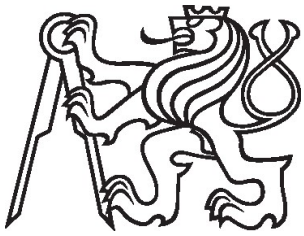
Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

Fakulta elektrotechnická

Energetické využití zdroje geotermální energie

Bc. Marek HOLEČEK

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Vít Klein, Ph.D.
2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Holeček** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **491873**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**

Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**

Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Energetické využití zdroje geotermální energie

Název diplomové práce anglicky:

Energy utilization of geothermal energy source

Pokyny pro vypracování:

1) Charakterizujte hlavní parametry využití geotermální energie v energetice.
2) Popište energetické využití zdrojů geotermální energie ve světě.
3) Popište energetický potenciál a využití geotermální energie v České republice.
4) Navrhněte projekt geotermálního zdroje v České republice a zpracujte jeho technicko – ekonomické vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

[1] BROŽ, Karel a Bořivoj ŠOUREK. Alternativní zdroje energie. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02802-X.
[2] DIPIPPO, Ronald. Geothermal power plants: principles, applications, case studies, and environmental impact. 3rd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-008-0982-06-9.
[3] DUFKA, Jaroslav. Vytápění netradičními zdroji tepla: biomasa – tepelná čerpadla solární systémy. Praha: BEN – technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-079-2.
[4] PETRÁŠ, Dušan. Nízkoteplotní vytápění a obnovitelné zdroje energie. Bratislava: Jaga, 2008. ISBN 978-80-8076-069-4.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D. katedra elektroenergetiky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **08.02.2024** Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **21.09.2025**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

. | Podpis studenta
Datum převzetí zadání

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 15. 8. 2024

Bc. Marek Holeček

Poděkování

Mé poděkování patří především vedoucímu práce Mgr. Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D., za vedení práce, věcné připomínky k práci, ale především za ochotu a trpělivost. Dále děkuji také své rodině a přátelům, kteří mě při vytváření této práce podpořili.

Bc. Marek Holeček

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá technologií geotermální energie. V první části práce je tato energie charakterizována a jsou popsány její parametry a výhody. V další části je představeno její možné energetické využití jako geotermálního zdroje energie ve světě. Je popsán energetický potenciál geotermální energie České republiky a jsou vysvětleny možnosti využití v národních geologických podmínkách. Ve druhé části práce je provedeno technicko – ekonomické vyhodnocení konkrétního projektu na území České republiky.

Klíčová slova

Geotermální energie, geotermální elektrárna, geotermální vrty, HDR, hydrotermální zdroje

Abstract

The thesis deals with geothermal energy technology. In the first part of the thesis this energy is characterized and its parameters and advantages are described. In the next part, its possible use as a geothermal energy source in the world is presented. The energy potential of geothermal energy of the Czech Republic is described and the possibilities of its use in national geological conditions are explained. In the second part of the thesis a technical and economic evaluation of a specific project in the Czech Republic is carried out.

Keywords

Geothermal energy, geothermal power plant, geothermal boreholes, HDR, hydrothermal resources

Obsah

1. Úvod 1

2. Charakteristika geotermální energie 3

2.1. Co je geotermální energie 3

2.2. Výhody / nevýhody 7

2.3. Vliv na životní prostředí 8

2.4. Současná podpora 10

2.5. Veličiny geotermální energie 11

2.6. Vrty 14

2.7. Typy geotermálních zdrojů 17

2.8. Typy generování elektřiny 20

2.8.1. Efektivita přeměny na elektřinu 27

2.9. Tepelná čerpadla 28

2.9.1. Princip tepelného čerpadla 28

2.9.2. Topný faktor 29

3. Energetické využití zdroje geotermální energie ve světě 33

3.1. Island 34

3.2. Itálie 39

3.3. Německo 41

3.4. Francie 43

3.5. USA 43

3.6. Slovensko 44

4. Energetický potenciál a využití geotermální energie v ČR 45

4.1. Momentální využití geotermální energie v ČR 46

4.2. Energetický potenciál geotermální energie v ČR 48

4.3. Plánované a nedokončené projekty v ČR 53

4.3.1. Litoměřice 53

4.3.2. Liberec 61

4.3.3. Děčín 61

4.3.4. ZOO v Ústí nad Labem 62

4.3.5. Semily 64

4.3.6. Praha – ČSOB – Československá obchodní banka, a. s. 64

5. Technicko–Ekonomické vyhodnocení konkrétního projektu v ČR 67
5.1. Technické informace – ZOO v Ústí nad Labem 67
5.2. Varianty projektu 69
5.2.1. Varianta 4 upravená pro realizaci 72
5.3. Ekonomické zpracování 73
5.3.1. Měřitelné ukazatele 74
5.4. Ekonomické vyhodnocení 77
5.4.1. Vyhodnocení původního projektu pomocí dat z roku 2006 77
5.4.2. Vyhodnocení reálného projektu 82
5.5. Technické vyhodnocení 84
6. Závěr 87
7. Seznam literatury a elektronických zdrojů 89
8. Seznam příloh 97

Obrázky

Obr. 2.1: Struktura Země 4
Obr. 2.2: Tepelný tok na území České republiky 13
Obr. 2.3: Vrták používaný při hloubení zkušebních vrtů 14
Obr. 2.4: Princip cirkulace vody 15
Obr. 2.5: Jednotlivé typy geotermálních zdrojů 19
Obr. 2.6: Schéma geotermální výtopny 20
Obr. 2.7: Princip suché páry *(Dry steam)* 21
Obr. 2.8: T-s diagram tepelného oběhu elektrárny fungující na principu *Dry steam* ... 22
Obr. 2.9: Princip Flash *(Flash steam)* 23
Obr. 2.10: T-s diagram tepelného oběhu elektrárny fungující na principu *Flash steam* 23
Obr. 2.11: Princip ORC *(Organic Rankine cycle)* 25
Obr. 2.12: T-s diagram tepelného oběhu elektrárny fungující na principu *OCR* 25
Obr. 2.13: Princip HDR *(Hot Dry Rocks)* 26
Obr. 2.14: Princip tepelného čerpadla 28
Obr. 2.15: Mapa teploty v hloubce 100 m pod povrchem České republiky 30
Obr. 3.1: Potenciál geotermální energie ve světě 34
Obr. 3.2: Vlevo vysokoteplotní a nízkoteplotní zóny na Islandu, vpravo nejaktivnější oblast 35
Obr. 3.3: Geotermální elektrárna Nesjavellir na jihu Islandu 37
Obr. 3.4: Elektrárna Nesjavellir schéma 38
Obr. 3.5: Geotermální elektrárna Larderello 40
Obr. 3.6: Larderello – krátery 40
Obr. 3.7: Teploty v Německu v hloubce 1 a 3 km 42
Obr. 4.1: Výskyt lázní a horkých pramenů v ČR 47
Obr. 4.2: Potenciál geotermální energie v Česku v hloubce 5000 metrů 50
Obr. 4.3: Potenciál geotermální energie v Česku v hloubce 5000 metrů s vrty 51
Obr. 4.4: Potenciál geotermální energie v Česku v hloubce 400 metrů s vrty 52
Obr. 4.5: Detail na plánovaný hlubinný vrt 5 km a mělké vrty Litoměřice 58
Obr. 4.6: Detail na plán kasárna Litoměřice 59

Obr. 4.7: Potenciál geotermální energie Litoměřice, červeně označený vrt v kasárnách 60
Obr. 4.8: Schéma vytápění ZOO v Ústí nad Labem 63
Obr. 5.1: Areál ZOO v Ústí nad Labem 67

Tabulky

Tab. 3.1: Státy s největší instalovanou kapacitou výroby elektřiny z geotermální energie 33
Tab. 5.1: Souhrnná energetická bilance ZOO v Ústí nad Labem 68
Tab. 5.2: Energetická bilance jednotlivých variant ZOO v Ústí nad Labem..... 70
Tab. 5.3: Tabulka emisí variant v ZOO v Ústí nad Labem..... 71
Tab. 5.4: Tabulka Ekonomického vyhodnocení variant v ZOO v Ústí nad Labem 77
Tab. 5.5: Tabulka Ekonomické vyhodnocení Tebotin v ZOO v Ústí nad Labem 80
Tab. 5.6: Tabulka Ekonomické vyhodnocení variant pro delší dobu životnosti projektu 81
Tab. 5.7: Tabulka Ekonomické vyhodnocení reálné varianty 82
Tab. 5.8: Tabulka Ekonomické vyhodnocení reálné varianty, delší doba životnosti projektu 83

Grafy

Graf 5.1: Graf energetické bilance v ZOO v Ústí nad Labem 70
Graf 5.2: Graf celkové úspory nakoupené energie v ZOO v Ústí nad Labem 71
Graf 5.3: Graf varianty V2 – Peněžní tok diskontovaný 78
Graf 5.4: Graf varianty V2 – Peněžní tok diskontovaný detail 79
Graf 5.5: Graf varianty V2 – Peněžní tok kumulovaný diskontovaný 79

Seznam zkratek

CCF	Cumulative Cashflow, kumulovaný tok hotovosti
CF	Cashflow, Tok hotovosti
COP	Coefficient of Performance, topný faktor
CZT	Centrální zásobování teplem
ČGS	Česká geologická služba
ČR	Česká republika
ČSOB	Československá obchodní banka, a. s.
EGS	Enhanced Geothermal Systems
HDR	Hot Dry Rock, teplo ze suchých hornin
HFR	Hot Fractured Rock, teplo rozpraskaných hornin
HWR	Hot Wet Rock, teplo vlhkých hornin
IRR	Vnitřní výnosové procento
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
NPV	Současná čistá hodnota
ORC	Organic Rankine Cycle, binární cyklus
TČ	Tepelné čerpadlo
Ts	Prostá doba návratnosti
Tsd	Diskontovaná doba návratnosti
TV	Teplá voda
ZOO	Zoologická zahrada

1. Úvod

Termín geotermální energie provází lidstvo už tisíce let. Historie využívání geotermální energie vede až do starověkého Říma, kde přírodní teplá voda sloužila k vytápění termálních lázní. Staří řečtí filozofové psali o „podzemním ohni“. V Číně, Japonsku i na Blízkém východě využívaly termální prameny. V Evropě je zdokumentován tento způsob využití v dnešním Německu, Francii, Španělsku, Řecku, Turecku a v Anglii. [1] První z případů průmyslového využití geotermální energie je návrh Francesca Lardelela z roku 1927. Ten v Toskánsku v Itálii přišel s myšlenkou využití přehřáté páry z fumarol, výronů vodních par a plynů jako projev vulkanické činnosti,[2] k výrobě kyseliny borité.

