

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Geotermální energie, geotermální elektrárny**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří NEPRAŠ**  
Osobní číslo: **E10B0057K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Geotermální energie, geotermální elektrárny**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište způsoby využití geotermální energie a porovnejte jejich vhodnost pro různé lokality.
2. Rozdělení, tepelné oběhy a konstrukce geotermálních elektráren.
3. Posuďte možný podíl geotermálních elektráren v celkové výrobě elektrické energie.
4. Navrhněte možnosti využití těchto technologií geotermálních elektráren v České republice a případné lokality jejich umístění.




Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


1. Quasching Volker: Obnovitelné zdroje energií.
2. Přednášky a skripta z doporučených předmětů.
3. Elektronické informační zdroje a firemní katalogy.

Vedoucí bakalářské práce: Prof. Ing. Jan Mühlbacher, CSc.  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012  
Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

**Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku geotermální energie a geotermálních elektráren. Popisuje druhy geotermálních zdrojů a geotermálních elektráren. Dále hodnotí podíl světového využití a využití v České republice.

**Klíčová slova**

Geotermální energie, geotermální elektrárny, parní cyklus, binární cyklus, teplo suchých hornin.

**Abstract**

The presented bachelor thesis is focused on the issues of geothermal energy and geothermal power plants. It describes different types of geothermal resources and geothermal power plants. Further it evaluates the share of the world utilization and utilization in the Czech Republic.

**Key words**

Geothermal energy, geothermal power plants, hot dry rock, steam cycle, flash cycle, binary cycle.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 3.6.2013

Nepraš Jiří

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval panu Prof. Ing. Janu Mühlbacherovi, CSc a vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Luboši Frankovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1. GEOTERMÁLNÍ ENERGIE</b> .....	<b>11</b>
1.1 ZDROJE GEOTERMÁLNÍ ENERGIE .....	11
1.2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY PRO HODNOCENÍ ZEMSKÉHO TEPLA .....	12
1.2.1 Teplota .....	12
1.2.2 Tepelný gradient .....	13
1.2.3 Tepelná vodivost hornin .....	13
1.2.4 Tepelný tok .....	13
1.3 KATEGORIZACE ZDROJŮ GEOTERMÁLNÍ ENERGIE .....	14
1.3.1 Hydrogeotermální zdroje .....	14
1.3.2 Rozšířené geotermální systémy EGS .....	15
1.3.3 Teplotní kategorizace .....	18
1.4 ZPŮSOB VYUŽITÍ GEOTERMÁLNÍ ENERGIE .....	18
1.4.1 Vytápění objektů .....	18
1.4.2 Přeměna na elektrickou energii .....	21
<b>2 GEOTERMÁLNÍ ELEKTRÁRNY</b> .....	<b>22</b>
2.1 HISTORIE VÝVOJE GEOTERMÁLNÍCH ELEKTRÁREN .....	22
2.2 ZÁKLADNÍ ČÁSTI GEOTERMÁLNÍCH ELEKTRÁREN .....	22
2.2.1 Zdroj geotermální vody .....	23
2.2.2 Separátor .....	23
2.2.3 Výparník .....	23
2.2.4 Turbína .....	23
2.2.5 Přihříváč .....	24
2.2.6 Kondenzátor .....	24
2.3 ROZDĚLENÍ GEOTERMÁLNÍCH ELEKTRÁREN DLE PARAMETRŮ ZDROJE .....	25
2.3.1 Přímé využívání geotermálních par (Direct Dry Steam) .....	25
2.3.2 Přímé využívání geotermálních mokrých par, vody – jednoduchý oběh (Flash Cycle) .....	26
2.3.3 Přímé využívání geotermálních mokrých par, vody – zdvojený systém (Double Flash Cycle) .....	29
2.3.4 Nepřímé využívání geotermální vody (Binary Cycle) .....	31
<b>3 PODÍL GEOTERMÁLNÍCH ELEKTRÁREN VE VÝROBĚ ELEKTRICKÉ ENERGIE</b> .....	<b>41</b>
3.1 ENVIRONMENTÁLNÍ ZHODNOCENÍ GEOTERMÁLNÍCH ELEKTRÁREN .....	45
<b>4 MOŽNOSTI VYUŽITÍ SYSTÉMU GEOTERMÁLNÍCH ELEKTRÁREN V ČR</b> .....	<b>47</b>
4.1 GEOTERMÁLNÍ POTENCIÁL ČR PRO VÝROBU TEPLA A EL. ENERGIE .....	48
4.1.1 Hodnocení geotermálního potenciálu ČR dle základních parametrů .....	48
4.1.2 Zdroje geotermální energie v ČR .....	50
4.2 ORIENTAČNÍ EKONOMICKÝ ROZBOR UKÁZKOVÉHO PROJEKTU .....	51
4.3 REALIZOVANÉ GEOTERMÁLNÍ PROJEKTY V ČR .....	52
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>53</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>55</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>57</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>57</b>



## Seznam symbolů a zkratk

$\Theta_h$ .....	Teplota geotermální vody [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$p_n$ .....	Normální tlak ( $p_n=101,325 \text{ kPa}$ ) [Pa]
$p_{nas}$ .....	Tlak nasycené vodní páry pro danou teplotu [Pa]
$p_h$ .....	Tlak působící na geotermální vodu [Pa]
$t_v$ .....	Teplota varu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\nu$ .....	Tepelný gradient [ $^{\circ}\text{Ckm}^{-1}$ ]
$\lambda$ .....	Součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]
$H$ .....	Entalpie [J]
$p$ .....	tlak [Pa]
$V$ .....	Objem [ $\text{m}^3$ ]
$s$ .....	Entropie [ $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]
$T$ .....	Teplota [K]
$dQ$ .....	Teplo přenesené do systému
$\Phi_q$ .....	Tepelný tok [ $\text{W.m}^{-2}$ ]
$P_e$ .....	Výkon elektrický [ $\text{W}_e$ ]
$P_t$ .....	Výkon tepelný [ $\text{W}_t$ ]

## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na geotermální energii a její přeměnu na energii elektrickou. Dále zhodnocuje její stávající využití.

Text je rozdělen do čtyř hlavních částí. První část popisuje geotermální energii, její vznik, způsob získávání, kategorizaci jejích zdrojů a základních parametry, podle kterých se zdroje hodnotí. V druhé kapitole jsou kategorizovány geotermální elektrárny dle teploty hydro-geotermálního zdroje a podle vnitřního uspořádání. Třetí kapitola obsahuje zhodnocení podílu elektrické energie k celkovému množství elektrické energie vyrobené. V závěrečné kapitole je pak popsána možnost využití zdrojů geotermální energie v České Republice.

# 1. Geotermální energie

## 1.1 Zdroje geotermální energie

Geotermální energie je nezbytná pro geologické pochody naší planety. Přesný způsob vzniku a doplňování této energie je poměrně komplikovaný. Obecně lze původ geotermální energie rozdělit do několika základních zdrojů:

1. Původní teplo zemského jádra – Tato tepelná energie vznikala souběžně s formováním planety. Dá se říci, že je uložena v zemském jádře (a neustále odčerpávána), ovšem kolik množství energie zemského jádra je tohoto původu nelze určit, protože je neustále doplňována některými z ostatních složek, především z radioaktivního rozpadu prvků.
2. Radioaktivní rozpad prvků – Mezi prvky jejichž radioaktivní rozpad produkuje nejvíce tepelné energie, patří například uran, jehož radioaktivní rozpad doplnil od vzniku země přibližně 60% vnitřní tepelné energie, byl doplňován thoriem a radioaktivním draslíkem.
3. Tektonický pohyb – Kinetická energie tektonických desek je při jejich pohybu přeměňována na tepelnou. K tomuto zdroji lze také přidat energii vzniklou stlačováním nižších vrstev vahou nadloží a náhlých uvolněných tlaků. Množství energie způsobené tímto pohybem nelze přesně určit.
4. Fyzikálně chemické reakce – Exotermické reakce probíhající v zemské kůře mohou být například oxidace (slučování prvků s kyslíkem). V hlubších vrstvách zemské kůry dochází k rekrystalizaci minerálů a jejich změně na jiné o vyšší hustotě. Rekrystalizace minerálů je závislá na tlaku, který na ně působí, tento tepelný zdroj proto souvisí se zdrojem předchozím.
5. Energie slapových sil – tato energie je produkována třením vodních mas o sebe i o pevninský pás
6. Sluneční záření – Je trvalým přínosem obrovského množství energie. Teplo slunečního záření ovšem proniká pouze mělce pod povrch. Dle časopisu Planeta č.4/2007, při teplotě 20°C na povrchu Země a 10°C v hloubce dvou metrů se do hloubky jednoho metru pod povrch dostane jen 0,08 W.m<sup>-2</sup>, do hloubky dvou metrů jen 0,04 W.m<sup>-2</sup> a do hloubky čtyř metrů jen 0,01 mW.m<sup>-2</sup>. Proto i když má sluneční záření nepopíratelný vliv na teplotu zemského povrchu, na celkové tepelné hospodaření zemského tělesa nemá prakticky žádný vliv. [cit. 4], [12]

Lze tedy říci, že největší množství tepelné energie je uloženo v zemském jádře a je převážně produkováno radioaktivním rozpadem prvků. Tato energie se spojitě šíří vedením a

prouděním směrem k zemské kůře. S různě velkým tepelným gradientem, který závisí na složení hornin, kterými je tato tepelná energie přenášena. Samotné vnitřní zemské jádro, které je složené převážně ze železa a niklu, představuje přibližně 1,7% hmotnosti planety Země a jeho průměrná teplota se pohybuje mezi 4 500 – 5 000°C. Působením velmi vysokých tlaků je vnitřní jádro pevné a ve stavu blízkému natavení. Tlak na rozhraní vnitřního a vnějšího jádra je 330 GPa, což představuje váhu 33 000 000 tun tlačících na 1 m<sup>2</sup>. Rozhraní mezi vnitřním a vnějším jádrem tvoří plocha nespojitosti. Vnější Zemské jádro představuje 30,8% z celkové hmotnosti Země a jeho složení je přibližně stejné jako složení jádra vnitřního. Vzhledem k nižšímu tlaku a vysokým teplotám, které na vnější jádro působí je toto jádro v tekutém skupenství. Hmotu vnějšího jádra proudí kolem vnitřního jádra rychlostí přibližně jeden km/rok, tento pohyb vůči pohybu vnitřního zemského jádra vyvolává vznik geomagnetického pole. Plášť vnitřního zemského jádra je tvořen převážně těmito prvky: křemíkem, magnesiem a kyslíkem a tvoří přibližně 49% hmotnosti Země. Tato zemská vrstva funguje jako tepelný vodič, který přenáší energii zemského jádra směrem k zemské kůře. [28]

## 1.2 Základní parametry pro hodnocení zemského tepla

Hlavními fyzikálními veličinami pro hodnocení intenzity tepla v dané lokalitě generovaného zemským jádrem jsou teplota, tepelný gradient, tepelná vodivost hornin a tepelný tok. Podle těchto veličin změřených ve vybrané oblasti je možné celkem snadno stanovit efektivnost dané lokality pro odebírání a využívání zemského tepla.

### 1.2.1 Teplota

Základní jednotkou teploty je Kelvin [K], je jednou ze sedmi základních jednotek soustavy SI. Kelvinova teplotní stupnice je definována dvěma základními body: 0K – absolutní nula, tj. nejnižší teplota, kterou lze fyzikálně definovat a 273,16K – trojný bod vody, tedy teplota při které se voda vyskytuje ve všech třech skupenstvích. Absolutní velikost jedno stupně Celsia a Kelvina je stejná, tedy 0°C=273,16K. Teplota udává množství energie uložené v hornině a zvyšuje se směrem k zemskému jádru. Nárůst teploty směrem k zemskému jádru je ovlivněn různou teplotní vodivostí hornin, jejich typem a různými překážkami v hornině (např. prouděním podzemní vody, jež horninu ochlazuje a odvádí teplo pryč). Dále je teplota ovlivněna tektonickou aktivitou ve vybrané oblasti.

### 1.2.2 Tepelný gradient

Tepelný gradient představuje přírůstek teploty na jednotku hloubky.  $\nu$  [ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ ]. Průměrná hodnota teplotního gradientu  $\nu$  je  $30^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ . Ve vulkanicky aktivních oblastech, oblastech s menší šířkou zemské kůry a v oblastech na rozhraní zemských litosférických desek se teplotní gradient pohybuje řádově v hodnotách  $50 - 70^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ . V oblastech s nízkou tektonicko-vulkanickou aktivitou a v oblastech pevninských štítů se hodnota teplotního gradientu pohybuje v hodnotách  $10 - 15^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ .

### 1.2.3 Tepelná vodivost hornin

Vyjadřuje schopnost materiálu (horniny) vést teplo. Pod tímto pojmem si lze také představit rychlost jakou se teplo šíří z více zahřáté části látky do její chladnější části. Tepelná vodivost je charakterizována součinitelem teplotní vodivosti  $\lambda$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]. Teplotní vodivost hornin je závislá na složení, hustotě a pórovitosti hornin. Dále pak na obsahu meteorické vody v hornině její teplotě a tlaku. Velice dobrou teplotně vodivou horninou je například křemen  $\lambda=8,4[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ . Naopak nejhorší tepelnou vodivost vykazují jílovité struktury – jíly a jílovce  $\lambda=0,4 - 0,8[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ . [1]

Tabulka 1 Tepelné vodivosti hornin

Materiál	Tepelná vodivost $\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
Čedič	4,2
Pískovec	1,7
Porfyr, břidlice	1,7
Vápenec	1,5
Žula	3,1
Rostlá půda	2,3
Křemen	8,4

Zdroj: <http://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu>

### 1.2.4 Tepelný tok

Vyjadřuje množství tepla procházející jednotkou plochy za jednotku času. Často je označován jako  $\Phi_q$ , index  $q$  udává spotřebu tepla, Základní jednotkou tepelného toku  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Tepelný tok je důležitým údajem, z jeho hodnoty lze částečně odvodit tepelný gradient, tedy přírůstek teploty s hloubkou. Dále je důležitým indikátorem z hlediska geofyziky, resp.

geologie obecně. Průměrné rozmezí tepelného toku na zemském povrchu se pohybuje mezi 30 – 120 [mW.m<sup>-2</sup>]. Střední hodnota byla určena velkým množstvím měření, její hodnota je přibližně 70 [mW.m<sup>-2</sup>] (tato hodnota není příliš přesná, měření je subjektivní a počet měření v oblastech zemských štítů bylo provedeno méně). V tektonicky aktivních oblastech, v blízkosti sopek, zlomu tektonických desek apod. se hodnota tepelného toku pohybuje v řádu 10 – 100 [W.m<sup>-2</sup>]. Obecně lze říci, že hodnota tepelného toku je úměrná mocnosti (tloušťce) zemské kůry a stabilitě zemské kůry (stabilnější zemské štíty jsou chladnější s malým výskytem tektonických aktivit. Z hodnoty tepelného toku lze přibližně odvodit nárůst teploty s hloubkou, tedy tepelný gradient.[4]

Uvážíme-li průměrnou hodnotu tepelného toku  $\Phi_q = 60$  [mWm<sup>-2</sup>] a plochu zemského povrchu  $s = 510\,065\,284,702$  km<sup>2</sup> pak jednoduchým dosazením do výrazu  $\Delta P = \Phi_q \cdot s$  dostaneme množství energie vyzařené zemským povrchem.  $\Delta P = 30 \cdot 10^{12}$  [W] = 30 [TW]. Což odpovídá vyzařnému výkonu 262,98.10<sup>3</sup>[TWh]. Celosvětová produkce elektřiny v roce 2010 byla přibližně 20,248.10<sup>3</sup>[TWh]. Lze tedy říci, že pokud bychom dokázali využít jen 10% z nabízených volně vyzařených ztrát geotermální energie, pokryla by se poptávka po elektrické energii s 25% rezervou.

### 1.3 Kategorizace zdrojů geotermální energie

Zdroje geotermální energie lze rozdělit do několika základních skupin. Podle hlavních fyzikálních a chemických vlastností, nebo podle způsobu jejich vzniku. Nejdůležitější rozdělení pro následné energetické využití je z hlediska kvality přenosu tepla z hornin do přenosového média - vody.

