



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta strojní
Ústav energetiky**

Energetické využití geotermální energie

Geothermal power plants

Bakalářská práce

Studijní program: TZSI

Studijní obor: -

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Bartoš, Ph.D.

Filip Adamec

Praha 2016



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní, Ústav energetiky

Technická 4, 166 07 Praha 6

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro: Filip ADAMEC

program: Teoretický základ strojního inženýrství

obor:

Název tématu: Energetické využití geotermální energie

Title: Geothermal power plants

Zásady pro vypracování:

Práce bude obsahovat:

1. rešerše a popis jednotlivých energetických cyklů používaných pro G.E.
2. popis způsobu získávání G.E. a problematika s tím spojená (chem. složení vody/páry)
3. pro zvolený G.E. zdroj navrhnout a zjednodušeně spočítat schéma výroby el. en.

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy:

Seznam odborné literatury:

Geothermal power plants, R. DiPippo

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Bartoš, Ph.D.

Konzultant/i:

Datum zadání bakalářské práce: 29. 4. 2016

Datum odevzdání bakalářské práce: 10. 6. 2016


Neodevzdá-li student/ka bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student/ka řádně neomluvil/a nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student/ka zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

Posluchač/ka bere na vědomí, že je povinen/povinna vypracovat bakalářskou nebo diplomovou práci samostatně bez cizí pomoci s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské nebo diplomové práci.

Zadání bakalářské práce převzal dne: 22. 4. 2016



student/ka



doc. Ing. Michal Kolovratník, CSc.
vedoucí Ú 12115





prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 29. 4. 2016

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

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Bartošovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Anotační list

Jméno autora	Filip Adamec
Název BP/DP	Energetické využití geotermální energie
Anglický název:	Geothermal power plants
Akademický rok:	2015/2016
Ústav/Odbor:	Ústav Energetiky
Vedoucí BP/DP:	Ing. Ondřej Bartoš, Ph.D.
Konzultant:	
Bibliografické údaje:	Počet stran: 43 Počet obrázků: 13 Počet tabulek: 4 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	Geotermální energie, geotermální elektrárny, binární cyklus, suchá pára, systém na mokrou páru s jednoduchou a dvojitou separací
Keyword:	Geothermal energy, geothermal power plants, flash cycle, hot dry rock, binary cycle, dry steam cycle
Anotace:	Tato bakalářská práce je zaměřena na využití geotermální energie a její problematiku při získávání elektrické energie. Popisuje jednotlivé typy geotermálních elektráren a jejich zdrojů. Dále porovnává podíl výroby elektrické energie geotermálního původu ve světě na celkové výrobě.
Abstract:	The bachelor thesis is focused on the usage of geothermal energy and types of geothermal power plants. There is a description of geothermal sources and geothermal power plants. This work is targetting on production of geothermal energy all over the world.

OBSAH

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1. GEOTERMÁLNÍ ENERGIE	11
1.1 PŮVOD GEOTERMÁLNÍ ENERGIE	11
1.2 HISTORIE A SOUČASNOST GEOTERMÁLNÍ ENERGIE	12
1.3 GEOTERMÁLNÍ VRTY.....	12
1.3.1 <i>Geotermální průzkum a vývoj vrtu</i>	12
1.3.1.1 Literární a mapovací průzkum.....	12
1.3.1.2 Geologický průzkum.....	13
1.3.1.3 Hydrologický průzkum.....	13
1.3.1.4 Geochemický průzkum	13
1.3.1.5 Geofyzikální průzkum.....	13
1.3.2 <i>Vhodnost vrtů</i>	13
1.3.2.1 Geotermický stupeň.....	14
1.3.2.2 Teplotní gradient.....	14
1.3.2.3 Tepelný tok.....	14
1.3.2.4 Tepelná vodivost hornin.....	15
2. GEOTERMÁLNÍ SYSTÉMY	17
2.1 HYDROTERMÁLNÍ SYSTÉMY	17
2.2 GEOTLAKOVÉ SYSTÉMY	17
2.3 SYSTÉMY HORKÝCH SUCHÝCH HORNIN.....	17
2.4 MAGMATICKÉ SYSTÉMY	18
3. GEOTERMÁLNÍ ELEKTRÁRNY	18
3.1 ROZDĚLENÍ PODLE PARAMETRŮ ZDROJE.....	18
3.1.1 <i>Systém na suchou páru</i>	18
3.1.2 <i>Systém na mokrou páru s jednoduchou separací</i>	19
3.1.2.1 Rozmístění potrubního systému	21
3.1.2.2 Tlakové ztráty.....	23
3.1.2.3 Systém přeměny energie	23
3.1.3 <i>Systém na mokrou páru s dvojitou separací</i>	23
3.1.4 <i>Binární systém</i>	25
3.1.5 <i>Kalinův systém</i>	26
3.2 GEOTERMÁLNÍ ELEKTRÁRNY VE SVĚTĚ	27
3.2.1 <i>The Geysers</i>	27
3.2.2 <i>Larderello Geothermal Complex</i>	28
3.2.3 <i>Cerro Prieto Geothermal Power Station</i>	29

3.2.4 Hellisheidi Geothermal Power Plant	30
3.2.5 Krafla Power station	30
3.3 NEVÝHODY GEOTERMÁLNÍ ENERGIE	31
3.4 GEOTERMÁLNÍ ELEKTRÁRNY V ČR MOŽNOSTI VYUŽITÍ	31
3.5 HODNOCENÍ GEOTERMÁLNÍHO POTENCIÁLU ČR DLE ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ	32
3.5.1 Tepelný tok v ČR	32
3.5.2 Tepelná vodivost hornin v ČR	33
3.5.3 Zdroje geotermální energie v ČR	33
3.5.3.1 Hydrotermální zdroje	33
3.5.3.2 Zdroje horké suché horniny	34
3.5.3.3 Zdroje rozdrcené suché horniny	35
3.5.4 Realizované geotermální projekty v ČR	35
3.6 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH ELEKTRÁREN PODLE SYSTÉMŮ VÝROBY ELEKTRINY	36
3.7 OVĚŘOVACÍ VÝPOČET PRO ZVOLENÉ GEOTERMÁLNÍ ELEKTRÁRNY	37
3.7.1 Kamojang	37
3.7.2 Larderello	38
3.7.3 The Geysers	39
3.7.4 Vyhodnocení vypočtených a zadaných hodnot	39
ZÁVĚR	40
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	41
SEZNAM OBRÁZKŮ	43
SEZNAM TABULEK	43

Seznam symbolů a zkratek

grad T	Tepelný gradient [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$]
λ	Součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
h.....	Entalpie [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
h_a	admisní entalpie [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
h_e	emisní entalpie [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
η_{TD}	Účinnost termodynamická [-]
\dot{m}	hmotnostní průtok [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
p.....	Tlak [Pa]
p_s	Saturační tlak
s.....	Entropie [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
Φ	Tepelný tok [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
T.....	Teplota [K]
t.....	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]
P.....	Výkon [W]

Úvod

Tato práce si dává za cíl shrnout poznatky z problematiky geotermální energie a zjistit možnosti využití geotermální energie ve světě a v České republice. Primárně je tato práce zaměřena na přeměnu geotermální energie na energii elektrickou, ale v této práci lze nalézt i zmínky o tepelné energii získané z geotermální energie. S ohledem na stále se opakující ropné krize a zvyšování energetické náročnosti, která je způsobena stále rostoucím počtem obyvatel, by mělo docházet ke zvyšování produkce energií za pomoci geotermálních elektráren.

Práce je rozdělena do tří hlavních oblastí. První oblast se zaměřuje na seznámení s pojmy v geotermální energetice a zaměření na její původ a vlastnosti. Dále se zaměřuje na způsob průzkumu výhodnosti vrtů na určitém území a jejich případnou vhodnost a vlastnosti potřebné k efektivnímu získávání geotermální energie. V druhé oblasti je práce zaměřena na geotermální systémy, které jsou využívány pro získávání energie ze Země. Třetí oblast se soustředí na rozdělení podle původu zdroje a systémy na výrobu elektrické energie v geotermálních elektrárnách. Další část je zaměřena na největší geotermální elektrárny ve světě jejich umístění, vlastnosti, výkon a případnou problematiku při získávání energií. A dále zde jsou vyjmenovány možnosti využití v ČR a vhodné lokality k tomu účelu. Na závěr práce je porovnání, seznam a ověřovací výpočet elektráren po celém světě a jejich vlastností.

1. Geotermální energie

Jedná se o energii obnovitelnou, čistou a oproti elektrárnám na fosilní paliva ekologicky nenáročnou. Geotermální energie by se dala zařadit mezi alternativní zdroje energie společně s energiemi solární, větrnou a energií vyrobenou spalováním biomasy. [14]

1.1 Původ geotermální energie

Geotermální energie má svůj původ v energii z tepla zemského jádra, které vzniká radioaktivním rozpadem izotopů v zemském magmatu. Rezervoáry hornin jsou nasyceny nejčastěji kapalinou, která skýtá potenciál ke vzniku zdroje energie. Nárůst teploty je o 3°C každých 100 m směrem k jádru Země od povrchu. Geotermální energie je rozmístěna velmi nahodile po celé Zemi a její projevy jsou převážně vyvěrající sopky, gejzíry nebo vroucí prameny vody.

Prvotně je geotermální energie rozprostřena v zemské kůře a k jejímu využití je nutné znát vlastnosti vody nebo páry. Dochází k nahromadění geotermální energie do jednoho prostoru neboli do geotermálního rezervoáru. Vzhledem k vlastnostem studené sestupující meteorické vody a teplé ohřáté stoupající vody jsme schopni docílit pohybu vody nebo páry v rezervoáru. Podstatný vliv na vytváření geotermální energie v rezervoáru mají pórovitost (poróznost) a propustnost (permeabilita) hornin.

Samozřejmě v obou těchto případech dochází k ovlivnění v pohybu a akumulaci tepelné energie vody a páry okolním prostředím rezervoáru, který je závislým na případné otevřenosti nebo uzavřenosti geologických a hydrogeologických struktur. [10]

Vnější část Země tvoří zemská kůra, která se dále dělí na mocnější kontinentální a méně mocný oceánský typ.