Fumarola je dodnes jedním z nejdůležitějších prvků využívání geotermální energie. Nalezneme je například v italské oblasti Flegrejských polí a na ostrově Vulcano. V USA je známý Yellowstonský národní park, ve kterém je více než 4 000 fumarol. Na Aljašce po erupci sopky Novarupta v roce 1912 vzniklo mnoho fumarol, které však postupem času přestaly být aktivní.[3] Fumarola je totiž aktivní pouze tak dlouho, dokud má tepelný zdroj, který ji napájí teplými plyny a párou. V Evropě jsou ale nejvíce zastoupené a známé zejména fumaroly na Islandu.

Už od roku 1888 používali Islanďané teplou vodu k vytápění skleníků a od roku 1928 začalo hlavní město Reykjavík postupně získávat teplo z geotermálních zdrojů. Reykjavík je hlavní město Islandu, leží na severu ostrova, žije zde 62 % obyvatelstva Islandu a patří mezi nejčistší města na světě. Název Reykjavík totiž znamená doslova „zátoka dýmu“, to odkazuje na množství vodní páry vycházející z termálních pramenů v okolí. Celé město je vytápěno podzemní teplou vodou s teplotou okolo 80 °C. V městě mají také vyhřívané chodníky a hlavní silnice, v zimě zde díky tomu nedochází k hromadění sněhu ani k tvorbě ledu.

---

[1] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

[2] BOUČEK, Bedřich; Geologie.1. díl: Všeobecná geologie.

[3] SVOBODA, Josef. Encyklopedický slovník geologických věd.

Také v České republice bylo v dobách minulých zjištěno, že teploty v kutnohorských stříbrných dolech, nacházející se několik set metrů pod povrchem, byly výrazně vyšší než teploty na povrchu. Další historický záznam z českého území pochází z příbramského dolu Vojtěch. V roce 1873 zde horníci poprvé na světě dosáhli hloubky přes 1 000 metrů a pod povrchem naměřili teploty okolo 50 °C.[4] O geotermální energii se tedy vědělo už dlouho, ale příliš se jí nikdo v České republice nevěnoval.

Evropou se začínají uplatňovat myšlenky Green Dealu, dekarbonizace a v energetice využívání neemisních zdrojů energie. Na vzestupu jsou solární a větrné elektrárny, o kterých se mluví jako o zdrojích budoucnosti. Rozvíjí se myšlenka bateriového uložiště, propojování trhů, komunitní energetiky, určité státy chtějí rozvinout svůj někdy už zapomenutý jaderný průmysl. Nikdo ale téměř nehovoří o energii země, tedy geotermální energii. Neměla by mít tato energie svůj význam v energetickém mixu? Pokud ano, jak moc velkého zastoupení lze dosáhnout, a co brání tomu, že ještě zastoupená není?

[4] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

2. Charakteristika geotermální energie

2.1. Co je geotermální energie

Slovo "geotermální" pochází z řečtiny, konkrétně z výrazů "geo" (země) a "therme" (teplo), které charakterizuje tepelnou energii Země, známou také jako geotermální energie. Věda zabývající se touto energií se nazývá geotermika. Pokud se podíváme trochu do historie, naše planeta vznikla před přibližně 4,6 miliardami let a v té době byla velmi odlišná od svého současného stavu, byla žhavá a roztavená. Teprve asi před 3 miliardami let se teplota povrchu snížila pod 100 °C, což umožnilo vzniku zemské kůry, která postupně tuhla do větších hloubek.[5] 99 % objemu Země má stále teplotu vyšší než 1 000 °C. Energie z 5 kilometrů zemské kůry by stačila na pokrytí potřeby celého lidstva na 200 tisíc let.[6] Vysoké teploty jsou ale přítomny převážně pouze v zemském nitru, ale při vulkanických aktivitách se rozžhavená láva často dostává na povrch. Toto teplo ze zemského nitra je poté možné využít k pokrytí části světové energetické spotřeby.

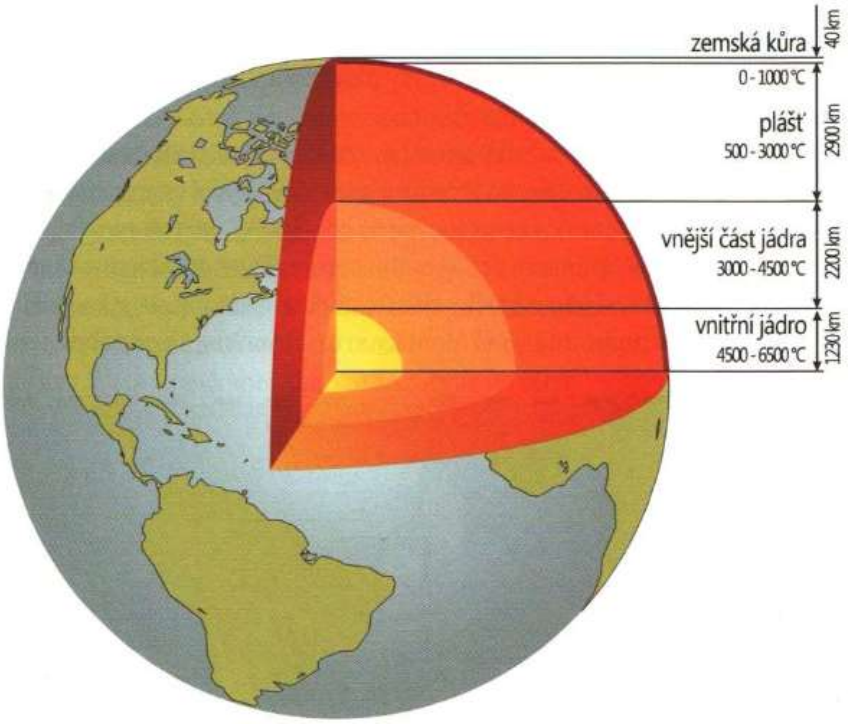
Země má vnitřní strukturu skládající se ze zemského jádra, pláště a kůry. Zemské jádro, s poloměrem přibližně 3 430 km, se dělí na vnější tekuté jádro a vnitřní pevné jádro. Teploty v jádru mohou dosahovat až 6 000 °C. Vnitřní jádro, složené převážně ze železa a niklu, by za normálního atmosférického tlaku bylo plynem, ale kvůli extrémně vysokému tlaku, který dosahuje až 4 milionkrát vyšších hodnot než atmosférický tlak, zůstává ve stavu pevném. Vnější část jádra je kvůli menšímu tlaku než v jádru vnitřním kapalná. Nad jádrem se nachází plášť, který se dělí na spodní a svrchní část. Nejvzdálenější vrstvu od středu tvoří zemská kůra, která má tloušťku od 6 km pod oceány až po 70 km pod nejvyššími horami na pevnině. V Česku je kůra silná přibližně mezi 30 a 34 km.[7]

---

[5] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

[6] KLOZ, Martin, Antonín TYM a Štěpán CHALUPA. Země má energie na rozdávání, proč ji využíváme tak málo a jak to změnit?.

[7] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.



Obr. 2.1: Struktura Země[8]

Teplo uvnitř Země pochází z menší části ze zbytkového tepla z doby vzniku planety a převážně z rozpadu jader radioaktivních prvků.[9] Značná část pochází z rozpadu uranu, poté thoria a radioaktivního draslíku. Zdroj tohoto tepla rozpadem radionuklidů je téměř nevyčerpatelný. V nitru Země se tedy nachází obrovské množství geotermální energie, pro nás je přístupná jen svrchní vrstva zemské kůry. Odhady naznačují, že teplo v nejsvrchnější tříkilometrové vrstvě zemské kůry by mohlo pokrýt energetické potřeby lidstva na nejméně 100 000 let.[10] Na povrch Země dopadá také sluneční záření. To ohřívá ale hlavně povrch a mělčí vrstvy země. V ČR pronikne do hloubky 3 metrů země méně než 0,01 % přijatého slunečního záření. Mezi 3 až do 10 metry se nachází oblast, kde nedochází k přenosu tepla ani z atmosféry, ani z hloubky. Z tohoto důvodu se význam slunce z pohledu zdroje zemského tepla neuvažuje, a naopak v definici geotermální energie je vliv Slunce **vyloučen**.

[8] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

[9] ENTERGEO. *Co je geotermální energie*.

