolutních četností**

*Zdroj: Vlastní*



**Obrázek 4 – Polygon kumulativních četností**

*Zdroj: Vlastní*

## Empirické parametry

Pomocí empirických parametrů lze jednoduše vyjádřit povahu statistického souboru. Vyjadřujeme-li jimi výběrový statistický soubor, pak je nazýváme „výběrovými parametry“. Podle Záškodného et al. (2016) jsou však tyto parametry zatíženy výběrovou chybou, kterou je třeba minimalizovat. Toho nejspolehlivěji dosáhneme tím, že zajistíme reprezentativnost výběrového souboru zpravidla provedením náhodného výběru. Pokud zajistíme dostatečnou reprezentativnost výběrového souboru, můžeme získané poznatky aplikovat na základní statistický soubor. Další používané způsoby náhodného výběru byly uvedeny v kapitole 3.2.1.

Rozlišujeme následující základní empirické parametry, které vyjadřují základní znaky zkoumaného statistického souboru (Záškodný et al., 2016):

- parametr polohy,

- parametr variability,
- parametr špičatosti,
- parametr šikmosti.

Další členění je podle způsobu výpočtu empirických parametrů:

- kvantilové parametry,
- momentové parametry.

*Parametr polohy* charakterizuje rozložení sledovaných hodnot na přímce. Tento parametr je vyjadřován střední hodnotou, kterou lze určit různými způsoby. Statistické soubory jsou nejčastěji charakterizovány právě středními hodnotami. Podle Kladiva (2013) k nim řadíme různé druhy průměrů jako například aritmetický, geometrický, harmonický či vážený. Užívanými znaky jsou také medián, modus či aritmetický střed.

V naší práci budou data zpracovávána pomocí momentových parametrů, které dělíme na obecné, centrální a normované momenty (Záškodný et al., 2016).

Obecný moment 1. řádu charakterizuje aritmetický průměr, obecný moment 2. řádu vystihuje empirický rozptyl. Centrální momenty nám slouží jako pomocné výpočty pro výpočet normovaných momentů 3. a 4. řádu, pomocí nichž lze určit parametry špičatosti a šikmosti (Záškodný et al., 2016).

Podle Záškodného et al. (2016) platí pro výpočty obecných a centrálních momentů tyto obecné vztahy (25, 26, 27 a 28):

$$\text{Obecný moment } r\text{-tého řádu:} \quad O_r(x) = \frac{1}{n} \sum n_i x_i^r \quad (25)$$

$$\text{Obecný moment 1. řádu:} \quad O_1(x) = \frac{1}{n} \sum n_i x_i \quad (26)$$

Uvedené vztahy obecného momentu vyjadřují vážený aritmetický průměr, jenž určují polohu empirického rozdělení na souřadnicové ose  $x$ .

$$\text{Centrální moment } r\text{-tého řádu:} \quad C_r(x) = \frac{1}{n} \sum n_i x_i (x_i - O_1)^r \quad (27)$$

Centrální moment 2. řádu: 
$$C_2(x) = \frac{1}{n} \sum n_i x_i (x_i - O_1)^2 \quad (28)$$

Centrální moment 2. řádu vyjadřuje empirický rozptyl neboli střední kvadratickou chybu (29).

Směrodatná odchylka: 
$$S_x = \sqrt{C_2} \quad (29)$$

Variační koeficient: 
$$\frac{S_x}{O_1} \text{ (také } 100 \frac{S_x}{O_1} \text{, [\%])} \quad (30)$$

*Parametr proměnlivosti* vyjadřuje empirický rozptyl neboli střední kvadratickou chybu a je určen centrálním momentem 2. řádu. Směrodatná odchylka je potom jeho odmocninou a její hodnota vypovídá o charakteru aritmetického průměru. Pakliže je hodnota směrodatné odchylky malá, vypovídací hodnota aritmetického průměru je velká a opačně. Směrodatná odchylka je ve statistice častěji používaný parametr nežli rozptyl. Vyjadřuje stupeň rozptylu sledovaných hodnot statistického znaku kolem průměrné hodnoty. Variační koeficient (30) je určen poměrem směrodatné odchylky a aritmetického průměru. Vynásobením výsledné hodnoty stem získáme hodnotu v procentech (Kladivo, 2013).

*Parametr šikmosti* lze určit hodnotou normovaného momentu 3. řádu  $N_3$  a je nazýván koeficientem šikmosti. Záporná hodnota tohoto momentu vypovídá o tom, že vyšší četnost mají prvky škály, které leží vpravo od aritmetického průměru. Říkáme, že záporné zešikmení znamená vyšší koncentraci menších hodnot statistického znaku. V případě výsledné kladné hodnoty aplikujeme opačný výklad šikmosti (Záškodný et al., 2016).

*Parametr špičatosti* můžeme určit podle hodnoty normovaného momentu 4. řádu  $N_4$  a nazýváme jej koeficientem špičatosti. Hodnota tohoto parametru vypovídá o rozdělení četností při daném rozptylu hodnot. Čím je rozptyl hodnot menší, tím je koeficient špičatosti vyšší a rozdělení špičatější a naopak. Pro porovnání rozdělení zkoumaného souboru s normálním rozdělením (Gaussovo rozdělení) se používá „exces“. Tato veličina udává, je-li zkoumané rozdělení špičatější nežli normální rozdělení. Ideální hodnota normálního rozdělení je 3. Pro výpočet excesu se použije vztah  $\text{exces} = N_4 - 3$ . Je-li

hodnota tohoto výpočtu kladná, můžeme prohlásit, že zkoumané rozdělení (empirické) je špičatější nežli normální rozdělení (Záškodný et al.,2016).

Záškodný et al. (2016) uvádí, že pro výpočet pomocných centrálních momentů lze použít hodnoty vypočtených obecných momentů. Normované momenty můžeme poté vyjádřit pomocí vypočtených hodnot centrálních parametrů. Z vypočtených obecných, centrálních a normovaných momentů je možné popsat parametry polohy, proměnlivosti, špičatosti a šikmosti. Obecné vztahy pro výpočty výše uvedených momentů jsou následující (31 a 32):

$$\begin{aligned}
 C_2 &= O_2 - O_1^2 \\
 C_3 &= O_3 - 3O_2O_1 + 2O_1^3 \\
 C_4 &= O_4 - 4O_3O_1 + 6O_2O_1^2 - 3O_1^4
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

$$N_3 = \frac{C_3}{C_2\sqrt{C_2}}; N_4 = \frac{C_4}{C_2^2}; N_r(x) = \sum \frac{n_i}{n} \left( \frac{x_i - O_1}{S_x} \right)^r
 \tag{32}$$

### 3.3 Metody matematické statistiky

Podle Hendla (2004) je hlavním cílem matematické statistiky zobecnění zkoumaných dat. Pomocí použitých metod tak zkoumáme, můžeme-li poznatky získané z výběrového statistického souboru aplikovat na základní statistický soubor (populaci).

#### 3.3.1 *Neparametrické testování*

Neparametrickým testováním zjišťujeme, jaké teoretické rozdělení můžeme přiřadit k rozdělení empirickému. Neparametrickému testování můžeme také nazvat „testováním neparametrických hypotéz“. Výhoda nahrazení empirického rozdělení teoretickým spočívá v možnosti užití jednoduchých matematických aparátů, s nimiž lze získat jiným způsobem nedostupné informace (Záškodný et al., 2016).

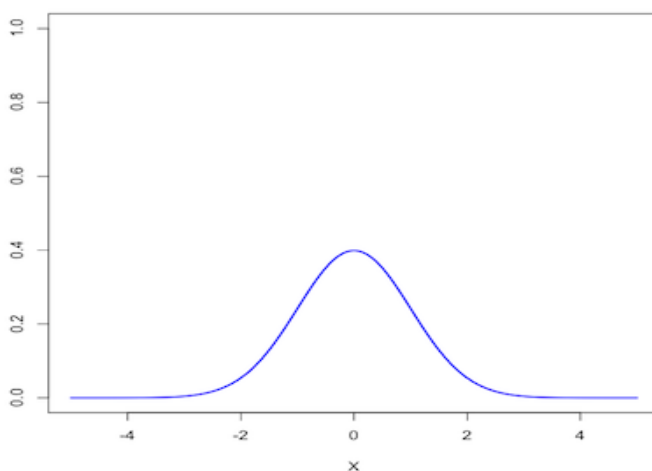
## Intervalové rozdělení četností

Někdy je vhodné rozdělit rozpětí prvků škály nebo hodnot statistického znaku u jednorozměrného statistického souboru na několik intervalů. Počet intervalů lze určit např. podle Sturgesova pravidla nebo pomocí jiných méně používaných způsobů (viz kap. 3.2.2).

## Teoretické rozdělení – testování hypotéz

Teoretická rozdělení dělíme podle povahy náhodné veličiny, kterou měříme. Náhodné veličiny dělíme podle jejich povahy na *diskrétní* a *spojité* (Kába a Svatošová, 1999). Diskrétní veličina (nespojité) je veličina, která nabývá pouze konečného množství hodnot navzájem od sebe oddělených. Spojitou náhodnou veličinu charakterizuje, že může nabývat nekonečné množství hodnot  $x \in (-\infty; \infty)$  nebo libovolné množství hodnot z uvažovaného intervalu.

Tzv. zákon rozdělení náhodné veličiny říká, že ke každé naměřené hodnotě nebo hodnotě z určitého intervalu můžeme přiřadit pravděpodobnost s jakou nastane. Tento zákon lze vyjádřit také jinou formou, např. distribuční funkce či hustota pravděpodobnosti. Příkladem diskrétního teoretického rozdělení jsou podle Káby a Svatošové (1999) např. binomické, alternativní, Poissonovo či hypergeometrické rozdělení. V případě spojitého teoretického spojitého rozdělení rozlišujeme tyto typy – normální, normované normální, rovnoměrné, exponenciální, Weibullovo, Weibullovo dvouparametrické a gama rozdělení.



**Obrázek 5 – Gaussova křivka**

Zdroj: <http://1-2-8.net/mwva/jtomsa/gauss.htm>

Pro účely naší práce bude testováno rozdělení normální. Jak už bylo zmíněno dříve, jde o rozdělení spojitého charakteru. Tvar grafického vyjádření má v tomto případě tvar „zvonu“ a je znám pod pojmem „Gaussova křivka“ (obr. 5). Při vzájemném vztahu teorie pravděpodobnosti a statistiky se užívá pojmu *distribuční funkce*, který odpovídá pojmu *kumulativní četnost*. Normální rozdělení je charakterizováno dvěma parametry –  $\mu$ ,  $\sigma$ , kde  $\mu$  je teoreticky analogický k empirickému aritmetickému průměru a  $\sigma$  k směrodatné odchylce  $S_x$ . Obvykle zapisujeme závislost těchto dvou parametrů jako  $N(\mu; \sigma)$  a hovoříme zde o tzv. „obyčejném Gaussovi“. Naproti tomu normované normální rozdělení zapisujeme  $N(0; 1)$  a jde o tzv. „normovaného Gausse“ (Záškodný et al., 2016).

Aparátem pro neparametrické testování je stanovení nulových ( $H_0$ ) a alternativních ( $H_a$ ) hypotéz, přičemž nulovou hypotézou předpokládáme, že můžeme empirické rozdělení nahradit teoretickým rozdělením, v našem případě tedy normálním rozdělením. Alternativní hypotéza potom tuto možnost zamítá. K testování neparametrických hypotéz se často používá  $\chi^2$ -test dobré shody jako test normality. V testu dobré shody budeme pomocí výrazu  $\nu = k - r - 1$  určovat počet stupňů volnosti. Pomocí tohoto počtu stupňů volnosti určíme spolu s uvažovanou hladinou významnosti  $\alpha = 0,05$  teoretickou hodnotu  $\chi_{teor}^2 = \chi_{k-r-1}^2$  (Záškodný et al., 2016).

Testem normality budeme srovnávat relativní četnosti  $n_i/n$  s plochami pod Gaussovou křivkou. Plochy odpovídající normovanému normálnímu rozdělení pod Gaussovou křivkou nalezneme ve statistických tabulkách. Zjištěné rozdíly nám umožní rozhodnout, zdali můžeme přijmout nulovou hypotézu či bude nutné přijmout hypotézu alternativní. V této souvislosti hovoříme o tzv. Laplaceově funkci, která je vyjádřením distribuční funkce normovaného normálního rozdělení.

Vztah pro distribuční funkci normálního rozdělení (33):

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \rho(x) dx \quad (33)$$

Distribuční funkce normovaného normálního rozdělení je Laplaceova funkce  $F$  je dána vztahem (34):

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \rho(u) du \quad (34)$$

Pro výpočet normovaných hodnot  $u_i$  bude použit vztah (35):

$$u_i = \frac{x_i - O_1}{S_x} \quad (35)$$

Test dobré shody lze obecně popsat vztahy (36 a 37):

$$\chi_{\text{exp}}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \quad (36)$$

$$p_i = F(u_i) - F(u_{i-1}) \quad (37)$$

Prostřednictvím určení vymezeného počtu stupňů volnosti a využití statistických tabulek se určí kritická teoretická hodnota na hladině statistické významnosti  $\alpha = 0,05$ . Po určení kritické teoretické hodnoty se sestrojí kritický obor podle vztahu (38). V závěru se podle výsledku testovaného kritéria vyhodnotí, patří-li nebo nepatří experimentální hodnota  $\chi_{\text{exp}}^2$  do kritického oboru. Rozhodneme tudíž, jestli můžeme přijmout nulovou hypotézu  $H_0$  a nahradit empirické rozdělení teoretickým normálním rozdělením (Záškodný et al., 2016).

$$W = (\chi^2(0,05); \infty) \quad (38)$$

### 3.3.2 Měření statistických závislostí

Při dvou a vícerozměrných statistických souborech můžeme zjišťovat vzájemné vztahy těchto znaků. Podle Součka (2006) je vlastním předmětem zkoumání charakterizování číselné závislosti zkoumaných znaků. Každá korelační závislost má v případě kvantitativního charakteru dvě stránky, které jsou podrobeny měření a analýze:



- *Regresní analýza* – cílem této analýzy je nalézt matematickou funkci (označovanou jako regresní funkci), která nám zobrazí průběh proměnné hodnoty při postupné změně druhé proměnné. V podstatě jde říci, že zde proti sobě stojí jedna nezávislá proměnná v roli „příčiny“ a druhá proměnná (závislá) jako „následek“ při změně nezávislé proměnné.
- *Korelační analýza* – tato analýza vyjadřuje intenzitu závislosti (neboli těsnost) vztahu dvou proměnných. Analýza je pro nás důležitá pro rozlišení různých faktorů, pomocí nichž můžeme posléze posoudit kvalitu průběhu závislosti zkoumaných proměnných.

### Lineární regresní analýza

Lineární regresní analýza bude popsána formou grafu. Zkoumány budou dva statistické znaky „*koncentrace amoniaku*“ a „*koncentrace vodíku*“. Statistické znaky budou značeny jako SZ-x a SZ-s. V sestrojeném grafu budou prvky škály  $x_1, x_2, \dots, x_9$  naneseny na vodorovnou osu  $x$  a na svislou osu znaky značené jako  $s_1, s_2, \dots, s_9$ . Uspořádané dvojice tak budou představovat jakýsi „pravděpodobnostní oblak“ bodů, kterými bude proložena přímka. Tvar této přímky je dán tvarem pro polynomickou funkci 1. řádu  $y = b_0 + b_1x$ , přičemž parametry  $b_0, b_1$  značí regresivní parametry (Záškodný et al., 2016).

Pomocí metody nejmenších čtverců nalezneme minimální hodnotu s použitím výrazu (39):

$$S = \sum_{k=1}^k (s_i - y_i)^2 \quad (39)$$

Pro jednoduchou lineární regresi je používána soustava normálních rovnic (40 a 41) pomocí nichž získáme hodnoty parametrů  $b_0, b_1$ .

$$\sum s_i = kb_0 + b_1 \sum x_i \quad (40)$$

$$\sum s_i x_i = b_0 \sum x_i + b_1 \sum x_i^2 \quad (41)$$

## Korelační analýza

Ke kvantitativnímu vyjádření korelace dvou náhodných veličin se používá pojem „korelační koeficient“. Vyjadřuje se jím jejich vzájemný vztah (závislost). Korelační koeficient je také nazýván „Pearsonovým korelačním koeficientem“. Výpočet je určen vztahy (42), (43).

$$k_{xs} = \frac{S_{xs}}{S_x S_s}, k_{xs} \in \langle -1; 1 \rangle \quad (42)$$

$$S_{xs} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{n} (x_i - O_{1x})(s_i - O_{1s}) \quad (43)$$

Pearsonův koeficient korelace vyjadřuje normování kovariance na jednotkový součin dvou směrodatných odchylek  $S_x S_s$  a lze jej také nazývat jako normovanou kovariancí statistických znaků SZ-x a SZ-s (Záškodný et al., 2016).

## 4 VÝSLEDKY

V této kapitole budou představeny dosažené výsledky pro splnění cílů práce včetně použitých postupů a výpočtů.

### 4.1 Vyhodnocení cíle 1

Prvním cílem práce bylo vymezit význam chemických procesů, které se odehrávají v chladivu primárního okruhu a jsou významné pro bezpečný, dlouhodobý a bezporuchový provoz jaderné elektrárny. Cílem bylo rovněž popsat způsob měření sledovaných chemických složek a vybrat vhodné složky k jejímu hlubšímu šetření.

Stanoveného cíle bylo dosaženo prostřednictvím systémové analýzy probíhajících radiochemických procesů v chladivu primárního okruhu, které byly podrobněji popsány v kapitole 1.8. V rámci provedené analýzy byly dále v kapitole 1.6 uvedeny všechny důležité chemické parametry, které svou povahou významným způsobem ovlivňují chemický režim chladiva primárního okruhu a jejich množství v chladivu je proto systematicky sledováno prostřednictvím kontinuálního anebo ručního měření. Způsoby měření byly podrobněji popsány v kapitole 1.9. Pro následné hlubší šetření byly vybrány chemické složky chladiva **amoniak** ( $\text{NH}_3$ ) a rozpuštěný **vodík** ( $\text{H}_2$ ).

**Amoniak** se do chladiva primárního okruhu dávkuje ve formě hydroxidu amonného ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) především za účelem generování vodíku. Účinek amoniaku na pH chladiva je značně závislý na jeho teplotě. Při vysokých teplotách má velmi slabé alkalizační účinky, a naopak při nižších teplotách má nezanedbatelný vliv na hodnotu pH chladiva. Řízení chemického režimu chladiva je především závislé na udržování takové koncentrace amoniaku, která zajistí optimální koncentraci vodíku v chladivu primárního okruhu (kap. 1.6.2).

Pro účely diplomové práce byly podrobněji popsány způsoby kontinuálního měření čpavku, draslíku, lithia a vodíku. Pro měření kationtů – čpavku, draslíku a lithia se používá metoda iontové chromatografie. Pro měření rozpuštěného vodíku je používán přístroj ORBISPHERE model 511 s vodivostní celou. Podrobněji jsou uvedené způsoby měření popsány v kapitolách 1.9.1 a 1.9.2.

## 4.2 Vyhodnocení cíle 2

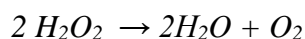
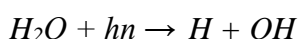
Druhým cílem práce bylo vymežit význam rozpuštěného vodíku pro kompenzaci negativních korozivních vlivů, které ohrožují provoz jaderné elektrárny zvláště radiolyticky vzniklým kyslíkem a popsat generování vodíku amoniakem.

**Vodík** je generován radiolytickým rozkladem amoniaku a rychlost jeho generování je závislá na jeho koncentraci v chladivu primárního okruhu a výkonu reaktoru. Skutečnost, že není znám obecný vztah (korelace) mezi koncentracemi amoniaku (resp. jeho radiolytickým rozkladem) a výkonem reaktoru, je překážkou při zajišťování potřebné koncentrace amoniaku (kap. 1.6.4).

Význam udržování „přebytkového“ množství vodíku v chladivu primárního okruhu spočívá v jeho úloze eliminovat kyslík vznikající radiolýzou vody.