	Km od povrchu Země	Skupenství	Hustota	Teplota °C
Vnitřní jádro	6370-4980	pevné	12 g.cm ⁻³	4000-4700
Vnější jádro	4980-2900	kapalné	10 g.cm ⁻³	3500-4000
Spodní plášť	2900-600	pevné příp. plastické	5,5 g.cm ⁻³	1000-3500
Svrchní plášť	600-25	pevné příp. plastické	3,5 g.cm ⁻³	pod 1000
Oceánská kůra	12-6	pevné	3 g.cm ⁻³	pod 1000
Kůra	70-0	pevné	2,7 g.cm ⁻³	pod 1000

Tab. 1 Rozložení jednotlivých zemských sfér [14]

1.2 Historie a současnost geotermální energie

Již od starého Říma byla tato energie využívána ke koupelím a lázeňským potřebám nejen v Itálii, ale i dnešním Německu, Francii, Španělsku, Řecku a Turecku. Od roku 1888 byla využívána geotermální energie na vytápění skleníků na Islandu, kde postupně celé hlavní město Reykjavík bylo vytápěné právě geotermální energií.

V roce 1827 Ital Francesco Larderel navrhl možnosti zpracování přehřáté páry ze sopečné činnosti v Toskáně. To je považováno za úplně první využití geotermální energie v průmyslu na světě. V roce 1904 na tom samém místě jako F. Larderel rozsvítil Ital Piero Ginori Conti 5 žárovek za pomoci energie z přírodního tepla Země.



První sestavená geotermální elektrárna (Itálie) Zdroj obrázků: [1]

Jedním z impulsů ke zvýšení zájmu o geotermální energii bylo několik ropných krizí v průběhu 20. století a oprávněné obavy o vyčerpání zdrojů fosilních paliv. Největší rozvoj zažívá v současné době, to převážně díky snaze o snížení emisí oxidu uhličitého, změnám v globálním klimatu a celkovém oteplování planety Země. Dle odhadů se v zemské kůře nachází teplo, které by vystačilo pokrýt produkci tepla na přinejmenším 100 000 let. [1][14]

1.3 Geotermální vrty

1.3.1 Geotermální průzkum a vývoj vrtu

Geotermální průzkum obsahuje spektrum činností začínaje identifikací perspektivních geotermálních oblastí a konče úspěšným vyvrtáním prvního produkčního vrtu. Hlavním cílem průzkumu je objevení místa s co největším entalpickým tokem v co nejnížší hloubce od povrchu Země a zároveň s adekvátní permeabilitou hornin vzhledem k vyšší výhodnosti realizovatelného vrtu.

Samotný výzkumný program by měl obsahovat několik fází. Každá úspěšná fáze výzkumu navazuje na další a ovlivňuje ji. Typický zjednodušený výzkum obsahuje 5 fází:

1.3.1.1 Literární a mapovací průzkum

Sbírání, sestavování existujících dat a vykonání předběžného výzkumu za použití geografického informačního systému. U potenciálně vytipovaných oblastí dochází k

vymezení případných logistických, politických, environmentálních a sociálních záležitostí, které by mohly bránit dalšímu výzkumu a zároveň dochází k mapování prostředí s ohledem na případnou výstavbu vrtů. Tento literární průzkum napomáhá k lepšímu porozumění danému území s ohledem na strukturu podloží a tepelný tok. [3] [4]

1.3.1.2 Geologický průzkum

Obsahuje environmentální povolení, geologické mapování, rozbor geochemického složení vody a plynu. Lze z něj získat tektonické a stratosférické vlastnosti místa, zlomy, věk a strukturu vulkanických hornin.

Zavedením podpovrchové sondy zkoumáme teploty v podloží. Jedná se o nejlevnější způsob jak zjistit potenciál daného místa. Sonda je zavedena zhruba do hloubky kolem dvou metrů do země. [3] [4]

1.3.1.3 Hydrologický průzkum

V hydrologickém průzkumu daného místa se dostáváme ke zjišťování meteorologických dat, teploty a průtoku teplých a studených pramenů, chemické analýze pramenů a pohybu vody a její množství v podloží a na povrchu. [3] [4]

1.3.1.4 Geochemický průzkum

Zde dochází k vyvrtávání hloubkových vrtů, které mají dosáhnout geotermálního rezervoáru v podloží. Po vyvrtání jsou kontrolovány a zaznamenávány hodnoty teploty, tlaku a tepelného toku v rezervoáru. Na základě těchto hodnot je následně určena uskutečnitelnost a rozměr zdroje, což pomáhá k následnému výběru a projektování designu a kapacity geotermální elektrárny. [3] [4]

1.3.1.5. Geofyzikální průzkum

Tento průzkum je založen na aplikaci principů mechaniky, termiky a elektřiny k rozpoznání a charakterizaci geotermálních systémů. Jedná se o poslední část výzkumu před samotnou realizací vrtných prací. Napomáhá nám zjistit vhodné místo k umístění vrtů a navazují na předcházející průzkumy.

Získáváme díky němu kompletní informace o tepelném toku, teplotnímu gradientu, elektrickou rezistivitu, hustotu hornin, magnetickou citlivost a místní gravitační zrychlení. [3] [4]

1.3.2 Vhodnost vrtů

Pro zjišťování vhodnosti zemského povrchu ke geotermálním vrtům potřebujeme znát geofyzikální vlastnosti daného místa a rozdělení vrstev Země. Země je složena

z jádra vnějšího a vnitřního, na které navazuje plášť, který je rozdělen na spodní a svrchní.

Základní vlastnosti tepelného pole Země: geotermální stupeň, teplotní gradient (grad T), hustota tepelného toku (q), tepelná vodivost hornin (k) [1] [14]

1.3.2.1 Geotermický stupeň

Jedná se o počet metrů, které je nutné sestoupit pod povrch Země, aby teplota stoupla o 1°C. U geotermického stupně je podstatné tzv. neutrální pásmo blízko povrchu, kde nedochází ke změně tepla z důvodu vnějších vlivů na povrch. Výzkumy ukázaly, že průměrný geotermický stupeň je 33 m, což znamená, že ve stometrové hloubce je změna teploty 3°C. V případě tisíce metrů se jedná o 30°C. Nicméně se jedná o hodnotu průměrnou, která nemusí vždy odpovídat danému místu. U tektonicky aktivních oblastí může hodnota dosahovat až 5 m na 1°C (Sicílie). [1] [14]

1.3.2.2 Teplotní gradient

Teplotní gradient je definován jako vertikální gradient teploty v zemské kůře. Nabývá hodnot od 0,01 až 0,1°C na metr hloubky. [1] [14]

Hloubka pod povrchem	Teplota ve °C	
	uprostřed kontinentu	uprostřed oceánu
50 km	500	750
100 km	750	1100
200 km	1100	1600
300 km	1200	1650
400 km	1400	1750

Tab. 2 Růst teploty s hloubkou v kontinentální a oceánské kůře [14]

1.3.2.3 Tepelný tok

Tepelný tok Φ je vyjadřován jako množství tepla, které projde jednotkou plochy za jednotku času. Je vyjadřován v jednotkách $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$. Jedná se o velmi podstatnou informaci, která nám určuje jednak hledisko využití geotermální energie, ale také geofyzikální a geologické poznatky o zkoumaném místě.

Rozmezí hodnot tepelného toku na Zemi se nachází mezi 30 - 120 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$. Za předpokladu, že průměrná hodnota tepelného toku pro celou Zemi je 50 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$, dojdeme k závěru, že ze zemského povrchu dochází k úniku cca 0,25 milionů MW, což je pro srovnání asi 10x méně, než je schopno dodat Slunce Zemi.

Nejvyšší tepelný tok v České republice lze objevit v oblastech severozápadní části Českého masivu např. v Karlových Varech, na Teplicku nebo v okolí Cínovce, kde hodnoty mohou dosahovat až $100 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$. [1] [14]

1.3.2.4 Tepelná vodivost hornin

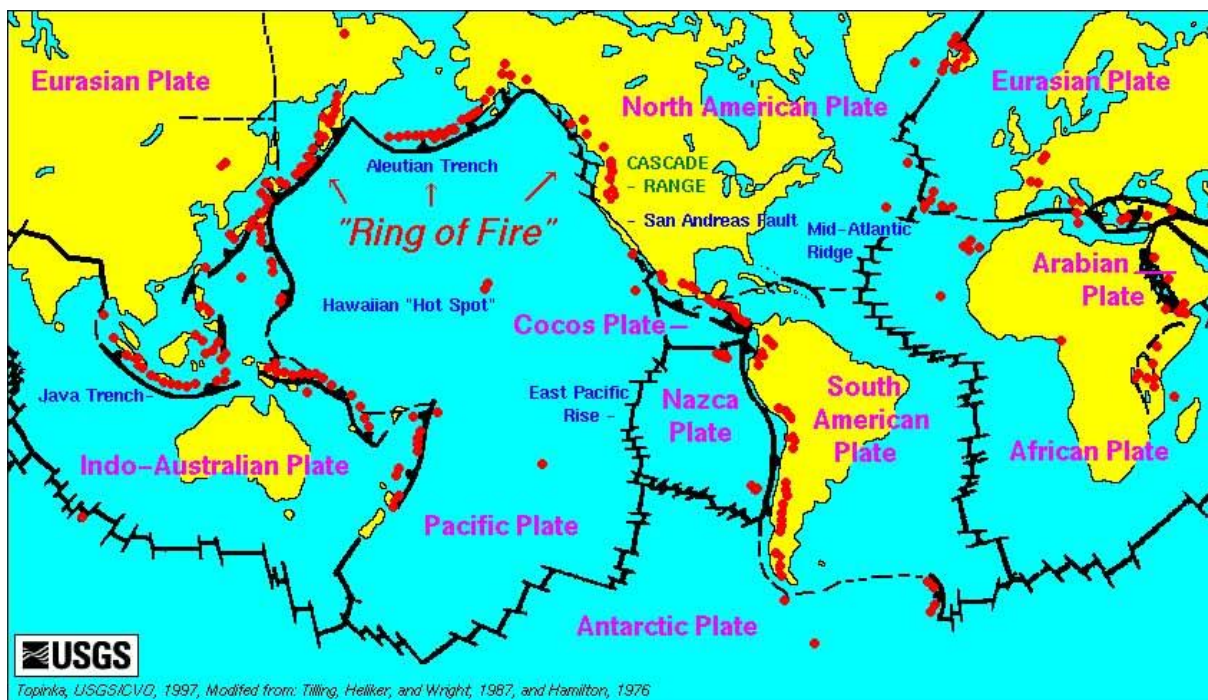
Velmi podstatná vlastnost hornin, která udává rozvrstvení teplot v zemské kůře. Vodivost je závislá na obsahu vody, porózitě, na struktuře a na tepelné vodivosti jednotlivých horninotvorných minerálů.

Nejvyšší tepelná vodivost hornin v ČR je v karpatské předhlubni průměrně $2,86 \text{ Wm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a také v Jeseníkách, které dosahují tepelné vodivosti $2,82 \text{ Wm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Existují dva způsoby využití geotermální energie, jedním z nich je vytápění a druhým je výroba elektrické energie. Elektrická energie z geotermálních zdrojů vzniká přeměnou tepelné energie páry na mechanickou práci rotoru turbíny, která je následně převedena na energii elektrickou.

