



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## ÚPRAVA VODY V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ

WATER TREATMENT IN A NUCLEAR POWER PLANT

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Hoskovec

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radomír

Chýlek

BRNO 2024



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Martin Hoskovec**  
Studijní program: Energetika  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. Radomír Chýlek**  
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Úprava vody v jaderné elektrárně

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce se zaměřuje na analýzu procesů upravujících vodu v rámci provozu jaderné elektrárny. Bude detailně prozkoumáno, jaké metody jsou využívány k tomu, aby byla voda vhodná pro provoz elektrárny. Důraz bude kladen na vliv úpravy vody na stabilitu a životnost elektrárny. Tímto bude dosaženo komplexního porozumění významu úpravy vody v kontextu jaderné energetiky a jejího dopadu na bezpečnost a efektivitu elektrárny.

### **Cíle bakalářské práce:**

Obecný souhrn celosvětově používaných metod úpravy vody pro jaderné elektrárny, obsahující metody čištění a možnosti dávkování chemikálií.

Popis úpravy vody pro konkrétní elektrárnu v ČR.

Použití, výhody a nevýhody jednotlivých metod čištění a úpravy vody.

### **Seznam doporučené literatury:**

KOLEKTIV AUTORŮ, ČEZ A.S. Chemie JE VVER 1000. 2023. Učební texty pro přípravu personálu JE.

HÜBNER, Pavel. Úprava vody v energetice: Pavel Hübner. 2., přeprac. a rozš. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-873-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá problematikou úpravy vody pro jaderné elektrárny. Cílem práce je podrobně analyzovat procesy a technologie využívané při úpravě vody, která je klíčová pro bezpečný a dlouhý provoz jaderných elektráren. V první části jsou představeny možnosti zdrojů vody a jaké látky obsahují. V následující části jsou rozebrány metody předúpravy vody, demineralizace vody a další technologie úpravy. Třetí část práce se zabývá rozdělením reaktorů a jejich chemickým režimem. V další části je popsána úprava vody s chemickým režimem na jaderné elektrárně Temelín. Poslední část práce srovnává metody úpravy vody, jejich výhody a nevýhody.

### **Klíčová slova**

úprava vody, jaderná elektrárna, reverzní osmóza, ionexové filtry, chemický režim

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the issue of water treatment for nuclear power plants. The aim of the work is to analyse in detail the processes and technologies used in water treatment, which is crucial for the safe and long operation of nuclear power plants. In the first part, the possibilities of water sources and what substances they contain are presented. In the following part, water pretreatment methods, water demineralization and other treatment technologies are presented. The third part of the thesis deals with reactor partitioning and their chemistry program. The next part describes the water treatment with chemistry program at the Temelin nuclear power plant. The last part of the thesis compares water treatment methods, their advantages, and disadvantages.

### **Key words**

water treatment, nuclear power plant, reverse osmosis, ionex filtration, chemistry program

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HOSKOVEC, Martin. *Úprava vody v jaderné elektrárně*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157096>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Radomír Chýlek.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Úprava vody v jaderné elektrárně** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

\_\_\_\_\_  
*Jméno a příjmení*

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu Ing. Radomíru Chýlkovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce a také za exkurzi do JE Temelín.

## OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Voda využívaná v energetických zařízeních .....	12
1.1 Surová voda .....	12
1.2 Nežádoucí látky .....	12
1.3 Požadavky JE na kvalitu vody .....	13
2 Přehled technologií pro úpravu vody .....	14
2.1 Předúprava .....	14
2.1.1 Hrubé předčištění cezením .....	14
2.1.2 Sedimentace.....	15
2.1.3 Čiření .....	15
2.1.4 Typy čířících reaktorů .....	16
2.1.5 Flotace .....	19
2.1.6 Filtrace zrnitým lože.....	20
2.1.7 Membránová filtrace.....	21
2.2 Demineralizace ionexovými filtry .....	22
2.2.1 Regenerace.....	23
2.2.2 Provoz.....	24
2.3 Reverzní osmóza .....	24
2.4 Směsné filtry (mix-bed) .....	25
2.5 Elektrodeionizace (EDI) .....	25
2.6 Změkčování a dekarbonizace.....	26
2.7 Ostatní techniky úpravy vody .....	26
2.7.1 Destilace .....	26
2.7.2 Odsolování.....	27
2.7.3 Úprava vody s využitím magnetismu .....	28
2.7.4 Biologická filtrace .....	29
2.8 Odplynění.....	29
2.9 Alkalizace .....	30
2.10 Dezinfekce .....	30
3 Chemický režim.....	33
3.1 Tlakovodní reaktor – PWR (VVER).....	33
3.1.1 Úprava vody .....	33
3.1.2 Dávkování chemikálií a kontinuální čištění .....	33
3.2 Varný reaktor – BWR .....	35
3.2.1 Úprava vody BWR .....	35
3.2.2 Dávkování chemikálií BWR.....	35
3.3 Těžkovodní reaktor PHWR (CANDU).....	36
3.3.1 Úprava vody PHWR.....	36
3.3.2 Dávkování chemikálií PHWR .....	37
4 Úprava vody na JE Temelín .....	39

4.1	Vodní hospodářství a zásobování.....	39
4.2	ÚCHV.....	40
4.3	CHÚV.....	41
4.4	Chemický režim I.O. ....	43
4.5	Chemický režim II.O. ....	44
5	Srovnání technologií .....	46
5.1	Předúprava vody.....	46
5.2	Demineralizace .....	46
5.3	Odsolování.....	47
5.4	Chemické režimy.....	47
	ZÁVĚR .....	49
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	50
	SEZNAM ZKRATEK.....	53
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	54
	SEZNAM TABULEK.....	55

## **ÚVOD**

Jaderná energetika představuje klíčový zdroj elektřiny v mnoha zemích světa. Jaderné elektrárny vyžadují přesnou kontrolu a řízení mnoha technických aspektů, mezi nimiž hraje zásadní roli úprava vody, proto je nutné ji věnovat velkou pozornost. S rostoucími požadavky na kvalitu vody a úsporu z pohledu ekonomiky se vyvinulo několik technik předúpravy, čištění vody a dávkování chemikálií v energetickém prostoru. Jaderné elektrárny používají především povrchovou vodu, která obsahuje spousty nežádoucích látek, které je potřeba odstranit, popřípadě snížit na daný limit. Ve světě je mnoho jaderných elektráren, které se odlišují typem reaktoru, zdrojem vody, požadavky na kvalitu a pro každou elektrárnu je stanoven vlastní chemický režim. Elektrárny využívající mořskou vodu, nebo vodu s vysokým obsahem solí, potřebují zařízení pro odsolování, které z mořské vody tyto soli odstraní. Odsolování a přeměna mořské vody na pitnou či užitkovou vodu bude v budoucnosti jednou z možností, jak vyřešit problém s nedostatkem vody.

Cílem práce je popsat možnosti úpravy vody pro jaderné elektrárny, a to včetně získávání vody pro samotné zařízení. V práci budou popsány zdroje vody, jaké látky obsahují a jaké problémy způsobují. Dále budou rozebrány metody úpravy vody, které se skládají z předúpravy, následné demineralizaci a dočištění vody, ať už fyzikální nebo chemické. Pro každý typ a okruh zařízení jsou specifické požadavky, proto v této práci budou dále představeny typy aktuálně používaných reaktorů, které využívají vodu jako moderátor a chladiivo. Každý typ bude zjednodušeně popsán a bude zde představen chemický režim s dávkováním chemikálií jednotlivých okruhů. Následná část práce se bude věnovat popisu úpravy vody a chemickému režimu na jaderné elektrárně Temelín. Posledním bodem této práce bude srovnání zmíněných technologií pro úpravu vody využívaných na jaderných elektrárnách.

## 1 Voda využívána v energetických zařízeních

Zdrojem vody pro jaderné elektrárny a energetická zařízení s parovodním cyklem je většinou povrchová voda. Podzemní voda se používá zřídka, protože je využívána při úpravě pitné vody a je vzácnější než povrchová voda. Navíc obsahuje velké množství rozpuštěných minerálních látek. Vzhledem k odebíranému objemu vody a z ekonomického hlediska se voda odebírá buď přímo z toku, nebo z vodního díla. Vodním dílem rozumíme vodní nádrž, přehradu, či stavbu zadržující velké množství vody, odkud čerpáme vodu do energetického zařízení. Takto získanou vodu nazýváme surovou vodou. Ve světě se používá i mořská voda, která je pro parovodní cyklus nevhodná a také je velmi agresivní. Mořskou vodu je potřeba odsolit pomocí vhodných technik.

Voda je doplňována do primárních a sekundárních okruhů v menším množství, ale jsou zde vysoké požadavky na kvalitu vody. Nejvíce vody spotřebujeme na chlazení v kondenzátoru. Většina jaderných elektráren, které používají na chlazení velké množství vody, se budují v blízkosti moře, velkého vnitrozemského vodního útvaru nebo velké řeky. Voda se využije jediným průchodem a poté je vypouštěna zpět do zdroje o pár stupňů teplejší. Tento způsob chlazení můžeme označit za průtočný chladicí okruh. Pokud taková zásoba vody není k dispozici, používá se chladících věží. Při použití věží dochází ke ztrátám chladicí vody, která musí být doplňována. Pro snížení spotřeby vody se může využívat suchých chladících věží nebo hybridních chladících věží. [1]

### 1.1 Surová voda

Získanou surovou vodu, ať už povrchovou nebo podzemní, je nutné upravit pro potřeby jaderné elektrárny, protože obsahuje spoustu znečišťujících látek, které je nezbytné odstranit nebo snížit jejich limit dle normy, či požadavků zařízení. V průběhu roku se kvalita vody mění s klimatickými podmínkami, například v období tání a dešťů se může kvalita vody výrazně zhoršit. Proto je potřeba sledovat některé parametry, které určují kvalitu vody.

Charakteristika některých souhrnných hodnot určujících kvalitu vody: [2]

- Pro vyjádření kyselosti, či zásaditosti se používá stupnice pH, která se pohybuje v intervalu 0–14. Neutrální roztok je takový, jehož pH má hodnotu 7. Pokud je hodnota menší než 7, tak je roztok kyselý. Naopak při hodnotě větší než 7 je roztok zásaditý.
- Měrná elektrická vodivost vody vyjadřuje koncentraci všech iontů rozpuštěných ve vodě, které vedou elektrický proud. Čím větší je hodnota, tím více se zvyšuje schopnost vody vést elektrický proud a z toho se dá nepřímo určit obsah minerálních látek rozpuštěných ve vodě. Jednotkou je  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  (mikrosiemens/centimetr), pro teplotu 25 °C.
- Tvrdost vyjadřuje poměr vápníku  $\text{Ca}^{2+}$  a hořčíku  $\text{Mg}^{2+}$ . Jednotkou je  $\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  (mili-mol/litr). Čím větší je tvrdost, tím více vzniká na povrchu potrubních tras povlak kotelního kamene, což vede ke snížení přestupu tepla.
- CHSK a BSK jsou udavatelé množství organických látek. Pomocí těchto látek, které mají schopnost se oxidovat, můžeme stanovit chemickou spotřebu kyslíku (CHSK) a biologickou spotřebu kyslíku (BSK).

### 1.2 Nežádoucí látky

Surová voda obsahuje organické a anorganické nečistoty, které je potřeba odstranit pro správný a dlouhý provoz elektrárny. Tabulka 1 ukazuje, jaké látky jsou nežádoucí a co mohou způsobovat.

Tabulka 1 Látky obsažené ve vodě; upraveno dle [2]

Látka	Čemu mi vadí?
Nerozpuštěné látky	Degradace materiálu
Kyslík O <sub>2</sub>	Hlavní činitel koroze
Oxid uhličitý CO <sub>2</sub>	Vliv na korozi, ovlivňuje pH
Vápník a Hořčík	Ovlivňuje tvrdost vody
Dusík	ve formě NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Fosforečnany	Váže se s Fe, Al a Ca a vytváří soli
Organické látky	Ovlivňuje katexovou vodivost – korozi
Chloridy	Iniciují korozi austenitického materiálu
Oxid křemičitý	Nánosy na lopatkách turbíny
Sodík Na <sup>+</sup> , Draslík K <sup>+</sup>	Aktivují se v I.O, ovlivňuje pH

Provoz energetických zařízení a požadavky na kvalitu vody určuje výrobce zařízení, který volí na základě norem, podle požadavků kvality páry, zvolených materiálech a typu zařízení. Nejčastějšími problémy chladicí vody je tvorba vodního kamene, koroze a biofilmy.

### 1.3 Požadavky JE na kvalitu vody

Jaderná elektrárna má požadavky na kvalitu vody takové, aby se na teplosměnných plochách nevytvářeli nánosy a nesmí se zanášet potrubní trasy. Dále nesmí voda způsobovat korozi a také jsou požadavky na životní prostředí, kdy vypouštěná voda musí být nezávadná.

Pro každý okruh JE jsou specifické požadavky kvality vody. Pro primární okruh (I.O) a sekundární okruh (II.O) se používá demineralizovaná voda, zbavena všech nečistot, a navíc doplněna pro každý okruh specifickými chemikáliemi. V těchto okruzích dochází ke kontinuálnímu čištění pro udržení parametrů vody a voda je i doplňována. Pro chladicí okruhy a technické vody nejsou tak náročné požadavky na kvalitu vody a není nutné ji demineralizovat. Také je důležité zabránit rozvoji řas, plísní a hub. V chladicích systémech má velmi dobré podmínky pro rozmnožování bakterie legionella, která pro člověka představuje zdravotní riziko. Mikroorganismy mohou tvořit nánosy biofilmů, které snižují přestup tepla a tím i celkovou účinnost zařízení. Těmto problémům se dá předejít dávkováním chemikálií, filtrací a dezinfekcí. [3]

## 2 Přehled technologií pro úpravu vody

V této kapitole bude popsána úprava vody od jejího získání. Voda musí projít přes několik čistících procesů, aby se dostala na požadované parametry. Už ve vodním díle, pokud je zde voda zdržena dostatečně dlouho, dochází k čištění pomocí sedimentace, kdy se větší částice vlivem gravitace usazují na dno. To je však jen začátek úpravy vody a stále je potřeba použít technologie pro dosažení požadavků jaderné elektrárny, které zajistí co nejlepší a nejdelší provoz zařízení a také ekonomickou výhodnost.

### 2.1 Předúprava

Předúpravou vody rozumíme odstranění částic a nečistot do takové míry, abychom vodu mohli demineralizovat a dopravit pro potřeby jaderné elektrárny. Zahrnuje procesy předřazené na začátku úpravárenského schématu. Volba metody odstranění nečistot závisí na velikosti částic, které chceme odstraňovat a na ekonomickém hledisku, životním prostředí a životnosti použité technologie. V tabulce 2 je možné vidět závislost mezi velikostí částic na jejich metodě odstraňování.

Tabulka 2 Velikost částic ve vodě a metody jejich odstraňování; upraveno dle [4]

ionty	molekuly	makromolekuly	mikročástice	makročástice
	← cukry →			
		← koloidy →		
	← pyrogeny →			
		← viry →		
		← bakterie →		
	← enzymy →			
				← cukry →
← REVERZNÍ OSMÓZA →				
	← NANOFILTRACE →	← MIKROFILTRACE →		
				← FILTRACE ZRNITÝM LOŽEM →
	← ULTRAFILTRACE →			← ŠTĚRBINOVÉ FILTRY →

Surovou vodu získáváme z vodního zdroje, kde je odebrána a dopravována do areálu jaderné elektrárny, kde se nachází vyrovnávací vodojem, který funguje jako zásobárna pro potřeby ochlazení elektrárny. Nasávání surové vody probíhá přes česle nebo síta, následně se voda může upravit čířením a poté se dočišťuje filtry se zrnitým ložem, popřípadě jinými jemnějšími filtry. Takto upravená voda se může použít k demineralizaci, k chlazení, nebo k jiným účelům elektrárny.

#### 2.1.1 Hrubé předčištění cezením

Za hrubé předčištění vody jsou považovány česle, které se nacházejí na vstupu surové vody ve vodním díle. Česle jsou zařízení, odpovídající mřížím, které slouží k zachycení nejhrubších nečistot, jako jsou větve, listy, odpadky anebo led. Dělí se na hrubé a jemné česle podle velikosti zachytávaných nečistot. Česle jsou umístěny pod úhlem a mohou být ručně

vyklížené nebo strojově vyklížené. Toto předčištění zajišťuje ochranu čerpadel, které by se mohli bez česlí velice rychle poškodit. Pro zvýšení bezpečnosti a životnosti čerpadel se mohou používat síta nebo sítové filtry, které odstraní menší nečistoty. [5]

### 2.1.2 Sedimentace

Pomocí usazování pevných látek můžeme docílit zlepšení kvality vody. Tato metoda využívá gravitace, kdy částičky nečistot rozptýlené v látce se usazují a shromažďují do místa, kde se vytváří kal. Tento kal je tvořen nerozpuštěnými látkami. Sedimentace je proces hrubého předčištění a kal se využívá jako médium na čistírnách odpadních vod. K sedimentaci dochází už ve vodních nádržích, kdy při dlouhém zdržení může dojít ke zlepšení kvality, pokud je malé množství srážek. Při velkém množství srážek nebo v období tání se může naopak kvalita vody rapidně zhoršit. [2; 4]

Pro sedimentaci používáme čířící reaktory, které fungují na principu kyselého čiření nebo alkalického čiření. Dále se sedimentace využívá v čističkách odpadních vod. Účinnost sedimentace závisí na velikosti částic, dávkování chemikálií a době zdržení v čířícím reaktoru. Velké množství částic ve vodě je menších než 20  $\mu\text{m}$ , proto je samotná sedimentace nedostatečná a neúčinná [6].