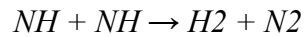
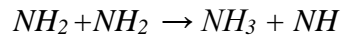
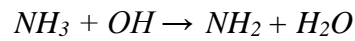
Z provozních zkušeností rovněž vyplývá, že k udržení potřebné koncentrace vodíku na různých výrobních blocích je koncentrace amoniaku různá. Je však potřebné zajistit minimální koncentraci rozpuštěného vodíku z důvodu zajištění maximální povolené koncentrace rozpuštěného kyslíku v primárním okruhu. Zároveň je však také stanovena maximální koncentrace vodíku, jelikož vodík při vyšších koncentracích způsobuje hydrogenaci slitin zirkonia, přičemž také existuje riziko nežádoucího hromadění vodíku v dílčích systémech primárního okruhu. Při nominálním provozu reaktoru je zapotřebí udržovat optimální koncentraci vodíku. Generovaný vodík však také představuje riziko při odstavení bloku, kdy existuje možnost vzniku výbušné koncentrace vodíku se vzduchem, respektive kyslíkem (kap. 1.6.4).

Voda při provozu reaktoru podléhá radiolytickému rozkladu, který je znázorněn komplexem následujících reakcí (kap. 1.8.1):



Jak vyplývá z uvedených reakcí, radiolýzou vody vznikají oxidační radikály a kyslík, jehož nepříznivý účinek je potlačován zajištěním přebytku volného vodíku v chladivu

primárního okruhu. Toho je dosaženo radiolytickým rozkladem amoniaku dle následujících reakcí (kap. 1.8.1):



**Kyslík** obsažený v chladivu primárního okruhu je nežádoucí u hlediska jeho korozivních vlastností. Způsobuje korozi austenitických nerez ocelí a je také příčinou koroze materiálu pokrytí palivových proutků. Kyslík je odstraňován odplyněním doplňované vody a také prostřednictvím dávkování hydrazinu  $N_2H_2$  při nižší teplotách. Při najetí reaktoru na výkon je kyslík odstraňován pomocí dávkování čpavku  $NH_3$  (kap. 1.6.3). Negativní korozivní vliv kyslíku je podrobněji popsán v kapitolách 1.8.8, resp. 1.8.9.

### 4.3 Vyhodnocení cíle 3

Pro účel splnění cíle 3 bylo na základě vybraného období palivových kampaní provedení šetření časových průběhů koncentrací čpavku a vodíku v rámci HVB1 a HVB2 jaderné elektrárny.

Pro HVB1 bylo vybráno období 16. palivové kampaně (28. 2. 2018 – 28. 2. 2019).

Pro HVB2 bylo vybráno období 15. palivové kampaně (27. 7. 2017 – 29. 6. 2018).

Cíl 3 byl splněn prostřednictvím ověření hypotéz H1 a H2, jejichž výsledky jsou uvedeny v následujících kapitolách.

#### 4.3.1 Formulace statistického šetření

V rámci formulace statistického šetření byly definovány základní pojmy uvedené v tabulkách 7 a 8. Testovány byly vybrané parametry na obou výrobních blocích HVB1 a HVB2.

**Tabulka 7 – HVB1 definice základních pojmů**

<b>Hromadný náhodný jev</b>	Koncentrace chemických látek v chladivu I.O
<b>Statistická jednotka</b>	Naměřené koncentrace chemických látek v chladivu I.O pomocí kontinuálního měření.
<b>Statistický znak</b>	SZ <sub>1</sub> – čpavek SZ <sub>2</sub> – vodík
<b>Hodnota statistického znaku</b>	SZ <sub>1</sub> – koncentrace čpavku[mg/l] SZ <sub>2</sub> – koncentrace vodíku [Nml/l]
<b>Základní statistický soubor</b>	Počet hodnot 8 023
<b>Náhodný výběr</b>	Losováním v aplikaci Excel ( <i>RANDBETWEEN</i> )
<b>Výběrový statistický soubor</b>	600 hodnot

*Zdroj: Vlastní*

**Tabulka 8 – HVB2 definice základních pojmů**

<b>Hromadný náhodný jev</b>	Koncentrace chemických látek v chladivu I.O
<b>Statistická jednotka</b>	Naměřené koncentrace chemických látek v chladivu I.O pomocí kontinuálního měření.
<b>Statistický znak</b>	SZ <sub>3</sub> – čpavek SZ <sub>4</sub> – vodík
<b>Hodnota statistického znaku</b>	SZ <sub>3</sub> – koncentrace čpavku [mg/l] SZ <sub>4</sub> – koncentrace vodíku [Nml/l]
<b>Základní statistický soubor</b>	Počet hodnot 10 243
<b>Náhodný výběr</b>	Losováním v aplikaci Excel ( <i>RANDBETWEEN</i> )
<b>Výběrový statistický soubor</b>	600 hodnot

*Zdroj: Vlastní*

#### **4.3.2 Příprava dat**

Získaná „surová“ data byla extrahována ve formátu .csv z aplikace CHEMIS postupem uvedeným v kapitole 3.1.1. Výstupem z této fáze výzkumu bylo získání validovaných dat očištěných od nepravdivých a zcela zjevně nesprávných hodnot způsobených např. nesprávnou funkcí měřicího přístroje či výkonovými změnami, které se udály v průběhu celého období sledované palivové kampaně. Touto úpravou byl definován základní statistický soubor ZSS pro výrobní bloky HVB1 a HVB2. Zkoumanými statistickými

jednotkami byly jednotlivé výstupy z kontinuálního chemického měření chladiva primárního okruhu.

Výše uvedeným způsobem byla data z kontinuálního měření čpavku a vodíku na obou výrobních blocích extrahována takto:

- **HVB1** – za období 16. palivové kampaně z období 28. 2. 2018 – 28. 2. 2019 bylo z aplikace Chemis získáno cca 137 600 všech naměřených hodnot. Procesem validace dostupných dat popsáním v kapitole 3.1.1 byl počet sledovaných hodnot zredukován na **8 023** dále uvažovaných hodnot, která jsou základním statistickým souborem (ZSS).
- **HVB2** – za období 15. palivové kampaně z období 27. 7. 2017 – 29. 6. 2018 bylo získáno cca 160 900 hodnot. Tento počet byl stejným postupem jako u HVB1 zredukován na **10 243** hodnot a představují základní statistický soubor.

Pro zajištění dostatečně reprezentativního počtu statistických jednotek pro výběrový statistický soubor (VSS) byla použita tabulka představující přibližné poměry výběrového a základního statistického souboru (Katriak a Milly, 1978). Pro náš případ se uvádí při velikosti ZSS do 10 000 hodnot přibližná velikost 7,5 %. Výsledný počet jednotek VSS byl určen na **600** hodnot. Přehled hodnot ZSS obou bloků je uveden v Příloze A a B.

Pro potřeby statistického výzkumu byl VSS získán prostřednictvím náhodného výběru. Tato operace byla realizována v aplikaci Microsoft Excel pomocí integrované funkce *RANDBETWEEN*. Tímto nástrojem bylo vylosováno potřebných 600 hodnot VSS.

### 4.3.3 Škálování

Při stanovení počtu škál bylo použito Sturgesovo pravidlo. Níže uvedeným výpočtem bylo doporučeno celkem 10 tříd.

$$k \approx 1 + 3,3 \times \log_{10} n \approx 1 + 3,3 \times 2,778 \approx 10,17$$

Vzhledem k tomu, že jde pouze o orientační stanovení počtu tříd, byl konečný počet variačního souboru nastaven na **9 tříd** pro oba sledované statistické znaky (pro oba HVB). Při stanovení konečného počtu tříd hrála roli skutečnost, že VSS obsahoval také odlehlejší hodnoty, které negativně ovlivňovaly jejich celkové rozložení.

Citlivostní analýzou bylo potřebné prověřit, jak změna šíře intervalů ovlivní celkové rozložení statistických znaků. S ohledem na rozložení četností byly postupně testovány všechny čtyři statistické znaky a pro každý statistický znak byla nastavena nejvhodnější varianta rozložení tříd. Prostřední třídy všech statistických znaků (5. třídy) byly nastaveny podle hodnoty aritmetického průměru.

Rozložení intervalů na HVB1 a HVB2 je prezentováno v tabulkách 9, 10, 11 a 12.

**Tabulka 9 – HVB1 třídící intervaly vodíku**

<b>Vodík</b>	
$x_i$	<b>Interval</b>
1	$\leq 20,0$
2	20,1 – 20,2
3	20,3 – 20,4
4	20,5 – 20,6
5	20,7 – 20,8
6	20,9 – 21,0
7	21,1 – 21,2
8	21,3 – 21,4
9	$\geq 21,5$

*Zdroj: Vlastní*

**Tabulka 10 – HVB1 třídící intervaly čpavku**

<b>Čpavek</b>	
$x_i$	<b>Interval</b>
1	$\leq 9,4$
0	9,5 – 9,6
3	9,7 – 9,8
4	9,9 – 10,0
5	10,1 – 10,2
6	10,3 – 10,4
7	10,5 – 10,6
8	10,7 – 10,8
9	$\geq 10,9$

*Zdroj: Vlastní*

**Tabulka 11 – HVB2 třídící intervaly vodíku**

<b>Vodík</b>	
$x_i$	<b>Interval</b>
1	$\leq 20,2$
2	20,3 – 20,4
3	20,5 – 20,6
4	20,7 – 21,8
5	20,9 – 21,0
6	21,1 – 21,2
7	21,3 – 21,4
8	21,5 – 21,6
9	$\geq 21,7$

*Zdroj: Vlastní*

**Tabulka 12 – HVB2 třídící intervaly čpavku**

<b>Čpavek</b>	
$x_i$	<b>Interval</b>
1	$\leq 9,2$
2	9,3 – 9,7
3	9,8 – 10,2
4	10,3 – 10,7
5	10,8 – 11,2
6	11,3 – 11,7
7	11,8 – 12,2
8	12,3 – 12,7
9	$\geq 12,8$

*Zdroj: Vlastní*



#### 4.3.4 Grafy a tabulky

Pro oba statistické znaky  $SZ_1$  a  $SZ_2$  obou výrobních bloků byly zpracovány přehledné tabulky o osmi sloupcích, z nichž první čtyři sloupce byly použity pro grafické vyjádření empirických parametrů. Další čtyři sloupce mají pomocný charakter a jsou určeny ke slnění úkolu parametrizace.

- A. Tabulky 13 a 14 obsahují výpočty parametrů pro statistické oba statistické znaky  $SZ_1$  – vodík a  $SZ_2$  – čpavek na HVB1.

**Tabulka 13 – HVB1  $SZ_1$  vodík – pomocné výpočty**

$x_i$	$n_i$	$n_i/n$	$\Sigma n_i/n$	$x_i n_i$	$x_i^2 n_i$	$x_i^3 n_i$	$x_i^4 n_i$
1	25	0,04	0,08	25	25	25	25
2	29	0,05	0,09	58	116	232	464
3	75	0,13	0,22	225	675	2025	6075
4	79	0,13	0,31	316	1264	5056	20224
5	117	0,20	0,54	585	2925	14625	73125
6	91	0,15	0,69	546	3276	19656	117936
7	66	0,11	0,80	462	3234	22638	158466
8	63	0,11	0,91	504	4032	32256	258048
9	55	0,09	1,00	495	4455	40095	360855
$\Sigma$	600	1,00		3216	20002	136608	995218

*Zdroj: Vlastní*

**Tabulka 14 – HVB1  $SZ_2$  čpavek – pomocné výpočty**

$x_i$	$n_i$	$n_i/n$	$\Sigma n_i/n$	$x_i n_i$	$x_i^2 n_i$	$x_i^3 n_i$	$x_i^4 n_i$
1	17	0,03	0,02	17	17	17	17
2	33	0,06	0,08	66	132	264	528
3	69	0,12	0,20	207	621	1863	5589
4	117	0,20	0,39	468	1872	7488	29952
5	125	0,21	0,60	625	3125	15625	78125
6	102	0,17	0,77	612	3672	22032	132192
7	68	0,11	0,89	476	3332	23324	163268
8	37	0,06	0,95	288	2304	18432	147456
9	32	0,05	1,00	288	2592	23328	209952
$\Sigma$	600	1,00		3047	17667	112373	767079

*Zdroj: Vlastní*

B. Tabulky 15 a 16 obsahují výpočty parametrů pro statistické oba statistické znaky HVB2.

**Tabulka 15 – HVB2 SZ<sub>3</sub> vodík – pomocné výpočty**

$x_i$	$n_i$	$n_i/n$	$\Sigma n_i/n$	$x_i n_i$	$x_i^2 n_i$	$x_i^3 n_i$	$x_i^4 n_i$
1	23	0,04	0,02	23	23	23	23
2	75	0,13	0,13	150	300	600	1200
3	103	0,17	0,34	309	927	2781	8343
4	128	0,21	0,55	512	2048	8192	32768
5	112	0,19	0,74	560	2800	14000	70000
6	53	0,09	0,82	318	1908	11448	68688
7	40	0,07	0,89	280	1960	13720	96040
8	34	0,06	0,95	272	2176	17408	139264
9	32	0,05	1,00	288	2592	23328	209952
$\Sigma$	600	1,00		2712	14732	91500	626278

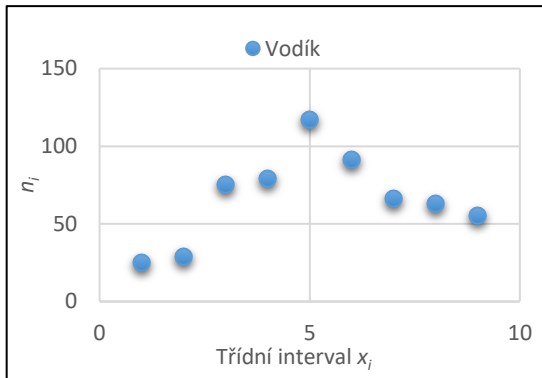
*Zdroj: Vlastní*

**Tabulka 16 – HVB2 SZ<sub>4</sub> čpavek – pomocné výpočty**

$x_i$	$n_i$	$n_i/n$	$\Sigma n_i/n$	$x_i n_i$	$x_i^2 n_i$	$x_i^3 n_i$	$x_i^4 n_i$
1	22	0,04	0,04	22	22	22	22
2	69	0,12	0,16	138	276	552	1104
3	88	0,15	0,31	264	792	2376	7128
4	89	0,15	0,46	356	1424	5696	22784
5	94	0,16	0,62	470	2350	11750	58750
6	66	0,11	0,71	396	2376	14256	85536
7	69	0,12	0,83	483	3381	23667	165669
8	62	0,10	0,93	496	3968	31744	253952
9	41	0,07	1,00	369	3321	29889	269001
$\Sigma$	600	1		1994	17910	119952	863946

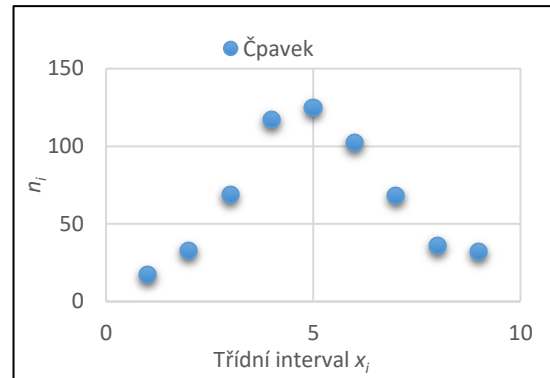
*Zdroj: Vlastní*

A. Z hodnot prvních čtyř sloupců tabulek byly pro statistické znaky HBV1 sestrojeny grafy (obr. 6, 7, 8, 9, 10 a 11) znázorňující absolutní, relativní a kumulativní četnosti.



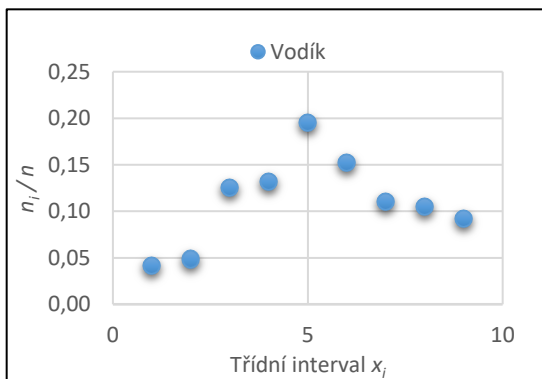
**Obrázek 6 – HVB1 polygon absolutních četností – vodík**

*Zdroj: Vlastní*



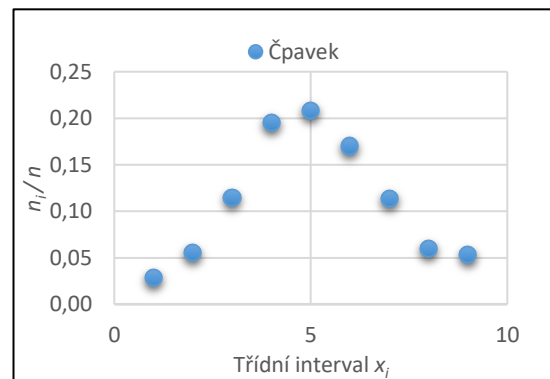
**Obrázek 7 – HVB1 polygon absolutních četností – čpavek**

*Zdroj: Vlastní*



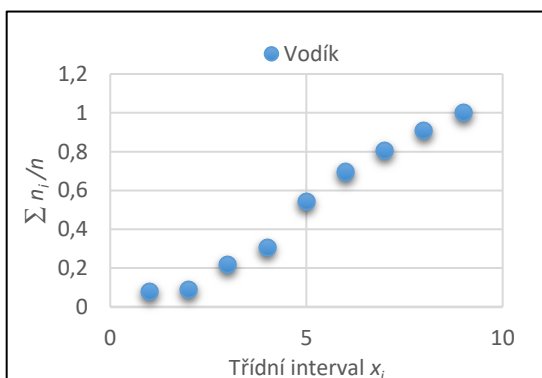
**Obrázek 8 – HVB1 polygon relativních četností – vodík**

*Zdroj: Vlastní*



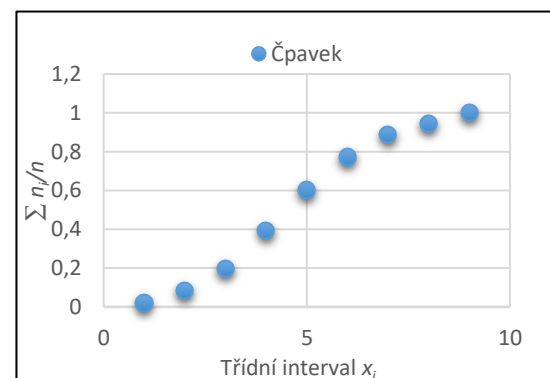
**Obrázek 9 – HVB1 polygon relativních četností – čpavek**

*Zdroj: Vlastní*



**Obrázek 10 – HVB1 polygon kumulativních četností – vodík**

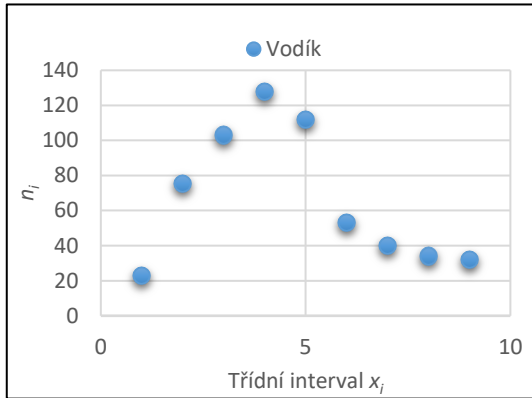
*Zdroj: Vlastní*



**Obrázek 11 – HVB1 polygon kumulativních četností – čpavek**

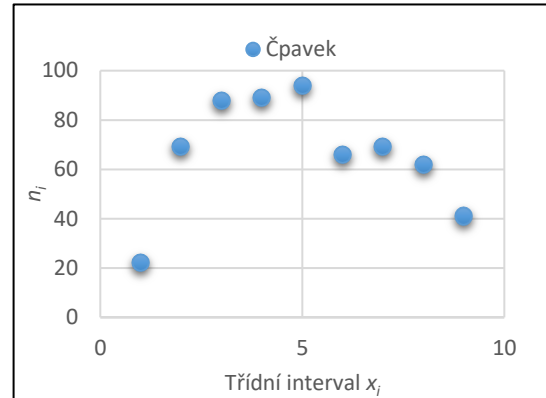
*Zdroj: Vlastní*

B. Z hodnot prvních čtyř sloupců byly sestrojeny grafy (obr. 12, 13, 14, 15, 16 a 17), znázorňující absolutní, relativní a kumulativní četnosti pro statistické znaky HVB 2.