#### 1.3.1 Hydrogeotermální zdroje

Přenos tepla z hluboko uložených hornin na povrch je realizován teplonosným médiem ve formě geotermální vody, geotermální páry, nebo jejich směsi. Zdrojem vhodné geotermální vody pro následné energetické zpracování jsou přirozené rezervoáry geotermálních vod. Rezervoáry geotermálních vod mohou být otevřené (zvodnění rezervoáru je doplňováno) a uzavřené. Tyto rezervoáry mohou mít přírodní výtok na povrch, nebo jsou do nich hloubeny jímací vrty, kterými je tato voda (pára) odebírána. V případě uzavřeného rezervoáru, nebo pokud je přítok média do něj malý, je nutné vytvořit re-injektážní vrt, kterým je ochlazené médium do rezervoáru vraceno a tím je zásoba geotermální vody doplňována. Speciálním

případem rezervoáru geotermální vody může být například artéská studně (pánev). Tento přírodní útvar je tvořen propustnou horninou, ve které je obsažena voda. Nad touto propustnou horninou je vrstva horniny nepropustné. Voda obsažena v pórovité hornině tlačí na nepropustný strop. Jestliže je do tohoto nepropustného stropu vyhlouben vrt, pak voda, díky přirozenému vztlaku vystoupí na přetlakovou úroveň (úroveň kde jsou tlaky zvodnění vyrovnány). Příkladem takovýchto pánví je např.: velká artéská pánev v Austrálii. [2]

Vydatnost hydro-geotermálního zdroje udává množství geotermální vody volně vytékající, nebo čerpané ze zdroje v určitém časovém úseku. Tento údaj je nutné dlouhodobě sledovat, díky němu obdržíme informaci o možnosti využití zdroje, z hlediska množství tepelného média, které můžeme odebírat a o jeho doplňování. Podle vydatnosti můžeme geotermální zdroje rozdělit na zdroje: s malou vydatností (do  $10 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ ), se střední vydatností (do  $50 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a s velkou vydatností (nad  $50 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Geotermální zdroje tohoto typu jsou využívány již dlouho (pro účely vytápění, koupání apod.), pro přeměnu na elektrickou energii již od začátku 20. století.[10], [12]

### 1.3.2 Rozšířené geotermální systémy EGS

Geotermální energie ve formě tepla se pod povrchem vyskytuje na celé planetě, ale podmínky hydro-geotermálních zdrojů, výše zmíněné jsou dostupné pouze na 10% rozlohy Země. Přístup získávání geotermální energie v suchých oblastech, tedy v oblastech s absencí výskytu hydro-geotermální vody je znám jako rozšířený geotermální systém (Enhanced Geothermal System). EGS systém můžeme v dnešní době rozdělit na technologie horké suché horniny – HDR (Hot Dry Rock) a rozpraskané horké horniny – FHR (Fractured Hot Rock).[3], [4]

#### 1.3.2.1 Systém Hot - Dry – Rock (HDR)

Tento systém pracuje s horninami uloženými v určité hloubce pod povrchem, které jsou prakticky suché a nepropustné pro kapaliny. Tlak nadložních hornin, který může být až 160 MPa zabraňuje vzniku pórů a větších trhlin v horninách, které jsou v těchto hloubkách převážně granitoidové a metamorfované. Cirkulace kapalin (příp. plynů) zde může probíhat pouze v tektonicky drcených pásmech, se kterými pracuje systém HFR. V těchto pevných nepropustných horninách jsou uměle vytvářeny praskliny, nebo jsou drceny, čímž vzniká nádrž tepelného výměníku. Kapalina – voda injektovaná z povrchu injektážním vrtem

v těchto popraskaných, nebo rozdrčených pásmech odjímá teplo okolním horninám. Díky vysokému tlaku zůstává voda v kapalném stavu i při zahřátí řádově na 150°C. Důležitým faktorem, je množství ztrát vody, která cirkuluje uměle vytvořenými propustnými pásmy, jež jsou hlavně způsobeny otevřeností pásma (resp. nemožností jeho uzavření). V povrchovém výměníku je pak tato voda přeměněna v páru (systémy elektráren s přímým využíváním geotermálních par/vody), nebo je jí odebrána tepelná energie ve výměníku. Samotnou realizaci tohoto systému můžeme rozdělit na dva základní modely. 1. model je realizován pomocí dvou vrtů vzdálených minimálně 1km a propojených jednou širokou puklinou. Postup vytvoření tohoto modelu spočívá nejdříve ve vyhloubení prvního vrtu. Na dně tohoto vrtu je pak hydraulickým procesem vytvořena jedna puklina a ve směru jejího vzniku je pak vyvrtán vrt druhý. 2. model je realizován pomocí větší množství puklin propojujících dva vrty. Vzdálenost vrtů je minimálně 300m.

Pukliny ve skalním masivu jsou vytvářeny vstřikováním vody o vysokém tlaku do vrtů.

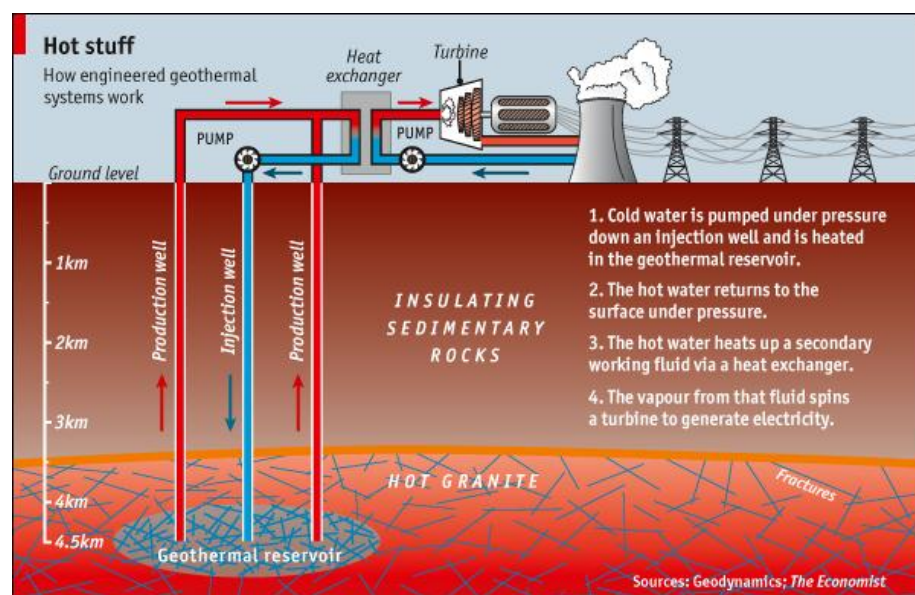
Shrneme-li požadavky na tento systém limitovaný dnešními technologickými možnostmi a ekonomickými parametry, potom lze říci, že ideální hloubka výměníku je přibližně 5km a jeho plocha by neměla přesáhnout 3km<sup>2</sup>. Pukliny v hornině by měly být otevřeny maximálně 1,5mm a podíl napěťového rozdílu maximálně 0,75, čímž se zajistí stabilita systému a minimalizují ztráty vody. Teplota v zásobníku by se měla pohybovat kolem 180°C, při minimálním množství cirkulované vody 78l.s<sup>-1</sup>, čímž je zajištěno dostatečné množství tepelné energie dodávané do výměníku.

Obecně lze říci, že systém HDR umožňuje získávání energie v podstatě v jakékoliv lokalitě. A dodávka elektrické energie z elektráren napojených k HDR zdrojům, je konstantní po celý den, na rozdíl od elektráren fotovoltaických, či větrných, které mají produkci elektrické energie více či méně nárazovou. Dalším kladem je velice malá produkce škodlivých kapalin a plynů (CO<sub>2</sub>, NOX, a síry). Mohlo by se zdát, že tento systém je kromě své technologické a finanční náročnosti naprosto perfektní a bezproblémový. Ovšem HDR systémy s sebou nesou riziko vzniku zemětřesení.

Při hloubení, nebo rozšiřování puklin propojující vrty může nastat zemětřesení až o síle 3,4 RichtEROVY stupnice (zatím nejsilnější vzniklé). Paradoxem je, že právě malé zemské otřesy jsou znakem správného fungování procesu hloubení prasklin ve skále. Většina zemětřesení vzniklých při procesu hloubení jsou sotva znatelné a jen málo z nich může



způsobit škodu na majetku. Snahou firem realizujících výstavbu HDR systémů je volit stabilnější lokality a proces hloubení upravit takovým způsobem, aby zemětřesení bylo sotva znatelné. Nejsilnější zemětřesení doprovázející výstavbu HDR bylo změřeno v Basileji ve Švýcarsku v roce 2006. Naměřená síla zemětřesení činila 3,4 RichtEROVY stupnice. Projekt byl následně uzavřen na žádost místních úřadů. I v jiných projektech např. ve Francii, Německu a Austrálii byly změřeny znatelné otřesy. Dle tabulky Rychterovy stupnice je intenzita otřesů 3,4 kategorizovatelná jako stupeň zemětřesení 3 – malé (v rozmezí 3 - 3,9), takové zemětřesení je popsáno jako často pocíitelné a nezpůsobující škody. Odhadovaný počet zemětřesení stupně 3 se pohybuje kolem 49 000 ročně. [5], [6], [11], [12]



Obrázek 1 Schéma geotermální elektrárny binárního cyklu, připojená k systému HDR  
Zdroj: <http://www.cleanenergyworldnews.com/geothermal-energy/>

### 1.3.2.2 Systém Hot - Fractured –Rock (HFR)

Systém horké porušené, nebo rozpukané horniny (HFR) pracuje na podobném principu jako systém HDR. HFR systém ovšem nevytváří uměle rozpukané horniny, ale zaměřuje se na lokality, kde se rozpukaná, nebo rozdrčená hornina vyskytuje již přírodně. Takové oblasti se vyskytují hlavně v tektonických pásmech zasahujících hlouběji do zemské kůry. Obvykle jsou tvořeny žulovou skálou v hloubce 4 500 – 5 000m. Ve většině případů je ovšem nutné přírodně rozpukanou horninu doupavit, což se provádí například hydraulickým štěpením hornin. Vzhledem k růstu tepelného gradientu s hloubkou je v těchto systémech předpokládán rychlejší a mohutnější výstup tepla. V tomto systému je běžná cirkulace podzemních vod do

větších hloubek (několik kilometrů), také jsou hůře ovlivnitelné ztráty těchto vod. Z těchto důvodů je nutné detailní zmapování podzemní struktury. [6],[12]

### 1.3.3 Teplotní kategorizace

V návaznosti, na teploty kterých dosahuje teplotnosné médium, můžeme tyto ekologické zdroje energie dělit na: nízkoteplotní (20 – 100 °C), středoteplotní (100 – 180°C) a vysokoteplotní (více než 180°C). Určení klasifikace hranic teplotního rozdělení je obecná, jejich definice se liší podle účelu následného využití. Důležitým klasifikátorem hydro-geotermálních systémů a systémů suchých horní je skupenství odebíraného média – vody. Skupenství je závislé na teplotě a tlaku, který působí na geotermální vodu. Jednofázové hydro-geotermální struktury obsahují pouze jedno skupenství, tedy kapalnou fázi – geotermální vodu ( $\Theta_h < 100^\circ\text{C}$ ,  $p_h = p_n$ , nebo  $\Theta_h > 100^\circ\text{C}$ ,  $p_h > p_{nas}$ ), nebo plynnou fázi – geotermální pára ( $\Theta_h > 150^\circ\text{C}$ ,  $p_h < p_{nas}$ ). Dvoufázové hydro-geotermální struktury obsahují obě skupenství vody, kdy jedno z nich je vždy převládající: převládající obsah vody ( $240 < \Theta_h < 374^\circ\text{C}$ ), převládající obsah páry ( $200 < \Theta_h < 250^\circ\text{C}$ ). V závislosti na teplotě a tlaku na povrchu získáváme výstupní médium ve formě vody, vlhké páry, nebo suché páry. [10]

## 1.4 Způsob využití geotermální energie

Teplo generované zemským jádrem je v dnešní době využíváno prioritně k vytápění obytných a průmyslových objektů. Při vhodných geologických podmínkách je využívána k přeměně na elektrickou energii. Pro přímé i dálkové vytápění objektů (domů, lázní, průmyslových závodů) je využíváno 28 GW tepelné kapacity. Výrobou elektřiny je z geotermální energie získáváno 10,959 MW

### 1.4.1 Vytápění objektů

První zmínky o distribučním rozvodu geotermální energie jsou datovány k roku 1330 v oblasti Chaudes-Aigues ve Francii. Na distribuční rozvod vody z horkých pramenů bylo napojeno několik domů a kromě jejich vytápění byla geotermální voda využívána i k odmašťování vlny a k vaření. V souvislostech s distribučním využíváním těchto teplých pramenů, jsou také zmínky o poplatcích, které za jejich užívání místní šlechtic vybíral. Největší rozvoj využívání geotermální energie začíná s počátkem 19 století, tento rozvoj umožnil především vědecký a technologický pokrok. Vědecký – možnosti využití, technologický – způsoby čerpání. Roku 1892 byl postaven první dálkový systém vytápění

v Americkém Boise, tepelná energie byla využita k vytápění skleníků. Zhruba ve stejné době je geotermální energie pro distribuční účely využívána i v Toskánsku a na Islandu. V té době bylo již dávno lordem Kelvinem vynalezeno tepelné čerpadlo a H. Zoelly patentoval myšlenku jeho použití při čerpání geotermálních vod. První pokusy o realizaci systému tepelných čerpadel narážely na technické problémy. Konstrukce tepelného čerpadla byla úspěšně realizována až v roce 1940. V dnešní době je vytápění objektů, skleníků a bazénů nejrozšířenějším způsobem využívání geotermální energie. V České Republice je asi největším projektem na využívání geotermální energie k topným účelům výtopna v Děčíně. [7],[8],[10]

**Tabulka 2 Orientační přehled států využívající geotermální energii pro vytápění**

Země	Kapacita [GW]	Převažující využití
Čína	3,69	Dálkové vytápění, tepelná čerpadla
Švédsko	4,2	Tepelná čerpadla
USA	7,82	Tepelná čerpadla
Turecko	1,5	Dálkové vytápění
Island	1,84	Dálkové vytápění
Japonsko	0,82	Dálkové vytápění, lázně
Nový Zéland	0,31	Průmyslové využití
Ostatní země (65)	7,93	
<b>Celkem</b>	<b>28,11</b>	<b>Místní vytápění</b>

Zdroj: [http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal\\_heating#cite\\_note-utilization-3](http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_heating#cite_note-utilization-3)

#### 1.4.1.1 Tepelná čerpadla

Principem tepelných čerpadel (dále jen TČ) je odebrání energie z nízkoteplotních zdrojů a její následná transformace na teplotu využitelnou pro vytápění objektů. Nízkoteplotními zdroje z, kterých TČ odebrá energii lze rozdělit na vzduch, vodu a zemi. Z hlediska geotermální energie jsou zajímavé pouze zdroje voda a země. Vodní zdroje lze dále dělit na vodní plochy, na jejichž dně jsou uloženy hadice naplněné nemrznoucí směsí, jejich zástupci jsou rybníky, řeky apod. A na geotermální zdroje vody, jež přímo protékají primárním, okruhem výparníku. Pro využití geotermální vody je nutné systém doplnit vodními filtry, hlídači zaplavení apod. Geotermální vody jsou získávány z vrtů či z přírodních zřídél. Systémy využívající geotermální vodu jsou složitější a náročnější na údržbu než systémy využívající zemní zdroje. Zemní zdroje lze dělit dle rozložení kolektoru s teplotním

médiiem na horizontální a na vertikální. V horizontálním (plošném) systému jsou kolektory rozloženy pod povrchem pozemku (zahrady) v přibližné hloubce 1,5 – 2m, doporučená plocha vymezená pro uložení tohoto systému je doporučována přibližně 200 – 400m<sup>2</sup>, pro rodinný dům. Tento systém využívá energii uloženou v zemské kůře ze slunečního záření. Vertikální uložení je realizováno vrtly o průměru 12 – 16cm a hloubky 50 – 150m. Do vrtů jsou zapuštěny kolektory – v podstatě PE potrubí tvaru U, v němž cirkuluje nemrznoucí směs na bázi technického lihu. Touto směsí je odnímána nízkoteplotní energie hornin. Vrt je vyplněn injektážní směsí. Dalším způsobem uložení kolektorů mohou být staré doly, které se zaplaví vodou. V takových prostorech v nejhorším případě lze dosáhnout stejné efektivnosti výměny tepla jako u kolektorů uložených na dně vodních ploch. V lepším případě podle hloubky daného dolu bude voda odebírat teplo horninám, čímž se zvýší efektivnost cyklu. Podobné systémy jsou zkoušeny například v Nizozemsku (Heerlen, kde je zaplaven vytěžený uhelný důl).[9], [10], [11]

#### Zjednodušený princip tepelného čerpadla s použitým systémem země/voda

Podzemními trubkami tepelného čerpadla typu země/voda proudí speciální nemrznoucí kapalina, která odebírá z okolní zeminy (příp. horniny) teplo. Takto ohřátá kapalina proudí do výparníku tepelného čerpadla, kde předá teplo chladivu, které v zařízení koluje. Ve výparníku se chladivo změní v plyn. Plynné chladivo se prudce stlačí v kompresoru, kde díky vysokému tlaku dojde k dalšímu zvýšení jeho teploty. Chladivo musí následně předat získané teplo do vody topné soustavy domu, k čemuž dochází v kondenzátoru. Chladivo v kondenzátoru změní zpět své skupenství na kapalné. Následně je vedeno přes expanzní ventil, kde se prudce zchladí. Tento cyklus se neustále opakuje.

### 1.4.1.2 Geotermální teplárny

Geotermální teplárny jsou spojením geotermální výtopny a geotermální elektrárny. Toto zařízení je primárně určené k výrobě elektrické energie. Zbytkové – odpadní teplo elektrárny je dále používáno k vytápění objektů a k ohřevu teplé užitkové vody (dále TUV). Kromě tepelných výměníků je část teplárny sloužící pro vytápění doplňována tepelnými čerpadly, jež zvyšují účinnost tepelného systému. Teplárny vzhledem ke své konstrukci – primární část geotermální elektrárna, na jejíž chladicí okruh je připojený tepelný výměník ochlazující pracovní médium, energie odebraná tepelným výměníkem je dále užívána k topným účelům, potřebují k svému provozu poměrně velké zásobníky geotermální energie. Nejvhodnějšími

zdroji pro ně jsou hydro-geotermální rezervoáry s velkou vydatností (nad  $50 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ ), v oblastech s velkým tepelným tokem. Případně lze využít zdroje typu HDR, tyto zdroje se používají několika násobně.