### 2.1.3 Čiření

Tato technologie úpravy vody se uplatňuje pro odstranění rozpuštěných či suspendovaných látek a také pro odstranění organických nečistot, jako je zákal vody. Používá se zejména pro úpravu vody s velkým obsahem těchto látek, kdy provozování pouze filtrace by bylo neekonomické. Pokud je však kvalita surové vody dostačující, proces čiření se může vynechat. [4]

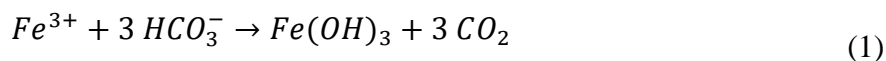
Čířící proces se skládá z několika procesů a probíhá v čířících reaktorech. Skládá se z koagulace, což je proces, při kterém se do vody přidává koagulant, který eliminuje náboj částic, což způsobí tvorbu shluků pevně vázaných částic. Dále se čiření skládá z flokulace, u které se zformují vločky z volně vázaných částic a jejich velikost je poté vhodná pro odstranění sedimentací. Rozhodující pro volbu čiření je alkalita vody, díky které se dá určit nejvýhodnější proces čiření. [4]

Podle pH, při kterém je proces prováděn rozdělujeme čiření na: [7]

- Kyselé čiření, kdy se pH pohybuje v rozmezí 5,0–6,0 a dává se koagulant na bázi železa nebo hliníku
- Alkalické čiření, kdy se pH pohybuje v rozmezí 9,6–10,5 a při kterém se dává koagulant s alkalizačním prvkem.
- Neutrální čiření, kdy se pH pohybuje v rozmezí 6,0–8,0

#### Kyselé čiření

Pro kyselé čiření je využíváno toho, že suspendované látky mají vesměs záporný náboj, a proto je přidáváno koagulační činidlo s kladným nábojem. Jako koagulant se využívá oxidů a hydroxidů hliníku, například síran hlinitý, ale většinou se používají pro přípravu pitné vody. Pro následnou demineralizaci je využíváno oxidů či hydroxidů železa, např. síran železitý, hydroxid železitý nebo chlorid železitý. Po dávkování koagulantu dochází k reakci: [4]



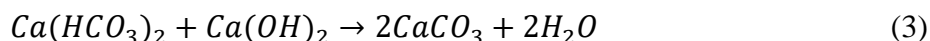
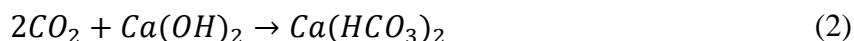
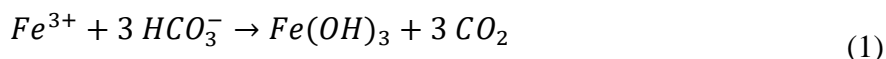
Množství dávkovaného koagulantu se pohybuje v rozmezí 0,6–0,8 mmol/l. Dávka koagulantu by měla být menší, než je alkalita vody, aby došlo k úplné transformaci celé dávky. Čířená voda je poměrně korozivní a pH má obvykle 5–6 (v některých případech se pH pohybuje do hodnoty 7), což se odvíjí od obsahu rozpuštěného  $\text{CO}_2$ , které se mění na kyselinu uhličitou

a okyseluje vodu. Málo alkalická voda se dříve dodatečně alkalizovala pomocí  $\text{Ca(OH)}_2$  nebo  $\text{NaOH}$ , ale dávkování bylo náročné na přípravu, zvyšovala se solnost upravované vody, a tím se zvyšovaly náklady na provoz a následnou demineralizaci. Proto se k těmto koagulantům začaly používat polymerní koagulanty (např. PAC–polyaluminiumchlorid) s vysokým nábojem, které dokážou neutralizovat náboj v menších dávkách mg/l. Kombinací anorganického a polymerního koagulantu se dosáhlo výhodného ekonomického řešení. [4; 7]

#### Alkalické čiření

Pro alkalické čiření se používá stejného principu jako u kyselého čiření. Převážně se používají železité koagulanty, protože hlinité jsou ve vysokém pH příliš rozpustné. Čiřená voda se pohybuje v pH 9,6–10,5 a úprava pH na požadovanou úroveň se provádí pomocí hydroxidu vápenatého  $\text{Ca(OH)}_2$ . Velkou výhodou je nízká korozivnost upravené vody a při vysokém pH se snižuje koncentrace těžkých kovů s  $\text{SiO}_2$ . Dávkování koagulantu není jednoznačné jako u kyselého čiření, ale musí být dostatečně velké pro překonání koagulační prahu organických koloidů. V surové vodě se vyskytuje rovnováha  $\text{HCO}_3^-$  a  $\text{CO}_2$ . Pokud využíváme vápno k alkalizaci vody, tak při pH cca 10 přechází do formy  $\text{CO}_3^{2-}$ . Následující reakce jsou závislé na podílu kationtů vyvážených ionty  $\text{HCO}_3^-$ . [4; 7]

První možností je, že **obsah Ca je vyšší nebo roven alkalitě vody**, což je případ většiny povrchových vod v ČR, pak u tohoto případu následují reakce: [4]



Vylučovanou fází je  $\text{Fe(OH)}_3$  a  $\text{CaCO}_3$ . Pokud se dávkuje jen vápno a nepoužívá se koagulant, nastává charakter kondenzačně krystalický, kdy se formují malé částice s nízkou sedimentační rychlostí. [4]

Dalším případem nastává, pokud je **alkalita vody vyšší nebo rovna obsahu vápníku, ale nižší nebo rovna obsahu vápníku a hořčíku**. U této možnosti se opět vylučuje  $\text{Fe(OH)}_3$  a  $\text{CaCO}_3$ , jako tomu bylo v prvním případě, ale navíc zde reaguje hořčík, který se vylučuje jako  $\text{MgCO}_3$  a při běžných koncentracích hořčíku  $\text{Mg}^{2+}$  se rozpustí. Pokud je však koncentrace hořčíku vyšší, vzniká hydroxid hořečnatý  $\text{Mg(OH)}_2$  a výsledná fáze je tříslučková. [4]

Případ, že **alkalita vody je vyšší nebo rovna obsahu vápníku a hořčíku** je velmi vzácný a opět by platili stejné reakce jako v prvním případě navýšené o reakci, kdy vzniká  $\text{MgCO}_3$  a o reakci hydrogenuhličitanu sodného  $\text{NaHCO}_3$ , ze kterého vzniká uhličitan sodný  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Při další alkalizaci by probíhaly reakce s hořčíkem, kdy výstupem je  $\text{Mg(OH)}_2$ . Dalším přídavkem  $\text{Ca(OH)}_2$  vzniká reakce s uhličitanem sodným  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a vzniká hydroxid sodný  $\text{NaOH}$ . [4]

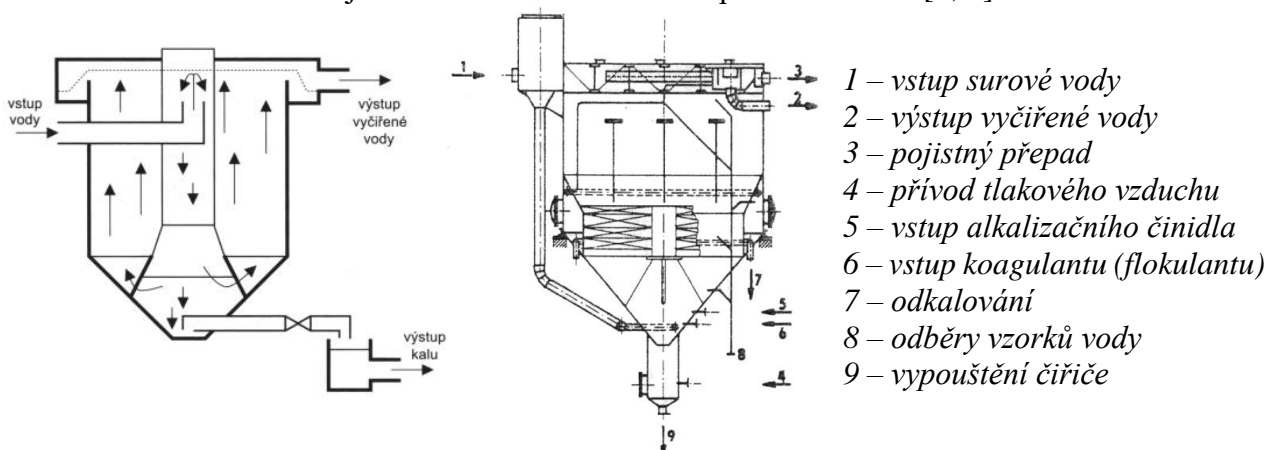
#### Neutrální čiření

Způsob, který se využívá zejména pro úpravu pitné vody. Opět se používají koagulanty jako u kyselého čiření. Při neutrálním pH se zvyšuje negativní náboj nečistot, zatímco účinný náboj koagulantu klesá, což vyžaduje zvýšení dávek a vede ke zhoršení kvality vyčištěné vody. Pro neutrální čiření se pH pohybuje v rozmezí 6–8. Pokud je pH 6–7, tak není nutné vodu dodatečně alkalizovat např.  $\text{NaOH}$ . [4; 7]

#### 2.1.4 Typy čířících reaktorů

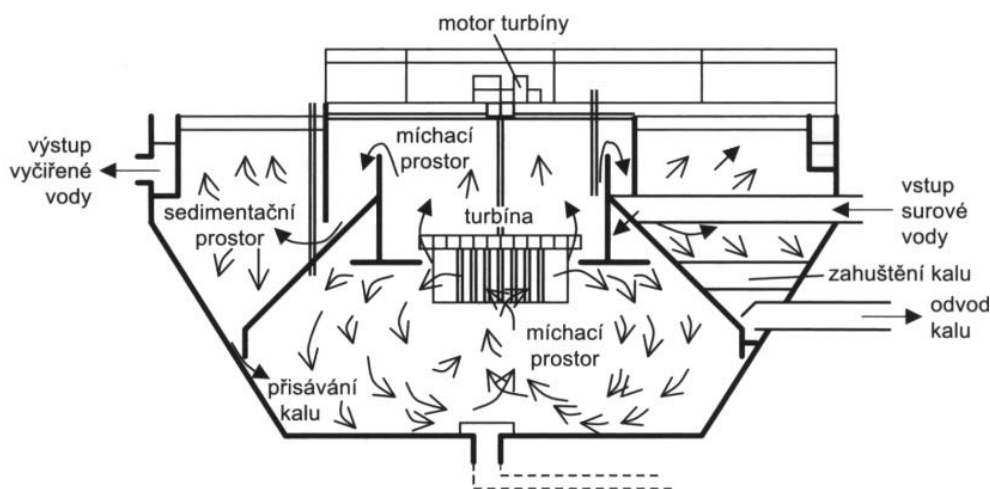
**Čířiče s kalovým mrakem** jsou léty osvědčenou metodou, která se dodnes používá zejména díky své jednoduché konstrukci a minimální poruchovosti. Mohou mít označení např. Dukla nebo Kugrajev. V čířiči vzniká při určitém průtoku kalový mrak z tvořícího se kalu, který

urychluje srážecí reakci. Nevýhodou tohoto typu je citlivost na průtok, kdy rychlost průtoku je ideální okolo  $3-4 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ . Pokud se průtok zpomalí, zploští se mrak a dojde ke vzniku zkratových proudů, takže voda neprochází dostatečně mrakem. Při zvýšení průtoku se mrak roztáhne a dochází k únosu kalu. Další nevýhodou je citlivost na změny teploty, kdy voda ohřátá na jedné straně od Slunce může způsobovat tepelné proudění a příčné proudy, které narušují sedimentaci. Menší komplikací může být dávkování polymerních koagulantů, kdy jednotlivé fáze nejsou výrazně odděleny. To se později vyřešilo přidáním předřazené tlakové flokulační komory. Velkou výhodou je výška přepadu, kdy je možné pro čiření využít gravitačního způsobu následné filtrace a eliminuje se riziko rozbití vložek čerpací technikou. [4; 7]



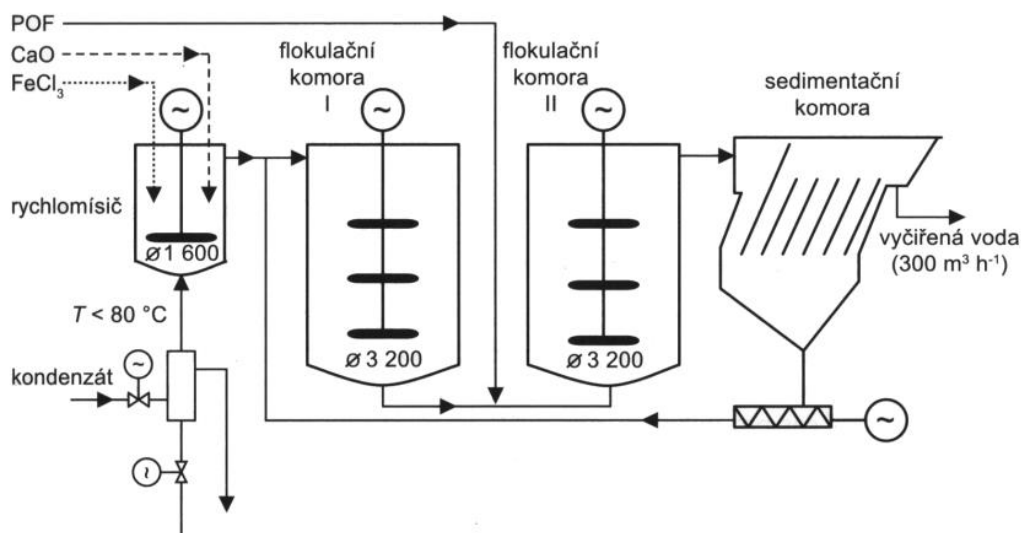
Obrázek 1 Schéma čičiče s kalovým mrakem (vlevo) a čičiče Dukla (vpravo) [7]

**Čičiče s recirkulací kalu** se dělí na čičiče s vnitřní recirkulací neboli akcelátory a na čičiče s vnější recirkulací kalu. Akcelátory využívají k recirkulaci turbínu, kdy je kal nasáván štěrbinou mezi sedimentačním a flokulačním prostorem. Následně je zajištěno promíchání kalu s přiváděnou vodou. Výhodou tohoto způsobu je prudký pokles rychlosti v části sedimentace, což vede k lepší stabilizaci kalového mraku. Problém je však s odvodem kalu, kdy je řešení odstranění kalu na stěnách určeno pro dobře odstranitelný kal např. u kyselého čiření. Pro alkalické čiření je nutné použití shrabování, kdy se kal ze stěn shrabuje doprostřed reaktoru a je poté odčerpáván. [4]



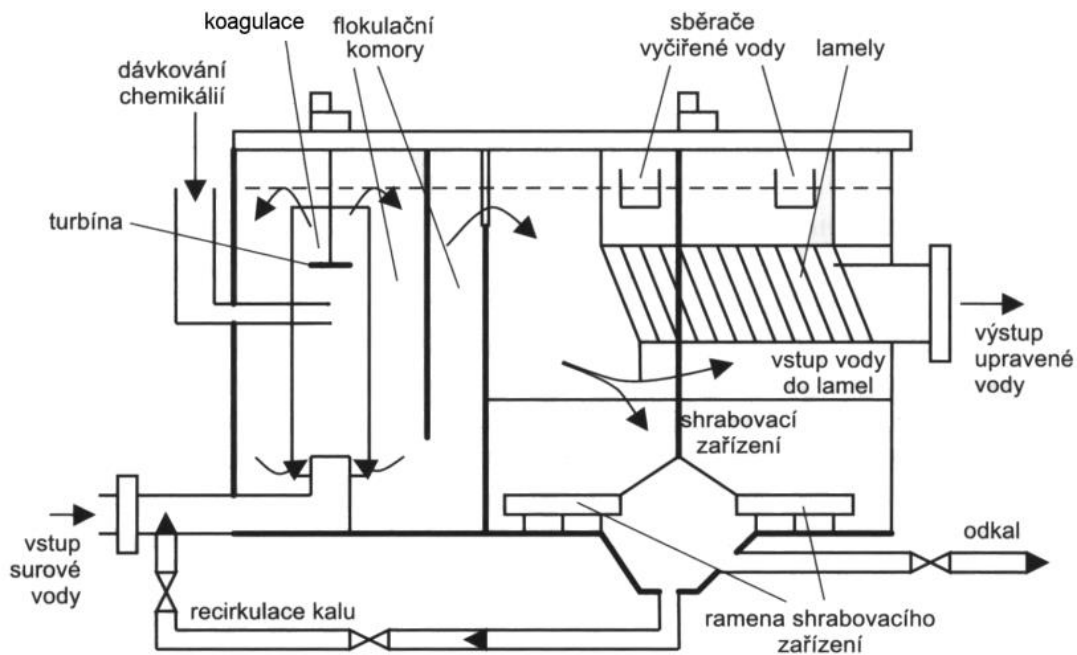
Obrázek 2 Schéma čičiče s vnitřní recirkulací kalu [7]

Čiřiče s vnější recirkulací kalu mají tu výhodu, že umožňují nastavení optimálních podmínek flokulace. V rychlomísčič dojde k dokonalému rozmíchání surové vody s chemikálií a začíná flokulace. Poté se do směsi přidá recirkulovaný kal a domíchá se v první flokulační komoře, kde se za výstup, resp. před vstup do druhé flokulační komory přidává organický flokulant. Sedimentace se uskutečňuje v sedimentační komoře s lamelovou vestavbou s velkou rychlostí průtoku. Výhody jsou menší citlivost na změny průtoku čířené vody a přesné nastavení intenzity míchání včetně míst dávkování. Dále může být výhodou vysoká citlivost na poruchu míchadel, kdy se okamžitě zhorší kvalita čířené vody. Nevýhodou je riziko vyčerpání kalu z čiřiče, pokud máme malý průtok čířené vody. [4; 7]



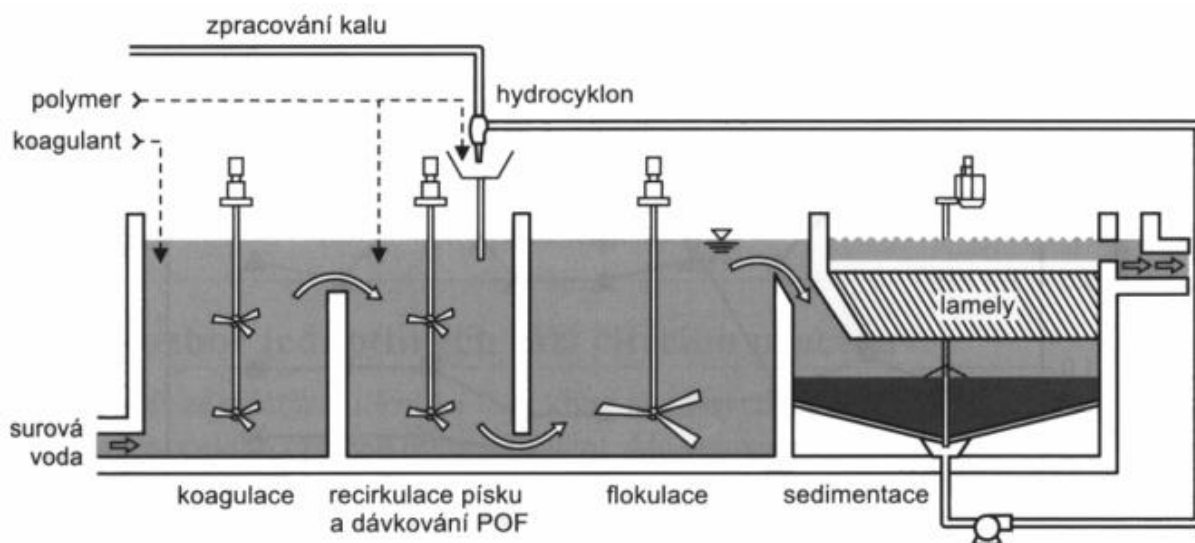
Obrázek 3 Schéma čiřiče s vnější recirkulací kalu [7]

Čiřiče s kombinovanou recirkulací kalu (systém Densadeg) se využívají s vnitřní i vnější recirkulací kalu, kdy flokulační stupeň je pouze jednostupňový a je náročnější na optimální nastavení. Pro nové verze se používá rychlomísčič jako předřazený stupeň. Výhodou je zmenšení rozměrů. [4]



Obrázek 4 Schéma čiřiče s kombinovanou recirkulací kalu [7]

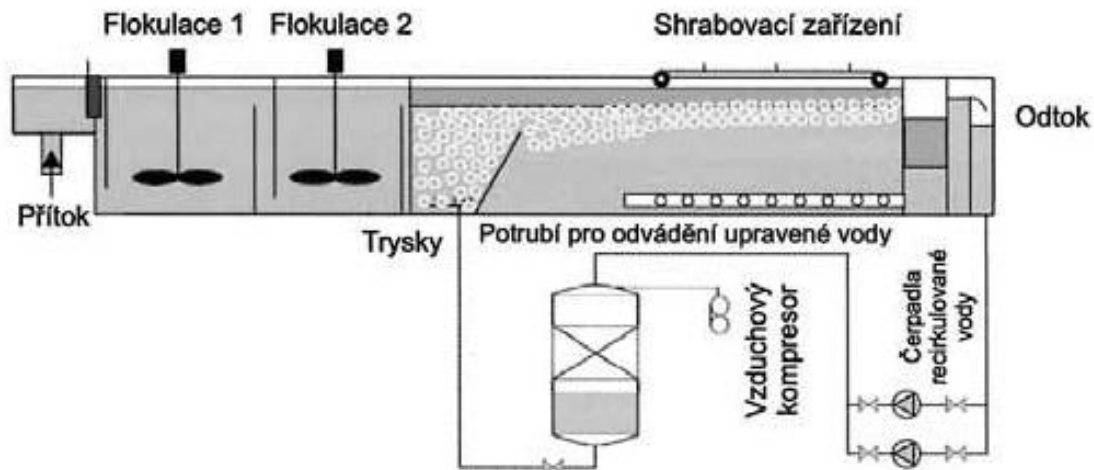
**Čiřiče s tvorbou kalu na nosiči** jsou zařízení, kde se po koagulaci dávkuje písek se zrnitostí 100  $\mu\text{m}$  a polymer, což způsobuje, že kal vzniká na jednotlivých zrnech písku a zkracuje se tak doba ve flokulaci. Díky větší hmotnosti kalu, jelikož základ tvoří písek, je možné dosahovat extrémně velkých stoupacích rychlostí, cca 60–80 km/h. Recirkulace písku nastává v hydrocyklonu, kde se kal oddělí od písku. Tato separace je velmi účinná, takže nedochází ke značným ztrátám písku. K výhodám patří menší rozměry, menší dávky koagulantu a nízké náklady na provoz. Také je výhodou snadné zprovoznění po odstavení bez vlivu na kvalitu. Tato technologie se používá zejména při kyselém čiření, ale v nedávné době se začala využívat i při alkalickém čiření. [4; 7]



Obrázek 5 Schéma čističky s tvorbou kalu na nosiči v kyselém prostředí [7]