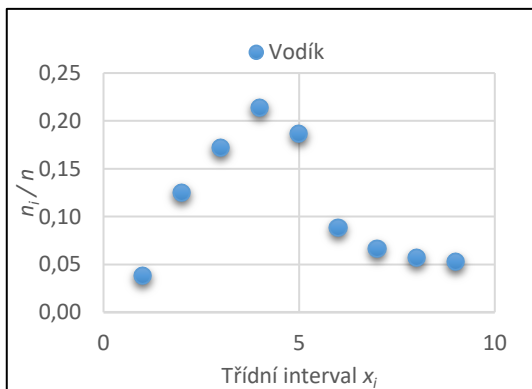
**Obrázek 12 – HVB2 polygon absolutních četností – vodík**

*Zdroj: Vlastní*



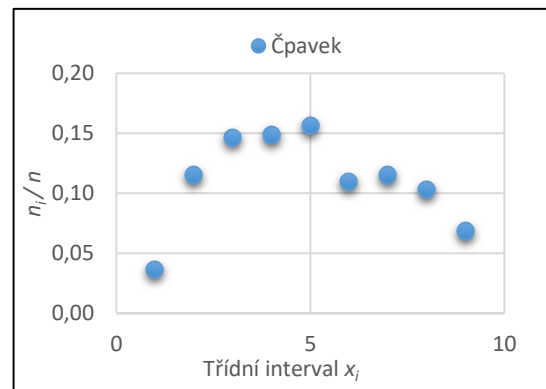
**Obrázek 13 – HVB2 polygon absolutních četností – čpavek**

*Zdroj: Vlastní*



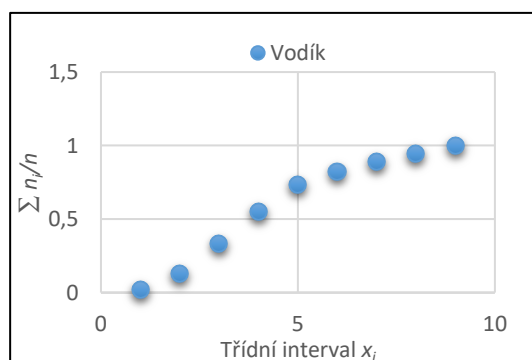
**Obrázek 14 – HVB2 polygon relativních četností – vodík**

*Zdroj: Vlastní*



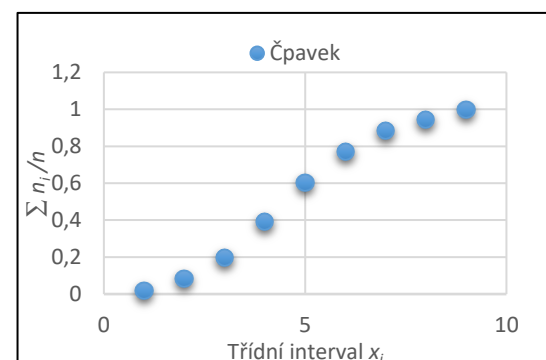
**Obrázek 15 – HVB2 polygon relativních četností – čpavek**

*Zdroj: Vlastní*



**Obrázek 16 – HVB2 polygon kumulativních četností – vodík**

*Zdroj: Vlastní*



**Obrázek 17 – HVB2 polygon kumulativních četností – čpavek**

*Zdroj: Vlastní*

#### 4.3.5 Výpočty empirických parametrů

Výpočty obecných momentů 1. až 4. řádu s využitím pomocných výpočtů uvedených v tabulkách 7, 8, 9 a 10 podle vztahu:  $O_1 = \sum n_i x_i$

##### HVB1 SZ<sub>1</sub> – vodík

$$O_1 = \sum n_i x_i = \frac{3216}{600} = 5,4$$

$$O_2 = \sum n_i x_i^2 = \frac{20002}{600} = 33,3$$

$$O_3 = \sum n_i x_i^3 = \frac{136608}{600} = 227,7$$

$$O_4 = \sum n_i x_i^4 = \frac{995218}{600} = 1658,7$$

##### HVB1 SZ<sub>2</sub> – čpavek

$$O_1 = \sum n_i x_i = \frac{3047}{600} = 5,1$$

$$O_2 = \sum n_i x_i^2 = \frac{17667}{600} = 29,4$$

$$O_3 = \sum n_i x_i^3 = \frac{112373}{600} = 187,3$$

$$O_4 = \sum n_i x_i^4 = \frac{767079}{600} = 1278,5$$

##### HVB2 SZ<sub>3</sub> – vodík

$$O_1 = \sum n_i x_i = \frac{2712}{600} = 4,5$$

$$O_2 = \sum n_i x_i^2 = \frac{14734}{600} = 24,6$$

$$O_3 = \sum n_i x_i^3 = \frac{91500}{600} = 152,5$$

$$O_4 = \sum n_i x_i^4 = \frac{626278}{600} = 1043,8$$

##### HVB2 SZ<sub>4</sub> – čpavek

$$O_1 = \sum n_i x_i = \frac{2994}{600} = 5,0$$

$$O_2 = \sum n_i x_i^2 = \frac{17910}{600} = 29,9$$

$$O_3 = \sum n_i x_i^3 = \frac{119952}{600} = 199,9$$

$$O_4 = \sum n_i x_i^4 = \frac{863946}{600} = 1439,9$$

Parametr polohy  $O_1$  ukazuje na umístění empirického rozdělení četností na ose  $x$  – aritmetický průměr koncentrací statistických znaků  $SZ_1$ ,  $SZ_2$ ,  $SZ_3$  a  $SZ_4$  v prvcích škály. V hodnotách statistického znaku tomu odpovídají tyto koncentrace sledovaných parametrů: **SZ<sub>1</sub> – 20,6 Nml/; SZ<sub>2</sub> – 10,1 mg/l; SZ<sub>3</sub> – 20,7 Nml/l; SZ<sub>4</sub> – 11,0 mg/l.**

Výpočty centrálních momentů 2. až 4. řádu s využitím obecných momentů pro oba statistické znaky na HVB1 a HVB2.

##### HVB1 SZ<sub>1</sub> – vodík

$$C_2 = O_2 - O_1^2 = 33,3 - 5,4^2 = 4,14$$

$$C_3 = O_3 - 3O_2 O_1 + 2O_1^3 = 227,7 - 3 \times 33,3 \times 5,4 + 2 \times 5,4^3 = 3,17$$

$$C_4 = O_4 - 4O_3 O_1 + 6O_2 O_1^2 - 3O_1^4 = 1658,7 - 4 \times 227,7 \times 5,4 + 6 \times 33,3 \times 5,4^2 - 3 \times 5,4^4 = 15,63$$

HVB1 SZ<sub>2</sub> – čpavek

$$C_2 = O_2 - O_1^2 = 29,4 - 5,1^2 = 3,39$$

$$C_3 = O_3 - 3O_2 O_1 + 2O_1^3 = 187,3 - 3 \times 29,4 \times 5,1 + 2 \times 5,1^3 = 2,8$$

$$C_4 = O_4 - 4O_3 O_1 + 6O_2 O_1^2 - 3O_1^4 = 1278,5 - 4 \times 187,3 \times 5,1 + 6 \times 29,4 \times 5,1^2 - 3 \times 5,1^4 = 16,2$$

HVB2 SZ<sub>3</sub> – vodík

$$C_2 = O_2 - O_1^2 = 24,6 - 4,5^2 = 4,35$$

$$C_3 = O_3 - 3O_2 O_1 + 2O_1^3 = 152,5 - 3 \times 24,6 \times 4,5 + 2 \times 4,5^3 = 2,65$$

$$C_4 = O_4 - 4O_3 O_1 + 6O_2 O_1^2 - 3O_1^4 = 1043,8 - 4 \times 152,5 \times 4,5 + 6 \times 24,6 \times 4,5^2 - 3 \times 4,5^4 = 57,5$$

HVB2 SZ<sub>4</sub> – čpavek

$$C_2 = O_2 - O_1^2 = 29,9 - 5^2 = 4,9$$

$$C_3 = O_3 - 3O_2 O_1 + 2O_1^3 = 199,9 - 3 \times 29,9 \times 5 + 2 \times 5^3 = 1,4$$

$$C_4 = O_4 - 4O_3 O_1 + 6O_2 O_1^2 - 3O_1^4 = 1439,9 - 4 \times 199,9 \times 5 + 6 \times 29,9 \times 5^2 - 3 \times 5^4 = 51,9$$

Výpočet směrodatných odchylek a variačních koeficientů pro oba statistické znaky na HVB1 a HVB2.

HVB1 SZ<sub>1</sub> – vodík

$$S_x = \sqrt{C_2} = \sqrt{4,14} = 2,03$$

$$V_x = \frac{S_x}{O_1} = \frac{2,03}{5,4} = 0,377 \approx 38 \%$$

HVB2 SZ<sub>3</sub> – vodík

$$S_x = \sqrt{C_2} = \sqrt{4,35} = 2,08$$

$$V_x = \frac{S_x}{O_1} = \frac{2,08}{4,5} = 0,462 \approx 46 \%$$

HVB1 SZ<sub>2</sub> – čpavek

$$S_x = \sqrt{C_2} = \sqrt{3,39} = 1,84$$

$$V_x = \frac{S_x}{O_1} = \frac{1,84}{5,1} = 0,361 \approx 36 \%$$

HVB2 SZ<sub>4</sub> – čpavek

$$S_x = \sqrt{C_2} = \sqrt{4,9} = 2,21$$

$$V_x = \frac{S_x}{O_1} = \frac{2,2}{5} = 0,44 = 44 \%$$

Výpočet *normovaných momentů 3. a 4. řádu* za použití vypočtených hodnot centrálních momentů pro oba statistické znaky na HVB1 a HVB1.

HVB1 SZ<sub>1</sub> – vodík

$$N_3 = \frac{C_3}{C_2\sqrt{C_2}} = \frac{3,1}{4,16\sqrt{4,16}} = 0,37$$

$$N_4 = \frac{C_4}{C_2^2} = \frac{15,7}{4,16^2} = 0,91$$

$$exces = N_4 - 3 = 0,91 - 3 = -2,09$$

HVB1 SZ<sub>2</sub> – čpavek

$$N_3 = \frac{C_3}{C_2\sqrt{C_2}} = \frac{2,78}{3,39\sqrt{3,39}} = 1,51$$

$$N_4 = \frac{C_4}{C_2^2} = \frac{16,2}{3,39^2} = 1,41$$

$$exces = N_4 - 3 = 1,41 - 3 = -1,59$$

HVB2 SZ<sub>3</sub> – vodík

$$N_3 = \frac{C_3}{C_2\sqrt{C_2}} = \frac{2,65}{4,35\sqrt{4,35}} = 0,29$$

$$N_4 = \frac{C_4}{C_2^2} = \frac{57,5}{4,35^2} = 3,03$$

$$exces = N_4 - 3 = 3,03 - 3 = 0,03$$

HVB2 SZ<sub>4</sub> – čpavek

$$N_3 = \frac{C_3}{C_2\sqrt{C_2}} = \frac{1,4}{4,9\sqrt{4,9}} = 0,13$$

$$N_4 = \frac{C_4}{C_2^2} = \frac{51,9}{4,9^2} = 2,16$$

$$exces = N_4 - 3 = 2,16 - 3 = -0,84$$

#### 4.4 Ověření hypotézy H1

V rámci splnění třetího cíle práce bylo pomocí neparametrického testování ověřována platnost hypotézy H1 prostřednictvím hypotéz H<sub>0</sub> a H<sub>A</sub>.

Pro H<sub>0</sub> platí, že empirické statistické rozdělení statistických znaků lze nahradit normálním rozdělením.

Intervalové rozdělení četností a pomocné výpočty normovaných náhodných hodnot  $u_i$ , plochy  $p_i$  pomocí integrálu s použitím Laplaceovy funkce  $F(u)$  a  $\chi^2$ -testu dobré shody zkoumaných statistických znaků SZ<sub>1</sub>, SZ<sub>2</sub>, SZ<sub>3</sub> a SZ<sub>4</sub>.

Výpočty pro statistický znak SZ<sub>1</sub> – vodík.

Přehled vypočítaných hodnot je uveden v tabulce 17.

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \frac{1,5 - 5,4}{2,03} = -1,92 & p_1 &= \int_{-\infty}^{-1,92} \rho(u) d(u) = F(-1,92) = 1 - F(-1,92) = 0,03 \\
 u_2 &= \frac{2,5 - 5,4}{2,03} = -1,43 & p_2 &= \int_{-1,92}^{-1,42} \rho(u) d(u) = F(-1,42) - F(-1,92) = 0,05 \\
 u_3 &= \frac{3,5 - 5,4}{2,03} = -0,93 & p_3 &= \int_{-1,42}^{-0,93} \rho(u) d(u) = F(-0,93) - F(-1,42) = 0,1 \\
 u_4 &= \frac{4,5 - 5,4}{2,03} = -0,44 & p_4 &= \int_{-0,93}^{-0,44} \rho(u) d(u) = F(-0,44) - F(-0,93) = 0,15 \\
 u_5 &= \frac{5,5 - 5,4}{2,03} = 0,05 & p_5 &= \int_{-0,44}^{0,05} \rho(u) d(u) = F(0,05) - F(-0,44) = 0,19 \\
 u_6 &= \frac{6,5 - 5,4}{2,03} = 0,54 & p_6 &= \int_{0,05}^{0,54} \rho(u) d(u) = F(0,54) - F(0,05) = 0,18 \\
 u_7 &= \frac{7,5 - 5,4}{2,03} = 1,03 & p_7 &= \int_{0,54}^{1,03} \rho(u) d(u) = F(1,03) - F(0,54) = 0,14 \\
 u_8 &= \frac{8,5 - 5,4}{2,03} = 1,53 & p_8 &= \int_{1,03}^{1,53} \rho(u) d(u) = F(1,53) - F(1,03) = 0,09 \\
 u_9 &= \frac{\infty - 5,4}{2,03} = \infty & p_9 &= \int_{1,53}^{\infty} \rho(u) d(u) = F(\infty) - F(1,53) = 0,07
 \end{aligned}$$

**Tabulka 17 – HVB1 SZ<sub>1</sub> – vodík**

$x_i$	<i>Interval střed</i>	$n_i$	$n_i/n$	$u_i$	$p_i$	$np_i$	$\frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$
1	1,5	25	0,04	-1,92	0,03	18	2,72
2	2,5	29	0,05	-1,43	0,05	30	0,03
3	3,5	75	0,13	-0,93	0,1	60	3,75
4	4,5	79	0,13	-0,44	0,15	90	1,34
5	5,5	117	0,20	0,05	0,19	114	0,08
6	6,5	91	0,15	0,54	0,18	108	2,68
7	7,5	66	0,11	1,03	0,14	84	3,86
8	8,5	63	0,11	1,53	0,09	54	1,50
9	$\infty$	55	0,09	$\infty$	0,07	42	4,02
	$\Sigma$	600	1		1		<b>19,99</b>

Zdroj: Vlastní



Výpočty pro statistický znak SZ<sub>2</sub> – čpavek.

Přehled vypočítaných hodnot je uveden v tabulce 18.

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \frac{1,5-5,1}{1,84} = -1,92 & p_1 &= \int_{-\infty}^{-1,96} \rho(u) d(u) = F(-1,96) = 1 - F(-1,96) = 0,03 \\
 u_2 &= \frac{2,5-5,1}{1,84} = -1,41 & p_2 &= \int_{-1,96}^{-1,41} \rho(u) d(u) = F(-1,41) - F(-1,96) = 0,05 \\
 u_3 &= \frac{3,5-5,1}{1,84} = -0,87 & p_3 &= \int_{-1,41}^{-0,87} \rho(u) d(u) = F(-0,87) - F(-1,41) = 0,11 \\
 u_4 &= \frac{4,5-5,1}{1,84} = -0,33 & p_4 &= \int_{-0,87}^{-0,33} \rho(u) d(u) = F(-0,33) - F(-0,87) = 0,18 \\
 u_5 &= \frac{5,5-5,1}{1,84} = 0,22 & p_5 &= \int_{-0,33}^{0,22} \rho(u) d(u) = F(0,22) - F(-0,33) = 0,21 \\
 u_6 &= \frac{6,5-5,1}{1,84} = 0,76 & p_6 &= \int_{0,22}^{0,76} \rho(u) d(u) = F(0,76) - F(0,22) = 0,19 \\
 u_7 &= \frac{7,5-5,1}{1,84} = 1,30 & p_7 &= \int_{0,76}^{1,30} \rho(u) d(u) = F(1,30) - F(0,76) = 0,12 \\
 u_8 &= \frac{8,5-5,1}{1,84} = 1,85 & p_8 &= \int_{1,30}^{1,85} \rho(u) d(u) = F(1,85) - F(1,30) = 0,07 \\
 u_9 &= \frac{\infty-5,1}{1,84} = \infty & p_9 &= \int_{1,85}^{\infty} \rho(u) d(u) = F(\infty) - F(1,85) = 0,04
 \end{aligned}$$

**Tabulka 18 – HVB1 SZ<sub>2</sub> – čpavek**

$x_i$	<i>Interval střed</i>	$n_i$	$n/n$	$u_i$	$p_i$	$np_i$	$\frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$
1	1,5	17	0,03	-1,96	0,03	18	0,06
2	2,5	33	0,06	-1,41	0,05	30	0,30
3	3,5	69	0,12	-0,87	0,11	66	0,14
4	4,5	117	0,20	-0,33	0,18	108	0,75
5	5,5	125	0,21	0,22	0,21	126	0,01
6	6,5	102	0,17	0,76	0,19	114	1,26
7	7,5	68	0,11	1,30	0,12	72	0,22
8	8,5	37	0,06	1,85	0,07	42	0,86
9	$\infty$	32	0,05	$\infty$	0,04	24	2,67
	$\Sigma$	600	1		1		<b>6,26</b>

Zdroj: Vlastní

Výpočty pro statistický znak SZ<sub>3</sub> – vodík.

Přehled vypočítaných hodnot je uveden v tabulce 19.