Geotermální energie je nejvýhodněji využitelná na území tektonických zlomů litosférických desek Země, na kterých dochází k časté vulkanické a tektonické činnosti.

[1] [14]



Výhodná místa na Zemi k využití na geotermální energii Zdroj obrázku: [2]

Země	Instalovaná kapacita 2014 [MWe]	Výroba elektřiny v roce 2012 [GWh]	Podíl na výrobě elektřiny 2012 [%]
Spojené státy americké	3442	15562	0,35
Filipíny	1904	9934	15,05
Indonésie	1333	10556	6,11
Mexiko	1005	5792	2,09
Itálie	901	8768	3,06
Nový Zéland	895	6015	14,02
Island	664	4974	28,93
Japonsko	537	2917	0,3
Turecko	275	850	0,37
Keňa	237	1518	19,93
Kostarika	208	1473	14,9
Salvador	204	1525	25,45
Nikaragua	104	550	15,63
Rusko	97	505	0,05
Papua-Nová Guinea	56	400	12,03
Guatemala	42	271	3,24

ostatní	>30	>250	-
---------	-----	------	---

Tab. 3 Tabulka instalované kapacity geotermální energie v porovnání s celkový podílem na výrobě elektřiny [6]

2. Geotermální systémy

K získávání tepla Země přes fluida (plyny, vodní pára, podzemní voda) jsou využívány tyto systémy.

2.1 Hydrotermální systémy

Tyto systémy jsou vázány na geologické či hydrogeologické struktury, kde vodičem zemského tepla je buď suchá pára, nebo horká voda. Dochází ke vzniku rezervoárů, které mohou být buď uzavřené, nebo otevřené. U uzavřeného rezervoáru je za potřeby injektovat ochlazenou vodu zpět, aby nedošlo ke snižování kapacity v průběhu času. Podle teploty vody v rezervoárech jsou systémy rozděleny na systémy o vysoké teplotě (teplota je více než 100°C), o střední teplotě (40 až 100°C) a o nízké teplotě (25 až 40°C).

Využití v ČR je na české křídové pánvi v Děčíně a Ústí nad Labem s rozmezím teplot 32-35°C. Další projekt ve fázi přípravy se nachází na Moravě o teplotách 50-70 °C. Například na Islandu je tímto systémem vytápěno 90% všech domů v zemi. [1] [14]

2.2 Geotlakové systémy

Jde o pánevní struktury s mocnou sedimentární výplní a s existencí řady napjatých termálních rezervoárů. [1] [12]

2.3 Systémy horkých suchých hornin

V určité hloubce pod povrchem Země se nacházejí horniny téměř suché a nepropustné pro tekutiny. Díky tlaku v těchto hloubkách nedochází ke vzniku pórů a větších dutin a díky umělému vytvoření prostor pod povrchem vznikají tepelné výměníky. Voda je zde pod velkým tlakem a ten ji udržuje jako přehřátou kapalinou. Pohybem kapaliny dochází k ohřívání o okolní horniny a takto ohřátá voda se následně vytahuje do povrchového výměníku, kde se za sníženého tlaku přeměňuje na přehřátou páru.

Nejvhodnější teplota výměníku je kolem 150°C. Z důvodu maximální využitelnosti probíhá společně s výrobou elektrické energie i využívání zbytkového tepla k vytápění. Tyto systémy se rozdělují ještě na systémy s přídavným teplem a bez přídavného tepla. Přídavné teplo bývá realizováno teplem nukleárního původu.

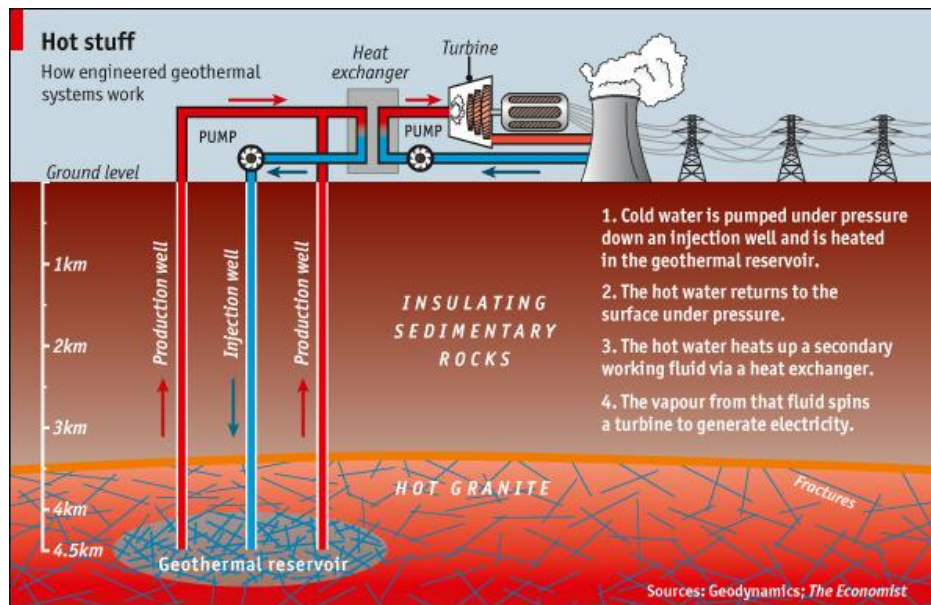


Schéma systému horkých suchých hornin Zdroj obrázku: [3]

Mezi výhody patří obrovský energetický potenciál v podstatě kdekoli na světě, zanedbatelná produkce oxidu uhličitého a jiných škodlivých plynů a kapalin. Mezi nevýhody by jistě patřila obrovská plocha výměníku (řádově desítky km²) a vlačování kolem 100 litrů vody za sekundu zpět při tlaku až 40 MPa. Mezi systém horkých suchých hornin se také řadí systém rozpukané teplé horniny. [1] [14]

2.4 Magmatické systémy

V těchto systémech dochází k makroseizmickým pohybům vlivem mělce uložených roztavených magmatických těles. [1] [12]

3. Geotermální elektrárny

3.1 Rozdělení podle parametrů zdroje

Jedná se o více pohledů na dělení geotermálních elektráren. První variantou je nakládání se zbytkovým teplem, které zůstává nevyužité v mokré páře. Pára může být injektována zpět do rezervoáru nebo využita na zpracování v teplárně nebo vypouštěna do atmosféry. Druhou variantou je dělení podle entalpie geotermální vody. Voda s vysokou entalpií je využívána v parních elektrárnách, zatímco zdroje s nízkou entalpií v okruhových elektrárnách.

3.1.1 Systém na suchou páru

Výroba elektrické energie probíhá přímo za pomoci suché páry vycházející z vrtů, která roztáčí lopatky turbíny. Mechanická energie je přenesena na generátor a zde se mění energie mechanická na energii elektrickou. Suchá pára, která projde přes turbínu,

putuje do kondenzátoru, kde se mění na vodu, která je vstříkována zpátky do geotermálního ložiska. Jedná se o nejefektivnější způsob získávání elektrické energie.

Elektrárna na suchou páru byla prvním typem geotermální elektrárny na světě, která získala komerční statut. Jedná se o jednodušší a levnější variantu, oproti systému na mokrou páru se separací. Snazším způsobem se zde předchází usazování solí a minerálů z geotermálních vrtů. Ačkoliv se jedná o nejjednodušší způsob získávání geotermální energie, na celém světě byly nalezeny pouze pár větších rezervoárů na suchou páru.

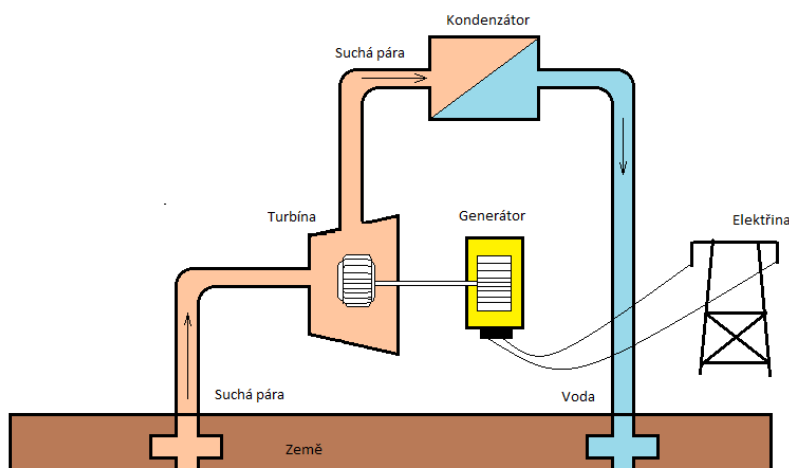


Schéma systému na suchou páru

Rezervoáru na suchou páru obsahuje trhliny v pórovité hornině, která je nepropustná nebo propojená s další trhlinou naplněnou suchou párou. Pára také obsahuje oxid uhličitý, sirovodík, metan a stopové množství dalších prvků. V tomto zásobníku je velmi málo nebo vůbec žádné množství vody. Došlo se k závěru, že pára v rezervoárech má buď magmatický, nebo meteorický původ. U první z variant pára prošla pomalým vývojem z magmatických komor umístěných ve velkých hloubkách a při působení velmi vysokých teplot blížících se roztavené hornině. Druhá varianta vychází z předpokladu, že dešťová voda prosakovala skrz zlomy až do velké hloubky, kde se setkala s horninou o vysokých teplotách.

Jeden z rezervoárů na suchou páru se nachází v Kalifornii v komplexu zvaném The Geysers a druhý leží v Itálii na místě Larderello v Toskánsku. Obě tyto geotermální elektrárny se svou kapacitou 2471 MW mají podíl téměř 26% na celkové geotermální celosvětově instalované kapacitě. [3]

3.1.2 Systém na mokrou páru s jednoduchou separací

Systém na mokrou páru s jednoduchou separací je z typů geotermálních elektráren nejrozšířenější na celém světě. Jako vstupní médium se používá voda o teplotách vyšších než 160°C, nebo mokrá pára. Nachází se zde separátor pracující jako cyklonový odlučovač, zároveň může pracovat jako de-mineralizátor vody.

Tento typ bývá první instalovanou elektrárnou na místě nového nálezu vodu obsahujícího geotermálního pole. Následně je dle potřeby doplňována dalšími typy ke zvýšení výtěžnosti a efektivnosti vrtu. Typ elektráren na mokrou páru s jednoduchou separací je zastoupen 32% ze všech geotermálních elektráren na celém světě (k roku 2007). Tyto elektrárny dosahují rozsahu výkonu 3 - 90 MW. Samozřejmě dochází ke spojení více systémů na mokrou páru s jednoduchou separací dohromady, díky čemuž se zvyšuje kapacita jednotlivých elektráren.