[10] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

Zemská kůra a nejvyšší vrstvy zemského pláště tvoří litosféru, jejíž tloušťka se pohybuje od několika kilometrů do více než 100 kilometrů. Litosféra sestává ze sedmi velkých a několika menších litosférických desek, které plavou na méně pevném materiálu zvaném astenosféra. Tyto desky jsou v neustálém pohybu, což v oblastech jejich střetu způsobuje zemětřesení a zvýšenou vulkanickou činnost. To může způsobit, že se vysoké teploty objeví v menších hloubkách, a to jsou právě ta místa, ve kterých je nejvýhodnější čerpat geotermální energii.[11]

Teplo se nejčastěji přenáší k zemskému povrchu prouděním magmatu, což je křemičitanová tavenina vznikající částečným tavením hornin pláště i zemské kůry. Magma se pohybuje vzhůru, kde postupně chladne. Když se dostane do kontaktu se zavodněnou oblastí, může v hloubkách několika kilometrů zahřát vodu až na 200 °C, ale vysoký tlak zabrání jejímu varu. Jakmile tlak klesne, voda se začne vařit a vzniká pára. Vodní páry se často mísí s plyny obsahujícími síru, dusík a některé inertní plyny, které poté unikají na povrch průduchy. Sirné plyny jsou lidskými smysly snadno rozpoznatelné, ale oxid uhličitý ve větších koncentracích je nezachytitelný a smrtelně nebezpečný. Ve 20. století na únik oxidu uhličitého z kráterového jezera Lake Nyos v Kamerunu zahynulo 1 700 lidí. Horké vody pod vysokým tlakem také mohou prorazit na povrch jako teplé prameny nebo gejzíry. Slavné gejzíry se nacházejí například v Yellowstonském národním parku v USA, které stříkají do výšky až 20 metrů po dobu pěti minut.[12]

Pokud bychom chtěli geotermální energii využít jako zdroj energie, je nutno prozkoumat zásoby této energie pomocí vrtů. Využití geotermálních zdrojů je silně ovlivněno geologickým složením, ekonomickou a technickou vyspělostí dané země a její snahou o ochranu životního prostředí včetně omezení skleníkových plynů. Vysoké náklady na těžbu geotermální energie často omezují její širší využití. Důležitým faktorem pro její využití je přítomnost užitkové vody, která slouží k přenosu tepla. Geotermální energie je v podstatě lokálním zdrojem energie, což dokládá i nejdelší teplovod na světě, který měří pouhých 70 km a nachází se na Islandu.[13]

---

[11] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalni energie.

[12] Tamtéž

[13] Tamtéž

Geotermální zdroje se dělí podle teploty na **vysokoteplotní, středněteplotní a nízkoteplotní**. Vysokoteplotní zdroje, s teplotami nad 200 °C, se nacházejí pouze ve vulkanicky aktivních oblastech a jsou vhodné pro přímou výrobu elektřiny. Středněteplotní zdroje, které mají teplotu mezi 150 °C a 200 °C, lze využít jak pro přímé vytápění, tak pro výrobu elektřiny. Nízkoteplotní zdroje, s teplotami pod 150 °C, jsou nejběžnější a nacházejí se jak ve vulkanicky aktivních, tak neaktivních oblastech. Tyto zdroje jsou vhodné pro vytápění budov, skleníků, pro různé průmyslové procesy a pro využití s tepelnými čerpadly. V Evropě jsou vysokoteplotní geotermální zdroje omezeny na několik lokalit, konkrétně Island, Itálii a Řecko. Naopak, nízkoteplotní a středněteplotní geotermální zdroje jsou mnohem běžnější a vyskytují se ve všech ostatních státech.

Ve vulkanicky aktivních oblastech, jako je například Island, je možné využít teplo ze zdrojů s teplotou přesahující 200 °C, které se následně používá k výrobě elektrické energie. Oproti tomu v regionech s nižšími podzemními teplotami je pro výrobu elektřiny z geotermální energie nezbytné vybudovat hluboké vrty, obvykle dosahující hloubky 4 až 5 km. Mělké vrty, které dosahují hloubky několika desítek až stovek metrů, mohou být využity pro vytápění objektů, například pomocí tepelných čerpadel. Platí, že čím hlubší je vrt, tím vyšší je získaná teplota.[14] V hloubce přibližně 2 km se teplota pohybuje kolem 60 °C, zatímco v hloubce 5 km dosahuje teplota přibližně 200 °C. To je dostatečná teplota pro výrobu elektrické energie.[15]

Geotermální energie je ale pouze částečně obnovitelným zdrojem. Předpokládá se, že životnost tepla využitelného pro výrobu elektřiny z jednoho vrtu je mezi 20 až 30 lety. To je také doba, na kterou míří většina projektů minulých i budoucích. Pro účely vytápění je tato doba delší, protože není potřeba vysokých teplot a množství čerpané vody se tím může snížit. Díky tomu může elektrárna fungovat déle, i když už nevyrábí elektřinu. Tuto schopnost můžeme zařadit mezi unikátní výhodu těchto elektráren oproti například uhelným či plynovým. Teorie říká, že by bylo možné po určité době obnovit výrobu elektřiny, pokud se znovu okolí vrtu prohřeje.[16] V praxi je ale tato varianta často

[14] ŠAFANDA, Jan. Jaké jsou možnosti využití geotermální energie v České republice?.

[15] NAZELENO.CZ. První geotermální elektrárna v ČR: Liberec nebo Litoměřice?.

[16] ENTERGEO. *Co je geotermální energie*.

ekonomicky nevýhodná, jenom čekat, krom toho se špatně zjišťuje, kdy a jak moc se hornina znovu prohřeje. Proto se operuje s množstvím odebíraného tepla/vody už při provozu, aby pokud možno teplota horniny zásadně nikdy neklesla.

2.2. Výhody / nevýhody

Výhody geotermální energie:[17]

1. **Téměř žádné škodlivé emise:** Používání geotermální energie nevytváří škodlivé emise jako oxid uhelnatý nebo oxid dusičitý. Při vrtu se objevuje sice malé množství oxidu uhličitého, ale existuje technologie, která dokáže tento plyn ukládat pod zem. Toto zařízení se skládá z kolektorů s ventilátory, které nasávají vzduch a filtry zachytávají oxid uhličitý. Kolektor se poté naplněný uzavře, geotermální energie teplem ohřeje vnitřní prostor na přibližně 100 °C, čímž se CO_2 uvolní z filtru a uskladní se pod zem.
2. **Stabilní a dostupný zdroj:** Geotermální energii je možné využít v libovolnou dobu, není to zdroj intermitentní, to zajišťuje spolehlivý a konstantní zdroj energie za téměř bezobslužného provozu.[18] Tento zdroj je také téměř neovlivnitelný externími výkyvy a nezávislý na dopravě paliva do elektrárny.[19]
3. **Nízké provozní náklady:** Po počáteční investici jsou náklady na výrobu elektrické energie nízké, protože geotermální elektrárny nevyžadují palivo. Tedy pokud počáteční investice není překážkou, může se jednat o ekonomicky výhodný zdroj.
4. **Flexibilita:** Zdroj můžeme využít kdykoli a téměř kdekoli v rámci určité lokality. Zdroj je flexibilní a lze snadno manipulovat se získaným výkonem. Zdroj je možno kromě výroby elektrické energie využít kombinovaně i pro vytápění budov, což zvyšuje jeho efektivitu a všestrannost.

---

[17] ELEKTŘINA.CZ. Geotermální energie: Jakou budoucnost má v Česku?: Jakou budoucnost má v Česku?.

[18] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

[19] ENTERGEO. *Co je geotermální energie*.

Nevýhody geotermální energie:[20]

1. **Geografická omezení:** Geotermální elektrárny potřebují specifické geologické podmínky, což omezuje jejich výstavbu jen na určité oblasti s vysokou geotermální aktivitou. Jinak jsou bohužel velmi ekonomicky ztrátové.
2. **Vysoké počáteční investice:** Náklady na výstavbu geotermálních elektráren jsou vysoké. To může znevýhodňovat jejich širší rozšíření, zároveň se vrty mohou zkomplikovat a prodražit.
3. **Riziko ekologických škod:** Nesprávně navržené a spravované elektrárny mohou způsobit ekologické škody, včetně znečištění vodních zdrojů či vymírání živočišných druhů. Špatně navržené elektrárny mohou také způsobovat zemětřesení.
4. **Složitost výstavby:** Výstavba geotermálních elektráren vyžaduje složité plánování a schvalovací procesy, které mohou zpomalit a prodražit jejich rozvoj.
5. **Neefektivita:** Efektivita výroby elektřiny dosahuje od 10 do 20 % v závislosti na technologii.[21] Platí, že čím vyšší teplota je na vstupu, tím je vyšší účinnost.
6. **Omezený výzkum a inovace:** V porovnání s jinými obnovitelnými zdroji, jako je solární nebo větrná energie, je výzkum a rozvoj v oblasti geotermální energie méně rozvinutý. To může omezit inovace, či zlepšování technologií a ztížit tím vyjednávací pozici ohledně financování od jednotlivých bank.

2.3. Vliv na životní prostředí

Jako u většiny energetických zdrojů je nutné provést analýzu vlivů na životní prostředí v každé zkoumané lokalitě. Jedním z klíčových faktorů je objem vody nutný k provozu dané elektrárny. Čerpání vody může způsobit narušení bilance podzemních vod kvůli změnám tlaku v horninách, to s určitou pravděpodobností způsobí i poklesy povrchu. Vyčerpáváním tepla dochází k prochlazování hornin. Při těžbě mohou unikat plyny jako sirovodík a oxid uhličitý, může docházet k rozpouštění minerálů v horninách. Do atmosféry se také uvolní značné množství tepla. Postavení chladicích věží a potrubí na povrchu kazí krajinný ráz. Krom toho je při provozu elektrárny v okolí zvýšený hluk.

[20] ELEKTŘINA.CZ. Geotermální energie: Jakou budoucnost má v Česku?: Jakou budoucnost má v Česku?.