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \frac{1,5 - 4,5}{2,08} = -1,44 & p_1 &= \int_{-\infty}^{-1,44} \rho(u) d(u) = F(-1,44) = 1 - F(-1,44) = 0,07 \\
 u_2 &= \frac{2,5 - 4,5}{2,08} = -0,96 & p_2 &= \int_{-1,44}^{-0,96} \rho(u) d(u) = F(-1,44) - F(-0,96) = 0,09 \\
 u_3 &= \frac{3,5 - 4,5}{2,08} = -0,48 & p_3 &= \int_{-0,96}^{-0,48} \rho(u) d(u) = F(-0,48) - F(-0,96) = 0,15 \\
 u_4 &= \frac{4,5 - 4,5}{2,08} = 0 & p_4 &= \int_{-0,48}^0 \rho(u) d(u) = F(0) - F(-0,48) = 0,17 \\
 u_5 &= \frac{5,5 - 4,5}{2,08} = 0,48 & p_5 &= \int_0^{0,48} \rho(u) d(u) = F(0,48) - F(0) = 0,18 \\
 u_6 &= \frac{6,5 - 4,5}{2,08} = 0,96 & p_6 &= \int_{0,48}^{0,96} \rho(u) d(u) = F(0,96) - F(0,48) = 0,15 \\
 u_7 &= \frac{7,5 - 4,5}{2,08} = 1,44 & p_7 &= \int_{0,96}^{1,44} \rho(u) d(u) = F(1,44) - F(0,96) = 0,09 \\
 u_8 &= \frac{8,5 - 4,5}{2,08} = 1,92 & p_8 &= \int_{1,44}^{1,92} \rho(u) d(u) = F(1,92) - F(1,44) = 0,05 \\
 u_9 &= \frac{\infty - 4,5}{2,08} = \infty & p_9 &= \int_{1,92}^{\infty} \rho(u) d(u) = F(\infty) - F(1,92) = 0,05
 \end{aligned}$$

**Tabulka 19 – HVB2 SZ<sub>3</sub> – vodík**

$x_i$	<i>Interval střed</i>	$n_i$	$n_i/n$	$u_i$	$p_i$	$np_i$	$\frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$
1	1,5	23	0,03	-1,44	0,07	42	8,60
2	2,5	75	0,06	-0,96	0,09	54	8,17
3	3,5	103	0,12	-0,48	0,15	90	1,88
4	4,5	128	0,2	0	0,17	102	6,63
5	5,5	112	0,21	0,48	0,18	108	0,15
6	6,5	53	0,17	0,96	0,15	90	15,21
7	7,5	40	0,11	1,44	0,09	54	3,63
8	8,5	34	0,06	1,92	0,05	30	0,53
9	$\infty$	32	0,05	$\infty$	0,05	30	0,13
	$\Sigma$	600	1		1		<b>44,92</b>

Zdroj: Vlastní

Výpočty pro statistický znak SZ<sub>4</sub> – čpavek.

Přehled vypočítaných hodnot je uveden v tabulce 20.

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \frac{1,5-5,0}{2,21} = -1,58 & p_1 &= \int_{-\infty}^{-1,58} \rho(u) d(u) = F(-1,58) = 1 - F(-1,58) = 0,06 \\
 u_2 &= \frac{2,5-5,0}{2,21} = -1,13 & p_2 &= \int_{-1,58}^{-1,13} \rho(u) d(u) = F(-1,13) - F(-1,58) = 0,07 \\
 u_3 &= \frac{3,5-5,0}{2,21} = -0,67 & p_3 &= \int_{-1,13}^{-0,67} \rho(u) d(u) = F(-0,67) - F(-1,13) = 0,12 \\
 u_4 &= \frac{4,5-5,0}{2,21} = -0,23 & p_4 &= \int_{-0,67}^{-0,23} \rho(u) d(u) = F(-0,23) - F(-0,67) = 0,16 \\
 u_5 &= \frac{5,5-5,0}{2,21} = 0,23 & p_5 &= \int_{-0,23}^{0,23} \rho(u) d(u) = F(0,23) - F(-0,23) = 0,18 \\
 u_6 &= \frac{6,5-5,0}{2,21} = 0,68 & p_6 &= \int_{0,23}^{0,68} \rho(u) d(u) = F(0,68) - F(0,23) = 0,16 \\
 u_7 &= \frac{7,5-5,0}{2,21} = 1,13 & p_7 &= \int_{0,68}^{1,13} \rho(u) d(u) = F(1,13) - F(0,68) = 0,07 \\
 u_8 &= \frac{8,5-5,0}{2,21} = 1,6 & p_8 &= \int_{1,13}^{1,6} \rho(u) d(u) = F(1,6) - F(1,13) = 0,07 \\
 u_9 &= \frac{\infty-5,0}{2,21} = \infty & p_9 &= \int_{1,6}^{\infty} \rho(u) d(u) = F(\infty) - F(1,6) = 0,06
 \end{aligned}$$

**Tabulka 20 – HVB2 SZ<sub>4</sub> – čpavek**

$x_i$	<i>Interval střed</i>	$n_i$	$n_i/n$	$u_i$	$p_i$	$np_i$	$\frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$
1	1,5	22	0,04	-1,58	0,06	36	10,03
2	2,5	69	0,12	-1,13	0,07	42	1,93
3	3,5	88	0,15	-0,67	0,12	72	0,13
4	4,5	89	0,15	-0,23	0,16	96	4,59
5	5,5	94	0,16	0,23	0,18	108	2,68
6	6,5	66	0,11	0,68	0,16	96	0,38
7	7,5	69	0,12	1,13	0,12	72	0,22
8	8,5	62	0,10	1,6	0,07	42	0,86
9	$\infty$	41	0,07	$\infty$	0,06	36	0,44
	$\Sigma$	600	1		1		<b>21,25</b>

Zdroj: Vlastní

Vyhodnocení výsledků  $\chi^2$ -testu dobré shody jako nástroje pro ověření nulové hypotézy pro testované znaky ( $SZ_1$ ,  $SZ_2$ ,  $SZ_3$  a  $SZ_4$ ): „Empirické rozdělení lze nahradit normálním rozdělením“.

Pro jednotlivé statistické znaky byly určeny kritické teoretické hodnoty prostřednictvím vymezeného počtu stupňů volnosti s využitím statistických tabulek (Záškodný et al., 2016).

*Pro všechny zkoumané znaky ( $SZ_1$ ,  $SZ_2$ ,  $SZ_3$  a  $SZ_4$ ) byl určen stejný počet stupňů volnosti a rozsah pravostranného kritického oboru:*

Určení počtu stupňů volnosti:  $v = k - r - 1 = 9 - 2 - 1 = 6$ ;  $W_6^{\alpha=0,05} = (12,59; \infty)$

### **Hodnocení výsledků pro statistické znaky HVB1**

#### $SZ_1$ – Vodík

Vypočítaná hodnota  $\chi^2 = 19,99$ ;  $W_6^{\alpha=0,05} = (12,59; \infty)$

$$\chi_{\text{exp}}^2 \in W$$

Vzhledem k tomu, že experimentální hodnota  $\chi_{\text{exp}}^2 = 19,99$  sice patří do kritického oboru a je však zároveň velmi blízká kritické hodnotě (12,59), můžeme předpokládat, že empirické rozdělení na hladině statistické významnosti  $\alpha = 0,05$  je velmi blízké testovanému normálnímu rozdělení.

#### $SZ_2$ – Čpavek

Vypočítaná hodnota  $\chi^2 = 6,26$ ;  $W_6^{\alpha=0,05} = (12,59; \infty)$

$$\chi_{\text{exp}}^2 \notin W$$

Vypočítaná experimentální hodnota  $\chi_{\text{exp}}^2 = 6,26$  nepatří do kritického oboru, tudíž nezamítáme nulovou hypotézu a můžeme tvrdit, že empirické rozdělení na hladině statistické významnosti  $\alpha = 0,05$  je možné nahradit normálním rozdělením.

## Hodnocení výsledků pro statistické znaky HVB2

### SZ<sub>3</sub> – Vodík

Vypočítaná hodnota  $\chi^2 = 44,92$ ;  $W_6^{\alpha=0,05} = (12,59; \infty)$

$$\chi_{\text{exp}}^2 \in W$$

Vzhledem k tomu, že experimentální hodnota  $\chi_{\text{exp}}^2 = 44,92$  patří do kritického oboru a je však vzdálenější kritické hodnotě (12,59), můžeme předpokládat, že empirické rozdělení na hladině statistické významnosti  $\alpha = 0,05$  je vzdálenější testovanému normálnímu rozdělení.

### .SZ<sub>4</sub> – Čpavek

Vypočítaná hodnota  $\chi^2 = 21,25$ ;  $W_6^{\alpha=0,05} = (12,59; \infty)$

$$\chi_{\text{exp}}^2 \in W$$

Vzhledem k tomu, že experimentální hodnota  $\chi_{\text{exp}}^2 = 21,25$  patří do kritického oboru a je však také zároveň velmi blízká kritické hodnotě (12,59), můžeme předpokládat, že empirické rozdělení na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  je blízké testovanému normálnímu rozdělení.

## 4.5 Ověření hypotézy H2

Výpočty a grafická znázornění výsledků měření lineární regresi pro statistické znaky (SZ<sub>1</sub>, SZ<sub>2</sub>, SZ<sub>3</sub> a SZ<sub>4</sub>).

Vztah pro jednoduchou lineární regresi je vyjádřen rovnicí:  $y = b_0 + b_1x$ . Výpočet regresní přímky je soustavou normálních rovnic:

$$\sum_{i=1}^k s_i = b_0 \times k + b_1 \sum_{i=1}^k x_i ; k = 600; \sum_{x=1}^k s_i x_i = b_0 \sum_{x=1}^k x_i + b_1 \sum_{x=1}^k X_i^2 ; k = 600$$

#### 4.5.1 Regresní analýza pro SZ<sub>1</sub> a SZ<sub>2</sub> – HVB1

Statistický znak SZ<sub>1</sub> – vodík

$x_i$  – SZ<sub>1</sub>' – čas

$s_i$  – SZ<sub>1</sub> – vodík

Tabulka 21 udává vypočítané hodnoty potřebné pro výpočet regresních parametrů  $b_0$  a  $b_1$ .

**Tabulka 21 – HVB1 ZS<sub>1</sub> – hodnoty pro výpočet regresní analýzy**

$\sum x_i$	$\sum s_i$	$\sum s_i x_i$	$\sum x_i^2$
180300	12505	3733709	72180100

Zdroj: Vlastní

Sestavená soustava normálních rovnic:

$$12505 = 600b_0 + 180300b_1$$

$$3733709 = 180300b_0 + 72180100b_1$$

$$b_0 = 21,243$$

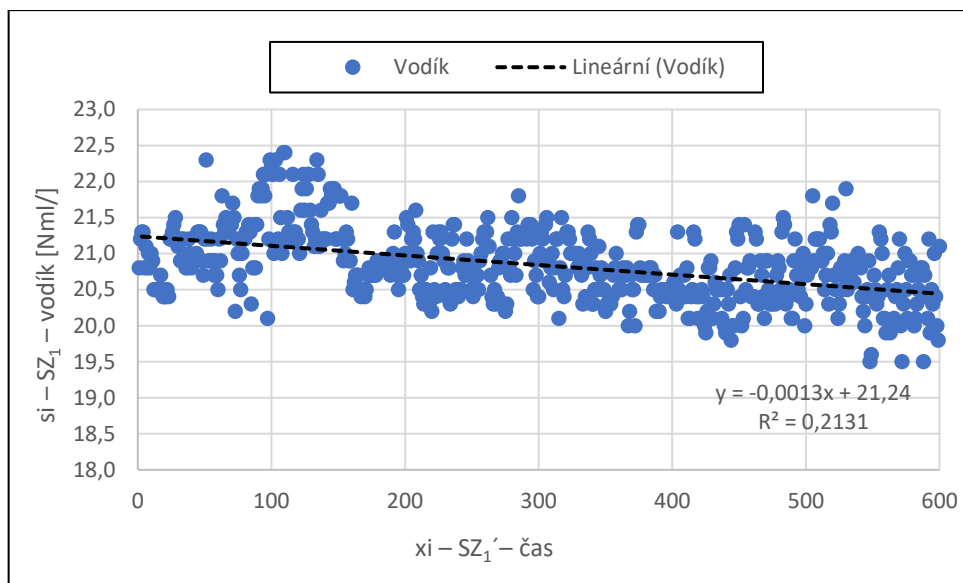
$$b_1 = -0,00133$$

Výpočet rovnice regresní přímky dosazením regresních parametrů  $b_0$  a  $b_1$ .

$$\underline{\underline{y = 21,243 - 0,00133x}}$$

Parametr  $b_1$  vyjadřuje sklon regresní přímky (obr. 18), jímž je úhel, který přímka svírá s osou  $x$ . Tangens tohoto vypočteného úhlu je potom:  $tg(\alpha) = 173,6474^\circ \Rightarrow 173^\circ 38'$

Podle definice směrnice přímky je výsledný úhel 173,64 stupňů, přibližně 173 stupňů 38 minut, grafem (obr. 18) je přibližně rovnoběžka s časovou osou.



Obrázek 18 – HVB1 SZ<sub>1</sub> regrese – vodík

Zdroj: Vlastní

Statistický znak SZ<sub>2</sub> – čpavek

$x_i - SZ_2' - \text{čas}$

$s_i - SZ_2 - \text{čpavek}$

Tabulka 22 udává vypočítané hodnoty potřebné pro výpočet regresních parametrů  $b_0$  a  $b_1$ .

Tabulka 22 – HVB1 SZ<sub>2</sub> – hodnoty pro výpočet regresní analýzy

$\sum x_i$	$\sum s_i$	$\sum s_i x_i$	$\sum x_i^2$
180300	6109	1843316	72180100

Zdroj: Vlastní

Sestavená soustava normálních rovnic:

$$6109 = 600b_0 + 180300b_1$$

$$1843316 = 180300b_0 + 72180100b_1$$

$$b_0 = 10,055$$

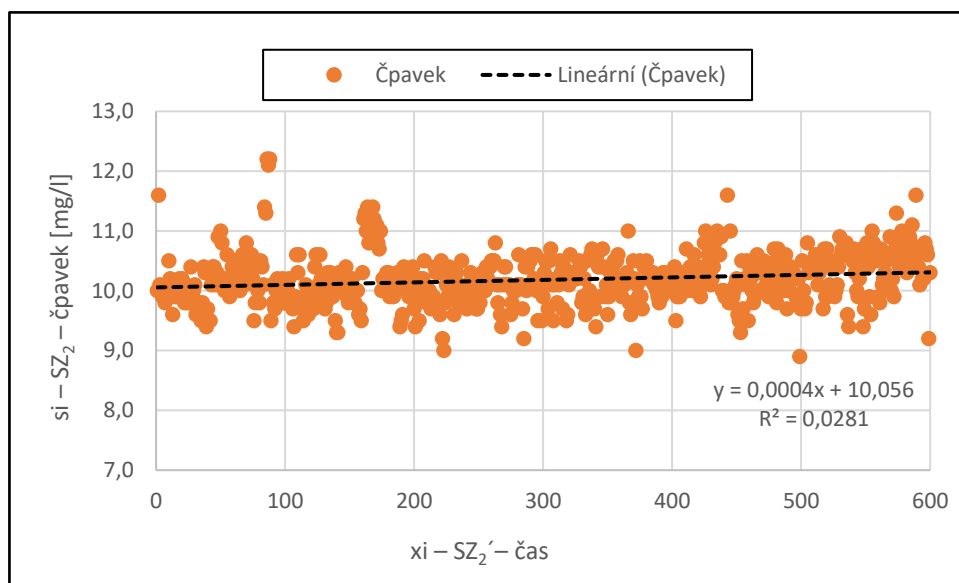
$$b_1 = 0,00042$$

Výpočet rovnice regresní přímky dosazením regresních parametrů  $b_0$  a  $b_1$ .

$$\underline{\underline{y = 10,055 + 0,00042x}}$$

Parametr  $b_1$  vyjadřuje sklon regresní přímky (obr. 19), jímž je úhel, který přímka svírá s osou  $x$ . Tangens tohoto vypočteného úhlu je potom:  $tg(\alpha) = 0.0241^\circ \Rightarrow 0^\circ 1'$

Podle definice směrnice přímky jde o úhel přibližně 0 stupňů, grafem je tedy přibližně rovnoběžka s časovou osou.



**Obrázek 19 – HVB1 SZ<sub>2</sub> regrese – čpavek**

*Zdroj: Vlastní*

#### 4.5.2 Regresní analýza pro SZ<sub>3</sub> a SZ<sub>4</sub> – HVB2

##### Statistický znak SZ<sub>3</sub> – vodík

$x_i$  – SZ<sub>3</sub>' – čas

$s_i$  – SZ<sub>3</sub> – vodík

Tabulka 23 udává vypočítané hodnoty potřebné pro výpočet regresních parametrů  $b_0$  a  $b_1$ .

**Tabulka 23 – HVB2 ZS3 – hodnoty pro výpočet regresní analýzy**

$\sum x_i$	$\sum s_i$	$\sum s_i x_i$	$\sum x_i^2$
180300	12526	3750496	72180100

*Zdroj: Vlastní*



Sestavená soustava normálních rovnic:

$$12526 = 600b_0 + 180300b_1$$

$$3750496 = 180300b_0 + 72180100b_1$$

$$b_0 = 21,098$$

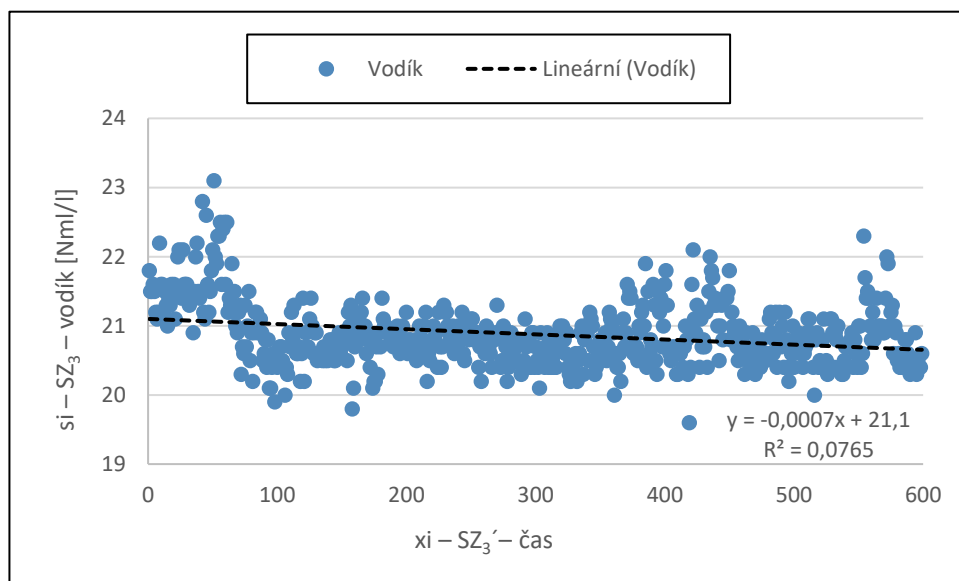
$$b_1 = -0,000737$$

Výpočet rovnice regresní přímky dosazením regresních parametrů  $b_0$  a  $b_1$ .

$$\underline{y = 21,098 - 0,0007x}$$

Tangens úhlu  $\alpha$  je potom:  $\underline{tg(\alpha) = 0.0422^\circ \Rightarrow 0^\circ 2'}$

Podle definice směrnice přímky jde o úhel přibližně 0 stupňů, grafem (obr. 20) je přibližně rovnoběžka s časovou osou.



**Obrázek 20 – HVB2 SZ<sub>3</sub> regrese – vodík**

*Zdroj: Vlastní*

### Statistický znak SZ<sub>4</sub> – čpavek

$x_i$  – SZ<sub>4</sub>' – čas

$s_i$  – SZ<sub>4</sub> – čpavek

Tabulka 24 udává vypočítané hodnoty potřebné pro výpočet regresních parametrů  $b_0$  a  $b_1$ .