Geotermální zdroj produkuje směs páry a vody, elektrárna se systémem na morkou páru s jednoduchou separací je jeden z nejjednodušších způsobů jak přeměnit geotermální energii na elektřinu, nicméně ne příliš efektivní. V první fázi je směs rozdělena na páru a na vodu, aniž by došlo ke ztrátě většího množství tlaku. Tato činnost je prováděná v cylindrické cyklonové tlakové nádobě, která je obvykle orientována vertikálně, kde tyto dvě části směsi jsou odděleny vzhledem k jejich podstatně odlišnému rozdílu hustoty.

Typická 30 MW geotermální elektrárna potřebuje 5-6 produkčních vrtů a 2-3 vstříkovací vrtů. Jednou z možností jak získávat potřebné látky z vrtů je ta, že systém potrubí musí nabírat geotermální kapalinu z produkčního vrtu a přenášet jí do elektrárny k dalšímu čištění. [3]

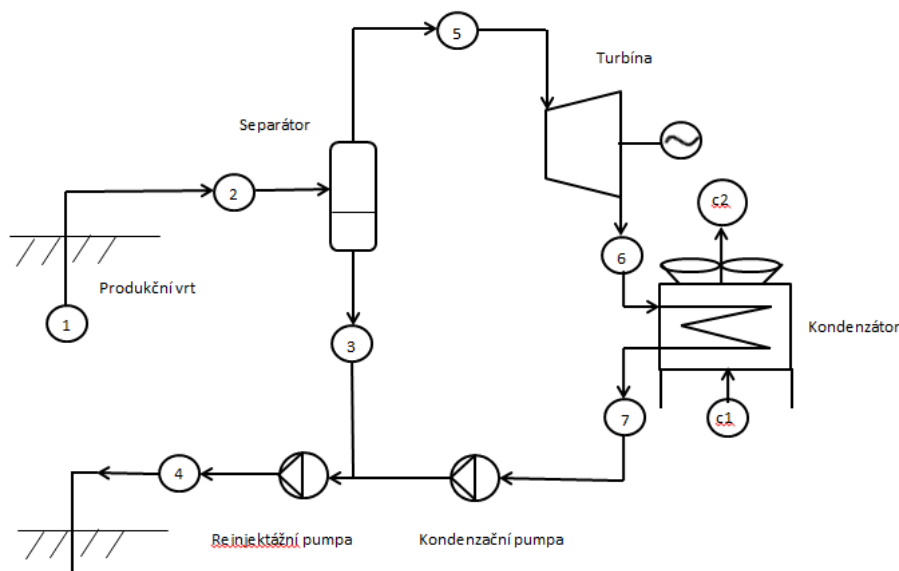
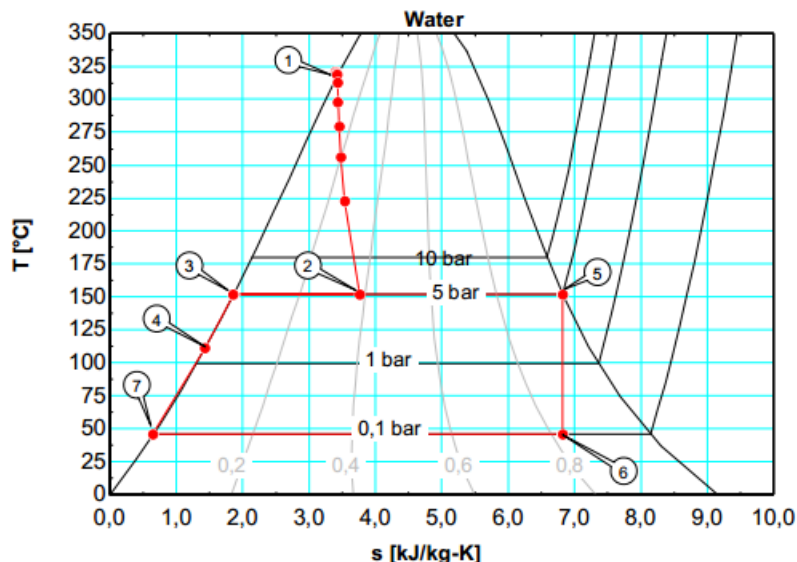


Schéma systému s jednoduchou separací [16]



T-s diagram systému na mokrou páru s jednoduchou separací [16]

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 pn), 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 dochází k expanzi 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.

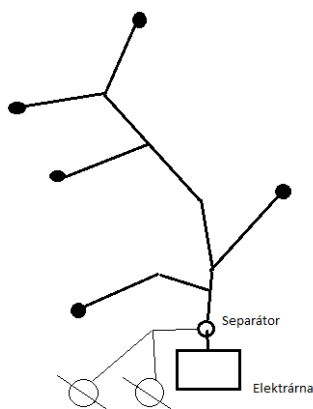
Kondenzovaná voda (bod **7**) je dále kondenzátorovým čerpadlem vedena k re-injektážímu čerpadlu, zde je smíchána s minerální vodou oddělenou separátorem (bod **3**). Směs kondenzované a separované minerální vody je re-injektáží čerpadlem vrácena do geotermálního zdroje, kde je opět přehřívána.

Body vyznačené v grafech se shodují se stavy, kterými pracovní látka prochází v pracovním cyklu.

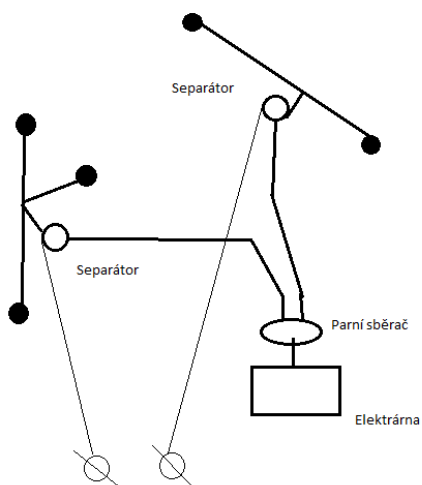
Elektrárny tohoto provedení jsou například v Dixie Valley v Nevadě či Cosu v Kalifornii. [12]

3.1.2.1 Rozmístění potrubního systému

Separátory mohou být umístěny v elektrárně nebo v okrajových stanicích na geotermálním poli nebo na ústí pramenu. [3]



Dvoufázový nabírací systém se separátorem součástí elektrárny [3]



Nabírací systém se separátory na okraji geotermálního pole[3]

Dvoufázový nabírací systém ukazuje 5 produkčních pramenů, které přivádí dvoufázovou tekutinu do velkého cyklonového odlučovače v elektrárně. Ty jsou následně rozděleny na páru, která dále putuje do turbíny, a vodu, která se za pomoci vstříkovacích vrtů vrací zpět do země.

Nabírací systém se separátory na okraji pole popisuje uspořádání, ve kterém jsou produkční prameny spojeny do dvou satelitních odlučovacích stanic umístěných na geotermálním poli. Pára z odlučovačů putuje do geotermální elektrárny ve dvou potrubích, která se střetávají v parním kolektoru. Oddělená tekutina proudí ze satelitů do dvou vstříkovacích pramenů. Tento typ uspořádání je použit v elektrárně v Miravalles v Kostarice.

Třetí možnost uspořádání popisuje uspořádání, kde součástí všech produkčních vrtů jsou odlučovače. U této varianty je nutné, aby měl každý svůj produkční vrt své vlastní potrubí. Oddělená voda putuje z odlučovačů zpět do vstříkovacích vrtů, kudy je navracena zpět do země k opětovnému využití. Tento typ je využit například v Ahuachapánu v Salvadoru. [3]

3.1.2.2 Tlakové ztráty

Hlavní snahou při návrhu uspořádání dané geotermální elektrárny a jejích vrtů je minimalizace tlakových ztrát při přenosu potrubím z vrtu do geotermální elektrárny. Tlaková ztráta je závislá na délce a uspořádání potrubního systému, hustotě a hmotnostnímu toku dané páry. Ke snížení tlakových ztrát může pomoci zvětšení průměru potrubí na úkor vyšší ekonomické náročnosti daného řešení.

Tlakové ztráty v dvoufázovém potrubí se skládají z poklesu tlaku třením (viskózní efekt), z gravitačního tlakového poklesu a z tlakového poklesu od zrychlení. [3]

3.1.2.3 Systém přeměny energie

Jedná se o systém na mokrou páru s jednoduchou separací, kdy dochází k jednoduchému oběhu. Je to proces přeměny stlačené vody na směs vody a páry, což je výsledkem snižování tlaku geotermální kapaliny pod saturační tlak související s bodem varu kapaliny. [3]

3.1.3 Systém na mokrou páru s dvojitou separací

Změna oproti systému na mokrou páru je v tom, že se do soustavy přidá nízkotlaký separátor, díky němuž jsme schopni dosáhnout vyšší účinnosti než u systému s jednoduchou separací. Kde je využit i zbytek minerální vody, který odchází z vysokotlakého separátoru. Odcházející voda z vysokotlakého separátoru má stále teplotu a tlak, které mohou být využity. Tato voda následně přechází do prostředí s nižším tlakem a tím dochází k přeměně na páru o nižším tlaku. Tato pára z druhého separátoru putuje do sekundárního vstupu turbíny. [12]