### 2.1.5 Flotace

Flotace je proces, při kterém dávkuje koagulant k tvorbě shluků nečistot, které jsou poté vyneseny proudem vzduchových mikrobublinek na hladinu, kde vzniká vrstva kalu a kalové pěny. Vzduch se přidává v saturátoru, a když se dosáhne určité výšky vrstvy kalu, tak je odváděn sběračem kalu, například stíráním. Tento proces je zejména vhodný pro odstranění mikroorganismů, řas, zápachů, rozpuštěných plynů a suspendovaných látek nízké hmotnosti. Díky své jednoduchosti, a také účinným odstraňováním mikroorganismů, se tento proces používá zejména při úpravě pitné vody. Výhody použití flotace jsou vysoká hodnota povrchového zatížení, vysoká separační účinnost i u špatně usaditelných částic, vyšší kvalita upravené vody, snížení zatížení následujícího separačního stupně, rychlý náběh flotace při jejím odstavení, efektivní a ekonomický provoz. [8]

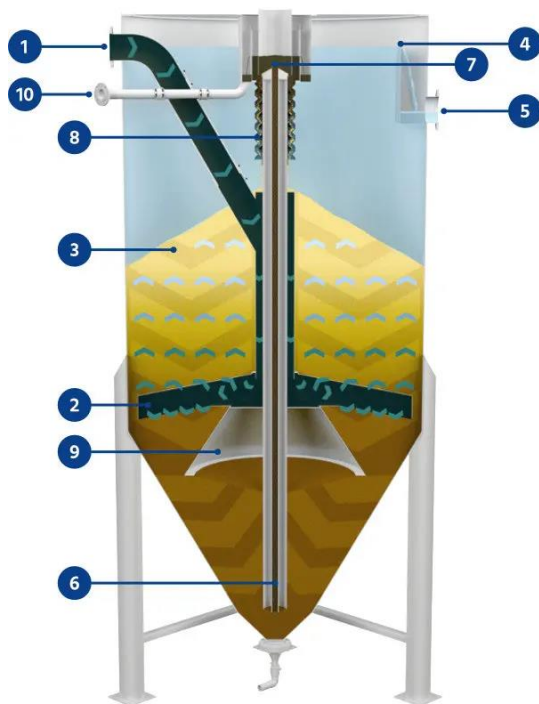


Obrázek 6 Schéma klasického uspořádání zařízení flotace [32]

### 2.1.6 Filtrace zrnitým lože

Nejvyužívanější technologií odstraňování suspendovaných částic je filtrace zrnitým lože, která se skládá z velké nádoby naplněné médiem, přes které prochází voda. Uvnitř nádoby filtrace se může vytvořit filtrační koláč, který napomáhá k zachytávání menších částic a tím zvyšuje účinnost. K filtraci čírené vody se používají především pískové filtry. [4]

Účinnost filtrace zrnitým lože se zvyšuje s velikostí zachytávaných částic a filtrace zachycuje většinou látky od 15  $\mu\text{m}$ . Dále závisí účinnost na filtračním materiálu, kdy menší zrnitost média způsobí lepší kvalitu upravené vody. Výhodné je použít dva stupně, kdy v prvním stupni je hrubší náplň a ve druhém stupni jemnější. Minimální výška filtračního lože se udává 600 mm, obvykle se používá 1000–1200 mm a průměr je obvykle do 3000 mm. Průtočná rychlost by se měla pohybovat v rozmezí 10–20  $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ , protože větší rychlost způsobuje vyšší tlakovou ztrátu a u menších rychlostí nedochází k rozdělení vody do celého průřezu. Ve filtraci se používá obvykle náplň o zrnitosti 1–2 mm. Používají se i řešení vícevrstevných filtrů, kdy náplň může být například kombinace antracit-písek. Pro praní a sběr filtrované vody se osvědčilo hydraulické řešení použitím tryskového dna, kdy se nad tryskami nachází podložní vrstva ve větší zrnitosti, která blokuje menší zrna ve vniknutí do trysek. Vzduch pro praní je zaváděn pod tryskové dno, kde vytvoří vzduchový polštář a rovnoměrně se rozdělí po celém průřezu filtru. [4]



Surová voda proudí vstupním potrubím (1) do rozdělovače (2), kde se voda přefiltruje přes náplň (3) a stoupá nahoru k přepadu (4). Přefiltrovaná voda je poté odváděna výstupním potrubím. Znečištěný písek je díky vzduchovému čerpadlu (6) přesunut vzhůru do filtrační jednotky (7), kde písek padá do pračky písku (8). Zde je písek čištěn protiproudem a vyčištěný padá zpět na povrch filtračního lože a opět slouží jako filtrační médium. Rozdělovací kužel písku (9) zajišťuje rovnoměrné rozložení písku po celé ploše filtru. Znečištěná prací voda odchází z filtru vývodem prací vody (10).

Obrázek 7 Schéma průtočného pískového filtru Leiblein [9]

Praní filtru se dělí na 3 způsoby:

#### **Praní pouze vodou**

Způsob praní filtru pouze vodou se používá jen v menších filtrech. Je to způsobeno tím, že spotřeba vody je velmi vysoká, navíc by bylo potřeba čerpadlo o větším výkonu. Filtrační rychlost závisí na zrnitosti náplně. Také se zvyšuje pravděpodobnost rozpadu filtračního koláče, který se může rozpadnout na tzv. mud-balls, což jsou hroudy náplně s nerozpuštěnými látkami. Ty se nerozpustí, protože propadnou na tryskové dno, kde způsobí snížení kapacity filtrace a zhoršení kvality filtrované vody. [4]

#### **Praní vodou a vzduchem postupně**

Tato metoda se skládá ze dvou procesů. První se pere filtr vzduchem rychlostí okolo 50 m·h<sup>-1</sup> po dobu několika minut, což způsobí narušení filtračního koláče, ale už nevznikají hroudy, které by mohli propadnout k tryskovému loži. Poté se pere filtr vodou, což způsobí, že látky uvolněné při praní vzduchem se odvádějí z filtru pryč. Pro úsporu vody a kvalitnější praní filtru se používá několikanásobné střídání praní vzduchem a vodou, ale tento způsob se převážně využívá ve vícevrstvých filtrech, aby se zamezilo unikání lehčí náplně z filtru. [4]

#### **Praní vodou a vzduchem současně**

U této metody se využívá praní vzduchem a vodou současně. Praní vzduchem má za cíl odstranit kal ze zrn náplně a voda kal dopravuje z filtru ven. Výhodou této metody je snížení prací vody cca o 30 % v porovnání s postupnou metodou. Po dokončení praní je filtr vymyt od shora dolů. Další výhodou je nenáročnost na průtočnou rychlost, kdy není potřeba používat čerpací techniku a celý proces se dá jednoduše zautomatizovat. [4]

### **2.1.7 Membránová filtrace**

Volba metody pro odstranění částic z vody závisí zejména na velikosti částic, které chceme z vody odstranit. Kapalina musí projít přes filtrační médium, které má póry menšího průměru, než je průměr zachytávané částice tuhé látky. Mikrofiltrace je nad 0,1 μm porozity membrány, například před reverzní osmózou (3–5 μm) a je neregenerovatelná. Existují však i

pytlíkové membrány, které se po použití mohou vyprat a dovolují tak několikanásobné využití. Od 50  $\mu\text{m}$  jsou regenerovatelné, ale už se objevují i mikrofiltrace s menšími póry, které lze po dosažení tlakové ztráty obráceným proudem vyprat. Ultrafiltrace je 0,001–0,5  $\mu\text{m}$  porozitní membrány, ale v energetice se tato filtrace většinou nevyužívá. Používá se k odstranění organických látek. [4]

Tabulka 3 Tlakové a energetické nároky pro membránové procesy; upraveno dle [1]

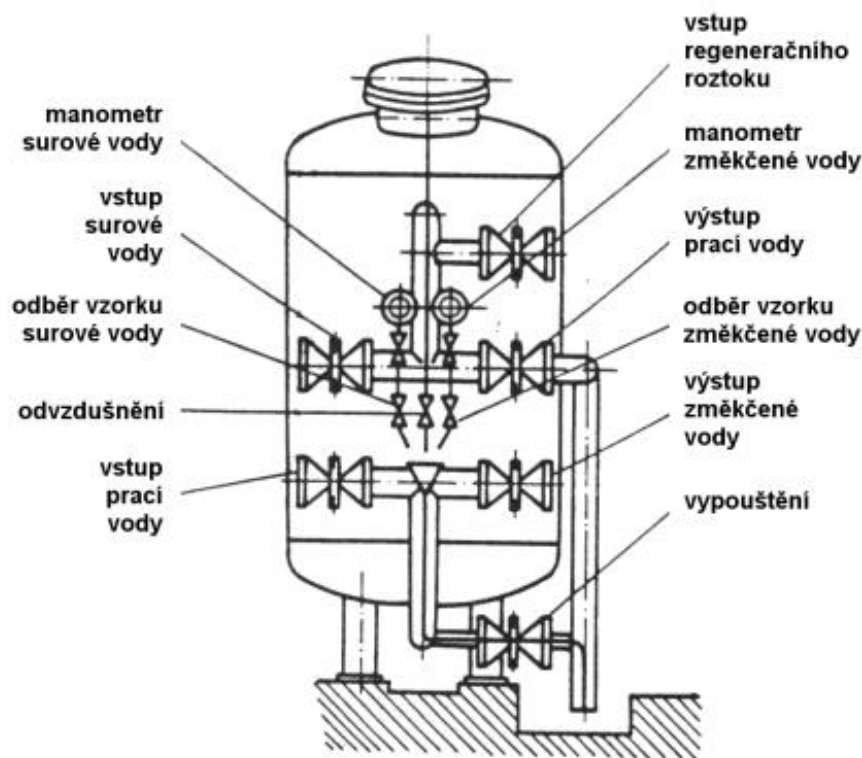
Membránové procesy	Zachytávané částice	Obvykle provozovaný tlak [bar]	Obvyklá spotřeba energie [ $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ]
Mikrofiltrace	0,1-0,5 mikrometrů	0,2-2	0,4
Ultrafiltrace	0,005-0,05 mikrometrů	0,35-5,15	3
Nanofiltrace	0,005-0,001 mikrometrů	3,5-10,5	5,3
Reverzní osmóza	<10 mezní molekulová hmotnost	8,6-86	10 až 47

Membránové filtrace se běžně používají v úpravě vody k odsolení a k produkci ultračisté vody. Membrány jsou v různých provedeních, například spirálně vinuté, trubkové, keramické atd. Filtrační postup rozlišujeme do dvou skupin: [4]

- Dead-end filtrace  
Kolmo na povrch membrány o dané porozitě protéká voda. Na membráně se zachytávají látky větší, než je velikost pórů a vytváří se filtrační koláč. Membrána může rychleji přijít o svou schopnost, což se projeví zhoršením kvality filtrované vody nebo nárůstem tlakové ztráty. Náplň se neregeneruje, je potřeba ji vyměnit za novou.
- Cross-flow filtrace  
Voda protéká podél membrány. Filtrovaná voda proteče membránou a vyfiltrované látky jsou odplavovány do odpadu. Tím se zvyšuje životnost membrány. Odpadní voda se recirkuluje zpět do zásobníku a proces se opakuje.

## 2.2 Demineralizace ionexovými filtry

Pro demineralizaci vody, která prošla předúpravou, se používá ionexových filtrů, které fungují na principu výměny iontů. Médium v těchto filtrech je ionexová hmota ve formě kuliček, která je většinou uměle vyrobenou pryskyřicí a průchodem vody přes tyto kuličky o průměru 0,3 – 1,5 mm dochází k iontové výměně, což způsobuje, že látky obsažené ve vodě jsou zachytávány ionexovou hmotou, ionty původně navázané na ionexovou hmotu se uvolňují do vody a vychází z filtru ven. Pro iontovou výměnu určenou k demineralizaci je možné použít dva druhy ionexů. Prvním z nich je katex, který zachytává a vyměňuje kationty za  $\text{H}^+$  ionty. Z katexového filtru dostáváme vodu, která je zbavena kationtů, avšak je mírně kyselá. Druhým ionexem je anex, který zachytává a vyměňuje anionty za  $\text{OH}^-$  ionty. Pokud vodu z katexu vyfiltrujeme v anexovém filtru, tak dostaneme téměř demineralizovanou vodu, která se dočišťuje směsnými filtry. Pro úpravu vody se skoro vždy používá jako první stupeň katex a druhý stupeň anex. Reverzní demineralizace, u níž je první stupeň anex, je teoretická a prakticky se nepoužívá. [2; 4]



Obrázek 8 Konstrukce a zapojení ionexového filtru [10]

### 2.2.1 Regenerace

Katexový stupeň je po vyčerpání svých schopností nutné regenerovat za pomoci chemikálií, převážně kyselinami HCl, HNO<sub>3</sub> nebo H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Anexový stupeň se regeneruje roztokem NaOH nebo KOH. [4]

**Souproudá regenerace**, kdy regenerační roztok je pouštěn stejným směrem jako upravovaná voda při provozu, je nákladná na chemikálie, a proto se už prakticky nepoužívá. Také musí před každou regenerací probíhat praní filtru. [4]

**Protiproudou regenerací** se snížili ekonomické náklady na chemikálie. Regenerát je z ionexových filtrů odváděn roštem, který se nachází v horní části filtru. U této techniky nesmí dojít k promíchání lože jak při regeneraci, tak i v provozu. Protiproudá regenerace už dožívá a používá se modernějších řešení. [4]

**Dvouproudá regenerace** probíhá tak, že se regenerační roztok zavádí do horní i do spodní části ionexového filtru a vystupuje roštem zhruba ve 2/3 výšky lože. Tím se docílí souproudu v horní části a protiproudu v dolní části. Hlavní výhodou je praní filtru, kdy spodní vrstvě stačí praní jednou za deset cyklů. Horní vrstva se pere vždy před regenerací. Tento systém je složitý a pro nové projekty se nepoužívá. [4]

**Protiproudé systémy s plnými kolonami** se používá při použití filtru s plným ionexem, protože se nemusí použít střední regenerační rošt. Voda může protékat shora dolů nebo obráceně, ale regenerát protéká vždy opačným směrem než voda. Praní náplně se provádí externě a jsou větší nároky na předúpravu vody. Tento typ je vhodný pro provozování za stálých průtoků, kdy nedochází k náhlým změnám, protože může dojít k promíchání náplně. Tomu se dá předejít recirkulačními čerpadly, které musejí recirkulovanou vodu držet na poměrně vysoké průtočné rychlosti, což vede ke zvýšení nákladů čerpání. Praní náplně se provádí v externí nádrži. Výhodami protiproudých systému s plnými kolonami jsou zkrácená doba regenerace, zredukování počtu armatur, maximalizace kapacity ionexového filtru a jednoduchost řízení. [4]

### 2.2.2 Provoz

Provoz ionexového filtru se skládá ze 4 fází: [2]

- Provoz (pracovní fáze)
- Praní a kypření
- Regenerace
- Vymytí

Při zajištění nové náplně je potřeba nejprve filtr připravit k provozu. To se provádí tak, že náplň se ukládá do filtru zčásti naplněného vodou a nechá se 24 hodin bobtnat. V průběhu bobtnání se ionex kypří vodou a poté se vypere intenzivně vodou. Tím se zbaví všech prachových částic a zbytky z výroby. Poslední důležitou fází je regenerace, kdy se použije trojnásobné množství regeneračního činidla, než se obvykle používá při provozu. [2; 10]

**Provoz** ionexového filtru nastává, když voda protéká katexem a následně anexem, kdy probíhá výměna jednotlivých iontů. Ukončení pracovní fáze je dáno zhoršením kvality upravované vody. [10]

**Praní a kypření** probíhá před regenerací, kdy se filtr pere vodou, dokud nezačne vytékat čirá voda a je u toho důležité kontrolovat, aby nedošlo k úniku ionexu. Prání vodou a kypření vzduchem nelze provozovat současně, proto se používá střídavé praní. Jako náhradu za vzduch se může použít dusík. [2; 4]

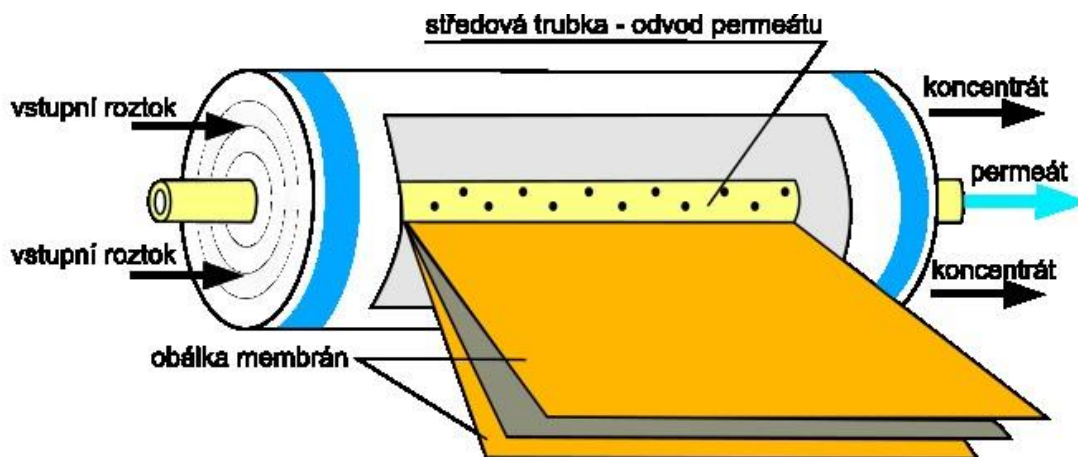
**Regenerace** probíhá 45 až 90 minut a regeneruje se chemikáliemi. Může probíhat souproudě, kdy je ale horší zregenerování spodních vrstev a větší spotřeba regenerantu. U protiproudé regenerace se spodní vrstvy regenerují nejdříve. Právě spodní vrstvy ionexu rozhodují o kvalitě upravované vody, takže je potřeba je dobře regenerovat. [2; 10]

**Vymývání** slouží k odstranění roztoků a vytěsněných iontů po regeneraci. Spočívá ve dvou fázích, kdy při první fázi vymývací voda protéká filtrem stejně rychle jako regenerační roztok. Druhá fáze je rychlé vymývání, kdy se vymývá obdobným zatížením jako při provozu. V některých případech se používá jen druhá fáze. Jako médium pro vymývání se používá čistý kondenzát nebo vstupní voda. [2; 4]

## 2.3 Reverzní osmóza

Tento proces spadá do membránových procesů. Reverzní osmóza neboli RO obsahuje membránu, která propouští čistou vodu a odděluje dva různě koncentrované roztoky. Osmóza je děj, kdy roztok s nižší koncentrací, respektive zředěnější roztok, začne samovolně pronikat do roztoku s vyšší koncentrací. Tento proces trvá do doby, než se hladina ustálí v části s koncentrovanějším roztokem na vyšší úrovni. Osmotický tlak je poté rozdíl těchto hladin. Pokud začneme působit tlakem na koncentrovanější roztok, který bude vyšší než osmotický tlak, tak dojde k obrácení procesu a voda bude proudit z koncentrovanějšího prostředí do zředěnějšího prostředí. Tomuto procesu říkáme reverzní osmóza. [11]

Z RO dostáváme dva produkty. Jedním z nich je permeát, což je čistější produkt a druhým produktem je roztok, který neprošel přes membránu a je koncentrovanější (tzv. retentát). Osmotický tlak je závislý na koncentraci roztoku. Se zvětšující se koncentrací roste tlak. Pracovní tlak závisí na požadavcích výtěžku permeátu a na membráně. Pro úpravu vody se používají spirálně vinuté konfigurace a téměř vždy se systémem cross-flow, kdy voda teče podél membrány a elementy, tzv. spacery, zajišťující turbulenci pro eliminaci mrtvých zón. Tím se zabraňuje zvýšení koncentrace a usazování nečistot na povrchu elementů. Jednotlivé elementy jsou uloženy spirálně a tvoří tak svitek, ve kterém je umístěna středová trubka, kterou je odváděn permeát. Pro zvýšení výtěžnosti permeátu se používá více stupňů, které jsou řazeny za sebe. Tím však klesá kvalita permeátu. Pro zlepšení kvality a produkce je možné zařadit mezi jednotlivé stupně zvyšovací čerpadlo. [2; 4]



Obrázek 9 Schéma reverzní osmózy; upraveno dle [2]