**Tabulka 24 – HVB2 ZS4 – hodnoty pro výpočet regresní analýzy**

$\sum x_i$	$\sum s_i$	$\sum s_i x_i$	$\sum x_i^2$
180300	6600	2072131	72180100

*Zdroj: Vlastní*

Sestavená soustava normálních rovnic:

$$6600 = 600b_0 + 180300b_1$$

$$2072131 = 180300b_0 + 72180100b_1$$

$$b_0 = 9,514$$

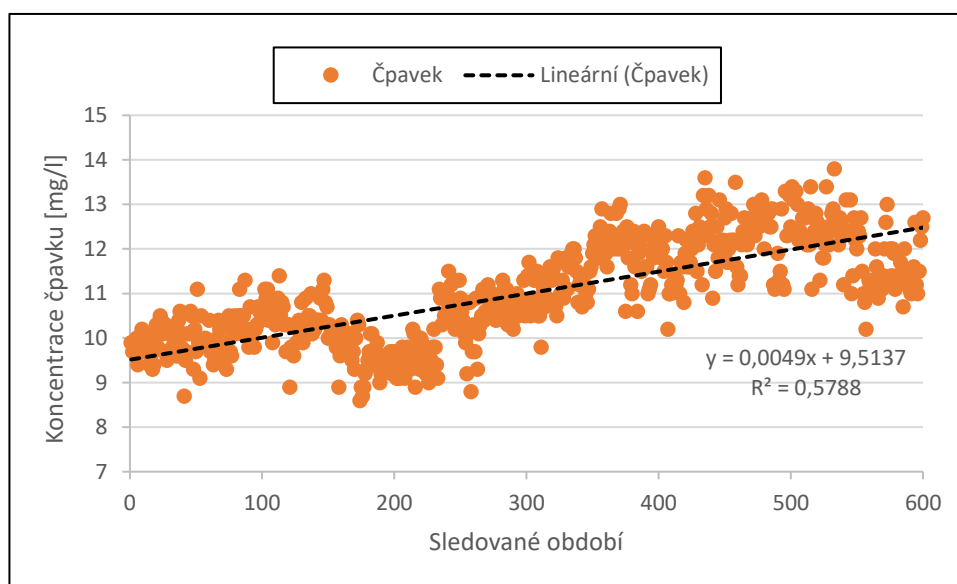
$$b_1 = 0,0049$$

Výpočet rovnice regresní přímky dosazením regresních parametrů  $b_0$  a  $b_1$ .

$$y = 9,514 + 0,0049x$$

Tangens úhlu  $\alpha$  je:  $tg(\alpha) = 0.2807^\circ \Rightarrow 0^\circ 16'$

Podle definice směrnice přímky jde o úhel přibližně 0 stupňů, grafem (obr. 21) je tedy přibližně rovnoběžka s časovou osou.



**Obrázek 21 – HVB2 SZ4 regrese – čpavek**

*Zdroj: Vlastní*

## 4.6 Vyhodnocení cíle 4

Splnění cíle 4 bylo dosaženo prostřednictvím ověření hypotézy H3. K jejímu ověření byly použity statistické metody regresní a korelační analýzy dat. Pro účely statistického dat bylo nutné přistoupit k přeformulování statistického šetření.

### 4.6.1 Ověření hypotézy H3 pro HVB1

#### Lineární regresní analýza

Pro výpočty byly použity absolutní četnosti prvků škály pro šetřené statistické znaky zpracované v tabulkách 19 a 20. Absolutní četnosti a pomocné výpočty pro oba statistické znaky jsou uvedeny v tabulce 25.

SZ<sub>1</sub> – vodík ⇒  $s_i$

SZ<sub>2</sub> – čpavek ⇒  $x_i$

Tabulka 25 – HVB1 regrese SZ<sub>1</sub> a SZ<sub>2</sub>

$s_i - (\text{SZ}_1)$ vodík	$x_i - (\text{SZ}_2)$ čpavek	$x^2$	$s_i x_i$
25	17	289	425
29	33	1089	957
75	69	4761	5175
79	117	13689	9243
117	125	15625	14625
91	102	10404	9282
66	68	4624	4488
63	37	1369	2331
55	32	1024	1760
Σ600	Σ600	Σ52874	Σ48286

Zdroj: Vlastní

Soustava normálních rovnic:

$$\sum_{i=1}^9 s_i = b_0 \times k + b_1 \sum_{i=1}^9 x_i ; \sum_{i=1}^9 s_i x_i = b_0 \sum_{i=1}^9 x_i + b_1 \sum_{i=1}^9 x_i^2 ; k = 600$$

$$600 = 9b_0 + 600b_1 \quad / \cdot 200$$

$$\underline{48286 = 600b_0 + 52874b_1} \quad / \cdot 3$$

$$12000 = 1800b_0 + 1200b_1$$

$$144858 = 1800b_0 + 158622b_1$$

$$132858 = 146622b_1 \Rightarrow b_1 \doteq 0,91$$

$$600 = 9b_0 + 600 \times 0,91 = b_0 \doteq 6$$

Dosažením vypočítaných regresních parametrů získáme rovnici lineární regresní přímky:

$$\underline{y = 6 + 0,91x}$$

Vypočítaný regresní parametr  $b_1$  určuje úhel, který regresní přímka svírá s osou  $x$ , přičemž jde o tangens tohoto úhlu. Hodnota je ukazatelem vlivu koncentrace čpavku na koncentraci vodíku v chladivu primárního okruhu.

$$b_1 = 0,91 \Rightarrow \operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{tg}(0,91) \Rightarrow \alpha = 42^\circ 18' \doteq 42^\circ$$

### **Korelační analýza**

Vstupní hodnoty (absolutní četnosti) statistických znaků ( $SZ_1$  – vodík a  $SZ_2$  – čpavek) použitých při výpočtu jsou uvedeny v tabulce 25.

$SZ_1$  – vodík  $\Rightarrow s$

$SZ_2$  – čpavek  $\Rightarrow x$

---

Obecný moment 1. řádu ( $O_{1s}$ ) pro  $SZ_1$  – vodík:

$$O_{1s} = \frac{\sum s_i}{k} = \frac{600}{9} = 66,7$$

Obecný moment 1. řádu ( $O_{1x}$ ) pro  $SZ_2$  – čpavek:

$$O_{1x} = \frac{\sum x_i}{k} = \frac{600}{9} = 66,7$$

Výpočet směrodatné odchylky ( $S_s$ )  $SZ_1$  – vodík:

$$S_s = \sqrt{\frac{1}{9} \sum (s_i - O_{1s})^2} = \sqrt{\frac{1}{9} (1738,89 + 1421,29 + 68,89 + \dots + 136,89)} = \sqrt{739,1} = 27,2$$

Výpočet směrodatné odchylky ( $S_x$ ) SZ<sub>2</sub> – čpavek:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{9} \sum (x_i - O_{1x})^2} = \sqrt{\frac{1}{9} (2470,69 + 1135,69 + 5,29 + \dots + 1204,09)} = \sqrt{12874} = 37,82$$

Výpočet kovariačního koeficientu:

$$S_{xs} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 (x_i - O_{1x})(s_i - O_{1s}); k = 9$$

$$S_{xs} = \frac{1}{9} [(-41,7)(-49,7) + (-37,7)(33,7) + (8,3 \times 2,3) + \dots + (-11,7)(-34,7)]$$

$$S_{xs} = 920,7$$

Výpočet lineární korelace podle Pearsonova vztahu:

$$k_{xs} = \frac{S_{xs}}{S_x S_s} = \frac{920,7}{27,2 \times 37,82} \doteq \mathbf{0,9}$$

Výsledná hodnota korelačního koeficientu **0,9** poukazuje na silnou pozitivní lineární korelaci mezi koncentracemi čpavku a vodíku v chladiči primárního okruhu HVB1.

#### 4.6.2 *Ověření hypotézy H3 pro HVB2*

##### **Lineární regresní analýza**

Pro výpočty byly použity absolutní četnosti prvků škály pro šetřené statistické znaky zpracované v tabulkách 21 a 22. Absolutní četnosti a pomocné výpočty pro oba statistické znaky je uveden v tabulce 26.

SZ<sub>3</sub> – vodík  $\Rightarrow s_i$

SZ<sub>4</sub> – čpavek  $\Rightarrow x_i$

Soustava normálních rovnic:

$$\sum_{i=1}^9 s_i = b_0 \times k + b_1 \sum_{i=1}^9 x_i; \sum_{x=1}^9 s_i x_i = b_0 \sum_{x=1}^9 x_i + b_1 \sum_{x=1}^9 x_i^2; k = 600$$

Tabulka 26 – HVB2 regrese SZ<sub>3</sub> a SZ<sub>4</sub>

$s_i$ – (SZ <sub>3</sub> ) vodík	$x_i$ – (SZ <sub>4</sub> ) čpavek	$x_i^2$	$s_i x_i$
23	22	484	506
75	69	4761	5175
103	88	7744	9064
128	89	7921	11392
112	94	8836	10528
53	66	4356	3498
40	69	4761	2760
34	62	3844	2108
32	41	1681	1312
600	∑600	∑44388	∑46343

Zdroj: Vlastní

$$600 = 9b_0 + 600b_1 \quad / \cdot 200$$

$$46343 = 600b_0 + 44388b_1 \quad / \cdot 3$$

$$12000 = 1800b_0 + 1200b_1$$

$$139029 = 1800b_0 + 133164b_1$$

$$127029 = 121164b_1 \Rightarrow b_1 \doteq 1,05$$

$$600 = 9b_0 + 600 \times 1,05 = b_0 \doteq -3,33$$

Dosazením vypočítaných regresních parametrů získáme rovnici lineární regresní přímky:

$$y = -3,33 + 1,05x$$

Vypočítaný regresní parametr  $b_1$  určuje úhel, který svírá regresní přímka s osou  $x$ , přičemž jde o tangens tohoto úhlu. Hodnota je ukazatelem vlivu koncentrace čpavku na koncentraci vodíku v chladivu primárního okruhu.

$$b_1 = 1,05 \Rightarrow \operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{tg}(1,05) \Rightarrow \alpha = 46^\circ 20' \doteq 46^\circ$$

### Korelační analýza

Vstupní hodnoty (absolutní četnosti) statistických znaků (SZ<sub>3</sub> – vodík a SZ<sub>4</sub> – čpavek) použitých při výpočtu jsou uvedeny v tabulce 26.

Obecný moment 1. řádu ( $O_{1s}$ ) pro SZ<sub>3</sub> – vodík:

$$O_{1s} = \frac{\sum s_i}{k} = \frac{600}{9} = 66,7$$

Obecný moment 1. řádu ( $O_{1s}$ ) pro SZ<sub>4</sub> – čpavek:

$$O_{1x} = \frac{\sum x_i}{k} = \frac{600}{9} = 66,7$$

Výpočet směrodatné odchylky ( $S_s$ ) SZ<sub>3</sub> – vodík:

$$S_s = \sqrt{\frac{1}{9} \sum (s_i - O_{1s})^2} = \sqrt{\frac{1}{9} (1909,69 + 68,89 + 1317,69 + \dots + 1204,09)} = \sqrt{1364,45} = 36,94$$

Výpočet směrodatné odchylky ( $S_x$ ) SZ<sub>4</sub> – čpavek:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{9} \sum (x_i - O_{1x})^2} = \sqrt{\frac{1}{9} (1998,09 + 5,29 + 453,69 + \dots + 660,49)} = \sqrt{487,56} = 22,1$$

Výpočet kovariačního koeficientu:

$$S_{xs} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 (x_i - O_{1x})(s_i - O_{1s}); k = 9$$

$$S_{xs} = \frac{1}{9} [(-44,7)(-43,7) + 2,3 \times 8,3 + 21,3 \times 36,3 + \dots + (-25,7)(-34,7)]$$

$$S_{xs} = 704,8$$

Výpočet lineární korelace pomocí Pearsonova vztahu:

$$k_{xs} = \frac{S_{xs}}{S_x S_s} = \frac{704,8}{22,1 \times 36,94} \doteq \mathbf{0,86}$$

Výsledná hodnota korelačního koeficientu **0,86** poukazuje na silnou pozitivní lineární korelaci mezi koncentracemi čpavku a vodíku v chladiči primárního okruhu HVB2.

Porovnáme-li výsledky korelačních koeficientů na obou výrobních blocích ( $k_{xs-HVB1} = \mathbf{0,9}$ ;  $k_{xs-HVB2} = \mathbf{0,86}$ ) dospějeme k závěru, že na obou výrobních blocích provozovaných se stejným chemickým režimem je podle předpokladu korelace mezi koncentracemi čpavku a vodíku v primárním okruhu obdobná a obě korelace jsou velmi silného pozitivního charakteru.

## 5 DISKUSE

S ohledem na použitý postup zpracování stanovených cílů bychom mohli diplomovou práci rozdělit na dvě etapy. V první etapě zpracování jsme splnili první a druhý cíl práce pomocí systematické analýzy. Prvním cílem bylo vymezení významu chemických procesů, které se odehrávají v chladiivu primárního okruhu při provozu reaktoru na nominálním výkonu. Druhým cílem práce bylo vymezení významu rozpuštěného vodíku v chladiivu primárního okruhu a osvětlit kompenzaci jeho vlivů na korozi komponent zařízení primárního okruhu se zvláštním zřetelem na vliv radiolyticky vzniklého kyslíku a popsat způsob generování vodíku z amoniaku.

Ve druhé etapě jsme se věnovali splnění třetího a čtvrtého cíle práce, k jejichž splnění bylo nutné pomocí metod deskriptivní a matematické statistiky ověřovat stanovené hypotézy H1, H2 a H3. Stanoveným cílem bylo na základě vybraného období palivové kampaně provést šetření časových průběhů koncentrací čpavku a vodíku v rámci obou výrobních bloků a zkoumat jednostrannou závislost mezi koncentracemi čpavku a vodíku na základě faktu, že vodík je generován radiolytickým rozkladem čpavku.

Následující kapitoly obsahují diskusi o dílčích částech zpracování této práce a také pro mne zajímavé poznatky získané během studia teoretické části a radiochemických procesů, které se odehrávají v aktivní zóně reaktoru provozovaným na výkonovém stavu.

### 5.1 Příprava a výběr dat

Zdánlivě jednoduchým se zpočátku jevil úkol vybrat potřebná data ke statistickému šetření, jichž bylo třeba k ověření stanovených cílů a hypotéz. Vzhledem k tomu, že pro zkoumání bylo vybráno období celého průběhu palivové kampaně, bylo nutné zprvu přistoupit k pečlivé verifikaci všech dostupných dat. Bylo nutné vyřadit ze souboru dat všechny výrazně odlehle hodnoty, jež byly způsobené např. výkonovými změnami reaktoru nebo poruchami on-line analyzátorů. Zároveň byly ze základního statistického souboru vyřazeny hodnoty naměřené na začátku palivové kampaně, kdy bylo z graficky znázorněných hodnot patrné výrazné rozkolísání naměřených hodnot způsobených pravděpodobně nestacionárním stavem výkonu reaktoru. Bylo rovněž nutné přistoupit



k vyřazení naměřených hodnot z posledních 14 dní kampaně, kdy byl reaktor provozován na tzv. „výkonový efekt“ a docházelo tak k postupnému poklesu výkonu reaktoru.

Jak v interním provozním předpisu uvádí Zach et al. (2016), je potřeba zdůraznit, že není známa korelace mezi koncentrací čpavku a výkonem reaktoru, resp. úrovní radiace. Aby nám tato „neznámá proměnná“ nevstupovala do výpočtů a nezhodnocovala tak jejich validitu, byla vybrána pouze data generovaná při nominálním výkonu reaktoru. Z takto upraveného základního statistického souboru bylo náhodným losováním vybráno 600 hodnot.

## **5.2 Měření koncentrací chemických látek a jejich dávkování**

Při systémové analýze zpracovávané pro splnění cílů 1 a 2 jsem při studování problematiky měření koncentrací chemických látek pomocí on-line analyzátorů narazil na pozoruhodnou vlastnost jaderného reaktoru. Velmi zajímavý byl pro mne poznatek, že jaderný reaktor se chová jako „*průtočný ideálně míchaný reaktor*“. Podle Hasala et al. (2007) pro takový reaktor (rozuměj chemický reaktor) platí, že koncentrace a teplota chemických složek na výstupu z reaktoru je stejná jako koncentrace a teplota těchto složek v reakční směsi. V praxi to znamená, že při dávkování chemických reagentů do chladiwa primárního okruhu jaderného reaktoru se při dávkování čpavku do chladiwa projevuje změna koncentrací čpavku v podstatě „okamžitě“. Totéž platí také pro měření koncentrace vodíku, který je generován radiolytickým rozkladem právě čpavku.

Výše uvedená „vlastnost“ reaktoru je také velmi výhodná pro obsluhu blokové dozorny, která tak má relativně okamžitý přehled o aktuálním stavu koncentrací všech sledovaných významných chemických parametrů a může tak při jejich změnách velmi pružně reagovat např. změnou jejich dávkovaného množství. Například právě při sledování zkoumané koncentrace čpavku (jejíž koncentraci/množství určuje technolog chemických režimů denním plánem spolu s udržení určené minimální koncentrace rozpuštěného vodíku) musí někdy obsluha zasáhnout v případech, kdy dojde k neplánovanému výpadku automatického dávkování čpavku doplňovacím čerpadlem. Tato situace se řeší zahájením režimu „ručního dávkování“, kdy se zpravidla prodlouží časové periody dávkování reagentu.

Další zajímavou skutečností pro mne bylo zjištění, že dávkování čpavku do chladiwa nebylo od začátku provozu elektrárny realizováno stejným způsobem jako je tomu dnes. V počátcích provozu jaderného reaktoru byl čpavek dávkován pouze v ručním režimu v relativně dlouhých časových periodách. Výsledkem toho byla skutečnost, že koncentrace čpavku v chladiwu relativně významně kolísala. Přechodem na v současnosti realizovaný automatický režim dávkování se tento problém úspěšně vyřešil.

Neméně zajímavé pro mne bylo také zjištění, že v měsíčních zprávách vydávanými oddělením chemických režimů „*Hodnocení chemických režimů těsnosti bariér a korozního stavu*“ (Zach et al., 2019) se kromě významných a ostře sledovaných chemických parametrů sleduje také množství spotřebovaného čpavku na základě změny hladiny v nádržích 1TB21B01 a 2TB21B01. V interní zprávě vydané za leden 2019 (Zach et al., 2019) se uvádí, že spotřeba 5% čpavku na HVB1 a HVB2 byla 7,2 l/hod resp. 8,3 l/hod. V téže zprávě autor uvádí, že průměrná koncentrace za sledované období byla na HVB1 a HVB2 u vodíku stejná tj. 20,3 Nml/l a u čpavku 10,3, resp. 11,7 mg/l. Uvedené informace o naměřených koncentracích a spotřebách čpavku zřetelně ukazují na skutečnost, že k udržení potřebné minimální koncentrace rozpuštěného vodíku v chladiwu primárního okruhu je u HVB2 potřeba dávkování většího množství čpavku, resp. udržování vyšší koncentrace. Výsledky zmíněné zprávy také korespondují s naměřenými výsledky v této práci (kap. 4.3.5), kde byly vypočítány obecné momenty prvního řádu, jež ukazují polohu střední hodnoty na vodorovné ose  $x$ , resp. aritmetický průměr koncentrací zkoumaných znaků v prvcích škály. V hodnotách statistického znaku tomu odpovídají koncentrace pro statistické znaky:  $SZ_1$  vodík – 20,6 Nml/l;  $SZ_2$  čpavek – 10,1 mg/l;  $SZ_3$  vodík – 20,7 Nml/l;  $SZ_4$  čpavek – 11,0 mg/l.

Z hodnocení výsledků uvedených v této práci a ve vydané zprávě vyplývá, že k dosažení potřebné minimální koncentrace rozpuštěného vodíku v chladiwu primárního okruhu je na HVB2 potřebné udržovat o cca 9 resp. 13,6 % vyšší koncentraci čpavku. Jinak řečeno, pro HVB2 je potřebné dávkovat větší množství čpavku nežli na HVB1.

Zdůvodnění výše diskutované skutečnosti není vůbec snadné a v tuto chvíli ani není známo. Možným důvodem by zde mohly být například jisté drobné odlišnosti v provedení komponent primárního okruhu, rozdílná účinnost při odplyňování chladiwa nebo odlišné extrémní podmínky, které panují v aktivní zóně reaktoru nebo jiný dosud neznámý faktor.

Jako další diskutovanou příčinou rozdílné spotřeby čpavku se jeví chybné měření koncentrace vodíku on-line analyzátozem. Tato varianta možného vysvětlení je na elektrárně také diskutována především z toho důvodu, že přesnost měření vodíku může být ovlivněna celou řadou faktorů. Ačkoliv výrobce uvádí nejistotu měření cca  $\pm 3\%$ , na přesnost měření působí také teplota měřeného vzorku (její stabilita), nastavený „protitlak“ (zabraňující úniku rozpuštěného vodíku z kapaliny) a parciální tlak vodíku v chladivu (přítomnost dalších plynů, resp. účinnost uzlu odplynování chladiva). Na rozdíl od on-line měření koncentrace čpavku, jehož koncentrace se pravidelně ověřuje také ručním odběrem vzorku a měřením v laboratoři metodou kapilární elektroforézy, nelze on-line naměřenou koncentraci vodíku nijak ověřit.