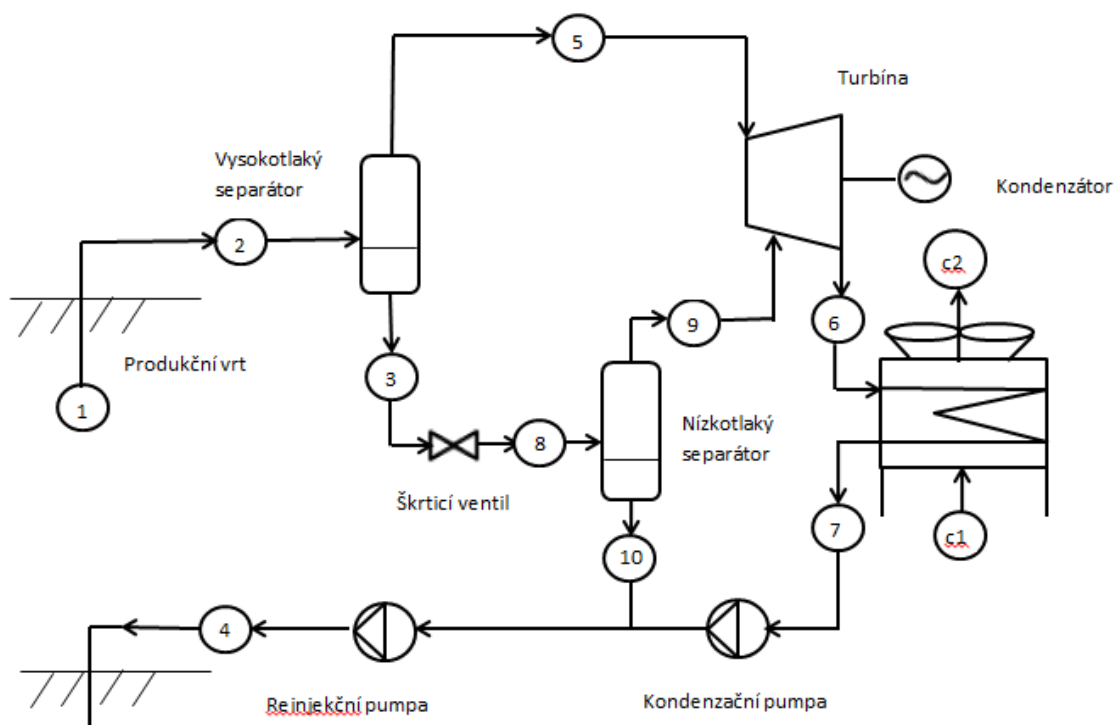
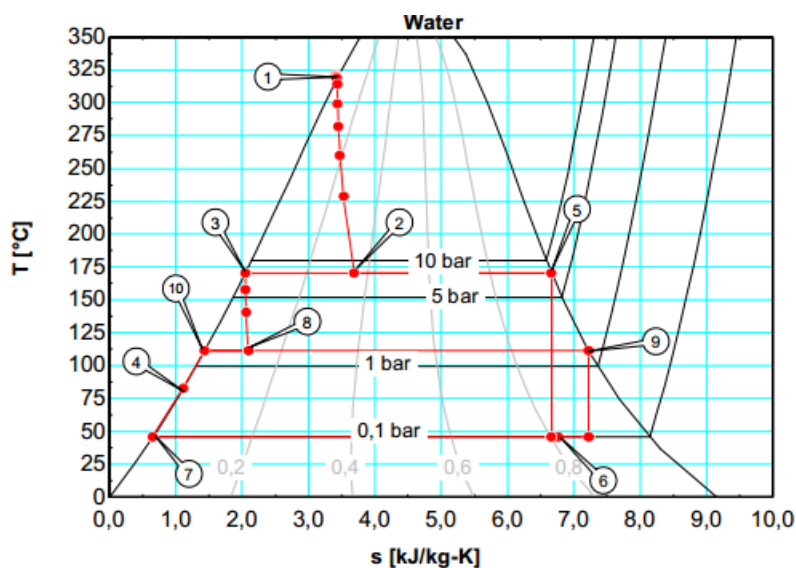


Schéma systému na mokrou páru s dvojitou separací [16]



T-s diagram systému na mokrou páru s dvojitou separací [16]

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 kondenzátor. Voda ochlazená kondenzátorem je tlačena kondenzačním čerpadlem k čerpadlu re-injektážímu (7). Zde je smíšena s minerální vodou oddělenou nízkotlakým separátorem (10). Tato směs je re-injektována (4) do podzemního rezervoáru kde je opět přihřívána. Z T-s diagramu je patrné, že oblast ohraničená červenou křivkou je větší, díky čemuž jednoznačně poznáme zvýšení vykonané práce pracovním médiem. T-s diagram popisuje přesné stavy, kterými prochází voda z vrtů během výroby elektrické energie v elektrárně. [12]

3.1.4 Binární systém

Binární systém vznikl roku 1912 v Larderellu v Itálii. Je také nazýván jako „nepřímý okruh“. Pára z geotermálních vrtů byla dopravena příliš znečištěná rozpuštěnými plyny a minerály na to, aby mohla projít efektivně parní turbínou. Prošla tepelným výměníkem, zde došlo k varu vody, kde vzniklá pára roztočila turbínu.

U binárního principu se používá chladnější voda oproti systémům na mokrou páru se separací nebo systému na suchou páru, čímž se zvyšuje výtěžnost vrtů a snižují se nároky na geotermální rezervoár.

Vroucí voda ohřívá organickou kapalinu v uzavřeném okruhu, která má výrazně nižší bod varu než voda. U organické kapaliny (např. propan, isobutan, freon) dochází k přeměně na páru, která rozpohybuje lopatky turbíny generátoru. Tento systém pracuje s vyšší účinností než výše zmiňované systémy, dále jsou podstatně nižší nároky na kvalitu a dostupnost geotermálních rezervoárů.

Jednou z výhod je úsporný systém hospodaření s vodou a zbytky zkondenzované páry, při němž dochází k návratu vody a páry do rezervoáru k opětovnému použití, čímž se zvyšuje trvanlivost geotermálního pramenu.

Volba systému při stavbě nové geotermální elektrárny závisí na druhu geotermálního pramenu, na kvalitě vody a páry na daném území, na teplotě a hloubce daného rezervoáru. [3]

3.1.5 Kalinův systém

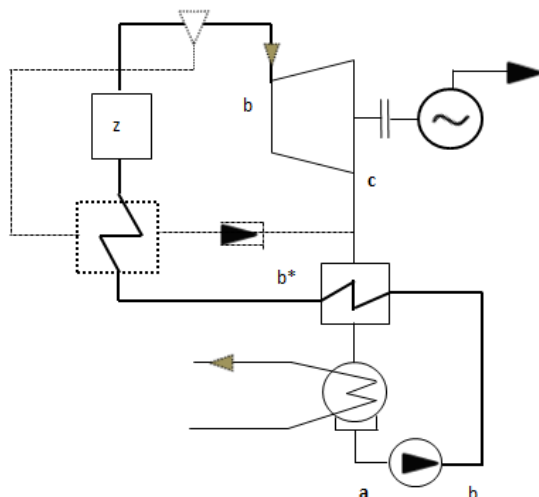
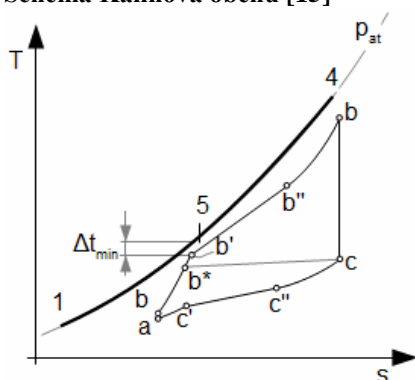


Schéma Kalinova oběhu [15]



T-s diagram Kalinova oběhu [15]

Přesný tvar T-s diagramu roztoku $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ (počáteční teplota vypařování a teplota ukončení výparu) závisí na poměru jednotlivých složek roztoku, který musí být optimalizován pro konkrétní aplikaci, respektive maximální teplotu a teplotní spád.

Kalinův oběh by sice dosahoval lepšího vychlazení spalin v paroplynovém oběhu v jednotlakovém uspořádání než klasický parní oběh, ale celé zařízení by bylo technologicky velmi složité a nákladné. Dalším omezením je vliv čpavku na lidský organismus, při vdechování může dojít k poškození plic i smrti. Při velkých výkonech spalovacích turbíny by objem amoniaku v parním, respektive Kalinovu oběhu byl mnohatunový, což by mělo velké nároky na bezpečnost. Proto se tyto oběhy používají pouze pro využití nízko-potenciálního odpadního tepla malých výkonů (např. odpadní teplo či geotermální energie).

Tento roztok může mít také teplotu kondenzace hluboko pod $0\text{ }^\circ\text{C}$ (kvůli podílu čpavku) a proto se používá jako absorpční chladicí oběh, který využívá stejné směsi (používají se ale i roztoky jiných látek). Ze stejných důvodů se používá Kalinův oběh i u geotermálních elektráren v chladných oblastech s velmi nízkou okolní teplotou a tím

oběh může dosáhnout vyšší účinnosti než parní oběh s vodou, u které je teplota kondenzace vysoko nad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. [15]

3.2 Geotermální elektrárny ve světě

Z mapy je zřejmé, že geotermální elektrárny jsou umístěny převážně v blízkosti tektonických zlomů nejvíce v tzv. ohňovém prstenci.



Mapa umístění geotermálních elektráren ve světě Zdroj obrázku: [4]

3.2.1 The Geysers



The Geysers geotermální elektrárna (USA - Kalifornie) Zdroj obrázku: [5]

The Geysers Geothermal Complex je geotermální pole v Kalifornii, ve Spojených státech amerických, v Maycamském pohoří, přibližně 115 km severně od San Franciska. Je to největší geotermální pole o rozloze přibližně 80 kilometrů čtverečných, obsahující

23 geotermálních elektráren v jedné oblasti s instalovanou kapacitou pohybující se kolem 2000 MW.

The Geysers je zároveň první místem ve Spojených státech amerických, kde byla spuštěna do provozu první komerční geotermální elektrárna na suchou páru. Aktuální počet geotermálních elektráren v chodu je 18, které jsou schopny vytvořit energii o velikosti až 1500 MW. [3][8]

První zmínka o snaze prozkoumat The Geysers je z období dvacátých let 20. století, nicméně tento projekt byl odložen z důvodu nedostupnosti dostatečně kvalitních materiálů na potrubní systém a turbíny. Druhý projekt v tomto místě odstartoval v padesátých letech 20. století. V této době proběhla řada výzkumů a studií, které vyvrcholily vrtnými pracemi, díky kterým bylo možné spustit v roce 1960 první geotermální elektrárnu. Na konci osmdesátých let 20. století bylo zjištěno, že průtok páry procházející geotermálními elektrárnami se snížil, a proto došlo k odstavení nejméně efektivních elektráren z celého komplexu, čímž se snížil celkový výkon.

V současné době je v této oblasti vyvrtáno více než 500 vrtů na suchou páru. Nejhlubší z vrtů mají až 3 kilometry. V severní a severozápadní části byl objeven rezervoár s velmi vysokou teplotou až 300°C, bohužel pára z něj byla příliš přehřátá, kyselá a obsahovala velké množství chlorovodíku, který způsoboval velkou korozi. [3]

3.2.2 Larderello Geothermal Complex



Larderello geotermální elektrárna (Itálie) Zdroj obrázku: [6]

Geotermální komplex Larderello v Itálii je vzdálen přibližně 100 km jihozápadně od Florencie. Je to nejstarší geotermální elektrárna na světě, připojena do sítě byla roku 1914. Výkon této elektrárny byl 250 kW. Za druhé světové války byla zničena. Po válce byla postavena nová elektrárna. [3]

Geotermální pole se rozkládá na rozloze 400 km², které se skládá z 34 elektráren s maximálním výkonem 550 MW, díky tomu se řadí mezi největší geotermální elektrárny na světě. Elektrina produkovaná z geotermálních zdrojů je soustředěna do oblasti Toskánska v centrální Itálii. Výkon tohoto komplexu se rovná 10% geotermální energie vyrobené celosvětově a zajišťuje 27% veškerých energetických potřeb regionu. [3][8]

3.2.3 Cerro Prieto Geothermal Power Station



Cerro Prieto geotermální elektrárna (Mexiko) Zdroj obrázku: [7]

Nachází se na severu Mexika přibližně 30 km jižně od hranic se Spojenými státy americkými. Mexická geotermální elektrárna je se svými 720 MW instalované kapacity jedna z nejvýkonnější geotermálních elektráren na světě. Postupně ovšem dochází ke snižování kapacity až na současných 570 MW z důvodu nedostatku páry. Je složena ze 4 bloků obsahujících 13 jednotek. První z nich byla postavena v roce 1973 a poslední, čtvrtá, v roce 2000.