Reverzní osmózou lze odstranit více než 95 % rozpuštěných solí. Co však neodstraní jsou plynné součásti roztoku. Navíc je potřeba řešit zabránění nárůstu mikrobiálních nánosů v RO, které poškozují membránu. To se děje zejména pomocí UV lampy, která je na vstupu RO, nebo pomocí dávkování chemikálií, například chlornanu. Výťažnost permeátu je závislá na kvalitě vstupní vody, proto je potřeba dbát na kvalitu předúpravy. Dále závisí na pracovním tlaku a teplotě, která má výrazný příspěvek, protože s narůstající teplotou klesá viskozita a narůstá jednotkový průtok membránou. S novými moderními membránami není problém dosáhnout dostatečného množství a kvality permeátu i při tlacích pod 1 MPa. Důležitou ochranou membrán je použití filtrů před reverzní osmózou. Většinou se používají jemné filtry 2–5  $\mu\text{m}$ , které je potřeba v pravidelných intervalech měnit za nové. Kvalita upravené vody se pohybuje většinou v rozmezí od 2,0 do 10  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , proto je potřeba vodu dočistit směsnými filtry nebo elektrodeionizací. [4]

Pro správný a dlouhý chod RO je důležité zvolit vhodnou předúpravu. Ta závisí na kvalitě vody a obsažených látkách. Pro membránu RO je problém obsah železa, protože může uvnitř membrány tvořit krystaly a ty poškozují póry, které poté propouští soli. Proto u vstupní vody s velkým obsahem železa se doporučuje použít odželeznění. [12]

#### 2.4 Směsné filtry (mix-bed)

Směsné filtry slouží k dočištění demineralizované vody z ionexů nebo z reverzní osmózy. Tyto filtry se skládají jak z anexu, tak i z katexu. Po průchodu vody směsným filtrem je výstupní voda zbavena všech iontů (tzv. ultračistá voda) a může se použít k doplňování chladicích okruhů. Pro demineralizaci se zásadně používá silně kyselý katex a silně bazický anex. [2]

Regenerace probíhá tak, že se nejprve provede rozplavení demineralizovanou vodou, která rozdělí anex do horního prostoru a katex do spodního prostoru mix-bedu. Poté se anex regeneruje shora dolů NaOH a katex se regeneruje odspodu nahoru kyselinou HCl nebo H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Po vytěsnění se vzduchem se obě vrstvy zamíchají a filtr se vymyje na požadovanou kvalitu demineralizované vody. [4]

#### 2.5 Elektrodeionizace (EDI)

Elektrodeionizace se používá jako náhrada mixbedu a slouží k dočištění vody po demineralizaci nebo z RO. Skládá se z elektrodialýzy a ionexů, které se nachází v jednom zařízení. Pro separaci iontu je použit stejnosměrný elektrický proud. Hlavní výhodou je, že se proces nemusí přerušovat kvůli zanášení, jako tomu je u mixbedu kvůli regeneraci a spotřeba elektřiny je poměrně nízká. [13]

## 2.6 Změkčování a dekarbonizace

Změkčování vody z pískových filtrů se provádí pomocí ionexových filtrů, které odstraní ionty  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$ . Tyto ionty se vyměňují za  $\text{H}^+$  v silně kyselém katexu, který je regenerován 5–10% roztokem  $\text{NaCl}$ . Regenerace se provádí většinou sou proudě, protože protiproudá regenerace je komplikovanější v menších provozech a použití je hlavně pro velmi tvrdé vody. [2; 4]

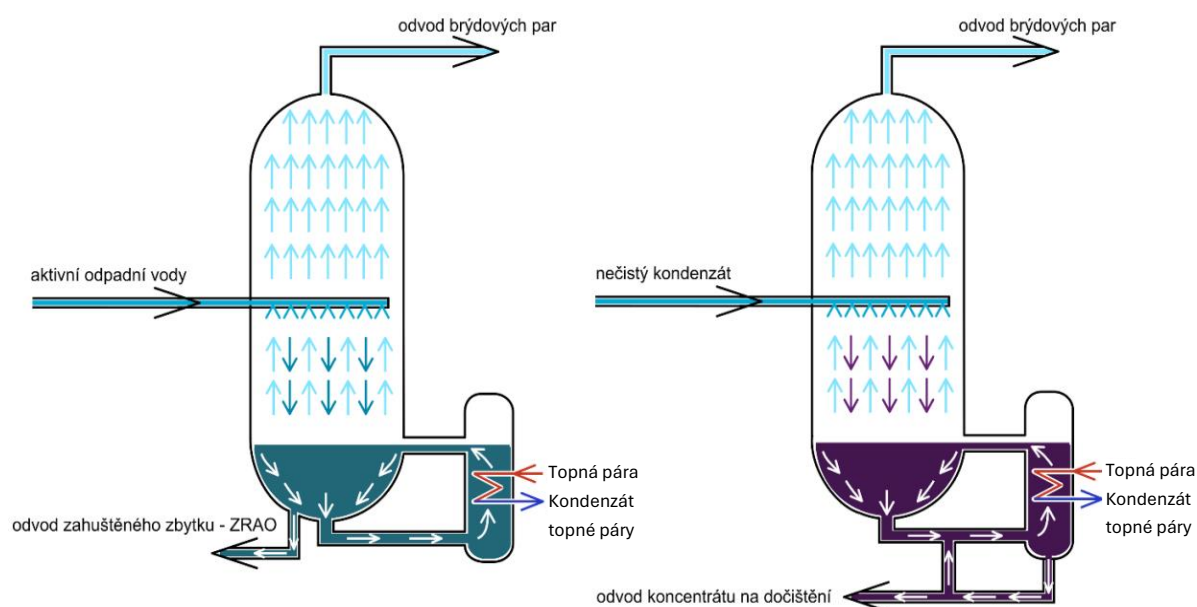
Dekarbonizaci je nutné použít, pokud je hodnota alkality vody příliš vysoká a zároveň je vysoký obsah  $\text{HCO}_3^-$  iontů v surové vodě. Použití slabě kyselého katexu v  $\text{H}^+$  formě se nazývá kyselá dekarbonizace. Proces kyselé dekarbonizace se řadí před změkčování. Výhody jsou velká kapacita kyselého katexu a snížení solnosti. Nevýhodou je nutnost použití antikoročních materiálů. Další možností je neutrální dekarbonizace, která se v minulosti velmi často používala. Proces neutrální dekarbonizace využívá silně bazický anex v  $\text{Cl}^-$  formě. Zde naopak můžeme použít materiály z uhlíkaté oceli, a navíc je odpadní voda neagresivní. Nevýhodou je menší kapacita a vysoké náklady. [4; 14]

## 2.7 Ostatní techniky úpravy vody

V této části budou popsány metody odsolování a využití magnetické filtrace.

### 2.7.1 Destilace

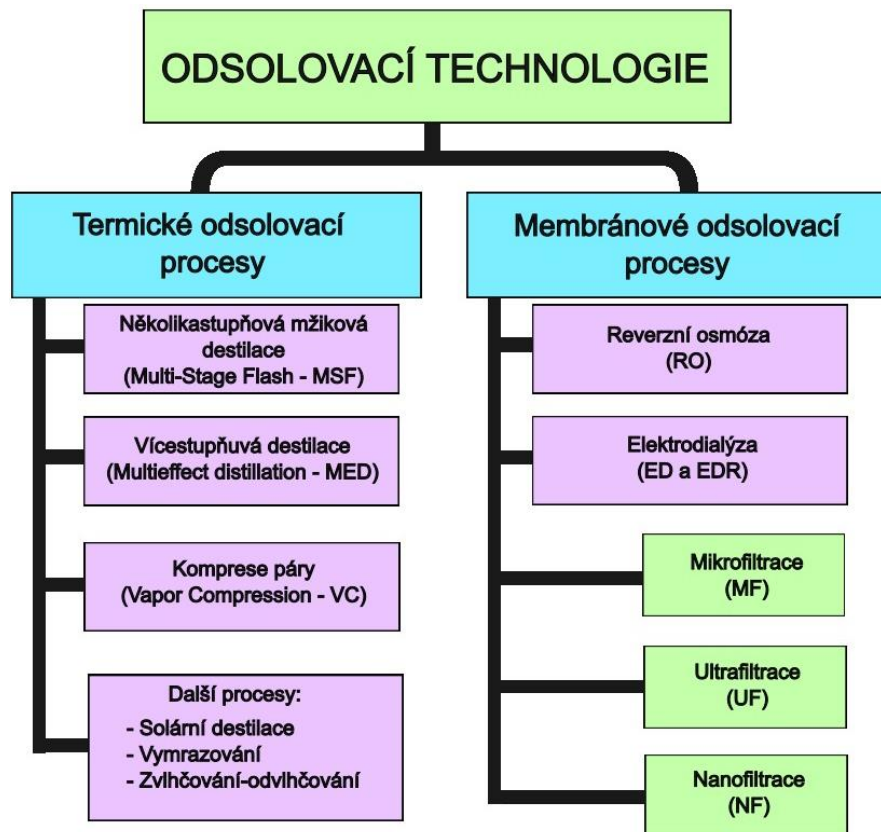
Tato separační metoda funguje na principu oddělení kapalných látek pomocí rozdílné teploty varu. Voda se převede varem do plynné fáze a poté se nechá zkondenzovat zpět do kapalného skupenství zbavena nečistot. Nevýhodou je, že k uvedení kapaliny do varu je potřeba velké množství energie. Zejména se destilace využívá pro odsolování, kde je historicky nejpoužívanější metodou. Dále se destilace využívá na odparkách SVO, což jsou čistící stanice odpadních vod z I.O. [11]



Obrázek 10 Odparka JE Temelín na SVO 3 (vlevo) a SVO 6 (vpravo) [11]

### 2.7.2 Odsolování

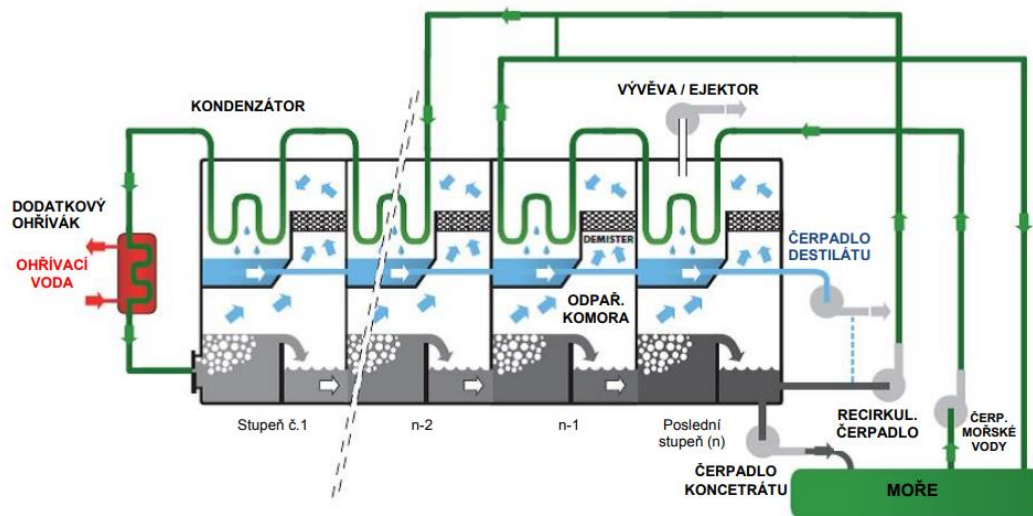
Odsolování bude v budoucnosti velmi důležitým tématem z důvodů nedostatku podzemní vody. Proto je potřeba se zaměřit na technologie, které nám umožní mořskou vodu přetransformovat na vodu, kterou můžeme využít v elektrárnách, popřípadě pro jiné účely. Obrázek 11 zobrazuje některé metody odsolování.



Obrázek 11 Schéma rozdělení odsolovacích technologií; upraveno dle [33]

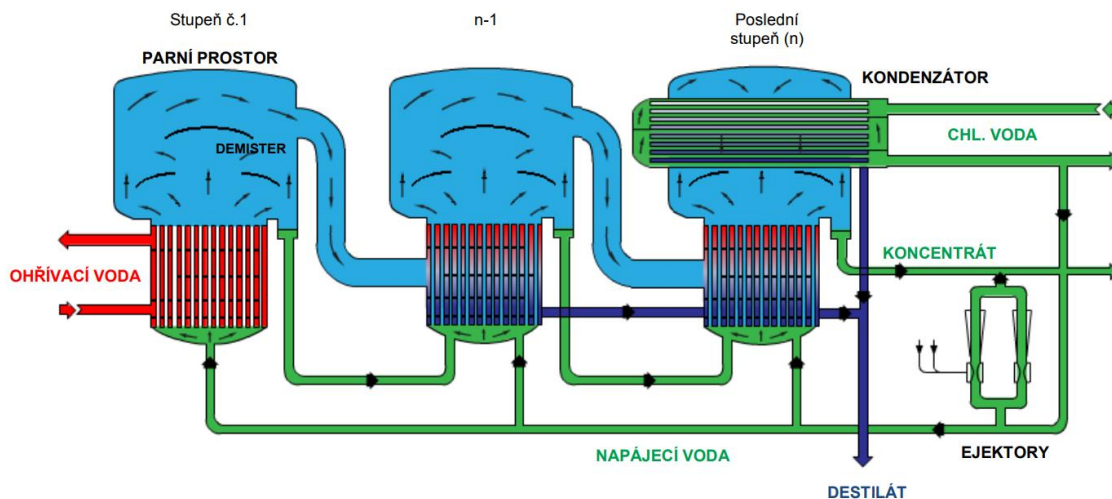
Také existují hybridní metody, které kombinují tepelné procesy a membránové procesy. V použití se však převážně využívá reverzní osmózy, která je v současné době velmi populární. Další metody jsou na principu tepelného procesu. Ostatní metody se nepoužívají, popřípadě jsou stále ve vývoji nebo je jejich použití omezené. Tepelné procesy na principu destilace se využívají zejména dva. Prvním je několikastupňová mžiková destilace MSF.

**MSF – několikastupňová mžiková destilace** má alespoň dva stupně, ale čím více stupňů má, tím se zvyšuje její účinnost, kapacita a snižují se náklady na provoz. Jednotlivé stupně obsahují odpařovací komoru, kondenzátor a odlučovač kapek. MSF funguje na principu okamžitého odpaření vody za podtlaku, což se provede tak, že se přivede přehřátá kapalina do komory s nižším tlakem, než je tlak odpovídající bodu varu kapaliny, což vede k okamžitému odpaření části kapaliny. [15]



Obrázek 12 Schéma jednotky MSF s recirkulací koncentrátu [15]

**MED – vícestupňové odpařování** je druhým tepelným procesem, který používá vícestupňové odpařování a funguje na principu varu vody v trubkách výměníků za podtlaku. Tato zařízení jsou označována jako odparky. Opět platí, že čím více stupňů zařízení má, tím je lepší účinnost, větší kapacita a sníží se provozní náklady. Každý stupeň zařízení obsahuje výměník tepla (tzv. vařák), ve kterém probíhá var. Dále je vybaven odlučovačem kapek a kondenzátorem, který se nachází na posledním stupni. [15]



Obrázek 13 Schéma jednotky ME (3 stupně) [15]

### 2.7.3 Úprava vody s využitím magnetismu

Úprava magnetismem není zatím zcela popsána. Pro některé specifické vlastnosti vody můžeme volit tuto úpravu, kdy silným magnetickým polem z elektromagnetů necháme procházet vodu, a tím můžeme změnit krystalickou strukturu a ovlivňujeme aktivační energii tvorby krystalických center, což pomáhá snížit nánosy na stěnách zařízení a také dojde k redukci tvorby tvrdých nánosů. Problémem je maximální obsah Fe, solnost, voda nesmí obsahovat koloidní látky a suspendované částice. Tato úprava vody je vhodná spíše pro chladicí okruh, popřípadě jako ochrana horkovodního systému, zejména kvůli omezení tvorby tvrdých

nánosů. Dále se zkoušelo experimentální použití této metody v sekundárním okruhu JE, kde byl elektromagnetický filtr nainstalován za kondenzátor a prokázala se účinnost filtru nad 90 %. Pro primární okruh a další aplikace je nutné na této metodě pracovat a ověřit její účinnost, investiční a provozní nároky. [16; 17]

Ve studii, kde se zabývali odstraňováním oxidu železitého z napájecí vody, která prochází vysokoteplotní částí tepelné elektrárny, byla použita vysokoteplotní magnetická separace. Solenoidový supravodivý magnet, který generuje magnetické pole o velikosti 2 T, umožnil účinnou separaci okují. V budoucnu se plánují další experimenty a zkoumání magnetické separace. [18]

#### 2.7.4 Biologická filtrace

Tato metoda využívá k čištění mikroorganismy, které umí odstranit znečišťující látky ve vodě. Je potřeba, aby čištěná voda obsahovala dostatečné množství vzduchu, což se provádí pomocí míchání a provzdušňování. Díky tomu budou mít mikroorganismy vhodné podmínky k rozmnožování a čištění. Biologické filtrace se využívá především na čističkách odpadních vod. [11]

### 2.8 Odplynění

Cílem odplynění je odstranit kyslík a oxid uhličitý z vody, aby se zabránilo korozi na zařízeních. Dělí se na fyzikální a chemické odplynění. Pro fyzikální odplynění je nutné docílit toho, aby se parciální tlak odstraňovaného plynu zmenšil na nulu a udržela se atmosféra čisté páry, takže je odplyňovaná voda ohřata na teplotu blízkou varu při daném tlaku [4]. Jeden z mechanismů odloučení plynů je tvorba bublin, kdy se voda přivede k varu a dochází k uvolnění 90–95 % plynů [16]. Druhým mechanismem je difuze, která probíhá přes obalovou blanku kapek vody a rychlost závisí na poloměru těchto kapek [4]. Difuzí lze odstranit zbývající plyny.

**Desorpce** spočívá v použití jiného plynu, než který odstraňujeme, k náhradě atmosféry nad vodou. Jako náhradní plyn v parovodním okruhu je vhodné použít dusík a desorpce se používá v provzdušňovacích věžích pro odvod CO<sub>2</sub> po dekarbonizaci. Kvůli vyšším nákladům se desorpce v parovodním cyklu nevyužívá. [16]

**Vakuové odplynění** spočívá ve snížení tlaku na úroveň odpovídající tlaku při bodu varu. Voda se nejprve ohřeje nad teplotu sytosti a po rozstříku dojde k expanzi a zároveň voda vře. Během expanze se uvolňují plyny, ale je nutné mít zařízení dokonale těsné a zároveň je potřeba použití vývěvy. Vakuové odplyňování najdeme v kondenzátorech, jako odplyňovačky s hlubokým vakuem 1–10 kPa. [16]

**Membránové odplynění** spočívá v odstranění plynů pomocí mikroporézní membrány z dutých vláken. Pletené duté vlákno je uspořádáno do řady a omotáno kolem centrální trubky uvnitř pouzdra. Během provozu voda teče po vnější straně dutých vláken, zatímco na jejich vnitřní straně se vytváří vakuum, nebo se používá stripovací plyn, popřípadě je možné využít obojí. Membrána je hydrofobní, takže při kontaktu s plynem a vodou nedochází k disperzi. Vyšší tlak umožňuje, aby rozpuštěný plyn ve vodě procházel skrze póry membrány. Plyn je následně odstraňován pomocí vakuové pumpy či hnacího plynu. [19]

Membránové odplynění se stává populárním z hlediska nákladů. Osvědčilo se použití dvou stupňů, kdy první stupeň sníží obsah kyslíku na 100 μg·l<sup>-1</sup> a druhý stupeň poté může dosáhnout obsahu kyslíku pod 1 μg·l<sup>-1</sup>. [4]

**Odplyňovač CO<sub>2</sub>** se využívá zejména pro iontovou výměnu, kdy při jeho použití mezi katexem a anexem se zvyšuje kapacita a prodlužuje životnost anexových filtrů. [20]

**Termické odplynění** je velmi rozšířené a spočívá v ohřátí vody na teplotu bodu varu, kdy se pohlcené plyny začínají uvolňovat. Termické odplynění sekundárního okruhu se provádí v napájecí nádrži. V primárním okruhu se k odplynění využívá systém doplňování a bórová

regulace [11]. Tlak je vyšší než atmosférický, proto není kladeno tak přísných požadavků na těsnost, protože netěsnosti nepřisávají vnější vzduch a nedochází ke zpětnému pohlcování plynů [16].