V souvislosti s ověřováním jednostranné závislosti mezi koncentracemi čpavku a vodíku, jejichž závislost je zřejmá, a byla předmětem zkoumání této práce, by bylo velmi zajímavé rozšířit statistické šetření o koncentraci kyslíku a sledovat tak vzájemnou závislost tří proměnných. Tato varianta šetření však nebyla možná z důvodů velmi nízkých měřených hodnot koncentrací kyslíku, které se pohybovaly zpravidla pod mezí detekce měřicího přístroje. Negativní vliv kyslíku a jeho vzájemná souvislost se čpavkem a vodíkem byla osvětlena v kap. 1.6.3.

### **5.3 Ověření hypotézy H1**

Byla ověřována hypotéza H1, že distribuce časových měření koncentrací čpavku a vodíku v rámci obou výrobních bloků HVB1 a HVB2 bude blízká teoretické normální distribuci. Tato hypotéza byla potvrzena  $\chi^2$ -testem, který se často užívá k testování neparametrických hypotéz jako tzv. testu dobré shody neboli testem normality. Ze čtyř testovaných distribucí zkoumaných statistických znaků byla jedna z nich ve shodě s normálním teoretickým rozdělením, ostatní tři distribuce testovaných hodnot však byly hodnoceny jako blízké nebo poněkud vzdálenější tomuto rozdělení. Pokud bychom se měli pokusit o vysvětlení, proč byly testované distribuce hodnoceny jako blízké teoretickému normálnímu rozdělení a nebyly s nimi přímo ve shodě, museli bychom se blíže podívat na všechny možné faktory, které mohou ovlivňovat měřené hodnoty. Je zřejmé, že identifikovat všechny negativní faktory ovlivňující výsledné naměřené hodnoty koncentrací není nijak snadné a svým rozsahem by to výrazně přesahovalo rámeček

této práce. Přesto bychom se mohli zmínit přinejmenším o nejistotě měření, kterou je potřeba brát do úvahy při měření jakékoli veličiny.

O problematice měření vodíku jsme se již zmínili v kapitole 1.9.2 a 5.2, kde jsme si osvětlili působení vlivů, negativně ovlivňující přesnost stanovení. Situace při měření čpavku není tolik problematická, jelikož je, jak jsme se už zmínili také v kapitole 5.2, pravidelně ověřována ručním měřením jinou a relativně přesnější analytickou metodou (kapilární elektroforéza). U výsledků generovaných on-line analyzátozem pomocí iontové chromatografie je tak potřeba brát v úvahu nejistotu stanovení, která nabývá v případě čpavku hodnot  $\pm 20\%$ . Zmínit bychom se také mohli o drobných výkonových změnách, které se odehrávají v pravidelných intervalech z důvodu postupného vyhořívání jaderného paliva. Výkon tak v podstatě osciluje kolem nominálního výkonu (tj.  $100 \pm \text{cca } 1\%$ ).

#### 5.4 Ověření hypotézy H2

Při ověřování hypotézy H2 byly zkoumány časové závislosti koncentrací čpavku a vodíku v rámci obou bloků HVB1 a HVB2, kdy byl ověřován předpoklad, že výsledná lineární regresní funkce bude velmi blízká rovnoběžce s osou  $x$ . Tento předpoklad vyplývá z interních provozních předpisů, které určují udržování minimální koncentrace vodíku v chladivu primárního okruhu. Autoři provozního předpisu „*Vodochemický režim pro primární okruh*“ (Zach et al., 2016) určují řídicí parametry rozsah koncentrací vodíku a čpavku takto:

- vodík  $\rightarrow$  20–40 Nml/l,
- čpavek  $\rightarrow$  8–16 mg/l.

Snahou je udržovat koncentraci vodíku na nejmenší možné požadované koncentraci, tzn. že reálně se koncentrace vodíku během celé kampaně udržuje přibližně na hodnotě 21 Nml/l. Důvodem udržování jeho koncentrace na takto nízké úrovni je jeho negativní vliv na komponenty primárního okruhu zmiňované v kapitole 1.8.7.

Při ověření hypotézy H2 jsme si prokázali, že regresní funkce všech zkoumaných statistických znaků jsou blízké rovnoběžce s osou  $x$ . Pokud se však na tyto průběhy podíváme blíže, zjistíme zajímavou skutečnost. Diskutované průběhy regresních přímek

totiž mají na obou blocích zdánlivě podobný charakter. Tímto charakterem je sice velmi malá, ale přesto pozorovatelná tendence lehce klesající koncentrace vodíku v čase na obou blocích (viz obr. 18 a 20), a naopak velmi lehce stoupající tendence koncentrace čpavku taktéž na obou blocích (viz obr. 19 a 21). Pokud bychom se oprostili od faktu, že tyto trendy jsou vzhledem k minimálním sklonům regresních přímk v podstatě zanedbatelné, mohli bychom uvažovat o možném pravděpodobně neznámém vlivu, který by mohl způsobovat zvýšenou spotřebu čpavku, respektive snížení radiolytického rozkladu dávkovaného čpavku. Teoreticky a s ohledem na hlubší neznalost procesů reaktorové fyziky bychom zde mohli o jako možné příčině spekulovat o postupně vyhořívajícím palivu, jehož parametry se v průběhu kampaně s časem mění. Potvrzení nebo vyvrácení této domněnky by vyžadovalo odborné znalosti v oboru jaderného inženýrství zvláště v oblasti jaderné a reaktorové fyziky.

### 5.5 Ověření hypotézy H3

Pro ověření hypotézy H3 bylo nutné přeformulovat statistické šetření způsobem, kdy jsme za jednotlivé statistické znaky pro čpavek a vodík dosadili za hodnoty  $x_i$  a  $s_i$  absolutní četnosti čpavku a vodíku v prvcích škály. S ohledem na tuto skutečnost je potřeba si uvědomit, že při interpretaci vypočítané regresní přímky nelze zjistit konkrétní hodnoty statistického znaku v koncentracích, nýbrž pouze v prvcích škály. Výslednou regresní přímku je nutné interpretovat tak, že z počtu naměřených hodnot čpavku, v měřeném intervalu reprezentovaným prvkem škály, lze získat počet hodnot koncentrací vodíku ve vazbě na prvky škály.

Naměřené hodnoty korelačních koeficientů jsou na obou blocích obdobné (tj. HVB1 – 0,9 a HVB2 – 0,86). V této souvislosti zde také vyvstává otázka, proč je na HVB2 spotřeba čpavku o cca 1 mg/l vyšší (rozdílná spotřeba čpavku byla diskutována v kap. 5.2, ve které byly diskutovány její možné teoretické příčiny. Skutečnost obdobné korelace na obou blocích tak může indikovat jinou, dosud neznámou veličinu/jev (mimo radiaci), která způsobuje vyšší, respektive nižší spotřebu čpavku.

## 6 ZÁVĚR

Předmětem diplomové práce bylo provedení analýzy vybraných chemických parametrů chladiva primárního okruhu Jaderné elektrárny Temelín. K hlubšímu zkoumání byly z chemických parametrů vybrány čpavek a vodík, jejichž koncentrace jsou měřené on-line analyzátory. Ke statistickému šetření byla vybrána období 16. palivové kampaně na HVB1 a 15. palivové kampaně na HVB2.

V rámci splnění cíle 1 byla provedena podrobná systémová analýza chemického složení chladiva včetně popisu jejich významu pro bezpečný, dlouhodobý a bezporuchový provoz. Byly vymezeny podstatné radiochemické procesy ovlivňující korozní děje konstrukčních materiálů použitých v komponentách primárního okruhu.

V rámci druhého cíle práce byla osvětlena nezbytnost udržování „přebytkového“ množství rozpuštěného vodíku v chladivu primárního okruhu, jehož význam spočívá v jeho úloze eliminovat kyslík vznikající radiolýzou vody. K dosažení potřebné koncentrace vodíku je do chladiva dávkován čpavek, jehož radiolytickým rozkladem v aktivní zóně reaktoru je vodík generován.

Třetím cílem práce bylo na základě šetření časových průběhů koncentrací čpavku a vodíku v rámci celé kampaně ověřit prostřednictvím hypotéz H1 a H2. Hypotéza H1 byla dílčím způsobem potvrzena pomocí  $\chi^2$ -testu, který potvrdil, že pro koncentrace čpavku a vodíku na HVB1 platí, že empirická distribuce vodíku je blízká teoretickému normálnímu rozdělení a distribuce čpavku je testovanému rozdělení rovněž blízká. Pro HVB2 potom platí, že empirická distribuce čpavku i vodíku je blízká teoretickému normálnímu rozdělení. Hypotézou H2 byla ověřena časová závislost koncentrací čpavku a vodíku v rámci obou bloků. Výsledkem měření bylo potvrzení, že tato časová závislost ve všech ověřovaných případech odpovídá regresní funkci, která je blízká rovnoběžce s časovou osou.

Posledním cílem bylo zkoumání jednostranné závislosti mezi koncentracemi čpavku a vodíku. Pro účely splnění cíle byla zformulována hypotéza H3, že v případě vedení stejné technologie a vedení stejného chemického režimu na obou blocích bude korelace mezi koncentracemi čpavku a vodíku v chladivu primárního okruhu obdobná a blízká silné pozitivní korelaci. Hypotéza byla ověřena pomocí jednoduché lineární regresní

a korelační analýzy, která potvrdila silnou korelaci mezi zkoumanými parametry. Pro HVB1 a HVB2 platí korelační koeficienty  $k_{xs-HVB1} = 0,9$  a  $k_{xs-HVB2} = 0,86$ . Z výsledků je patrné, že korelace mezi čpavkem a vodíkem je dle předpokladu na obou blocích obdobná.

Nastavené cíle práce a formulované hypotézy byly splněny aplikovaným kvantitativním výzkumem. Pomocí statistických metod bylo provedeno ověření zformulovaných „pravdivých“ hypotéz. Ke zkoumání jevu (tj. ověření teoretické normální distribuci naměřených koncentrací a jednostranné závislosti koncentrace vodíku na čpavku) byly použity statistické metody  $\chi^2$ -test normality a jednoduchá lineární regresní a korelační analýza.

Za teoretické přínosy práce bychom mohli považovat aplikaci dvojrozměrných statistických analýz na probíhající radiochemické procesy v chladivu primárního okruhu. Pomocí systematické analýzy byla popsána v kap. 1.1 a 1.2 úroveň jaderné fyziky, úroveň technologické struktury v kap. 1.3 a 1.4, role chemického režimu chladiwa v kap. 1.5, úroveň obsahu chemických složek v kap. 1.6, úroveň probíhajících chemických procesů v kap. 1.8 a úroveň metrická v kap. 1.9.

Praktickým přínosem práce je prověření potřebné regresní a korelační vazby vybraných chemických parametrů chladiwa. Získané poznatky lze využít v praxi při hodnocení vedení chemického režimu a při hledání příčin drobných odchylek koncentrací čpavku a vodíku v chladivu primárního okruhu na obou výrobních blocích.

V kontextu s dosaženými výsledky této práce je možné v navazujících pracích navrhnout aplikaci regresní a korelační analýzy dalších chemických složek a chemických procesů odehrávajících se v chladivu primárního okruhu. Předmětem dalších prací by mohlo být např. ověření závislosti dávkovaného draslíku, pH chladiwa a koncentrace kyseliny borité. S ohledem na skutečnost, že korelace mezi koncentrací čpavku a výkonem reaktoru (radiací) není známa, bylo by zajímavé provést šetření regresní a korelační závislosti čpavku a vodíku při postupném snižování výkonu reaktoru (provoz na „výkonový efekt“) nebo při plánovaném odstavení bloku za účelem výměny paliva.

## 7 POUŽITÉ ZDROJE

1. ADAIR, R., 2007. *Boron*. New York: Rosen Pub. ISBN 978-1-4042-1004-2.
2. ANDRIEU, C., S. RAVEL, G. DUCROS a C. LEMAIGNAN, 2005. *Release of Fission Tritium Through Zircaloy-4 Fuel Cladding Tubes: Journal of Nuclear Materials*. Amsterdam, 347: 12-15.
3. *Atom.info: Rosatom přichází s novým materiálem pro jaderné palivo* [online], 2018. Zdroj: RIA Novosti [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2018/01/rosatom-prichazi-s-novym-materielem-pro-jaderne-palivo/>
4. BLAŽEK, V., L. SLÁDEK, P. ŠIMEČEK a M. KIBUS, 2017. *ITS102: PROVOZNÍ PŘEDPIS PRO REAKTOR A PRIMÁRNÍ OKRUH*. Temelín, 55 s.
5. CAPŮRKA, K., M. VACIKAR a J. FENCL, 2016. *ITS116: Provozní předpis pro hospodářství a nádrží a reagentů ITB10, 20, 30*. ČEZ, a. s. Temelín.
6. COTTON, F. A. a G. WILKINSON, 1980. *Advanced Inorganic Chemistry: And Comprehensive Text*. 4. New York: Inorganic College of Chemistry Imperial College Of Csience And Technology Univerzity Of London. ISBN 0-471-02775-8.
7. ČERNÝ, M., 1984. *Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.
8. EMSLEY, J., 1998. *The elements*. 3rd ed. New York: Oxford University Press. ISBN 01-985-5819-8.
9. EPRI, , 2010. *Estimation of Carbon-14 in Nuclear Power Plant Gaseous Effluents* [online]. In: . s. 21 [cit. 2019-02-06].
10. GARZAROLLI, F., R. VON JAN a H. STEHLE, 1979. *The main causes of fuel element failure in water-cooled power reactors* [online]. International Atomic Energy Agency (IAEA) [cit. 2019-02-09]. 0004-7112.



11. GLASSTONE, S. a M. EDLUND, 1952. *The elements of nuclear reactor theory*. New York: Van Nostrand.
12. GOSSET, D., M. LE SAUX, D. SIMEONE a D. GILBON, 2012. New insights in structural characterization of zirconium alloys oxidation at high temperature. *Journal of Nuclear Materials*. **429**(1-3), 19-24. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2012.05.003. ISSN 00223115. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022311512002334>
13. GRANDJEAN, C. a G. HACHE, 2008. *A STATE-OF-THE-ART REVIEW OF PAST PROGRAMMES DEVOTED TO FUEL BEHAVIOUR UNDER LOSS-OF-COOLANT CONDITIONS. Part 3.: Cladding Oxidation. Resistance to Quench and Post-Quench Loads, Technical report* [online]. 2008. Saint Paul lez Durance: Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire [cit. 2019-02-09]. DPAM/SEMCA 2008-093. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/docs/ML0816/ML081680167.pdf>
14. HACH, 2016. : *Orbisphere Hydrogen sensors*. U.S.A. Dostupné také z: [https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahUKEwjctM7ht\\_DgAhWIaFAKHbLSBIgQFjACegQIBxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.hach.com%2Fasset-get.download.jsa%3Fid%3D36453593201&usg=AOvVaw3zAHO8M2wdHuFW\\_4GppShr](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahUKEwjctM7ht_DgAhWIaFAKHbLSBIgQFjACegQIBxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.hach.com%2Fasset-get.download.jsa%3Fid%3D36453593201&usg=AOvVaw3zAHO8M2wdHuFW_4GppShr)
15. HANUS, V., 2011. *Scienceworld: Chemie na jaderné elektrárně aneb Vše se točí kolem vody* [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <https://www.scienceworld.cz/neziva-priroda/chemie-na-jaderne-elektrarne-aneb-vse-se-toci-kolem-vody-1561/>
16. HASAL, P., I. SCHREIBER a D. ŠNITA, 2007. *Chemické inženýrství I*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. ISBN 978-80-7080-002-7.
17. HAYNES, W., ed. a LIDE D., ed., 2011. *CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data* [online]. 92nd ed. Boca Raton: CRC Press [cit. 2019-02-03]. ISBN 978-1-4398-5511-9.

18. HENDL, J., 2004. *Přehled statistických metod zpracování dat: analýza a metaanalýza dat*. Vyd. 1. Praha: Portál. ISBN 80-7178-820-1.
19. HOUSER, F., NEHNĚVSKÝ J. a KOLEKTIV, 2012. Analýza možného vzniku explozivní směsi vodíku v primárním okruhu s ohledem na bezpečnost provozu jaderné elektrárny. *JOSRA: Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti*. 5(1-2). ISSN 1803-3687.
20. HUANG, J., Mei-yi YAO, GAO Ch., LIANG X., PENG J., ZHANG J. a B. ZHOU, 2015. The influence of second phase particles on the crack formation in oxide films formed on zirconium alloys. *Corrosion Science*. 99, 172-177. DOI: 10.1016/j.corsci.2015.06.030. ISSN 0010938X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010938X15003182>
21. CHOPPIN, Gr. R., J. LILJENZIN a J. RYDBERG, 1995. *Radiochemistry and nuclear chemistry*. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann. ISBN 07-506-2300-4.
22. IAEA, , 2004. *Technical Reports SeriEs No.42I: Management of waste containing tritium and carbon-14*. [online]. Vienna [cit. 2019-02-06]. ISBN 92-0-114303-6. Dostupné z: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS421\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS421_web.pdf)
23. IAEA, , 2010. *Review of fuel failures in water cooled reactors: Technical report* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 191 s. [cit. 2019-02-09]. Technical reports series (International Atomic Energy Agency), no. 388. ISBN 978-92-0-102610-1. Dostupné z: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1445\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1445_web.pdf)
24. KÁBA, B. a L. SVATOŠOVÁ, 1999. *Statistika*. Provozně ekonomická fakulta. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze.
25. KATRIAK, M. a S. MILLY, 1978. *Metódy a techniky sociologického výskumu*. 3. vyd. Bratislava: Vysoká škola ekonomická.
26. KIBUS, M., M CAPŮRKA a M. MACURA, 2016. *OTS141: Provozní předpis pro přípravu reagentů a kyseliny borité*. ČEZ, a. s. Temelín.

27. KING, R. B., 2005. *Encyclopedia of inorganic chemistry*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley. ISBN 978-0-470-86078-6.
28. KLADIVO, P., 2013. *Základy statistiky* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci [cit. 2019-03-13]. ISBN 978-80-244-3841-2.
29. KLOUDA, P., 2003. *Moderní analytické metody*. 2., upr. a dopl. vyd. Ostrava: Pavel Klouda. ISBN 80-86369-07-2.
30. KOLAT, P. a D. TOMÁŠEK, 2012. *Jaderná energetika* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: [https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/18\\_Zaklady-ekologie\\_48-49/48\\_IUT/111\\_Jaderna-energetika---Kolot---P3.pdf](https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/18_Zaklady-ekologie_48-49/48_IUT/111_Jaderna-energetika---Kolot---P3.pdf)
31. KOUTSKÝ, J. a J. KOČÍK, 1994. *Radiation damage of structural materials*. New York: Elsevier. ISBN 04-449-8708-8.
32. KRŮŽEK, M. a J. ŠÍMA, 2015. *Analytická chemie*. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, ZF. ISBN 978-80-7394-486-5.
33. KURPASKA, L., I. JOZWIK a J. JAGIELSKI, 2016. Study of sub-oxide phases at the metal-oxide interface in oxidized pure zirconium and Zr-1.0% Nb alloy by using SEM/FIB/EBS and EDS techniques. *Journal of Nuclear Materials*. **476**, 56-62. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2016.04.038. ISSN 00223115. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022311516301520>
34. LINDE, 2016. : *Vodík*. DL 0132/08. Dostupné také z: [https://www.linde-onlineshop.cz/wcsstore/CZ\\_Linde\\_CatalogAssetStore/Attachment/DL/Datový%20list%20Vodík%204.0.pdf](https://www.linde-onlineshop.cz/wcsstore/CZ_Linde_CatalogAssetStore/Attachment/DL/Datový%20list%20Vodík%204.0.pdf)
35. MAGIL, J., 2019. *Nucleonica: Nuclide Search / Radiation Search* [online]. [cit. 2019-02-10]. Developed under a Licence of the European Atomic Energy Community. Dostupné z: <https://nucleonica.com/Application/AppPortal.aspx>
36. PACÁKOVÁ, V. a K. ŠTULÍK, 1986. *Vysokoučinná kapalinová chromatografie: seminár*. Praha: SPN.

