

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2022**

**JAN  
LOSKOT**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Loskot** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **492655**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Meziokruh fúzní elektrárny pro vyrovnávání pulzního režimu fúzního reaktoru**

Název bakalářské práce anglicky:

**Fusion power plant intermediate circuit for balancing the pulsed operation of a fusion reactor**

Pokyny pro vypracování:

Student zpracuje stručnou rešerši výzkumu jaderné fúze jako energetického zdroje. V praktické části se zaměří na meziokruh prototypu fúzní elektrárny DEMO s pulsním fúzním reaktorem a provede výpočet jeho základních parametrů.

Hlavní části práce:

Teoretická část

- 1) Rešerše výzkumu jaderné fúze.
- 2) Odvod tepla z reaktoru.
- 3) Meziokruh pro vyrovnávání energetických pulzů.

Praktická část

- 1) Výběr vhodných metod akumulace energie.
- 2) Porovnání a zhodnocení vybraných metod akumulace energie.

Seznam doporučené literatury:

Entler S a kol. Budoucnost energetiky: jaderná fúze, Academia, Praha 2019

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Slavomír Entler, Ph.D. ústav energetiky**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

Ing. Slavomír Entler, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Meziokruh fúzní elektrárny pro vyrovnávání pulzního režimu fúzního reaktoru“ vypracoval samostatně a s použitím uvedené literatury a pramenů.

V Praze, dne 24. 05. 2022

.....

Jan Loskot

# Anotační list

---

<b>Jméno autora:</b>	Jan Loskot
<b>Název BP:</b>	Meziokruh fúzní elektrárny pro vyrovnávání pulzního režimu fúzního reaktoru
<b>Anglický název</b>	Fusion power plant intermediate circuit for balancing the pulsed operation of a fusion reactor
<b>Akademický rok:</b>	2021/2022
<b>Ústav/Odbor:</b>	Ústav energetiky/Jaderná energetická zařízení
<b>Vedoucí BP:</b>	Ing. Slavomír Entler, Ph.D.
<b>Bibliografické údaje:</b>	Počet stran: 63 Počet obrázků: 34 Počet tabulek: 7 Počet grafů: 8
<b>Klíčová slova:</b>	jaderná fúze, WCLL, HCBP, IHTS, ITER, DEMO, zásobníky energie
<b>Keywords:</b>	nuclear fusion, WCLL, HCPB, IHTS, ITER, DEMO, energy storage systems
<b>Abstrakt:</b>	<p>Teoretická část této bakalářské práce se skládá z rešerše výzkumu termojaderné fúze, jejích problémů a možných trendů do budoucna. Dále obsahuje rešerši vybraných variant odvodu tepla z fúzního reaktoru do meziokruhu v evropském prototypu fúzní elektrárny DEMO a popisem zmíněného meziokruhu. Praktická část je zaměřena na zhodnocení vhodných metod akumulace energie použitých pro dosažení stálého výkonu fúzní elektrárny v době prodlevy reaktoru. Zvolené metody akumulace jsou poté výpočtově aplikovány na vybrané metody odvodu tepla z reaktoru a porovnány na základě poskytnutých parametrů tekutých solí.</p>
<b>Abstract:</b>	<p>Theoretical part of this bachelor thesis consists of research on development of thermonuclear fusion, its difficulties and possible future trends. Theoretical part also contains research on chosen methods of heat transfer between the fusion reactor and the intermediate heat circuit in the European concept of fusion plant DEMO and the intermediate heat circuits description. Practical part is aimed at analysing suitable methods for energy storage used to achieve stable operation of a fusion plant during the dwell phase of a fusion reactor. These energy storage methods are then mathematically applied to chosen heat transfer methods and compared using provided parameters of molten salts.</p>

## **Poděkování**

Chtěl bych tímto poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Slavomíru Entlerovi, Ph.D., za věnovaný čas, poskytnutou literaturu a připomínky týkající se jak formální, tak věcné stránky této práce. Zároveň také děkuji Ing. Michalu Cihlářovi za poskytnutí dat shrnujících parametry tekutých solí, na kterých jsem zakládal svůj výpočet.

# Obsah

1	Úvod – motivace k fúzní energii.....	8
2	Teoretická část .....	9
2.1	Jaderná fúze a cesta k jejímu objevu .....	9
2.2	Princip jaderné fúze .....	10
2.2.1	Teoretické fungování procesu.....	10
2.2.2	Nutné podmínky pro sloučení jader.....	12
2.3	Realizace termojaderné fúze .....	14
2.4	Inerciální udržení.....	15
2.5	Magnetické udržení.....	16
2.5.1	Princip.....	16
2.5.2	Chování plazmatu v magnetickém poli .....	17
2.5.3	Realizace magnetického udržení.....	18
2.5.4	Stelarátor.....	20
2.5.5	Tokamak.....	22
2.6	Výhledy fúzní energie do budoucnosti.....	24
2.7	Fúzní elektrárna – Evropský koncept DEMO.....	25
2.8	Metody odběru tepla z reaktoru.....	27
2.8.1	Chlazení vodou (WCLL BB) .....	27
2.8.2	Blanket chlazený heliem – HCPB BB.....	28
3	Praktická část .....	30
3.1	Vhodné metody akumulace energie .....	30
3.2	Akumulace ve formě tepelné energie.....	30
3.2.1	Metoda dvou nádrží.....	31
3.2.2	Akumulace ve formě tepla pro fázovou změnu .....	32
3.2.3	Akumulace ohřevem média v termoklinické nádrži s pórovitým médiem .....	33
3.2.4	Vynechání akumulace .....	34
3.3	Použití tekutých solí pro ukládání tepelné energie.....	34
3.4	Výpočtová analýza variant .....	36
3.4.1	Seznam použitých symbolů a indexů .....	36
3.4.2	Zjednodušující předpoklady výpočtu .....	37
3.4.3	Rozbor tepelného výkonu přivedeného do parogenerátoru .....	39
3.4.4	Akumulace v systému horká/studená nádrž.....	41
3.4.5	Akumulace v termoklinickém tanku.....	50
3.4.6	Akumulace ve vícevrstevném zásobníku se změnou skupenství .....	53
3.5	Porovnání jednotlivých variant .....	55
3.5.1	Cena za médium pro akumulaci tepla.....	55
3.5.2	Provedení, problémy a omezení aplikace .....	56
4	Závěr.....	58
5	Seznam použitých zdrojů .....	59
6	Seznam obrázků, tabulek a grafů .....	62

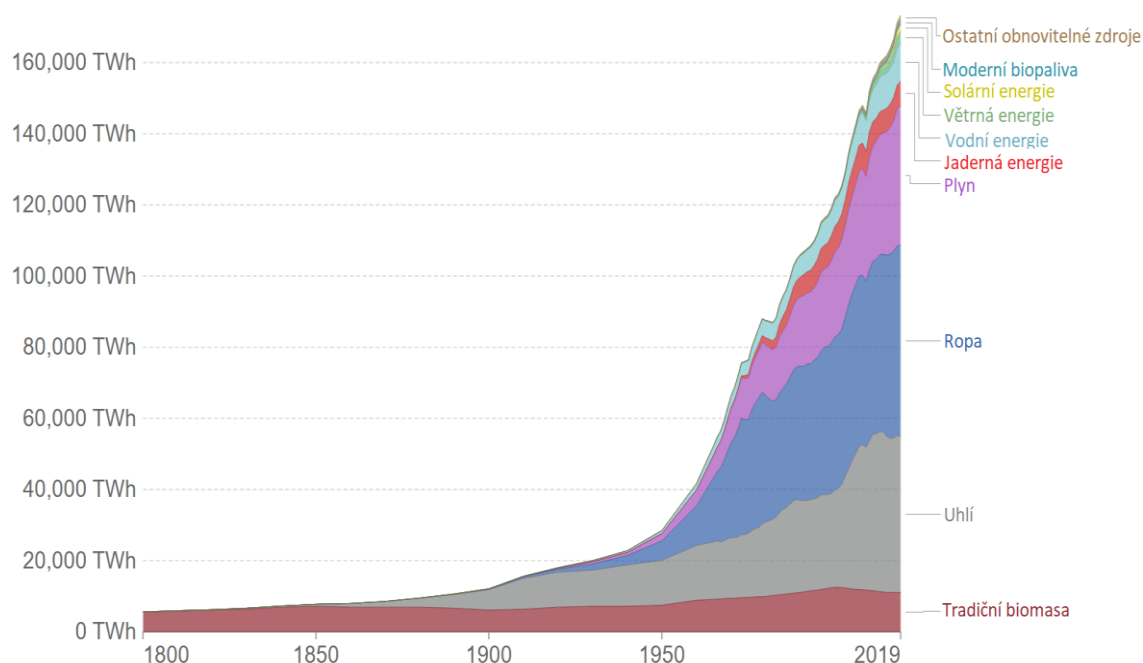
## Seznam použitých zkratk

NIF	National Ignition Facility
LHD	Large Helical Device
JET	Joint European Torus
TFTR	Tokamak Fusion Test Reactor
EAST	Experimental Advanced Superconducting Tokamak
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
DIV–Cass	Divertor Cassette
DIV–PFU	Divertor Plasma Facing Unit
WCLL	Water Cooled Lithium Lead Breeding Blanket
HCPB	Helium Cooled Pebble Bed Breeding Blanket
DEMO	Demonstration power plant
CSP	Concentrated Solar Power Plant
IHTS	Intermediate Heat Transfer System
R–C cyklus	Rankin–Clausiusův cyklus

# 1 Úvod – motivace k fúzní energii

Novodobá civilizace by se bez energie neobešla. Energii každý potřebujeme denně, a to v různých formách – ať už mechanické, tepelné, elektrické či jiné – stále ji na něco využíváme. Vzhledem k zákonu zachování energie a také druhému zákonu termodynamickému, který zavádí entropii, můžeme energii pouze měnit na jiný typ a při této přeměně vždy o určitou část energie přicházíme – přeměnění se na námi nevyužitelnou energii neboli disipuje.

Ze všech typů energie je bezpochyby nejužitečnější energie elektrická, protože ji dokážeme přeměňovat pohodlně na další typy, zejména na mechanickou (elektromotory), tepelnou (ohmický ohřev) a chemickou (elektrolýza, akumulátor). Problematické je to, že elektrickou energii neumíme čerpat, musíme ji vyrábět z jiných typů energie, například z té, kterou uměle „zachytíme“ z prostředí, ve kterém žijeme (za pomoci elektráren). Tento fakt s sebou nese jeden z největších problémů moderního světa – emise a dopad lidské činnosti na životní prostředí. V dnešní době zažíváme rapidní růst potřeby výroby energie, nemluvě o dosud neelektrifikovaných zemích, které tento růst do budoucna ještě zvýší. Vzhledem k aktuálnímu trendu, kdy asi 85 % vyrobené energie pochází z fosilních zdrojů (obr. 1), jejichž spalování s sebou nese produkci skleníkových plynů, jde o obrovský problém, který by právě fúze, díky její čistotě, mohla v budoucnu pomoci vyřešit.



Obrázek 1 – Světový energetický mix – roční produkce energie v TWh v průběhu let – zdroj [5]



## 2 Teoretická část

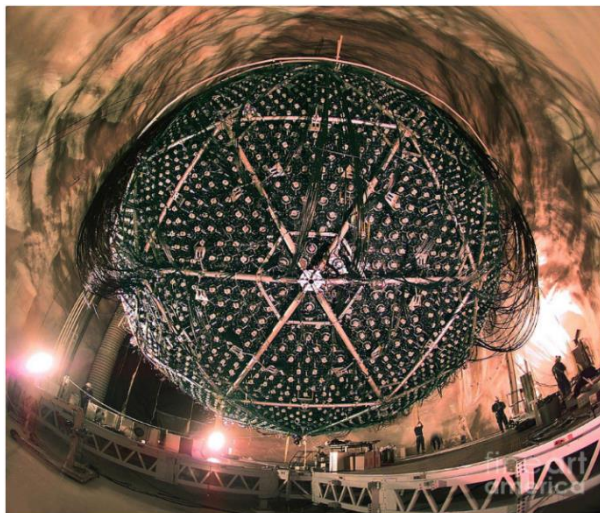
### 2.1 Jaderná fúze a cesta k jejímu objevu

Velká část zdrojů energií na Zemi je svázána se Sluncem. Uhlí jsou zuhelnatělé dřeviny, které rostly díky fotosyntéze. Při jeho spalování se dá obrazně říct, že si tuto energii bereme zpět. Stejně tak větrná energie vzniká díky tlakovým gradientům, vzniklým rozdělením teplot na planetě, které Slunce přímo ovlivňuje. Nutno dodat, že celkové rozložení podnebí na planetě je také určováno zářivou energií slunce, v průběhu roku. Je tedy zřejmé, že Slunce a ostatní hvězdy produkují velké množství energie a v historii bylo jednou z otázek vědy zjistit, co je jejím zdrojem.

Ke zjištění existence jaderné fúze byly klíčové dva objevy. V roce 1905 objevil Albert Einstein možnost přeměny hmoty na energii a popsal ji matematicky rovnicí  $E = m \cdot c^2$  [1]. Tato rovnice říká třeba to, že když atom při radioaktivním přechodu vyzáří energii do okolí, jeho hmotnost se nutně musí zmenšit. V té době šlo o průlomovou úvahu – hmota je pouze další typ energie – bylo ale těžké ji ověřit.

O necelých 10 let později, v roce 1920, sestrojil francouzský chemik Francis Aston tzv. hmotnostní spektrograf, který dokázal velice přesně měřit hmotnost atomů a zjistil například to, že existují izotopy (atomy stejného prvku s rozdílným počtem neutronů) a také fakt, že čtyři atomy vodíku jsou o trochu těžší než jeden atom helia. Do té doby se ale předpokládalo, že jeden atom helia je tvořen čtyřmi atomy vodíku – malá část hmotnosti chyběla [1].

Tyto dva objevy vedly k závěru, že při slučování lehkých atomů na těžší se může uvolnit energie – dnes víme, že jde o fúzní energii – která je ekvivalentní úbytku hmotnosti. To dalo odpověď i na otázku, co stojí za produkcí energie ve Slunci, které se skládá především z vodíku (71,6 %) a helia (27 %) [37]. Zbývala otázka, zda se tato energie dá využít i na Zemi.



Obrázek 2 – Detektor neutrin 2 km pod zemí v neutrinové observatoři Sudbury – zdroj

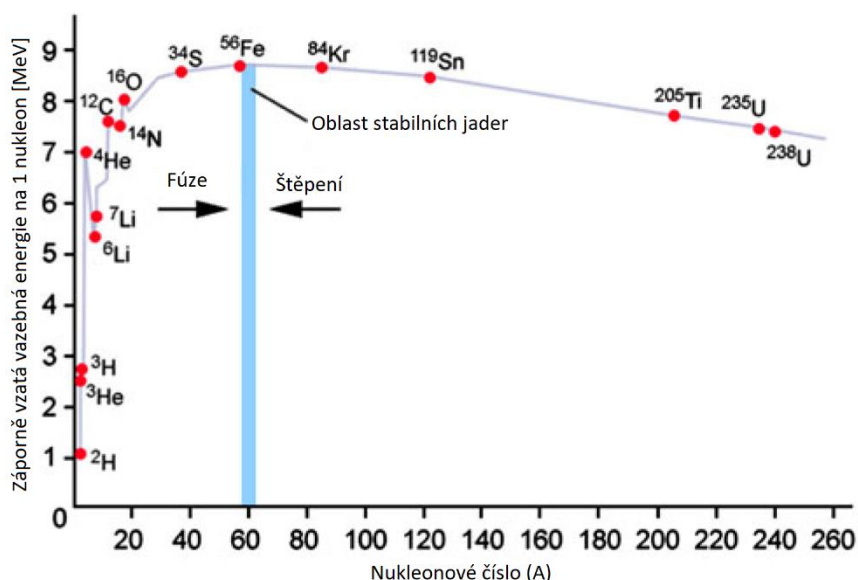
Toto byl průlomový objev, protože do té doby nikdo nedokázal vysvětlit, proč Slunce může generovat takové množství energie, aniž by rychle vyhaslo. Nyní již víme, že při daných rychlostech fúzní reakce vodík → helium na Slunci, si vystačí jen s vodíkem na 10 miliard let [1].

Přesný typ fúzní reakce, probíhající na Slunci, byl potvrzen teprve před 22 lety, v roce 1999 v neutrinové observatoři v Sudbury (Kanada, obr. 2). A to i přes to, že matematicky byl fúzní cyklus na Slunci popsán již v letech 1938 – 1939 Hansem Bethem a Charlesem Critchfieldem na základě hypotézy z roku 1920 astrofyzika Arthura Eddingtona [2].

## 2.2 Princip jaderné fúze

### 2.2.1 Teoretické fungování procesu

Jaderná fúze je obecně slučování jader lehkých prvků za vzniku jader těžších prvků a uvolnění vazebné energie. Jde o pravý opak jaderného štěpení. Při štěpení se těžká a nestabilní jádra rozpadají na jádra lehčí a energie se tím uvolňuje. Opačně to funguje taktéž – jádra některých prvků potřebují dodat vazebnou energii k tomu, aby se sloučila a některá k tomu, aby se rozpadla. Tento fakt je vidět na křivce, označované jako *binding energy curve* (obr. 3). Která ukazuje využitelnou vazebnou energii v MeV v závislosti na nukleonovém čísle prvku.

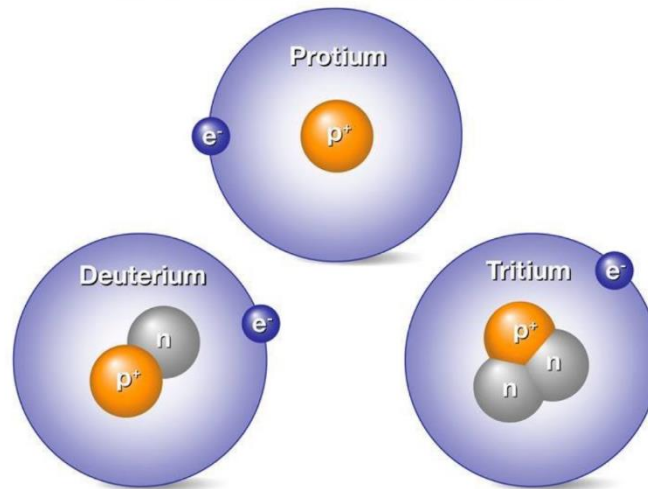


Obrázek 3 – Vazebná energie uložená v jádrech prvků – zdroj [3]

Diagram dělí na dvě části nejstabilnější prvek ve vesmíru – železo  $^{56}\text{Fe}$ . Jádra prvků nalevo od něj se dají slučovat v těžší jádra (jaderná fúze) a naopak všechna jádra napravo se mohou rozpadat na jádra lehčí (jaderné štěpení), obojí při energetickém zisku. Čím dále od železa prvek stojí, tím je proces energeticky výhodnější. To potvrzuje i současnou praxi – v jaderných štěpných reaktorech se štěpí nejčastěji jádra uranu a momentálně zkoumaná jaderná fúze pracuje s fúzí vodíku v helium. Ve skutečnosti probíhá teoreticky ve vesmíru jaderná fúze všech prvků a čím jsou těžší, tím extrémnější podmínky jsou vyžadovány, aby k fúzi došlo [1].

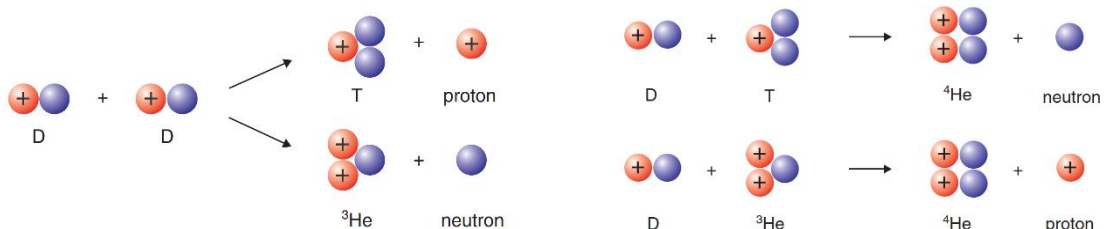
Pro nás nejzajímavější je jaderná fúze vodíkových jader na jádra helia, která má největší energetický potenciál. Vodík se v přírodě vyskytuje ve třech možných izotopech (obr. 4). Vodík  ${}^1_1\text{H}$  se vyskytuje nejčastěji a je někdy označován jako lehký vodík. Deuterium  ${}^2_1\text{H}$ , označovaný těžký vodík se značkou **D**, se sice vyskytuje méně, ale i tak v globálně hojném množství – asi jeden ze sedmi tisíc atomů vodíku je atom deuteria [1]. Nejtěžší izotop, tritium  ${}^3_1\text{H}$ , značený značkou **T**, je nestabilní, radioaktivní a podléhá beta rozpadu, s poločasem rozpadu asi 12,3 let [6]. V přírodě se vyskytuje velice málo a pro využitelnost při fúzi je nutné ho vyrábět.

## IZOTOPY VODÍKU



Obrázek 4 – izotopy vodíku – zdroj [7]

Kvůli existenci izotopů může fúze vodíku začínat dvěma způsoby. Rozeznáváme DT fúzi a DD fúzi (obr.5) – podle toho, které izotopy vodíku v ní figurují na počátku. Fúzní reakce vodík → helium probíhá vždy ve čtyřech krocích, ale u DD reakce musí ještě tritium vzniknout fúzí samotnou, kdežto u DT reakce ho přímo dodáváme (resp. ho „vyrábíme“, momentální koncepce v tokamacích je, že vzniká reakcí ve stěně reaktoru, která obsahuje Lithium) [1],[2].

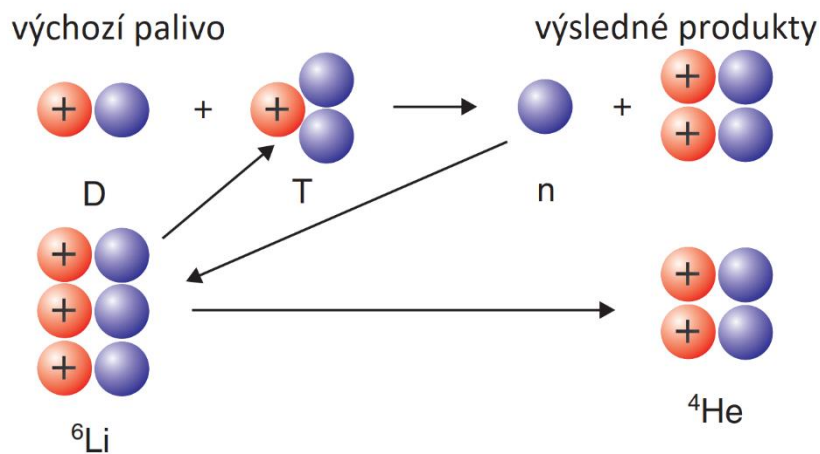


Obrázek 5 – Fúzní reakce vodík → helium – zdroj [1]

DD fúze může probíhat dvěma způsoby. Buď za vzniku Tritia + protonu, nebo vzácného izotopu helia  ${}^3_2\text{He}$  a neutronu. Tyto dva konečné prvky potom reagují s dalším atomem deuteria za vzniku izotopu běžného helia  ${}^4_2\text{He}$  a neutronu nebo protonu, dle vstupního atomu z DD reakce.

DT fúze probíhá rovnou za vzniku atomu helia  ${}^4_2\text{He}$  a neutronu (obr. 5, vpravo nahoře). Vzhledem k výrobě tritia přímo v reaktoru štěpnou reakcí s Lithiem ve stěně, probíhá celá DT reakce dle jednoho z následujících vzorců, dle vstupního izotopu Lithia:  ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + \text{T}$  nebo  ${}^7\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + \text{T} + n$ . Reakce s izotopem  ${}^7\text{Li}$  je endotermická, takže tento lithiový mezikrok spotřebuje energii [1]. Bez uvážení reakce s lithiem vyprodukuje teoreticky jedna celková fúzní DT reakce vodík  $\rightarrow$  helium energii 43,2 MeV (cca.  $7 \cdot 10^{12}$  J) [2].