[21] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

Kromě problémů spojených s horninami může nastávat problém i v samotné elektrárně. Vody s teplotou nad 70 °C, získané z hloubek 1–2 km, často obsahují více než 100 g rozpuštěných minerálů na 1 litr. Takové vody mohou způsobovat usazeniny v potrubí a vyžadují značné množství chemikálií pro úpravu. Například v geotermální elektrárně The Geysers v USA vzniká při výrobě 1 000 MWh energie přibližně 10 000 tun odpadu. Přesto, když se porovná produkce oxidu uhličitého geotermálních elektráren s ostatními zdroji, vychází geotermální energie lépe. Geotermální elektrárny emitují pouze 13–380 g CO_2 na 1 kWh, zatímco uhelné elektrárny 1 050 g.kWh^{-1}, ropné 900 g.kWh^{-1} a plynové 450 g.kWh^{-1}. Emise oxidu síry jsou rovněž nižší u geotermálních elektráren. Krom toho systém Hot Dry Rock, který by byl použit v ČR, neprodukuje plyny téměř žádné.[22]

Efektivita geotermálních elektráren je ale nízká, a to jenom kolem 10–20 %. Efektivita se zvyšuje kombinovaným využitím tepla a elektřiny. Studie ukazují, že je možné produkovat 10 kW tepla při snížení výroby elektrické energie o 1 kW. Kombinované systémy jsou nejefektivnější při výrobě 10 MW až 100 MW tepla a elektřiny, za jedné podmínky, a to že teplo je využito v blízkosti elektrárny.[23]

Většina geotermálních elektráren není v provozu dostatečně dlouho na podrobné posouzení dlouhodobého vlivu na životní prostředí. Nicméně je zmapováno, že využití horkých vod je méně rizikové než technologie Hot Dry Rock, která může při vhánění studené vody a jejím následném ohřátí způsobit změny v tlaku a podmínkách v horninových strukturách a potenciálně vyvolat seismické aktivity. Příkladem je menší zemětřesení o síle 3,4 Richterovy škály[24] v Basileji v roce 2006, které vzniklo u experimentálního projektu HDR. Z tohoto důvodu se musel experimentální projekt úplně zastavit. 10 000 domácností tímto ztratilo elektřinu z geotermálních vrtů, a asi 2 700 domácností ztratilo geotermální energii pro vytápění. Vyhloubené vrty byly v hodnotě 60 milionů dolarů a zemětřesení vedlo k poškození v hodnotě dalších 9 milionů dolarů. V roce 2018

[22] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalni energie.

[23] Tamtéž

[24] VOBOŘIL, David. Geotermální energie.

v Pchohangu na jihozápadě Jižní Koreje došlo ještě k většímu zemětřesení než v Basileji. Se silou 5,4 Richterovy škály šlo o nejsilnější otřes v novodobé historii Jižní Koreje a způsobilo největší hospodářské škody do té doby. Zemětřesení poničilo 2 000 budov. Žádná ze simulací neprokázala, že by bylo tak velké zemětřesení možné, ale výzkumné týmy jak z Jižní Koreji, tak Evropy se shodly, že zemětřesení vzniklo atypicky v malé hloubce a dle dat se zde objevuje aktivní zlom, který vede přímo pod areálem elektrárny. Tedy nejpravděpodobnější vysvětlení situace je, že natlakovaná voda ve vrtu rozpouštěla skálu ve zlomu postupně a tím ho pomalu oslabovala. Až byla hornina příliš oslabena, došlo k velkému posunu o 4 cm vzhůru.[25] Zatímco lokality jaderných elektráren se soustředí na nejméně aktivní oblasti, geotermální elektrárny HDR jsou nejvýhodnější v nejnebezpečnějších aktivních lokalitách. Snížení rizik spojených s technologií HDR je tedy klíčové i nutné a je podmínkou pro hromadné zavedení této technologie.

2.4. Současná podpora

V současné době se v České republice většina dotačních programů zaměřuje na podporu solárních a větrných technologií. Geotermální energie, navzdory svým mnoha výhodám, jako jsou nízké provozní náklady a stabilní dodávka energie, často zůstává opomíjena. Pro vyvážení této situace by stát měl upravit stávající dotační programy nebo vytvořit nové, které by specificky podporovaly geotermální projekty. Nové dotační programy by měly pokrývat nejen počáteční investice do výstavby geotermálních elektráren, ale také podporovat výzkum a vývoj v této oblasti. Problémem je například neexistence legislativní úpravy pro získávání energie země stimulovanými HDR systémy, neexistující vhodné finanční nástroje na podporu vstupu na trh pro tyto zdroje či že nejsou pro investory dostatečně identifikovány lokality s vhodnou geologií.[26] Pokud by finanční podpora byla větší, pomohlo by to překonat vysoké počáteční náklady, které jsou jednou z hlavních překážek rozvoje geotermální energie.[27]

---

[25] TECHNICKYTYDENIK. Jak elektrárna může „vyrobit zemětřesení.

[26] KLOZ, Martin, Antonín TYM a Štěpán CHALUPA. Země má energie na rozdávání, proč ji využíváme tak málo a jak to změnit?.

[27] ELEKTŘINA.CZ. Geotermální energie: Jakou budoucnost má v Česku?: Jakou budoucnost má v Česku?.

Dalším důležitým krokem pro podporu geotermální energie by bylo zjednodušení a urychlení schvalovacích procesů. V současné době může být získání povolení pro geotermální vrty a elektrárny složité a zdlouhavé. Stát by měl pracovat na zjednodušení těchto procesů, aby bylo možné rychleji a efektivněji realizovat geotermální projekty. Příkladem by bylo například zjednodušení povolování pro uzavřené systémy, které nemají vliv na kvalitu podzemních vod či změna přílohy 1 zákona č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů, zvýšení hloubky geotermálního vrtu, pro který není potřeba provádět zjišťovací řízení EIA z 200 m na 400 m.[28]

Geotermální energie představuje pro Českou republiku značný potenciál, který by mohl významně přispět k energetické bezpečnosti, snižování emisí a klimatických, ale i energetických cílů. Aby bylo možné tento potenciál naplno využít, musí stát aktivně podpořit tento sektor prostřednictvím dotačních programů a zjednodušení schvalovacích procesů.[29] Momentálně je totiž zájem investorů o tento druh obnovitelné energetiky velmi nízký.

2.5. Veličiny geotermální energie

Geotermální energie se řadí mezi obnovitelné zdroje energie, i když ne vždy. Některé zdroje geotermální energie se totiž mohou vyčerpat během několika desítek let. Celkový tepelný tok geotermální energie z nitra Země se odhaduje na 47 TWt, to je zhruba dvojnásobek lidské spotřeby energie.[30] **Tepelný tok** je fyzikální veličina vyjadřující množství tepla, které projde jednotkou plochy za jednotku času, měřenou ve wattech na metr čtvereční ($W.m^{-2}$). Správně by se ale mělo hovořit o plošné hustotě tepelného toku, protože z definice by tepelný tok měl mít jednotku watt (W) viz rovnice č. 1.

---

[28] KLOZ, Martin, Antonín TYM a Štěpán CHALUPA. Země má energie na rozdávání, proč ji využíváme tak málo a jak to změnit?.

[29] ELEKTŘINA.CZ. Geotermální energie: Jakou budoucnost má v Česku?: Jakou budoucnost má v Česku?.

[30] POJAR, Petr. Příprava prvního geotermálního projektu v ČR trvala 20 let, vrty budou hluboké až 4 km.

Tepelný tok z definice vypočteme:

$$\phi = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}\tau} \quad \text{(W; J; s)} \tag{1}$$

Tepelný tok z definice pojednává o množství tepla, které projde určitou plochou za jednotku času, měřenou ve wattech. V praxi se ale využívá právě zmíněná plošná hustota tepelného toku. Jedná se o vektorovou veličinu, která určuje množství tepla, které projde jednotkovou plochou kolmou ke směru šíření tepla za jednotku času. Ta už má zmíněnou jednotku watt na metr čtvereční ($W.m^{-2}$). Tuto nesrovnalost lze najít ve veškeré literatuře pojednávající o geotermální energii.

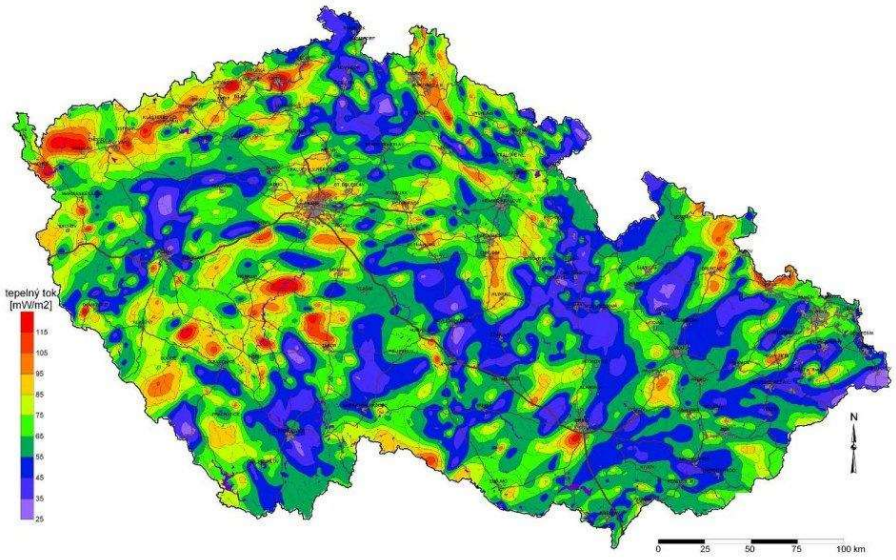
Hustotu tepelného toku z definice vypočteme:

$$\phi = \oiint_S \vec{q} \cdot \mathrm{d}\vec{S} \quad \text{(W; W.m}^{-2}\text{; m}^2\text{)} \tag{2}$$

Na zemském povrchu se tepelný tok pohybuje v rozmezí 30 až 120 $mW.m^{-2}$. Střední hodnota byla odhadnuta z několika desítek tisíc měření na 70 $mW.m^{-2}$. Tepelný tok je především závislý na vulkanické aktivitě, druhu hornin a tloušťce zemské kůry. Ve stabilních částech zemské kůry je nižší. Proto jsou pro geotermální energii zajímavější vulkanicky aktivní oblasti s vysokou hodnotou tepelného toku. Tepelný tok je totiž klíčový nejen pro využití geotermální energie, ale také pro geofyziku a geologii, protože poskytuje informace o složení hlubších vrstev zemské kůry a o celkovém geologickém vývoji oblasti.[31] Díky němu se dá přibližně odhadovat růst teploty s hloubkou, nevypovídá ovšem vůbec o původu tepla.