#### 1.4.2 Přeměna na elektrickou energii

Přeměna hydro-geotermální energie na energii tepelnou je realizována v geotermálních elektrárnách. Základními částmi těchto celků jsou: trafostanice, alternátor, parní turbína, tepelný výměník, separátor, oběhová čerpadla, zdroj tepelné energie. Obrovskou výhodou geotermálních zdrojů oproti ostatním alternativním zdrojům energie (zejména větrným a fotovoltaickým elektrárnám) je stálost provozu, tj. vyrovnaná produkce elektrické energie po celý den. Oproti konvenčním zdrojům elektrické energie lze jmenovat především environmentální pozitiva jako: v podstatě žádnou produkci plynů vznikajících při spalování, žádný radioaktivní odpad s nutností jeho uchování apod. Při těžbě hydro-geotermálního média dochází k uvolnění plynů vázaných v horninách, nebo na tepelné médium, množství těchto plynů a složení je srovnatelné s plyny uvolněnými při těžbě ropy a zemního plynu. [13], [17], [18]

## 2 Geotermální elektrárny

Geotermální elektrárny jsou zařízení, která přeměňují energii zemského jádra na energii elektrickou. Většinou jsou řazeny mezi obnovitelné zdroje energie. Oproti ostatním alternativním zdrojům energie mají obrovskou výhodu, výroba elektrické energie je plynulá a konstantní během celého dne. Větrné či fotovoltaické elektrárny jsou závislé na velice proměnných zdrojích, jejich výkon během dne kolísá, závislosti na intenzitě proudění vzduchu, nebo slunečního záření. Místa pro umístění geotermálních elektráren jsou definované lokalitami se slabou zemskou kůrou, lokalitami s vyšším tepelným gradientem či lokalitami s vyšší geotermální aktivitou například oblasti zlomu tektonických desek apod. Vzhledem k tomuto omezení lokalitami nejsou geotermální elektrárny v dnešní době příliš rozšířeny. Neopomenutelným omezujícím parametrem je jejich velmi vysoká cenová náročnost, z celkové výstavby jsou nejnákladnější hloubkové vrty a realizace puklin v systémech HDR. Pro dosažení teplot vhodných pro výrobu elektrické energie je mnohdy nutné provádět vrty až do hloubky několika kilometrů. Země s největším podílem ve výrobě geotermální energie: USA, Itálie, Japonsko, Nový Zéland. Účinnost geotermálních elektráren je poměrně nízká, pohybuje se kolem 10 – 23%. Nízká účinnost je způsobena nízkou teplotou vstupního média. Geotermální vody nedosahují teplot přehřáté páry generované v tepelných elektrárnách běžných typů.[10], [11], [19], [20]

### 2.1 Historie vývoje geotermálních elektráren

V roce 1904 v Larderellu v Itálii byl započat první pokus s výrobou elektřiny z geotermálního zdroje páry. Úspěch tohoto experimentu byl jasným důkazem hodnoty geotermální energie pro průmyslové využití a byl velkým impulsem pro výzkumnou činnost této problematiky. Následkem bylo následování několika zemí příkladu Itálie. Japonsko realizovalo první geotermální vrty v Beppu v prefektuře Ōita roku 1921, následovala Kalifornie, USA. Roku 1958 byla spuštěna malá geotermální elektrárna na Novém Zélandu a v Mexiku. V roce 1942 byla geotermální elektrárna v Larderellu inovována její elektrická kapacita dosáhla hodnoty 127,650 kW<sub>e</sub>. [12]

### 2.2 Základní části geotermálních elektráren

Zjednodušený model geotermální elektrárny se skládá z šesti hlavních částí. V následující části se pokusím jednotlivé části trochu přiblížit.

### 2.2.1 Zdroj geotermální vody

Zdroje geotermální vody jsou popsány v kapitole 1.3. Hlavním parametrem geotermálního zdroje s ohledem ke konstrukci elektrárny je entalpie, nebo energie tekutiny. Geotermální nádrže mají určitou produktivitu, která je charakterizovaná vydatností zdroje [ $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ ]. Jestliže hydro-geotermální rezervoár není artézského typu, nebo je použit systém HDR je nutné kapalinu čerpat hloubkovými čerpadly.

### 2.2.2 Separátor

Hlavním úkolem separátoru je oddělení kapiček vody z mokré páry. Pokud je výstupem hydro-geotermálního zdroje suchá pára, nebo v případě použití speciální výfukové turbíny není jeho použití nutné. Jednoduché separátory páry využívají gravitační a setrvační princip. Při vstupu páry do separátoru dojde ke skokové změně průřezu, tím je snížena rychlost média a kapičky vody padají vlivem gravitační síly na dno separátoru, odkud je kapalina čerpána k dalšímu využití. Dále je tento separátor vybaven deskami (sestava desek je podobná labyrintu) jež způsobují rychlé změny směru proudění páry. Mnohonásobně těžší kapičky vody nedokáží směr proudění měnit stejně rychle jako pára a jsou zachytávány na stěnách těchto desek. Z nich jsou také sváděny na dno separátoru. [21]

### 2.2.3 Výparník

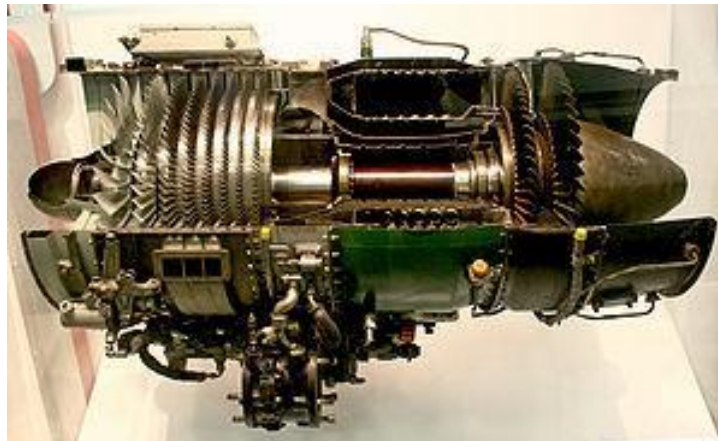
Výparník je užíván cyklu ORC a v Kalinově cyklu. Slouží k předání tepelné energie z hydro-geotermálního média, médiu pracovnímu. Pracovní médium zde přechází do plynné fáze a dosahuje vyššího tlaku. Zařízení si lze představit jako soustavu deskových výměníků, které jsou vzájemně propojeny.

### 2.2.4 Turbína

Turbína převádí část entalpie páry na mechanickou práci, která je přes hřídel přenášena na rotor alternátoru vyrábějícího elektrickou energii. Termodynamický průběh pracovního média v ideální turbíně je adiabatický. Entropie pracovního média je tedy stejná na vstupu i výstupu turbíny a mezi pracovním médiem a turbínou nedochází k výměně tepla. Adiabatická účinnost turbíny je dána výrobcem a je to poměr mezi skutečnou změnou entalpie a maximální možnou. Výstupní výkon turbíny lze vyjádřit jako skutečnou změnu entalpie vynásobená hmotností pracovního média procházejícího turbínou.

$$W = m \cdot (H_1 - H_2)$$

Expanze pracovní látky v turbíně může mít za následek, že výstupem může být mokrá pára. To může mít za následek korozivní poškození lopatek turbíny. Je proto nutné volit vhodné materiály se speciálními povrchovými úpravami (př. nemagnetický titan). [16], [22]



Obrázek 2 Axiální turbína pro technologii ORC

Zdroj: <http://www.turbomachinerymag.com/blog/content/axial-turbine-orc-technology-low-grade-heat-sources>

## 2.2.5 Přihříváč

Přihříváč je tepelným výměníkem mezi výstupním médiem z turbíny a ochlazeným kapalným médiem z kondenzátoru. Jeho využití v cyklu zvýší účinnost elektrárny, respektive sníží tepelné nároky na hydro-geotermální zdroj. Jeho použití je blíže popsáno v kapitole 2.3.4.1.1.

## 2.2.6 Kondenzátor

Jedná se opět o tepelný výměník, tepelný přenos probíhá mezi výstupním médiem turbíny (suchá, nebo mokrá pára) a chladícím médiem, jehož účelem je ochlazení výstupního média z turbíny do kapalně fáze, do nasycené kapaliny. Jako chladící médium se používá vzduch, nebo voda. Pro systémy přímo využívající geotermální páry lze použít v podstatě klasickou chladicí věž. Pro binární cykly musí být chladicí systém zapouzdřený, protože potřebujeme například v kalinově cyklu chladit amoniakovou vodu, která je toxická. Tyto cykly jsou převážně chlazené vodou ve výměnících podobných výparníku.



## 2.3 Rozdělení geotermálních elektráren dle parametrů zdroje

Geotermální elektrárny lze dělit do skupin dle různých parametrů. Nejdůležitějším a základním parametrem je teplota a tlak vstupního média, tedy entalpie geotermální vody. Zdroje s vysokou entalpií jsou využívány v parních elektrárnách, zdroje s nízkou entalpií v dvou okruhových elektrárnách. Dále lze elektrárny dělit podle způsobu nakládání se zbytkovým teplem, které je akumulováno v odpadní mokré páře. Pára může být volně vypouštěna do atmosféry, nebo je dále zpracovávána v teplárně, či kondenzována a vracena injektážními vrty do původních vodonosných kolektorů a zvodní. Popřípadě kombinace těchto příkladů. [10], [11]

### 2.3.1 Přímé využívání geotermálních par (Direct Dry Steam)

Přímé využití geotermálních par vyžaduje geotermální zdroj velmi vysokých teplot. Takové zdroje se vyskytují převážně v tektonických oblastech. Přímé využívání geotermálních par je nejjednodušší a nejstarší způsob využívání geotermální energie. První geotermální elektrárna pracující na tomto principu byla postavena v Itálii v Larderellu roku 1904. Geotermální elektrárny tohoto systému můžeme také nalézt na Islandu, Novém Zélandu, v Itálii, USA. Ve spojených státech amerických v severní Kalifornii se nalézá největší geotermální elektrárna pracující na principu přímého využití geotermálních par.

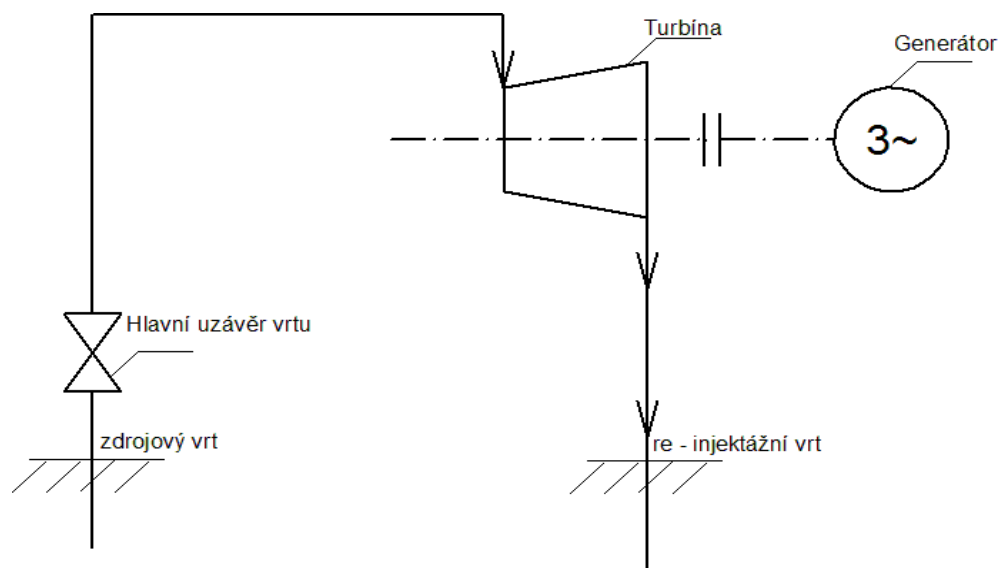
#### **Princip:**

Mokrý pára generovaná v geotermálním rezervoáru je vedena přímo do výfukové turbíny, která pohání generátor. Zplodinami generující elektrárna jsou převážně přebytečné vodní páry, voda a velice malé množství plynů. Tyto zplodiny jsou vedeny do re injektážního vrtu a zpět do rezervoáru geotermální páry, kde jsou znovu přihřívány. Schéma systému na *Obrázek 3* je zjednodušené schéma elektrárny přímo využívající geotermální páry. Geotermální elektrárny s výfukovou turbínou jsou vhodné pro zdroje geotermální páry s obsahem plynů větším jak 12%. Spotřeba páry u těchto systémů je téměř dvojnásobná oproti systémům s kondenzační jednotkou, za stejných vstupních podmínek. I přes tuto nižší účinnost oproti systémům s kondenzační jednotkou jsou systémy s atmosférickými výfukovými turbínami často užívány. Vhodné jsou především jako pohotovostní elektrárny, nebo v případě výroby elektřiny malého množství z izolovaných geotermálních vrtů. Své uplatnění také mají jako zkušební elektrárny při testování vrtů během vývoje v terénu. Instalace a uvedení do provozu

je u tohoto typu elektráren je velice rychlá řádově 13 – 15 měsíců od objednávky. Obvykle jsou konstruovány pro výrobu 2,5 – 5 MW<sub>e</sub>.

Elektrárny s kondenzačními jednotkami mají složitější konstrukci, jejich realizace může trvat dvakrát až třikrát tak dlouho než výstavba elektráren s výfukovou turbínou. Velkou výhodou je přibližně poloviční spotřeba páry, díky tomu jsou tyto elektrárny běžně konstruovány s kapacitou 55 – 60 MW<sub>e</sub>. V dnešní době již nejsou výjimečné elektrárny s kapacitou 110 MW<sub>e</sub>.

[10], [12], [16], [23], [24]



Obrázek 3 Schéma elektrárny přímo využívající geotermální páry

### 2.3.2 Přímé využívání geotermálních mokrých par, vody – jednoduchý oběh (Flash Cycle)

Elektrárny konstrukce „bleskového okruhu“ (flash cycle) jsou nejrozšířenějším typem geotermálních elektráren, jako vstupní médium je používána voda o teplotách vyšších než 160°C, nebo mokrá pára. Pojem „flash“ je ve smyslu kotle (separátoru) pracujícího jako cyklonový odlučovač, zároveň může pracovat jako de-mineralizátor vody. Schéma single flash elektrárny je znázorněno na *Obrázek 4*. V tomto schématu, v části označené číslem **1** je znázorněno čerpání geotermálního média z produkčního vrtu. Toto médium (horká voda, na kterou působí tlak vyšší než normální  $p_n$ ), začne v bodě **2** přecházet do varu. Var geotermální vody v bodě **2** je způsoben tlakovými ztrátami při jejím čerpání z vrtu. Mokrá pára následně vstupuje do separátoru, zde jsou od sebe odděleny pára a minerální voda. Pára ze separátoru (bod **5**) pokračuje do turbíny kde, expanduje a odevzdává energii turbíně. Ochlazená pára

z turbíny je vedena do kondenzátoru (bod **6**). Zde je znázorněn vzduchový kondenzátor, bod **c1** znázorňuje nasávaný chladný vzduch a **c2** vzduch ohřátý teplem odebraným výstupní páře z turbíny. Kondenzovaná voda (bod **7**) je dále kondenzátorovým čerpadlem vedena k re-injektážnímu čerpadlu, zde je smíchána s minerální vodou oddělenou separátorem (bod **3**). Směs kondenzované a separované minerální vody je re-injektážním čerpadlem vrácena do geotermálního zdroje, kde je opět přehřívána. [12], [16], [23]

*Obrázek 5* zobrazuje T-H diagram pracovního média tohoto systému, T-h diagram vyjadřuje závislost teploty na entalpii (tepelné energii uložené v jednotkovém množství látky). Body vyznačené v grafech se shodují se stavy, kterými pracovní látka prochází v pracovním cyklu. Entalpie je definována jako součet vnitřní tepelné energie **E** se součinem tlaku **p** a objemu látky **V**, na kterou tlak působí („vtlačovaná energie“). Tedy: [24]

$$H = E + p \cdot V$$

Nebo pro elementární změnu:

$$dH = dE + d(p \cdot V)$$

*Obrázek 6* znázorňuje T-s diagram tohoto systému, vyjadřuje závislost teploty na entropii. Entropie charakterizuje změny tepla vzhledem k teplotě. Také pomáhá charakterizovat vratnost či nevratnost děje, kdy vratný děj je charakterizován, jako proces při kterém lze převést systém z koncového stavu do počátečního (geotermální vodě se vrátí odevzdané teplo, systému je vracena vykonaná práce). Nevratný děj je pak definován, jako děj, při kterém dochází ke ztrátám, které při zpětném procesu nelze obnovit (přeměna mechanické práce na teplo). Entropie **s** je stavovou veličinou (charakterizuje tedy stav systému), byla zavedena tak aby v uzavřeném systému platily následující pravidla:

1. probíhá-li vratný děj pak  $\Delta s=0$ .
2. probíhá-li nevratný děj pak  $\Delta s>0$