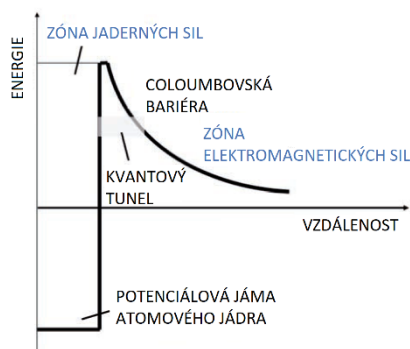
V současnosti se výzkum využitelné fúze zaměřuje na DT fúzi, protože je méně náročná, co se podmínek pro její zapálení týče a je snazší z ní vytěžit žádaný energetický zisk [2]. DD fúze je hubbou budoucnosti vzhledem k podmínkám pro její realizaci – avšak její provedení přináší velkou konstrukční a funkční výhodu, odjímá nám totiž potřebu dodávat tritium přímo do prvotní reakce. Momentální koncept DT fúze, kde je palivem lithium a deuterium, probíhá dle obr. 6.



Obrázek 6 – Celková fúzní reakce vodík  $\rightarrow$  helium – zdroj [1]

### 2.2.2 Nutné podmínky pro sloučení jader

Základ teorie za fúzní reakcí je přehledný. Problém nastává při pokusu o její realizaci. Snažíme se sloučit dvě vodíková jádra se stejným, kladným nábojem – jádra se odpuzují. Aby k fúzi došlo, musíme jádra přiblížit na takovou vzdálenost, kdy přitažlivá jaderná síla překoná odpudivou elektrostatickou sílu (označovanou jako Coloumbovská bariéra) danou nábojem jader (obr. 7).

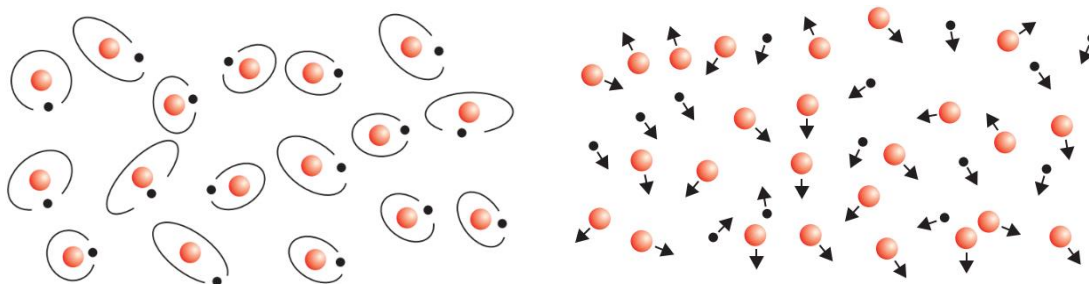


Obrázek 7 – Vyobrazení Columbovské bariéry, kterou je nutné překonat – zdroj [2]

K překonání této vzdálenosti do jisté míry pomáhá kvantové tunelování, nicméně i tak musí mít jádra dostatečnou energii, aby se mohla překlenout do tzv. potenciálové jámy, sloučit se, uvolnit vazebnou energii, a dosáhnout nového stabilního stavu. V historii se vědci pokoušeli dodat energii různými způsoby, odtud pochází koncepty jako mionová katalýza, či srážky jader v urychlovači [2]. Nicméně tyto cesty zatím k využitelné fúzi nevedly, protože nutná dodaná energie je vždy větší, než energie získaná. Proto se současný výzkum fúze zaměřuje na dodání energie ohřevem na velmi vysokou teplotu – neboli **termojadernou fúzi** (dále jen fúzi).

Z tohoto důvodu se také snažíme o DT fúzi. Potenciálová jáma jádra se dá totiž představit jako doslovná jamka o velmi malém průřezu, do které chceme aby jádro spadlo, označovaném též jako účinný průřez. Právě DT fúze má největší účinný průřez při nejnižší dodané energii. Hodnota energie pro největší účinný průřez DT fúze, kterou dodáme jádrům, je vyčíslena na 100 keV [1].

Termojaderná fúze je výhodná, protože využívá samotnou fyzikální podstatu vlastností skupenství látek. Vodík sám o sobě je plyn. Už i plyn je výhodný – atomy plynu do sebe samovolně naráží, avšak s příliš malou energií pro účel fúze. Když plynu dodáme potřebné množství energie, některá atomová jádra se oddělí od obalu. Poté postupně, v širokém rozsahu teplot, vzniká směs iontů, nukleonů a elektronů, čtvrté skupenství hmoty, označované jako plazma. Podle toho, kolik atomů se rozdělí hovoříme o stupni ionizace plazmatu. Plazma má oproti plynu velmi užitečnou vlastnost – je dobře elektricky vodivé, protože jde o shluk různě nabitých částic (obr.8).



Obrázek 8 – Znázornění rozdílu mezi plynem (vlevo) a plazmatem (vpravo) – zdroj [1]

Kvůli tomu, že plazma samotné má vysokou energii a dodáváním energie se pohyb částic ještě urychluje (rychlejší srážky), můžeme plazma pouze ohřát na dostatečně vysokou teplotu a díky samovolně se srážejícím jádrům je určitá pravděpodobnost, že k fúzi bude mezi jádry docházet a systém si zachová stále nějakou energii. Zbývá vyřešit to, jak plazma udržet pohromadě a vyčíslit potřebnou teplotu. Nutno dodat, že pro potřebu co největší hustoty paliva, je pro fúzi ideální prostředí co nejvyšší vakuum. Cizí prvky v plazmatu totiž hustotu paliva snižují [1].

## 2.3 Realizace termojaderné fúze

Snaha je jasná. Chceme, aby se jádra slučovala dostatečně často na to, aby vytěžená fúzní energie byla minimálně stejná, jako energie stále dodávaná systému. Tento bod se označuje jako vědecké vyrovnaní (scientific breakeven) [2]. To nám ovšem nestačí, chtěli bychom aby plazma začalo samo pohánět svou vlastní fúzi – energie, kterou plazma absorbuje z vlastní fúze se rovná energii, kterou plazma ztratí do okolí – tzv. zapálení. Velmi důležitá rovnováha je také tzv. inženýrské vyrovnaní (engineering breakeven) [2], kdy chceme, aby se celkový získaný fúzní výkon rovnal dodávanému výkonu v celé elektrárně.

Podmínku pro rovnováhu sestavil britský fyzik John Lawson a po něm se také nazývá Lawsonovo kritérium. To říká, že součin hustoty jader  $n$  ( $\text{m}^{-3}$ ) a doby udržení energie  $\tau_E$  (s) musí být stejný, nebo větší, jako určitá hodnota závislá na teplotě. Doba udržení označuje, jak dlouho je plazma v tepelné rovnováze (ztrátový výkon se rovná tepelnému výkonu plazmatu):

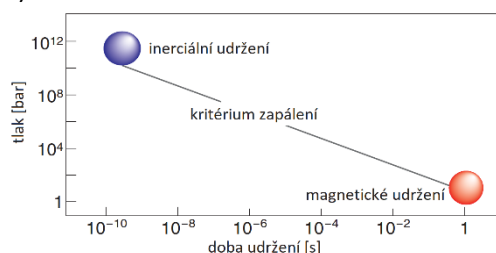
$$n \cdot \tau_E \geq f(T)$$

Vzhledem k tomu, že hustota a další parametry plazmatu jsou závislé na teplotě, tato rovnice se užívá pro magnetické udržení plazmatu ve formě tzv. trojného součinu:

$$n \cdot \tau_E \cdot T \geq \text{konst.}$$

Ukázalo se, že pro smysluplnou realizaci doby udržení a hustoty částic je tato konstantní hodnota DT fúze asi  $3 \cdot 10^{21}$ , přičemž teplotu  $T$  uvažujeme v rozsahu 100 až 200 milionů °C pro platnost trojného součinu [1]. Ve fyzice plazmatu se uvádí teplota častěji v jednotkách keV. Jednotka tak vyjadřuje, že elektron při termodynamické teplotě  $T$  má určitou energii v keV. Zde to přibližně odpovídá rozsahu 10–20 keV. Přepočet je dán Boltzmannovou konstantnou, a proto obecně energie 1 keV odpovídá teplotě asi  $11,6 \cdot 10^6$  K.

Součin hustoty částic a teploty se dá vnímat jako tlak v plazmatu. Rovnice se dá tedy chápat jako součin tlaku a doby udržení [1]. Máme zde dvě možnosti. Buď za velmi krátkou dobu udržení dosáhneme vysokého tlaku, tomuto principu fúze se říká inerciální udržení. Nebo udržet plazma v rovnováze co možná nejdéle za nižšího tlaku, tento způsob je označován jako magnetické udržení (obr.9).

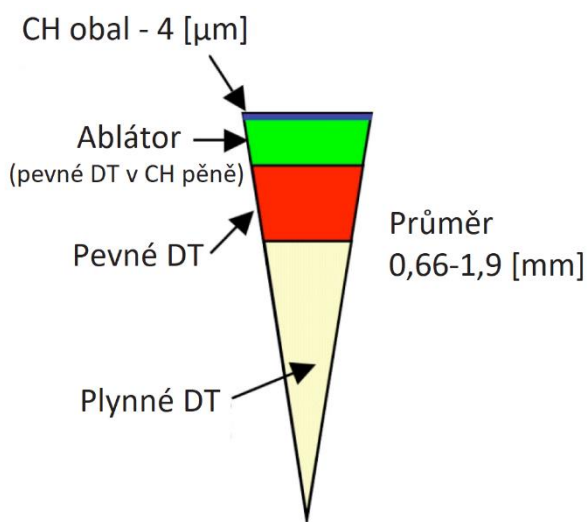


Obrázek 9 – Možnosti dosažení podmínek pro zapálení – zdroj [1]

## 2.4 Inerciální udržení

Myšlenka inerciálního udržení je zahřát palivo na požadovanou teplotu tak vysokou rychlostí, že dojde k zapálení fúze a palivo stihne zreagovat rychleji, než se plazma rozpadne (rozletí a vychladne). Název „inerciální“ vychází z pojmu inerce neboli setrvačnost. Díky intenzivnímu působení energie na palivo se jeho obal začne prudce odpařovat. Reakcí na toto odpařování je potom obrovský tlak, který stlačuje palivo.

Palivo je v tomto případě ve formě terčičků, o průměru do 2 mm. Jako způsob dodání potřebné nárazové tepelné energie existují momentálně jen velice výkonné ultrafialové lasery, jejichž výzkum stále postupuje kupředu. Palivo se skládá z několika částí. Jádrem tvoří plynné DT palivo, okolo kterého je vrstva zmraženého DT paliva. Terčiček je obalen tzv. ablatorem (tepelným štítem), viz obr. 10. Výzkumem zapálení fúze za pomoci laserů se momentálně zabývá hlavně National Ignition Facility (NIF) v Kalifornském městě Livermore.



Obrázek 10 – Výřez ze standardního palivového terčičku v NIF – zdroj [8].

V této instituci se též zabývali problémem rovnoměrného ohřevu terčičku a v roce 1975 přišli s chytrým přípravkem nazývaným hohlraum (z němčiny – dutina). Jde o dutinu ze zlata, do které se nasměrují laserové paprsky. Ty potom intenzivně zahřívají vnitřek dutiny, který se začne odpařovat a následně ionizovat. Vzniklé plazma produkuje rentgenové záření, které se odráží mezi stěnami dutiny a terčičkem, čímž se terčiček velice intenzivně a rovnoměrně zahřívá. Navíc má rentgenové záření menší vlnovou délku než ultrafialové záření laseru, a tím pádem dokáže působit homogenněji. Terčiček se tak stlačuje na hustotu až 100x větší, než je hustota olova a dosahuje konečné teploty cca. 10 keV, při které dojde k zapálení fúze [9]. Celý proces je zobrazen na obr. 11. Při ohřevu s využitím dutiny hovoříme o nepřímém ohřevu.



Obrázek 11 – Fáze fúze s inerciálním udržením při nepřímém ohřevu za pomoci hohlraumu – zdroj [9]

Komerční využitelnost fúze s inerciálním udržením je momentálně ještě daleko kvůli účinnosti laserů. Výzkum superlaserů stále pokračuje a momentální lasery nejsou schopné s takovou účinností dodávat potřebné výkony, aby byl získaný fúzní výkon větší, než výkon dodaný. Další problém je s cenou výroby palivových terčů včetně hohlraumu, protože se jich musí spotřebovat mnoho, a to je zatím velmi prodělečné (kvůli poměru výkonu na terč).

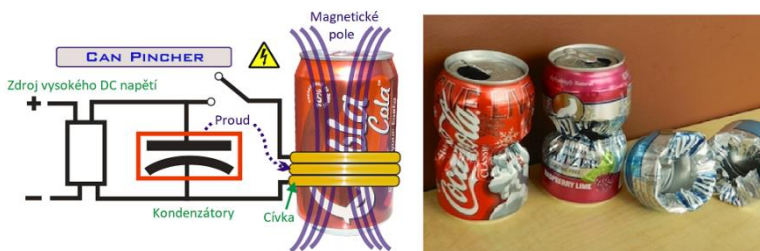
Momentální rekord z NIF je dodaná ultrafialová zářivá energie 2,15 MJ a vytěžená fúzní energie přes 1,3 MJ, oba nezávisle na sobě z roku 2021. Rekordu 1,3 MJ bylo dosaženo během  $1 \cdot 10^{-10}$  sekund, to činí fúzní výkon více, než  $1,3 \cdot 10^{16}$  W [9]. Pro srovnání – při uvažování roční hrubé výroby elektřiny v České republice cca. 88 TWh by tento fúzní výkon pokryl roční výrobu celé naší republiky za necelých 25 sekund.

## 2.5 Magnetické udržení

### 2.5.1 Princip

Při magnetickém udržení je snaha vytvořit vysokoteplotní plazma, ve kterém probíhá s určitou (co největší) pravděpodobností fúze částic, a co nejdelší dobu ho chránit před vychladnutím za pomoci magnetického pole. Problém plazmatu je, že je velmi nestabilní – jde přeci jen o neuspořádaný shluk různě nabitých částic, které do sebe volně narážejí, a navíc mají vysokou energii. Plazma se tak velmi snadno ochlazuje, ztrácí energii a přechází v plyn.

Počátkem myšlenky využití magnetického pole k udržení plazmatu pohromadě byl objev tzv. pinč-effektu (obr.12) [1]. Zjistilo se, že při udeření blesku do hromosvodu projde vodičem tak velký proud, že indukované magnetické pole ho stlačí směrem dovnitř a vodič zůstane trvale deformovaný. Vzhledem k vodivosti plazmatu vědce napadlo, že by se tohoto efektu mohlo využít pro ochranu plazmatu před okolím, vytvořením jistého magnetického „obalu“, který bude plazma držet pohromadě dostřednou silou.



Obrázek 12 – pinč efekt demonstrováný zařízením „Can pincher“ na hliníkových plechovkách. – zdroje [10,11]



## 2.5.2 Chování plazmatu v magnetickém poli

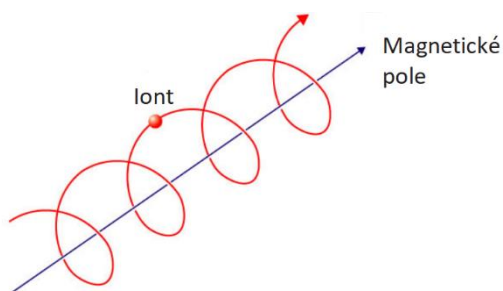
Teoretickým popisem chování plazmatu se zabývá fyzika plazmatu. Plazma je sice „jen“ ionizovaný plyn, ale jeho chování se na tolik liší od plynu, že vyžaduje svou vlastní vědeckou disciplínu. Co se samotné ionizace týče, ta probíhá za široké škály teplot (nejde tedy o běžnou změnu skupenství). Na venek se plazma chová jako elektricky neutrální (mluvíme o tzv. kvazineutralitě), ale jde o shluk různě nabitých (i neutrálních) částic, takže lokálně v něm vznikají elektrická a magnetická pole. Zároveň v něm dochází k interakcím mezi ionty a volnými i vázanými elektrony, které produkují elektromagnetické záření v celém spektru od radiových frekvencí až po tvrdé rentgenové záření [2].

Mezi další vlastnosti plazmatu patří jeho tzv. kolektivní chování. Díky existenci vazeb mezi částicemi, které mají velký dosah (hlavně Coloumbovy síly), reakce plazmatu na vnější podněty je do jisté míry společná [2]. Právě díky kolektivnímu chování je možné plazma držet v magnetickém poli a šířit skrze něj různé typy vln. Kolektivní chování také znamená to, že se plazma může chovat i jako proud kapaliny – globálně měnit tvar průřezu a dochází v něm k turbulentním jevům a vírům.

Zrychlený pohyb samotných částic v plazmatu, na které působí elektrické a zároveň magnetické pole, je ovlivňován Lorentzovou silou dle vztahu:

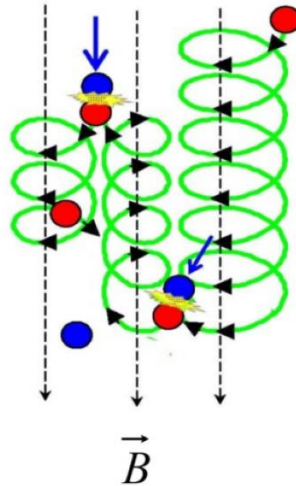
$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{v} \times \vec{B} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Rovnice říká, že částice o náboji  $q$  je urychlována Lorentzovou silou ve směru elektrického pole  $E$ . Pokud se částice pohybuje ve směru rovnoběžném s magnetickým polem ( $\vec{v} \times \vec{B} = 0$ ), nepůsobí na ni od tohoto pole síla. Největší síla na částici působí, pohybuje-li se ve směru kolmém na magnetické pole (součin  $\vec{v} \times \vec{B}$  dosahuje maxima). Částice se tedy ve směru magnetického pole pohybuje volně a při pohybu kolmo na tento směr vykonává tzv. *gyrační* pohyb po kruhové trajektorii, kde poloměr této trajektorie je nazýván Larmorův poloměr (obr.13) [2]. Jinými slovy částice, která se pohybuje ve směru elektrického pole a začne se pohybovat kolmo na směr magnetického pole, je magnetickým polem stáčena a výsledný pohyb koná po šroubovici, jejíž osa je siločára magnetického pole (obr. 13).



Obrázek 13 – Výsledný gyrační pohyb kladně nabitého iontu – zdroj [12]

Směr stoupání šroubovice je dán nábojem částice. Tím, že dochází i k volnému srážení částic, středy jejich gyračí se samovolně posouvují tam a zpět ve směru kolmém na magnetické pole – jejich gyrační centra se posouvají o násobky Larmorova poloměru a střídavě o tento násobek poskakují (obr. 14).



Obrázek 14 – Skoková změna polohy gyračního centra daná srážkou částic – zdroj [13]

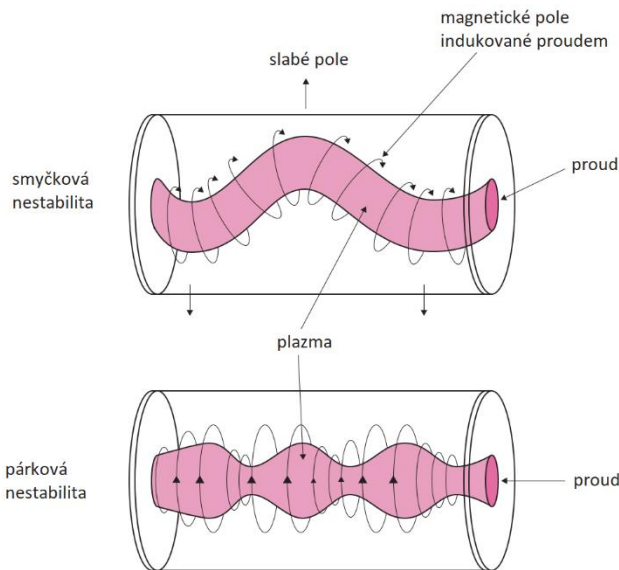
Kvůli tomu, že reálné magnetické komory mají různě zakřivená a nehomogenní magnetická pole, řeší se také transport částic, kde částice konají specifické pohyby dané těmito odchylkami od ideálního tvaru pole, a ne pouze lineární tok ve směru magnetického pole. Obecně se pohyb částic řeší složitými matematickými modely za pomoci výpočetní techniky.

### 2.5.3 Realizace magnetického udržení

Snaha spočívá tedy ve vytvoření magnetického obalu, který chrání plazma před okolím a zároveň materiál komory před extrémními teplotami. Plazma pak chceme ohřát na teplotu nutnou k zapálení a udržovat ji co nejdéle. Obal je realizován vytvořením magnetického pole v rovině průřezu komory (poloidální magnetické pole), které plazma pinčuje směrem dovnitř.

Byly provedeny pokusy s válcovou vakuovou komorou na jejichž koncích byly různé systémy zrcadel, každopádně nepodařilo se nijak zabránit úniku částic ven z komory [1]. To vyřešila komora zvaná torus. Torus, od geometrického tvaru – toroid – je válec stočený k sobě svými konci tak, aby plazma nemohlo z konců unikat do okolí.

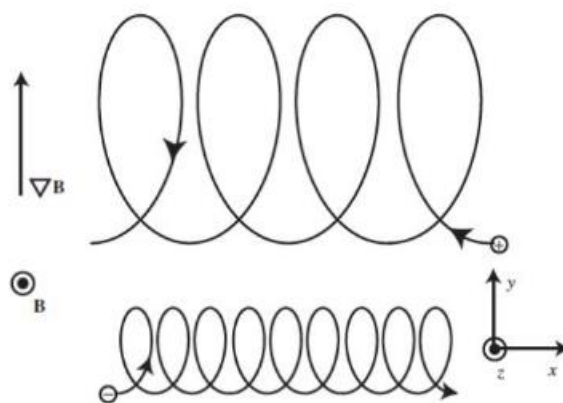
Problém systému pouze s poloidálním polem jsou nestability plazmatu. Čistě poloidální pole stlačuje plazma směrem dovnitř. V komoře se kvůli tomu plazma buď kroutí a narazí do stěn komory (tzv. smyčková nestabilita) anebo se v nějakém místě smáčkne a v jiném tím pádem roztáhne (tzv. párková nestabilita, či zaškrfování) (obr. 15).



Obrázek 15 – Nestability plazmatu v lineární komoře – zdroj [1]

Tyto nestability se částečně vyřešily přidáním cívek okolo stěn toru. Ty v plazmatu vytváří přidavné toroidální magnetické pole (ve směru střednice toru). Výsledné magnetické pole je proto šroubovicové (helikální).

Tvar toru také bohužel přinesl problém nehomogenního magnetického pole, které slábne směrem od středu toru ven. Protože Larmorův poloměr je nepřímo úměrný magnetické indukci, směrem od středu toru se poloměr zvětšuje a částice tak konají pohyb po křivkové trajektorii s proměnným poloměrem. Jde o tzv. grad-B drift – střed jejich gyračního pohybu se posouvá kolmo na siločáry toroidálního magnetického pole (v poloidální rovině) (obr. 16). Směr pohybu gyračního centra udává opět náboj částice.

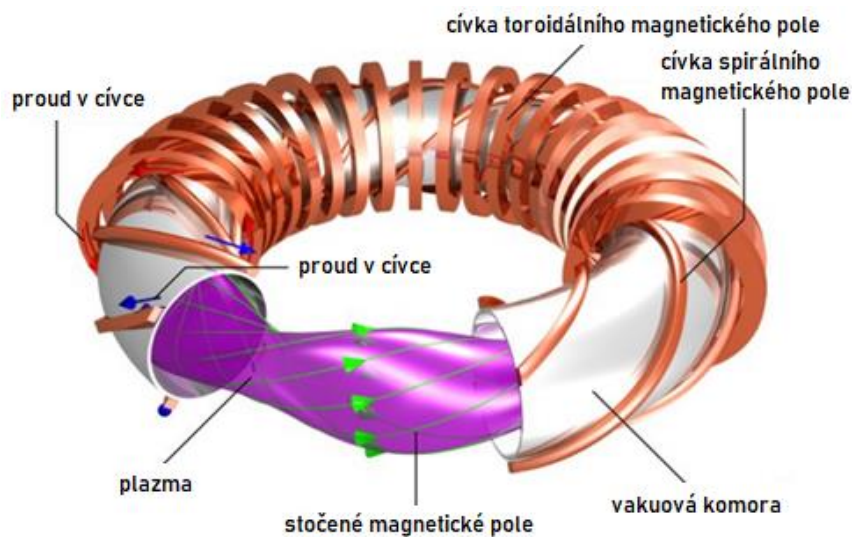


Obrázek 16 – grad-B drift způsobený nehomogenním magnetickým polem. Směrem nahorů se síla pole zvětšuje. Částice, podle svého náboje, driftuje podél osy x. Siločáry toroidálního pole jdou směrem ven z obrázku – zdroj [14]

Zařízení, která se pro výzkum magnetického udržení používají v dnešní době, mají různé kombinace magnetických polí, metod jejich indukce a způsobu ohřevu plazmatu. Kvůli tomu se v nich vzájemně liší chování plazmatu. První zařízení bylo nazýváno toroidální pinč [1]. Nejslibnější zařízení, na která se výzkum aktuálně zaměřuje jsou hlavně stelarátory a tokamaky.