Na našem území mají nejstabilnější oblasti s největší tloušťkou kůry (až 36 km) nejnižší hodnoty tepelného toku. Patří sem především střední a jižní část Českého masivu, včetně oblasti Třebíčska a Jeseníků. Vyšší hodnoty tepelného toku jsou typické pro oblasti hlubinných zlomů, které procházejí západním a severním Českým masivem. Nejvyšší hodnoty tepelného toku jsou zaznamenány v severozápadních Čechách, zejména v oblasti Krušných hor.

[31] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.



Obr. 2.2: Tepelný tok na území České republiky [32]

Další potřebnou fyzikální veličinou je **tepelná vodivost hornin**. Pro vypočtení tepelné vodivosti hornin musíme definovat **teplotní gradient**. Ten je definován jako poměr přírůstku teploty vůči vzdálenosti mezi izotermními plochami. Jinými slovy představuje růst teploty v daném místě. Jednotka teplotního gradientu je kelvin na metr ($K.m^{-1}$).

Teplotní gradient z definice vypočteme:

$$\text{grad}\, T = \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} \quad (K.m^{-1}; K; m) \tag{3}$$

Tepelnou vodivost horniny poté vypočteme:

$$\vec{q} = -\lambda\, \text{grad}\, T \quad (W.\, m^{-2}; W.m^{-1}.K^{-1}; K.m^{-1}) \tag{4}$$

λ je tepelná vodivost horniny odpovídající součiniteli tepelné vodivosti a má jednotku watt na metr na kelvin ($W.m^{-1}.K^{-1}$). Tato veličina udává schopnost horniny přenášet teplo vedením.

Tepelná vodivost hornin závisí na jejich struktuře, pórovitosti a minerálním složení. Hlubinné vyvřeliny mají obvykle nejvyšší schopnost přenášet teplo. Například křemen je vynikajícím tepelným vodičem s $\lambda = 8{,}4\ W.m^{-1}.K^{-1}$, zatímco jílovité minerály mají

[32] VOBOŘIL, David. Geotermální energie v ČR.

naopak nízkou tepelnou vodivost s $\lambda = 0{,}4\ W.m^{-1}.K^{-1}$. S pomocí těchto veličin se odhaduje teplota a vhodnost dané lokality pro samotné vrty. Slouží tedy jako jeden z mnoha faktorů ovlivňující geotermální projekty v rámci přípravy.[33]

2.6. Vrty

K nalezení míst s vysokými teplotami pod zemí je nutné provádět hlubinné zkušební vrty. Tato technika je dlouho známá z průzkumu ropných nalezišť. U rotačního postupu, což je nejčastější způsob vytváření vrtu, je korunkový vrták osazený diamantovými hlavicemi poháněn silnými motory. Cena vrtáku se pohybuje kolem 1,5 milionu Kč.[34]

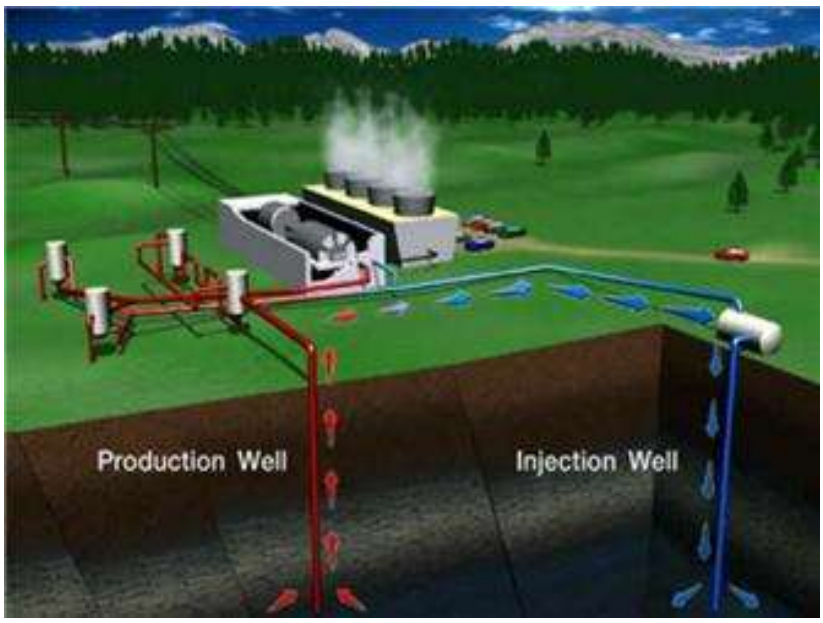
Obr. 2.3: Vrták používaný při hloubení zkušebních vrtů[35]

Při samotném vrtání protéká voda pod vysokým tlakem vnitřní částí vrtáku a vtlačuje se do vrtaného otvoru. Tento proces odplavuje rozdrcený materiál horniny do prostoru mezi korunkovým vrtákem a vrtným otvorem a zároveň ochlazuje korunkový vrták. Pohonný systém vrtné soupravy také umožňuje zaměřit osu vrtání a odklonit směr vrtu. Vysoká koncentrace soli, která je přítomna v termálních vodách, ve styku s kovem snadno způsobuje korozi. Tyto problémy s korozí se tedy musí řešit speciálními povrchovými úpravami a ochrannými vrstvami na materiálu.

[33] VOBOŘIL, David. Geotermální energie v ČR.

[34] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

[35] NAZELENO.CZ. První geotermální elektrárna v ČR: Liberec nebo Litoměřice?.



Obr. 2.4: Princip cirkulace vody[36]

Nejhlubší vrty provedené pro výzkumné účely se uskutečnily na ruském poloostrově Kola a dosáhly hloubky 12 km. V Německu byly nejhlubší vrty provedeny do hloubky 9,1 km. Tyto extrémní hloubky představují současné limity naší technologie. V hloubkách kolem 10 km panují velmi náročné podmínky s teplotami dosahujícími 300 °C a vysokým tlakem, které činí horniny plastickými a komplikují následné vrtání. Jeden z posledních projektů geotermálních elektráren byl projekt ve Finsku v univerzitním kampusu v Espoo. Zde byly odvrtány dva geotermální vrty do hloubky 6,2 a 6,4 km.[37] Pro geotermální využití není ale vždy potřeba vrtat do takových hloubek. Pro velké geotermální zařízení se v současnosti počítá s hloubkami maximálně do 5 kilometrů, je to balanc mezi náročností a ekonomickou návratností vrtu. To je také cíl pro české geotermální projekty.[38]

Geotermální vrty se dělí na mělké a hlubinné, přičemž mělké vrty sahají do hloubky až přibližně 400 metrů, zatímco hlubinné sahají obvykle do hloubek 2–3 kilometrů. Interval mezi 400 a 2 000 metry lze označit za středně hluboké vrty. Ty mají

[36] NAZELENO.CZ. První geotermální elektrárna v ČR: Liberec nebo Litoměřice?.

[37] KLOZ, Martin, Antonín TYM a Štěpán CHALUPA. Země má energie na rozdávání, proč ji využíváme tak málo a jak to změnit?.

[38] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

v podmínkách České republiky podobné možnosti jako mělké vrty, avšak díky větší hloubce a vyšší teplotě okolního prostředí (15–80 °C) poskytují vyšší potenciální výkon a účinnost. Kvůli nedostatečné teplotě je ale nutno doplnit středně hluboké systémy dodatečnou technologii tepelných čerpadel, aby byly vhodné pro komerční vytápění, například v systémech centrálního zásobování teplem (CZT). Hlubší vrty poté mohou dodávat energii přímo.[39]

Vzhledem k technologické a finanční náročnosti hlubších vrtů nejsou tyto systémy zatím příliš rozšířené a jejich masivní využití je teprve v začátcích. Program Horizont Evropa[40], zaměřený na podporu inovací, finančně podporuje vývoj a pilotní projekty až do hloubky 2 kilometrů. Tento vývoj souvisí s potřebou dosahování vyšších výkonů na menší ploše, typicky v hustě zastavěných evropských městech. Očekává se, že komerční využití těchto systémů začne během následujících pěti let, přičemž Česká republika má potenciál stát se jedním z lídrů v tomto sektoru díky projektu v Litoměřicích.

Dalším problémem samotného vrtu je jeho vysoká cena. Krom samotné drahé technologie na hloubení do kilometrových hloubek je problémem to, že nelze přesně určit složení hornin pod zemí. Pokud vrt narazí na tvrdou horninu místo měkké usazeniny, hlava vrtáku se opotřebí a je nutné ji vyměnit za novou, tedy náklady na elektrárnu rostou. Je tedy nutné vyměnit hlavici vrtáku po každých 100 metrech, pokud se vrtá tvrdou horninou, například žulou.[41] Nižší, než očekávané teploty v hloubce mohou vést k odstoupení od projektu již ve fázi průzkumných vrtů. To samé platí i o špatném rozložení puklin v horninách. Pokud se nic nezkomplikuje, polovina nákladů na elektrárnu tvoří samotné vrty. Z tohoto důvodu je cena geotermální elektřiny vyšší než elektřina z větrných nebo vodních zdrojů.

[39] KLOZ, Martin, Antonín TYM a Štěpán CHALUPA. Země má energie na rozdávání, proč ji využíváme tak málo a jak to změnit?.