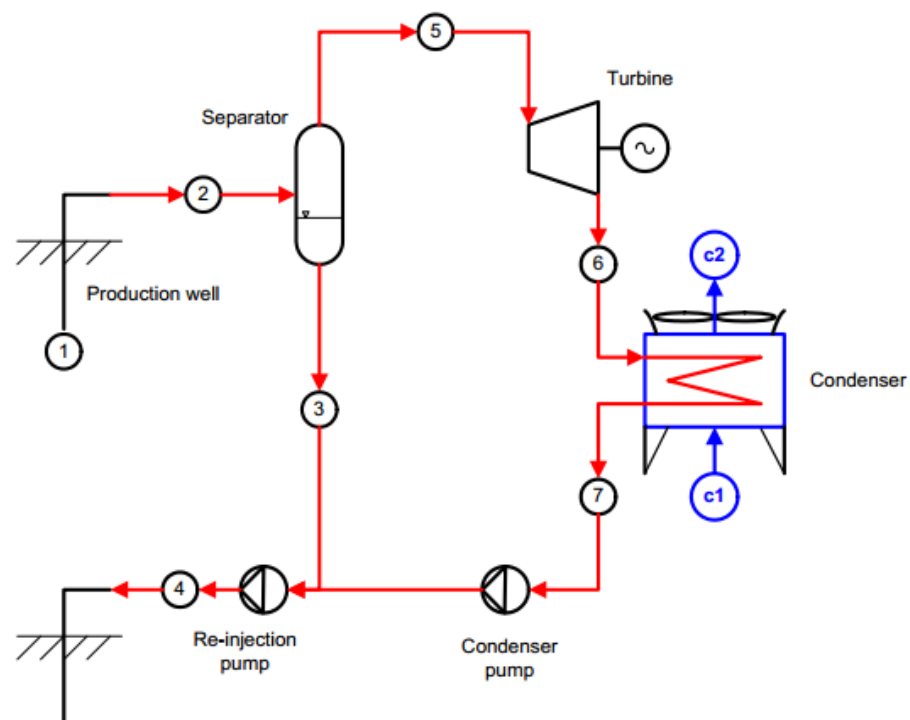
Změna entropie je definována jako rozdíl entropií počátečního a koncového stavu systému: [24]

$$\Delta s = s_1 - s_2 = \int_1^2 \frac{1}{T} dQ$$

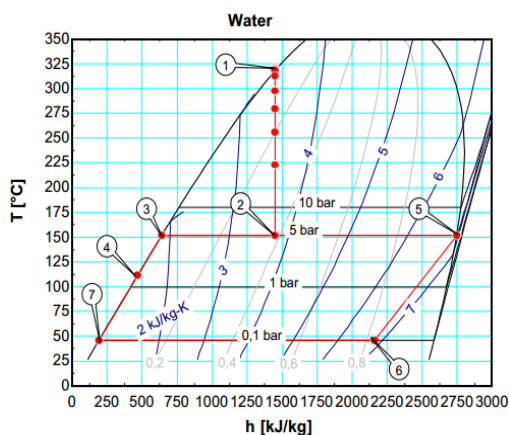
Pro elementární změnu entropie:

$$ds = \frac{dQ}{T}$$

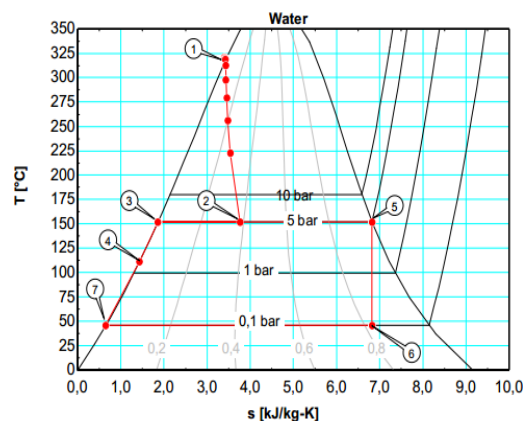
Elektrárny tohoto provedení jsou například v Dixie Valley, Nevadě, Cosu, Kalifornii. Běžní zástupci jednookruhových (kotlových) elektráren mají instalovaný výkon kolem 30MW, čerpají geotermální vodu z 5 – 6 produkčních vrtů a odpadní vodu vracejí do 2 – 3 vrtů injektážních. Nevýhodou je velká technologická náročnost. [12], [16], [23]



Obrázek 4 Schéma elektrárny - "single flash" systém  
Zdroj: [16]



Obrázek 5 T-H diagram "single flash" systému  
Zdroj: [16]



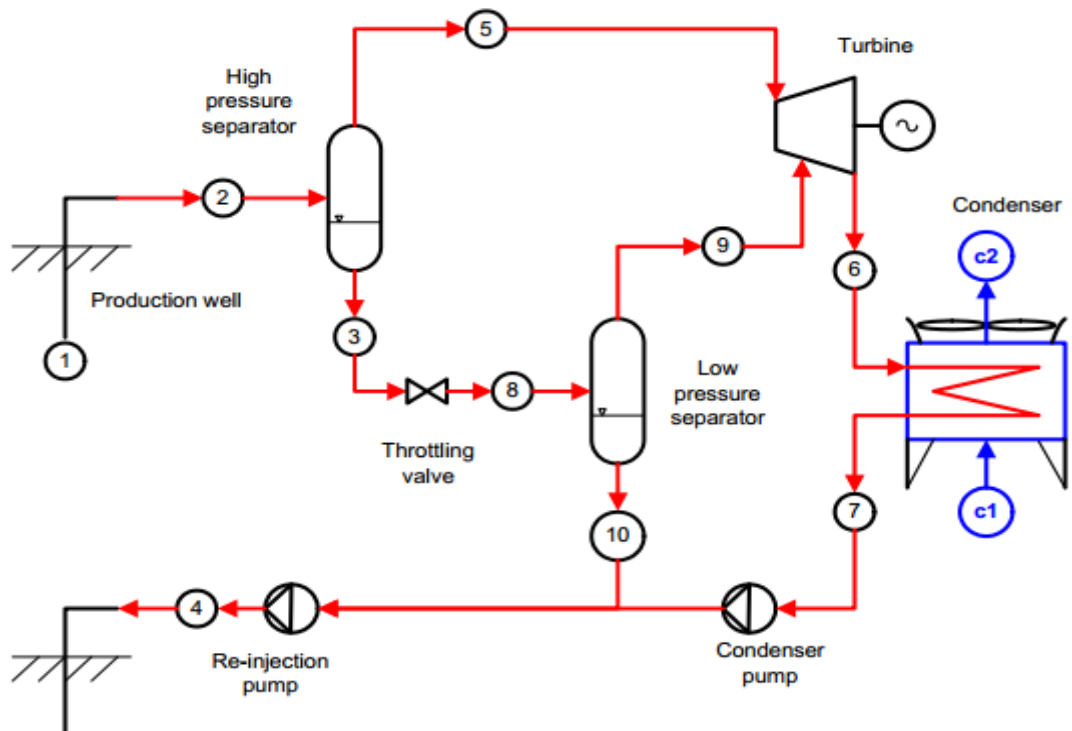
Obrázek 6 T-s diagram "single flash" systému  
Zdroj: [16]

### 2.3.3 Přímé využívání geotermálních mokrých par, vody – zdvojený systém (Double Flash Cycle)

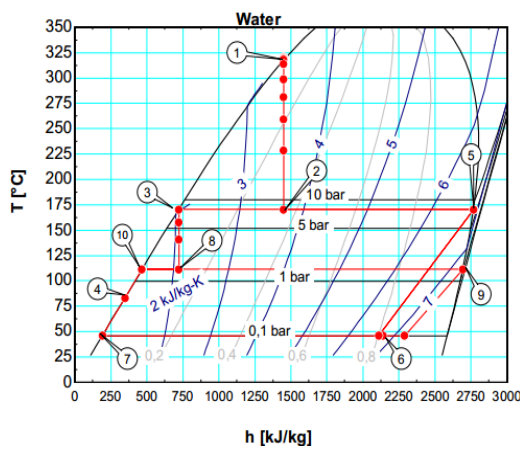
Účinnost geotermálních elektráren typu „single flash“ lze zefektivnit přidáním přihřívacího stupně – nízkotlakého separátoru, v němž je odpadní minerální voda z prvního separátoru se stále poměrně vysokou teplotou a tlakem vystavena tlaku nižšímu. Tím je přeměněna v páru o nižším tlaku, která je přiváděna do sekundárního vstupu turbíny. Schéma elektrárny tohoto typu je znázorněno na *Obrázek 7*. Geotermální voda je čerpána z vrtu (1), tlakovými ztrátami přechází do varu (2). Mokrá pára přechází do vysokotlakého separátoru, kde je oddělena minerální voda a vysokotlaká pára. Pára z vysokotlakého separátoru (5) je tlačena do vysokotlakého vstupu turbíny, zde expanduje a roztáčí turbínu. Minerální voda z vysokotlakého separátoru dále putuje k snižovacímu ventilu (3), zde je snížen tlak minerální vody a ta se začíná vařit, vzniká mokrá pára o nižším tlaku než v bodě (2). Mokrá pára dále putuje (8) do nízkotlakého separátoru, zde je znovu oddělena minerální voda a nízkotlaká pára. Nízkotlaká vstupuje do nízkotlakého vstupu turbíny. Výstupní médium z turbíny je chlazeno v kondenzátoru (6), ve schématu je znázorněn vzduchový. Voda ochlazená kondenzátorem je tlačena kondenzačním čerpadlem k čerpadlu re-injektážímu (7). Zde je smíšená s minerální vodou oddělenou nízkotlakým separátorem (10). Tato směs je re-injektována (4) do podzemního rezervoáru kde je opět přehřívána. [12], [16], [23]

T-H diagram tohoto cyklu je zobrazen na *Obrázek 8*, T-s na *Obrázek 9*. Na obou grafech je patrné zvětšení oblasti ohraničené červenou křivkou, jež kopíruje stavy, kterými médium

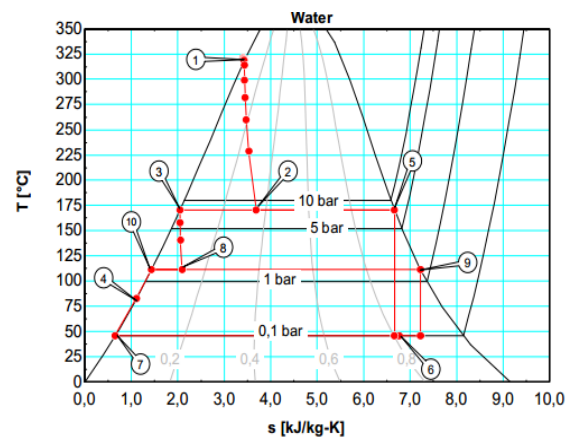
prochází v cyklu elektrárny. Plocha ohraničená touto křivkou představuje práci vykonanou pracovním médiem.



Obrázek 7 Schéma elektrárny - "double flash" systém  
Zdroj:[16]



Obrázek 8 T-h diagram "double flash" systému  
Zdroj: [16]



Obrázek 9 T-s diagram "double flash" systému  
Zdroj: [16]

### 2.3.4 Nepřímé využívání geotermální vody (Binary Cycle)

Výroba elektřiny z nízko a středně teplotních geotermálních zdrojů je realizována v elektrárnách nepřímo využívající geotermální vodu. Tyto binární elektrárny využívají sekundární pracovní kapaliny, obvykle organické kapaliny (n-pentan), nebo roztok amoniaku ve vodě. Organické kapaliny mají nízký bod varu, tedy vysoký tlak par při nízkých teplotách. Obecným principem je ohřev sekundární kapaliny kapalinou primární čerpanou z hydrogeotermálního zdroje. Sekundární kapalina je ohřívána ve výměníku tepla, díky nižší teplotě varu je odpařována i při poměrně nízkých teplotách vstupního média. Pára sekundární kapaliny pohání turbínu. Mokrý pára sekundárního média je ochlazována v kondenzátoru, odtud je přečerpávána zpět do tepelného výměníku, čímž je cyklus uzavřen. Vzhledem k sekundárnímu médiu je celý vnitřní cyklus zapouzdřen, aby nedocházelo k jeho úniku. Dle druhu látky sekundárního média a způsobení sekundárního okruhu lze elektrárny s nepřímým užitím geotermální vody okruhu rozdělit na: Organický Rankinův cyklus (ORC), Kalinův cyklus a Ueharův cyklus. [12], [16], [23]

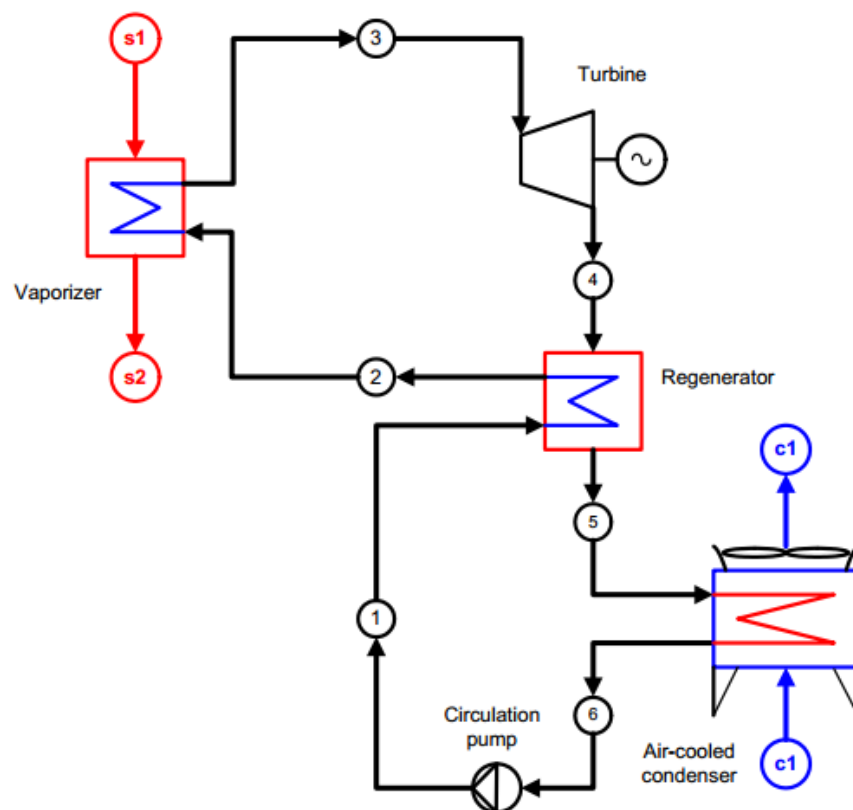
#### 2.3.4.1 Organický Rankinův cyklus (ORC) s regenerací

Rankinův cyklus je systém využívající nízkopotenciální zdroje tepla k přeměně na elektrickou energii. K pohonu turbíny tento cyklus místo vodní páry používá organické kapaliny jako například n-pentan, silikonový olej (n-pentan  $t_v=36^\circ\text{C}$ , neopentan  $t_v=9,5^\circ\text{C}$ ), nebo toulén ( $t_v=111^\circ\text{C}$ ). Účinnost Rankinova cyklu není vysoká – vzhledem k malému teplotnímu rozsahu. Základním principem je ohřev sekundárního organického média ve výparníku, zde vzniká sytá pára, jež je přiváděna do turbíny. V turbíně dochází k expanzi suché páry, turbína se roztáčí. Ochlazená suchá pára vycházející z turbíny je ochlazována na kapalinu v kondenzátoru a přečerpávána zpět do výparníku. Chladící médium kondenzátoru - voda je organickým médiem dostatečně ohřívána pro možnost dalšího zpracování například k vytápění objektů. Základní Rankinův proces lze zlepšit například přihříváním, nebo regenerací. [12], [16], [23]

Rankinův cyklus s regeneračním ohřevem je znázorněn na *Obrázek 10*. Geotermální voda je přiváděna (s1) do výměníku tepla, který zároveň pracuje jako odpařovač pracovního média. Udrží-li se dostatečně vysoký tlak vstupního média, nedochází k oddělení nekondenzovaných plynů a zemního plynu od vody. Geotermální voda předá ve výparníku

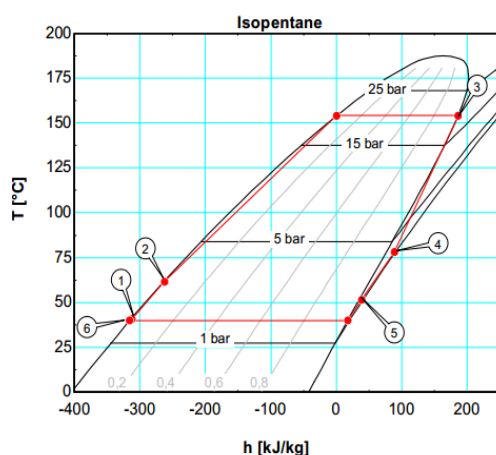
svoji tepelnou energii pracovnímu médiu, čímž se ochladí. Ochlazená geotermální voda je re-injektována (**s2**) zpět do jejího zdroje. Pára pracovního média je ve výparníku nasycena a v některých případech přehřáta, takto upravena vstupuje do turbíny (**3**). Zde je její tepelná energie přeměněna na mechanickou. Výstupní pára (**4**) je v regenerátoru využita k přehřátí kondenzovaného pracovního média, zároveň tím dojde k jejímu ochlazení. Dalším pracovním bodem (**5**) je vzduchem chlazený kondenzátor, zde je pracovní médium zkapalněno. Kapalně pracovní médium (**6**) je okruhovým čerpadlem vháněno do vysokotlaké části regenerátoru (**1**). Čerpadlo zároveň zvyšuje tlak pracovní tekutiny. Z regenerátoru pokračuje (**2**) pracovní médium do výparníku čímž je cyklus uzavřen.[16]

T-H a T-s diagram ORC s regenerací je znázorněn na Obrázek 11 a Obrázek 12

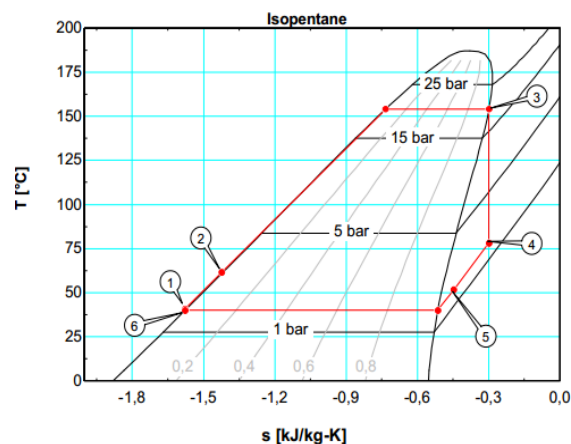


Obrázek 10 Rankinův cyklus s regenerací  
Zdroj: [16]





Obrázek 11 T-H diagram ORC s regenerací  
Zdroj [16]



Obrázek 12 T-s diagram ORC s regenerací  
Zdroj: [16]

Účinnost Rankinova cyklu lze také zvýšit přehříváním a to o 4 – 5 %. V tomto cyklu je turbína rozdělena na vysokotlakou a nízkotlakou část. Pára expandující (izoentropicky) ve vysokotlaké části turbíny, je při dosažení středního tlaku vrácena zpět do kotle. Zde je pára přehřívána při konstantním tlaku a následně vedena do nízkotlaké části turbíny. V nízkotlaké části pára expanduje na tlak kondenzátoru. Přehříváním páry se snižuje obsah vlhkosti v páře na výstupu z vysokotlaké části turbíny. V podstatě se dá říci, že na principu přehřívání výstupního média z první turbíny pracuje Ueharův cyklus.