#### 2.5.4 Stelarátor

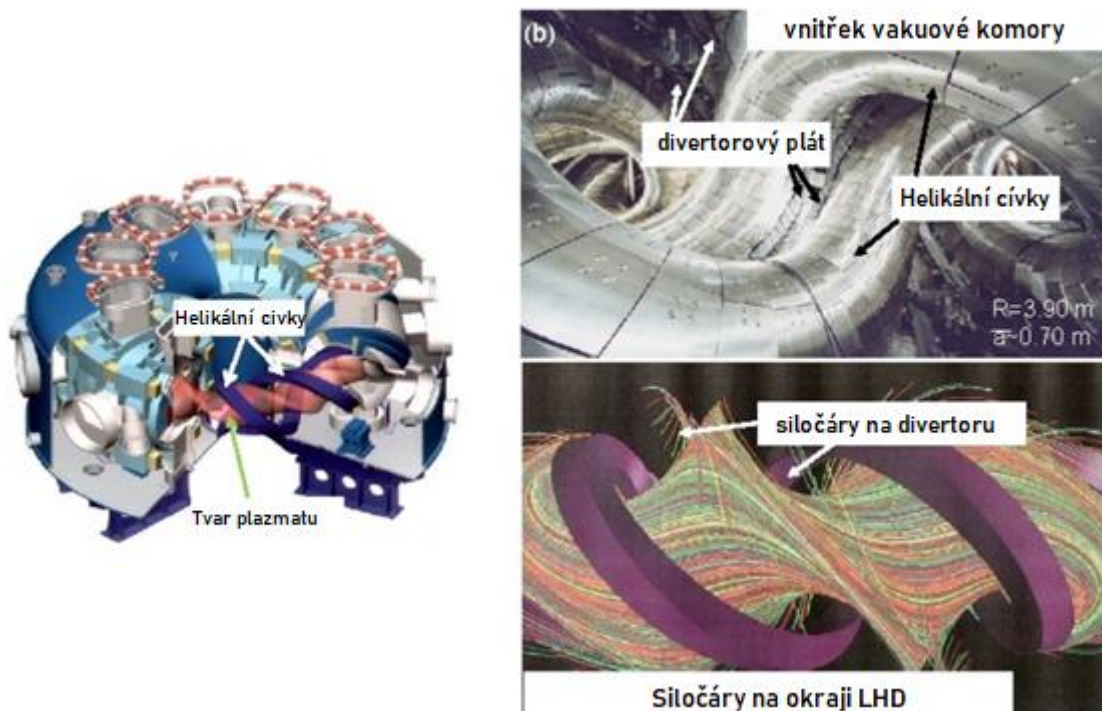
Myšlenku stelarátoru položil v 60. letech 20. století americký astrofyzik Lyman Spitzer [1]. Vycházela z toroidálního pinče, každopádně v plazmatu nebylo vytvářeno poloidální pole indukci elektrického proudu v plazmatu, plazma se tak ve stelarátorech nachází v ustáleném stavu – částice nejsou hnány elektrickým polem po obvodu. Místo toho byla snaha o tvorbu silného toroidálního pole, které plazma drží pohromadě. Samotné toroidální pole však nestačilo pro stabilizaci plazmatu, docházelo k jeho proražení částicemi. Šlo o to vymyslet, jak pole stočit. Prvotní pokus proběhl se stočením celé komory do tvaru osmičky. Jako lepší způsob se ale ukázalo přidat okolo komory spirální cívky se střídavým proudem, které pole stáčí. Tím vznikl koncept „konvenčního“ stelarátoru (obr. 17).



Obrázek 17 – konvenční stelarátor – zdroj [15]

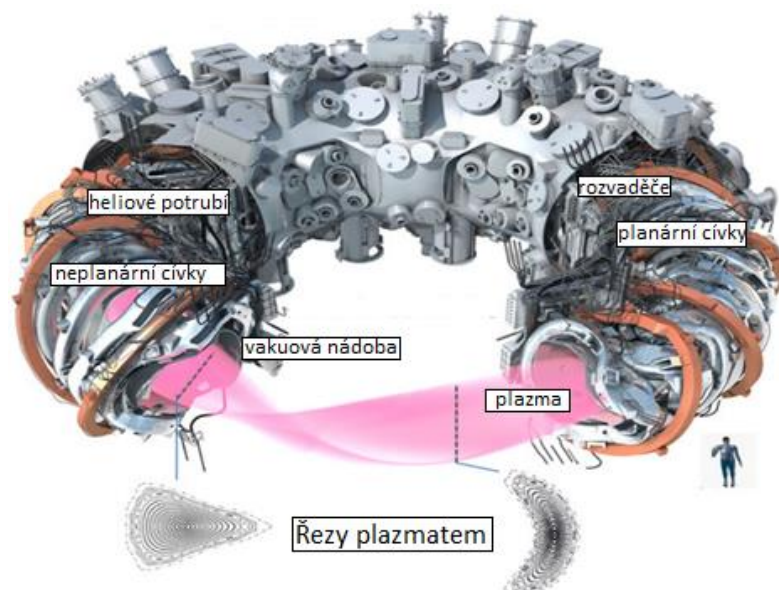
Jinou možností, jak stočit pole je uspořádání označované torsatron nebo heliotron, kde je spirálními cívkami obaleno přímo plazma. Přídavné cívky poloidálního pole mají tvar prstenců a jsou umístěny v rovnoběžných rovinách kolmých na rotační osu komory. Na tomto principu funguje například Large Helical Device (LHD) v městě Toki v Japonsku (obr.18).

## Large helical device (LHD)



Obrázek 18 – Large Helical Device, Toki, Japonsko – zdroj [16]

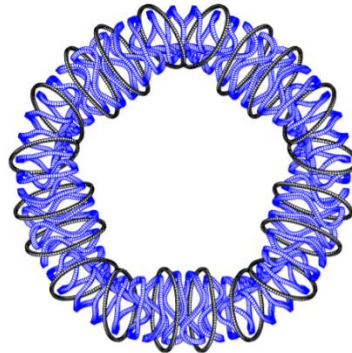
Stelarátory si také oproti tokamakům slibují to, že jsou schopné nepřetržitého provozu, právě kvůli absenci potřeby indukovat v plazmatu elektrický proud. Zároveň dokáží dosáhnout fúze při podstatně menších rozměrech reaktoru a tím pádem investičních nákladech. Velký problém v historii ale byl, že přesné tvary magnetických polí pro funkčnost reaktoru bylo nemožné určit bez pokročilé výpočetní techniky. V dnešní době je to však možné a stelarátory mají potenciál soupeřit s tokamakem. Aktuálně asi nejpopulárnější je výzkumný stelarátor v Německém Greifswaldu, který byl dostavěn v roce 2015 a nazývá se Wendelstein 7-X (obr.19).



Obrázek 19 – Náhled Stelarátoru Wendelstein X-7 – zdroj [18]

V tomto stelarátoru se realizuje stočení magnetického pole velmi precizním tvarem toroidálních, supravodivých cívek. Jedná se o složité křivkové tvary, které musely být přesně určeny výpočtovými modely. I přes zdánlivou složitost tvarů cívek dosahuje celek tzv. pětinasobné symetrie a tím pádem jde o velice elegantní zařízení (obr.20).

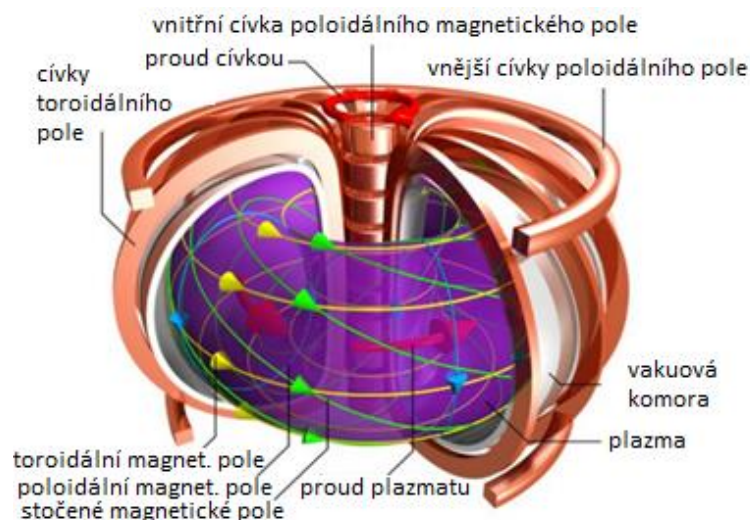
Dodnes řešeným problémem stelarátorů je nežádoucí průraz magnetického pole částicemi, což je momentálně společně s extrémní komplexností zařízení hlavní nevýhoda oproti tokamakům. Snaha je za pomoci optimalizací tyto ztráty minimalizovat.



Obrázek 18 – cívky stelarátoru Wendelstein 7-X seshora, tvořící pětiúhelník (pětinas. symetrii) – zdroj [19].

### 2.5.5 Tokamak

Druhé hlavní zařízení pro fúzi magnetickým udržením, které je momentálně populárnější než stelarátor, se nazývá tokamak (obr.21). Jeho konfigurace a princip byl vyvinut v Ústavu pro atomovou energii I.V.Kurčatova v Moskvě.



Obrázek 19 – Schéma tokamaku s označením hlavních částí – zdroj [18]

Oproti stelarátoru má centrální solenoid, který v plazmatu indukuje elektrický proud dosahující hodnot miliónů ampér (plazma se chová jako sekundární vinutí transformátoru).

Tento proud částic ohmicky ohřívá plazma a také generuje část poloidálního magnetického pole. Zároveň jsou okolo komory (stejně jako u stellarátoru) přidány cívky toroidálního magnetického pole. Tyto cívky generují podstatně silnější magnetické pole (cca. 10x [1]), než je pole poloidální, a proto má výsledné šroubové pole velmi velké stoupání, což přispívá ke stabilitě plazmatu. Navíc výsledný fúzní výkon tokamaku roste se 4. mocninou velikosti právě toroidálního pole [2], takže je snaha, aby tyto cívky byly co nejvíce vodivé (ideálně supravodivé) a samozřejmě co možná největší, v přijatelné míře.

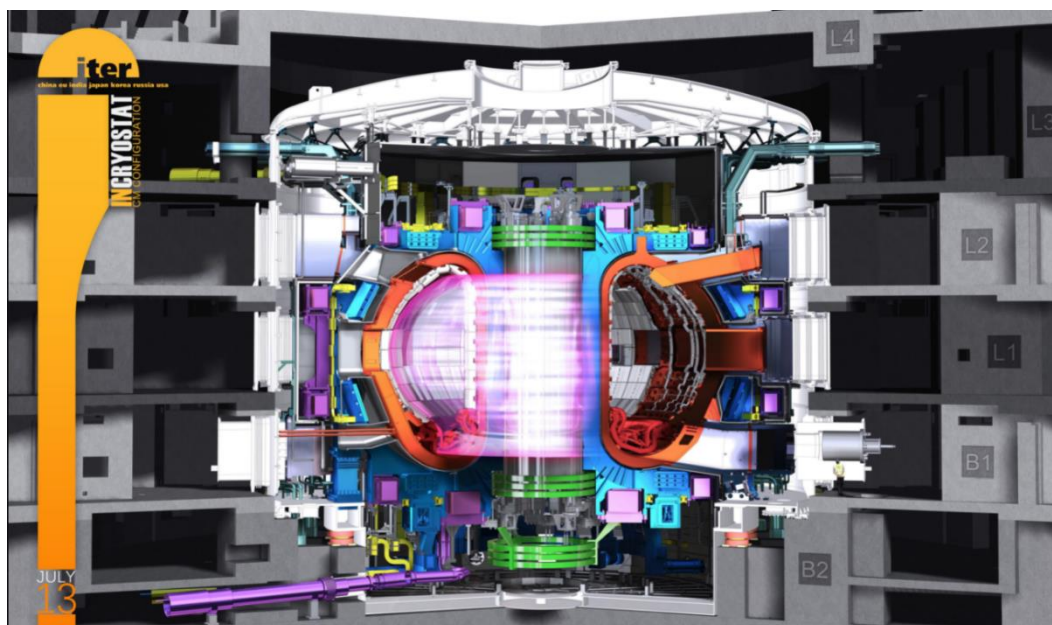
Modernější konfigurace tokamaku obsahuje ještě přídavné cívky poloidálního pole ve tvaru prstenců v rovinách kolmých na osu rotace toru, tyto cívky slouží pro regulaci radiální polohy plazmatu a pro jeho tvarování [2], nejčastěji do divertorového tvaru, připomínající písmeno velké D, kterému je přizpůsoben i tvar komory a cívek toroidálního pole.

Momentální koncept jejich funkce je pulsní – nepracují kontinuálně ale v doslovných pulzech plazmatu, kvůli nutnosti indukce magnetického pole – elektrický proud centrálního solenoidu se zvyšuje do určitého limitu a pak je třeba ho zase snížit a cyklus opakovat. Snaha do budoucna je dosáhnout co nejdelších pulzů (doby, při které se v komoře vyskytuje plazma).

Po světě je nyní mnoho experimentálních zařízení s konfigurací tokamaku. Podle autora článku [20] není nikde přesně vypsán seznam, každopádně se autorovi podařilo najít údaje o experimentálních 210 tokamacích, které byly postaveny během posledních 50 let, některé operující dodnes. Mezi větší zařízení patří například britský JET (Joint European Torus) či TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) v USA. Během letošního roku (2022) také dosáhl popularity velký supravodivý tokamak EAST v Číně, některými články nazýván jako „Čínské umělé Slunce“. V tomto tokamaku se podařilo v lednovém experimentu udržet plazma o teplotě 70 milionů Kelvinů po dobu přes 17 minut [21], což je teplota asi 5x větší, než je teplota jádra Slunce a rekordem je zde doba udržení, byla totiž překonána hranice 1000 sekund. Tím byla potvrzena obrovská výhoda supravodivých cívek, které potřebují k stálé indukci magnetického pole velmi malý příkon, přivedený proud v nich tak proudí teoreticky nekonečně dlouho. Nejvyšší teplota, které bylo na tomto tokamaku dosaženo je přes 100 milionů °C po dobu 101 sekund. Jednalo se o teplotní rekord zaznamenaný v dubnu v roce 2021 [22].

Momentálně největší budovaný supravodivý tokamak je ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) (obr.22), který má v plánu spustit jeho první experiment (nazýván „First Plasma“) v roce 2025 a je budován v Jižní Francii. Na jeho výstavbě se podílí Indie, Japonsko, Rusko, Severní Korea, USA, Čína, Austrálie, Kanada, Kazachstán, Thaisko, Velká Británie, Švýcarsko a celá Evropská unie.

Jedná se o jeden z nejdražších mezinárodních vědeckých projektů v historii lidstva využívající špičkové technologie, kterou máme momentálně k dispozici. Rozměry reaktoru jsou zhruba válec o průměru a výšce 30 metrů. ITER si klade ambice dosáhnout fúzního výkonu 500 MW v 400–sekundových pulzech, dosáhnout zapálení plazmatu, demonstrovat bezpečnost fúzní reakce a realizovat produkci tritia přímo reakcí v komoře reaktoru [23].



Obrázek 20 – Grafický model tokamaku ITER – z oficiálních webových stránek iter.org

## 2.6 Výhledy fúzní energie do budoucnosti

Fúze si slibuje produkci velmi čisté energie, pokud nebereme v potaz emise vyprodukované při výrobě materiálů reaktoru. Pro produkci je potřeba naprosto minimální množství paliva, kterého je relativně nevyčerpatelná zásoba ve vodních plochách na Zemi. Reakce neprodukuje žádný toxický odpad a nemůže, oproti štěpení, dojít k nebezpečné řetězové reakci, protože při jakýchkoliv nestabilitách plazma prostě vychladne a fúze se zastaví. Zároveň se jedná o stabilní zdroj energie, bez závislosti na počasí a jiných neovlivnitelných podmínkách.

Komerční využití fúze by byl průlom v historii energetiky, protože by se jednalo o první, velmi zelený a ve své podstatě nevyčerpatelný zdroj energie, který je stabilní a vyrovná se výkonem štěpným jaderným elektrárnám. Další velký plánovaný krok po realizaci experimentů ITERu je stavba demonstračních elektráren, které mají ukázat komerční využití fúze, což přímo předchází komerčním fúzním elektrárnám. Podle [2] jsou předními státy s projekty demonstračních elektráren Čína, Jižní Korea, Japonsko a Evropská unie. Společnost EUROfusion předpokládá první komerční využívání fúzních reaktorů v letech 2050–2060, ovšem toto datum bude velmi ovlivněno výsledky z ITERu [2].



Aktuální nevýhoda fúze je samozřejmě její náročnost. Dále stále řešené problémy jejího dosažení jakými jsou nestability, čistota plazmatu, vysoké tepelné toky přes první stěnu reaktoru, chlazení reaktoru, odvod tepla z reaktoru, jeho akumulace a stabilizace tepelného toku. Zároveň je s tím spojená extrémní konstrukční a technologická komplexnost předpokládaných zařízení a přímo od toho odvozené velmi vysoké investiční náklady.

## 2.7 Fúzní elektrárna – Evropský koncept DEMO

Ve fúzní elektrárně se přeměňuje tepelný výkon produkovaný ve fúzním reaktoru na výkon elektrický. Společnost Eurofusion ve svém koncepčním návrhu elektrárny (zvaným DEMO) počítá s fúzní reakcí v zařízení typu tokamak. Oproti jadernému štěpnému reaktoru vyžaduje tokamak podstatně komplexnější tepelný oběh pro odběr tepelného výkonu kvůli tomu, že je z něj teplo čerpáno z více míst a není skrze reaktor pouze hnána voda, jako tomu je při štěpení.

Dalším zásadním rozdílem je to, že u prvních fúzních elektráren je počítáno s pulzním režimem práce reaktoru. Je to dáno tím, že pro indukci proudu částic v komoře tokamaku je nutné proměnlivé magnetické pole. Kvůli tomu se proud v centrálním solenoidu neustále zvyšuje až do určitého maxima a pak je třeba ho snížit. Dobu snižování proudu nazýváme fáze prodlevy. Během prodlevy v reaktoru nemůže probíhat fúzní reakce. Při zvyšování proudu, v tzv. fázi pulzu, přibližně stanovené na dobu 2 hodin [24], je z reaktoru odebíráno teplo a elektrárna přímo vyrábí proud díky fúznímu výkonu reaktoru. Následuje fáze prodlevy s malým výkonem reaktoru (cca. 1–3 % nominálního výkonu [25]), odhadovaná na dobu kolem 10 minut [27]. Jde o zásadní rozdíl oproti štěpné elektrárně, který se projeví na tepelném oběhu před parogenerátorem, za kterým je předpokládán již klasický RC cyklus s parní turbínou jako u štěpné elektrárny.

Tepelný oběh odvádějící teplo od reaktoru k parogenerátoru je proto rozdělen na systém odvodu tepla a mezikruh s akumulací. Systém odvodu tepla má více primárních okruhů, které zajišťují odvod tepla od blanketu reaktoru a divertoru, fungujících nezávisle na sobě. Vzhledem k rozdělení tepelných výkonů je nejzásadnější teplo vyprodukované na první stěně a v tzv. zóně množení čili v reaktorovém blanketu. Primární okruh tak odvádí asi 80 % celkového tepla [25].

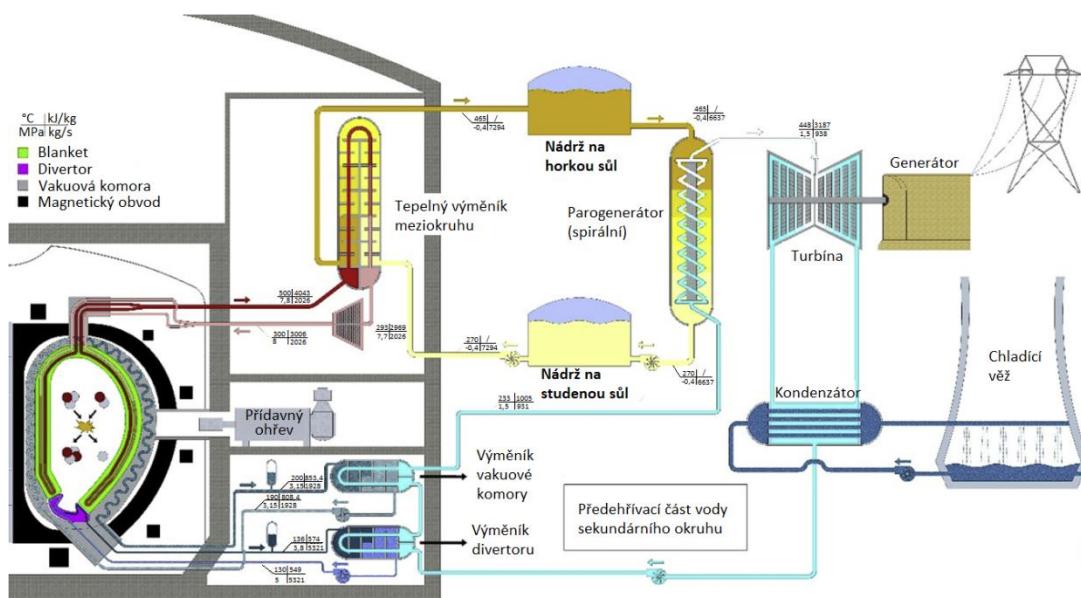
První stěna reaktoru chrání konstrukci reaktoru před vlivem plazmatu. Zóna množení reaktoru zachytává neutrony produkované fúzní reakcí a ty v ní reagují s lithiem za vzniku tritia, nutného pro DT fúzi neboli zde probíhá množení tritia. Jednotlivé bloky složené z první stěny a zóny množení pak tvoří dohromady blanket reaktoru.

Divertor se nachází na spodní části komory reaktoru a kvůli tvaru siločar magnetického pole v něm dochází k zachytávání nežádoucích cizích prvků a tím udržuje čistotu plazmatu. Jde o nejvíce tepelně a radiačně namáhanou část reaktoru. Divertor se dělí na jeho kostru (divertor–cassette, DIV–Cass) a terč (plasma facing unit, DIV–PFU).

Součástí primárního okruhu je systém výměníků tepla, do kterých je z blanketových bloků přiváděno teplo, které se v nich předá jednomu centrálnímu oběhu. Následuje hlavní tepelný výměník, který teplo předá do vyrovnávacího meziokruhu s akumulací tepla.

Meziokruh tak slouží k vyrovnávání energetických pulzů a je na něj zaměřena výpočetní část této práce. Cílem je při době pulzu akumulovat v zásobníku takovou část energie, která bude při době prodlevy pokrývat ideálně veškerý tepelný výkon potřebný pro kontinuální funkci parní turbíny sekundárního R–C cyklu. Meziokruh se v některých publikacích označuje jako IHTS.

Metody odběru tepla z reaktoru a následná akumulace tepla patří mezi stále řešené problémy pro realizaci komerční fúzní elektrárny. Přímo v reaktoru je řešena zejména problematika vysokého tepelného toku na první stěně a v meziokruhu koncept superzásobníku tepla, který je vhodný pro akumulaci obrovského množství energie. Jeden z konceptů fúzní elektrárny, kde je tepelný zásobník realizován dvěma nádržemi na tekutou sůl a odvod tepla z množivé zóny za použitím helia jako chladiva (HCPB BB) je na obrázku 23.