[40] Tamtéž

[41] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

2.7. Typy geotermálních zdrojů

Hydro-geotermální zdroje jsou zdroje, ve kterých se horká voda přirozeně vyskytuje v podzemí, zejména v porézních horninách rozsáhlých sedimentárních pánví. Hydrotermální systémy s nejvyššími teplotami se obvykle nacházejí na okrajích litosférických desek nebo v riftových zónách, což omezuje jejich geografické rozšíření. Výhodou těchto systémů je jejich jednoduchost, což přispívá k jejich dominanci ve světě. Největší hydrotermální pole je The Geysers v severní Kalifornii. Aktuálně zde funguje 22 elektráren s celkovým výkonem 1 517 MWe.[42] Tuto vodu lze čerpat pomocí vrtů a přímo ji využívat k vytápění, ohřevu a výrobě elektřiny. Pokud je teplé vody v podzemí nedostatek, je nutné vracet ochlazenou vodu zpět, aby se zdroj nevyčerpal. Tento způsob se využívá například také v Pařížské pánvi ve Francii, Panonské pánvi v Maďarsku, a také v menší míře na Slovensku, Bulharsku a Rumunsku. V České republice se tento způsob využívá především v Křídové pánvi v Děčíně a Ústí nad Labem. Teploty zde dosahují ale pouhých 32–35 °C, to sice stačí na nevýkonné teplárenské aplikace, ale vylučuje to možnosti využití jako geotermální elektrárnu.[43] Teplotu je možné následně zvýšit tepelnými čerpadly, proto je tento zdroj často s nimi doplňován. Výhodou tohoto zdroje je potřeba pouze nízkých vrtů do 400 metrů hloubky, kde se nachází ony rezervoáry s ohřátou vodou. Díky malým vrtům klesá jejich cena i cena celé výtopny.[44]

Systém HDR (Hot Dry Rock) využívá teplo z horkých hornin, které nemají dostatečné zásoby podzemní vody a nacházejí se v hloubkách dostupných pro současnou vrtnou techniku, tedy kolem 5–6 km. Typická konfigurace HDR elektrárny zahrnuje jeden vtlačovací vrt a dva čerpací vrty, které jsou často vrtány z jedné platformy. Čerpací vrty se ve spodní části rozbíhají na opačné strany, takže jejich dna jsou vzdálena několik set metrů od dna vtlačovacího vrtu. V hloubkách kolem 6 km může být teplota hornin až 180 °C. Vysoký tlak v těchto hloubkách zabraňuje vzniku pórů a větších dutin, je tedy nutné tyto prostory vytvořit uměle, čímž se v hloubce vytvoří v podstatě takový přírodní tepelný výměník. Horniny lze pomocí vhodných procesů přeměnit na tepelný výměník,

---

[42] ŠAFANDA, Jan. Jaké jsou možnosti využití geotermální energie v České republice?.

[43] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

[44] ŠAFANDA, Jan. Jaké jsou možnosti využití geotermální energie v České republice?.

proces vytvoření výměníku se nazývaná hydraulická stimulace[45], při kterém je cílem pod velkým tlakem vhánět vodu do nejspodnější části vtlačovacího vrtu. Čerpací vrty jsou nasměrovány tak, aby byly přes tento stimulovaný systém hydraulicky propojeny s vtlačovacím vrtem. Nejde o rutinní technologický postup a každá lokalita je v podstatě unikátní.[46] Voda ve vrtech cirkuluje pod vysokým tlakem, zůstává v kapalném stavu a odebírá teplo z okolních hornin. Na povrchu se pak při nižším tlaku voda mění na páru, která je použitelná pro výrobu elektřiny. Z ekonomických důvodů se výroba elektřiny kombinuje s rozvodem tepla pro vytápění blízkých obcí.[47]

Pro dostatečnou produkci elektrické energie systémem HDR je nezbytné mít výměník o rozloze 5–10 km² a vhánět 50–100 litrů vody za sekundu při tlacích dosahujících až 40 MPa. Na začátku tohoto procesu je také nutné počítat se ztrátou vody. Nejjednodušším principem je vytvořit dva vrty propojené puklinami. Ekonomicky výhodnější je však systém více puklin, přičemž vzdálenost vrtů se pohybuje mezi 300 – 1 000 metry.

V současnosti se vedle termínu teplo suchých hornin objevují termíny jako stimulované geotermální systémy (**EGS – Enhanced Geothermal Systems**), teplo rozpraskaných hornin (**HFR – Hot Fractured Rock**) a teplo vlhkých hornin (**HWR – Hot-Wet-Rock**). Tyto termíny označují rozdíly v geologických formacích hornin, které jsou vhodné pro vytvoření podzemního tepelného výměníku, ale všechny vycházejí ze stejného konceptu využití tepla uloženého v horkých horninách s nízkou hydraulickou propustností. Tyto technologie nejsou téměř rozvinuté, většina je ve fázi testování a prototypových projektů, jejichž výsledky jsou zatím neprůkazné. První prototypový projekt HDR o výkonu 1,5 MWe byl spuštěn v roce 2010 v Soultz-sous-Forêts ve Francii. Nedávno byl uzavřen projekt Cooper Basin na severu Jižní Austrálie, kde se realizovaly vrty do hloubky 5 km. Přestože se podařilo získávat horkou vodu a produkovat elektřinu, pokračování projektu nebylo ekonomicky udržitelné, a provoz této elektrárny byl předčasně ukončen. Další projekty po celém světě zatím ani nedosáhly fáze komerční realizace.

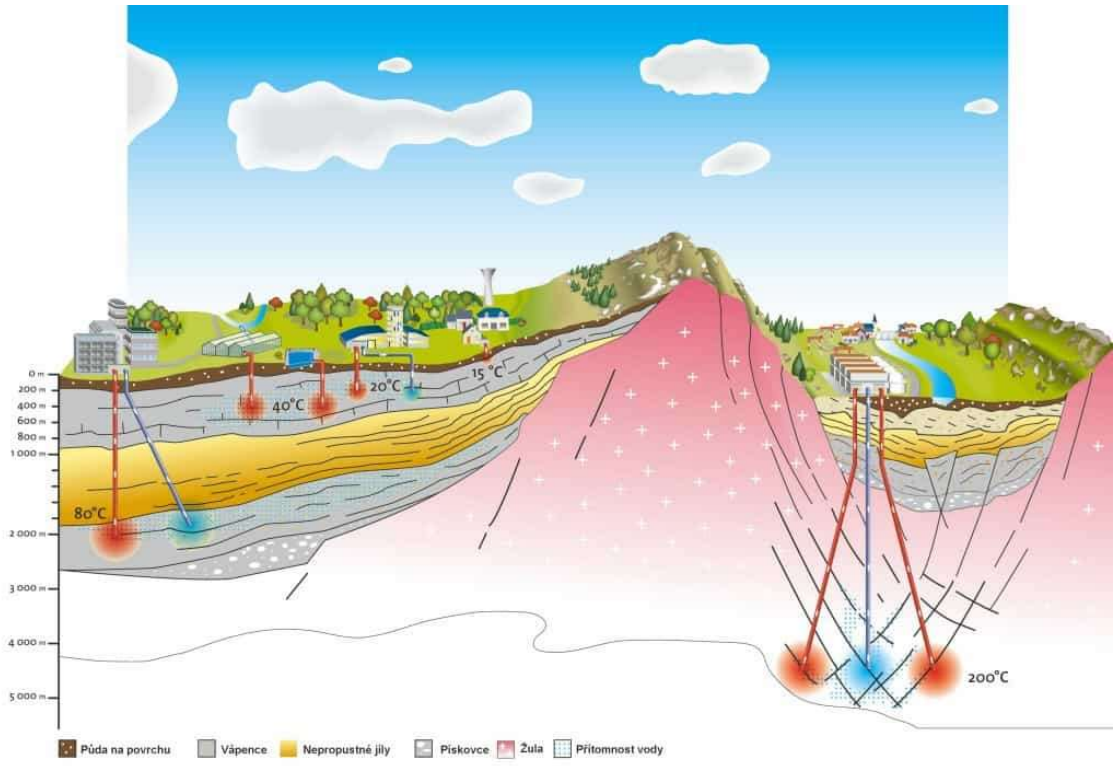
---

[45] ŠAFANDA, Jan. Jaké jsou možnosti využití geotermální energie v České republice?.

[46] KLOZ, Martin, Antonín TYM a Štěpán CHALUPA. Země má energie na rozdávání, proč ji využíváme tak málo a jak to změnit?.

[47] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

Hlavním problémem zůstává ekonomická nenávratnost, přičemž rizikem jsou i zemětřesení, která mohou tyto projekty provázet. U HDR elektráren s jedním vtlačovacím a dvěma čerpacími vrty v hloubce 5 km, životností 20 let a počáteční teplotou a výkonem 200 °C, respektive 7 MWe, je nutné prodávat vyráběnou elektřinu za 3–4 Kč.kWh^{-1}.[48] Nadějí této technologie může být zahájený projekt prototypové elektrárny o výkonu 3 MWe v Cornwallu ve Velké Británii, kde byly vrty o hloubce 4,5 km zahájeny v roce 2018. V České republice byl také zahájen podobný prototypový projekt geotermální elektrárny v Litoměřicích.



Obr. 2.5: Jednotlivé typy geotermálních zdrojů [49]

Na obrázku si můžeme všimnout, že lokace bez termální vody nedosahuje dobrých podmínek pro vznik geotermální elektrárny. Ano, lze využít i toto nízkopotenciální teplo k vyhřívání menších objektů či pro lokální rozvod tepla s použitím tepelných čerpadel, ale je to až geotermální elektrárna na obrázku vpravo s hlubokými HDR vrty, která dokáže generovat elektrickou energii v rámci jednotek MWe v kombinaci s výrobou tepla, a to bez použití tepelných čerpadel.