#### 2.3.4.1.1 Vliv regenerace na účinnost elektrárny

Umístíme-li regenerátor za výstup turbíny a využijeme-li zbytkovou tepelnou energii média expandovaného v turbíně k předehřátí kapalného média vystupujícího z kondenzátoru. Pak dokážeme zvýšit účinnost elektrárny. Tímto postupem jednak snížíme tepelnou energii média proudícího z turbíny, čímž zároveň snížíme množství energie, kterou mu musíme odebrat, aby médium přešlo z plynné do kapalné fáze. Současně tím zvýšíme tepelnou energii v kondenzovaném médiu, které je čerpáno do výparníku, zde předehřáté médium potřebuje méně energie k přechodu do plynné fáze. Kdyby byla elektrárna provozována na pohonné hmoty (př. nafta, zemní plyn) vedlo by použití regenerátoru k úspoře paliva. V případě geotermálního zdroje to znamená, že nevyužitou tepelnou energii geotermálního média můžeme využít například v dalším stupni elektrárny (v případě jeho dostatečné tepelné vydatnosti), nebo pro vytápění přilehlých objektů. Případně můžeme toto méně ochlazené médium re-injektážní vrtem vsříkovat zpět do zemního výměníku, tím zvýšíme životnost

tohoto výměníku (odebíráme méně tepelné energie z hornin). Zvýšení účinnosti je tedy dáno menšími nároky na vstupní teplotu geotermálního média. [12], [16]

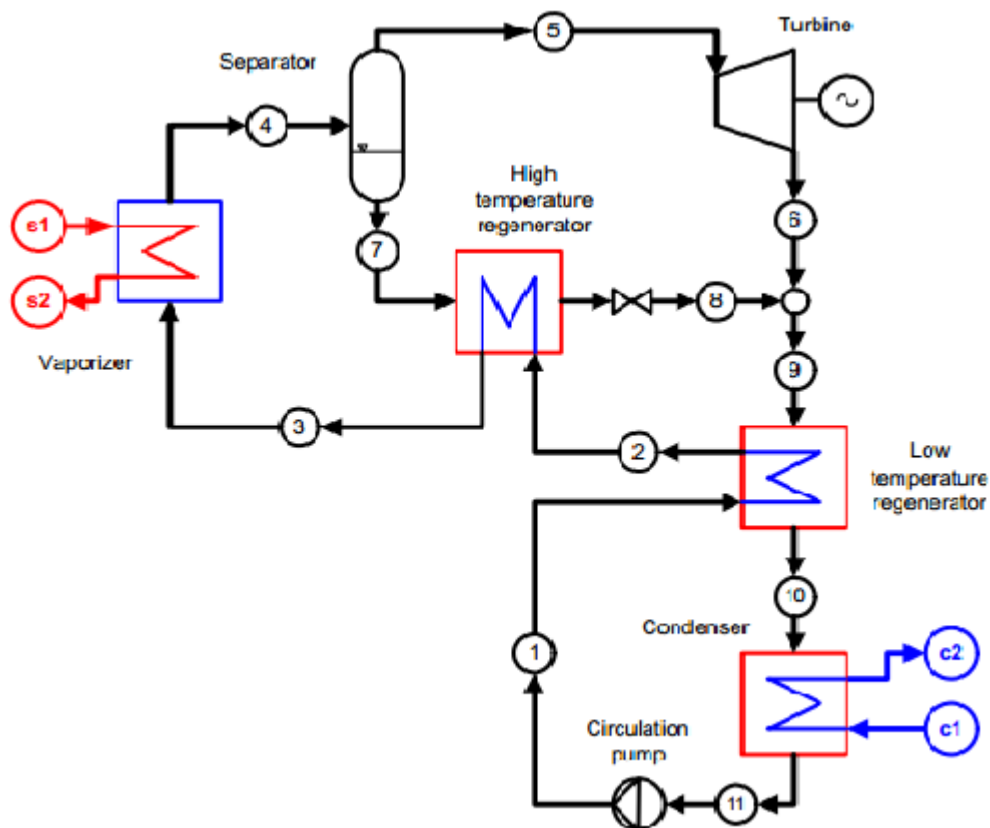
### 2.3.4.2 Kalinův cyklus

Kalinův cyklus byl patentován v roce 1980 ruským inženýrem Alexandrem Kalinou. Jedinečná myšlenka tohoto patentu tkví v použití směsi amoniaku a vody jako pracovního média. Aplikace Kalinova cyklu ve výrobě elektrické energie z geotermálních zdrojů je vzhledem ke své komplikovanosti poměrně málo rozšířená. V podstatě se jedná o upravený Clausis-Rankinův cyklus. Jako pracovní médium je zde použita směs čpavku a vody. Odpařování a kondenzace směsi neprobíhá při jedné teplotě, ale spíše při teplotním rozsahu. Tato vlastnost je způsobena faktem, že při zahřívání / ochlazování pracovního média nedochází pouze ke změně skupenství, ale i k oddělování / absorpci amoniaku vodou. Zásadním rozdílem mezi Kalinovým cyklem a ORC není pouze použití jiného pracovního média, ale i práce s ním. Kromě kondenzace je pracovní médium i destilováno, tento systém je označován jako DCS – destilace – kondenzace subsystému (Distillation Condensation Sub-System). Změnou množství amoniaku v kondenzované směsi (jeho snížením) vede ke snížení tlaku na výstupu turbíny, čímž je cyklus zefektivněn. [16], [25], [26]

#### 2.3.4.2.1 Technologické schéma Kalinova cyklu

Schéma Kalinova cyklu je zobrazeno na Obrázek 13. Směs vody a amoniaku (obsah amoniaku ~ 70%) o vysokém tlaku vstupuje do výparníku (3). Zde je zahřívána geotermální vodou (s1) označuje vstup geotermální vody a (s2) výstup ochlazené vody a její re-injektáž do geotermálního zdroje. Pracovní médium se díky tepelné energii získané ve výparníku začíná částečně vařit, směs kapaliny a páry vstupuje do separátoru (4). V separátoru je médium rozděleno na páru s vysokým obsahem amoniaku a vodu s naopak malým obsahem amoniaku. Pára je dále vedena do turbíny (5), kde expanduje na tlak kondenzátoru (6). Voda ze separátoru putuje vysokoteplotního regenerátoru (7), kde ohřívá kondenzované vysokotlaké médium směřující do výparníku. Tlak ochlazené vody vystupující z regenerátoru je tlakovým ventilem regulován na tlak kondenzátoru (8). Tlakově vyrovnané médium z regenerátoru a z turbíny (9) jsou smíšeny (výsledná směs má opět průměrnou hodnotu amoniaku) a slouží jako přehřívací médium v nízko teplotním regenerátoru, chladné médium nízké teploty z regenerátoru vstupuje do kondenzátoru (10). Jako chladící médium kondenzátoru je použita voda což s sebou nese nevýhodu nutnosti dostatečně vydatného jejího zdroje (vstup a výstup

chladící vody **c1,c2**). Směs páry a kapaliny je zde ochlazována a zároveň zde probíhá proces absorpce, kdy je amoniaková pára vstřebávána do kapaliny. Kinetika procesu absorpce určuje její míru, zatímco míru kondenzace určují parametry přenosu tepla a tepelné kapacity. Výsledná ochlazená směs amoniaku a vody putuje z kondenzátoru k oběhovému čerpadlu (**11**), které zvyšuje tlak pracovního média na vyšší tlakovou úroveň. Pracovní médium je následně přehříváno, nejdříve v nízkoteplotním (**1**) a potom ve vysokoteplotním regenerátoru (**2**). Takto upravené médium je připravené k opětovnému přivedení do výparníku (**3**). [16]



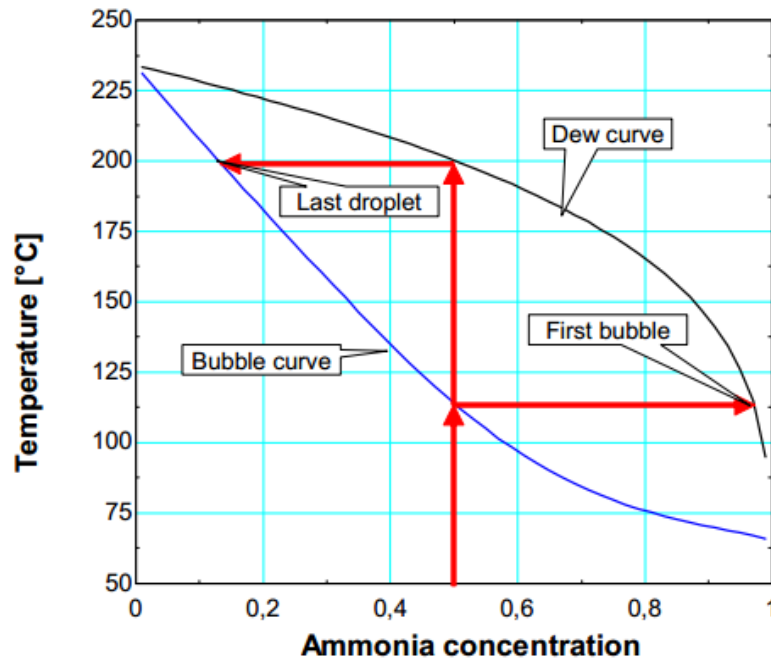
Obrázek 13 Kalinův cyklus  
Zdroj: [16]

#### 2.3.4.2.2 Pracovní látka Kalinova cyklu

Jak bylo zmiňováno výše pracovním médiem Kalinova cyklu je amoniaková voda. Tato kapalina se v technických proces používána již desetiletí. Nejčastější aplikace kde se s ní můžeme setkat, je cyklus absorpční ledničky. Na *Obrázek 14* je znázorněn fázový diagram závislosti množství amoniaku v amoniakové vodě na teplotě, při konstantním tlaku 30bar, což odpovídá 3MPa. Spodní křivka (bubble curve) označuje tvorbu prvních bublinek páry (first bubble). Tyto bublinky páry mají mnohonásobně větší obsah amoniaku než vroucí kapalina. Tím je snížen obsah amoniaku v kapalné fázi. Horní křivka označuje takzvaný rosný bod

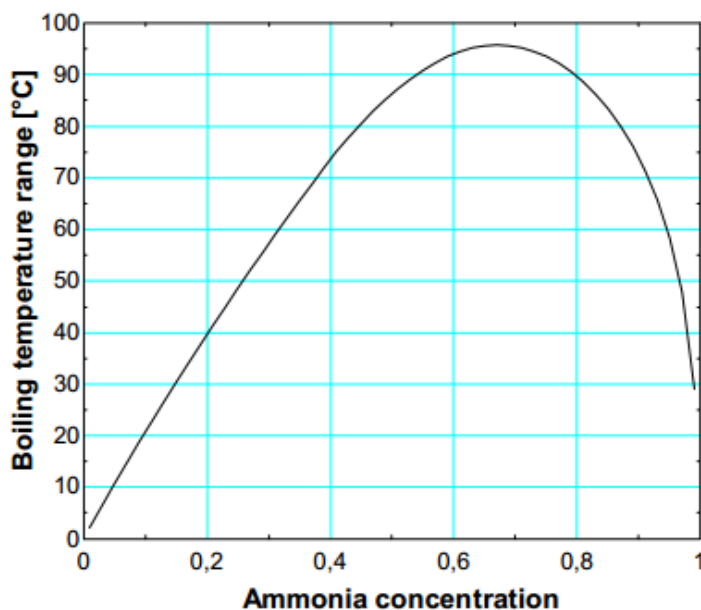
(dew curve), ten označuje stav kdy je odpařena poslední kapka kapaliny (last droplet). Odpařující se kapalina má v tuto chvíli mnohonásobně menší obsah amoniaku než pára.

[16], [26]



Obrázek 14 Změna fáze amoniakové vody v závislosti na teplotě a množství amoniaku  
Zdroj: [16]

Teplotní rozsah varu amoniakové vody v závislosti na množství amoniaku je znázorněn na Obrázek 15. V diagramu je patrné, že přechod ze stavu tvorby prvních bublinek do rosného stavu je největší (nejrychlejší) přibližně při 67% amoniaku a teplotě 95°C. To znamená, že směs má omezenou tepelnou kapacitu, to je výhodné pracujeme-li se zdrojem tepla s téměř konstantní tepelnou kapacitou

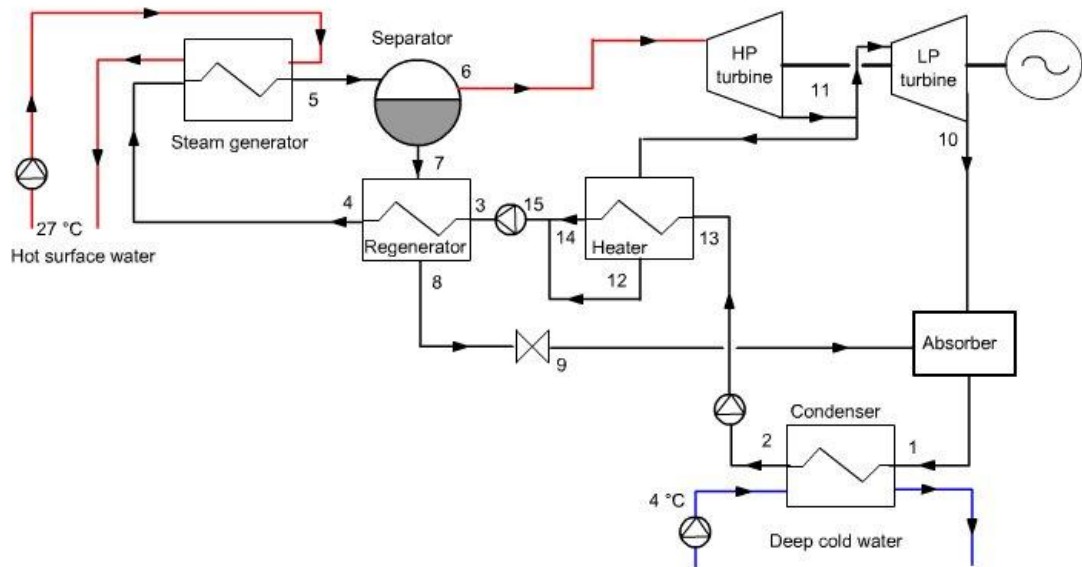


Obrázek 15 Teplotní rozsah varu amoniakové vody v závislosti na množství amoniaku  
Zdroj: [16]

Při užívání amoniaku v sekundárním cyklu elektrárny, mohou z environmentálního pohledu, vzniknou jisté obavy vzhledem k toxicitě amoniaku. Amoniak je klasifikovaný jako jedovatý, žíravý a nebezpečný pro životní prostředí. Ochranná opatření při výstavbě a provozu elektráren binárních okruhů jsou vysoká a metodika práce, zacházení a skladování této látky je za desetiletí jejího užívání v technických aplikacích velice dobře propracovaná.