37. *Periodická tabulka: Chemické prvky: Zirkonium* [online], 2009-2017. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/40.html#vlastnosti>
38. PLÁTENÍK, F. a M. TRÉGL, 2018. *ITC380: Provozní systém pro systém OLM - kontinuálního měření chemických parametrů*. Temelín.
39. RAČEK, J., 2009. *Jaderná zařízení*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. ISBN 978-80-214-3961-0.
40. SIALINI, P. a P. SAIDL, 2014. Oxidace slitin zirkonia v prostředí izotopické vody. In: KRAUSOVÁ, A. *1. VĚDECKÁ KONFERENCE FAKULTY TECHNOLOGIE OCHRANY PROSTŘEDÍ*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta technologie ochrany prostředí, 62 s. Dostupné také z: [https://4elements.vscht.cz/files/uzel/0023278/Sbornik\\_4elements\\_2014.pdf?redirected](https://4elements.vscht.cz/files/uzel/0023278/Sbornik_4elements_2014.pdf?redirected)
41. SKLENKA, L., 2001. *Provozní reaktorová fyzika*. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-010-2283-8.
42. SOUČEK, E., 2006. *Statistika pro ekonomy*. Praha: Vysoká škola ekonomie a managementu. ISBN 80-867-3006-9.
43. STEVENS, S. S., 1946. On the Theory of Scales of Measurement. *Science*. **103**(2684), 677-680. DOI: 10.1126/science.103.2684.677. ISSN 0036-8075. Dostupné také z: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.103.2684.677>
44. SÚJB, , 2005. *Koncepce posuzování nových typů jaderného paliva v České republice: Licenční požadavky na projekt paliva a aktivní zóny*. Praha: Státní úřad pro jadernou energii, 30 s. Dostupné také z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/Palivo.pdf>
45. ŠKRÁŠEK, J. a Z. TICHÝ, 1990. *Základy aplikované matematiky*. Praha: SNTL. ISBN 80-030-0111-0.
46. ŠTULÍK, K., 2004. *Analytické separační metody*. Praha: Karolinum. ISBN 80-246-0852-9.

47. THERMO FISHER SCIENTIFIC, 2008. Bannockburn. LPN 2002-02 40M. Dostupné také z: [http://www.dionex-france.com/2008\\_10\\_dio\\_guide\\_ic\\_par\\_SM/Files/id66354\\_dionex\\_product\\_guide\\_28mar2008\\_lpn2002.pdf](http://www.dionex-france.com/2008_10_dio_guide_ic_par_SM/Files/id66354_dionex_product_guide_28mar2008_lpn2002.pdf)
48. THERMO SCIENTIFIC, 2014. : *Produkt manual*. Document No. 065440 Revision 03. Dostupné také z: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CMD/manuals/man-065440-ionpac-cs19-columns-man065440-en.pdf>
49. ULLMANN, V., 2009. *Jaderná a radiační fyzika*. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, Fakulta zdravotnických studií, 173 s. ISBN 978-80-7368-669-7.
50. VÁCHA, M., 2013. *ČEZ\_PP\_0352: Zdroje tritia v I.O. ETE*. Temelín.
51. VAN ENGEN, W.R. a A. AINSWORTH, 1983. *Report on Antimony-Beryllium Neutron Sources Examined After 7.45 Effective Full Power Years in the Dodewaard BWR, Dimensional stability and mechanical behaviour of irradiated metals and alloys: In Dimensional Stability and Mechanical Behaviour of Irradiated Metals and Alloys, Volume 2, proceedings of the conference organized by the British Nuclear Energy Society, Brighton, 1983*. London: British Nuclear Energy Society. ISBN 07-277-0176-2.
52. VANCE, J. N., J. E. CLINE a D. E. ROBERTSON, 1995. *Characterization of carbon-14 generated by the nuclear power industry. Final report.: (EPRI-TR--105715)* [online]. In: . S. (Ed.). Unites States, s. 84 [cit. 2019-02-09].
53. VARGA, K., G. HIRSCHBERG, Z. NÉMETH, G. MYBURG, J. SCHUNK a P. TILKY, 2001. Accumulation of radioactive corrosion products on steel surfaces of VVER-type nuclear reactors. II. <sup>60</sup>Co. *Journal of Nuclear Materials*. **298**(3), 231-238. DOI: 10.1016/S0022-3115(01)00658-4. ISSN 00223115. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022311501006584>
54. VOJTÍŠEK, P., 2012. *Výzkumné metody: Metody a techniky výzkumu a jejich aplikace v absolventských pracích vyšších odborných škol* [online]. Praha, 54 s. [cit. 2019-03-07]. ISBN 978-80-905109-3-7. Dostupné z: [http://skoly.praha.eu/files/=84121/Skripta+++Výzkumné\\_metody.pdf](http://skoly.praha.eu/files/=84121/Skripta+++Výzkumné_metody.pdf)

55. VRTÍLKOVÁ, V., L NOVOTNÝ a J. KOLENČÍK, 2006. *Výzkumná zpráva: Termomechanické vlastnosti Zr-slitin po vysokoteplotní oxidaci*,. Praha.
56. WALLACE, D, 1977. *Carbon-14 Production in Nuclear Reactors: Prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission* [online]. United States: OAK Ridge National Laboratory, Office of Nuclear Material Safety & Safeguards, **1977**, 43 s. [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/08/328/8328183.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/08/328/8328183.pdf)
57. ZACH, V., L. JAROŠ, R. KOPA, J. RAINDL a M. MARTYKÁN, 2019. *Hodnocení chemických režimů těsnosti bariéra korozního stavu: Primární okruh 01/2019*. ČEZ, a. s. Temelín.
58. ZACH, V., KOPA R. a P. PILEČKOVÁ, 2016. *ITC013/1: Provozní předpis pro vodochemický režim I.O.* ČEZ, a. s. Temelín.
59. ZÁŠKODNÝ, P., R. HAVRÁNKOVÁ, J. HAVRÁNEK a V. VURM, 2016. *Základy statistiky (s aplikací na zdravotnictví)* [online]. 3. Praha: CURRICULUM, 254 s. [cit. 2019-03-07]. ISBN 978-80-87894-12-5.

## 8 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

- Obrázek 1 – Spojnicový graf
- Obrázek 2 – Histogram
- Obrázek 3 – Polygon absolutních četností
- Obrázek 4 – Polygon kumulativních četností
- Obrázek 5 – Gaussova křivka
- Obrázek 6 – HVB1 polygon absolutních četností – vodík
- Obrázek 7 – HVB1 polygon absolutních četností – čpavek
- Obrázek 8 – HVB1 polygon relativních četností – vodík
- Obrázek 9 – HVB1 polygon relativních četností – čpavek
- Obrázek 10 – HVB1 polygon kumulativních četností – vodík
- Obrázek 11 – HVB1 polygon kumulativních četností – čpavek
- Obrázek 12 – HVB2 polygon absolutních četností – vodík
- Obrázek 13 – HVB2 polygon absolutních četností – čpavek
- Obrázek 14 – HVB2 polygon relativních četností – vodík
- Obrázek 15 – HVB2 polygon relativních četností – čpavek
- Obrázek 16 – HVB2 polygon kumulativních četností – vodík
- Obrázek 17 – HVB2 polygon kumulativních četností – čpavek
- Obrázek 18 – HVB1 SZ1 regrese – vodík
- Obrázek 19 – HVB1 SZ2 regrese – čpavek
- Obrázek 20 – HVB1 SZ3 regrese – vodík
- Obrázek 21 – HVB2 SZ4 regrese – čpavek
- 
- Tabulka 1 – Technické parametry reaktoru
- Tabulka 2 – Parogenerátor
- Tabulka 3 – Chemické složení trubek parogenerátoru (v %)
- Tabulka 4 – Chemické složení E110 (v %)
- Tabulka 5 – Uspořádání výsledků měření
- Tabulka 6 – Popis sloupců výsledků měření
- Tabulka 7 – HVB1 definice základních pojmů
- Tabulka 8 – HVB2 definice základních pojmů
- Tabulka 9 – HVB1 třídní intervaly vodíku

Tabulka 10 – HVB1 třídní intervaly čpavku  
Tabulka 11 – HVB2 třídní intervaly vodíku  
Tabulka 12 – HVB2 třídní intervaly čpavku  
Tabulka 13 – HVB1 SZ1 vodík – pomocné výpočty  
Tabulka 14 – HVB1 SZ2 čpavek – pomocné výpočty  
Tabulka 15 – HVB2 SZ3 vodík – pomocné výpočty  
Tabulka 16 – HVB2 SZ4 čpavek – pomocné výpočty  
Tabulka 17 – HVB1 SZ1 – vodík  
Tabulka 18 – HVB1 SZ2 – čpavek  
Tabulka 19 – HVB2 SZ3 – vodík  
Tabulka 20 – HVB2 SZ4 – čpavek  
Tabulka 21 – HVB1 ZS1 – hodnoty pro výpočet regresní analýzy  
Tabulka 22 – HVB1 SZ2 – hodnoty pro výpočet regresní analýzy  
Tabulka 23 – HVB2 ZS3 – hodnoty pro výpočet regresní analýzy  
Tabulka 24 – HVB2 ZS4 – hodnoty pro výpočet regresní analýzy  
Tabulka 25 – HVB1 regrese SZ1 a SZ2  
Tabulka 26 – HVB2 regrese SZ3 a SZ4



## **9 SEZNAM PŘÍLOH**

**Příloha A – VSS HVB1**

**Příloha B – VSS HVB2**

## 10 SEZNAM ZKRATEK

OTB	System přípravy kyseliny borité
1,2TK	System doplňování chladiva do primárního okruhu
AÚ	Akční úroveň
DN 850	Přibližný vnitřní průměr potrubí
E110	Zirkoniová slitina
HPIC	Vysokotlaká iontová chromatografie
HVB	Výrobní blok
CHEMIS	Chemický informační systém
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
IÚ	Iničiační úroveň
JE Fukušima	Jaderná elektrárna Fukušima
JE Temelín	Jaderná elektrárna Temelín
MeV	Megaelektronvolt
Nml/l	Normální mililitr na litr
pH <sub>3000</sub>	Vysokoteplotní pH
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SVO6	Čisticí stanice bórových vod
SZ	Statistický znak
VSS	Výběrový statistický soubor
VVER-1000	Vodo-vodní energetický reaktor
ZSS	Základní statistický soubor

**Příloha A VSS HVB1**

	Vodík	Čpavek		Vodík	Čpavek		Vodík	Čpavek		Vodík	Čpavek
1	20,8	10,0	43	20,9	10,1	85	20,3	11,3	127	22,1	10,6
2	21,2	11,6	44	21,0	10,4	86	20,8	12,2	128	22,1	10,2
3	21,3	10,1	45	21,3	10,4	87	21,4	12,1	129	21,6	10,0
4	21,3	10,0	46	21,3	10,1	88	20,8	12,2	130	21,4	9,9
5	20,8	9,9	47	21,3	10,3	89	21,4	9,5	131	21,3	9,7
6	21,1	10,0	48	20,9	10,9	90	21,8	10,1	132	21,1	9,8
7	20,8	9,8	49	20,7	10,2	91	21,9	9,8	133	21,2	10,3
8	21,0	10,1	50	21,2	11,0	92	21,8	9,7	134	22,3	10,1
9	20,8	10,1	51	22,3	10,8	93	21,9	10,0	135	22,1	10,3
10	21,0	10,5	52	21,2	10,1	94	22,1	10,2	136	21,1	10,1
11	20,9	10,2	53	20,9	10,0	95	21,8	9,8	137	21,6	9,9
12	20,5	10,0	54	20,9	10,2	96	22,1	9,9	138	21,2	10,1
13	20,5	9,6	55	21,2	10,6	97	20,1	9,8	139	21,2	9,5
14	20,5	9,9	56	20,9	10,0	98	21,2	10,2	140	21,2	9,3
15	20,5	10,1	57	20,7	9,9	99	22,3	9,8	141	21,2	9,3
16	20,5	9,9	58	20,9	10,1	100	22,2	9,8	142	21,7	10,3
17	20,7	9,9	59	20,7	10,4	101	22,1	9,9	143	21,7	10,3
18	20,5	10,2	60	20,5	10,0	102	21,0	10,0	144	21,9	10,0
19	20,4	10,0	61	21,2	10,5	103	22,3	10,2	145	21,8	10,2
20	20,4	10,2	62	20,9	10,1	104	21,1	9,9	146	21,9	10,1
21	20,4	9,9	63	21,8	10,5	105	21,2	9,9	147	21,9	10,4
22	20,5	9,8	64	21,4	10,3	106	22,1	9,7	148	21,2	9,9
23	20,4	10,1	65	21,3	10,0	107	21,5	9,4	149	21,2	9,8
24	21,2	9,8	66	21,5	10,4	108	21,0	9,9	150	21,8	10,1
25	21,2	9,9	67	21,3	10,6	109	22,4	10,6	151	21,8	10,0
26	21,3	9,8	68	21,3	10,3	110	22,4	10,3	152	21,8	10,2
27	21,4	10,4	69	21,4	10,1	111	21,2	10,6	153	21,2	9,8
28	21,5	9,9	70	21,4	10,8	112	21,5	9,8	154	20,9	9,8
29	21,2	10,0	71	21,7	10,2	113	21,3	9,7	155	21,0	10,0
30	21,1	10,1	72	21,5	10,4	114	21,2	9,5	156	21,3	10,0
31	21,2	9,6	73	20,2	10,3	115	21,3	9,9	157	21,2	9,6
32	20,9	9,7	74	21,2	10,6	116	22,1	10,1	158	20,9	9,7
33	21,2	9,8	75	21,0	10,2	117	21,3	9,9	159	20,9	9,5
34	21,2	9,7	76	20,7	9,5	118	21,3	9,6	160	21,7	10,3
35	20,9	9,5	77	20,5	9,8	119	21,2	9,8	161	20,5	11,2
36	20,8	9,8	78	21,0	10,4	120	21,2	9,8	162	20,6	11,3
37	20,8	10,4	79	21,2	10,0	121	21,0	9,9	163	20,7	11,0
38	21,2	10,3	80	21,2	9,8	122	21,6	9,7	164	20,7	11,4
39	21,0	9,4	81	21,3	10,5	123	21,9	10,4	165	20,7	10,8
40	20,8	9,7	82	21,3	10,4	124	22,1	10,6	166	20,5	11,3
41	20,9	9,5	83	21,4	10,1	125	21,6	9,8	167	20,4	11,2
42	20,9	9,5	84	21,3	11,4	126	21,9	10,1	168	20,5	11,4

	Vodík	Čpavek
169	20,5	11,2
170	20,4	10,9
171	20,5	11,1
172	20,7	10,8
173	20,8	10,7
174	20,7	11,0
175	20,7	10,0
176	20,7	10,2
177	20,7	10,2
178	20,7	10,0
179	20,9	10,3
180	20,9	10,3
181	20,9	9,9
182	20,8	10,1
183	20,8	10,1
184	20,8	9,9
185	20,9	10,0
186	20,8	10,1
187	20,8	10,3
188	20,9	10,3
189	20,7	9,4
190	20,9	9,5
191	21,0	9,6
192	21,3	10,4
193	20,9	10,2
194	20,7	10,0
195	20,5	10,1
196	20,7	9,9
197	20,8	10,1
198	20,7	10,2
199	20,7	10,4
200	21,0	9,7
201	21,5	9,4
202	21,4	9,9
203	21,0	9,8
204	20,9	9,5
205	21,2	10,2
206	21,3	10,0
207	21,2	10,2
208	21,6	10,5
209	21,0	9,9
210	20,9	9,8
211	20,5	9,9
212	20,7	10,0

	Vodík	Čpavek
213	20,4	9,7
214	20,3	9,9
215	20,5	9,9
216	20,5	10,4
217	20,4	10,3
218	20,3	9,7
219	20,8	10,3
220	20,2	9,6
221	21,3	10,5
222	20,5	9,2
223	20,4	9,0
224	21,0	9,8
225	21,3	10,1
226	21,2	9,9
227	21,3	10,4
228	21,0	10,2
229	20,9	10,2
230	20,5	10,1
231	20,4	9,6
232	20,8	10,0
233	20,8	10,3
234	20,3	9,8
235	21,2	10,1
236	21,4	9,9
237	21,4	10,5
238	20,5	10,0
239	20,4	9,9
240	20,4	9,8
241	20,5	9,7
242	20,5	10,1
243	20,8	10,0
244	20,9	10,3
245	20,7	10,2
246	21,2	9,8
247	20,9	10,0
248	20,7	9,7
249	20,8	9,7
250	20,5	9,8
251	20,4	9,8
252	20,5	10,0
253	20,7	10,3
254	20,7	10,0
255	20,5	10,0
256	20,9	10,4

	Vodík	Čpavek
257	21,0	10,2
258	21,2	10,4
259	21,3	10,4
260	21,3	10,5
261	21,3	10,5
262	21,5	10,5
263	21,1	10,8
264	20,7	10,1
265	20,4	9,8
266	20,3	10,1
267	20,5	9,6
268	20,3	9,4
269	20,4	10,1
270	20,8	10,4
271	20,9	10,4
272	20,9	10,1
273	21,0	10,1
274	21,0	10,1
275	20,2	9,6
276	20,3	9,8
277	21,2	10,0
278	20,8	10,0
279	20,7	10,0
280	21,5	10,1
281	21,2	10,6
282	21,0	10,1
283	20,7	10,1
284	21,3	9,7
285	21,8	9,2
286	21,2	10,4
287	21,2	10,0
288	21,3	10,4
289	21,3	10,1
290	21,3	10,5
291	21,2	10,6
292	21,4	10,6
293	21,4	10,2
294	21,4	10,6
295	21,2	10,0
296	20,5	9,5
297	20,9	10,1
298	20,7	10,1
299	20,4	9,5
300	20,4	9,9

	Vodík	Čpavek
301	21,0	10,3
302	21,3	10,5
303	21,2	10,2
304	20,9	9,7
305	21,4	10,5
306	21,5	10,7
307	20,9	10,1
308	20,6	9,5
309	20,8	10,1
310	21,0	10,2
311	20,5	9,8
312	20,8	10,1
313	21,2	10,5
314	21,2	10,3
315	20,1	9,7
316	20,8	10,4
317	21,5	10,2
318	20,5	9,5
319	20,4	9,6
320	20,7	10,1
321	21,3	10,6
322	21,3	10,3
323	21,2	10,2
324	21,0	10,3
325	21,0	10,3
326	21,0	10,2
327	21,0	10,3
328	21,0	10,5
329	20,8	10,4
330	21,0	9,8
331	20,9	9,9
332	20,7	10,2
333	20,3	9,6
334	20,9	10,5
335	20,4	9,9
336	20,8	10,0
337	21,3	10,6
337	21,3	10,6
338	21,2	10,7
339	21,0	9,8
340	20,3	9,7
341	20,3	9,4
342	20,5	10,6
343	20,8	10,4

	Vodík	Čpavek
344	20,5	9,9
345	21,1	10,4
346	20,7	10,7
347	20,8	10,4
348	20,5	9,9
349	20,5	10,1
350	20,2	9,6
351	20,3	9,9
352	20,3	10,3
353	20,4	10,3
354	20,3	10,4
355	20,4	10,5
356	20,7	10,2
357	20,8	10,5
358	21,0	10,6
359	20,7	10,0
360	20,5	10,2
361	20,5	9,9
362	20,5	10,1
363	20,8	10,1
364	20,7	10,2
365	20,7	10,3
366	20,8	11,0
367	20,0	9,8
368	20,2	9,6
369	20,7	10,2
370	20,5	10,5
371	20,5	10,2
372	20,0	9,0
373	21,3	10,1
374	21,4	9,9
375	21,4	10,5
376	20,8	9,9
377	20,7	9,7
378	20,7	10,4
379	20,7	10,4
380	20,7	10,5
375	21,4	10,5
376	20,8	9,9
377	20,7	9,7
378	20,7	10,4
379	20,7	10,4
380	20,7	10,5