Voda je rozstříkována tak, aby tvořila kapičky s co největším povrchem. Dále může být použito vhodných vestaveb, které vodu roztříští. Pro odplynění je obvykle použita vlastní pára, v horkovodním okruhu se může použít externí pára nebo horká voda. Nevýhodou je velká spotřeba vody. [4]

**Chemické odplynění** spočívá v odstranění zbytkového kyslíku a následuje po termickém odplynění nebo v horkovodních okruzích, kde není použito termické odplynění. Pro odplynění, které následuje po termickém odplynění v parovodních okruzích, je používán siřičitan sodný, který se dávkuje do napájecí nádrže [16]. Dochází k reakci: [4]



Pro navázání 1 mg  $O_2$  je potřeba 7,9 mg  $Na_2SO_3$ . Kvůli velké spotřebě se nepoužívá, pokud je obsah kyslíku ve vodě vysoký, což platí například pro vodu, která nebyla termicky odplyněna. Pro vysoké tlaky se využívá místo siřičitanu hydrazin, který způsobuje reakci: [4]



V případě použití hydrazinu je na 1 mg  $O_2$  potřeba 1 mg  $N_2H_4$ . Navíc jeho použití představuje řadu výhod, například nezvyšuje obsah solí v napájecí vodě, reakcí vzniká neškodný dusík, působí jako inhibitor koroze tvorbou magnetitu a redukcí  $CuO$  vzniká méně rozpustný  $Cu_2O$ . Většinou je hydrazin dávkován do výtlaků kondenzátních čerpadel. Při teplotách nad  $270\text{ }^\circ\text{C}$  se rozkládá na amoniak. [4; 16]

## 2.9 Alkalizace

Kvůli zabránění koroze materiálů se voda alkalizuje, a tím se zvyšuje pH vody. Tato úprava se provádí především dávkování amoniaku, hydrazinu nebo těkavých aminů, ale volba alkalizačního prostředku závisí na aplikaci. Důležitým bodem je místo aplikace, které se volí tak, aby byl daný okruh ochráněn co nejvíce. Amoniak se používá pro reaktory VVER a dávkuje se do napájecí vody za odplynění v primárním okruhu, nebo do kondenzátu. Těkavé alkalizační aminy se například používají u PWR reaktorů a dále jsou používány filmotvorné aminy, které vytvářejí na povrchu kovů nesmáčivý film, který slouží jako ochrana před korozí a usazeninami. Také dokážou rozpustit již usazené nánosy. [4; 16]

## 2.10 Dezinfekce

Dezinfekce se provádí za účelem zlikvidování mikrobiologických složek. Můžeme využít dezinfekci fyzikální, např. UV filtrací, nebo se používá chemické dezinfekce, např. chlórem.

**UV filtrace** používá ultrafialové záření, které dokáže zničit bakterie, viry a jiné mikroorganismy nacházející se ve vodě. Vlnová délka záření, kterému je voda vystavena, je 254 nm. Záření projde přes buněčnou stěnu mikroorganismů a ničí jejich DNA. Skládá se z UV lampy, která produkuje ultrafialové záření. Dále se skládá z reaktorové komory, kterou proudí voda a je vystavována UV záření z lampy. Komora je navrhovaná tak, aby zajistila co nejdelší dobu expozice záření a dosáhla efektivní dezinfekce. [21]



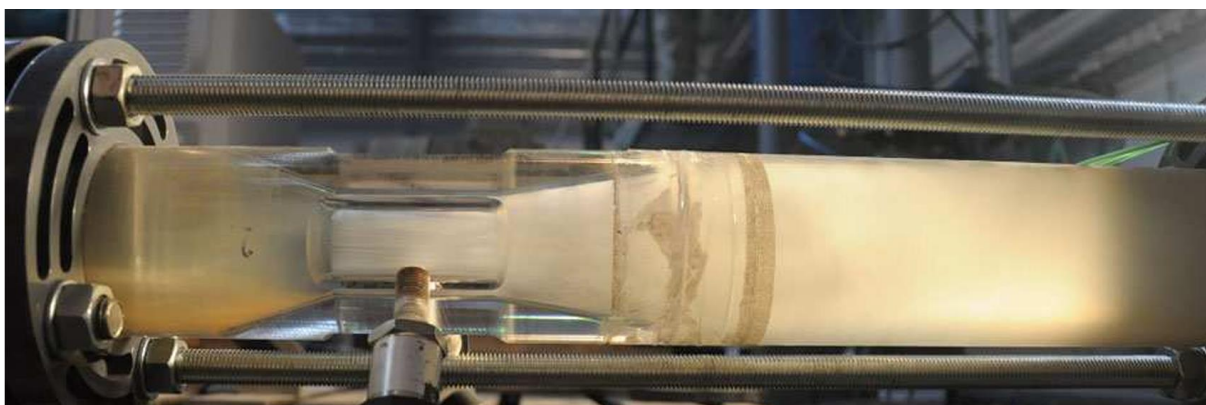
Obrázek 14 UV filtrace v JE Temelín na vstupu do RO

**Termická dezinfekce** spočívá v zahřátí vody na teplotu, která je pro odstraňované organismy smrtelná. Tato teplota se poté udržuje 20 minut. Termická dezinfekce se využívá zejména pro likvidaci bakterie legionelly, která má nejlepší podmínky při 20 až 45 °C. Teploty vody přesahující 80 °C jsou pro legionellu smrtící. [22]

**Dezinfekce ozonem** spočívá v generování ozonu, což je tříatomový kyslík, který je nestabilní a ve vodě se rozpadá na atomární kyslík, který má velmi dobrou schopnost zabíjení bakterií ve vodě, a na molekuly kyslíku [22]. Ozon se generuje UV zářením, vysokým výbojem v atmosféře čistého kyslíku s využitím generátoru ozonu nebo pomocí elektrolýzy vody [22]. Většinou se dezinfekce ozonem používá jako alternativa k chloraci, protože neprodukuje vedlejší nebezpečné látky [21].

**Dezinfekce chlorem** neboli chlorace je velmi používanou metodou, zejména díky své nízké ceně. Většinou se používá chlornan sodný NaClO. Dávkování chloru je velmi dobře monitorováno, protože při překročení bezpečné hodnoty může poškodit potrubí a zařízení. Dále je možné použít chlordioxid, který má oproti chloru lepší dezinfekční kapacitu a také může být použit i pro vyšší pH. Dále má lepší rozpustnost a také tvoří daleko méně halogenovaných organických látek. Dezinfekce chlordioxidem se používá v úpravě vody pro chladicí věže a je vhodná proti biofilmům. [22]

**Dezinfekce hydrodynamickou kavitací** je novou technologií dezinfekce vody, která dokáže vyčistit vodu od mikroorganismů. Kavitační je zajišťována pomocí kavitační trysky. Díky snížení tlaku dochází ve vodě ke generaci bublinek páry, které kolabují a způsobují



Obrázek 15 Kavitační tryska [23]

tlakové vlny, které ničí organismy. Tato úprava vody může v budoucnu nahradit dnešní používané technologie pro dezinfekci vody. [23]

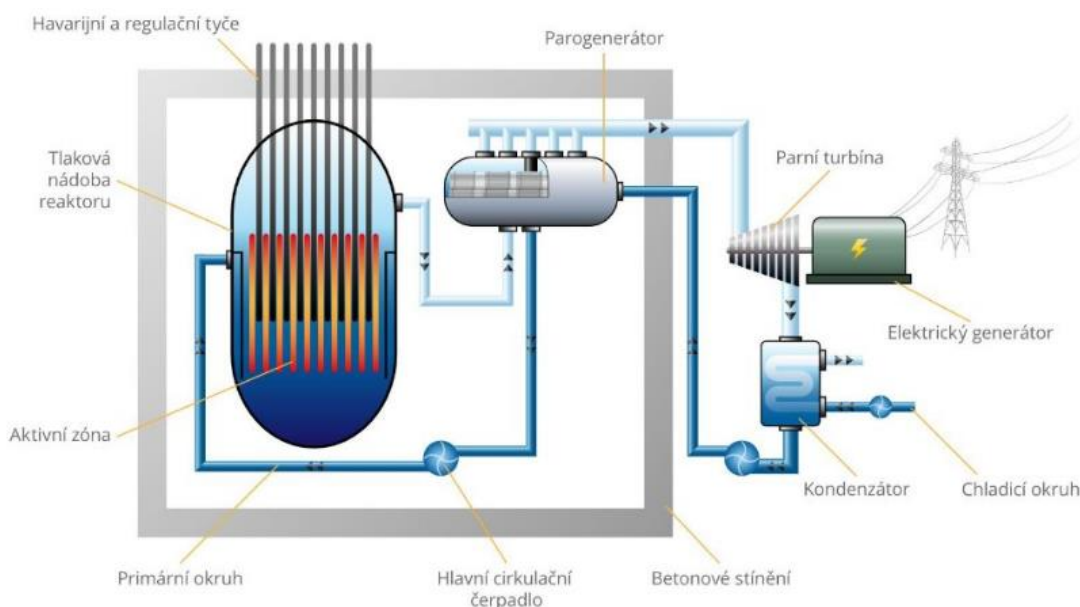
**Dezinfekce ultrazvukem** využívá ultrazvukové vlny ke generování kavitace. Výhodou je, že se nemusí dávkovat žádné chemikálie, ale s rostoucím množstvím také roste příkon zařízení. [24]

### 3 Chemický režim

Pro každý typ jaderného reaktoru jsou odlišné nároky na úpravu vody a liší se zejména v dávkování chemikálií. Tato kapitola představí jednotlivé typy reaktorů, které používají jako moderátor a chladivo vodu a popíše jejich chemický režim. Ve světě se nachází současně šest typů jaderných reaktorů, které jsou komerčně využívány a z toho 3 reaktory používají vodu jako moderátor i jako chladivo. Úkolem chemického režimu je snížit radiaci v primárním okruhu a zajistit integritu okruhů. [25]

#### 3.1 Tlakovodní reaktor – PWR (VVER)

Tento typ reaktoru využívá jako médium vodu. Je to nejrozšířenější typ reaktoru. Voda v primárním okruhu proudí s vysokou teplotou a tlakem, kdy vstupuje do parogenerátoru a ohřívá vodu v sekundárním okruhu, která putuje do turbíny a následně do kondenzátoru, kde je ochlazená chladicí vodou terciálního okruhu. Reaktory západní koncepce PWR se liší od ruských VVER hlavně použitými materiály v rozhodujících částech, a tím se odlišují v chemickém režimu, zejména u primárního okruhu. [4; 25]



Obrázek 16 Schéma tlakovodního reaktoru PWR [25]

##### 3.1.1 Úprava vody

Voda v primárním a sekundárním okruhu se používá demineralizovaná, zbavená všech nečistot. Využívá se nejčastěji předúpravy pomocí čirících reaktorů a pískových filtrů. Pro demineralizaci se využívá reverzní osmózy nebo ionexových filtrů a dočištění se provádí směsnými filtry. Také je potřeba vodu odplynit a upravit ji tak, aby se zabránilo korozi a tvorbě nánosů. V obou okruzích probíhá kontinuální čištění média pomocí ionexů a filtrů, které odstraňují z vody nežádoucí látky.

##### 3.1.2 Dávkování chemikálií a kontinuální čištění

**Primární okruh** je nejvíce namáhán na částech, kde dochází k přestupu tepla. Těmito místy jsou tyče jaderného paliva reaktoru a potrubí v parogenerátoru. K řízení primárního okruhu je používána kyselina boritá, která díky jejímu obsahu ve vodě řídí reaktivitu aktivní zóny. Protože kyselina boritá snižuje pH, tak se musí dávkovat u PWR hydroxid lithný LiOH, který vodu alkalizuje, a tím snižuje rozpustnost kovů a jejich oxidů. Dále vytváří tenký film, který slouží jako ochranná vrstva. Hodnota pH se pohybuje v závislosti na materiálech, ale

optimální pH u PWR by mělo být mezi 6,9 a 7,4 při 300 °C. U VVER je místo LiOH dávkován hydroxid draselný KOH. Optimální pH závisí na typu reaktoru a provozní teplotě, ale hodnoty se většinou pohybují mezi 7,1 a 7,3. Řízení redukčního prostředí se provádí přítomností vodíku v okruhu. Vodík pomáhá s omezením radiolýzy vody a nastavuje redukční podmínky pro minimalizaci koroze. Hodnota koncentrace vodíku je závislá na teplotě a typu reaktoru. Pro VVER se dávkuje do přídavné vody amoniak, který se rozkládá na vodík a dusík. Místo amoniaku lze dávkovat hydrazin, který se rozkládá na amoniak, vodík a dusík. [4; 26]

Výhodou hydrazinu je, že na sebe váže kyslík a toho se využívá zejména po odstávce, kdy byl primární okruh otevřen a při jeho najíždění je potřeba odstranit velké množství kyslíku [2]. Vodík se u PWR dávkuje přímo a výhoda je v absenci amoniaku, který způsobuje problémy s provozem ionexů a s radioaktivními odpady [4]. Pro PWR se může dávkovat zinek, který snižuje korozi u některých materiálů, např. pro slitiny niklu (Inconel 600), které se používají jako trubky parogenerátoru [4]. Další vlastností zinku je, že nahrazuje v krystalové mřížce ochranné vrstvy dvojmocné kovy, a tím zabraňuje vzrůstu aktivity vody [4].

Systémy kontinuálního čištění a čistící zařízení v primárním okruhu jsou důležité pro udržení provozu elektrárny. Používá se několik ionexových čistících stanic. Před vstupem do ionexových filtrů je použito předfiltrů s malou porozitou (např. 0,2  $\mu\text{m}$ ) a jsou doplněny mikrofiltry s porozitou cca 25  $\mu\text{m}$ . Ty mají za úkol zabránit úniku ionexů. Nevýhodou těchto filtrů je, že při změně teploty dochází k uvolňování zachycených látek. Dále se může jako mechanická filtrace použít titanová drť, která má výhodu v tom, že nemá teplotní omezení a nemusí se filtrované médium chladit. Ionexové filtry mají teplotní omezení a při jejich regeneraci nemůže být použito HCl, protože by mohlo dojít k úniku chloridů do okruhu. K regeneraci se proto využívá kyselina dusičná ( $\text{HNO}_3$ ), popřípadě se používá ionexů na jedno použití. Čištění kyseliny borité v primárním okruhu se provádí na odparce, ze které dostáváme kondenzát, který se odplynuje a poté se upravuje směsnými filtry, popřípadě odděleně katexy a anexy. Upravený kondenzát se vrací zpět do okruhu. [4]

**Sekundární okruh** v jaderných elektrárnách je namáhán méně oproti fosilním elektrárnám, protože parametry jsou nižší. Jaderné elektrárny vyrábějí sytou páru (případně mírně přehřátou) s parametry cca 6 MPa a 250 °C. Opět je cílem předejít korozi, zejména v parogenerátoru, a to se dosahuje správnými materiály, které se v podmínkách sekundárního okruhu nacházejí stabilněji ve formě oxidů než kovů. Tím vzniká na povrchu kovů tenká vrstva jejich oxidů, která snižuje reakční rychlost rozpouštění kovů. Nevýhodou je, že při plošné nestabilitě vrstvy dojde k celkové korozi materiálu a při lokálním porušení vrstvy nastane bodová nebo také důlková koroze. Dále může mechanické namáhání způsobovat korozi pod napětím. [4]

Voda v sekundárním okruhu se vyskytuje ve dvou skupenství a je nadávkována korekčními chemikáliemi, aby se dosáhlo optimálního chemického režimu. V sekundárním okruhu se musí vyřešit fázová změna média, která způsobuje problémy s nánosy, jelikož soli přechází do páry. Dále je potřeba brát ohled na netěsnost parogenerátoru a kondenzátoru, kdy může cizí voda pronikat do okruhu. Také je zde použito mnoho konstrukčních materiálů, což způsobuje rozdílné požadavky. Co se týče parametrů teploty a tlaku, tak ty se v okruhu značně mění, což mění vlastnosti přidávaných chemikálií. [26]

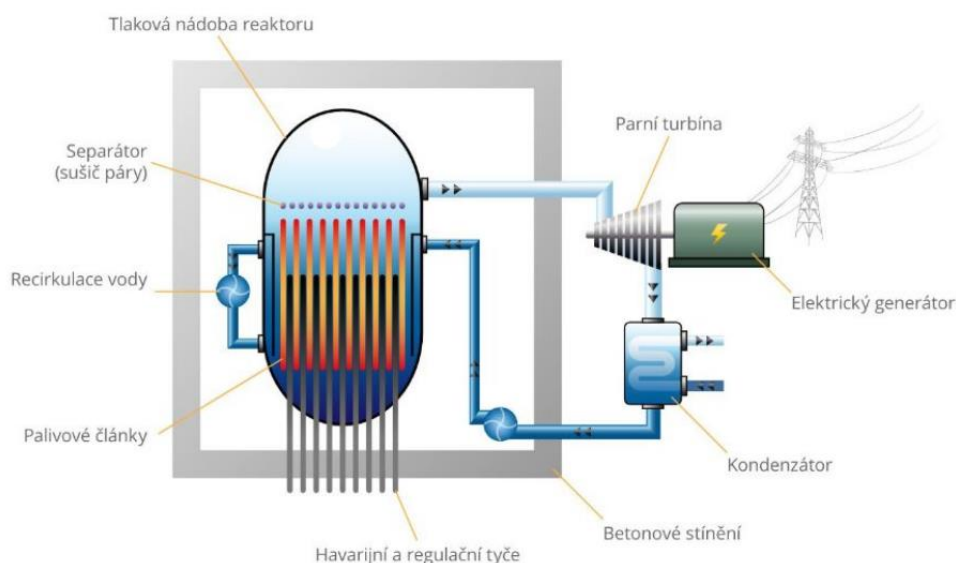
Přídavná demineralizovaná voda se přivádí do kondenzátoru, kde se odplyní s kondenzátem. Co se týče dávkování chemikálií, tak je potřeba zvyšovat pH alkalizací. To se provádí zejména dávkováním amoniaku a těkavými aminy. Pokud je v okruhu použita měď, tak je nezbytné udržovat pH maximálně 9,3, ale u nových realizací se měď nepoužívá a ve stávajících zařízení je často vyměňována. [4]

Existuje několik chemických režimů, které mají svoje specifické vlastnosti, výhody a nevýhody například kyslíkový režim, bazický režim a hydrazinový režim. Díky dávkování

hydrazinu se odstraňuje kyslík, čímž je dosaženo bezkyslíkatého prostředí a také se udržuje pH zásadité. Dále se mohou dávkovat chemikálie, které podporují chemický režim a snižují korozi. Proti štěrbinové korozi mezi trubičkami teplosměnných ploch parogenerátoru se dávkuje do okruhu hydroxid lithný LiOH. [4; 26]

### 3.2 Varný reaktor – BWR

Druhým nejrozšířenějším řešením jaderného reaktoru je typ BWR, kdy moderátorem i chladivem je voda. V tlakové nádobě se přímo generuje pára, která se posílá na turbínu a poté do kondenzátoru. Ve srovnání s PWR reaktory je vypuštěn sekundární okruh, takže reaktory jsou jen jednookruhové. [25]



Obrázek 17 Schéma varného reaktoru BWR [25]

#### 3.2.1 Úprava vody BWR

Reaktory typu BWR používají vysoce čistou vodu, která funguje jako moderátor a primární chladivo v produkci páry. Úprava vody je proto dost podobná jako u PWR reaktorů a používá se ionexových filtrů a filtračních procesů. V okruhu probíhá kontinuální čištění vody a doplňují se ztráty napájecí vodou.