### 2.3.4.3 Ueharův cyklus

Ueharův cyklus není ve spojení s binárními geotermálními elektrárny nikde popsán. Ovšem vzhledem k větší účinnosti oproti předchozím cyklům a práci s nízkými teplotami. Myslím, že jeho zmínění je vhodné. Je v podstatě vylepšením Kalinova cyklu. Jako pracovní médium využívá také roztok amoniaku ve vodě (v přibližném poměru 9:1). Oproti Kalinovu cyklu přidává další turbínu, snižuje zatížení kondenzátoru odčerpáváním páry z první turbíny, tato pára je spolu se zkapalněným médiem z kondenzátoru zahřívána před vstupem do regenerační jednotky, což zvyšuje účinnost. Pro zkvalitnění zkapalňování páry je zařazen druhý kondenzátor. Ueharův cyklus také snižuje množství odparků. Ueharův systém je primárně navržen pro výrobu elektrické energie z teplé povrchové mořské vody - OTEC. Ueharův systém je dvakrát účinnější než systém Kalinův.[25], [27]

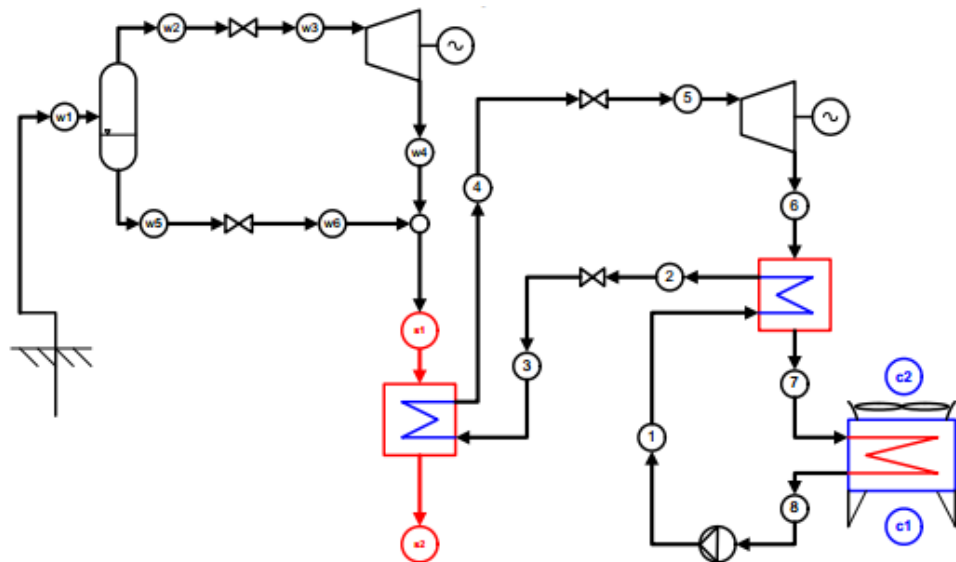


Obrázek 16 Ueharův cyklus

Zdroj: <http://www.thermoptim.org/sections/technologies/systemes/cycle-uehara>

#### 2.3.4.4 Geotermální elektrárny kombinovaných systémů

Systémy popsané výše jsou velice často vzájemně kombinovány. Nejčastějším spojením je kombinace přímého využití geotermálních par (single flash cycle) a binárního cyklu, například ORC. Binární cyklus je zařazen na výstup cyklu parního. V podstatě je pak výparník binárního cyklu použit jako kondenzátor cyklu parního. Spojením těchto dvou systémů s využitím jejich kladných parametrů lze dosáhnout významného zvýšení účinnosti elektrárny. Parní cyklus vyniká svojí jednoduchostí a binární cyklus jej doplní zvýšením účinnosti. Proti váhám těchto kladů je zvýšení konstrukční složitosti a investičních nákladů. Příkladem takové kombinace je cyklus na *Obrázek 17*. [16]



Obrázek 17 Kombinace "single flas" a binárního cyklu  
Zdroj: [16]

### 2.3.4.5 Porovnání okruhů geotermálních elektráren

Geotermální elektrárny s parním cyklem (flash cycle) potřebují pro svoji činnost hydro-geotermální zdroj s vysokou entalpií. V separátoru těchto cyklů je oddělována solanka (minerální voda) z mokré páry, množství solanky je zvyšováno průtokem geotermální páry separátorem. Z kapaliny jsou zde uvolňovány nekondenzovatelné plyny, které je nutné z kondenzátu ekologicky odstranit a až po této úpravě lze re-injektovat kapalinu do geotermálního zdroje. Tento aspekt omezuje použití tohoto typu elektráren na oblasti s nízkým obydlím. Oproti tomu elektrárnám s binárním cyklem, dostačuje pro výměnu tepla geotermální médium v kapalném stavu. Kapalného stavu primárního média lze docílit dodržáním jeho vysokého tlaku v průběhu procesu. Tím je zabráněno uvolňování nekondenzovatelných plynů a kapalina může být bez dalších úprav re-injektována zpět do geotermálního zdroje.

Pro geotermální zdroje nízkých a středních teplot (do 180°C) je ekonomičtější použití systému ORC, tento systém je také vhodný v případě že geotermální médium obsahuje velké množství nekondenzovatelných plynů, které by bylo nutné odstranit. Je možné uzpůsobit stupeň regenerace v ORC, takovým způsobem aby bylo možné dále pracovat s geotermálním médiem například pro dálkové vytápění, nebo aby byly, dodrženy chemická omezení.

Výhodou systémů ORC je možnost přizpůsobení pracovního média, jeho složením, parametrům geotermálního média, tak aby proces přechodu z kapalně na plynnou fázi ve výparníku probíhal co nejefektivněji. Nevýhodou pracovního (sekundárního) média, Kalinova, nebo ORC systému je jeho toxicita a hořlavost, což vede k nutnosti velkých bezpečnostních opatření. Tím že se jedná o speciální kapaliny, je dána jejich vyšší cena.

Systém ORC pracuje s nižším tlakem a tedy vyšším průtokem pracovní páry turbínou. Oproti tomu Kalinův cyklus pracuje s tlaky vyššími a menší průtokem pracovní páry. Náklady na turbínu cyklu ORC by tedy měly být daleko vyšší. Kalinův cyklus používá jako pracovní médium amoniakovou vodu (páru), ta způsobuje korozi turbíny, proto je nutné použít titan jako materiál rotoru turbíny. Nároky na potrubí a jeho materiál jsou v obou cyklech přibližně stejné. Také celková složitost těchto systémů je přibližně srovnatelná. Složitost je obecně dána úrovněmi regenerace a její porovnání je vhodné dělat pro systémy přibližně stejného rozsahu. [12], [16], [23]



### 3 Podíl geotermálních elektráren ve výrobě elektrické energie

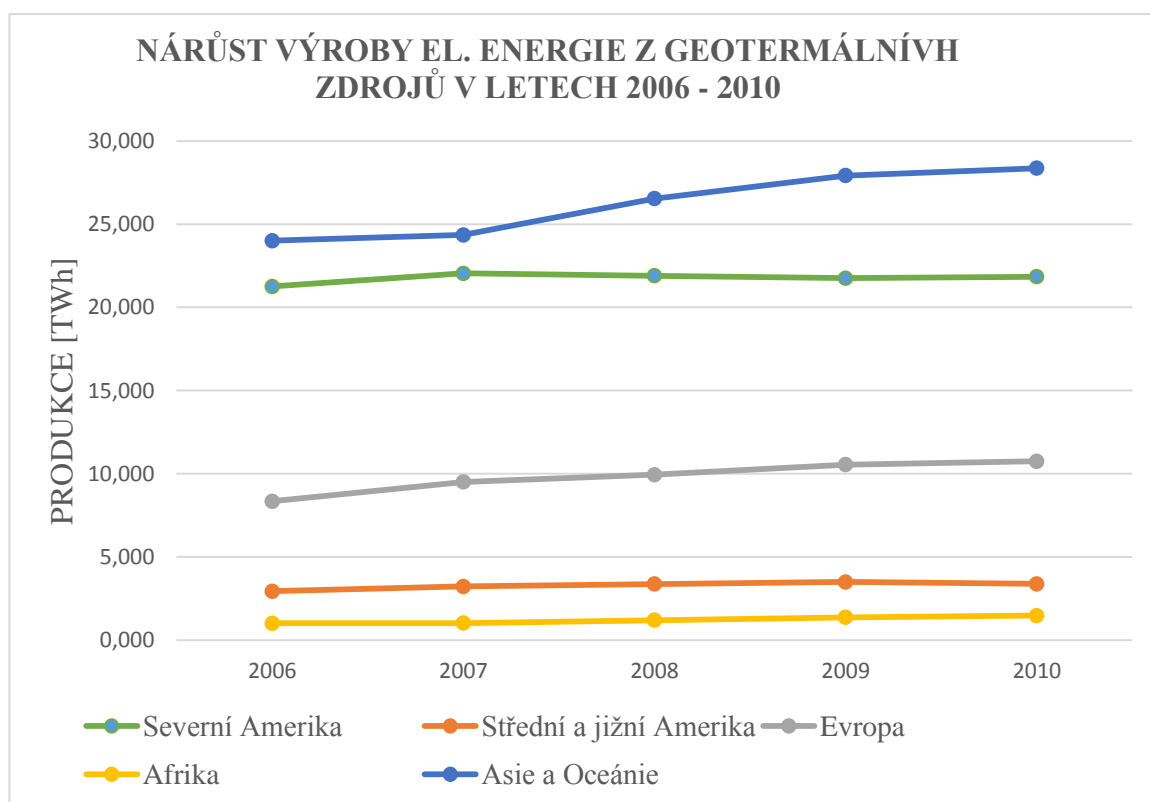
V celosvětovém měřítku jsou geotermální elektrárny minoritním zdrojem elektrické energie. Velkou vinu na podcenění tohoto energetického zdroje nese velká cenová náročnost, náročnost technologická a malá propagace těchto zdrojů. *Tabulka 3* uvádí výrobu elektrické energie z geotermálních zdrojů v jednotlivých státech v letech 2006 až 2010 a porovnává ji s celkovou vyrobenou elektrickou energií z obnovitelných zdrojů a s celkovou výrobou elektrické energie. Z tabulky je patrné, že výroba elektrické energie z geotermálních zdrojů je proti celkové výrobě zanedbatelná. Tyto malé a energeticky zanedbatelné elektrárny (v celkovém měřítku) jsou velice důležité. Právě tyto projekty prohlubují naše znalosti o geotermálních zdrojích a systémech, které je zpracovávají. Díky takovým projektům je pak věnována náležitá pozornost technologické náročnosti a jsou vyvíjeny metody, jež zvyšují účinnost geotermálních elektráren příkladem je třeba Kalinův, nebo Uehurův cyklus. Faktorem v dnešní době nejvýznamnější, jež eliminuje výstavbu geotermálních elektráren, jsou velké finanční náklady. Proto jsou snahy kombinovat geotermální elektrárny s geotermálními výtopnami do společných celků - tepláren. To s sebou ovšem nese omezení ve vzdálenosti umístění teplárny od obydleného území. Při přepravě elektrické energie vznikají mnohem menší ztráty než při přepravě tepla. Náklady na vybudování distribuční tepelné soustavy jsou sice srovnatelné s náklady pro distribuční soustavu elektrické energie, ovšem náklady na její údržbu a na minimalizování ztrát jsou vyšší. Tímto omezením je snížen počet vhodných lokalit, respektive efektivita teplárny v oblasti blízké obydleným územím je mnohdy nižší, než v lokalitách vhodnějších a vzdálenějších.

**Tabulka 3 Porovnání roční výroby elektřiny geotermálních elektráren v letech 2006 - 2010, Porovnání s celkovou výrobou z obnovitelných zdrojů a celkovou výrobou v roce 2010**

Země	Geotermální energie [TWh]					Obnovitelné zdroje celk.[TWh]	Celková výroba [TWh]
	2006	2007	2008	2009	2010	2010	2010
<b>Severní Amerika</b>	21,25	22,04	21,90	21,75	21,84	841,12	4 961,36
<b>Mexiko</b>	6,69	7,40	7,06	6,74	6,62	47,33	257,26
<b>USA</b>	14,57	14,64	14,84	15,01	15,22	427,38	4 112,20
<b>Střední a jižní Amerika</b>	2,93	3,23	3,37	3,49	3,37	736,10	1 096,18
<b>Kostarika</b>	1,22	1,24	1,13	1,19	1,18	8,87	9,47
<b>Salvádor</b>	1,14	1,38	1,52	1,52	1,53	3,87	6,07
<b>Guadeloupe</b>	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15	1,65
<b>Guatemala</b>	0,16	0,26	0,29	0,39	0,27	5,88	8,62
<b>Nikaragua</b>	0,31	0,24	0,32	0,30	0,30	1,18	3,35
<b>Evropa</b>	8,34	9,51	9,94	10,55	10,75	947,63	3 610,30
<b>Česká Republika</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,90	80,60
<b>Francie</b>	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	79,27	537,12
<b>Německo</b>	0,00	0,00	0,02	0,02	0,03	109,59	588,05
<b>Island</b>	2,63	3,58	4,04	4,55	4,47	16,93	16,93
<b>Itálie</b>	5,53	5,57	5,52	5,34	5,38	78,60	283,19
<b>Portugalsko</b>	0,09	0,20	0,19	0,18	0,20	28,52	51,91
<b>Turecko</b>	0,09	0,16	0,16	0,44	0,67	55,32	201,37
<b>Velká Británie</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,15	353,45
<b>Euroasie a stř. východ</b>	0,46	0,49	0,47	0,46	0,51	246,87	1 423,48
<b>Rusko</b>	0,46	0,49	0,47	0,46	0,51	168,10	983,81
<b>Afrika</b>	1,01	1,02	1,19	1,36	1,47	110,90	631,52
<b>Etiopie</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	4,90	4,93
<b>Keňa</b>	1,01	1,02	1,18	1,34	1,45	5,18	7,33
<b>Asie a Oceánie</b>	24,00	24,35	26,53	27,92	28,37	1 253,78	7 689,25
<b>Čína</b>	0,13	0,12	0,14	0,15	0,16	770,92	3 904,12
<b>Indonésie</b>	6,66	7,02	8,31	9,30	9,36	26,95	161,05
<b>Japonsko</b>	3,08	3,04	2,75	2,89	2,63	115,24	1 051,77
<b>Nový Zéland</b>	3,37	3,56	4,20	4,87	5,88	32,60	43,80
<b>Papua - Nová Guinea</b>	0,30	0,40	0,40	0,40	0,40	1,25	3,35
<b>Filipíny</b>	10,47	10,22	10,72	10,32	9,93	17,72	64,64
<b>Celkem světová výroba</b>	<b>58,00</b>	<b>60,63</b>	<b>63,39</b>	<b>65,54</b>	<b>66,30</b>	<b>4 154,34</b>	<b>20 225,28</b>

Zdroj dat: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=2&pid=2&aid=12>

Graf 1 shrnuje nárůst výroby elektrické energie z geotermálních zdrojů mezi roky 2006 a 2010. Z grafu je patrný nárůst produkce především v zemích Asie a Oceánie, z těchto zemí byl největší nárůst produkce v Indonésii a na Novém Zélandu. Mírné poklesy v produkci ostatních zemí mohou být způsobeny odstávkami z důvodu údržby, nebo úmyslným snížením jejich výkonu čímž byly vykrývány poklesy spotřeby elektrické energie. Vlastnost snadné regulace výkonu patří mezi klady geotermálních elektráren. Další patrný nárůst výroby elektrické energie z geotermálních zdrojů je patrný v zemích Evropy. Hlavními producenty jsou Itálie, Island a Turecko. Největší nárůst ve výrobě byl zaznamenán na Islandu. V ostatních územních celcích je produkce elektrické energie z geotermálních zdrojů vyrovnaná a nedochází k žádným velkým poklesům či nárůstům. Při bližším pohledu na jednotlivé státy však můžeme zaznamenat znatelný nárůst výroby v USA, Salvádoru, Guatemale, Etiopii a Keně.



Graf 1 Nárůst výroby el. energie z geotermálních zdrojů na jednotlivých kontinentech v letech 2006 – 2010

V Tabulka 4 jsou uvedeny hodnoty výroby elektrické energie rozdělené podle územních celků a způsobu její výroby. Vzhledem k informacím běžně kolujících v dnešních médiích je zajímavé jak obrovský podíl na výrobě elektrické energie mají elektrárny spalující fosilní

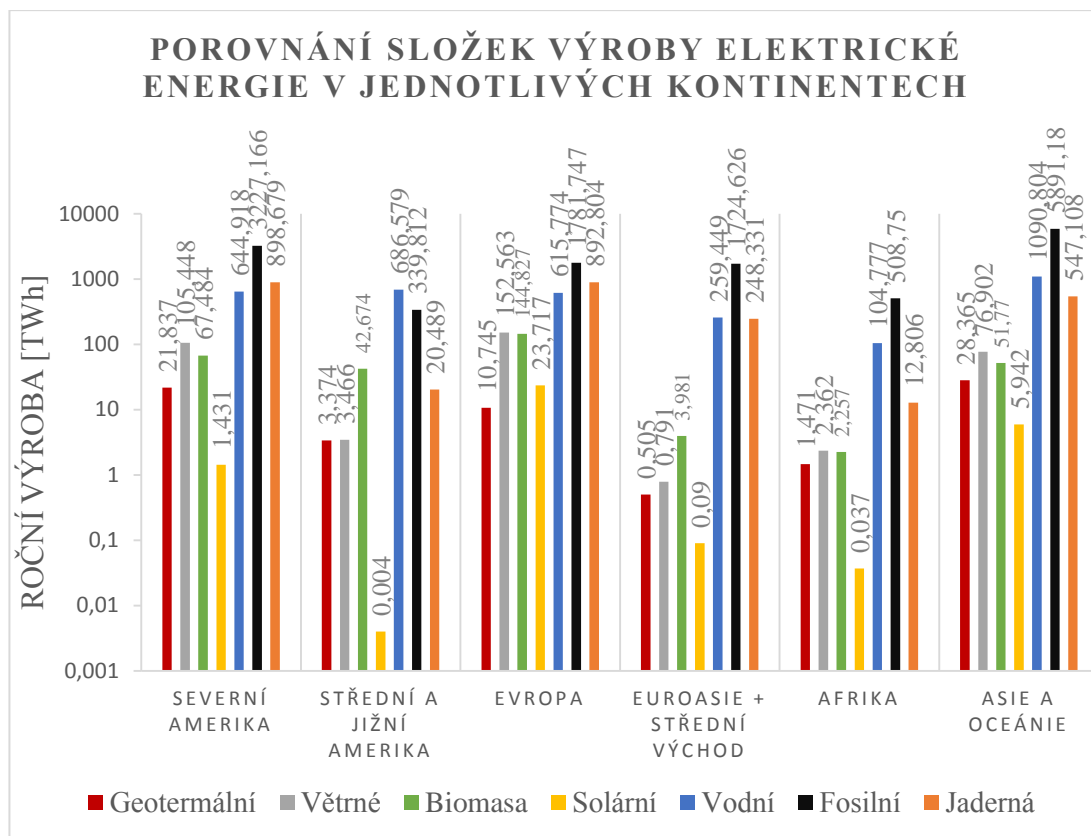
paliva. Přičemž tyto elektrárny jsou nejméně šetrné k životnímu prostředí a to způsobem získávání paliva i emisemi vznikajícími při jeho spalování a náklady na jeho dopravu. Dále jsou zajímavé hodnoty produkce elektrické energie z biomasy, největší jsou v Evropě a v Severní Americe. Když uvážíme, že mnohdy nejsou zdrojem pro výrobu elektrické energie pouze bio-odpady, ale jsou vyčleňovány pole určené pouze k produkci biomasy vhodné pro zpracování v bioplynových elektrárnách, je velikost jejich produkce alarmující. Přičteme-li k tomu ještě pole produkující olejnaté plodiny (řepku), jejichž olej je přimícháván do pohonných hmot, musím se zeptat: “kde pěstujeme plodiny pro jídlo?” Obecně nejmenší podíl ve výrobě elektrické energie mají fotovoltaické elektrárny, to je způsobeno jejich nízkou účinností plochy, na kterých jsou instalovány, jsou poměrně velké a zabírají mnohdy zemědělskou půdu. Jejich expanze byla nejvíce způsobena uměle vytvořenými ekonomickými podmínkami pro jejich instalaci, bez ohledu na jejich účinnost a kvalitu, respektive časovou stálost produkce elektrické energie.