	Vodík	Čpavek
381	20,7	10,2
382	20,7	10,3
383	20,8	10,3
384	20,8	10,3
385	20,7	10,3
386	20,5	10,1
387	20,7	10,2
388	20,2	10,0
389	20,2	9,9
390	20,2	9,8
391	20,4	10,2
392	20,5	9,9
393	20,5	10,3
394	20,5	10,3
395	20,5	10,1
396	20,4	10,2
397	20,5	10,1
398	20,5	10,0
399	20,5	10,3
400	20,5	10,1
401	20,6	10,1
402	20,5	10,4
403	20,3	9,5
404	21,3	9,9
405	20,5	10,0
406	20,7	9,9
407	20,7	10,0
408	20,4	10,3
409	20,7	10,2
410	20,4	10,0
411	20,8	10,7
412	20,1	10,0
413	20,1	10,2
414	20,4	10,4
415	20,5	10,3
416	21,3	10,0
417	21,2	10,6
418	20,4	10,3
419	20,1	10,1
420	20,4	10,4
421	20,1	10,3
422	20,5	9,9
423	20,4	10,1

	Vodík	Čpavek
424	20,0	10,1
425	19,9	10,8
426	20,2	11,0
427	20,8	10,4
428	20,8	10,6
429	20,9	10,5
430	20,1	10,1
431	20,3	10,2
432	20,6	10,4
433	20,5	10,8
434	20,5	10,6
435	20,5	11,0
436	20,5	10,6
437	20,1	10,6
438	20,5	10,9
439	20,0	10,0
440	19,9	10,0
441	20,5	9,9
442	20,3	9,9
443	20,7	11,6
444	19,8	9,8
445	20,0	11,0
446	20,0	9,8
447	20,8	9,9
448	21,3	10,0
449	21,2	10,1
450	21,4	10,2
451	20,4	9,6
452	20,0	9,5
453	20,1	9,3
454	21,4	10,5
455	20,5	9,7
456	20,8	10,2
457	20,8	10,1
458	20,9	10,5
459	20,4	9,5
460	20,4	10,4
461	20,4	10,2
462	21,3	10,0
463	21,2	9,8
464	20,3	9,9
465	20,3	10,3
466	20,9	10,6

	Vodík	Čpavek
467	20,7	10,3
468	20,4	10,0
469	20,1	10,0
470	20,9	10,5
471	20,9	10,5
472	20,5	10,3
473	20,3	10,1
474	20,4	10,0
475	20,3	9,9
476	20,4	10,1
477	20,3	10,1
478	20,7	10,4
479	20,9	10,7
480	20,8	10,5
481	20,5	9,8
482	21,3	10,7
483	21,5	10,4
484	21,4	10,2
485	20,3	10,0
486	20,4	10,2
487	20,4	10,0
488	20,5	10,6
489	20,1	9,7
490	20,1	10,1
491	20,9	10,0
492	21,2	10,4
493	20,7	10,2
494	20,5	10,3
495	20,7	10,2
496	20,4	9,9
497	20,8	9,8
498	21,0	10,2
499	20,0	8,9
500	20,3	9,7
501	20,7	10,5
502	20,9	10,0
503	20,8	9,7
504	20,8	9,8
505	21,8	10,8
506	20,9	10,3
507	21,2	10,4
508	21,2	10,4
509	21,2	10,4

	Vodík	Čpavek
510	21,2	10,4
511	20,9	10,6
512	20,9	10,4
513	21,0	10,1
514	20,5	10,3
515	20,7	10,5
516	21,0	10,4
517	20,3	9,7
518	21,4	10,7
519	21,3	9,9
520	21,7	10,7
521	20,7	9,9
522	20,5	10,1
523	20,7	10,5
524	20,1	10,4
525	20,3	10,0
526	20,8	9,9
527	20,5	10,0
528	20,7	10,1
529	20,9	10,4
530	21,9	10,9
531	20,5	10,6
532	20,7	10,7
533	20,7	10,7
534	20,9	10,6
535	20,9	10,8
536	20,6	9,6
537	20,8	9,4
538	20,9	10,6
539	21,0	10,6
540	20,9	10,5
541	20,8	10,7
542	20,4	10,3
543	20,2	10,0
544	20,0	9,9
545	20,4	10,2
546	20,5	10,4
547	20,9	10,7
548	19,5	9,4
549	19,6	9,7
550	20,4	10,6
551	20,7	10,8
552	20,5	10,4
553	20,3	9,9

	Vodík	Čpavek
554	20,4	9,6
555	21,3	11,0
556	21,2	10,8
557	21,0	10,7
558	20,1	10,5
559	20,1	10,7
560	19,9	9,9
561	20,5	9,8
562	20,7	10,7
563	19,9	10,1
564	20,0	10,2
565	20,0	10,3
566	20,1	10,5
567	20,4	10,6
568	20,5	10,6
569	20,8	10,9
570	21,2	10,0
571	20,0	10,2
572	19,5	9,9
573	20,3	10,7
574	21,0	11,3
575	20,5	10,8
576	20,1	10,4
577	20,9	10,5
578	20,9	11,0
579	20,7	10,7
580	20,7	10,7
581	20,0	10,5
582	20,1	10,3
583	20,3	10,4
584	20,5	10,9
585	20,7	10,8
586	20,8	11,1
587	20,8	10,7
588	19,5	10,5
589	20,7	11,6
590	20,4	10,6
591	20,1	10,4
592	21,2	10,1
593	19,9	10,7
594	20,5	10,2
595	20,3	10,2
596	21,0	10,8
597	20,4	10,7

	Vodík	Čpavek
598	20,0	10,6
599	19,8	9,2
600	21,1	10,3

**Příloha B VSS HVB2**

	Vodík	Čpavek		Vodík	Čpavek		Vodík	Čpavek		Vodík	Čpavek
1	21,8	9,9	43	21,2	9,7	85	20,9	10,1	127	21	10,3
2	21,5	9,7	44	21,1	10,1	86	20,9	10,5	128	20,6	10,4
3	21,5	9,7	45	22,6	10,1	87	21,1	11,3	129	20,9	10,1
4	21,6	9,8	46	21,6	10,6	88	20,9	10,1	130	20,9	10,8
5	21,5	10	47	21,2	10,5	89	20,5	10,2	131	20,5	9,9
6	21,2	9,4	48	21,5	9,3	90	20,6	9,8	132	20,6	10,4
7	21,1	9,7	49	21,8	10,2	91	20,8	10,7	133	20,6	10,9
8	21,2	9,7	50	22,1	9,7	92	20,4	9,9	134	20,6	10,3
9	22,2	10,2	51	23,1	11,1	93	20,8	10,2	135	20,5	10,5
10	21,6	9,8	52	22	9,9	94	20,1	9,8	136	20,7	10,5
11	21,6	9,7	53	21,9	9,1	95	20,1	10,2	137	20,5	11
12	21,2	9,9	54	22,3	10,5	96	20,4	10,3	138	20,6	10,1
13	21,5	10,1	55	22,3	9,9	97	20,6	10,7	139	20,5	10,2
14	21,3	10,1	56	22,5	9,9	98	19,9	10,6	140	20,6	10,2
15	21	9,4	57	21,6	10	99	20,5	10,4	141	20,8	10,4
16	21,4	9,6	58	22,4	9,9	100	20,4	10,7	142	20,7	10,4
17	21,3	9,3	59	22,5	9,8	101	20,5	10,5	143	20,8	10,4
18	21,6	9,4	60	21,6	10,4	102	20,7	11,1	144	20,5	10,9
19	21,4	9,9	61	22,5	9,7	103	20,7	10,9	145	20,5	10,4
20	21,6	10,3	62	21,2	9,7	104	20,5	11,1	146	20,8	11,1
21	21,1	9,8	63	21,4	9,4	105	20,4	10,4	147	20,8	11,3
22	21,5	10,1	64	21,3	9,5	106	20	10,9	148	20,9	10,8
23	22	10,5	65	21,9	9,9	107	20,4	10,7	149	20,6	10,7
24	22,1	10,4	66	21,2	10	108	20,3	9,9	150	20,7	10
25	21,5	10,1	67	21,5	10,4	109	20,9	10,6	151	20,9	10,3
26	21,4	9,7	68	21	10,2	110	20,7	10,3	152	20,8	10,1
27	22,1	10,3	69	20,9	9,6	111	21,2	10,6	153	20,9	10,2
28	21,6	9,5	70	21,2	9,6	112	20,8	10,9	154	20,5	10
29	21,6	9,6	71	21,3	9,6	113	21,3	11,4	155	21,2	10,1
30	21,6	9,7	72	20,3	9,9	114	20,9	10,5	156	21	9,8
31	21,5	10,2	73	20,7	9,3	115	20,6	10,8	157	21,3	10,1
32	21,3	9,8	74	20,6	10,3	116	20,6	10,7	158	19,8	8,9
33	21,4	10	75	21,3	10,5	117	20,7	10,3	159	20,1	9,6
34	21,4	9,9	76	20,7	9,7	118	20,2	9,7	160	20,7	10,3
35	20,9	9,6	77	21	9,6	119	20,6	10,3	161	20,9	9,9
36	21,5	9,6	78	21,5	10,1	120	21,4	10,3	162	20,8	9,8
37	22	10,4	79	20,5	10,5	121	20,2	8,9	163	21,1	9,8
38	22,2	10,6	80	20,9	10,1	122	20,9	9,8	164	20,8	9,8
39	21,5	9,8	81	20,2	10,4	123	20,7	9,8	165	21,2	9,9
40	21,4	10,1	82	20,9	10,5	124	20,7	9,6	166	21,4	10,1
41	21,5	8,7	83	21,2	11,1	125	21,1	10,3	167	21	9,8
42	22,8	9,5	84	21,2	10,5	126	21,4	9,9	168	21	9,5

	Vodik	Čpavek
169	20,6	9,7
170	20,8	9,3
171	20,9	10
172	20,4	10,4
173	20,8	10,3
174	20,1	8,6
175	20,2	8,9
176	20,2	8,7
177	20,7	8,9
178	20,3	9,2
179	20,9	9,3
180	20,7	9,5
181	21,4	9,7
182	21,1	10,1
183	21	10,1
184	21	9,5
185	20,9	9,4
186	20,9	9,6
187	20,9	9,9
188	20,8	9,6
189	20,9	9
190	20,7	9,2
191	20,9	9,6
192	20,8	9,3
193	21	9,4
194	20,8	9,3
195	20,6	9,5
196	20,7	9,6
197	21	9,7
198	20,8	9,2
199	20,8	9,7
200	21,2	9,3
201	20,6	9,6
202	20,8	9,1
203	20,8	9,1
204	20,7	9,1
205	20,7	9,4
206	20,6	9,8
207	20,8	9,3
208	20,5	9,1
209	20,8	9,5
210	21	9,8
211	20,8	9,6

	Vodik	Čpavek
213	20,8	9,6
214	21	10,2
215	21,2	10,1
216	20,2	8,9
217	20,6	9,8
218	20,5	9,6
219	20,7	9,3
220	20,8	10
221	21	9,9
222	20,8	9,8
223	20,9	9,4
224	20,4	9,2
225	21,2	9,6
226	20,7	9
227	20,4	9,5
228	20,7	9,5
229	21,3	9,8
230	21,2	10,2
231	21,2	9,8
232	21	9,4
233	20,9	9,1
234	20,8	11,1
235	20,8	10,9
236	21	10,3
237	20,6	11
238	20,7	10,5
239	20,9	10,9
240	21	10,6
241	20,8	11,5
242	21	10,9
243	21,2	11,2
244	20,6	10,4
245	20,5	10,7
246	21	10,2
247	20,9	10,7
248	20,8	10,8
249	21	11,3
250	21,1	10,9
251	21,1	10,6
252	20,8	10,4
253	20,8	10,1
254	20,9	9,9
255	20,9	9,2

	Vodik	Čpavek
257	20,7	10,8
258	20,2	8,8
259	20,9	9,7
260	20,7	10,3
261	20,6	9,7
262	21	10,9
263	20,8	9,3
264	20,7	10,1
265	20,6	10,3
266	20,4	10,5
267	20,8	11,1
268	20,8	10,4
269	20,9	10,6
270	21,3	10,9
271	20,9	11,2
272	20,9	10,5
273	20,4	10,5
274	20,5	11
275	21	10,8
276	20,8	10,9
277	20,7	10,4
278	20,2	10,6
279	20,4	10,7
280	20,6	10,6
281	20,9	10,9
282	20,7	11,3
283	20,8	11,1
284	20,5	10,4
285	20,7	11,1
286	20,8	10,3
287	20,5	10,5
288	20,8	10,8
289	20,3	10,3
290	20,4	10,2
291	20,5	10,5
292	21,1	10,8
293	20,7	11
294	20,8	10,5
295	20,4	10,7
296	20,4	10,8
297	20,9	10,7
298	20,9	11,3
299	20,4	10,5

	Vodik	Čpavek
301	20,5	11,4
302	20,4	11,7
303	20,1	10,5
304	20,9	10,9
305	20,5	10,9
306	20,6	11,3
307	20,4	10,8
308	20,7	11,5
309	20,9	10,5
310	20,4	10,5
311	20,8	9,8
312	20,4	11,4
313	20,5	11,1
314	20,4	10,7
315	20,6	11,3
316	20,4	10,9
317	20,7	11,4
318	20,8	11,6
319	21	11,3
320	20,9	11,4
321	21	11,6
322	20,8	10,7
323	20,6	10,5
324	20,9	11,8
325	20,4	10,9
326	20,3	11
327	20,2	11,3
328	20,4	10,9
329	20,5	11,7
330	20,5	11,8
331	20,6	11,1
332	20,2	11,6
333	20,5	11,6
334	20,6	11,9
335	20,9	12
336	21	12
337	20,3	11,8
338	20,8	11,5
339	20,9	10,8
340	20,9	11,2
341	20,5	11,3
342	21,2	10,7
343	21,1	11,4



	Vodík	Čpavek
345	20,7	11
346	20,3	10,8
347	20,4	11,1
348	20,5	11,5
349	20,6	11,6
350	20,8	11,9
351	20,5	12,1
352	20,8	12,3
353	20,8	12,1
354	20,9	11,8
355	20,5	12,1
356	20,7	12,5
357	21,2	12,9
358	21,1	12,3
359	21	12,3
360	20,9	11,9
361	20	11,6
362	20,6	12,2
363	20,4	12,4
364	20,4	12,8
365	20,6	12,2
366	20,2	12
367	20,9	12,2
368	21,1	12,8
369	20,7	12
370	20,9	12,9
371	21,6	13
372	21,4	12
373	21,5	12,4
374	21,4	12,1
375	20,7	10,6
376	20,6	12,5
377	20,6	11,8
378	20,7	12,2
379	20,5	11,2
380	21	11
381	20,9	12,4
382	21,2	11,6
383	21,3	12,1
384	21	10,6
385	21,9	11,9
386	20,4	12,2

	Vodík	Čpavek
387	21,5	11,5
388	20,6	12
389	20,8	12,4
390	20,7	11,6
391	21,6	11,6
392	21,3	11
393	20,5	11,1
394	20,3	11,2
395	21,5	12,3
396	21,2	11,8
397	21,4	12,1
398	20,7	12
399	21	12,3
400	21,6	12,5
401	21,8	12
402	21,3	11,8
403	20,7	12
404	20,6	11,5
405	20,5	12,3
406	20,7	11,7
407	20,6	10,2
408	20,7	11
409	20,3	11
410	20,3	11,2
411	20,7	11,2
412	20,6	11,4
413	20,7	11,2
414	20,4	11,3
415	20,7	12,3
416	21	11
417	20,8	11,7
418	20,3	11,6
419	19,6	10,8
420	20,4	11,9
421	21,6	12,2
422	22,1	11,6
423	21,1	11,6
424	20,9	11,7
425	21,3	12
426	21,1	12,4
427	20,4	12,1
428	21,1	12,8

	Vodík	Čpavek
429	20,7	11,5
430	20,8	12,1
431	20,7	12,5
432	21,2	12,4
433	20,4	11,2
434	21,5	13,2
435	22	13,6
436	21,8	12,9
437	21,7	12,3
438	21,3	13,2
439	21,4	12,5
440	21,3	12,8
441	21	10,9
442	20,5	12,1
443	21	11,5
444	21,3	12,5
445	20,8	11,8
446	21,4	13,1
447	21,4	12,2
448	21,4	11,9
449	21,5	12,2
450	21,8	12,7
451	20,8	12,9
452	21,2	11,7
453	21	12
454	20,9	12,2
455	20,8	12,8
456	20,7	12,2
457	20,5	12,2
458	21	13,5
459	20,7	11,6
460	20,6	11,2
461	20,7	11,4
462	20,3	11,4
463	20,9	12,1
464	20,5	12,4
465	20,6	12,7
466	20,5	12,3
467	20,7	12,1
468	20,9	12,6
469	20,6	12,5
470	20,3	12,7

	Vodík	Čpavek
471	20,4	12,3
472	20,7	13
473	20,6	12,3
474	20,4	12,5
475	20,8	13
476	20,6	12,5
477	20,5	12,8
478	20,5	13,1
479	20,6	12,6
480	20,6	12
481	21,1	12,8
482	21,2	12,9
483	20,9	12,8
484	20,6	12,5
485	20,8	12,5
486	21,2	12,9
487	20,4	11,2
488	20,8	11,1
489	21,2	11,2
490	20,7	11,9
491	21	11,3
492	20,4	11,5
493	21,2	12,9
494	20,8	11,2
495	20,4	11,1
496	20,2	13,3
497	20,4	12,3
498	20,6	13,3
499	21	13,2
500	20,4	12,5
501	20,7	13,4
502	20,8	13,1
503	20,9	12,4
504	20,7	13,3
505	20,6	13
506	20,8	12,2
507	20,4	12,4
508	20,6	12,2
509	20,7	12,7
510	20,9	12,2
511	21,1	12,7
512	21,1	12,1

	Vodík	Čpavek
513	20,9	12,9
514	20,8	12,1
515	20,4	13,4
516	20	11,1
517	20,8	12,7
518	20,9	12,4
519	20,4	12,8
520	20,5	12,6
521	20,4	12,5
522	20,8	11,3
523	21,1	12,2
524	20,4	11,8
525	20,5	11,8
526	20,3	12,1
527	20,4	13,4
528	21,1	12,5
529	21,1	12,1
530	20,9	12,4
531	20,4	12,8
532	20,9	12,9
533	20,8	13,8
534	21	12,7
535	20,4	12,6
536	20,4	12,1
537	20,3	12,7
538	20,3	12,6
539	20,5	12,3
540	20,7	11,2
541	20,7	12,4
542	20,7	13,1
543	20,7	12,4
544	20,8	12,4
545	20,9	13,1
546	20,4	11
547	20,8	11,4
548	20,6	12,7
549	20,4	12,2
550	21	12
551	21	12,4
552	20,4	12,3
553	20,6	12,7
554	22,3	11,5
555	21,7	11
56	21,4	10,8

	Vodík	Čpavek
557	21,5	10,2
558	21,4	11
559	21	11,3
560	20,8	11,2
561	21,2	11,1
562	20,8	11,3
563	20,9	11,2
564	21,4	12
565	21	11,6
566	20,9	10,9
567	21	11,2
568	21	11,1
569	20,9	11,1
570	20,9	11,4
571	21,4	12
572	22	12,6
573	21,9	13
574	21	11,3
575	21,2	12
576	21,3	11,4
577	20,6	12
578	21	11,9
579	20,9	11,1
580	20,5	11,4
581	20,6	11,2
582	20,4	11,4
583	20,4	11,7
584	20,4	11,4
585	20,5	10,7
586	20,8	12
587	20,8	11,5
588	20,6	11,2
589	20,4	11,2
590	20,3	11,1
591	20,5	11
592	20,5	11,3
593	20,5	11,6
594	20,9	12,6
595	20,3	11,2
596	20,5	11
597	20,4	11,5
598	20,4	12,2
599	20,6	12,5
600	20,6	12,7