Obrázek 21 – Schéma tepelného oběhu fúzní elektrárny s chlazením blanketu reaktoru heliem (HCPB BB) – zdroj [26]

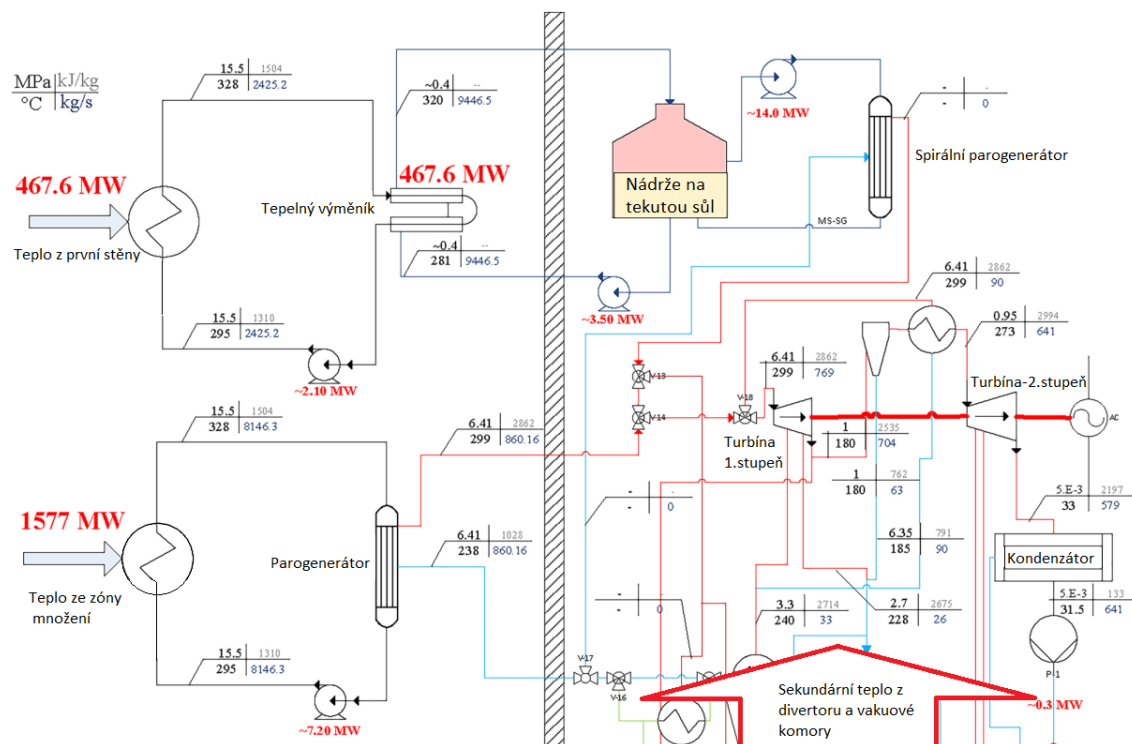
Co se týče části tepla odebírané z divertoru a přímo vakuové komory, jde o menší množství tepla, které je vhodné použít na předehřev vody vracující se z kondenzátoru, aby se využilo co nejvíce vyprodukované tepelné energie [26].

## 2.8 Metody odběru tepla z reaktoru

Momentálně je pozornost zaměřena na více různých způsobů chlazení reaktorového blanketu, které by potenciálně mohly být aplikovány v elektrárně DEMO. Varianty se liší způsobem chlazení reaktoru a lithiovou složkou v blanketu. Tyto odlišnosti přímo ovlivňují konstrukci a parametry použitých tepelných oběhů. Odhadovaný odebíraný tepelný tok z roku 2020 při pulzu pro DEMO je cca. 2100 MWt [29] z blanketu reaktoru (zóna množení + první stěna), při době prodlevy celkem 337 MWt [29] (divertor + vakuová komora).

### 2.8.1 Chlazení vodou (WCLL BB)

Při této variantě je teplo odebíráno z jednotlivých bloků blanketu skrze vodou protékající systém trubiček. Použitá zkratka WCLL BB znamená Water Cooled Lithium Lead Breeding Blanket. Užívá dva nezávislé tepelné oběhy. Jeden pro přímý odběr tepla z první stěny reaktoru a druhý umístěný v množivé zóně obklopený roztaveným  $Pb_{16}Li$ . Pro první stěnu a množivou zónu se počítá se dvěma nezávislými systémy potrubí a tepelných výměníků, kdy teplota vstupní vody je u obou 295 °C a výstupní vody 328 °C [24]. Odebrané teplo z první stěny (467,6 MWt [24]) pak pokračuje přes tepelný výměník do mezikruhu s akumulací a teplo odebrané z množivé zóny (1577 MWt [24]) přímo do parogenerátoru před turbínou.



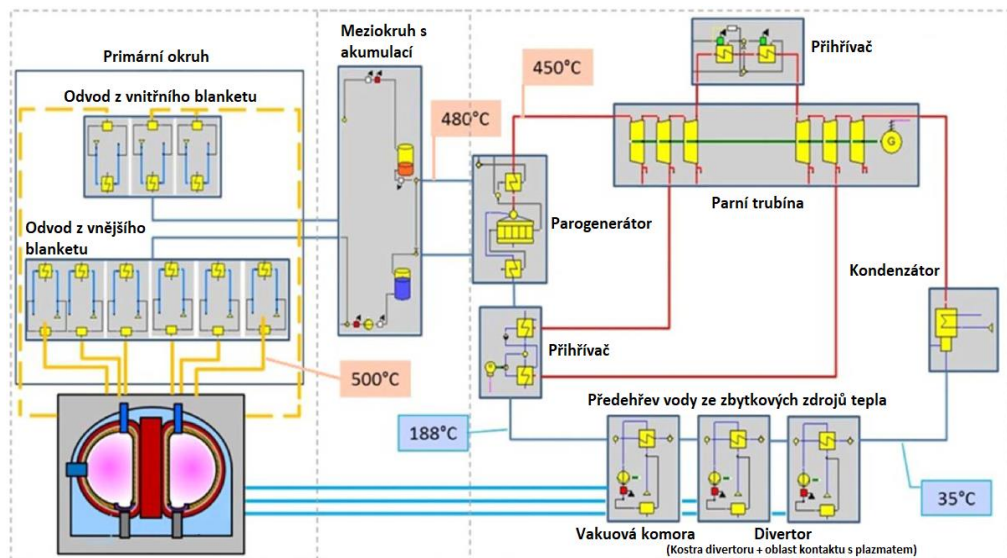
Obrázek 22 – Schema tepelného okruhu pro elektrárnu DEMO s WCLL BB, včetně navrhovaných parametrů toků – zdroj [24]

V meziokruhu jsou v tomto případě jako tepelný zásobník použity nádrže na tekutou sůl. Horká sůl má teplotu 320 °C a studená sůl 280 °C [24]. Při době pulzu se čerpá studená sůl do tepelného výměníku před meziokruhem, kde se zahřívá na pracovní teplotu a ukládá se do horkých nádrží. V době prodlevy je ve spirálním parogenerátoru předáváno teplo z horké soli vodě, která mění své skupenství a vzniklá pára pokračuje přímo k turbíně. Ochlazená sůl přechází do studených nádrží. Princip je schematicky znázorněn na obr. 24.

Tento přístup počítal s dobou prodlevy 30 minut (studie z roku 2018), každopádně novější modely předpokládají pouze 10 minut, či méně. Studie [24] navrhla použít jako teplotnosné médium tekutou sůl s označením HITEC. Pro navržené parametry odpovídá hmotností průtok soli do horké nádrže při době pulzu 6 t/s, při době prodlevy 24 t/s. Pro dobu prodlevy dlouhou třicet minut je potom minimální objem soli, které je nutný skladovat, 23 365 m<sup>3</sup> [24]. Nádrž by tedy byla obrovská. Při optimalizaci doby prodlevy na deset minut by byl potřebný minimální objem třetinový čili asi 7 788 m<sup>3</sup>.

## 2.8.2 Blanket chlazený heliem – HCPB BB

Druhou a poněkud přednější variantou je Helium Cooled Pebble Bed Breeding Blanket. Ve volném překladu jde o to, že v zóně množení jsou jako členy jaderné reakce pro produkci tritia užity drobné kuličky Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> jako složka s lithiem a kuličky obsahující Beryllium jako multiplikátor neutronů. Skrze tyto kuličky je hnáno helium, které odtud v době pulzu odvádí teplo. Je předpokládáno, že helium z blanketu odebere asi 85 % veškerého tepla vyrobeného tokamakem. V době prodlevy je průtok helia samozřejmě velice snížen a odvádí pouze zbytkové teplo. Helium do blanketu vstupuje na teplotě 300 [°C] a vystupuje na teplotě 500 [°C] ven. Celkový odebíraný tepelný tok heliem z blanketu je odhadován na 2107,7 MWt [26].



Obrázek 23 – Schéma tepelného oběhu fúzní elektrárny s chlazením reaktoru principem HCPB BB – zdroj [25]

Není zde rozlišen zvláštní okruh pro první stěnu a zónu množení, jako u WCLL. O odvod tepla z blanketu se stará 9 nezávislých tepelných okruhů, 3 pro odvod tepla z vnitřní části blanketu (nejblíže k centrálnímu solenoidu) a 6 z vnější strany blanketu. Za okruhy je zařazen hlavní tepelný výměník, ve kterém se teplo předá meziokruhu s akumulací. V meziokruhu se opět počítá s akumulacím systémem horká/studená sůl ve dvou nádržích. Za systém je opět zařazen R–C cyklus. Zbytek tepla vznikajícího v tokamaku (Divertor+vakuová komora) je použit na přehřev vody, která se vrací z kondenzátoru. Jako teplotné médium pro odběr tepla ze zbytkových zdrojů je použita voda. Schéma je vyobrazeno na obr. 25.

## 3 Praktická část

### 3.1 Vhodné metody akumulace energie

Existuje mnoho různých metod skladování energie. Jejich užití se týká zejména globální stabilizace elektrické sítě – při nadvýrobě elektřiny se do nich energie ukládá a při nedostatku se z nich energie naopak čerpá. Klasickým příkladem jsou přečerpávací vodní elektrárny, ve kterých se při nadvýrobě čerpá voda reversním módem turbín do jezera umístěného v určité pracovní výšce a při nedostatku se z tohoto jezera vypouští dolů a turbíny vyrábí v generátoru elektrický proud.

Přečerpávací vodní elektrárny tak transformují elektrickou energii v potenciální a tlakovou energii vody. Jde tedy o jednu z metod akumulace energie, která vyrobenou energii transformuje a ukládá v podobě energie jiné. Stejný princip využívají například systémy ukládání energie ve stlačeném vzduchu (tlaková energie), v palivových článcích či ve vodíku vyrobeném elektrolýzou (chemická energie), systémech vrstvení pevných těles (potenciální energie) a mnoho dalších [30]. Tyto metody mají společnou nevýhodu, protože vyžadují separátní zařízení pro čerpání uložené energie. Pro potřebu fúzní elektrárny by to znamenalo oddělený systém zakončený generátorem, který by do sítě dodával chybějící elektrický proud při prodlevě reaktoru. Zároveň by to znamenalo cyklické namáhání parní turbíny sekundárního okruhu a samozřejmě i celého hlavního R–C cyklu, který by se musel stále vypínat a spouštět v reakci na pulsní režim. Z tohoto důvodu se jedná o nevhodné způsoby akumulace pro fúzní elektrárnu, protože cyklické namáhání, zejména parní turbíny, přispívá ke snížení životnosti celé elektrárny.

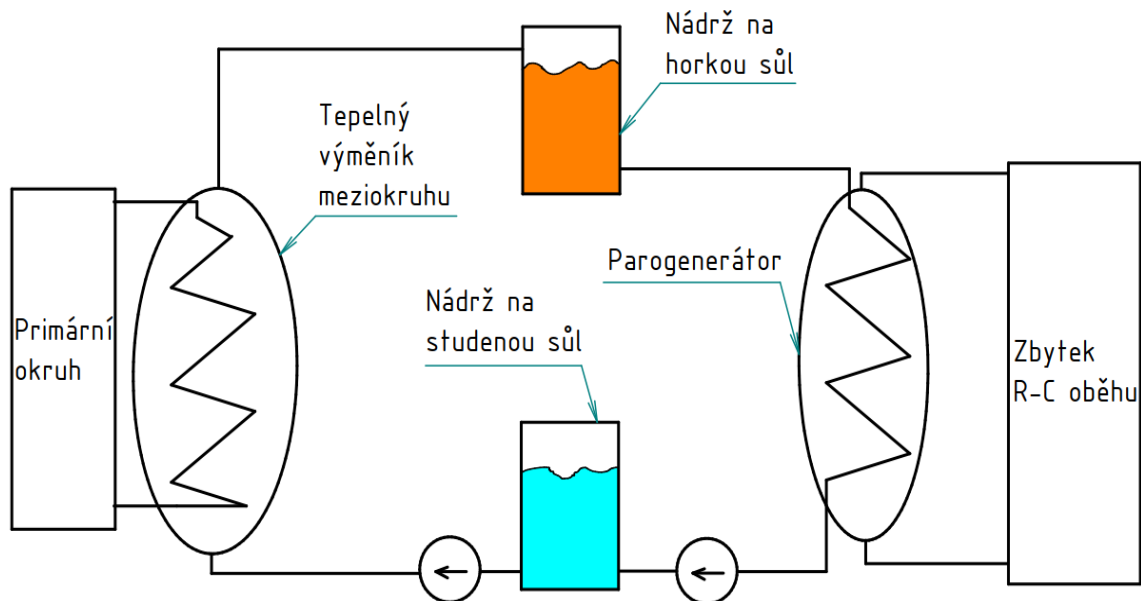
### 3.2 Akumulace ve formě tepelné energie

Vhodnější metody jsou ty, které skladují přímo reaktorem vyrobené teplo v tepelném zásobníku, bez jeho transformace na jiný typ energie. Tyto vyrovnávací zásobníky se používají u některých elektráren využívajících obnovitelné zdroje energie, kde dochází k častým výkyvům produkce vlivem počasí, roční a denní doby a tak podobně. Zejména pak u koncentračních slunečních elektráren (CSP), kde je pro stálý provoz parní turbíny akumulace zásadní, aby se předešlo namáhání parní turbíny nestejným chodem. Kvůli tomu jsou i v případě DEMO primárně uvažovány metody skladování energie ve formě tepla. Zároveň odebírají nutnost použití jiného zdroje energie a tím nedochází ke ztrátám energie při přeměně na jiný typ. Sledovat se tak musí v rámci ztrát „pouze“ jejich dostatečná izolace.

### 3.2.1 Metoda dvou nádrží

Pro účel skladování energie ve formě tepla se můžou použít například dvě nádrže na teplotnosné médium, konkrétně tekutou sůl. Sůl je během pulzu ohřívána v tepelném výměníku meziokruhu. Z tepelného výměníku proudí horká sůl do nádrže na horkou sůl. Odtud pokračuje přímo do parogenerátoru, kde předává teplo vodě za vzniku vodní páry, která je přivedena k turbíně. Výkon turbíny je zvolen tak, aby do horké nádrže proudilo větší množství tekuté soli, než je potřeba k ohřevu páry. Kvůli tomu je odtok z horké nádrže nižší než přítok, a tím dochází k akumulaci horké soli v nádrži a odčerpávání studené soli z nádrže na studenou sůl.

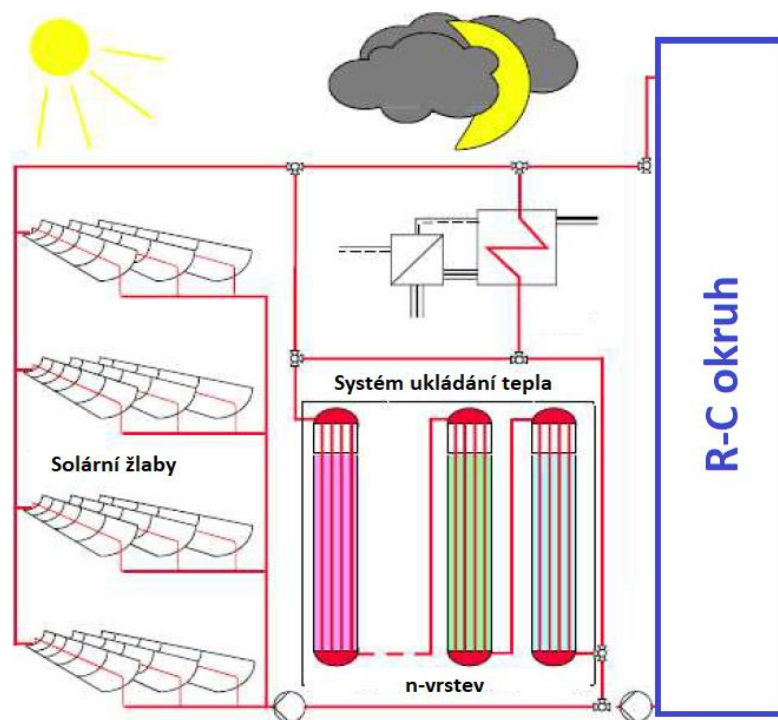
Při době prodlevy je objemový průtok do nádrže s horkou solí velmi malý (výkon reaktoru dosahuje cca. 1-3 % nominálního výkonu [25]) a odtok musí proto pokrýt nedostatek pro kontinuální přívod horké soli do parogenerátoru. Tím je horká sůl z nádrže odčerpávána a dochází k akumulaci studené soli v nádrži na studenou sůl. Cyklus se takto stále opakuje. Proto je zřejmé, že objem skladované soli je přímo závislý na době prodlevy reaktoru, kterou je snaha minimalizovat. Schéma meziokruhu se dvěma nádržemi je na obr. 26.



Obrázek 24 – Schéma meziokruhu s akumulací ve dvou nádržích

### 3.2.2 Akumulace ve formě tepla pro fázovou změnu

Další možností je ukládat energii v latentní teplo potřebné pro fázovou změnu látky. Bohužel není vhodné ukládat energii v jakémkoliv skupenském teplo. Při přeměně kapaliny v plyn vyvstává problém s akumulováním plynu na vysoké teplotě, se kterým se hůře pracuje [30], než s kapalinou a má podstatně větší objem a bylo by ho nutné například stlačovat, což by stálo další energii. Jako vhodnější se proto jeví užití fázového tepla buď pro fázovou změnu v pevném stavu anebo pro změnu skupenství z pevné látky na kapalinu a zpět. Nutno dodat, že pro tento účel se při užití sloučenin jeví jako vhodné takové sloučeniny, které se taví při jedné teplotě, nikoliv v rozsahu teplot. Existují také koncepty vícevrstvého systému ukládání tepla do skupenského tepla tání materiálu. Do zásobníku s prvním médiem je přivedena teplonosná látka od zdroje tepla (na obr. 27 konkrétně solární žlaby).



Obrázek 25 – Solární koncentrační elektrárna s akumulací v systému vícevrstvé akumulace – zdroj [30]

Teplonosná látka předává teplo do první vrstvy zásobníku a tím se ochlazuje. Po dosažení teploty tání média v první vrstvě se začne první médium tavit, čímž ukládá energii ve formě skupenského tepla tání a po roztavení ve formě tepelné energie pro ohřev. Tento proces probíhá za konstantní teploty. Kvůli tepelným ztrátám při předání tepla a přirozenému ochlazení soli podél zásobníku je vhodné, aby další médium v každé následující vrstvě mělo nižší teplotu tání než médium předchozí. Kdyby byla zvolena stejná látka pro všechny vrstvy, poslední vrstva by se vlivem tepelných ztrát začala tavit za delší dobu než vrstva první, a celý systém by tímto vlivem byl zpomalen.

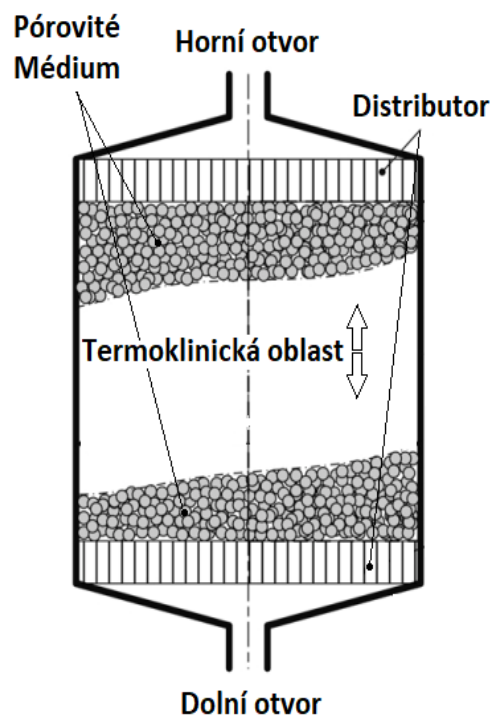


Tento systém momentálně není komerčně využíván, protože se jeví spíše jako koncept a jeho instalace s sebou nese problém komplexnosti a kvůli tomu i ceny [30]. Navíc není tak jednoduché zvolit vhodné látky, které mají dobře odstupňované teploty skupenské přeměny pro optimální teplotní odstupňování užitých vrstev. U fúzní elektrárny by se nicméně tyto vlivy mohly jevit jako zanedbatelné, vzhledem k vysoké ceně a složitosti fúzní elektrárny, jako celku.

### 3.2.3 Akumulace ohřevem média v termoklinické nádrži s pórovitým médiem

Další variantou je na místo dvou nádrží použít jednu nádrž s ohříváním médiem. Systém s sebou přináší úsporu rozměrů oproti dvou-tankové verzi. Uveden je příklad s pórovitým médiem. Schéma vnitřku nádrže je na obr. 28. Při době pulzu proudí horním otvorem horká sůl dovnitř. Skrze distributor je rozváděna na pórovité pevné médium, označováno v angličtině jako „Packed Bed“ (oproti „Pebble Bed“, které bylo popsáno výše, jsou zde pevné části pospojovány v jeden pórovitý celek pro zlepšení tepelné vodivosti). Sůl se průchodem směrem dolů postupně ochlazuje a klesá ke dnu i vlivem zvyšování hustoty s klesající teplotou. Kvůli tomu v nádrži vzniká oblast s teplotním gradientem, ve které dochází k přirozenému proudění vlivem změny hustoty s teplotou. Kvůli tomu se systém jedné nádrže označuje i jako termoklinický.

Při plnění nádrže horkou solí se tato oblast posouvá směrem dolů, čímž systém akumuluje teplo v pevném médiu. Spodním otvorem odchází studená sůl zpět k odběru tepla z reaktoru. Při odběru tepla se žene sůl opačným směrem a při průchodu tankem směrem vzhůru se ohřívá, čímž posouvá termoklinickou oblast směrem výše a odebírá akumulované teplo [31].



Obrázek 26 – Vnitřní konstrukce termoklinické nádrže – zdroj [31]

Tento systém patří mezi jeden z aktuálně zkoumaných, protože jeho aplikace by ulehčila prostorovou náročnost zásobníku tepla. Hlavními problémy jsou obecně zajištění dostatečného předání tepla pórovitému médium vlivem jeho malé tepelné vodivosti a cyklicky teplotně namáhané pórovité médium u kterého tím hrozí jeho degradace, ke které se přidává teplotní difúze částic, čímž se mění jeho vlastnosti [31].

### 3.2.4 Vynechání akumulace

Zkoumanou variantou je i úplné vynechání mezikruhu a akumulace tepla a použití přídatného plynového kotle, který by při době prodlevy nabíhal a ohřevem páry udržoval turbínu alespoň na 50 % výkonu [28]. Tato hodnota vychází z předpokladu, že by výkon turbíny (mimo odstávku) neměl klesnout pod 30 %, ideálně pod 50 % [28]. Samozřejmě to s sebou nese nevýhodu kolísajícího výkonu celé elektrárny. Zároveň by bylo spotřebováváno další palivo v poměrně velkém plynovém kotli, což s sebou přináší emise skleníkových plynů a elektrárna by přestala vyrábět energii z teoreticky nevyčerpatelného a zeleného zdroje (v případě DD fúze, kde se nespotebovává lithium). Další výzkum a vývoj je proto nutný, aby tato varianta mohla konkurovat ostatním.