**Tabulka 4 Porovnání výroby el. energie z jednotlivých složek v roce 2010**

	Obnovitelné zdroje					Konvenční	
	Geotermální	Větrné	Biomasa	Solární	Vodní	Fosilní	Jaderná
<b>Severní Amerika</b>	21,84	105,45	67,48	1,43	644,92	3 227,17	898,68
<b>Střední a jižní Amerika</b>	3,37	3,47	42,67	0,00	686,58	339,81	20,49
<b>Evropa</b>	10,75	152,56	144,83	23,72	615,77	1 781,75	892,80
<b>Euroasie a střed. východ</b>	0,51	0,79	3,98	0,09	259,45	1 724,63	248,33
<b>Afrika</b>	1,47	2,36	2,26	0,04	104,78	508,75	12,81
<b>Asie a Oceánie</b>	28,37	76,90	51,77	5,94	1 090,80	5 891,18	547,11
<b>Celkem světová výroba</b>	66,30	341,53	312,99	31,22	3 402,30	13 473,28	2 620,22

Zdroj dat: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=2&pid=2&aid=12>

Data uvedená v *Tabulka 4* jsou znázorněna v *Graf 2*, pro jejich přehledné zobrazení byla použita logaritmická stupnice roční výroby. Hodnoty produkce elektrické energie z obnovitelných zdrojů jsou malé a v porovnání s výrobou z fosilních paliv by v grafu nebyli vidět.



Graf 2 Porovnání výroby el. energie z jednotlivých složek v roce 2010

### 3.1 Environmentální zhodnocení geotermálních elektráren

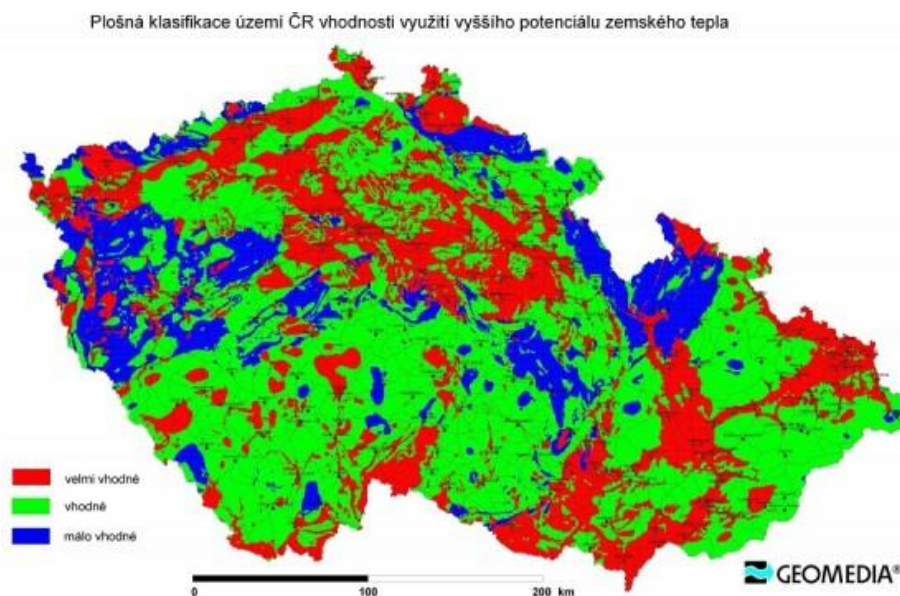
Z environmentálního pohledu je podíl geotermálních elektráren na znečištění přírody zanedbatelný. Není pravdou, že geotermální elektrárny, nebo teplárny neprodukují žádné znečišťující emise, stejně jako například fotovoltaické panely (škodlivé odpadní látky vznikají při jejich výrobě a v době budoucí budou vznikat při jejich likvidaci). Při čerpání geotermální vody jejím ochlazení a následném re-injektování zpět do podzemního rezervoáru může dojít k různým situacím, které mohou mít vliv na životní prostředí. Například může dojít k narušení bilance podzemních vod, při změně tlaku v pórech hornin, což může vyvolat pohyb hornin. Při přílišném čerpání (nebo velkém ochlazení geotermální vody) může dojít k prochlazení hornin. Při čerpání geotermální vody může docházet k uvolňování plynů (sirovodík, oxid uhličitý), dále se do atmosféry může uvolňovat velké množství tepla. Při práci s geotermální vodou je nutné řešit problém s látkami, které jsou v ní rozpuštěny (chloridy, sírany, karbonáty síranu a draslíku, dále pak křemičitany a těžké kovy). Voda, která má takových látek kolem 100g a více může způsobovat zanášení potrubí, případně jeho korozi. Takovou vodu je pak nutné dále upravovat za použití značného množství chemikálií. Systém HDR je v tomto ohledu příznivější, jelikož využívá vodu vstříkovanou z povrchu, která je vyčištěna a

množství nečistot, které jsou do ní uvolněny z hornin je malé a s časem klesá. Pro srovnání emise oxidu uhličitého z vysokoteplotních geotermálních zdrojů využívaných pro výrobu elektřiny se pohybují mezi 13 – 380 [g/kWh], při spalování zemního plynu 453 [g/kWh], ropy 960 [g/kWh] a uhlí 1042 [g/kWh]. Totéž platí i pro oxidy síry (přesné údaje nejsou k dispozici). Při využití nízkoteplotních geotermálních zdrojů jsou emise oxidu uhličitého a oxidů síry daleko menší. Snížení emisí lze také docílit udržováním geotermálního média při vysokém tlaku a jeho následného re-injektování. [4], [10], [12]

## 4 Možnosti využití systému geotermálních elektráren v ČR

Pro využití geotermální energie v České republice hovoří mnoho faktorů. Jsou zde přítomny zlomové struktury ve větší hloubce, jimiž přednostně prostupuje teplo z hloubky. Také je zde poměrně malá mocnost pevninské kůry a relativně malá nadmořská výška. Český masiv je tvořen horninami se zvýšenou radioaktivitou (při vzniku radioaktivity – štěpení látek je uvolňováno teplo). Některé vhodné oblasti jsou ovšem umístěny na úbočích hor, kde je velká členitost terénu (Krušné hory...)

Nejvhodnějšími lokalitami pro využití geotermální energie jsou například: ohárecký rift, Doupovské vrchy, karlovarský žulový masív (Jáchymov-Boží Dar-Zlatý kopec-Potůčky), chebská pánev, Smrčinský masív, plzeňská pánev, Podkrkonoší, Polická pánev, západní svahy orlických hor, Železné hory, oblast křížení oháreckého riftu s labskou zónou (Ústí nad Labem – Děčín), České Středohoří a další.... *Obrázek 18* zobrazuje rozdělení České republiky dle vhodnosti využití čerpání geotermální energie. Červeně jsou zobrazeny nejvhodnější lokality, modře lokality nejméně vhodné. [17]



Obr. 3.

*Obrázek 18* Vhodnost využití geotermální energie v ČR  
Zdroj: <http://www.geomedia.cz/>

## 4.1 Geotermální potenciál ČR pro výrobu tepla a el. energie

Česká republika má velice dobrý potenciál pro aplikaci geotermálních zařízení. Odhadovaná energetická bilance je uvedena níže. Jedná se o kategorizaci z hlediska druhu geotermálního zdroje, a zda bude zdroj použit pro výrobu elektrické energie, nebo tepla.

- Energie z hydrotermálních zdrojů vysokých teplot ( $>150^{\circ}\text{C}$ ) pro výrobu elektrické energie
  - odhadovaný potenciál 10MW
- Energie z tepla hornin (HDR) vysokých teplot ( $>150^{\circ}\text{C}$ ) pro výrobu elektrické energie
  - odhad teoretického potenciálu při uvažování produkce tepla hornin z  $1\text{ km}^3$  až 30MW elektrické energie po dobu přibližně 30 let. Činí přibližně 2,386 TW
- Energie z hydrotermálních zdrojů vysokých teplot ( $>150^{\circ}\text{C}$ ) pro výrobu tepla (při tepelném odběru větším než 5 K)
  - odhadovaný potenciál 25 MW
- Energie z nízkoteplotních geotermálních systémů – tepelná čerpadla
  - primární zdroj horniny 8,75 GW
  - primární zdroj podzemní voda 2,39 GW

[14]

### 4.1.1 Hodnocení geotermálního potenciálu ČR dle základních parametrů

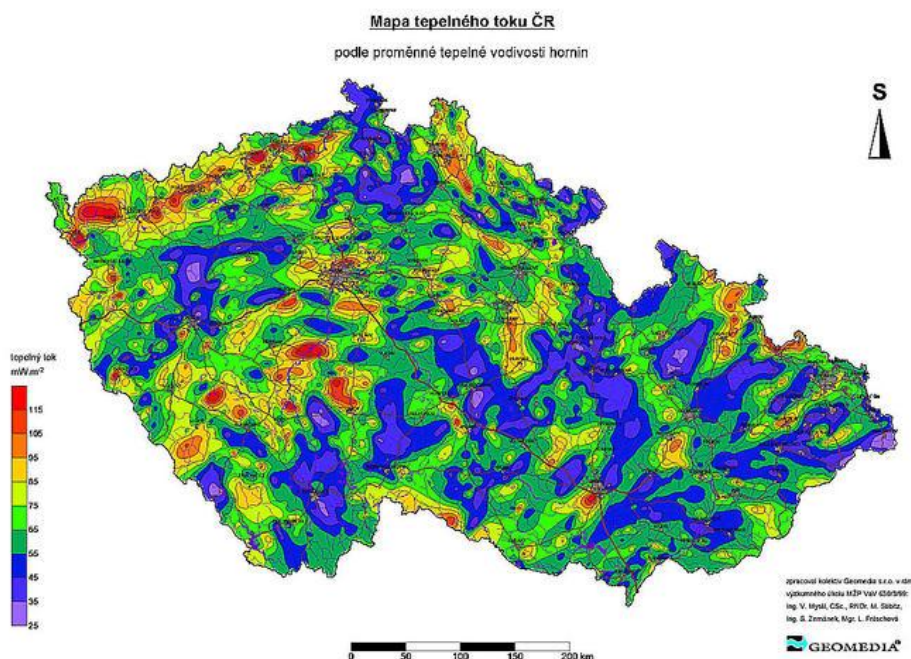
V následujících dvou kapitolách je Česká republika, respektive Český masiv hodnocen z pohledu velikosti tepelného toku a tepelné vodivosti hornin. Tyto dva parametry jsou základními hodnotícími aspekty pro výběr vhodné lokality pro geotermální zařízení. Na jejich základě lze například odhadnout nárůst teploty s hloubkou v dané skladbě hornin.

#### 4.1.1.1 Tepelný tok v ČR

Tepelný tok v České republice není konstantní, jeho velikost je ovlivněna druhem hornin, tloušťkou zemské kůry a vulkanickou aktivitou. V nejstabilnějších částech se silnější zemskou kůrou (až 36km) v jižní a střední části Českého masivu jsou hodnoty tepelného toku nejmenší. Jsou to především oblasti třebečského plutonu a Jeseníků. V okrajových částech Českého masivu jsou hodnoty vyšší, zvýšené hodnoty také nalezneme v oblastech hlubinných zlomů,



kteřé jej protínají. Mapa tepelného toku je zobrazena na *Obrázek 19*. Pro celé území České republiky lze stanovit průměrný tepelný tok  $68 \text{ [mWm}^{-2}\text{]}$ . [10]



**Obrázek 19** Rozložení tepelného toku v ČR  
Zdroj: <http://www.geomedia.cz/>

V *Tabulka 5* jsou uvedeny rozmezí hodnot tepelného toku v geologických jednotkách České republiky. Nejvyšších hodnot dosahují lokality v severní části západních Čech (Krušné hory, Oherský prolom, saxoturgnikum). Nejnižší hodnoty nalezneme v oblasti jižních Čech a Moravy (moravská část Českého masivu a Moldanubikum).

**Tabulka 5** Hodnoty tepelného toku v různých geologických jednotkách ČR

Geologická jednotka	Rozmezí $[\text{mWm}^{-2}]$	Střední hodnota $[\text{mWm}^{-2}]$
Český masiv – česká část	43 – 71	53,4
Český masiv – moravská část	21 – 41	31,2
Moldanubikum, celkově	21 – 71	40,4
Krušné hory	58 – 185	81,8
Oherský prolom	45 – 121	94,3
Saxoturgnikum	45 – 185	90,8
Předkarbonské jednotky	31 – 72	54,1
Permokarbon, křída	52 – 96	67,9
Barrandien	31 – 96	63,3
Hornoslezská pánev	55 – 92	69,6
moravikum	45 - 92	66,2

Zdroj: [4]

### 4.1.1.2 Tepelná vodivost hornin v ČR

V *Tabulka 6* je shrnuta tepelná vodivost hornin Českého masivu. Nejlepší tepelnou vodivost vykazují hlubinné vyvřeliny a metamorfity. Jejich dobrá tepelná vodivost je ovlivněna vysokou hustotou a malou pórovitostí, dalším ovlivňujícím parametrem je obsah minerálů, které jsou dobrými tepelnými vodiči.

**Tabulka 6 Průměrná tepelná vodivost hornin některých geologických jednotek**

Geologická jednotka	Počet měření	Tepelná vodivost [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
Český masiv – metamorfované horniny	146	2,67
Český masiv – granitoidy	83	2,72
Český masiv – teplický „porfyr“	22	2,50
Český masiv – cínovecký granit, greisen	32	2,70
Český masiv – Jeseníky	74	2,82
Český masiv – sedimenty české křídý	136	1,85
Český masiv – sedimenty permokarbonu	162	2,35
Sedimenty uhel. pánví – kladensko-rakovnické	110	2,28
Sedimenty uhel. pánví – ostravsko-karvinská	328	2,78
Sedimenty uhel. pánví – žacléřsko-svatoňovická	39	2,64
Sedimenty uhel. pánví – karpatská prohlubeň	236	2,86
Sedimenty uhel. pánví – vídeňská pánev	36	1,53

Zdroj: [4]

## 4.1.2 Zdroje geotermální energie v ČR

### 4.1.2.1 Hydro-geotermální zdroje

Tepelná energie hydro-geotermální zdrojů uložená v podzemních rezervoárech – zvodních je v České republice využívána hlavně v severních Čechách v oblasti Děčínska. Teplota spodních vod zde dosahuje teploty 32 až 35°C. V Děčíně je postavena teplárna využívající tento tepelný zdroj pro komerční vytápění. Další vhodnou lokalitou se zvodněním jsou moravské karpatské předhlubně a sedimenty vídeňské pánve. Teplota moravských zvodní se pohybuje v rozmezí 50 až 70°C.

#### 4.1.2.2 Zdroje HDR

Obecně lze říci, že využívání geotermální energie pomocí metody hot-dry-rock je možné po celé České republice. Lokality pak lze rozdělit na vhodné a méně vhodné. Tuto klasifikaci můžeme založit na velikosti tepelného toku. V oblastech s vyšším tepelným tokem lze předpokládat vyšší teploty v nižších dosažitelných hloubkách. V takovýchto vhodných oblastech jsou pak systémy HDR vhodné pro výstavbu tepláren, ve kterých je kombinována elektrárna binárního systému s tepelnými čerpadly, pro vytápění objektů v přilehlých lokalitách. Lokality méně vhodné lze pak využít jako zdroje tepelné energie – výtopny pro části měst, obce, nebo průmyslová zařízení. Průměrná hloubka využitelná pro systém HDR je na našem území přibližně 5 km, kde je průměrná teplota 200°C.

#### 4.1.2.3 Zdroje HFR

Rozdrcené suché horniny se v České republice vyskytují převážně v oblastech Karlovarska. Systém HFR lze nalézt například v Karlových Varech, projevem jsou minerální a proplyněné vody zdejších pramenů. Teplota geotermální vody – karlovarského vřídla se pohybuje kolem 72°C.

V podmínkách České republiky je tedy nejvhodnějším zdrojem geotermální energie systém HDR. Hydrogeotermální zdroje se zde vyskytují pouze v omezené míře a ne vždy je lze využít, jejich teplota je poměrně nízká čímž jsou předurčeny spíše pro výrobu tepla. Systémy HFR jsou v České republice ještě vzácnější a jsou vázány na lázeňské účely.

### 4.2 Orientační ekonomický rozbor ukázkového projektu

Specifikace projektu: Geotermální teplárna, výroba elektřiny 5 MWe, tepla 50MWt. Jako zdroj geotermální energie bude použit systém HDR. Systém teplárny se bude skládat z Kalinova cyklu produkujícího elektrickou energii a uzavřeného teplovodního okruhu pro vytápění.