Komplex obsahuje přibližně 140 produkčních vrtů a 13 injektážních vrtů. O získávání elektrické energie se starají 4 kondenzační turbíny o výkonu 110 MW, 4 turbíny na mokrou páru s dvojitou separací, 9 turbín na mokrou páru s jednoduchou separací, kde 4 z nich mají výkon 37,5 MW, 4 mají výkon 25 MW a poslední z nich o výkonu 30 MW. Pátý blok je nyní ve výstavbě a měl by se sestávat ze dvou 50 MW turbín. [3][7]

3.2.4 Hellisheidi Geothermal Power Plant



Hellisheidi geotermální elektrárna (Island) Zdroj obrázku: [8]

Nachází se 20 km východně od hlavního města Reykjavíku. Jedná se o největší geotermální elektrárnu na Islandu s 303 MW kapacitou na výrobu elektrické energie a 133 MW tepelné energie. Jedná se o vysokoentpický systém, který kombinuje výrobu geotermálního tepla a elektrické energie. Největší množství elektrické energie jde do nedaleké hliníkárny a energie tepla do hlavního města k vyhřívání chodníků a domů.

Stavba elektrárny začala po roce 2000 a její první fáze byla dokončena a schválena k provozu v roce 2006. Schvalování probíhalo v pěti fázích až do roku 2011. Bylo vykopáno 61 vrtů v hloubce 1000-2200 metrů, z toho 30 produkčních a 17 reinjektážních vrtů. Elektrárna se skládá z 6 vysokotlakých turbín a jedné nízkotlaké. Je plánováno její další rozšiřování v následujících letech na získávání tepla o 266 MW tepelné energie. [5]

3.2.5 Krafla Power station



Krafla geotermální elektrárna (Island) Zdroj obrázku: [9]

Tato elektrárna je umístěna na severovýchodě Islandu, západně od města Akureyri. Jedná se o elektrárnu o výkonu 60 MW, který obstarávají dvě 30 MW turbíny. Stavba elektrárny byla umístěna ve vulkanickém komplexu a začala již v roce 1974 a k připojení došlo v srpnu roku 1977. Jednalo se o velmi průkopnický projekt, který byl ovšem omezován vulkanickou aktivitou a technologické komplikace způsobily, že nedošlo k výraznějšímu rozšíření. Až v roce došlo k opravě poničených vrtů a přidáním druhé turbíny se zvýšil výkon na stávajících 60 MW. [13]

3.3 Nevýhody geotermální energie

V této kapitole bych se rád zaměřil na nevýhody a problémy geotermální energie. Jednou z nevýhod jsou vysoké investiční náklady na stavbu elektrárny, především hloubkových vrtů na tvorbu puklin metodou horkých suchých hornin. Cena vrtací hlavičky se pohybuje kolem 1 600 000 Kč, která má ve své struktuře diamanty, a je nutná její výměna každých 100 metrů vrtu. Hlavní ekonomickým aspektem je cena zkušebních vrtů, u kterých navíc není jistá jejich vhodnost na výrobu energie. [10]

Může docházet z důvodu narušení podzemních struktur k drobným zemětřesením (nejvyšší naměřené bylo 3,4 RichtEROVY stupnice), jinak je většina zemětřesení sotva znatelná. S tím souvisí vysoké nároky na stavbu, která odolá případným zemětřesením. Dále je potřeba nalezení vhodné lokality k výrobě elektrické energie s ohledem na podzemní strukturu a také teplotní gradient. [12]

Další nevýhodou je nejistota v geologických podmínkách, budeme-li schopni vytvořit dostatečně velký tepelný výměník. Nastávají také problémy s příměsemi v horké vodě z vrtů, která je silně mineralizována, a to má za následek časté zanášení a následnou výměnu technologických zařízení (potrubí, čištění systému) a s tím spojené snížení efektivity získávání energie. [9]

Konkrétním problémem, který se vyskytl ve Spojených státech amerických v geotermální elektrárně v The Geysers, je vysoký výskyt hydrogensulfidu. Dlouhodobý výskyt osob v přítomnosti tohoto plynu může mít negativní dopady na lidský organismus. Mohou nastat případy, kdy může dojít ke kontaminaci spodních vod. [3]

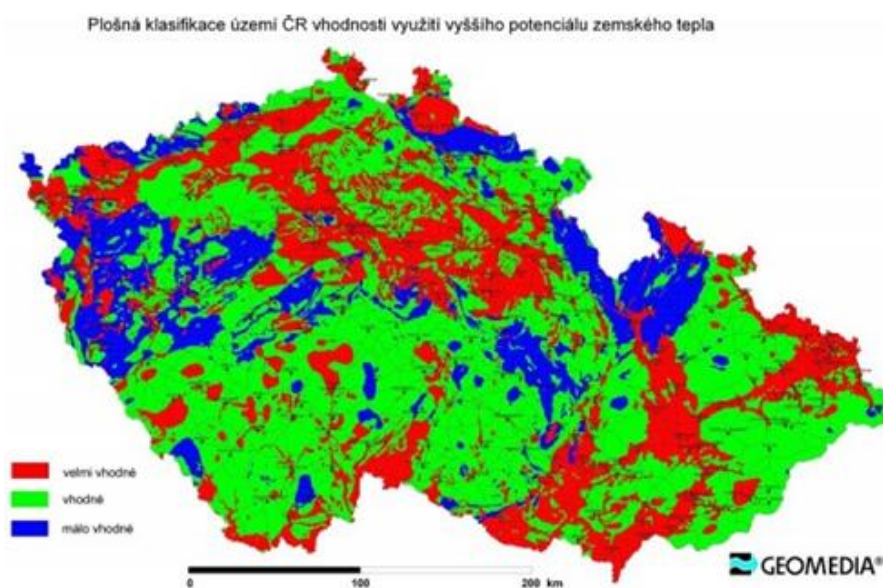
3.4 Geotermální elektrárny v ČR možnosti využití

V České republice je využití geotermálních elektráren jednoznačně možné, nachází se zde zlomy ve větší hloubce. Je zde také malá mocnost pevninské kůry a malá nadmořská výška. V Českém masivu je přítomna zvýšená radioaktivita. Důsledkem vzniku radioaktivity je tvorba tepla.

Místa s použitelnými parametry pro geotermální elektrárnu jsou například ohářecký rift, Doupovské vrchy, Železné hory, Ústí nad Labem, Děčín, České středohoří a mnohá další. [1] [14]

3.5 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. Návratnost na našem území i přes vysoké prvotní finanční nároky by se měla pohybovat kolem 7 let. [1] [14]



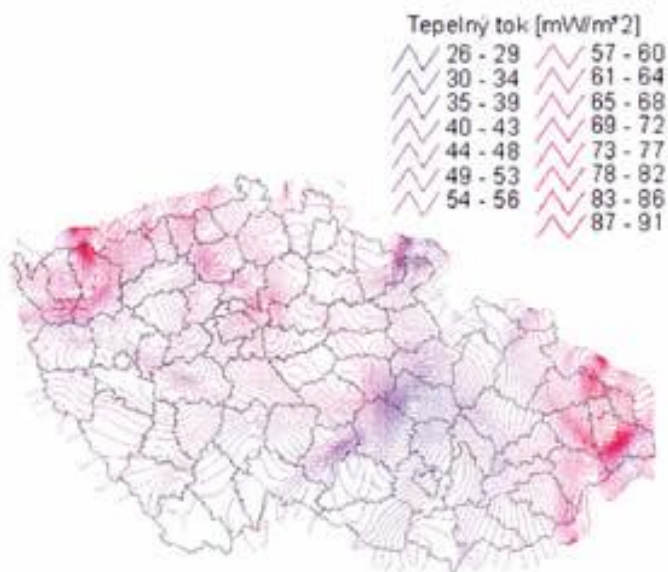
Potenciál zemského tepla v ČR Zdroj obrázku: [10]

3.5.1 Tepelný tok v ČR

Množství tepelného toku je ovlivněno druhem hornin, tloušťkou zemské kůry a vulkanickou aktivitou. V nejstabilnějších částech se silnější zemskou kůrou (až 36 km), které se nacházejí v jižní a střední části Českého masivu jsou hodnoty tepelného toku nejnižší. Jsou to především oblasti stabilní části Českého masivu v jižních Čechách, na Moravě (moravská část Českého masivu a Moldanubikum) a také v Jeseníkách.

V okrajových částech Českého masivu a oblastech hlubinných zlomů, které jimi procházejí, jsou hodnoty vyšší. V České republice se tepelný tok pohybuje kolem 64 mWm^{-2} . Nejvyšších hodnot dosahují lokality v severní části západních Čech (Krušné hory, Oherský prolom, saxoturingikum). [1] [14]

Tepelný tok na území ČR



Izočáry tepelného toku v ČR (vhodnost ke geotermálnímu využití) Zdroj obrázku: [11]

3.5.2 Tepelná vodivost hornin v ČR

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.

V oblasti Českého masivu se jedná o oblasti Jeseníků, karpatské předhlubně a ostravsko-karvinské pánve. [1] [14]

3.5.3 Zdroje geotermální energie v ČR

3.5.3.1 Hydrotermální zdroje

Hydrotermální zdroje v rezervoárech je možné najít v České republice převážně v severních Čechách, hlavně v oblasti Děčínska. Teplota spodních vod zde dosahuje teploty 32 až 35°C.