#### 3.2.2 Dávkování chemikálií BWR

Úkolem chemického režimu je opět zamezit korozi materiálů v okruhu, omezit tvorbu nánosů a minimalizovat aktivitu. Pro ochranu systému se používá standardní vodíková chemie (HWC – Hydrogen water chemistry). Přidávání  $H_2$  a  $O_2$  se provádí za účelem zabránění koroze. Rychlost koroze lze kontrolovat udržováním kyslíku v chladivu. Vstřikování vodíku do systému napájecí vody podporuje vytváření molekul vody z plynů  $H_2$  a  $O_2$  vytvořených radiolytickým rozkladem vody. Pokud tedy vzniká více vody, je méně kyslíku v systému a prostředí je tak méně korozivní. Přebytek vodíku, který byl do systému vstřikován, opouští nádobu reaktoru v podobě páry. To vytváří vyšší úroveň radiace hlavního parovodu a nadbytečný vodík musí být neutralizován, aby se zabránilo vysokým koncentracím v systému vypouštění plynů. Kyslík je vstřikován do systému odpadních plynů před rekombinátory. Tím se znovu vyváží  $H_2$  a  $O_2$ , což umožňuje, aby tyto plyny byly rekombinovány na  $H_2O$  pomocí rekombinátorů odpadních plynů. Protože se obsah kyslíku v páře snížil, je nutné přidávat malé množství kyslíku do kondenzačního systému. [27; 28]

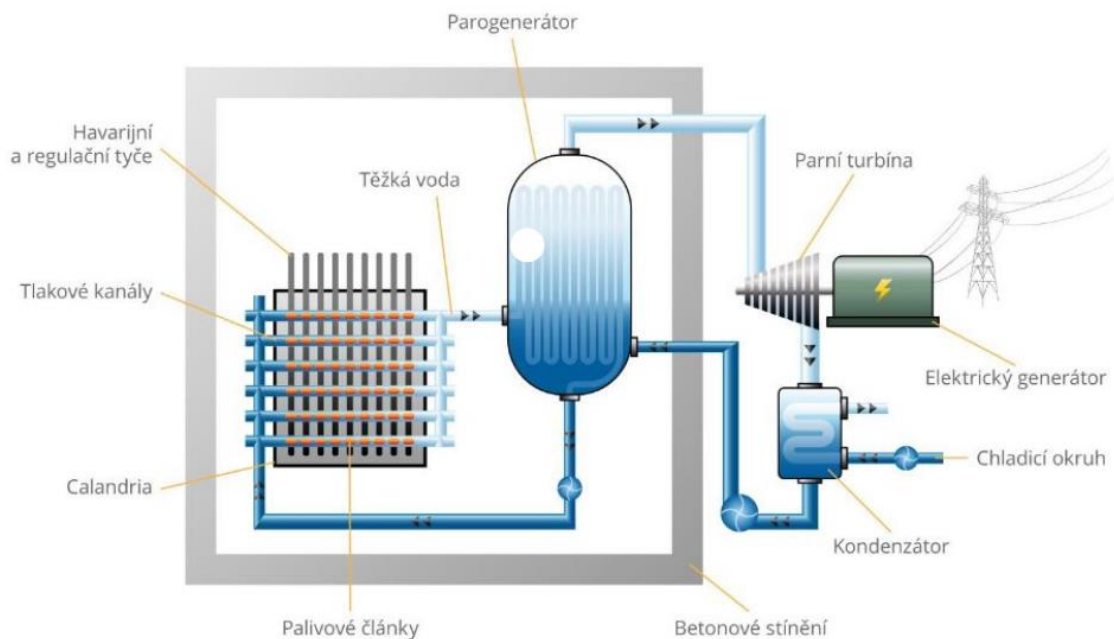
Do systému napájecí vody lze vstřikovat zinek, který nahradí ionty kobaltu (Co-60) v korozní vrstvě. Vstřikované ionty zinku soutěží s ionty kobaltu o reakční místa na korozní

vrstvě. Kobalt tak zůstává v roztoku delší dobu, protože se neukládá na korozní vrstvě. S menším množstvím kobaltu v korozní vrstvě je nižší úroveň radiace na potrubí primárního chladiva. [28]

Vstřikování vodíku do systému napájecí vody zvyšuje úroveň aktivity v parním potrubí. Čím nižší je vstřikování vodíku, tím nižší je úroveň radiace. Pokovení vnitřních částí primárního systému ušlechtilými kovy (například platina nebo palladium) umožňuje použít menší dávku vodíku bez vlivu na rychlost koroze. Při použití procesu s ušlechtilými kovy dochází k významným úsporám dávek v průběhu provozního cyklu. Ušlechtilé kovy se obvykle aplikovali při horké a odstavené elektrárně, ale tento postup byl změněn tak, aby bylo možné aplikovat ušlechtilé kovy i při provozu zařízení. Aby bylo možné tento proces provádět on-line, musí být instalován monitor, který odebírá vzorky chladicí kapaliny reaktoru, což umožní určit hladinu vzácných kovů. Průtok ušlechtilých kovů se upravuje tak, aby se zajistilo optimální rozložení na povrchu primárního chladiva. [27; 28]

### 3.3 Těžkovodní reaktor PHWR (CANDU)

Třetím nejčastějším typem reaktoru je PHWR, který používá jako moderátor a chladivo těžkou vodu  $D_2O$  (oxid deuteria). Oproti reaktorům s lehkou vodou, které musí používat jako palivo obohacený uran, se u těžké vody nemusí palivo obohacovat a je možné použít přírodní uran. To je způsobeno tím, že deuterium má nízkou schopnost absorpce neutronů. [25]



Obrázek 18 Schéma těžkovodního reaktoru CANDU [25]

#### 3.3.1 Úprava vody PHWR

Pro výrobu těžké vody  $D_2O$  se využívá lehké vody  $H_2O$ . Způsob výroby může být pomocí elektrolýzy vody, kdy se využívá průchodu elektrického proudu vodou a dochází k chemickým změnám na elektrodách. Elektrolýza vody je nejstarší metodou při výrobě těžké vody a také je velmi nákladná na energii. Dalším postupem pro výrobu deuteria je destilace, kdy poměr vyrobené těžké vody je 1:6000, což je pro použití v elektrárnách nereálné. [29]

Současně se používají 2 metody. První z nich je výměnná reakce vody se sirovodíkem (GS proces). GS proces spočívá ve výměně vodíku a deuteria mezi vodou a sirovodíkem v sérii kolon. Tyto kolony jsou uspořádány tak, že jejich horní část je chladná a spodní část je horká.

Voda proudí shora dolů a plynný sirovodík proudí zdola nahoru. Deuterium se při nízkých teplotách absorbuje do vody a při vysokých teplotách se přenáší do sirovodíku. V prvním stupni kolon se obohacený plyn nebo voda odvádějí na rozhraní horké a studené sekce. Tento proces se opakuje v dalších kolonách. Na konci procesu je výsledkem voda s koncentrací deuteria 30 %, která je poté přepravena do destilační jednotky. Tam se vyrábí těžká voda reaktorové kvality, obsahující 99,75 % oxidu deuteria. [29]

Druhou současně používanou metodou je výměnná reakce amoniaku s vodíkem. Tento proces probíhá v přítomnosti katalyzátoru při kontaktu syntézního plynu s kapalným amoniakem. Syntézní plyn se přivádí do výměnných kolon a do amoniakového konvertoru. V kolonách plyn stoupá zespoda nahoru, zatímco kapalný amoniak klesá shora dolů. Deuterium se přemísťuje z vodíku v syntézním plynu do amoniaku, kde se hromadí. Poté se amoniak přesouvá do krakovacího zařízení na dno kolony, zatímco plyn směřuje k horní části konvertoru amoniaku. Proces pokračuje v dalších stupních, kde se deuterium dále koncentruje. Konečným krokem je destilace, při níž se vyrábí těžká voda. Kromě syntézního plynu může být zdrojem deuteria i obyčejná voda, která prochází výměnným procesem s amoniakem a vodíkem. [29]

### 3.3.2 Dávkování chemikálií PHWR

V **primárním okruhu** je mnoho materiálů, které mají odlišné vlastnosti. Cílem chemického režimu primárního okruhu je zamezení tvorby koroze, minimalizování tvorby úsad korozních produktů na palivu a řízení koncentrace aktivovaných korozních produktů. Toho se dosahuje dávkováním chemikálií, regulací pH a koncentrací deuteria. Hodnota pH v primárním okruhu se pohybuje v rozmezí 10,2 – 10,4. Jako první chemikálie se pravidelně dávkuje do okruhu hydroxid lithný LiOH, který zvyšuje pH. Pro snížení pH se aplikuje vypouštění přes čisticí stanici s ionexy. [30]

Dále se od primárního reaktoru požaduje řízení reaktoru a možnost jeho bezpečného odstavení. Řízení se provádí těžkou vodou, ale když je nadměrná reaktivita nebo se odstavuje reaktor, tak se do systému přidávají nízké koncentrace prvků, jako je bór nebo gadolinium. Konkrétně je tedy využíváno dusičnanu gadolinitého  $Gd(NO_3)_3$  a/nebo kyseliny borité  $H_3BO_3$ . Alternativou je použití oxidu boritého  $B_2O_3$ . Kyselina boritá se používá spíše při spouštění s velkým množstvím nového paliva. [30]

Díky neustále radiolýze v okruhu se těžká voda rozkládá na deuterium a kyslík. Aby se zabránilo akumulaci těchto plynů v okruhu, je potřeba je neustále odstraňovat systémy pro to určenými. Deuterium je odstraňováno v katalytických rekombinátorech. [30]

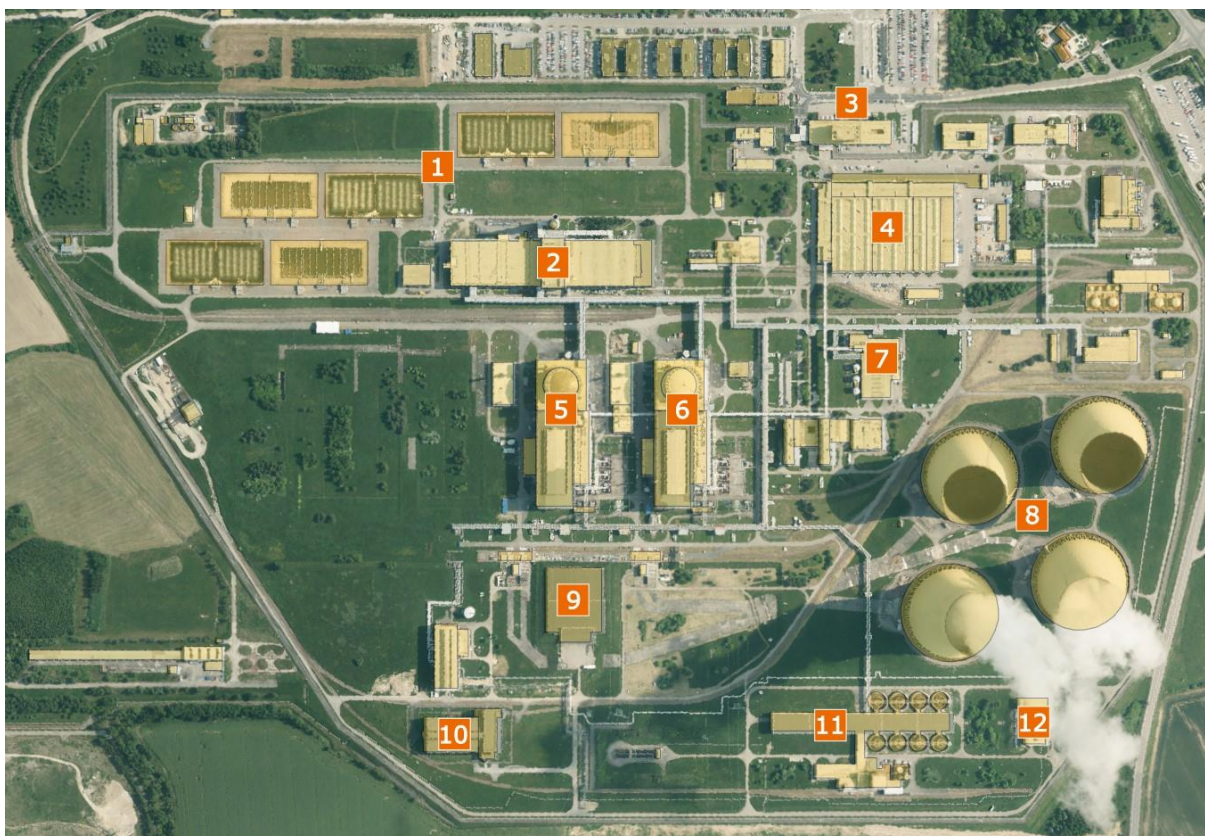
**Sekundární okruh** a jeho chemický režim má za úkol zabránit korozi materiálu. Podle použitých materiálů se dávkuje chemikálie a udržují se některé parametry. Pokud se v okruhu nevyskytuje měď, s pH se cílí k hodnotám 10, aby se podpořila tvorba pasivních oxidových vrstev a minimalizovala se koroze. Hodnotu pH ovlivňujeme dávkováním amoniaku nebo těkavých aminů. Pokud se v okruhu nachází měděné součásti, je třeba pH udržovat v rozmezí 9,2 - 9,4 a dávkování amoniaku omezit, popřípadě zcela vyloučit. K ochraně před praskáním slitin v parogenerátoru se dávkuje hydrazin. Pro ochranu celého sekundárního okruhu před korozi je využíváno těkavé činidlo, které vstupuje do fáze páry. Dříve se do napájecí vody používal fosforečnan sodný, který ale nebyl tak účinný a koncentroval se hlavně v parogenerátoru, kde způsoboval vysoce zásadité, nebo naopak vysoce kyselé podmínky. V současnosti je používáno dávkování hydrazinu a těkavé báze, jako je čpavek. Protože je však čpavek příliš těkavý, což může způsobit v parní fázi, že plochy zasažené vodou nebudou ochráněny, dávkuje se místo čpavku nebo v kombinaci s ním například morfolin, etanolamin nebo cyklohexylamin. Tyto chemikálie jsou méně těkavé, ale mají vyšší molekulovou hmotnost, což vede při vysokých teplotách k jejich rozkladu na látky, jako je například kyselina

octová. Proto musí být jejich koncentrace v plynné fázi omezena, aby nedocházelo ke korozi. [30]

Dále se do sekundárního okruhu mohou dostat různé látky netěsnostmi. Mezi tyto látky patří sodík, chloridy, sírany a další anorganické nečistoty. Tyto látky se koncentrují v parogenerátoru a odstraňují se průběžným vyfukováním, což způsobuje ztrátu malé části vody v okruhu. Sledování parametrů a odebírání vzorku z této vyfukované vody vypovídá o kvalitě a složení napájecí vody. [30]

## 4 Úprava vody na JE Temelín

JE Temelín je největší jadernou elektrárnou na území ČR. Nachází se v Jihočeském kraji, poblíž Týna nad Vltavou, a její výstavba začala v roce 1987. Elektrárna je vybavena dvěma tlakovodními reaktory typu VVER 1000, které byly uvedeny do provozu v letech 2000 a 2003. Celkový instalovaný výkon elektrárny je 2 x 1125 MW, což významně přispívá k energetické stabilitě a pokrytí spotřeby elektřiny v ČR. Temelín využívá pokročilé technologie a přísné bezpečnostní standardy. Každý z reaktorů VVER 1000 používá lehkou vodu jako chladivo a moderátor, což umožňuje efektivní řízení štěpné reakce a bezpečný odvod tepla z reaktoru. Kromě výroby elektřiny je teplo z elektrárny využíváno k vytápění Týna nad Vltavou pomocí horkovodu. Jaderná elektrárna Temelín je tedy nejen významným zdrojem elektrické energie, ale také příkladem moderního a bezpečného využívání jaderné energetiky. [31]



Obrázek 19 Mapa JE Temelín; 1 – chladicí bazény s rozstřikem; 2 – budova aktivních pomocných provozů; 3 – administrativní budova; 4 – hlavní technologické dílny; 5 – reaktorovna a strojovna bloku 2; 6 – reaktorovna a strojovna bloku 1; 7 – chemická úprava vody; 8 – chladicí věže; 9 – vyrovnávací vodojem; 10 – mezisklad paliva; 11 – úprava chladicí vody; 12 – čistírna odpadních vod; upraveno dle [11]

### 4.1 Vodní hospodářství a zásobování

Zásobou vody pro JE Temelín je řeka Vltava, na které se nachází vodní nádrž Kořensko a přehradní hráz Hněvkovice, ze které se voda čerpá a následně čistí od hrubých nečistot pomocí česlí. Vodní nádrž Kořensko poté slouží pro vypouštění vody z elektrárny. Voda se čerpá z Hněvkovic cca 6 km dlouhým potrubím do vyrovnávacího vodojemu, který se nachází v areálu elektrárny, kde se ukládá do dvou zásobních vodojemů o objemu 2 x 15 000 m<sup>3</sup>. Tato zásoba zajišťuje dostatečné množství vody na dochlazení elektrárny, kdyby došlo k poruše přívodu surové vody z řeky. Ze zásobního vodojemu se voda dopravuje do dvou objektů.

Jedním z nich je úpravna chemické vody (ÚCHV) a druhým objektem je chemická úpravna vody (CHÚV). [2; 11]



Obrázek 20 Vodní nádrž Hněvkovice [34]

## 4.2 ÚCHV

Úpravna chladicí vody se stará o úpravu vody pro: [2]

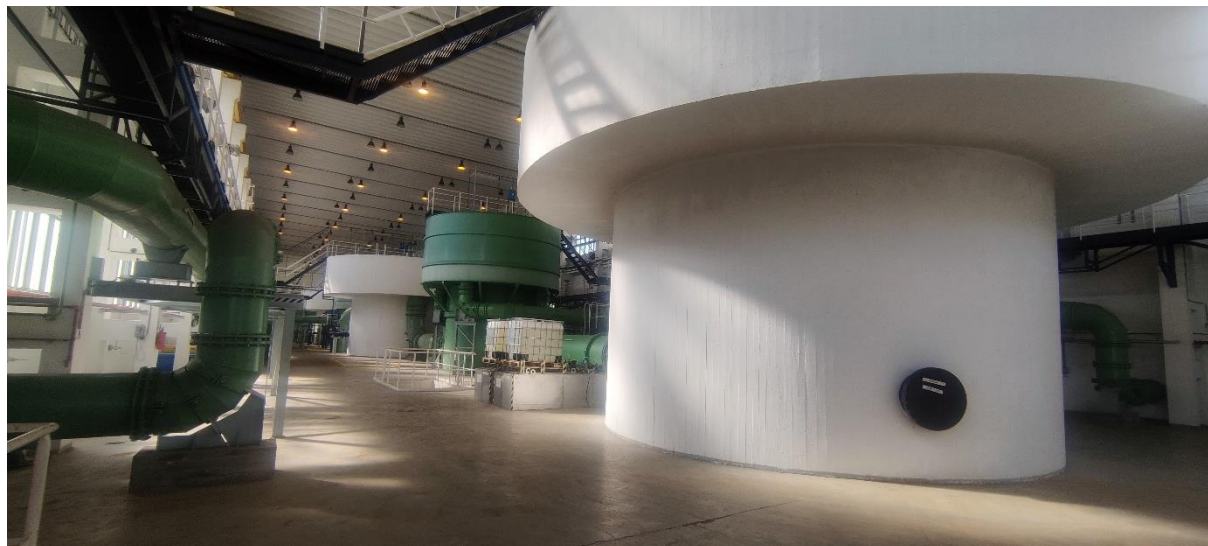
- cirkulační chladicí okruh
- technickou vodu důležitou (TVD) a technickou vodu nedůležitou (TVN)
- požární vody
- chladicí voda pro stanice zdroje chladu (SZCH) a nízkoteplotní kompresorové stanice (NTKS)

V ÚCHV se využívá procesu čiření, které se provádí několikrát za rok a závisí na znečištění surové vody z Vltavy. Surová voda se do zařízení ÚCHV dostává dvojicí přívodního potrubí samospádem z vyrovnávacího vodojemu. Pokud neprobíhá čiření, voda obtéká kolem čířiče do děliče a odtud jsou doplňovány ztráty ve vnějších chladicích okruzích. Zbytek vody putuje do sběrače, který slouží pro doplňování TVD, jako chladicí voda pro SZCH a NTKS. Sběrač má ještě jedno použití a tím je doplňování domácí vodárny, která se využívá pro ředění chemikálií. [11]

**Čiření na ÚCHV** se používá jen při větším znečištění a zhoršené kvalitě surové vody. Tato zhoršení kvality mohou být způsobena přívalovými dešti, povodněmi nebo táním. Proces čiření probíhá ve 3 flokulačních komorách, 2 rozdělovačích a 8 čířících reaktorech. Před flokulační komorou se dávkuje koagulant síran železitý  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , který napomáhá k vytváření shluků nečistot a vytváří vločky na bázi hydroxidu železitého  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , které se poté utvářejí do vločkového mraku, což napomáhá čištění vody. Tento proces se nazývá koagulace. Ve flokulační komoře je voda se síranem železitým rozmíchána a následně odchází do rozdělovačů, které rozdělují vodu na skupiny čířících reaktorů Binar-Bělský severní strany ÚCHV a skupinu jižní strany ÚCHV. Síran železitý snižuje pH vody, proto se v rozdělovačích používá Nalco neboli polyamid-akrylát PAA, který je organickým koagulantům. V čířících reaktorech je voda z rozdělovače přiváděna do flokulačních komor s míchadly, které se nacházejí v ose čířícího reaktoru. Přes přepad se vyčiřená voda z flokulační komory dostane do výstupní komory. Poté

voda putuje potrubím do děliče a část vody do sběrače. Na čířicích reaktorech by bylo možné dávkovat navíc organický flokulant (Zetag) pro zvýšení účinnosti číření. [11]

### 4.3 CHÚV



Obrázek 21 ÚCHV flokulační komory a rozdělovač

Chemická úprava vody se stará o úpravu vody pro: [2]