## 3.3 Použití tekutých solí pro ukládání tepelné energie

Důležitou otázkou je, co použít jako teplonosnou látku pro akumulaci ve formě tepelné energie uložené v poměrně objemném zásobníku tepla. Krom různých zkoumaných alternativ, jako jsou například hydridy alkalických kovů (např LiH) [30] je velkým trendem využívat různé směsi tekutých solí.

Tekuté soli mají menší měrnou tepelnou kapacitu než například voda, která je běžně využívána pro tepelné oběhy ( $c_{H_2O} = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Oproti vodě však mají vyšší hustotu, čímž se částečně problém nižší tepelné kapacity sníží při vztažení kapacity na jeden  $\text{m}^3$ . Hlavní výhodou je ale možnost odvodu tepla za atmosférického tlaku při teplotách 300–600 °C, čehož voda není schopná. Proto je jednodušší s nimi pracovat a akumulovat je na jednom místě, zásobník tak nemusí být vlastně přetlaková nádoba. Výhodou je i možnost využití pro skladování latentního tepla fázových přeměn při tavení solí, protože dosahují teplot tání i pod 200 °C, například právě ve vícevrstevném zásobníku. Dále je možnost využít soli, které nejsou toxické, jsou chemicky stabilní a nezpůsobují korozi potrubí oběhu a díky směsím solí tyto vlastnosti upravovat, či kombinovat.

Na základě požadovaných vlastností, jako je nízká teplota tání, vysoká teplota varu a tepelné stability, vysoká hustota a tepelná kapacita, nízký tlak nasycených par (pro možnost provozu za atmosférického tlaku), vysoká tepelná vodivost a samozřejmě nízká cena, bylo v interní zprávě ústavu energetiky od Ing. Michala Cihláře, která mi byla poskytnuta, vybráno šest technicky použitelných směsí solí pro meziokruh ve fúzní elektrárně DEMO:

**FLiBe (LiF-BeF<sub>2</sub>)** (a)      **FLiNaK (LiF-NaF-KF)** (b)      **LiCO<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>** (c)  
**FLiNaBe (LiF-NaF-BeF<sub>2</sub>)** (d)      **NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub>** (e)      **NaCl-MgCl<sub>2</sub>** (f)

Tabulka 1 – parametry vybraných tekutých solí, poskytnuté ústavem energetiky FS ČVUT

Sůl:	Teplota tání [°C]	Hustota [g·cm <sup>-3</sup> ]	Tepelná vodivost [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Měrná tepelná kapacita [kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Měrné skupenské teplo tuhnutí [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	Cena za 1 kg [USD]
<b>FLiBe</b>	460	1,923	1,1	2,4	456,7	144
<b>FLiNaBe</b>	315	1,998	0,97	2,046	544	163
<b>FLiNaK</b>	454	2,019	0,9	1,88	443,5	140
<b>NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub></b>	222	1,818	0,5	2,66	200	112
<b>LiCO<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	488	1,89	0,61	1,6	365	53
<b>NaCl-MgCl<sub>2</sub></b>	445	1,942	0,5	1,079	429	25

V ideálním případě je dobré nepoužívat soli obsahující beryllium, kvůli jeho toxicitě. Soli b, c, f jsou vhodné pro použití ve vysokoteplotní aplikacích kvůli vyšší teplotě tání, přes 450 °C. Hlavní uvažovanou variantou proto zůstává NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub>, označovaná jako solární sůl, právě kvůli nízké teplotě tání a vysoké měrné tepelné kapacitě.

Zmiňovaná cena solí je velmi důležitý parametr. Při momentálním kurzu 23,34 Kč/USD se výše vybrané soli cenou pohybují od 1000 korun za kilogram (NaCl-MgCl<sub>2</sub>) po 3700 korun za kilogram (FLiNaBe). Oproti tomu některé exotičtější soli jako např. LiF-RbF se pohybují v cenách v řádech stovek tisíců korun za kilogram. Vzhledem k předem uvažovanému množství soli nutné ke skladování v řádu desítek tisíců tun by celková cena pouze za sůl dosahovala několik bilionů korun. U výše vybraných solí „pouze“ desítky miliard korun.

## 3.4 Výpočtová analýza variant

### 3.4.1 Seznam použitých symbolů a indexů

$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
$\alpha$	součinitel přestupu tepla [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
$k$	součinitel prostupu tepla [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
$T$	termodynamická teplota [K]
$t$	čas [s]
$S$	plocha [ $\text{m}^2$ ]
$s$	tloušťka stěny [m]
$c_p$	měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
$m$	hmotnost [kg]
$\rho$	hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$V$	objem [ $\text{m}^3$ ]
$Q$	teplo [J]
$\dot{Q}$	tepelný tok [ $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$ ]; [Wt]
$\dot{m}$	hmotnostní tok [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
$\dot{V}$	objemový tok [ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ]
$P$	Výkon [W] (tepelný výkon [Wt])
$Nu$	Nusseltovo číslo [1]
$\xi$	Součinitel ztrát [1]
$l_t$	Skupenské teplo tání/tuhnutí [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]
$F_d$	Hodnota veličiny v době prodlevy reaktoru (použit index „d“ z angl. „dwell time“)
$F_p$	Hodnota veličiny v době pulzu reaktoru

### 3.4.2 Zjednodušující předpoklady výpočtu

Měrná tepelná kapacita a hustota jsou obecně funkcemi teploty. Pro teplotní spád WCLL (40°) a HCPB (210°) ji pro zjednodušení budu považovat za konstantní neboli  $c_p \neq f(T)$  a  $\rho \neq f(T)$ . Pro výpočet jsou použity jejich hodnoty stanovené při 300 [°C] dle tab.1.

Tekuté soli musí procházet tepelným výměníkem i parogenerátorem dost dlouho na to, aby došlo k předání veškerého tepla v pracovním rozsahu a během průchodu tak stihne proběhnout přechodný děj ohřevu/chlazení soli. Přenos tepla konvekcí lze vyjádřit Newtonovým vztahem:

$$\dot{Q} = S \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

Z uvedeného vztahu plyne, že teplosměnná plocha  $S$  bude odlišná pro různé soli, v závislosti na jejich součiniteli přestupu tepla  $\alpha$ . Při popisu tepelného přenosového děje v kapalině lze vycházet z určení Nusseltova čísla. Jedná se o bezrozměrné podobnostní číslo, které srovnává teplo odvedené konvekcí a kondukcí v proudící látce. Konkrétně:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (2)$$

Kde  $L$  je charakteristický rozměr pro daný případ. Pro Nusseltovo číslo zároveň platí, že je to obecná funkce geometrie, Reynoldsova a Prandtlova čísla. Po sloučení (1) a (2):

$$\dot{Q} = S \cdot \frac{Nu(Re, Pr, geometrie) \cdot \lambda}{L} \cdot \Delta T$$

Odtud se proto dá předpokládat, že pro soli s nižší tepelnou vodivostí bude muset tepelný výměník i parogenerátor dosahovat větších rozměrů, aby se prodloužila doba průchodu tekutiny zařízením a mohl být přenesen požadovaný tepelný tok. Vzhledem k tomu, že rozsah tepelné vodivosti vybraných solí se pohybuje od 0,5 do 1,1  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , může se jednat o zásadní rozdíl.

Newtonovou formulí (1) je popsán i ztrátový tepelný tok do okolí v případě akumulace tepla v nádrži. Proto je výhodné minimalizovat celkový povrch nádrže  $S$ . Při uvažování nádrže o rozměru obecného válce o průměru  $D$  [m] a výšce  $v$  [m], povrchu  $S$  [m<sup>2</sup>] a objemu  $V$  [m<sup>3</sup>]:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v \quad (3)$$

$$S = 2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} + \pi \cdot D \cdot v \quad (4)$$

Po vyjádření výšky z (3) a dosazení do (4):

$$S = 2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} + \pi \cdot D \cdot \frac{4 \cdot V}{\pi D^2} = \frac{\pi \cdot D^2}{2} + \frac{4 \cdot V}{D}$$

Druhá derivace této funkce je kladná pro všechna kladná  $D$ . Jde tím pádem o funkci, která musí mít lokální minimum. Pro nalezení tohoto minima (minimalizaci povrchu) lze potom použít první derivaci funkce a najít optimální kladný průměr nádrže takový, kde

$$\frac{dS}{dD} = 0 \Leftrightarrow D = D_{opt}$$

$$\frac{dS}{dD} = \pi \cdot D_{opt} - \frac{4 \cdot V}{D_{opt}^2} = 0 \quad / \cdot D_{opt}^2$$

$$D_{opt} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V}{\pi}} \quad (5)$$

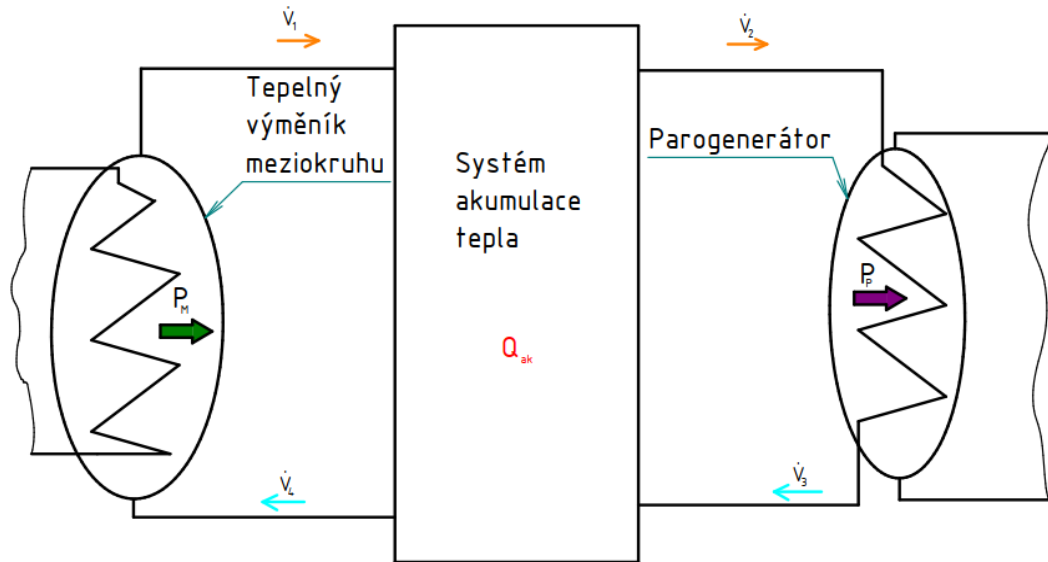
Po dosazení  $D_{opt}$  do (3) pak optimální výška nádrže:

$$v_{opt} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D_{opt}^2} \quad (6)$$

Z těchto dvou vztahů vycházím při odhadu rozměru nádrží ve tvaru válců, dále ve výpočtu.

### 3.4.3 Rozbor tepelného výkonu přivedeného do parogenerátoru

Tepelný výkon, který může být konstantně přiváděn do parogenerátoru závisí na době prodlevy  $t_d$ . Zobecněné schéma meziokruhu je na obr. 29.



Obrázek 27 – Obecné schéma meziokruhu s akumulací

Toky  $\dot{V}_1$  až  $\dot{V}_4$  jsou objemové toky tekuté soli v jednotlivých větvích meziokruhu. Dále:

$P_M$  Celkový tepelný výkon přiváděný do meziokruhu ve výměníku meziokruhu [W]

$P_P$  Celkový tepelný výkon odvedený z meziokruhu do parogenerátoru [W]

$Q_{ak}$  Celkové teplo akumulované v zásobníku tepla během jednoho pulzu reaktoru [J]

Pro pokrytí potřebného tepelného výkonu při době prodlevy musí platit jednoduchá rovnice:

$$Q_{ak} = P_p \cdot t_d \cdot \xi \quad (7)$$

Kde  $t_d$  je doba prodlevy a  $\xi$  je součinitel ztrát při předání tepla sekundárnímu okruhu.

Celkové teplo přivedené do meziokruhu během jednoho pulzu reaktoru  $Q_c$ :

$$Q_c = P_M \cdot t_p$$

Podle [25] budu předpokládat, že při době prodlevy dosahuje reaktor 3 % nominálního výkonu (optimistický odhad). Proto výkon přiváděný do meziokruhu v době prodlevy  $P_{Md} = 0,03 \cdot P_M$

Celková bilance tepla v meziokruhu během jednoho celého cyklu reaktoru:

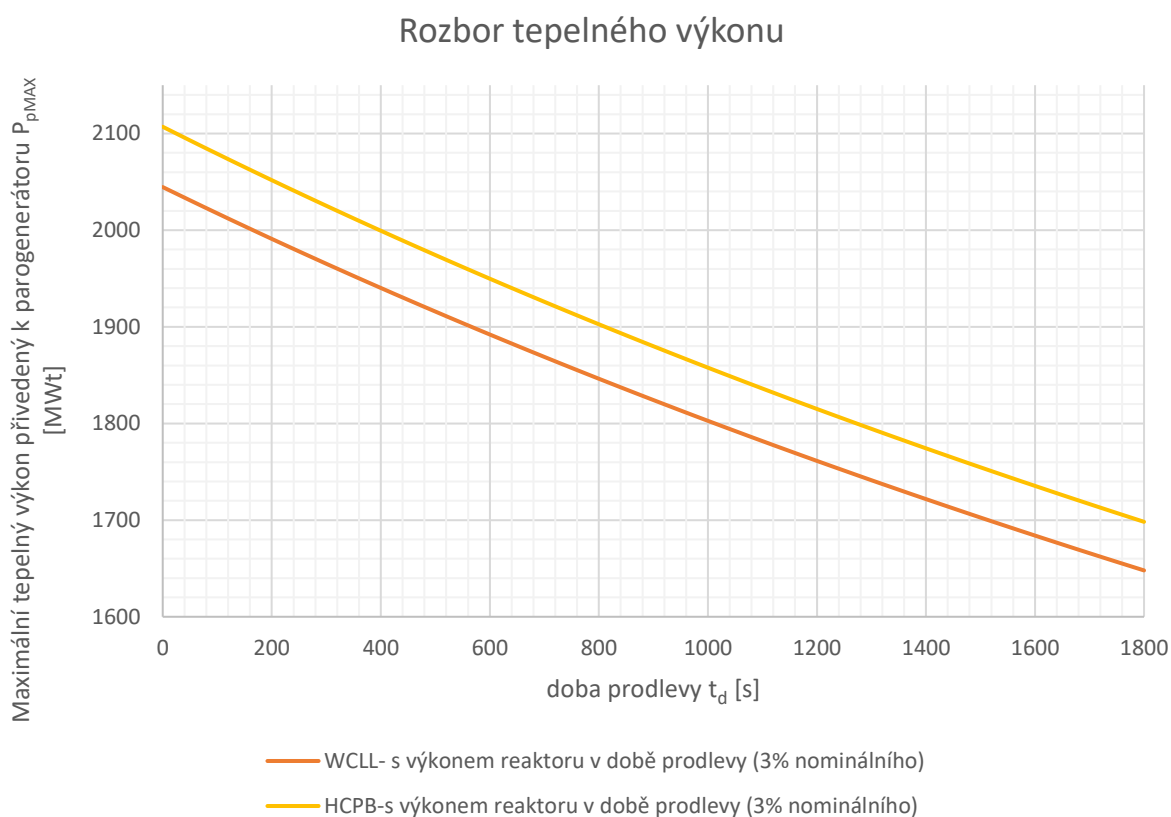
$$P_M \cdot t_p + P_{Md} \cdot t_d - P_p \cdot t_p - Q_{ak} = 0 \quad (8)$$

Při vyjádření  $Q_{ak}$  ze (7) a dosazení do (8) při  $\xi = 1$  (ideální stav) dostanu výsledný vztah pro maximální výkon přiváděný kontinuálně do parogenerátoru tak, aby se za čas pulzu dokázalo naakumulovat dostatečné teplo pro pokrytí ohřevu páry za dobu prodlevy reaktoru.

$$P_p = \frac{P_M \cdot t_p + P_{Md} \cdot t_d}{t_d + t_p} \quad (9)$$

Pro výpočet konkrétní hodnoty je důležité rozlišit přístup WCLL a HCPB. Při HCPB je  $\dot{V}_2$  konstantní a veškeré teplo odebrané z reaktoru se (vyjma ztrát) předá do meziokruhu. Proto  $P_M = 2107,7$  MW [26]. Při WCLL je část tepla přímo vedena do separátního parogenerátoru (1577 MW, obr. 24) a do meziokruhu je odvedeno pouze teplo z první stěny, proto  $P_M = 467,6$  MW [24] a  $\dot{V}_2$  není konstantní. Doba pulzu je v obou případech stanovena na 2 hodiny.

Na základě rovnice (9) jsem provedl celkový rozbor maximálního stabilního tepelného výkonu přiváděného do parogenerátoru  $P_p$  v závislosti na době prodlevy  $t_d$  tak, aby se během doby pulzu  $t_s$  (2 hodiny) stihlo naakumulovat potřebné teplo pro pokrytí  $P_p$  v době prodlevy. Zejména kvůli tomu, že studie o WCLL [24] uvažovala s dobou prodlevy 30 minut a novější studie hovořící o HCPB pracuje pouze s 10 minutami. Závislost je vidět na grafu 1.



Graf 1 – rozbor maximálního tepelného výkonu přiváděného do parogenerátoru z meziokruhu v závislosti na době prodlevy



V následujícím výpočtu předpokládám dobu prodlevy 10 minut. Při uvážení tepelných ztrát v meziokruhu a zjednodušené povahy výpočtu odhaduji na základě grafu 1 maximální stabilní tepelné výkony přivedené do parogenerátoru takto:

$$P_{pWCLL} = 1850 \text{ MW}$$

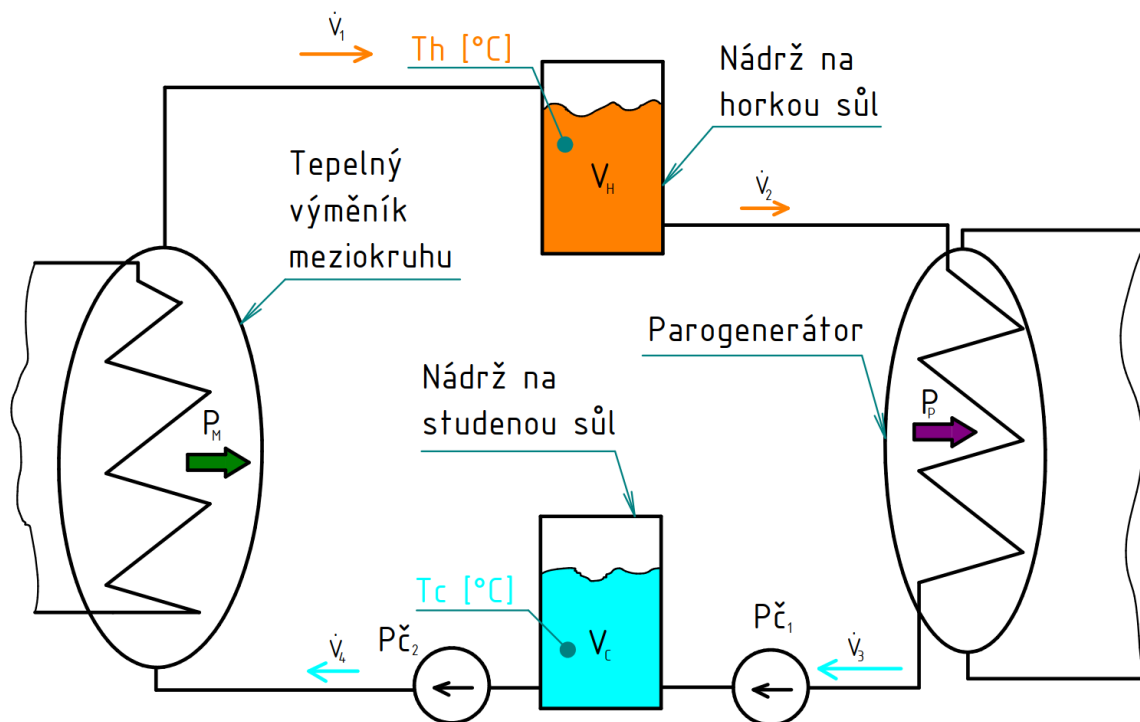
– tomu odpovídá minimální akumulované teplo  $Q_{akHCPB} = 1140 \text{ GJ}$  (308,33 MWh)

$$P_{pHCPBL} = 1900 \text{ MW}$$

– tomu odpovídá minimální akumulované teplo  $Q_{akWCLL} = 1110 \text{ GJ}$  (316,7 MWh)

Na tyto výkony nyní aplikuji akumulaci v systému dvou nádrží, termoklinickém tanku a vícevrstvěném zásobníku se změnou skupenství.

### 3.4.4 Akumulace v systému horká/studená nádrž



Obrázek 28 – Meziokruh se systémem horká/studená nádrž

Vzhledem ke zvolené pracovní teplotě studené soli (280 °C u WCLL [24] a 270 °C u HCPB [26]) je jako teplotná látka použita solární sůl ( $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ ) kvůli její nízké teplotě tání (222 °C).

Pro výpočet potřebného průtoku do parogenerátoru (za konstantního tlaku) platí jednoduchá kalorimetrická rovnice v průtokovém tvaru:

$$P_P = \rho \cdot c_p \cdot \dot{V}_2 \cdot (T_h - T_C) \quad (11)$$

Odtud nutný objemový tok do parogenerátoru:

$$\dot{V}_2 = \frac{P_P}{\rho \cdot c_p \cdot (T_h - T_C)}$$

Pro objemový tok z tepelného výměníku platí obdobně

$$\dot{V}_1 = \frac{P_M}{\rho \cdot c_p \cdot (T_h - T_C)}$$

Při uvážení nestlačitelnosti soli podél potrubí musí nutně platit, že:

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 \text{ a } \dot{V}_4 = \dot{V}_1, \text{ směry zavedeny kladně na obr. 30.}$$

Dále pro rychlost akumulace v nádržích platí (kladné – akumulace, záporné – čerpání):

$$\dot{V}_H = \dot{V}_1 - \dot{V}_2$$

$$\dot{V}_C = \dot{V}_3 - \dot{V}_4$$

Při uvážení 3 % nominálního výkonu v době prodlevy jsou výsledné vypočtené toky v tab. 2. Celkový okamžitý akumulovaný objem i teplo jsou uvedeny vždy na konci dané fáze:

Tabulka 2 – Výsledné objemové průtoky v mezikruhu, rychlost akumulace a akumulované teplo

	$\dot{V}_1 = \dot{V}_4$ [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	$\dot{V}_2 = \dot{V}_3$ [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	$\dot{V}_C$ [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	$\dot{V}_H$ [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	V <sub>ak</sub> [m <sup>3</sup> ]	Q <sub>ak</sub> [GJ]	Cena za sůl [miliardy Kč]
WCLL-pulz	2,42	1,41	-1,01	1,01	7243	1401	35
WCLL-prodleva	0,32	9,56	9,25	-9,25	1695	328	/
HCPB-pulz	2,07	1,87	-0,20	0,20	1468	1490	7,1
HCPB-prodleva	0,06	1,87	1,81	-1,81	382	388	/

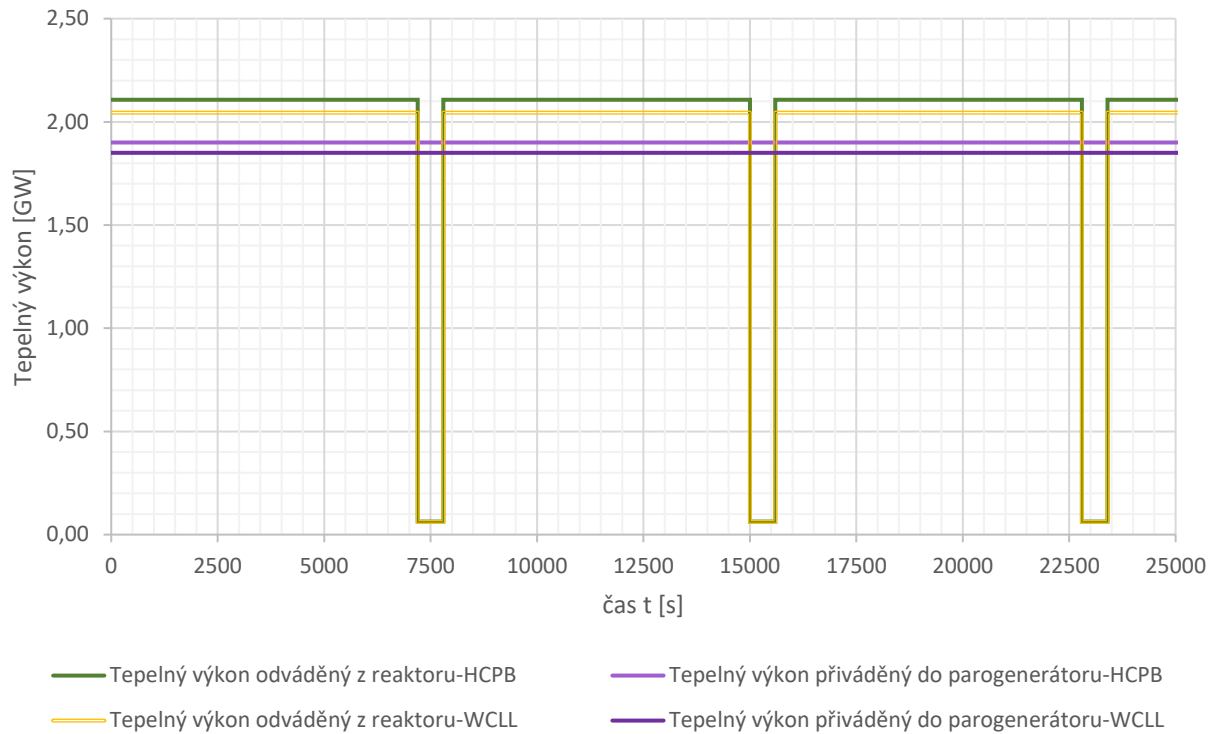
Po odeznění fáze pulzu zůstává při tomto výpočtu vždy nějaké teplo ve studené nádrži. To je způsobeno rezervou při volbě tepelného výkonu k parogenerátoru z grafu 1 a nabízí proto prostor pro regulaci konkrétních hodnot průtoků při reálné operaci elektrárny.