V Děčíně je energie v podzemním jezeře, z něhož vytéká přirozeným přetlakem na povrch voda, která má teplotu 30°C. Z jezera je voda zchlazena a dá se využít jako pitná. V teplárně dochází k zahřívání této vody na 90°C, které probíhá za pomoci kotle na zemní plyn. Není to tedy případ čistého využití geotermální energie, nicméně jeho výhodnost spočívá v náhradě stávající spalovny na hnědé uhlí a mazut za geotermální teplárnu. Dochází tak ke snížení CO₂ v ovzduší a zlevnění cen tepla pro místní obyvatele. Cena teplárny se vyšplhala na 550 miliónů korun. Teplárna na geotermální energii je zde v provozu od roku 2002. Instalovaný výkon je 42,72 MW tepelné energie vyráběných s využitím geotermální energie a 2,75MW elektrické energie produkovaných plynovými motory. [1] [10] [14]

VÝROBA TEPLA V GEOTERMÁLNÍ TEPLárnĚ DĚČÍN

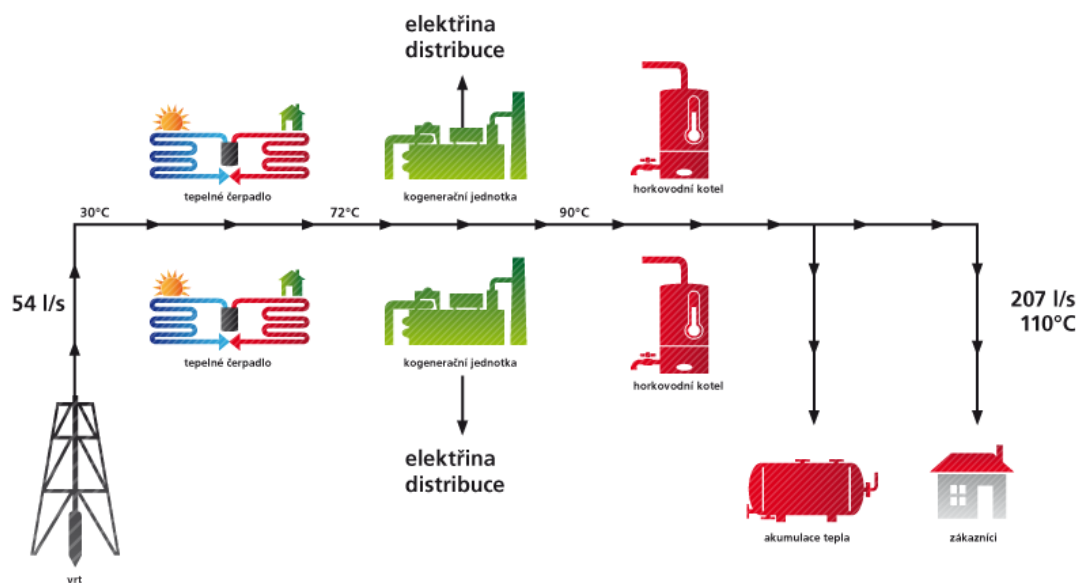


Schéma výroby tepla v teplárně Děčín od vrtu k zákazníkovi Zdroj obrázku: [12]



Teplárna v Děčíně Zdroj obrázku: [13]

Další vhodnou lokalitou s rezervoáry jsou karpatské předhlubně a sedimenty vídeňské pánve. Teplota moravských rezervoárů se pohybuje mezi 50 a 70°C. [1] [14]

3.5.3.2 Zdroje horké suché horniny

Získávání geotermální energie metodou horkých suchých hornin je proveditelné v podstatě v celé České republice. Využitelnost daného místa lze poznat z velikosti tepelného toku. Platí, že čím vyšší tepelný tok, tím je větší šance na získání většího tepla ze země a z menších hloubek. V těchto oblastech se systémy horkých suchých hornin využívají pro výstavbu tepláren, ve kterých se kombinuje elektrárna binárního systému s

tepelnými čerpadly. Lokality, které nejsou tak vhodné, se dají využít jako zdroje tepelné energie – výtopny pro části měst, obce, nebo průmyslová zařízení.

Pro systém horkých suchých hornin je průměrná hloubka, která je ideální k využití na našem území, v rozmezí 3,5 - 5 km, kde se teplota pohybuje na 200°C. [1][14]

3.5.3.3 Zdroje rozdrčené suché horniny

Rozdrčená suchá hornina se v České republice vyskytuje převážně v okolí Karlových Varů, projevem jsou minerální a proplyněné vody zdejších pramenů. Teplota karlovarského vřídla se pohybuje kolem 72°C. V masivu České republiky je tedy nejvhodnějším zdrojem geotermální energie systém horkých suchých hornin. Systémy rozdrčené suché horniny jsou vázány na lázeňské účely a jsou v České republice ojedinělé. [1] [14]

3.5.4 Realizované geotermální projekty v ČR

V České republice v současnosti není v provozu žádná geotermální elektrárna. Nejbližší realizaci a produkci elektřiny společně s teplem jsou v dnešní době v Litoměřicích, kde by měly být vybudovány dva zkušební vrty (konec roku 2017) a proběhne vyhodnocování měření a výhodnosti místa. V okolí Litoměřic je ideální místo vzhledem k tomu, že se zde potkávají dva tektonické zlomy. Z toho vyplývá, že se v tom místě nachází i sálavé teplo z magmatických vrstev z větších hloubek, což má za následek větší využitelnost daného místa. Navíc se zde nachází permokarbonské sedimenty, které izolují žulové podloží, díky nimž teplo neuniká tolik k povrchu země. Aktuálně největším problémem je vysoká finanční náročnost výstavby geotermální elektrárny, která by se při dokončení projektu měla pohybovat někde kolem 2,5 miliardy korun a její návratnost je odhadována na 25-30 let.

Geotermální elektrárna měla být instalována také v Liberci, projekt byl ovšem zastaven pro malou ziskovost. Podobně výhodná místa ke stavbě elektrárny by měla být v oblastech Kadaně, Mělníka, Nové Paky, Chomutova a Kroměříže. Jediný realizovaný projekt v České republice je výše zmiňovaná teplárna v Děčíně v ulici Benešovské. [2] [10] [11]

3.6 Porovnání jednotlivých elektráren podle systémů výroby elektřiny

Systém	Geotermální pole	Stát	Inst. kapacita P [MWe]	hmotnostní průtok m [t/h]	Entalpie h [kJ/kg]
<i>Suchá pára</i>					
	The Geysers	USA	1529	6950	2650
	Larderello	Itálie	542	3060	2770
	Travale/Radicondili	Itálie	160	1080	2793
	Java	Indonésie	140	1086	2792
<i>Jednoduchá separace</i>					
	Gunung Salak	Indonésie	330	11520	1149
	Leyte (Mahanagdong)	Filipíny	198	3958	1482
	Southern Negros	Filipíny	192,5	3500	1450
	Los Azufres	Mexiko	185	2184	2030
	Cerro Prieto (CP-1, Unit 1- 4)	Mexiko	150	1300	1396
	BacMan	Filipíny	150	2590	1990
	Miravalles	Kostarika	144	5634	1107
	Berlin	Salvador	100	2790	1270
<i>Dvojitá separace</i>					
	Makiling-Banahaw	Filipíny	330	3942	1910
	Cerro Prieto (CP-2)	Mexiko	220	5821	1442
	Cerro Prieto (CP-3)	Mexiko	220	4550	1519
	Hellisheidi	Island	210	5679	1365
	Leyte (Tongonan I)	Filipíny	112,5	1389	1750
	Oita (hatchobaru)	Japonsko	110	2556	1125
	Krafla	Island	60	986	1825

<i>Binární</i>					
	California-Casa Diablo	USA	40	3240	741
	Nevada-Washoe	USA	35,1	6120	676
	California-Heber (Heber2)	USA	33	3266	702
	Te Huka	Nový Zéland	24	750	1086
	California-East Mesa (Ormesa 1)	USA	24	2652	619
	Makiling-Banahaw (Binary 1, 2, 3, 4)	Filipíny	15,73	800	750
	Ribeira Grabde	Portugal	13	452	1100
	Idaho (Raft River)	USA	13	1440	589

Tab. 4 Porovnání elektráren podle systémů výroby elektřiny [8]

3.7 Ověřovací výpočet pro zvolené geotermální elektrárny

Kontrola a výpočet instalované kapacity udávané u zvolených zdrojů. K výpočtu přistupujeme jako ke kvalifikovanému odhadu nikoliv k přesnému řešení geotermálního zdroje.

3.7.1 Kamojang

Vstupní hodnoty: $T = 162^{\circ}\text{C}$, $p_a = 6,5 \text{ bar}$, $h = 2792 \text{ kJ/kg}$,

inst. kapacita $P = 140 \text{ MW}$

Výpočet: Po zjištění vstupních hodnot jsme získali hodnoty entalpie admisní díky zadané teplotě a tlaku na vstupu. Za pomoci doplňku Xsteam pro Microsoft Excel jsme získali veškeré hodnoty potřebné k výpočtu.

admisní entalpie $h_a = 2759,63 \text{ kJ/kg}$

entropie $s = 6,732 \text{ kJ/kg.K}$

saturační tlak při teplotě $(30+13)^{\circ}\text{C}$ $p_s = 0,0865 \text{ bar}$

termodynamická účinnost $\eta_{td} = 0,8$

celková účinnost $\eta_{celk} = 0,95$

emisní entalpie $h_e = 2114,89 \text{ kJ/kg}$

hmotnostní průtok $\dot{m} = 1086 \text{ t/hod}$

$$h_{e \text{ skutečná}} = h_a - (h_a - h_e) * \eta_{td} = 2759,63 - (2759,63 - 2114,89) * 0,8$$

$$h_{e \text{ skutečná}} = 2243,83 \text{ kJ/kg}$$

$$P_{\text{vypočtené}} = (h_a - h_{e \text{ skutečná}}) * \dot{m} * \eta_{\text{celk}} = (2759,63 - 2243,83) * \frac{1086}{3,6} * 0,95$$

$$P_{\text{vypočtené}} = 147 \text{ MW} \Rightarrow |140 - 147| = 7 \text{ MW}$$

Rozdíl v udávané a vypočtené hodnotě výkonu je 7 MW.

3.7.2 Larderello

Vstupní hodnoty: $T = 198^\circ\text{C}$, $p_a = 6,5 \text{ bar}$, $h = 2770 \text{ kJ/kg}$,

inst. kapacita $P = 542 \text{ MW}$

Výpočet: Po zjištění vstupních hodnot jsme získali hodnoty entalpie admisní díky zadané teplotě a tlaku na vstupu. Za pomoci doplňku Xsteam pro Microsoft Excel jsme získali veškeré hodnoty potřebné k výpočtu.

admisní entalpie $h_a = 2843,55 \text{ kJ/kg}$

entropie $s = 6,917 \text{ kJ/kg.K}$

saturační tlak při teplotě $(30+13)^\circ\text{C}$ $p_s = 0,0865 \text{ bar}$

termodynamická účinnost $\eta_{td} = 0,8$

celková účinnost $\eta_{\text{celk}} = 0,95$

emisní entalpie $h_e = 2173,51 \text{ kJ/kg}$

hmotnostní průtok $\dot{m} = 3060 \text{ t/hod}$

$$h_{e \text{ skutečná}} = h_a - (h_a - h_e) * \eta_{td} = 2843,55 - (2843,55 - 2173,51) * 0,8$$

$$h_{e \text{ skutečná}} = 2307,51 \text{ kJ/kg}$$

$$P_{\text{vypočtené}} = (h_a - h_{e \text{ skutečná}}) * \dot{m} * \eta_{\text{celk}} = (2843,55 - 2307,51) * \frac{3060}{3,6} * 0,95$$

$$P_{\text{vypočtené}} = 433 \text{ MW} \Rightarrow 542 - 433 = 109 \text{ MW}$$

Rozdíl v udávané a vypočtené hodnotě výkonu je 109 MW.