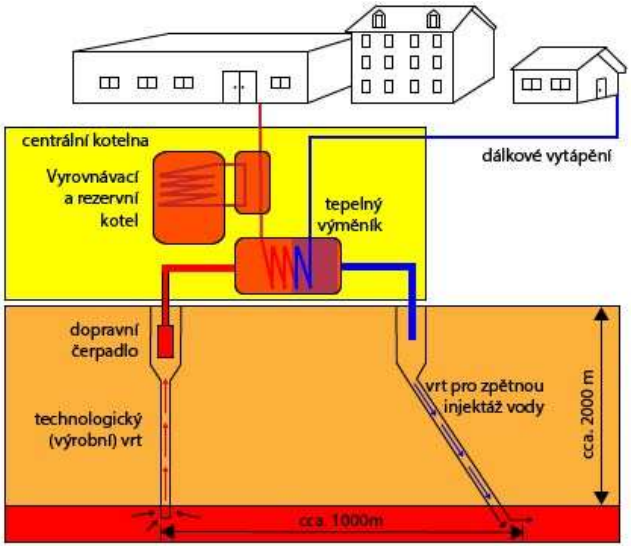
[48] ŠAFANDA, Jan. Jaké jsou možnosti využití geotermální energie v České republice?.

[49] VOBOŘIL, David. Geotermální energie.

2.8. Typy generování elektřiny

Bez generování elektřiny – výtopny

Pro účel vytápění bez výroby elektrické energie postačují nízké teploty pod 100 °C. To znamená, že nejsou potřeba velmi hluboké vrty, a tedy je celá výstavba levnější. Toto teplo lze nejsnadněji získat z termální vody. Geotermální výtopna používá čerpadlo k přepravě horké termální vody z vrtu na povrch. Vzhledem k vysokému obsahu minerálních solí a přírodních radioaktivních příměsí v termální vodě není vhodné, aby byla voda přímo použita jako teplonosné médium. Výtopna tedy často obsahuje tepelný výměník, který přebírá tepelnou energii z termální vody a předává ji do systému dálkového vytápění. Ochlazená termální voda je pak vracena zpět do země přes injekční vrt.[50]



Obr. 2.6: Schéma geotermální výtopny[51]

Ve střední Evropě obvykle dostačují vrty do hloubky 2000 m. Centrální výtopna má také možnost regulovat množství dodávaného tepla podle aktuální spotřeby. Výtopna má k dispozici kotel pro vyrovnávání špičkového odběru, který zajišťuje plynulou dodávku tepla během vyšší spotřeby. Krom hlavního kotle je často přítomen i záložní kotel k zajištění nepřerušené dodávky tepla v případě problémů s čerpací stanicí nebo vrtem.[52]

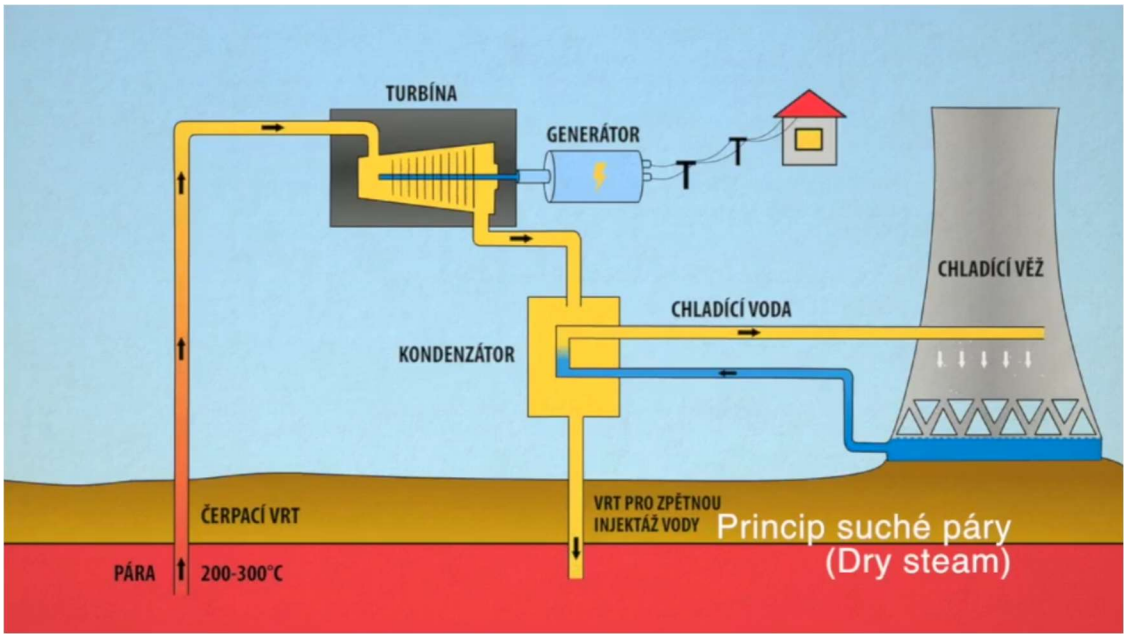
[50] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

[51] Tamtéž

[52] Tamtéž

Dry steam (na suchou páru)

Princip suché páry je nejjednodušší možností výroby elektrické energie z geotermální činnosti. V optimálních geotermálních lokalitách, tedy v lokalitách, kde je možné získat páru o teplotě 200–300 °C, se mohou využívat běžné elektrárny s parní turbínou. Pára po očištění v separátoru pohání přímo turbínu generátoru. To představuje nejjednodušší a nejstarší způsob výroby elektrické energie z geotermálních zdrojů díky nižším nákladům. Elektrárny mají výkon v intervalu 35 MWe – 120 MWe, nejčastěji 55–60 MWe.[53] Tento princip využívá i první geotermální elektrárna na světě v Larderellu. Největší elektrárna využívající tento princip je The Geysers v severní Kalifornii, postavená v roce 1960. Elektrárna vyrábí dostatek energie k zásobování města velikosti San Francisca. Nevýhodou je ale potřeba čistého zdroje pouze se suchou parou a žádnou vodou či ostatními plyny. Většinou totiž geotermální pára obsahuje plyny jako sulfan, oxid uhličitý či metan, které se musí pracně odstraňovat.

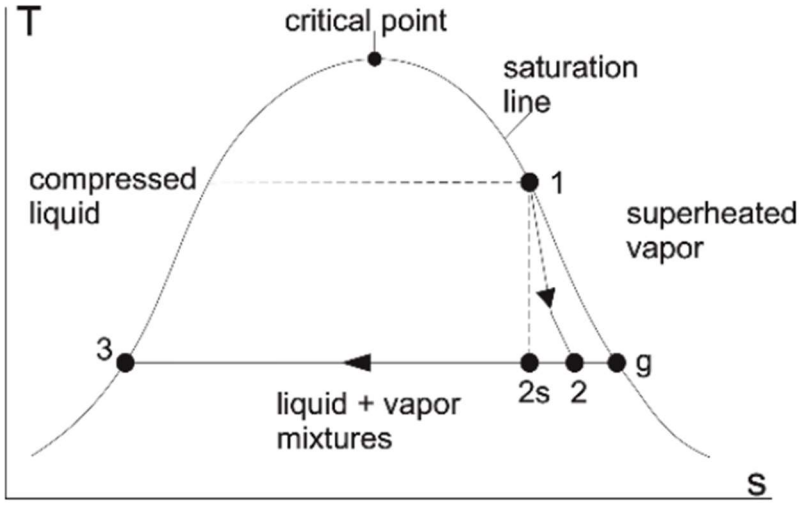


Obr. 2.7: Princip suché páry *(Dry steam)*[54]

Pokud se podíváme na parní cyklus této varianty, zjistíme, že se jedná o zjednodušený Clausius–Rankinův cyklus, tedy bez samotného cyklu. Pára je pokaždé čerpána nová a je uvažováno, že zpětná injektáž vody neovlivní teplotu páry u čerpacího vrtu.

[53] ŠAFANDA, Jan. Jaké jsou možnosti využití geotermální energie v České republice?.

[54] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.



Obr. 2.8: T-s diagram tepelného oběhu elektrárny fungující na principu *Dry steam*[55]

V bodě 1 na mezi sytosti získáváme parametry páry z čerpacího vrtu. U této páry dochází k izoentropické expanzi na lopatkách turbíny, tedy se pohybujeme mezi bodem 1 a 2s, popřípadě mezi body 1 a 2 při skutečném tepelném adiabatickém spádu se zvyšující se entropií. Mezi body 2-3 dochází k izobarické kondenzaci páry v kondenzátoru. Následuje reinjektáž pod zem a celý „cyklus" se opakuje.

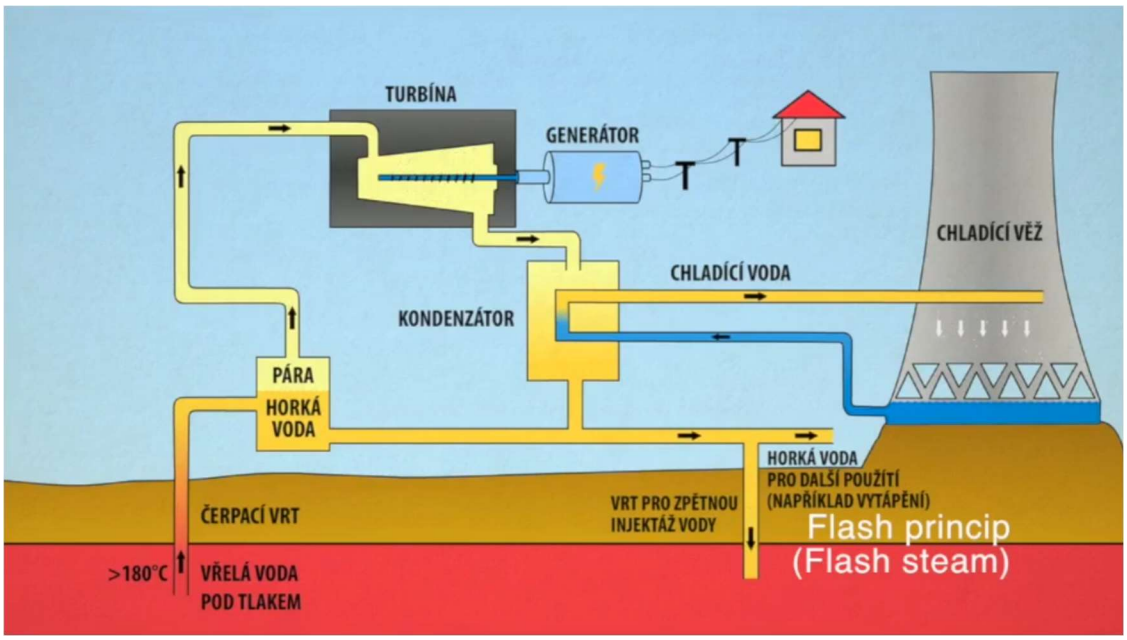
Flash steam (na mokrou páru)