U WCLL jde porovnat vypočtený nutný akumulovaný objem s [24], kde byla použita sůl HITEC. Pro 10 minut akumulace odpovídal akumulovaný objem soli 7788 m<sup>3</sup>. To je přímo srovnatelné se zde vypočtenými 7243 m<sup>3</sup> soli. Rozdíl ve velikosti je dán vlivem započtení výkonu reaktoru v době prodlevy, použití jiného typu soli, snížení maximálního výkonu přivedeného k parogenerátoru pro pokrytí ztrát a idealizujícími předpoklady mého výpočtu.

### 3.4.4.1 Časový průběh veličin v meziokruhu

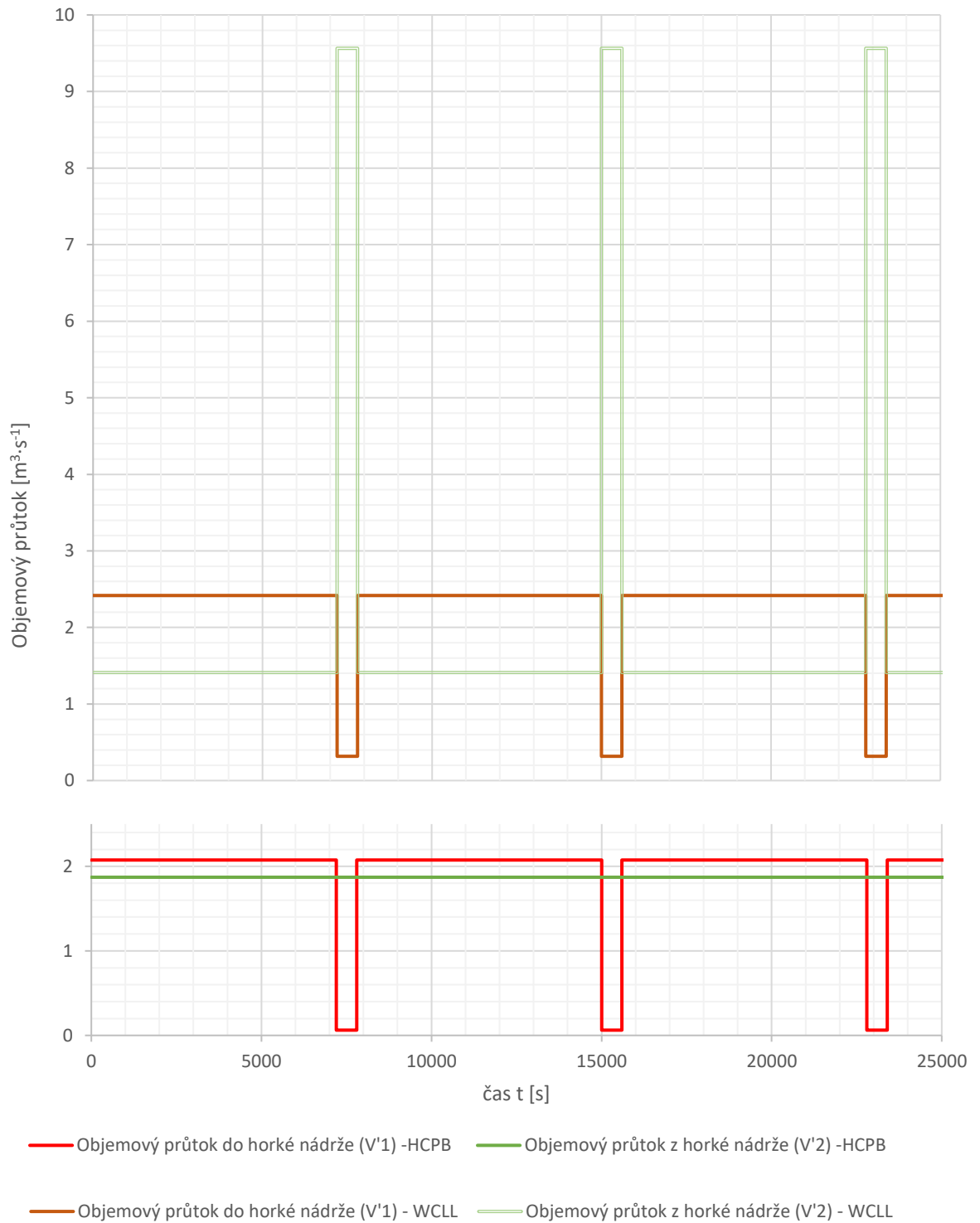
Na následujících diagramech jsou znázorněny vypočtené parametry průtoků, výkonů a akumulací po dobu 4 pulzů pro HCPB i WCLL a dobu prodlevy 10 minut.

Časový průběh tepelných výkonů



Graf 2 – časový průběh tepelných výkonů během 3 cyklů při době prodlevy 10 minut

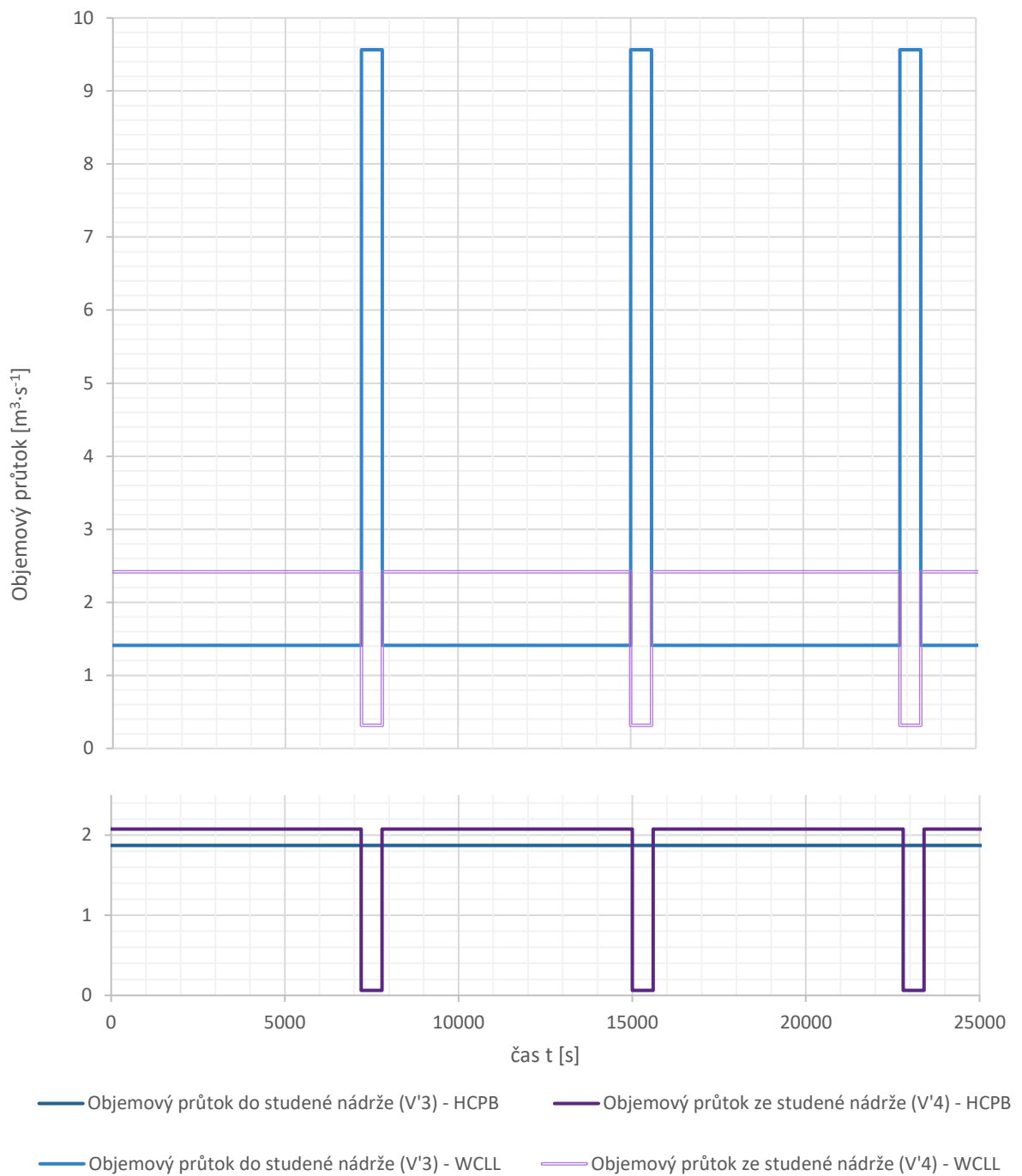
## Časový průběh objemových průtoků – horká nádrž



Graf 3 – Časový průběh objemových průtoků ve větvích horké nádrže WCLL a HCPB po dobu 3 cyklů

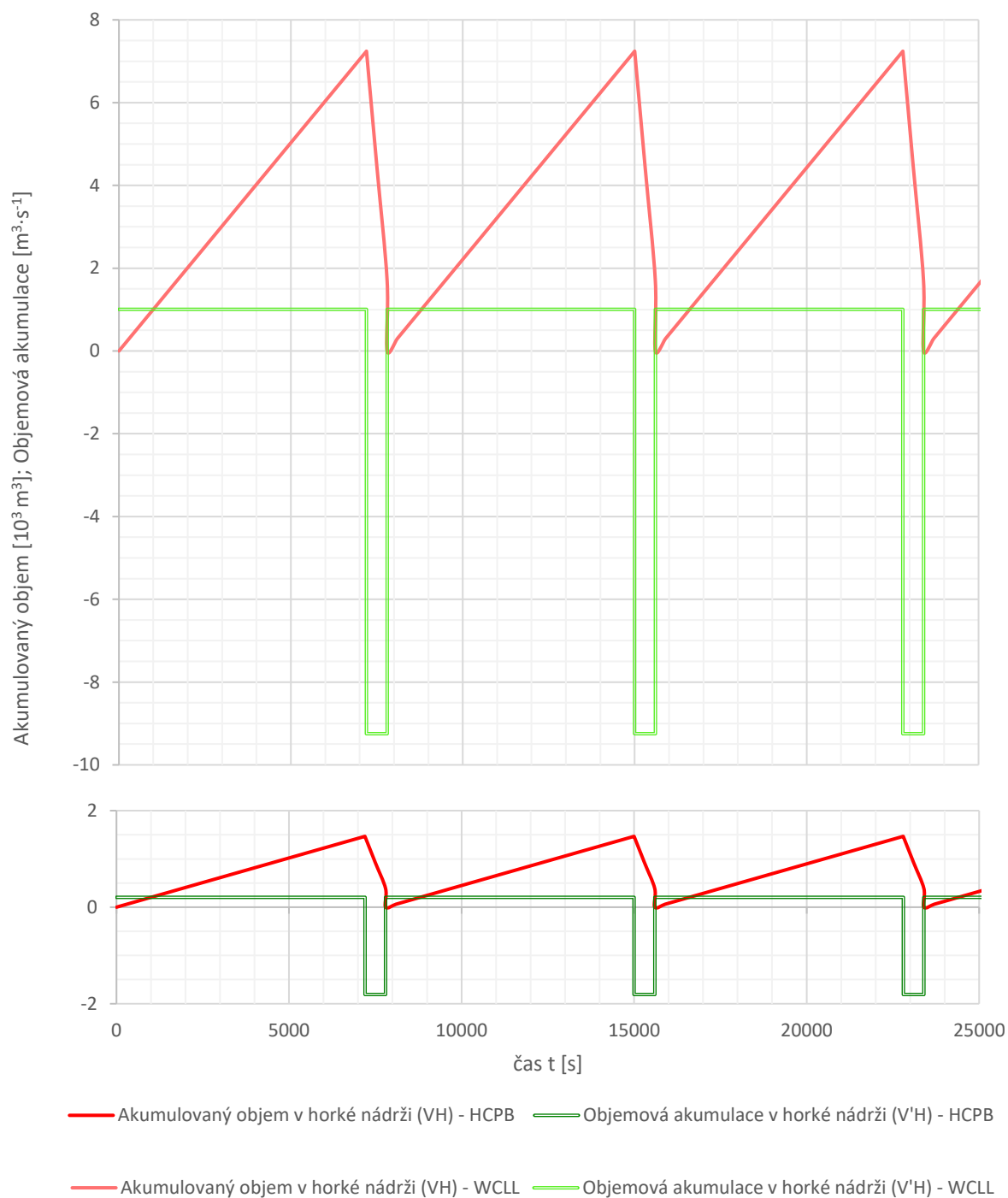
Tomu přímo odpovídá časový průběh ve studené nádrži. Pro doplnění:

### Časový průběh objemových průtoků studená – nádrž



Graf 4 – Časový průběh objemových průtoků ve větvích studené nádrže po dobu 3 cyklů

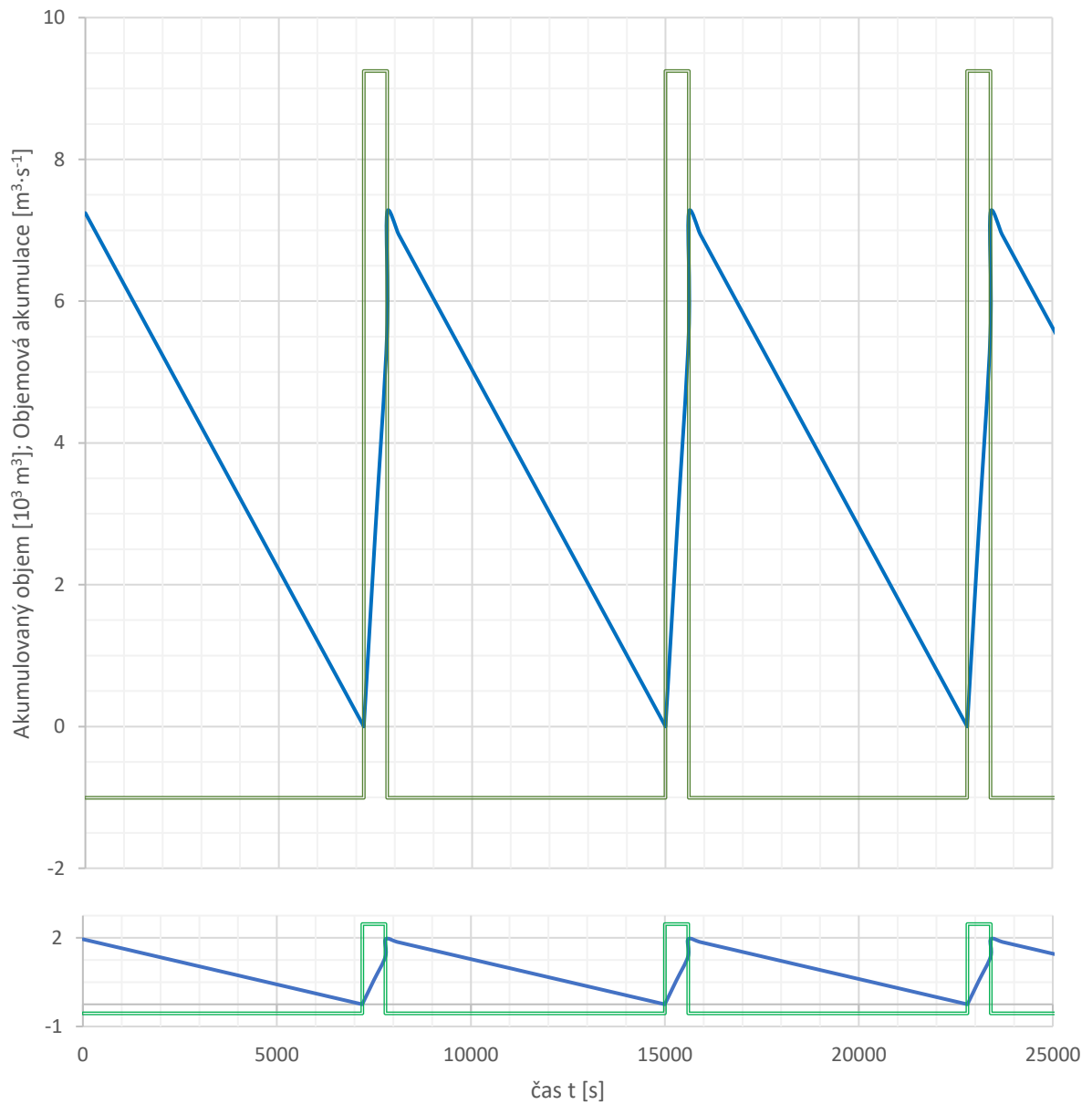
### Časový průběh objemové akumulace – horká nádrž



Graf 5 – Časový průběh akumulčních veličin v horké nádrži HCPB a WCLL po dobu 3 cyklů

Tomu opět odpovídá průběh akumulčních veličin ve studené nádrži. Pro doplnění:

### Časový průběh objemové akumulace – studená nádrž



— Akumulovaný objem ve studené nádrži (VC) - HCPB — Objemová akumulace ve studené nádrži (V'C) - HCPB

— Akumulovaný objem ve studené nádrži (VC) - WCLL — Objemová akumulace ve studené nádrži (V'C) - WCLL

Graf 6 – Časový průběh akumulčních veličin ve studené nádrži po dobu 3 cyklů HCPB a WCLL

### 3.4.4.2 Velikost nádrží

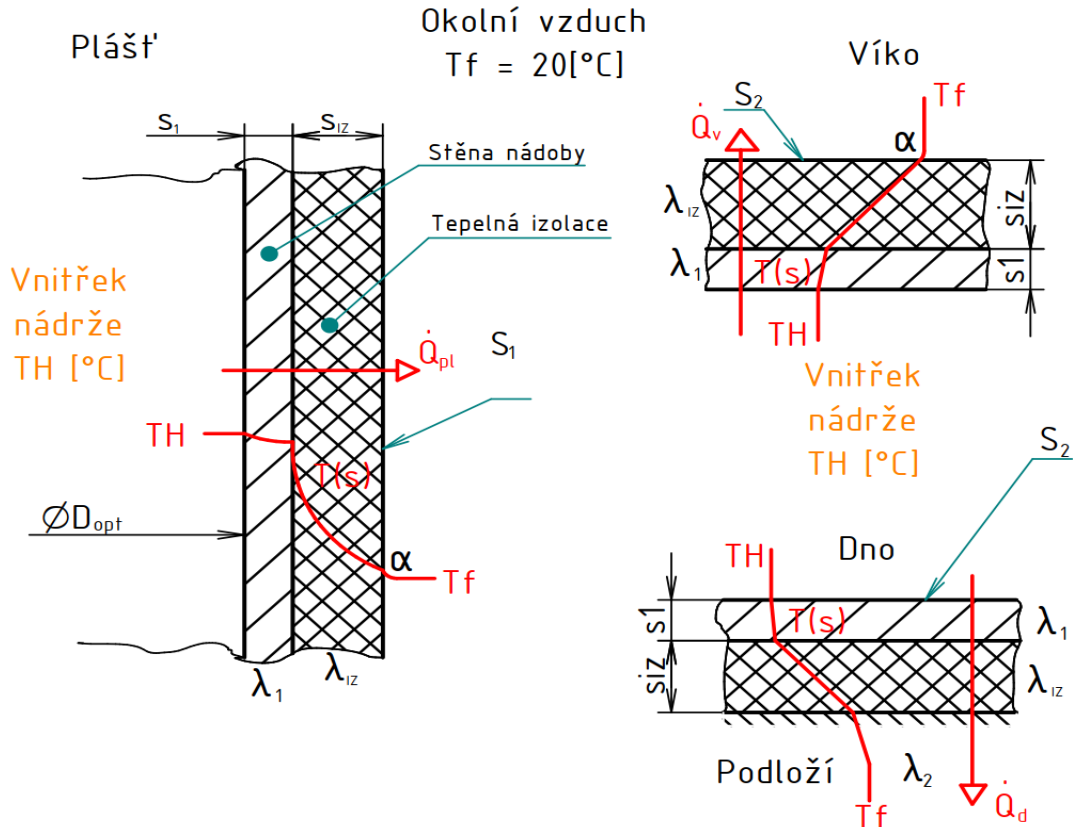
Při použití výsledných akumulovaných objemů z tab. 2 a vztahů pro optimální rozměry nádrže (5) a (6) jsou po zaokrouhlení objemu nahoru přibližné odhadnuté optimální velikosti nádrží následující:

Tabulka 3 – Výsledné rozměry nádrží na horkou sůl  $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$

Metoda odběru tepla	WCLL	HCPB
$V_{\min}$ [m <sup>3</sup> ]	7300	1500
$D_{\text{opt}}$ [m]	21	12,5
$V_{\text{opt}}$ [m]	5,2	3,1
Povrch [m <sup>2</sup> ]	1042	363

### 3.4.4.3 Tepelné ztráty do okolního vzduchu z nádrží

Z výpočtu vyplývá, že při WCLL je potřeba uskladnit zhruba 5x větší množství tekuté soli oproti HCPB. Je to dáno hlavně tím, že při HCPB se pracuje s větším teplotním rozsahem ohřevu soli. Kvůli maximální teplotě bude mít HCPB ale zároveň větší poměrné tepelné ztráty vztahené na m<sup>2</sup> plochy nádrže, proto je vhodné provést porovnání tepelných ztrát obou případů.



Obrázek 29 – znázornění ztrátových tepelných toků přes stěny při zanedbání tloušťky krycí vrstvy s vyznačením rozložení teplot podél obecné souřadnice stěny „s“.



Pro ztráty tepla skrze izolaci částí plochy  $S_i$  do okolního vzduchu lze využít vztah:

$$\dot{Q}_i = S_i \cdot k \cdot (T_h - T_f) \quad (12)$$

Kde  $k$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ] je součinitel prostupu tepla vyjadřující vliv tepelných odporů jednotlivých vrstev nádrže. Rozložení teplot podél stěn je vyobrazeno na obr. 31, kde zanedbávám tloušťku povrchové krycí vrstvy nádoby. Hodnoty tepelných vodivostí a součinitele přestupu tepla byly řádově určeny na základě doporučených hodnot, které nám byly poskytnuty v 6. semestru v rámci předmětu přenos hybnosti tepla a hmoty.