#### **Náklady:**

Komplexní průzkum vhodnosti lokality cca 100 mil Kč. Systém HDR (včetně hloubkových vrtů a souvisejících prací) cca 500 mil Kč. Technologie teplárny a připojení k distribuční soustavě cca 400 mil Kč. Pojištění stavby, zejména hlubinných prací cca 100 mil Kč. Roční

provozní náklady cca 20 mil Kč/rok.

Celkové náklady na realizaci této teplárny činí přibližně 1 100 mil Kč.

#### **Návratnost:**

Při předpokladu že teplárna bude provozována na 90% plánovaných parametrů. Je možné počítat s roční výrobou elektrické energie 39,42 [GWh] za rok. Výkupní cenu elektřiny vyrobené geotermálními zdroji je přibližně 4,5 Kč/kWh. Lze předpokládat roční zisk z produkce elektrické energie 177,39 mil Kč. Odečtou-li se od této částky roční provozní náklady a náklady vzniklé technickými odstávkami je možné uvažovat zisk z elektrické energie 140 mil Kč ročně. K této částce je nutné přičíst prodej tepelné energie. Roční výrobu tepelné energie uvažovat (opět při 90% provozu) 394,2 [GWh], to odpovídá 1,4 [PJ], odečteme-li distribuční ztráty ve výši 25%, dostáváme přibližné vyrobené množství tepla 1[PJ]. Při výkupní ceně 120 Kč za 1[GJ] a redukci tepla (zimní období) na 1/3 jsou tržby cca 40 mil Kč ročně.

Celkový roční zisk z této teplárny činí 180 mil Kč ročně. Návratnost při nákladech 1 100 mil Kč a zisku 180 mil Kč/rok je přibližně 7 let. Životnost takovéto teplárny respektive podzemního výměníku je řádově 25 – 30 let.

Tento rozbor je samozřejmě pouze orientační, ovšem i za předpokladu zhoršení účinnosti o dalších 20% a tím i návratnosti z původních 7 na 9 let, je stále návratnost investic nižší než u fotovoltaických elektráren, kde se pohybuje řádově kolem 10 – 12 let.

### **4.3 Realizované geotermální projekty v ČR**

V České republice v dnešní době není instalována žádná geotermální elektrárna. O jejich instalaci je jednáno například v obci Nová Paka, Semily, Dětrichov na Frýdlantsku. Geotermální elektrárna měla být instalována také v Liberci, projekt byl ovšem zastaven společností ČEZ pro malou ziskovost oproti projektům jiným. Jediný realizovaný projekt v České republice je teplárna v Děčíně ulici Benešovské, tento projekt je v provozu od roku 2002. Geotermální energie tvoří přibližně 25% celkové energie vstupních paliv, je zde kombinována se Zemním plynem. Instalovaný výkon je 42,72 MWt vyráběných s využitím geotermální energie a 2,75MWe produkovaných plynovými motory.

## Závěr

Geotermální energie jako zdroj „čistý a ekologický“ vhodný pro přeměnu na energii elektrickou má obrovský potenciál. Bohužel v 90% lokalit je využití geotermální energie na hranici stávajících technických možností. Tím je možnost jeho využití komplikována.

Z první kapitoly vyplývají tři základní zdroje geotermální energie. Hydro-geotermální zdroje jsou vázány na přírodní rezervoáry geotermálních vod o vhodné teplotě, které jsou poměrně vzácné (při požadavcích na teplotu vody ~200°C, lokalitě v blízkosti obydleného území a malé hloubce – do 5 km). Systémy HFR, jež podmiňují speciální rozdrčené horniny v podloží, takové lokality jsou převážně vázány na tektonické oblasti. A systémy HDR jež lze velice zjednodušeně řečeno umístit všude. Tento systém s sebou nese pouze podmínku dosažení dostatečné hloubky (ve které je vyhovující teplota) a vhodného podloží – suché horniny. Obecně lze tedy geotermální zdroje hodnotit z pohledu teploty, hloubky, ve které se potřebná teplota vyskytuje a přítomnosti, či nepřítomnosti geotermální vody. Největším omezením ve výstavě geotermálních elektráren jsou tedy nedostatečná technická vyspělost, a finanční náklady. Další překážkou pro rozšíření výstavby geotermálních elektráren (tepláren) je distribuce elektrické energie (tepla) na větší vzdálenosti, čímž se zvyšují náklady na výstavbu. V případě využití zbytkového tepla je pak distribuce na velké vzdálenosti velice problematická vzhledem k velkým ztrátám a potřeby čerpadel pohánějících teplonosné médium. V dnešní době jsou nejrozšířenější nízkoteplotní geotermální zdroje v kombinaci s tepelnými čerpadly.

V druhé kapitole jsou popsány geotermální elektrárny a jejich cykly. Nejjednodušší provedení využívající přímé zpracování geotermální páry, je pro své použití omezeno vhodnou lokalitou a nízkou účinností. Flash systémy zpracovávající mokrou páru jsou efektivnější a lze je provozovat na větším množství lokalit vzhledem k nižším teplotám zdroje. Protiváhou je složitější systém cyklu. Zajímavější cykly z pohledu účinnosti jsou ORC a Kalinův cyklus. Pro tyto cykly platí menší nároky na teplotu geotermálního zdroje jsou velice vhodné pro geotermální zdroje typu HDR. Jejich nízká náročnost na vstupní teplo je vyvážena jejich složitostí a používáním toxického a hořlavého sekundárního média a obecně složitostí cyklu. Ueharův cyklus je zřejmě z uvedených cyklů neúčinnější, bohužel však ve vztahu s geotermálními elektrárnami není nikde popsán. Vhodnou metodou pro zefektivnění cyklu je přihřívání média vystupujícího z kondenzátoru, nebo kombinací cyklů přímo

využívající geotermální páry s cykly binárními. Elektrárny pracující s binárními cykly jsou obecně velice vhodným převodníkem nízkoteplotních zdrojů energie na energii mechanickou.

Při zhodnocení produkce elektrické energie z geotermálních elektráren v celosvětovém měřítku. Lze konstatovat, že jsou stále minoritním zdrojem energie a to nejen v porovnání s celkovou produkcí elektrické energie, ale i v porovnání s elektrickou energií vyráběnou pomocí obnovitelných zdrojů (geotermální energie tvoří 1,409% energie vyráběné obnovitelnými zdroji). Jistý rozvoj v této technologii lze předpokládat s rozvojem těžebních technologií a se vzrůstající informovaností lidí, kteří se tomuto zdroji brání, nebo oněm nevědí. Rozvoj této technologie lze také předpokládat se vzrůstající poptávkou po energiích a se ztenčováním zásob konvenčních paliv. Především uhlí, protože z obnovitelných zdrojů dokáží stálost dodávek elektrické energie ve standartu uhelných elektráren produkovat pouze elektrárny vodní a zpracovávající biomasu.

V České republice je velké množství lokalit vhodných pro výstavbu geotermálních elektráren. Bohužel investorů schopných pokrýt tak velké náklady na výstavbu je málo a jsou pro ně zajímavější projekty s rychlejší a větší návratností. Prognózy o využití této energie na našem území. Udávají, že do roku 2020 by mělo být postaveno 12 elektráren o celkovém výkonu 80 MWe. Při dlouhodobém výhledu by do roku 2050 mělo být realizováno až 140 projektů jednotlivém výkonu 5 – 30 MWe, tedy o celkovém výkonu v rozmezí 700 – 4 200 MWe. [15]

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] prof. Petránek Josef. Geologická encyklopedie. Tepelná vodivost hornin. [online]. Poslední změna 2007. [Cit. 5.3.2013]. Dostupné z: [http://www.geology.cz/encyklopedie/term.pl?tepelna\\_vodivost\\_hornin](http://www.geology.cz/encyklopedie/term.pl?tepelna_vodivost_hornin)
- [2] Rubín Josef. Příroda. Co je to artéská studně?. [online]. Poslední změna 9.1.2003. [Cit.10.4.2013]. Dostupné z: [http://www.rozhlas.cz/priroda/porady/\\_zprava/59697](http://www.rozhlas.cz/priroda/porady/_zprava/59697)
- [3] Union of Concerned Scientis. How Geothermal Energy Works. [online]. Poslední změna 2013. [Cit. 10.4.2013]. Dostupné z: [http://www.ucsusa.org/clean\\_energy/our-energy-choices/renewable-energy/how-geothermal-energy-works.html](http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/renewable-energy/how-geothermal-energy-works.html)
- [4] Ing. Myslík Vladimír a kol. Geotermální energie. Planeta 2007/4. [online]. Ministerstvo životního prostředí. 4.2007. [Cit.11.4.2013]. ISSN – tištěné verze 1801-6898. Dostupné z: <http://www.mzp.cz/osv/edice.nsf/doc/4BE8C2DA7BE810F6C125725900456E0A>
- [5] The economist. Hot rocks and high hopes. [online]. Poslední změna 10.2010. [Cit. 10.4.2013]. Dostupné z: <http://www.economist.com/node/16909897>
- [6] Hot Rock Limited. Hot Fractured Rock Geothermal. [online]. Poslední změna 2013. [Cit. 10.4.2013]. Dostupné z: [http://www.hotrockltd.com/irm/content/about\\_hotfracturedrock.html](http://www.hotrockltd.com/irm/content/about_hotfracturedrock.html)
- [7] Stískal Ondřej. Island – geotermální ráj. [online]. Poslední změna 2000. [Cit. 12.4.2013]. Dostupné z: <http://www.kamenet.cz/kz/islandgt.htm>
- [8] Wikipedia. Geothermal heating. [online]. Poslední změna 5.2013. [Cit. 15.4.2013]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal\\_heating](http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_heating)
- [9] Enza. Princip tepelného čerpadla. [online]. Poslední změna: 2006. [Cit. 5.2013]. Dostupné z: <http://www.enza.cz/princip-tepelneho-cerpadla.htm>
- [10] Petráš Dušan a kol. Nízkoteplotní vytápění a obnovitelné zdroje energie. 1.vydání. Bratislava: Jaga group, 2008. ISBN 978-80-8076-069-4
- [11] Quashning Volker. Obnovitelné zdroje energií. 1.vydání. Praha: Grada Publishing a.s., 2010. ISBN 978-80-247-3250-3
- [12] International Geothermal Association. [online]. Poslední změna: 17.1.2013. [Cit. 20.3.2013]. Dostupné z: <http://www.geothermal-energy.org/>
- [13] Ministerstvo životního prostředí. Geotermální energie. [online]. Poslední změna 2012. [Cit.10.3.2013]. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/cz/geotermalni\\_energie](http://www.mzp.cz/cz/geotermalni_energie)
- [14] Blažková Miroslava. Metodika k hodnocení geotermálního potenciálu v modelovém území Podkrušnohoří. 2010. [online]. UJEP, Fakulta životního prostředí. [Cit. 10.5.2013]. Dostupné z: [http://fzp.ujep.cz/projekty/wd-44-07-1/dokumenty/Method\\_G\\_E.pdf](http://fzp.ujep.cz/projekty/wd-44-07-1/dokumenty/Method_G_E.pdf)
- [15] Březová Kateřina. Česko má dobrý potenciál v geotermální energii. [online]. Poslední změna 16.8.2011. [Cit. 20.5.2013]. Dostupné z: <http://www.vasevec.cz/blogy/cesko-ma-dobry-potencial-v-geotermalni-energii>
- [16] Dr. Páll Valdimatsson. Geothermal power plant cycles and main components. 2011. [online]. University of Iceland, Reykjavik. [Cit. 3.-5. 2013]. Dostupné z: <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-12-35.pdf>
- [17] Paseková Lucie. Aliance pro energetickou soběstačnost. S Martinem Klozem o geotermální energii. [online]. Poslední změna 11.5.2012. [Cit. 15.4.2013]. Dostupné z: <http://www.alies.cz/2012/05/s-martinem-klozem-o-geotermalni-energii/>
- [18] Geoelec. About geothermal electricity. [online]. Poslední změna 2013 [Cit. 15.4.2013]. Dostupné z: [http://www.geoelec.eu/?page\\_id=9](http://www.geoelec.eu/?page_id=9)
- [19] Geoterm. Geotermální energie. Geotermální zdroje. [online]. [Cit. 16.4.2013]. Dostupné z: <http://www.geoterm.cz/>

- [20] Wikipedia. Geothermal electricity. [online]. Poslední změna: 5.4.2013. [Cit. 16.4.2013]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal\\_electricity](http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_electricity)
- [21] Neužil Martin PhD. Mokrý pára a separátory vlhkosti Spirax Sarco. Tzb-info. [online]. Poslední změna: 19.9.2001. [Cit. 5.3.2013]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/665-mokra-para-a-separatory-vlhkosti-spirax-sarco>
- [22] TAS Energy. Axial turbine with ORC technology for low-grade heat sources. Turbomachinery blog. [online]. Poslední změna 22.4.2013. [Cit. 30.4.2013]. Dostupné z: <http://www.turbomachinerymag.com/blog/content/axial-turbine-orc-technology-low-grade-heat-sources>
- [23] Geothermal Technologies Office. Electricity generation. [online]. Poslední změna: 22.2.2012. [Cit. 30.4.2013]. Dostupné z: <http://www1.eere.energy.gov/geothermal/powerplants.html>
- [24] Encyclopedia britannica. [online]. Vyhledávaná slova: enthalpy, entropy. Dostupné z: <http://www.britannica.com>
- [25] Holba Marek Ing. Získávání technologie z oceánů: technologie OTEC. Tzb-info. [online]. Poslední změna: 16.5.2005. [Cit. 10.3.2013]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2514-ziskavani-energie-z-oceanu-technologie-otec>
- [26] Kalina Cycle. [online]. Poslední změna 2010. [Cit. 10.3.2013]. Dostupné z: <http://kalinacycle.net/>
- [27] Portail ThermoOptim. Uehara cycle. [online]. Poslední změna: 18.12.2012. [Cit. 10.3.2013]. Dostupné z: <http://www.thermooptim.org/sections/technologies/systemes/cycle-uehara>
- [28] Stavba nitra Země. [online]. Poslední změna: 15.1.2010. [Cit. 15.2.2013]. Dostupné z: <http://astronomia.zcu.cz/planety/zeme/1948-stavba-nitra-zeme>



## Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 SCHÉMA GEOTERMÁLNÍ ELEKTRÁRNY BINÁRNÍHO CYKLU, PŘIPOJENÁ K SYSTÉMU HDR .....	17
OBRÁZEK 2 AXIÁLNÍ TURBÍNA PRO TECHNOLOGII ORC .....	24
OBRÁZEK 3 SCHÉMA ELEKTRÁRNY PŘÍMO VYUŽÍVAJÍCÍ GEOTERMÁLNÍ PÁRY .....	26
OBRÁZEK 4 SCHÉMA ELEKTRÁRNY - "SINGLE FLASH" SYSTÉM.....	28
OBRÁZEK 5 T-H DIAGRAM "SINGLE FLASH" SYSTÉMU.....	29
OBRÁZEK 6 T-S DIAGRAM "SINGLE FLASH" SYSTÉMU.....	29
OBRÁZEK 7 SCHÉMA ELEKTRÁRNY - "DOUBLE FLASH" SYSTÉM .....	30
OBRÁZEK 8 T-H DIAGRAM "DOUBLE FLASH" SYSTÉMU .....	30
OBRÁZEK 9 T-S DIAGRAM "DOUBLE FLASH" SYSTÉMU .....	30
OBRÁZEK 10 RANKINŮV CYKLUS S REGENERACÍ .....	32
OBRÁZEK 11 T-H DIAGRAM ORC S REGENERACÍ.....	33
OBRÁZEK 12 T-S DIAGRAM ORC S REGENERACÍ.....	33
OBRÁZEK 13 KALINŮV CYKLUS .....	35
OBRÁZEK 14 ZMĚNA FÁZE AMONIAKOVÉ VODY V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ A MNOŽSTVÍ AMONIAKU .....	36
OBRÁZEK 15 TEPLOTNÍ ROZSAH VARU AMONIAKOVÉ VODY V ZÁVISLOSTI NA MNOŽSTVÍ AMONIAKU .....	37
OBRÁZEK 16 UEHARŮV CYKLUS .....	38
OBRÁZEK 17 KOMBINACE "SINGLE FLAS" A BINÁRNÍHO CYKLU .....	39
OBRÁZEK 18 VHODNOST VYUŽITÍ GEOTERMÁLNÍ ENERGIE V ČR.....	47
OBRÁZEK 19 ROZLOŽENÍ TEPELNÉHO TOKU V ČR.....	49

## Seznam tabulek

TABULKA 1 TEPELNÉ VODIVOSTI HORNIN .....	13
TABULKA 2 ORIENTAČNÍ PŘEHLED STÁTŮ VYUŽÍVAJÍCÍ GEOTERMÁLNÍ ENERGII PRO VYTÁPĚNÍ .....	19
TABULKA 3 POROVNÁNÍ ROČNÍ VÝROBY ELEKTRINY GEOTERMÁLNÍCH ELEKTRÁREN V LETECH 2006 - 2010, POROVNÁNÍ S CELKOVOU VÝROBOU Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ A CELKOVOU VÝROBOU V ROCE 2010.....	42
TABULKA 4 POROVNÁNÍ VÝROBY EL. ENERGIE Z JEDNOTLIVÝCH SLOŽEK V ROCE 2010.....	44
TABULKA 5 HODNOTY TEPELNÉHO TOKU V RŮZNÝCH GEOLOGICKÝCH JEDNOTKÁCH ČR.....	49
TABULKA 6 PRŮMĚRNÁ TEPELNÁ VODIVOST HORNIN NĚKTERÝCH GEOLOGICKÝCH JEDNOTEK.....	50