- primární okruh
- sekundární okruh
- havarijní systémy
- statorovou vodu
- vložený okruh chlazení generátoru
- stanice zdroje chladu
- horkovodní systémy
- vložený okruh ve strojojně

Voda se do CHÚV dostává z vyrovnávacího vodojemu přes ÚCHV, kde je voda čířena jen při zhoršení její kvality. Na CHÚV se také nachází dva čířiče, a to konkrétně čířiče typu Dukla. Přívodním potrubím je voda čerpána do dvou flokulačních komor, na jejichž vstupu se pro zlepšení účinnosti číření dávkuje chemikálie  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  a Nalco. Tyto chemikálie se rozmíchají ve flokulační komoře a potom je voda zaváděna do čířicího reaktoru DUKLA 9000, u kterého se průtok může pohybovat v rozmezí 0–250 m<sup>3</sup>/h. Dále je možné pro další zvýšení účinnosti číření dávkovat Zetag, který se dávkuje do spodní části čířicího reaktoru. Po procesu číření je vyčířená voda zaváděna do skupiny čtyř pískových filtrů, kdy každý filtr má maximální výkon 100 m<sup>3</sup>/h. Náplň filtru je složena ze tří vrstev a každá z nich má rozdílnou zrnitost (1–12 mm). Zde se zachytí ostatní nečistoty, které nebyly odstraněny čířením a od doby, kdy se začala používat RO se může před pískové filtry dávkovat roztok NaOH. Ten napomáhá ve spojení s RO k odplynění od CO<sub>2</sub>. Z pískových filtrů získáváme čířenou filtrovanou vodu, která je ukládána do jímek a rozdělována potrubím na demineralizaci a ke změkčení. Dále se tato voda používá pro praní náplní filtrů a pro ředění chemikálií, konkrétně NaCl (používáno pro regeneraci změkčovacích filtrů). Před demineralizací se čířená filtrovaná voda čistí pomocí sorpčních filtrů, které mají jako náplň vysoce porézní anex. Ten slouží především k zachycení

organiky a výsledkem je ochrana anexů demilinek. Při používání RO pro demineralizaci sorpční filtry slouží jako mechanický filtr. [2]

Výroba demineralizované vody se provádí v současné době pomocí RO. Nacházejí se zde 3 linky, z toho každá je schopna vyrobit 35 m<sup>3</sup>/h. Na vstupu do reverzní osmózy se nachází UV



*Obrázek 22 Čiřič DUKLA*

lampa, která dezinfikuje vodu a ta prochází dále svíčkovou filtrací za účelem odstranění mechanických nečistot. Před filtr se dávkuje nepřetržitě antiscalant, který funguje jako stabilizátor solí. Za filtrem se dávkuje periodicky biocid, který zabraňuje zanášení membrán od biologických nečistot a dávkuje se při odstavování linky RO. Po svíčkové filtraci je vodě zvýšen tlak pomocí pracovního čerpadla, které dosahuje tlaku 1,6 MPa. Voda poté vstupuje do tří stupňů, kdy je každý stupeň složen z více membránových filtrů. První stupeň obsahuje 4 membránové filtry, druhý obsahuje 3 a třetí stupeň pouze 2. Z každého stupně dostáváme permeát, který se svádí do jednoho potrubí, a to vede do zásobních nádrží demineralizované vody. Z třetího stupně získáváme retentát, který se odvádí do čičiče nebo do cirkulačního chladicího okruhu. Výtěžnost permeátu ku retentátu je cca 4:1. [11]



*Obrázek 23 Reverzní osmóza JE Temelín*

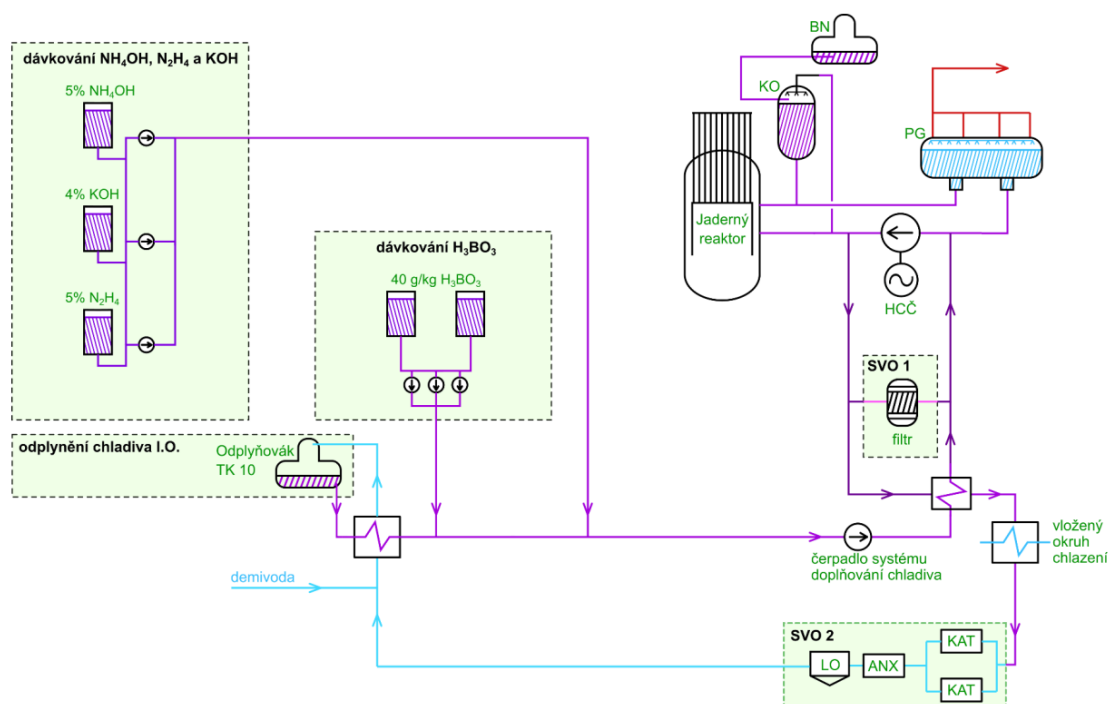
Druhou možností výroby demineralizované vody jsou ionexové filtry. Na CHÚV se nachází tři demilinky a každá linka obsahuje 3 stupně. Prvním a druhým stupněm je katexový

filtr v  $H^+$  formě. Třetím stupněm je anexový filtr v  $OH^-$  formě. Aktuálně demineralizace probíhá přes reverzní osmózu. [11]

Skladování demineralizované vody se uskutečňuje ve třech zásobních nádrží, každá s objemem  $811\text{ m}^3$ . Pro zimní období je zde systém proti zamrznutí, který pomocí cirkulace vody přes ohřívák je schopen zvýšit teplotu nad  $10\text{ }^\circ\text{C}$ . Takto uskladněná voda stále obsahuje nežádoucí ionty, které se odstraňují závěrečným dočištěním. Ze zásobních nádrží je voda přiváděna pomocí čerpadel na směsné filtry. Ty jsou vybaveny pojistným ventilem, který slouží pro zachycení ionexových hmot. Médiiem ve směsných filtrech je silně kyselý katex a silně bazický anex. Výkon směsného filtru se pohybuje cca  $120\text{ m}^3/\text{h}$  a regenerace se provádí dvěma proudy, což znamená, že spodní a horní vrstva se regenerují zvlášť. Ve spodní části filtru je katex, který se regeneruje protiproudě a odpad se z filtru odvádí středním roštem. Anex se regeneruje souprůdě a odpadní regenerant odchází opět středovým roštem. [11]

Pro vytápění Týna nad Vltavou a pro vlastní vytápění elektrárny byl vybudován horkovodní systém, který používá čířenou filtrovanou vodu, která se změkčuje ionexovými filtry s náplní katexu. Ve filtru se poté vyměňují ionty  $Ca^+$  a  $Mg^+$  za  $H^+$  a tím se snižuje tvrdost vody. [2]

#### 4.4 Chemický režim I.O.



Obrázek 24 Chemický režim I.O.; SVO – speciální vodoočistka, PG – parogenerátor;  
KO – kompenzátor objemu; BN – barbotážní nádrž; HCC – hlavní cirkulační čerpadlo;  
ANX – anex; KAT – katex, LO – lapač ionexů; [11]

Na JE Temelín se udržuje přísný chemický režim, který musí být bezkyslíkatý, což znamená, že, výskyt kyslíku v médiu je minimální. Dále se musí udržovat optimální pH, které se pohybuje v rozmezí  $7,0 - 7,2$  při  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . Pokud by se pH neudržovalo stabilní a docházelo by k výkyvům, tak by to vedlo k většímu šíření aktivovaných korozních produktů. Optimální a stabilní pH navíc snižuje korozi a potlačuje tvorbu nánosů. [11]

Do primárního okruhu se dávkuje několik chemikálií. První z nich je kyselina boritá  $H_3BO_3$ , která je schopna absorbovat neutrony a lze pomocí ní řídit počet neutronů v aktivní zóně. S postupným vyhoříváním paliva je potřeba koncentraci kyseliny borité snižovat, a to se

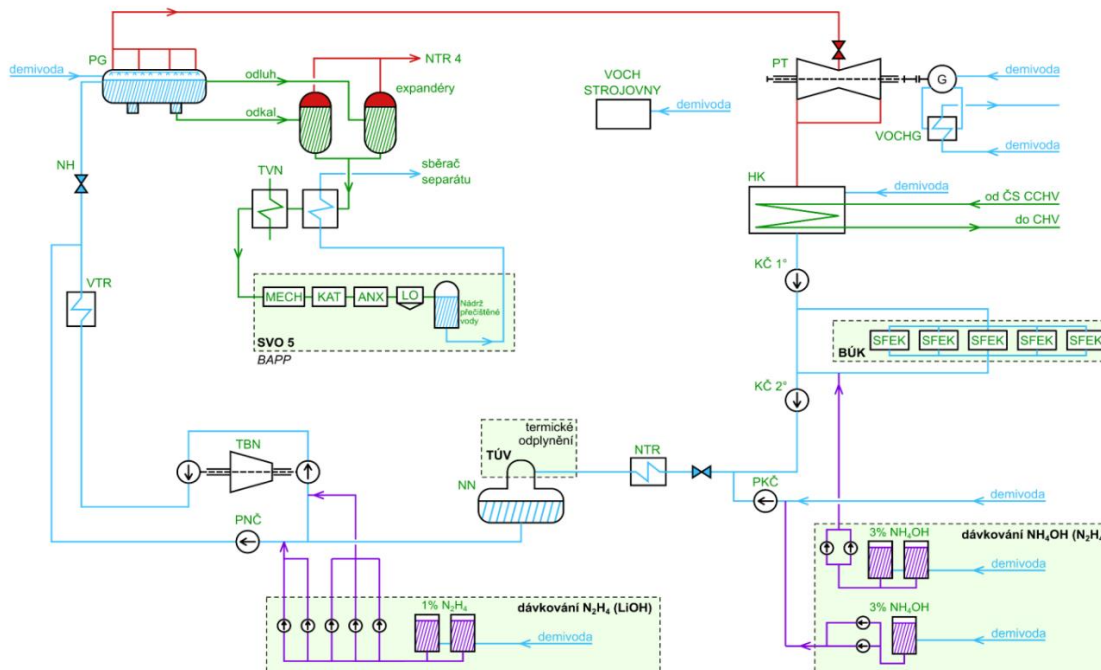
provádí jejím ředěním. Tím se dosáhne konstantního výkonu reaktoru. Další chemikálií, která je dávkována do okruhu, je hydroxid draselný KOH, která kompenzuje vliv kyseliny borité, jenž snižuje pH. Hydroxid draselný je zásada a má tedy zvyšovat hodnoty pH, ideálně je udržovat v optimálním rozmezí. [2; 11]

Pro odstranění kyslíku, který zůstal v primárním okruhu po termickém odplynění se dávkuje do okruhu hydrazín  $N_2H_4$  nebo amoniak  $NH_3$  (amoniaková voda  $NH_4OH$ ). Dávkování hydrazinu se využívá zejména při nahřívání bloku, kdy je nutné odstranit velké množství kyslíku. Po nahřátí bloku, kdy už probíhá řízená štěpná reakce, se místo hydrazinu začne nepřetržitě dávkovat amoniak. [2]

SVO 1 funguje jako mechanický filtr, který odolá vysoké teplotě, protože využívá k filtrování titanovou drť. Díky tomu se chladivo nemusí nijak chladit. [2]

SVO 2 už využívá pro čištění ionexy a tento systém slouží k čištění drenážních vod primárního okruhu. V tomto systému se odstraňuje kyselina boritá na konci kampaně a také se tento systém využívá při regulaci chemického režimu okruhu. Dále je systém určen ke snížení pH chladiva a čištění vody odpouštěné z primárního okruhu. [2]

#### 4.5 Chemický režim II.O.



Obrázek 25 Chemický režim II.O.; PG – parogenerátor; PT – parní turbína; VTR – vysokotlaká regenerace; NTR – nízkotlaká regenerace; HK – hlavní kondenzátor; KČ – kondenzátní čerpadlo; PNČ – pomocné napájecí čerpadlo; PKČ – pomocné kondenzátní čerpadlo; BÚK – bloková úpravna kondenzátu; VOCHG – vložený okruh chlazení generátoru; TVN -technická voda nedůležitá; NTR 4 – nízkotlaká regenerace 4 stupně; NN – napájecí nádrž; TBN – turbonapáječka; BAPP – budova aktivních pomocných provozů; TÚV – termická úprava vody; ČS CCHV – čerpací stanice cirkulační chladicí vody; CHV – chladicí věž; SVO – speciální vodoočistka; SFEK – směsný filtr s externí regenerací s navezenou vrstvou katexu; G – generátor; MECH – mechanický filtr; KAT – katex; ANX – anex; LO – lapač ionexů; [11]

Pro chemický režim sekundárního okruhu platí, že nesmí způsobovat korozi a vytvářet nánosy především na teplosměnných plochách. Chemický režim tedy musí být bezkyslíkatý a s optimálním pH. Proto se do okruhu musí přidávat chemikálie, které tyto požadavky budou splňovat. Stejně jako u primárního okruhu se dává amoniaková voda  $\text{NH}_4\text{OH}$ , která má zde odlišnou funkci. Díky své zásaditosti posouvá pH k hodnotám 9,7 – 10, zejména kvůli použitým materiálům. Amoniak se odpařuje s vodní párou, což je dobré pro udržování alkality i na straně páry. Nevýhodou jsou velké ztráty amoniaku, proto je nutné ho kontinuálně doplňovat. Menší množství amoniaku vzniká tepelným rozkladem hydrazinu v okruhu, ale vzhledem k netěsnostem okruhu a ztrátám toto množství nestačí na udržení správného pH. [2; 11]

Dále se do systému dává hydrazin  $\text{N}_2\text{H}_4$ , který má opět za úkol odstranit velké množství kyslíku a udržuje tak bezkyslíkatý režim. Od primárního okruhu se dávkování hydrazinu liší tím, že hydrazin je zde dávkován po celou dobu provozu. Dále přispívá ke zvýšení pH a způsobuje pasivaci, kdy na povrchu materiálů vytváří ochrannou vrstvu oxidů proti korozi. [11]

V neposlední řadě se do oběhu dává hydroxid lithný  $\text{LiOH}$ . Ten upravuje pH tak, aby vytvořil co nejlepší podmínky pro šterbinové prostředí. Šterbinové prostředí je velmi nebezpečné na korozi a nachází se v parogenerátoru. Hydroxid lithný se dává podle potřeby a do systému je dávkován přes nádrže hydrazinu. [11]

SVO 5 v sekundárním okruhu je používán pro čištění odluhů z parogenerátoru. Tento systém zaručuje udržování kvality vody v sekundárním okruhu. K čištění se používají ionexy a mechanické filtry. [2]

## 5 Srovnání technologií

Zde budou popsány a srovnány hlavní metody čištění a úpravy vody.

### 5.1 Předúprava vody

Volba předúpravy vody především závisí na kvalitě a množství vstupní vody. Pokud je kvalita vody ze zdroje dostačující, nemusí se používat čířících reaktorů a voda pro chladicí okruh se může využít rovnou. Jestliže je vstupní voda znečištěna více, je nutné použít vhodnou separační techniku a pro velké množství vody se právě používá číření. Čířící reaktory jsou několika typů a používají se ve větším počtu. Aby se zvýšila účinnost číření, je potřeba dávkovat některé chemikálie, což způsobuje vysoké náklady. Navíc jsou čířiče vybaveny míchadly, které musí být poháněny a také se musí usazené nečistoty zpracovávat na ČOV, což opět zvyšuje náklady na provoz. Pokud vodu nečíříme a chceme ji využít k demineralizaci, může se použít čířícího reaktoru před filtrací zrnitým ložem. Jako nevýhody číření mohou být považovány velké nároky na prostor, které se odvíjí od množství upravované vody. Také je tato technologie náročná na počáteční investici, vzhledem k množství použitých materiálů.

Jako další v procesu předúpravy může být využito pískových filtrů, respektive filtrů se zrnitým ložem. Tyto filtry používají média o různé zrnitosti a s menší zrnitostí jsou schopny zachytit menší částice. Navíc je výhodou v kombinaci více vrstev filtrů, nebo se může použít více stupňů s odlišnou náplní. Tyto filtry jsou velmi rozšířené, zejména kvůli jejich jednoduchosti a nízkým nákladům na provoz. Používají se před demineralizací a jejich regenerace není komplikovaná. Nevýhodou může být jejich velikost, a když se některé filtry regenerují, je potřeba tuto ztrátu nahradit dalšími filtry, takže je nutné jich provozovat více.

Jako ochrana pro RO a další systémy se používá membránových filtrů. Konkrétně pro RO se využívá mikrofiltrů, které je potřeba pravidelně měnit, ale s novým vývojem jsou některé membrány regenerovatelné. Výhodou je, že čas jejich výměny poznáme podle narůstající tlakové ztráty. Membránové filtry nejsou tak nákladnou položkou a mohou výrazně pomoci v úpravě vody, zejména pak jako ochrana systému, které by se bez těchto filtrů mohli poškodit.

### 5.2 Demineralizace

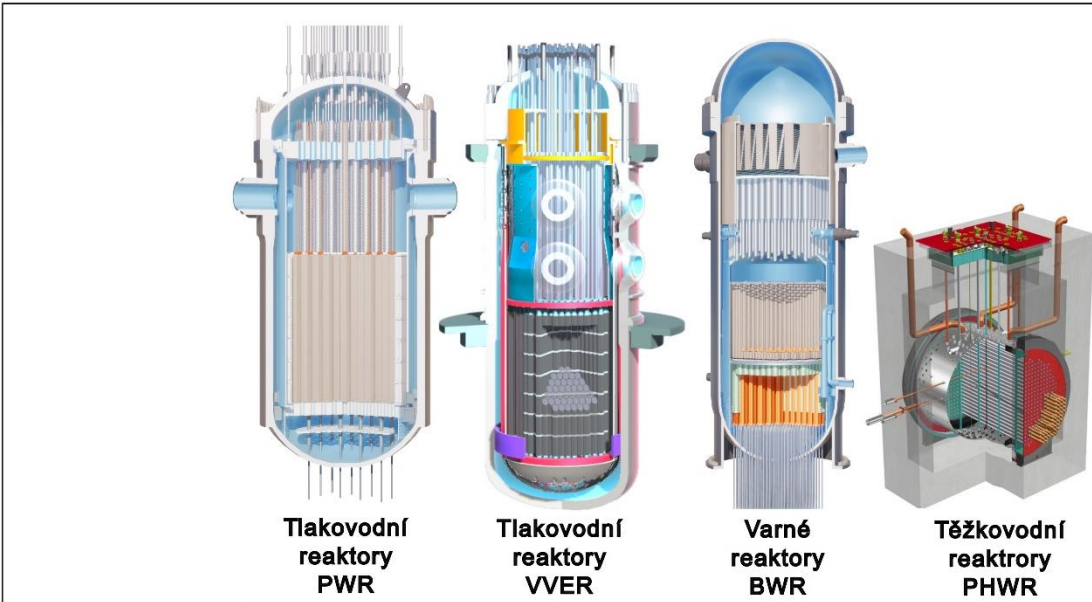
V současné době je čím dál více oblíbenou technologií pro demineralizaci reverzní osmóza, která ke své práci potřebuje pouze čerpadla, které překonají osmotický tlak. Regenerace RO neprobíhá, ale systém je čištěn chemikáliemi, aby se v systému neusazovali mikroorganismy, které by mohli membrány RO poškodit. Před RO může být dávkován chemikálie, které pomáhají se záchytem CO<sub>2</sub>, navíc může být na vstupu použita UV filtrace, která likviduje zmíněné mikroorganismy. Výhodou systému RO je modularita, kdy se může použít více stupňů, ale tím se také sníží kvalita permeátu. Navíc je systém poměrně kompaktní v porovnání ionexových filtrů. Náklady na provoz se skládají zejména z pohonu čerpadel, UV filtrace, po určitém intervalu je nutné systém čistit a také by se měla měnit membrána za novou.