Součinitel prostupu tepla pláštěm je dán vztahem (vztažený na vnitřní plochu pláště  $S_{pl}$ ):

$$k_{pl} = \frac{1}{D_{opt}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha \cdot [D_{opt} + 2 \cdot (s_1 + s_{IZ})]} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{IZ}} \cdot \ln\left(\frac{D_{opt} + 2 \cdot (s_1 + s_{IZ})}{D_{opt}}\right)} \quad (13)$$

Součinitel prostupu tepla víkem:

$$k_v = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_{IZ}}{\lambda_{IZ}}} \quad (14)$$

Součinitel prostupu tepla dnem:

$$k_v = \frac{1}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_{IZ}}{\lambda_{IZ}} + \frac{s_{podloží}}{\lambda_2}} \quad (15)$$

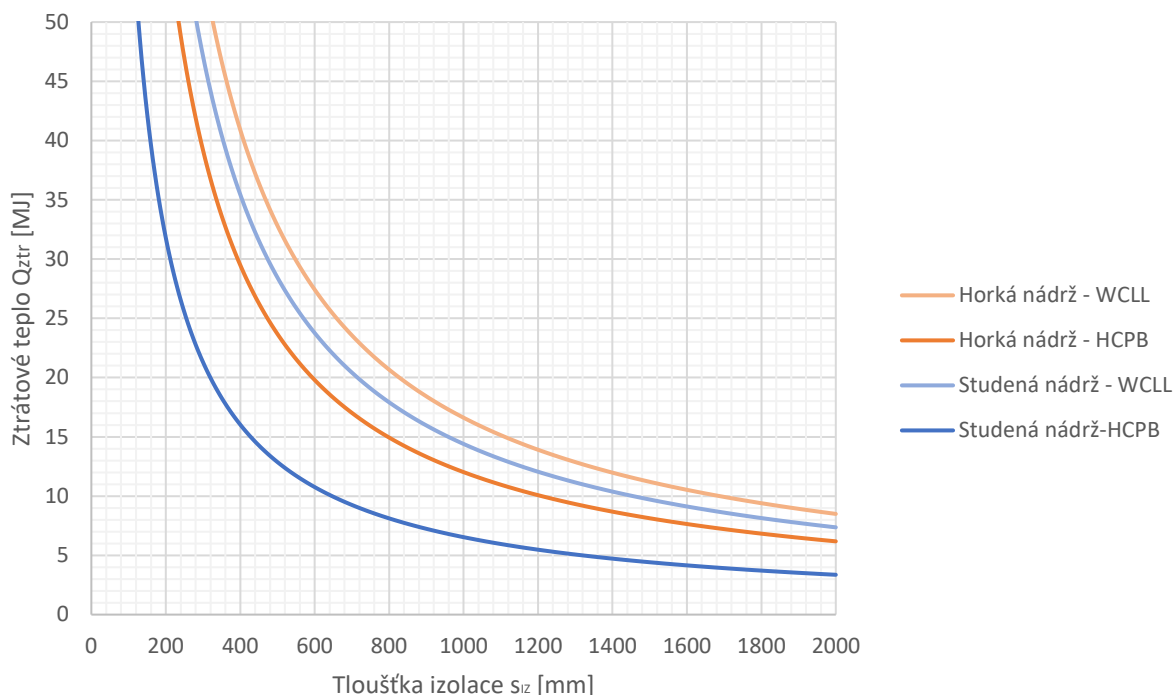
Vzhledem k rozsáhlosti podloží oproti tloušťce stěny nádoby i izolace uvažuji  $k_v \approx 0$ . Také kvůli tomu, že tloušťku stěny nádoby  $s_1$  uvažuji v řádu desítek mm, je vůči průměru nádoby a tepelné vodivosti oceli  $\lambda_1 \approx 15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (nerezová ocel) zanedbatelná.

Uvažuji-li volnou konvekci venkovního vzduchu, potom  $\alpha \approx 10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Izolační vrstvu pokládám za kvalitní izolaci, pro kterou platí přibližně  $\lambda_{IZ} \approx 0,01 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Po přijmutí těchto předpokladů a parametrů jsem zpracoval závislosti přibližného ztrátového tepla z nádoby na základě tloušťky izolace v grafu 7, celkové ztrátové teplo  $Q_{ztr}$  je posčítané přes jednotlivé dílčí plochy (víko a plášť nádoby)

## Ztracené teplo v nádržích během jednoho cyklu reaktoru



Graf 7 – ztrátové teplo z nádrží za jeden cyklus reaktoru (7800 sekund) v závislosti na tloušťce izolace

Z grafu je patrné, že oproti celkovému teple vyprodukovanému na reaktoru jsou tepelné ztráty do okolí poměrně malé. Nicméně pro izolaci tenčí, než 400 mm dochází k jejich prudkému růstu. Zároveň je vidět, že i když nádrže u WCLL pojmu 5x větší objem soli, ztracené teplo je u horké nádrže vlivem nižší pracovní teploty pouze zhruba 1,5x větší (za předpokladu použití jedné nádrže na horkou a jedné nádrže na studenou sůl).

### 3.4.5 Akumulace v termoklinickém tanku

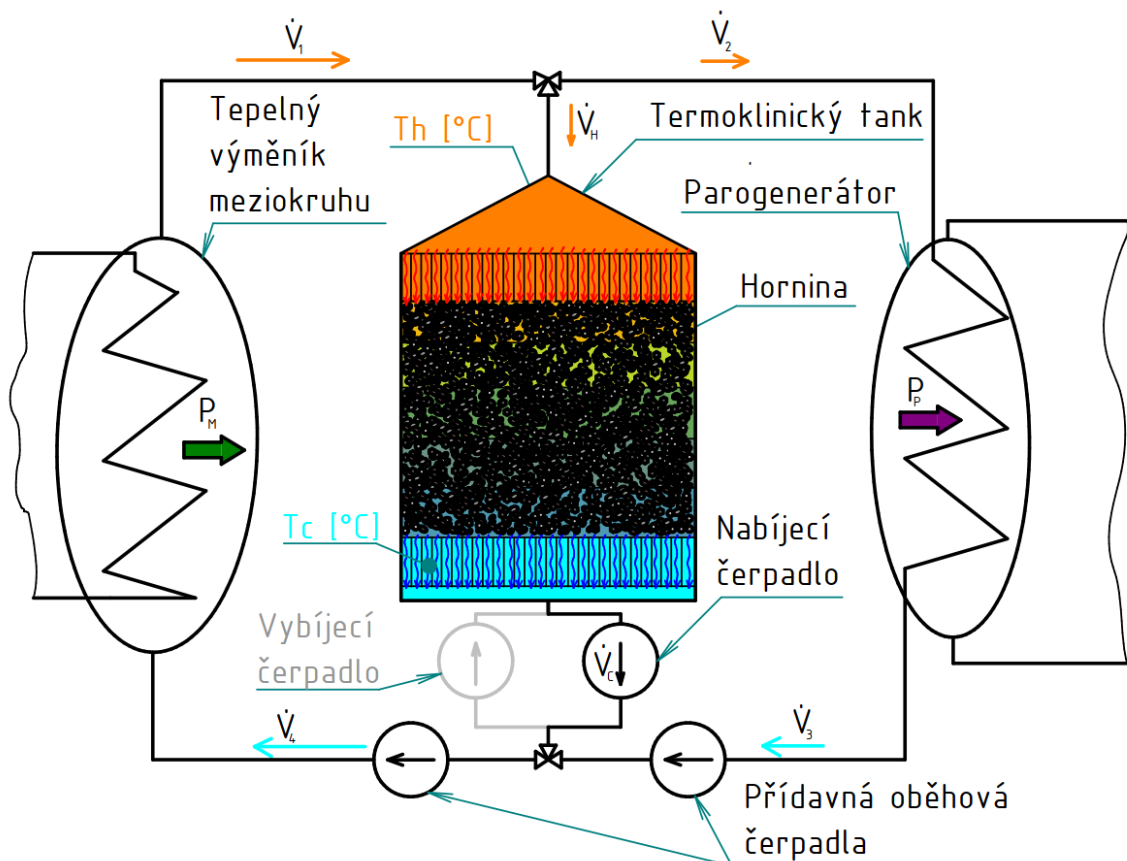
Další variantou je termoklinický tank. Akumulace spočívá v ohřevu akumulčního média. Tímto médiem může teoreticky být i horká sůl, každopádně potom by výsledek výpočtu minimálního objemu soli nebyl odlišný od systému dvou nádrží a metoda by oproti dvěma nádržím neměla smysl kvůli zbytečnému použití další soli „navíc“.

Aby byl termoklinický tank cenově velmi efektivní, budu uvažovat, že jako médium pro akumulaci tepla bude použita nějaká běžná hornina a tím pádem půjde o podstatně levnější variantu oproti tekuté soli. Studie [35] se zabývala proměřením vlastností šesti vybraných hornin použitých pro akumulaci tepla na vysoké teplotě. Horniny byly cyklicky zatěžovány mezi 100 a 600 °C při rychlosti ohřevu 2,6 °C/min.

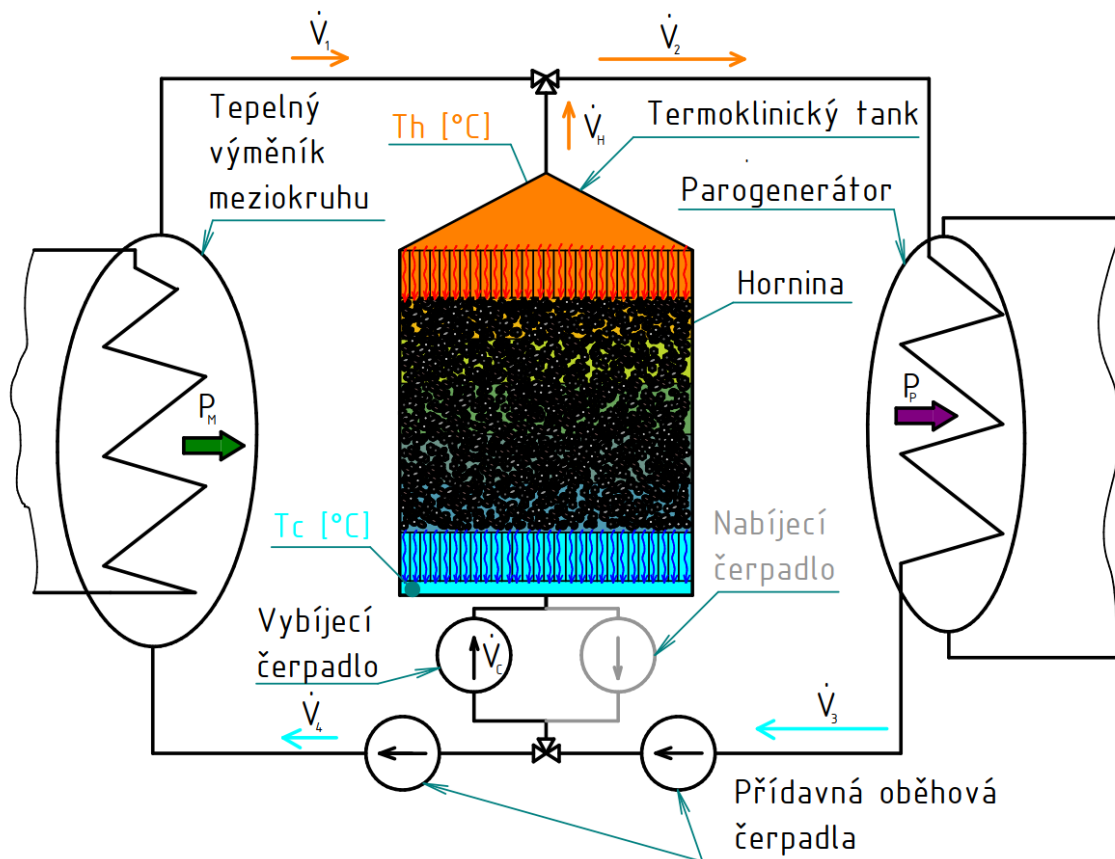
Kdyby se hornina rovnoměrně ochlazovala během doby prodlevy reaktoru v rozmezí pracovních teplot (WCLL: 280-320 °C; HCPB 270-480 °C), rychlosti dosahují 4 °C/min pro WCLL a 21 °C/min pro HCPB. Zejména u HCPB je proto hornina namáhána v podstatně větší míře. Vzhledem k tomu, že u termoklinického tanku využívajícího horninu je těžké zajistit ideální podmínky předání tepla hornině vlivem nehomogenit horniny a pórovitosti [35], použití pro HCPB se jeví jako náročné kvůli vysoké rychlosti ochlazování horniny.

Důležitou roli dále hrají chemické děje na rozhraní sůl/hornina, které by bylo nutné podrobně zkoumat. Možnou variantou je i zařazení termoklinického tanku u HCPB přímo do primárního okruhu, protože HCPB využívá pro odběr tepla helium, stejně, jako tomu bylo v případě [35], kdy bylo helium použito pro cyklické tepelné testování hornin.

Schéma aplikace termoklinického tanku je na obr. 32. (nabíjení) a 33. (vybíjení) s naznačením poměrné velikosti objemových toků. Tank obsahuje dvě čerpadla kvůli tomu, že při vybíjení proudí sůl opačným směrem, než při nabíjení a je nutný větší průtok a tím pádem i vyšší výkon čerpadla.



Obrázek 30 – Nabíjení termoklinického tanku



Obrázek 31 – Vybíjení termoklinického tanku

Velikosti objemových průtoků  $\dot{V}_1$  až  $\dot{V}_4$  jsou shodné s průtoky určenými při akumulaci ve dvou nádržích (tabulka 2). Průtoky do nádrže při nabíjení a vybíjení odpovídají průtokům  $\dot{V}_H$  a  $\dot{V}_C$ . Závěr studie [35] je, že při tepelném namáhání horniny postupně klesá tepelná kapacita horniny a zvyšuje se její pórovitost. Při aplikaci parametrů z tabulky 4 jsem sestavil tabulku 5, shrnující nutné objemy a hmotnosti hornin a hrubý odhad průměrné ceny za horninu v závislosti na pórovitosti (objemu vzduchových mezer  $V_{vz}$ ). Měrnou tepelnou kapacitu jsem použil při 300 °C pro WCLL a 350 °C pro HCPB na základě [35]. Odhad hustoty je hrubý, zdroj [36]. Ceny některých hornin ze zdrojů [32] a [33]. V tabulce 5 jsou udány průměrné hodnoty.

tabulka 4 – vlastnosti zkoumaných hornin.

Hornina:	Mafitická (Čedič)	Felsitická	Vápenatý pískovec	Vápenec	Křemitý slepenec	Hadec
$c_p$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] při 300 [°C]	1,05	1,12	1,15	1,20	1,07	1,30
$c_p$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] při 350 [°C]	1,07	1,18	1,18	1,25	1,09	1,35
$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	3000	2600	2650	2800	2600	2600
Cena [Kč·kg <sup>-1</sup> ]	4,3	/	1,5	3,5	/	4,9

tabulka 5 – Průměrný objem, hmotnost a cena horniny nutná k akumulaci tepla v závislosti na poměru objemů vzduchu a horniny (pórovitosti média)

/	WCLL			HCPB		
	$\bar{V}$ [m <sup>3</sup> ]	$\bar{m}$ [tisíc tun]	$\bar{cena}$ [milion Kč]	$\bar{V}$ [m <sup>3</sup> ]	$\bar{m}$ [tisíc tun]	$\bar{cena}$ [milion Kč]
0,3	12574	34	119,2	2320	6,3	22
0,5	13472	36,5	127,7	2485	6,7	23,6
1	17962	48,7	170,3	3313	9	31,4
1,5	22 454	60,8	212,8	4142	11,2	39,26

Z ceny je vidět, že se oproti skladování v tekuté soli, kde je předpokládána cena v řádu desítek miliard korun se u horniny pohybujeme maximálně ve stovkách milionů korun. Jedná se proto o několikrát levnější variantu akumulace tepelné energie. Vzhledem k vysoké nutné rychlosti chlazení horniny v případě HCPB se jedná o variantu představitelnější spíše pro WCLL.

### 3.4.6 Akumulace ve vícevrstevném zásobníku se změnou skupenství

Třetí variantou, kterou porovnám s předchozími je akumulace ve vícevrstevném zásobníku se změnou skupenství. Vzhledem k malému rozsahu pracovních teplot u WCLL se nejedná o vhodnou variantu pro tento způsob odběru tepla. Pro takto malý rozsah připadá v úvahu pouze ukládání tepla do tání jednoho média a vzhledem k teplotám tání vybraných solí pak konkrétně do FLiNaBe ( $T_t = 315$  °C).

Pro výpočet objemu vycházím z rovnice ohřevu rozšířené o skupenské teplo tání (shodné s teplem tuhnutí) z tabulky 1:

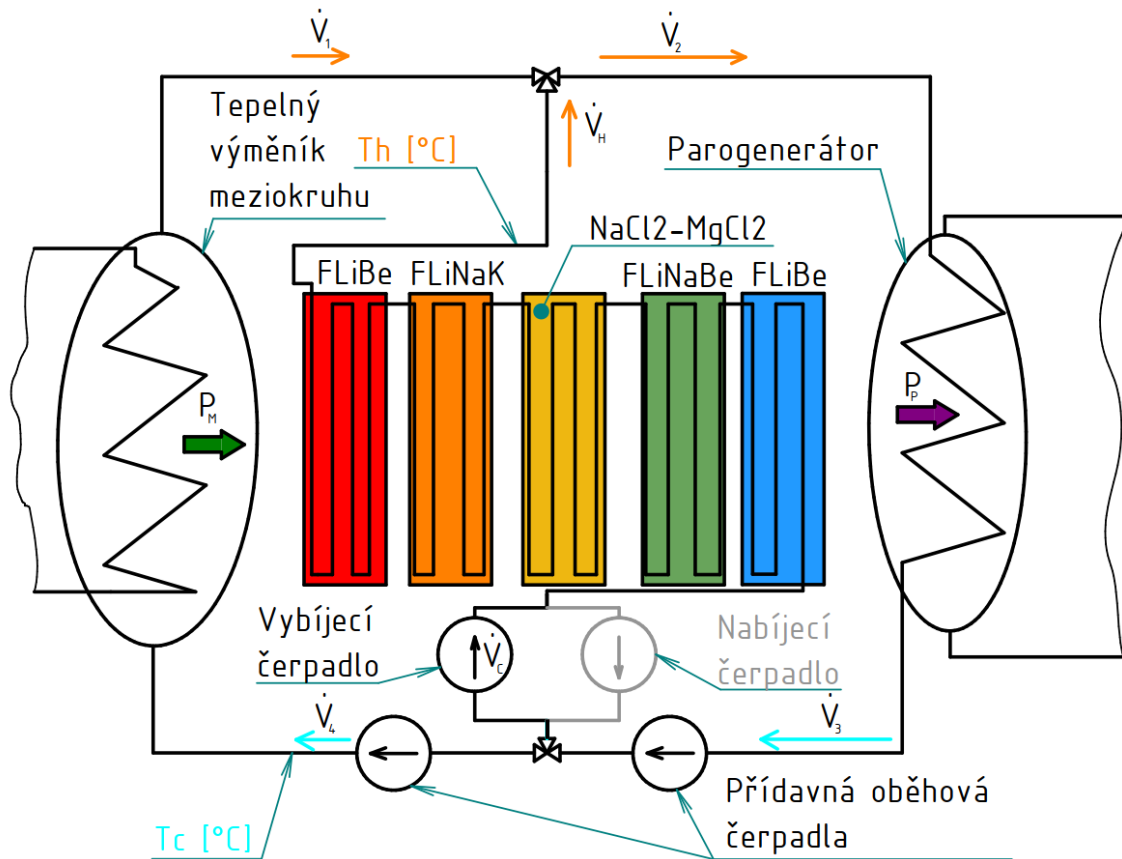
$$Q_{ak} = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \Delta T + \rho \cdot V \cdot l_t \quad (16)$$

Pro skladování tepla v FLiNaBe v případě WCLL je nutný objem soli po vyjádření z (16):

$$V = \frac{Q_{ak}}{\rho \cdot (c_p \cdot \Delta T + l_t)} = \frac{1110 \cdot 10^9}{1,998 \cdot 10^3 \cdot (2,046 \cdot 10^3 \cdot 40 + 544 \cdot 10^3)} \approx 888 \text{ [m}^3\text{]}$$

Problém s tímto způsobem je vzniklý teplotní gradient a nestejněměrné tavení, které s sebou metoda akumulace ve fázové změně přináší. Objem je sice podstatně menší než pouze pro ohřev soli, ale musel by se zajistit dostatečně rychlý odběr tepla při době prodlevy, což bývá dle [34] obtížné. Celková cena za FLiNaBe je dle ceny z tabulky 1 pak 6,78 miliard korun.

V případě HCPB lze soli rozdělit na rozsah pracovních teplot. Schéma takového systému je na obr. 34. Vyobrazen je ve stavu vybíjení. Stejně jako u termoklinického tanku odpovídají toky tokům v tabulce 2.



Obrázek 32 – Meziokruh s akumulací ve vícevrstvěném zásobníku ve stavu vybíjení

Soli jsou zvoleny sestupně podle jejich teplot tání, jak je doporučeno v [34]. Jako poslední vrstvu jsem volil FLiBe, která se bude pouze ohřívat, nikoliv tavit. Vlivem poklesu teploty podél zásobníku předpokládám rozložení teplot v jednotlivých tavených vrstvách sestupně:

$$480 - 460 - 450 - 430 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kvůli tomu je mezi teplotou studené soli a horké soli velký skok a bylo by nutné ji cestou zpět k reaktoru dochlazovat o 160 °C zpět na pracovní teplotu studené soli. Proto je poslední článek navržen tak, aby se ohříval maximálně na 300 °C bez tavení a nedocházelo k tak velkému skoku teplot. Pro rozvržení jednotlivých objemů jsem vycházel z celkového poměrného tepla, které sůl absorbuje během ohřevu z teploty  $T_c$  na horní teplotu  $T$ . Neboli:

$$q_c = \rho \cdot c_p \cdot (T - T_c) + \rho \cdot l_t$$

Podle toho jsem rozdělil celkové nutné absorbované teplo mezi jednotlivé zásobníky tak, že mají všechny stejný objem, shrnuto v tabulce 6.

tabulka 6 – vypočítané parametry vícevrstvého zásobníku

Vrstva:	1	2	3	4	5
Sůl	FLiBe	FLiNaK	NaCl-MgCl <sub>2</sub>	FLiNaBe	FLiBe-ohřev
Horní teplota T [°C]	480	460	450	430	300
Poměrné uložené teplo q <sub>c</sub> [GJ/m <sup>3</sup> ]	1,85	1,62	1,21	1,76	0,12
Uložené teplo [GJ]	322,13	281,88	211,03	303,57	21,38
Objem [m <sup>3</sup> ]	174,37	174,37	174,37	174,37	174,37
Cena [miliard Kč]	1,13	1,15	0,19	1,33	1,13
Cena celkem [miliard Kč]	4,92				
Cena při tavení 888 m <sup>3</sup> FLiNaBe (WCLL) [miliard Kč]	6,78				

Podobně, jako v případě dvou nádrží lze z objemu a vztahů (5) a (6) určit optimální rozměry nádrží ve tvaru válců pro HCPB, konkrétně:

$$D_{\text{opt}} = 6 \text{ [m]} \quad v_{\text{opt}} = 1,5 \text{ [m]}$$

Celkový objem zásobníku pro HCPB je zhruba 872 m<sup>3</sup>. Tato velikost je srovnatelná s velikostí pro WCLL a tavení jedné soli. S tím, že jsou v něm uvažovány tepelné ztráty při předávání tepla z teplotné soli NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub> solím do jednotlivých vrstev zásobníku, což rozměr zvětšuje. Nejobtížnější je zajistit rovnoměrné tavení každé vrstvy, jak je uvedeno v [34]. Jedná se ovšem o variantu, která je levnější, než dvě nádrže a o něco málo rozměrově úspornější.

### 3.5 Porovnání jednotlivých variant

#### 3.5.1 Cena za médium pro akumulaci tepla

Co se ceny týče, nejlevnější analyzovanou variantou je zde termoklinický tank, protože se v něm akumuluje teplo v běžně dostupných horninách, které jsou několikanásobně levnější než tekuté soli. Řádově se pohybujeme do stovek miliónů korun (tabulka 5). Systém vícevrstvého zásobníku je o poznání dražší, řádově jednotky miliard korun (tabulka 6). Srovnatelné ceny jako vícevrstvý zásobník dosahuje metoda dvou nádrží pro HCPB, protože má oproti WCLL větší rozsah pracovního teplotního spádu a tím pádem i menší rozměry nádrží. Nejdražší variantou zůstává akumulace ve dvou nádržích při metodě odběru tepla z reaktoru vodou (WCLL), kde cena za sůl dosahuje několik desítek miliard korun (tabulka 2).