3.7.3 The Geysers

Vstupní hodnoty: $T = 182,2^{\circ}\text{C}$, $p_a = 6,897 \text{ bar}$, $h = 2650 \text{ kJ/kg}$,

inst. kapacita $P = 1529 \text{ MW}$

Výpočet: Po zjištění vstupních hodnot jsme získali hodnoty entalpie admisní díky zadané teplotě a tlaku na vstupu. Za pomoci doplňku Xsteam pro Microsoft Excel jsme získali veškeré hodnoty potřebné k výpočtu.

admisní entalpie $h_a = 2805,22 \text{ kJ/kg}$

entropie $s = 6,809 \text{ kJ/kg.K}$

saturační tlak při teplotě $(30+13)^{\circ}\text{C}$ $p_s = 0,0865 \text{ bar}$

termodynamická účinnost $\eta_{td} = 0,8$

celková účinnost $\eta_{celk} = 0,95$

emisní entalpie $h_e = 2139,04 \text{ kJ/kg}$

hmotnostní průtok $\dot{m} = 6950 \text{ t/hod}$

$$h_{e \text{ skutečná}} = h_a - (h_a - h_e) * \eta_{td} = 2805,22 - (2805,22 - 2139,04) * 0,8$$

$$h_{e \text{ skutečná}} = 2272,28 \text{ kJ/kg}$$

$$P_{\text{vypočtené}} = (h_a - h_{e \text{ skutečná}}) * \dot{m} * \eta_{celk} = (2805,22 - 2272,28) * \frac{6950}{3,6} * 0,95$$

$$P_{\text{vypočtené}} = 977 \text{ MW} \Rightarrow 1529 - 977 = 551 \text{ MW}$$

Rozdíl v udávané a vypočtené hodnotě výkonu je 551 MW.

3.7.4 Vyhodnocení vypočtených a zadaných hodnot

Z rozdílu vypočtených a udávaných hodnot je zřejmé, že udávané hodnoty v literatuře nemusí vzájemně korespondovat s ověřovacím výpočtem a je třeba každý jednotlivý zdroj na základě uvedených hodnot pro tento ověřovací výpočet přezkontrolovat. V tomto výpočtu se potvrzuje, že se nejedná o přesné řešení, ale spíše o kvalifikovaný odhad. Rozdíly mohou být velmi velké, ale v některých případech také téměř bezvýznamné. Uvedené hodnoty je zapotřebí vždy důkladně analyzovat, protože zde dochází ke značným rozdílům v porovnání ověřovacího výpočtu a udávaných hodnot.

Závěr

Hlavní cíl této bakalářské práce byl zhodnocení využití geotermální energie ve světě a případné možnosti a realizace v ČR, kterým předcházela charakterizace jednotlivých systémů na získávání energie ze Země.

Potenciál geotermální energie na Zemi je obrovský a v současné době jeho využití je velmi nízké s ohledem na množství energie ukryté pod zemským povrchem. S ohledem na opakující se ropné krize, zvětšování populace a její energetické náročnosti lze vyvodit, že je nezbytně nutné tento potenciál geotermální energie začít využívat ve větším množství. Jelikož se jedná o energii získanou z obnovitelných zdrojů, v podstatě nevyčerpatelnou a oproti energii získané z fosilních paliv velmi ekologickou, tak se očekává rozšíření jejího využití. Za předpokladu dosažení hranice tohoto potenciálu ve svrchní části zemské kůry bychom mohli získat energii, která by postačila k pokrytí spotřeby celého lidstva až na 100 000 let.

Jednotlivé státy využívají svůj potenciál různě, např. Island využívá na pokrytí své energetické spotřeby až z 65 procent geotermální energii. Některé státy mají vysoký geotermální potenciál, ale bohužel kvůli jiným podmínkám je využití nemožné.

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] BLAŽKOVÁ, Miroslava. *Metodika k hodnocení geotermálního potenciálu v modelovém území Podkrušnohoří*. Ústí nad Labem: UJEP, Fakulta životního prostředí, 2010. Dostupné také z: http://prvnigeotermalni.cz/upload/4084e9a33cc28c0fe8e25501a8bcbc01/metodika_ujep_4.pdf

[2] BŘEŇOVÁ, Eva. *Jednou z priorit města je zvyšování energetických úspor*. 2015. Dostupné také z: <https://www.litomerice.cz/aktuality/2807-jednou-z-priorit-mesta-je-zvysovani-energetickych-uspor>

[3] DIPIPPPO, Ronald. *Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact*. 2nd ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2008. ISBN: 978-0-7506-86204.

[4] HANCE, Cédric Nathanaël. *Factors Affecting Costs of Geothermal Power Development* [online]. 2005. 5-12 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.geo-energy.org/reports/Factors%20Affecting%20Cost%20of%20Geothermal%20Power%20Development%20-%20August%202005.pdf>

[5] HALLGRÍMSDÓTTIR, Elín, Claus BALLZUS a Ongólfur HRÓLFSSON. *The Geothermal Power Plant at Hellisheidi, Iceland*. 2012. Dostupné také z: <http://pubs.geothermal-library.org/lib/grc/1030363.pdf>

[6] MATEK, Benjamin. *2014 Annual U.S. and Global Geothermal Power Production Report*. Geothermal Energy Association, 2014. Dostupné také z: <http://geo-energy.org/events/2014%20Annual%20US%20&%20Global%20Geothermal%20Power%20Production%20Report%20Final.pdf>

[7] MIRANDA-HERRERA, Carlos A. *Geothermal and Solar Energy in Cerro Prieto*. Melbourne, Australia, 2015. Dostupné také z: <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/26030.pdf>

[8] MOON, Hyungsul a Sadiq J. ZARROUK. *Efficiency of Geothermal Power Plants: A Worldwide Review* [online]. New Zealand: Department of Engineering Science, University of Auckland, 2012 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/NZGW/2012/46654final00097.pdf>

[9] MRÁZEK, Vojtěch. *Sílu geotermální energie v Česku zatím nikdo nevyužívá*. 2012. Dostupné také z: <http://www.prumysl.cz/silu-geotermalni-energie-v-cesku-zatim-nikdo-nevyuziva-brzy-by-se-to-vsak-mohlo-zmenit/>

[10] MVV Energie CZ a.s.: *Geotermální zdroj v Děčíně*, 2009 [on-line, cit. 2016-05-15]
Dostupné on-line: <<http://www.mvv.cz/geotermalni-zdroj-v-decine.html>>

[11] Nachtmanová, I. *Geotermální energie v ČR - Zapomenuté teplo z hlubin*: Ekolist.cz, 2005 [on-line, cit. 2016-05-15]. Dostupné online: <<http://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/geotermalni-energie-v-cr-zapomenute-teplo-z-hlubin>>.

[12] NEPRAŠ, Jiří. *Geotermální energie, geotermální elektrárny*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[13] PÁLSSON, Bjarni, Bjarni Már JÚLIUSSON a Árni GUNNARSSON. *Krafla Power Plant in Iceland: 27 Year of operation*. Landsvirkjun, Iceland, 2005. Dostupné také z: <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2005/1320.pdf>

[14] PLANETA: *GEOTERMÁLNÍ ENERGIE, Ekologická energie z hlubin Země - současné možnosti využívání*. Ministerstvo životního prostředí. 2007, ročník XV, č.4. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2007-. 6x - 12x ročně. ISSN: 1801-6898

[15] ŠKORPÍK, Jiří. Parní turbína v technologickém celku, *Transformační technologie*, 2011-04, [last updated 2016-03-08]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/parni-turbina-v-technologickem-celku.html>.

[16] VALDIMARSSON, Páll. *Geothermal power plant cycles and main components* [online]. , 1-5 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-12-35.pdf>.

Seznam obrázků

[1] **První sestavená geotermální elektrárna (Itálie)**

<http://www.reuk.co.uk/OtherImages/larderello-first-geothermal-electricity.jpg>

[2] **Výhodná místa na Zemi k využití na geotermální energii**

<http://www.crystalinks.com/rof.html>

[3] **Schéma systému horkých suchých hornin**

<http://www.cleanenergyworldnews.com/geothermal-energy/>

[4] **Mapa umístění geotermálních elektráren ve světě**

https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1kVn_quMo8uI18noPxbFEqK219gY&hl=en_US

[5] **The Geysers geotermální elektrárna (USA - Kalifornie)**

http://www.energy.ca.gov/tour/geysers/Geysers_3.jpg

[6] **Larderello geotermální elektrárna (Itálie)**

<http://www.swisseduc.ch/stromboli/perm-small/larderello/icons/larderello-13.jpg>

[7] **Cerro Prieto geotermální elektrárna (Mexiko)**

http://www.thinkgeoenergy.com/wp-content/uploads/2011/07/CerroPrieto_plant_Mexico.png

[8] **Hellisheidi geotermální elektrárna (Island)**

<https://shared.uoit.ca/shared/faculty-sites/sustainability-today/Images/Blog/hellisheidi-power-plant.jpg>

[9] **Krafla geotermální elektrárna (Island)**

<http://cdn.c.photoshelter.com/img-get/I0000Tyxm7Vbx6Rk/s/860/860/Krafla-Geothermal-Power-Station-Iceland.jpg>

[10] **Potenciál zemského tepla v ČR**

Geomédia

[11] **Izočáry tepelného toku v ČR (vhodnost ke geotermálnímu využití)**

Geomédia

[12] **Schéma výroby tepla v teplárně Děčín od vrtu ke koncovému zákazníkovi**

<http://www.mvv.cz/files/sluzby/teplo-1.png>

[13] **Teplárna v Děčíně**

http://termo.mvv.cz/files/11_Z_D.JPG

Seznam tabulek

Tab. 1 **Rozložení jednotlivých zemských sfér**

Tab. 2 **Růst teploty s hloubkou v kontinentální a oceánské kůře**

Tab. 3 **Tabulka instalované kapacity geotermální energie v porovnání s celkový podílem na výrobě elektřiny**

Tab. 4 **Porovnání jednotlivých elektráren podle systémů výroby elektřiny**