Ionexové filtry, které fungují na principu výměny iontů, jsou kvalitní technologií pro demineralizaci. Největší nevýhoda použití ionexových filtrů je spotřeba chemikálií na jejich regeneraci. Dále mají velké nároky na prostor, což je dáno hlavně rozdělením katexu a anexu do samostatných filtrů. Proto se v nových řešení od ionexových filtrů spíše opouští a jejich využití je zejména pro dočištění vody z reverzní osmózy, ať už směsným filtrem nebo deionizací. Deionizace využívá ionexy s použitím stejnosměrného proudu a tím odpadá potřeba regenerace, takže proces může fungovat bez přerušení. Ionexové filtry se ale využívají v čistících systémech primárního a sekundárního okruhu.

### 5.3 Odsolování

U elektráren, které využívají mořskou vodu, nebo vodu s vysokou solností, pro chlazení je nutné odstranit tyto soli. Pro odsolování je několik technik, z toho jsou využívány zejména RO, MSF, MED. RO je membránový proces narušil od MSF a MED, které fungují na principu destilace. K destilaci je potřeba dodat velké množství energie. Dále je nevýhoda ve velikosti zařízení, které se může skládat z více stupňů. Výhodou je vyšší kvalita vyráběné vody oproti RO a nemusí se u nich měnit membrána. U membránových procesů je výhoda zejména v kompaktnosti zařízení, nižších investičních i provozních nákladech a jejich modularita. Navíc je u termických odsolovacích procesů možnost výskytu koroze. Provozní náklady závisejí na zdroji tepla, protože při využívání odpadního tepla budou náklady na provoz nižší.

### 5.4 Chemické režimy



	<b>Tlakovodní reaktory PWR</b>	<b>Tlakovodní reaktory VVER</b>	<b>Varné reaktory BWR</b>	<b>Těžkovodní reaktory PHWR</b>
<b>Palivo</b>	obohacený UO <sub>2</sub>	obohacený UO <sub>2</sub>	obohacený UO <sub>2</sub>	přírodní UO <sub>2</sub>
<b>Chladivo</b>	lehká voda	lehká voda	lehká voda	těžká voda
<b>Moderátor</b>	lehká voda	lehká voda	lehká voda	těžká voda
<b>Hodnota pH v I.O.</b>	6,9 - 7,4 (300 °C)	7,0 - 7,3 (300 °C)	5,6 - 8-6 (většinou okolo 7) při 25 °C	10,2 - 10,4
<b>Hodnota pH v II.O.</b>	cca 9,3 -9,6 (měď – pH max 9,3) při 25 °C	cca 9,5 - 10,2 (měď – pH max 9,3) při 25 °C	-	K hodnotám 10, měď – pH max 9,3 při 25 °C
<b>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></b>	Ano	Ano	Ne	Lze, ale častěji Gd(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> , alternativa B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Zvýšení pH v I.O.</b>	LiOH	KOH	-	LiOH
<b>Zvýšení pH v II.O.</b>	NH <sub>4</sub> OH	NH <sub>4</sub> OH	-	NH <sub>4</sub> OH
<b>Další dávkování I.O.</b>	H <sub>2</sub> , Zn	NH <sub>4</sub> OH, N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , Zn, Ušlechtilé kovy (např. Pt nebo Pd)	-
<b>Další dávkování II.O.</b>	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , těkavé aminy (např. ethanolamin, morfolin)	LiOH, N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , těkavé aminy	-	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , těkavé aminy (morfolin, ethanolamin, cyklohexylamin)
<b>Termické odplynění I.O.</b>	Ano	Ano	Ano	Ano
<b>Termické odplynění II.O.</b>	Ano	Ano	-	Ano

Obrázek 26 Typy reaktorů a jejich porovnání; upravené obrázky dle [35; 36; 37; 38]

Každá elektrárna má svůj konkrétní chemický režim. Ten závisí na typu reaktoru, na použitých materiálech v okruhu, na použitém palivu a dalších specifických řešení. Pro

přehlednost jsou v obrázku 26 porovnány základní charakteristiky a možnosti dávkování chemikálií. PHWR se liší v použití média, kterým je těžká voda. Díky tomu může být použito přírodního uranu a odpadájí tak náklady na jeho obohacování. Na druhou stranu je výroba deuteria poměrně náročná a náklady na jeho výrobu jsou vyšší.

U porovnání reaktorů PWR a VVER jsou zejména odlišnosti v primárním okruhu, kdy se pro zvýšení pH používají odlišné sloučeniny. Dále se u PWR dává přímo vodík a také se může přidávat zinek, protože v některých PWR reaktorů se používají slitiny na bázi kobaltu. Reaktory VVER vykazují lepší korozní chování a mají všeobecně nižší radiaci v okruhu. [4]

BWR reaktory jsou jednookruhové, takže voda přechází i do páry. Hodnoty pH se pohybují v neutrální oblasti a dávkování se značně liší od ostatních reaktorů. Je kladen důraz na vysokou čistotu vody, a proto se v okruhu musí kontinuálně čistit.

## ZÁVĚR

Účelem předložené bakalářské práce je informovat o metodách a technologiích související s úpravou vody v jaderných elektrárnách, které se současně používají a představit chemické režimy jaderných elektráren.

V první kapitole jsme pojednávali o zdrojích vody a jejich využití v jaderné elektrárně. Bylo popsáno, jaké látky se ve vodě vyskytují a co způsobují.

V druhé kapitole byly představeny používané techniky předúpravy vody, následná demineralizace a dočištění. Také zde byly rozebrány možnosti odsolování a představeny nejpoužívanější techniky. Úprava vody s využitím magnetismu se používá zatím velmi málo, ale budoucí výzkum může tuto techniku zdokonalit na tolik, že se bude standardně používat v nových projektech. Důležitou roli v úpravě vody hraje odplynění a také dezinfekce vody, proto byly tyto procesy v práci rozděleny a popsány.

V třetí kapitole byly představeny jaderné reaktory, které používají vodu jako moderátor a chladivo. Následně pro každý reaktor byla představena předúprava vody a popsáno dávkování chemikálií v okruhu. Protože je každý reaktor a jeho systém jedinečný, tento popis byl velmi obecný.

Ve čtvrté kapitole byla představena JE Temelín a zároveň byla popsána úprava vody od jejího získávání. Především zde byly vyobrazeny budovy úpravny chladící vody a chemické úpravny vody. Dále byl představen primární a sekundární okruh s dávkováním chemikálií, k tomu bylo popsáno schéma okruhu a představeno kontinuální čištění na SVO.

V poslední kapitole jsme srovnávali možnosti předúpravy vody, která zejména závisí na upravované vodě. Poté jsme popisovali výhody a nevýhody demineralizace reverzní osmózou a ionexovými filtry. V neposlední řadě jsme porovnávali metody odsolování, konkrétně membránové procesy s procesy využívající destilace. Poslední část obsahovala porovnání jaderných reaktorů. Bylo zde shrnuto dávkování chemikálií pro jednotlivé okruhy a také zde byli uvedeny hodnoty pH jednotlivých okruhů. U tohoto srovnání je spousta možností a konstrukcí, navíc se chemické režimy mění podle provozu reaktoru.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Efficient Water Management in Water Cooled Reactors*. Online. 2012. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 2012. ISBN 978-92-0-132610-2. Dostupné z: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1569\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1569_web.pdf). [cit. 2024-03-22].
- [2] KOLEKTIV AUTORŮ, ČEZ A.S. *Chemie JE VVER 1000*. 2023. Učební texty pro přípravu personálu JE. [cit. 2024-04-22].
- [3] *Problematika úpravy chladicí vody*. Online. EuroClean. 2023. Dostupné z: <https://euroclean.cz/clanky/problematika-upravy-chladici-vody/>. [cit. 2024-04-14].
- [4] HÜBNER, Pavel. *Úprava vody v energetice*. 3. přepracované a rozšířené vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2023. ISBN 978-80-7592-091-1.
- [5] *Cesle a síta*. Online. ASIO - čištění a úprava vod, dešťové a šedé vody. 2014. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/news/cesle-a-sita.264>. [cit. 2024-03-22].
- [6] HÜBNER, Pavel. *Úprava vody pro průmyslové účely*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 80-708-0624-9.
- [7] FS-ČVUT V PRAZE, ÚSTAV ENERGETIKY. *Vodní hospodářství jaderných energetických zařízení - čiření*. Online. ČVUT, Ústav energetiky. 2018. Dostupné z: [https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/VHJAE\\_03\\_uprava\\_vody2\\_srazeci\\_reakce.pdf](https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/VHJAE_03_uprava_vody2_srazeci_reakce.pdf). [cit. 2024-03-22].
- [8] *Flotace*. Online. ENVI-PUR. 2024. Dostupné z: <https://www.envi-pur.cz/upravny-pitne-vody-flotace-rozpustenym-vzduchem-daf/>. [cit. 2024-03-29].
- [9] *FlowSand-Filter of Leiblein*. Online. Leiblein. 2024. Dostupné z: <https://www.leiblein.de/en/products/flowsand-filter>. [cit. 2024-05-05].
- [10] *Vodní hospodářství jaderných energetických zařízení - ionexy*. Online. ČVUT, Ústav energetiky. 2018. Dostupné z: [https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/VHJAE\\_03\\_uprava\\_vody3\\_ionexy.pdf](https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/VHJAE_03_uprava_vody3_ionexy.pdf). [cit. 2024-04-16].
- [11] KOLEKTIV AUTORŮ, ČEZ A.S. *Učební text pro přípravu personálu JE: Chemie modul 2*. Brno, 2024.
- [12] *Reverzní osmóza všeobecné informace*. Online. Mangala. 2024. Dostupné z: <https://www.mangala.cz/page.html?id=4>. [cit. 2024-05-17].
- [13] *Elektrodeionizace*. Online. MemBrain. 2024. Dostupné z: <https://www.membrain.cz/elektrodeionizace.html>. [cit. 2024-05-05].
- [14] *Vakuový odplyňovač*. Online. EUROWATER. B.d. Dostupné z: <https://www.eurowater.com/cz/zarizeni-na-upravu-vody/odplyneni/vakuovy-odplynovac>. [cit. 2024-05-05].
- [15] HÁJEK, Zdeněk. *VÝZKUM ZAŘÍZENÍ PRO ÚPRAVU MOŘSKÉ VODY A DALŠÍ APLIKACE*. Online, dizertační práce, vedoucí Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=81305](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=81305). [cit. 2024-04-23].
- [16] *Vodní hospodářství jaderných energetických zařízení - speciální postupy*. Online. ČVUT, Ústav energetiky. 2018. Dostupné z: [https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/VHJAE\\_03\\_uprava\\_vody3\\_ionexy.pdf](https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/VHJAE_03_uprava_vody3_ionexy.pdf). [cit. 2024-04-16].

- [content/uploads/2018/06/VHJAE\\_03\\_uprava\\_vody4\\_dalsi\\_postupy.pdf](#). [cit. 2024-04-22].
- [17] KYSELA, Jan; JINDŘICH, Karel a FRIČ, Zdeněk. Využití elektromagnetické filtrace na jaderných elektrárnách a výsledky zkoušek prototypu filtru. Online. In: *Sborník vědecké konference*. Československo: Ústav jaderného výzkumu ŘEŽ, 1985, s. 67-75. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/18/014/18014538.pdf?r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/18/014/18014538.pdf?r=1). [cit. 2024-05-24].
- [18] MIZUNO, Nobumi; MISHIMA, Fumihito; AKIYAMA, Yoko; OKADA, Hidehiko; HIROTA, Noriyuki et al. Removal of Iron Oxide With Superconducting Magnet High Gradient Magnetic Separation From Feed-Water in Thermal Plant. Online. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2015, s. 1-4. ISSN 1051-8223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TASC.2015.2392624>. [cit. 2024-05-22].
- [19] *Membránový odplyňovač*. Online. EUROWATER. B.d. Dostupné z: <https://www.eurowater.com/cz/zarizeni-na-upravu-vody/odplyneni/membranovy-odplynovac>. [cit. 2024-04-22].
- [20] *Odplyňovač CO<sub>2</sub>*. Online. EUROWATER. B.d. Dostupné z: <https://www.eurowater.com/cz/zarizeni-na-upravu-vody/odplyneni/co2-degasser>. [cit. 2024-04-22].
- [21] WATERMAN ENGINEERS AUSTRALIA. *WATER QUALITY REQUIREMENT FOR VARIOUS KIND OF POWER PLANTS*. Online. WATERMAN ENGINEERS AUSTRALIA. 2024. Dostupné z: <https://watermanaustralia.com/water-quality-requirement-for-various-kind-of-power-plants/>. [cit. 2024-04-23].
- [22] *Dezinfekce vody*. Online. EUROWATER. B.d. Dostupné z: <https://euroclean.cz/dezinfekce-vody/>. [cit. 2024-04-23].
- [23] JANČULA, Daniel; MIKULA, Přemysl; MARŠÁLEK, Blahoslav; RUDOLF, Pavel a POCHYLÝ, František. Selective method for cyanobacterial bloom removal: hydraulic jet cavitation experience. Online. *Aquaculture International*. 2014, roč. 22, č. 2, s. 509-521. ISSN 0967-6120. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10499-013-9660-7>. [cit. 2024-05-20].
- [24] *Ultrazvukový balastní vody Dezinfekce*. Online. Hielscher Ultrazvuk. 2024. Dostupné z: <https://www.hielscher.com/cs/ultrasonic-ballast-water-disinfection.htm>. [cit. 2024-05-16].
- [25] *Základní typy jaderných reaktorů*. Online. ČEZ A.S. 2024. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru>. [cit. 2024-05-07].
- [26] *Vodní hospodářství jaderných energetických zařízení - chemické režimy*. Online. ČVUT, Ústav energetiky. 2018. Dostupné z: [https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/VHJAE\\_04\\_chemicke\\_rezimy.pdf](https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/VHJAE_04_chemicke_rezimy.pdf). [cit. 2024-05-07].
- [27] Lin, C.C., Cowan, R.L., & Kiss, E. 2004. *Optimum coolant chemistry in BWRs (INIS-XA-N--080)*. International Atomic Energy Agency (IAEA). Online. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/35/095/35095462.pdf?r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/35/095/35095462.pdf?r=1). [cit. 2024-05-24].
- [28] General Electric Systems Technology Manual: Chapter 1.9 Chemistry. Online. In: . USA: NRC, 2011. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1125/ML11258A298.pdf>. [cit. 2024-05-22].

- [29] *Těžká voda a její výroba.* Online. Fyzmatik. 2009. Dostupné z: <https://fyzmatik.pise.cz/991-tezka-voda-a-jeji-vyroba.html>. [cit. 2024-05-21].
- [30] G. COOK, William a H. LISTER, Derek. *Chemistry in CANDU Process Systems.* Online. Kanada: Univerzita Nový Brunswick, 2014. Dostupné z: <https://unene.ca/essentialcandu/pdf/15%20-%20Chemistry%20in%20CANDU%20Process%20Systems.pdf>. [cit. 2024-05-21].
- [31] *Jaderná elektrárna Temelín.* Online. ČEZ A.S. 2024. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/ete>. [cit. 2024-05-22].
- [32] *Vodárenská flotace a její použití při úpravě pitné vody v ČR.* Online. TBZ-info. 2012. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/8900-vodarenska-flotace-a-jeji-pouziti-pri-uprave-pitne-vody-v-cr>. [cit. 2024-04-14].
- [33] *New Technologies for Seawater Desalination Using Nuclear Energy.* Online. IAEA, 2015. ISBN 978-92-0-100115-3. Dostupné z: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1753\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1753_web.pdf). [cit. 2024-04-21].
- [34] MAPY.CZ. *Vodní nádrž Hněvkovice.* Online. Seznam.cz. 2024. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?m3d=1&height=397&yaw=1&pitch=-70&x=14.4455789&y=49.1809906&z=18>. [cit. 2024-22-5].
- [35] REAKTOR. Online. SVĚT ENERGIE. 2020. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny-pro-deti/co-vsechno-v-jaderne-elektrarne-najdeme/reaktor/jak-to-funguje>. [cit. 2024-05-24].
- [36] *NPP BWR reactor.* Online. Energy Encyclopedia. 2024. Dostupné z: <https://www.energyencyclopedia.com/en/free-downloads/images/npp-bwr-reactor-131>. [cit. 2024-05-24].
- [37] *NPP PWR reactor.* Online. Energy Encyclopedia. 2024. Dostupné z: <https://www.energyencyclopedia.com/en/free-downloads/images/npp-pwr-reactor-140>. [cit. 2024-05-24].
- [38] NEA. Workshop ARFEM\_14. CANDU Reactor Fuel Cycle Flexibility. 2020. OECD Publishing, Paris. Online. Dostupné z: [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_30763/workshop-arfem-14-candu-reactor-fuel-cycle-flexibility](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_30763/workshop-arfem-14-candu-reactor-fuel-cycle-flexibility). [cit. 2024-05-24].

## **SEZNAM ZKRATEK**

BSK	Biologická spotřeba kyslíku
BWR	Boiling water reactor
CANDU	Canada deuterium-uranium
CHÚV	Chemická úpravna vody
CHSK	Chemická spotřeba kyslíku
EDI	Elektrodeionizace
JE	Jaderná elektrárna
MED	Multieffect distillation
MSF	Multi-stage flash
NTKS	Nízkoteplotní kompresorové stanice
PWR	Pressurized water reactor
PHWR	Pressurized heavy-water reactor
RO	Reverzní osmóza
SVO	Speciální vodoočistka
SZCH	Stanice zdroje chladu
TVD	Technická voda důležitá
TVN	Technická voda nedůležitá
UV	Ultrafialové záření
ÚCHV	Úpravna chladící vody
VC	Vapor compression
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma čířiče s kalovým mrakem (vlevo) a čířiče Dukla (vpravo) [7] .....	17
Obrázek 2 Schéma čířiče s vnitřní recirkulací kalu [7] .....	17
Obrázek 3 Schéma čířiče s vnější recirkulací kalu [7] .....	18
Obrázek 4 Schéma čířiče s kombinovanou recirkulací kalu [7] .....	18
Obrázek 5 Schéma čířiče s tvorbou kalu na nosiči v kyselé oblasti [7] .....	19
Obrázek 6 Schéma klasického uspořádání zařízení flotace [32] .....	20
Obrázek 7 Schéma průtočného pískového filtru Leiblein [9].....	21
Obrázek 8 Konstrukce a zapojení ionexového filtru [10].....	23
Obrázek 9 Schéma reverzní osmózy; upraveno dle [2].....	25
Obrázek 10 Odparka JE Temelín na SVO 3 (vlevo) a SVO 6 (vpravo) [11] .....	26
Obrázek 11 Schéma rozdělení odsolovacích technologií; upraveno dle [33] .....	27
Obrázek 12 Schéma jednotky MSF s recirkulací koncentrátu [15].....	28
Obrázek 13 Schéma jednotky ME (3 stupně) [15] .....	28
Obrázek 14 UV filtrace v JE Temelín na vstupu do RO .....	31
Obrázek 15 Kavitační tryska [23].....	31
Obrázek 16 Schéma tlakovodního reaktoru PWR [25] .....	33
Obrázek 17 Schéma varného reaktoru BWR [25] .....	35
Obrázek 18 Schéma těžkovodního reaktoru CANDU [25] .....	36
Obrázek 19 Mapa JE Temelín; upraveno dle [11].....	39
Obrázek 20 Vodní nádrž Hněvkovice [34].....	40
Obrázek 21 ÚCHV flokulační komory a rozdělovač .....	41
Obrázek 22 Čířič DUKLA.....	42
Obrázek 23 Reverzní osmóza JE Temelín.....	42
Obrázek 24 Chemický režim I.O.; [11] .....	43
Obrázek 25 Chemický režim II.O.; [11].....	44
Obrázek 26 Typy reaktorů a jejich porovnání; upravené obrázky dle [35; 36; 37; 38] .	47

## **SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Látky obsažené ve vodě; upraveno dle [2].....	13
Tabulka 2 Velikost částic ve vodě a metody jejich odstraňování; upraveno dle [4].....	14
Tabulka 3 Tlakové a energetické nároky pro membránové procesy; upraveno dle [1]..	22