### 3.5.2 Provedení, problémy a omezení aplikace

Nejjednodušší provedení tepelného zásobníku je bezpochyby systém dvou nádrží, kde není potřeba řešit přestupové tepelné děje mezi tekutou solí a dalším médiem. Problém varianty jsou rozměrné nádrže a velké množství horké tekuté soli, kterou je potřeba skladovat. S rozměrem nádrží pak souvisí i tepelné ztráty do okolí. Varianta je vhodná pro oba řešené způsoby odběru tepla z reaktoru.

Termoklinický tank je, co se komplikovanosti týče, uprostřed řešených variant. Jeho výrazné omezení je rychlost ohřívání či ochlazování média, kvůli kterému je jeho aplikace u HCPB, vlivem většího teplotního spádu oproti WCLL, velmi náročná. Problém, který by bylo nutné vyřešit je zajištění co největší pórovitosti média pro co největší teplosměnnou plochu a zároveň co nejmenší pórovitosti pro co nejlepší tepelnou vodivost. Tyto dva požadavky jdou přímo proti sobě a je třeba dojít k optimálnímu řešení. Dalším problémem je proměnlivost vlastností pórovitého média vlivem cyklického tepelného namáhání [35]. Zajímavou vlastností je možnost zařazení přímo do primárního okruhu a ohřevu horniny heliem v případě případného užití u HCPB, i přes zmíněnou náročnost v tomto případě.

Vícevrstvý zásobník je zde, co se funkční stránky týče, poměrně nejkomplicovanější variantou. Je třeba správně odstupňovat teploty tání použitých médií, aby byl schopný dostatečně dynamicky reagovat a nedocházelo ke zpoždění nabíjení či dobíjení vlivem teplotního gradientu. Samotné zajištění optimálního předání tepla mezi solí v tuhém stavu a tekutou solí proudící do zásobníku je velmi problematické, dle [34]. Omezením této varianty je nutnost práce s větším teplotním rozsahem, proto se jeví jako málo vhodná pro WCLL, pro jeho malý teplotní spád (40 °C) se totiž obtížně hledá více solí s různou teplotou tání v daném rozsahu.

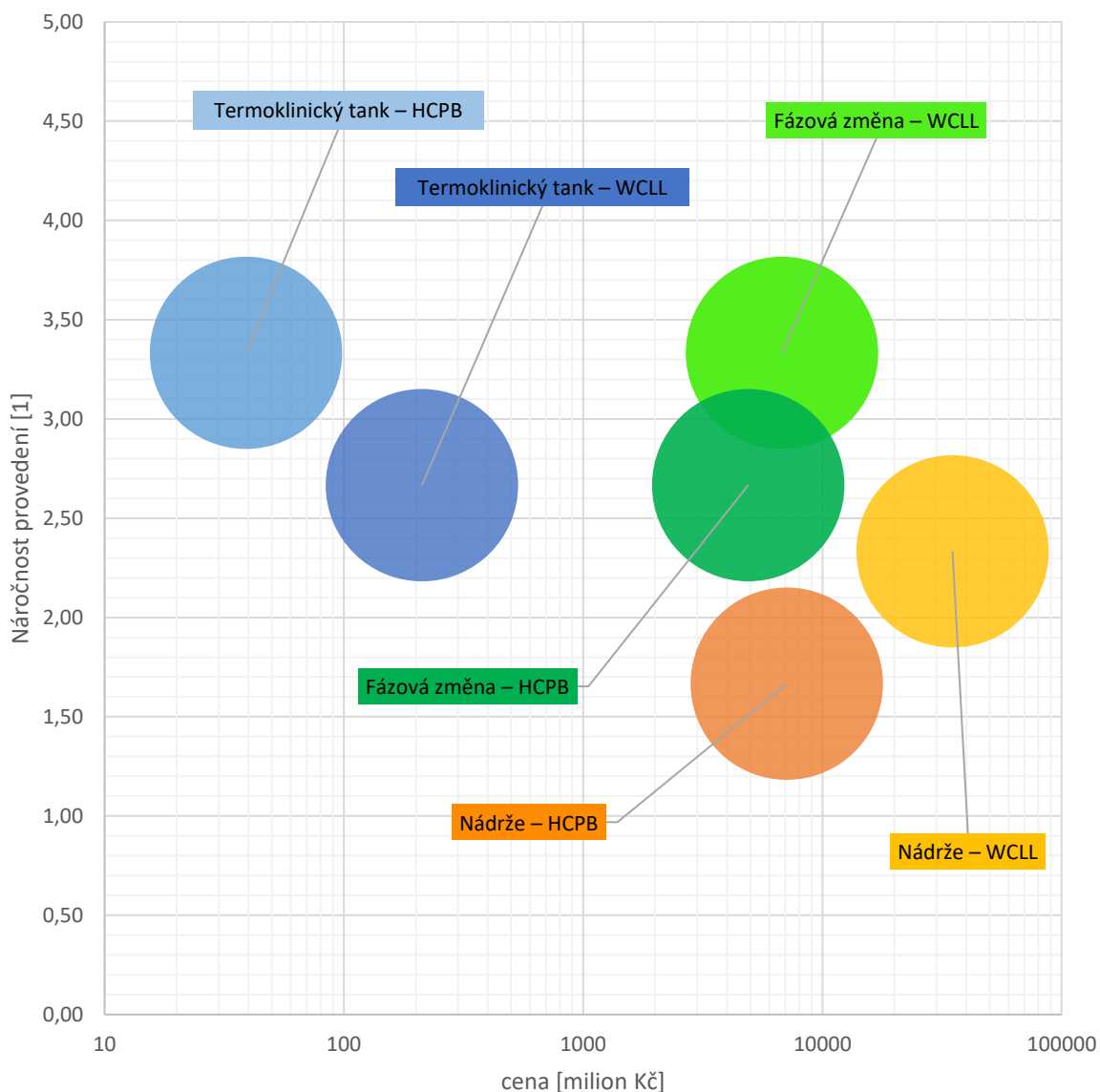
Další komplikovanost, kterou sdílí termoklinický tank s vícevrstvým zásobníkem je nutnost regulace teploty na vstupu a výstupu do systému akumulace, kde by bylo nutné zařadit v horké větvi přehřívání soli za zásobníkem při vybíjení a ve studené větvi dochlazování soli za zásobníkem při nabíjení. Jedná se o velmi komplikovaný problém, který je mimo rozsah této práce.

Výsledné porovnání ceny v milionech korun a náročnosti na stupnici od 1 do 5, kde 5 je nejvíce náročné je na následujícím grafu (graf 8). Náročnost jsem zhodnotil jako průměr za pomoci vlastností z tabulky 7.



tabulka 7 – zhodnocení ceny a náročnosti variant akumulace tepla

Hrubá cena za akumulační médium [milion korun]	Nádrže		Termoklinický tank		Fázová změna	
	WCLL	HCPB	WCLL	HCPB	WCLL	HCPB
	<b>35 000</b>	<b>7 100</b>	<b>212</b>	<b>39</b>	<b>6780</b>	<b>4900</b>
Komplexnost	1	1	3	3	3	5
Rozměry	5	3	4	3	2	2
Omezení použitelnosti	1	1	1	4	5	1
<b>Celková náročnost</b>	<b>2,33</b>	<b>1,67</b>	<b>2,67</b>	<b>3,33</b>	<b>3</b>	<b>2,33</b>



Graf 8 – vyobrazení ceny a náročnosti jednotlivých variant akumulace tepla

## 4 Závěr

Cílem této práce bylo v první řadě shrnout problematiku jaderné fúze a motivaci k jejímu užití pro výrobu elektrické energie v budoucnu. Dále popsat aktuální trendy ve vývoji Evropského prototypu demonstrační fúzní elektrárny DEMO. Následovala řešerše vhodných způsobů akumulace tepla ve vyrovnávacím mezikruhu, který elektrárna DEMO musí, vlivem pulsního režimu práce reaktoru, obsahovat. Na základě zjištěných poznatků ohledně plánovaných metod odběru tepla z reaktoru v DEMO a vhodných způsobů akumulace tepla byl zpracován výpočetní rozbor maximálního tepelného výkonu přiváděného do parogenerátoru a dále navržený a porovnány hrubé parametry rozměrů a objemových toků při akumulaci tepla ve dvou nádržích, termoklinickém tanku a vícevrstevném zásobníku se změnou skupenství.

Bylo zjištěno, že každá studovaná varianta má své přednosti i komplikace. Metoda dvou nádrží se jeví jako nejjednodušší varianta, je ovšem cenově náročná. Akumulace v termoklinickém tanku je zde nejlevnějším způsobem akumulace tepla. Varianta je ovšem složitě použitelná pro HCPB a vnitřní tepelný děj pro zajištění správných pracovních podmínek je komplikovaný a ovlivněný změnami fyzikálních vlastností pórovitého média vlivem tepelného namáhání. Vícevrstvý zásobník s fázovou změnou se jeví jako nejkomplikovanější koncept. Byť jeho výslednou náročnost v grafu 8 podstatně snižují jeho malé rozměry oproti zbylým variantám, funkčně je velmi náročný kvůli problematice správné volby odstupňovaných teplot tání médií v jednotlivých vrstvách a zajištění podmínek předání tepla z proudící soli do jednotlivých vrstev. Zároveň kvůli nutnosti velkého teplotního rozsahu není jednoduše použitelný pro WCLL. Koncept je ovšem rozměrově velmi příznivý a cenově levnější než metoda dvou nádrží.

## 5 Seznam použitých zdrojů

- [1] MCCracken, Garry M. et al. *Fúze: Energie vesmíru*. Praha: Mladá fronta, 2006. ISBN 8020414533; 9788020414533.
- [2] ENTler, Slavomír, Ondřej FICKER et al. *Budoucnost energetiky: jaderná fúze*. Praha: Středisko společných činností Akademi věd České republiky, v v. i., 2019. ISBN 9788027060573; 8027060575.
- [3] LÉPINE-SZILY, Alinka a Pierre DESCOUVEMONT. Nuclear astrophysics: nucleosynthesis in the Universe. *International Journal of Astrobiology* [online]. 2012, vol. 11, no. 4, s. 243-250. ISSN 14735504.
- [4] Science Photographs. *Fine Art America* [online]. Science Source, 2015 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://fineartamerica.com/featured/6-sudbury-neutrino-observatory-sno-science-source.html>
- [5] RITCHIE, Hannah, Max ROSER a Pablo ROSADO. Energy mix. *Our World in Data* [online]. 2020 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/energy-mix>.
- [6] T COOK, Gordon, Charles J PASSO a Brian CARTER. 6 - ENVIRONMENTAL LIQUID SCINTILLATION ANALYSIS. *Handbook of Radioactivity Analysis*. 2003 [cit. 2021-11-22]. ISBN 9780124366039. Dostupné z: doi:10.1016/B978-012436603-9/50011-9.
- [7] Energy.gov. *Energy.gov-science*. [Online] U.S. Department of energy, 31. 03. 2021. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/science/fes/articles/understanding-outsized-effect-hydrogen-isotopes.html>
- [8] PERKINS, L. J. et al. Shock ignition: a new approach to high gain inertial confinement fusion on the national ignition facility. *Physical Review Letters*. 2009, vol. 103, no. 4, s. 045004-045004. ISSN 0031-9007.
- [9] Pursuing Fusion Ignition. Lawrence Livermore National Laboratory [online]. Lawrence Livermore National Laboratory, 2018 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://lasers.llnl.gov/science/pursuit-of-ignition>.
- [10] Can Crusher – Magnetic Implosion. Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations [online]. Harvard University [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/can-crusher-magnetic-implosion>.
- [11] Pinch (plasma physics). Wikiwand [online]. [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: [https://www.wikiwand.com/en/Pinch\\_\(plasma\\_physics\)](https://www.wikiwand.com/en/Pinch_(plasma_physics)).
- [12] Cyclotron frequency. EUROfusion [online]. EUROfusion CONSORTIUM RESEARCH INSTITUTIONS [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.euro-fusion.org/glossary/glossary-term/cyclotron-frequency/>.
- [13] WIESEMANN, K. *A Short Introduction to Plasma Physics*. 2014.
- [14] MIZUNO, Yosuke. *Plasma Astrophysics Chapter 2: Single particle motiron*. Taichung City : Institute of Astronomy, National Tsing-Hua University [online].[cit. 2021-11-30]. Dostupné z <https://itp.uni-frankfurt.de/~mizuno/plastro/PlasmaAstro-ch2.pdf>

- [15] PROLL, Josefine H. E. Trapped-particle instabilities in quasi-isodynamic stellarators [online]. Greifswald, 2014 [cit. 2021-12-02].  
Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/262364216\\_Trapped-particle\\_instabilities\\_in\\_quasi-isodynamic\\_stellarators](https://www.researchgate.net/publication/262364216_Trapped-particle_instabilities_in_quasi-isodynamic_stellarators). Disertační práce. Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald.
- [16] KOBAYASHI, M. a S. MASUZAKI et al. Control of 3D edge radiation structure with RMP fields applied to stochastic layer and stabilization of radiative divertor plasma in LHD. SlideToDoc [online]. San Diego: IAEA Fusion Energy Conference, 2012 [cit. 2021-12-03].  
Dostupné z: <https://slidetodoc.com/24-th-iaea-fusion-energy-conference-iaea-cn197>.
- [17] Harnessing the Power of the Sun on Earth: Major Advance in Stellarator Performance for Fusion Energy. SciTechDaily [online]. Princeton, New Jersey: Princeton University, 2021 [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: <https://scitechdaily.com/harnessing-the-power-of-the-sun-on-earth-major-advance-in-stellarator-performance-for-fusion-energy/>.
- [18] KLINGER, Thomas a A. ALONSO et al. Performance and properties of the first plasmas of Wendelstein 7-X. Plasma Physics and Controlled Fusion [online]. 2017 [cit. 2021-12-12]. ISSN 1361-6587. Dostupné z: [doi:10.1088/0741-3335/59/1/014018](https://doi.org/10.1088/0741-3335/59/1/014018).
- [19] ANDREEVA, T. Vacuum magnetic configurations of Wendelstein 7-X (IPP--III/270). Max-Planck-Institut fuer Plasmaphysik, Garching [online]. 2002 [cit. 2021-12-12]
- [20] BALSHAW, Nick. Tracking down all the world's tokamaks. Iter [online]. ITER ORGANIZATION, 2008 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.iter.org/newsline/47/672>.
- [21] GAMILLO, Elizabeth. China's Artificial Sun Just Broke a Record for Longest Sustained Nuclear Fusion. Smithsonian Magazine. [Online]. 2022 [cit. 2022-02-15]  
Dostupné z: <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/chinas-artificial-sun-reactor-broke-record-for-nuclear-fusion-180979336/>.
- [22] CHENCHEN, Zhao. China's 'artificial sun' smashes 1000-second fusion world record. CGTN See the difference. [Online] 2020 [cit. 2022-02-15]  
Dostupné z: <https://news.cgtn.com/news/2021-12-31/China-s-artificial-sun-smashes-1000-second-fusion-world-record-16rIFJZzHqM/index.html>.
- [23] What will ITER do? Iter [online]. ITER ORGANIZATION [cit. 2022-02-15].  
Dostupné z: <https://www.iter.org/sci/Goals>.
- [24] MARTELLI, Emanuela et al. Study of EU DEMO WCLL breeding blanket and primary heat transfer system integration. Fusion Engineering and Design. 2018, vol. 136, s. 828-833. ISSN 0920-3796.
- [25] BUBELIS, Evaldas, Wolfgang HERING a Sara PEREZ-MARTIN. Conceptual designs of PHTS, ESS and PCS for DEMO BoP with helium cooled BB concept. Fusion Engineering and Design. 2018, vol. 136, s. 367-371. ISSN 0920-3796.
- [26] MOSCATO, I. et al. Progress in the design development of EU DEMO helium-cooled pebble bed primary heat transfer system. Fusion Engineering and Design. 2019, vol. 146, s. 2416-2420. ISSN 0920-3796.
- [27] ROVIRA, Antonio et al. Proposal of optimized power cycles for the DEMO power plant (EUROfusion). Fusion Engineering and Design. 2019, vol. 148, s. 111290. ISSN 0920-3796.

- [28] MALINOWSKI, Leszek, Monika LEWANDOWSKA a Fabio GIANNETTI. Design and analysis of a new configuration of secondary circuit of the EU-DEMO fusion power plant using GateCycle. Fusion Engineering and Design. 2018, vol. 136, s. 1149-1152. ISSN 0920-3796.
- [29] UTILI, Marco. Challenges and R&D Needs for PbLi Coolant and Breeder for Fusion Applications. IAEA [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2017 [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Shared%20Documents/Workshop%20Coolants/Presentations/5.07/Utili.pdf>.
- [30] HOMMONAY, Zoltán a Attila HALÁCSY. Thermal Energy Storage Systems for a Pulsed DEMO Using Molten Salts. Budapest, 2006. EFDA Technology Workprogramme.
- [31] XU, Chao et al. Effects of solid particle properties on the thermal performance of a packed-bed molten-salt thermocline thermal storage system. Applied Thermal Engineering. 2013, vol. 57, no. 1-2, s. 69-80. ISSN 1359-4311.
- [32] Kusové kameny. DOLFI STONE [online]. [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.dolfistone.cz/kusove-kameny/dolomit/>.
- [33] Sypké materiály. Obi [Online]. [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.obi.cz/sypke-materialy/big-bag-cedicove-drcene-kamenivo-cerne-25-50-mm-1-000-kg/p/5488325>.
- [34] N, Lakshmi Narasimhan. Assessment of latent heat thermal storage systems operating with multiple phase change materials. Journal of Energy Storage. 2019, vol. 23, s. 442-455. ISSN 2352-152X.
- [35] BECATTINI, Viola et al. Experimental investigation of the thermal and mechanical stability of rocks for high-temperature thermal-energy storage. Applied Energy. 2017, vol. 203, s. 373-389. ISSN 0306-2619.
- [36] BUREŠ, Jiří. conVERTER. Hustota-pevné látky. [Online] 2002. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-pevne.htm>.
- [37] Dva pohledy do vesmíru [online]. ČEZ [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/zaj10.htm#:~:text=Chemick%C3%A9%20slo%C5%BEen%C3%AD%20je%20pom%C4%9Brn%C4%9B%20jednoduch%C3%A9,%3A%20%2C85.1026%20J>.

## 6 Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázek 1 – Světový energetický mix – roční produkce energie v TWh v průběhu let – zdroj [5]8	
Obrázek 2– Detektor neutrin 2 km pod zemí v neutrinové observatoři Sudbury – zdroj [4] .....	9
Obrázek 3 – Vazebná energie uložená v jádrech prvků – zdroj [3] .....	10
Obrázek 4 – Izotopy vodíku – zdroj [7] .....	11
Obrázek 5 – Fúzní reakce vodík → helium – zdroj [1] .....	11
Obrázek 6 – Celková fúzní reakce vodík → helium – zdroj [1].....	12
Obrázek 7 – Vyobrazení Columbovské bariéry, kterou je nutné překonat – zdroj [2] .....	12
Obrázek 8 – Znázornění rozdílu mezi plynem (vlevo) a plazmatem (vpravo) – zdroj [1].....	13
Obrázek 9 – Možnosti dosažení podmínek pro zapálení – zdroj [1] .....	14
Obrázek 10 – Výřez ze standardního palivového terčíku v NIF – zdroj [8]. .....	15
Obrázek 11 – Fáze fúze s inerciálním udržením při nepřímém ohřevu za pomoci hohlraumu – zdroj [9] .....	16
Obrázek 12 – pinč efekt demonstrováný zařízením „Can pincher“ na hliníkových plechovkách. – zdroj [10,11] .....	16
Obrázek 13 – Výsledný gyrační pohyb kladně nabitého iontu – zdroj [12] .....	17
Obrázek 14 – Skoková změna polohy gyračního centra daná srážkou částic – zdroj [13].....	18
Obrázek 15 – Nestability plazmatu v lineární komoře – zdroj [1].....	19
Obrázek 16 – grad-B drift způsobený nehomogenním magnetickým polem. Směrem nahoru se síla pole zvětšuje. Částice, podle svého náboje, driftuje podél osy x. Siločáry toroidálního pole jdou směrem ven z obrázku – zdroj [14].....	19
Obrázek 17 – konvenční stellarátor – zdroj [15].....	20
Obrázek 18 – Large Helical Device, Toki, Japonsko – zdroj [16] .....	21
Obrázek 19 – Náhled Stellarátoru Wendelstein X-7 – zdroj [18] .....	21
Obrázek 20 – cívky stellarátoru Wendelstein 7-X seshora, tvořící pětiúhelník (pětinás. symetrii) – zdroj [19].....	22
Obrázek 21 – Schéma tokamaku s označením hlavních částí, zdroj [18].....	22
Obrázek 22 – Grafický model tokamaku ITER – z oficiálních webových stránek iter.org .....	24
Obrázek 23 – Schéma tepelného oběhu fúzní elektrárny s chlazením blanketu reaktoru heliem (HCPB BB) – zdroj [26].....	26
Obrázek 24 – Schema tepelného okruhu pro elektrárnu DEMO s WCLL BB, včetně navrhovaných parametrů toků – zdroj [24] .....	27
Obrázek 25 – Schéma tepelného oběhu fúzní elektrárny s chlazením reaktoru principem HCPB BB – zdroj [25] .....	28
Obrázek 26– Schéma meziokruhu s akumulací ve dvou nádržích .....	31

Obrázek 27 – Solární koncentrační elektrárna s akumulací v systému vícevrstvé akumulace – zdroj [30] [31].....	32
Obrázek 28 – Vnitřní konstrukce termoklinické nádrže – zdroj [31] .....	33
Obrázek 29 – Obecné schéma meziokruhu s akumulací.....	39
Obrázek 30 – Meziokruh se systémem horká/studená nádrž .....	41
Obrázek 31 – znázornění ztrátových tepelných toků přes stěny při zanedbání tloušťky krycí vrstvy s vyznačením rozložení teplot podél obecné souřadnice stěny „s“ .....	48
Obrázek 32 – Nabíjení termoklinického tanku.....	51
Obrázek 33 – Vybíjení termoklinického tanku .....	52
Obrázek 34 – Meziokruh s akumulací ve vícevrstvěném zásobníku ve stavu vybíjení .....	54
Tabulka 1 – parametry vybraných tekutých solí, poskytnuté ústavem energetiky FS ČVUT .....	35
Tabulka 2 – Výsledné objemové průtoky v meziokruhu, rychlost akumulace a akumulované teplo .....	42
Tabulka 3 – Výsledné rozměry nádrží na horkou sůl $\text{NaNO}_3\text{--KNO}_3$ .....	48
Tabulka 4 – vlastnosti zkoumaných hornin.....	52
Tabulka 5 – Průměrný objem, hmotnost a cena horniny nutná k akumulaci tepla v závislosti na poměru objemů vzduchu a horniny (pórovitosti média) .....	53
Tabulka 6 – vypočítané parametry vícevrstvého zásobníku .....	55
Tabulka 7 – zhodnocení ceny a náročnosti variant akumulace tepla .....	57
Graf 1 – rozbor maximálního tepelného výkonu přivedeného do parogenerátoru z meziokruhu v závislosti na době prodlevy .....	40
Graf 2 – časový průběh tepelných výkonů během 3 cyklů při době prodlevy 10 minut .....	43
Graf 3 – Časový průběh objemových průtoků ve větvích horké nádrže WCLL a HCPB po dobu 3 cyklů .....	44
Graf 4 – Časový průběh objemových průtoků ve větvích studené nádrže po dobu 3 cyklů.....	45
Graf 5 – Časový průběh akumulčních veličin v horké nádrži HCPB a WCLL po dobu 3 cyklů....	46
Graf 6 – Časový průběh akumulčních veličin ve studené nádrži po dobu 3 cyklů HCBP a WCLL .....	47
Graf 7 – ztrátové teplo z nádrží za jeden cyklus reaktoru (7800 sekund) v závislosti na tloušťce izolace .....	50
Graf 8 – vyobrazení ceny a náročnosti jednotlivých variant akumulace tepla .....	57