Flash princip využívá horkou vodu, která dosahuje přes 160–180 °C.[56] Ta je napojena na rezervoár, ve kterém je voda pod vysokým tlakem. Při čerpání této vody na povrch dochází k poklesu tlaku, což způsobí její přeměnu na páru. Z toho plyne právě název „flashing". Tento proces probíhá ve svisle orientované válcové cyklonové tlakové nádobě. Následně pára vstupuje do separátoru, který není na obrázku vyznačen, kde se oddělí pára a mineralizovaná voda.[57] Tato pára následně pohání turbínu. Voda, která se nepromění v páru, je vracena zpět do rezervoáru pro opětovné využití. Tyto elektrárny mají výkon 5 – 100 MWe, nejčastěji však okolo 20 MWe. Většina moderních geotermálních elektráren dnes využívá právě tento princip.

[55] CUKUP, Mulyana. The thermodynamic cycle models for geothermal power plants by considering the working fluid characteristic

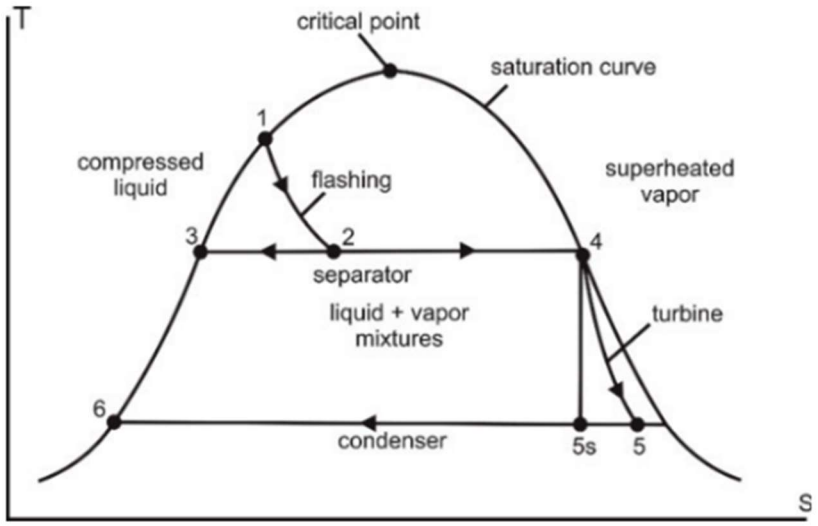
[56] GEOTERMIE. Technologie pro geotermální elektrárny.

[57] VOBOŘIL, David. Geotermální energie.



Obr. 2.9: Princip Flash *(Flash steam)*[58]

Pokud se podíváme na parní cyklus této varianty, zjistíme, že je složitější oproti předešlé variantě. V tomto případě je čerpána voda, a ne pára a v T-s diagramu se objeví změna tlaku právě vyvolávající přeměnu vody na páru.



Obr. 2.10: T-s diagram tepelného oběhu elektrárny fungující na principu *Flash steam*[59]

[58] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

[59] CUKUP, Mulyana. The thermodynamic cycle models for geothermal power plants by considering the working fluid characteristic

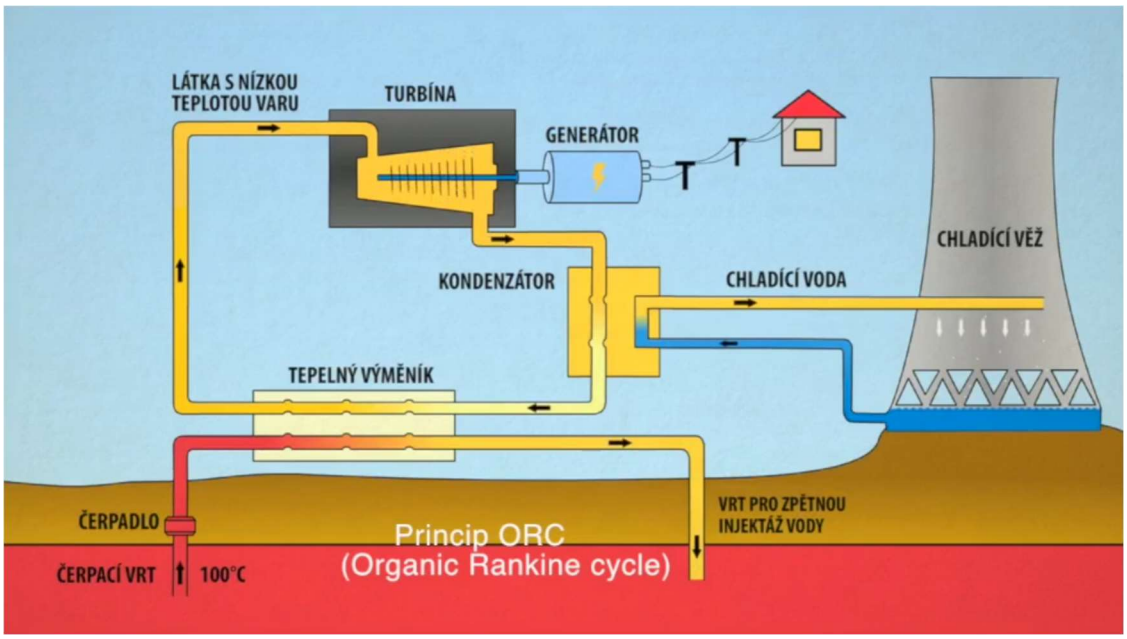
Nejdříve je čerpána z čerpacího vrtu pod tlakem horká voda v bodě 1. Z tohoto bodu přechází do bodu 2, odebírané vodě se v tomto úseku snižuje tlak a separuje se na páru v úseku 2 až 4 a kondenzát v úseku 2 až 3. Pára následně expanduje v turbíně a odevzdává svoji energii mezi body 4 a 5. Bod 5s představuje ideální izoentropický spád, bod 5 označuje reálný adiabatický tepelný spád se zvyšující se entropií. Poté nízkopotenciální pára kondenzuje v kondenzátoru a vrací se jako voda reinjektážním vrtem zpět do geotermálního zdroje. U tohoto principu je možné využít více „flashingů“, tedy poklesů tlaku vody na přeměnu na páru, zvyšuje se tím efektivita dané elektrárny.

Organic Rankine Cycle (ORC, Binární cyklus)

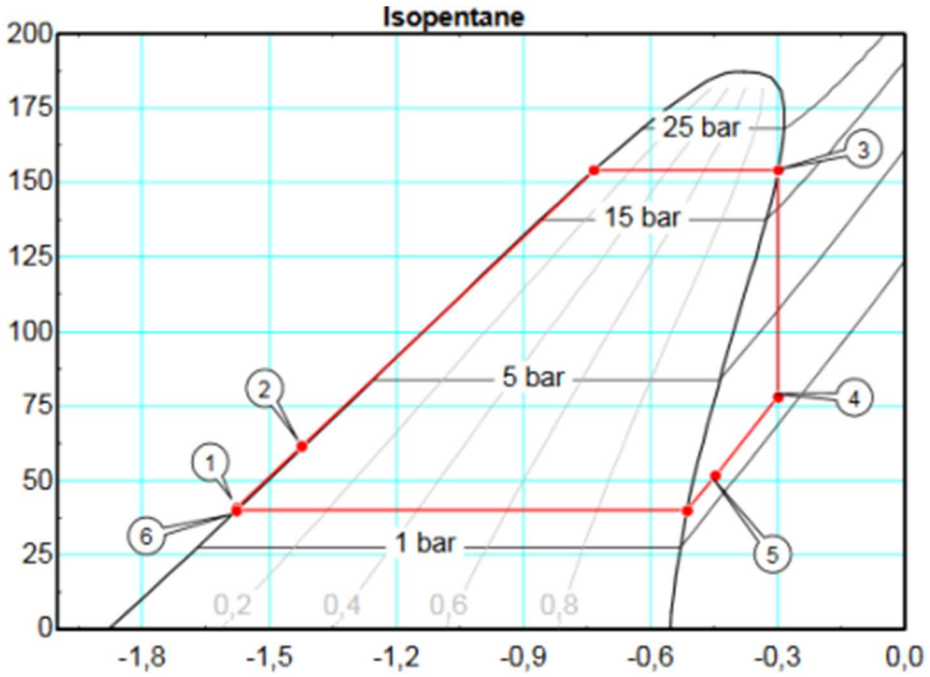
Při teplotách od 73–100 °C nebo i lehce vyšších není geotermální teplo dostatečné pro var a odpařování vody, tedy klasické parní turbíny nelze v tomto případě použít. Tento systém ale využívá horkou vodu k ohřevu kapaliny, která má mnohem nižší bod varu než voda, například isopentan PF5050, isobutan či propan. Teplo z geotermálního oběhu se prostřednictvím tepelného výměníku přenáší na tuto kapalinu, která se pak odpařuje pod vysokým tlakem a pohání turbínu generátoru. Pracovní médium se poté v kondenzátoru ochlazuje a kondenzuje zpět do kapalného stavu, aby mohlo být znovu použito v oběhu. Tento princip vyžaduje napájecí čerpadlo, které dodává termální vodě potřebný tlak na proudění. Systém OCR má obecně lepší účinnost než předešlé 2 způsoby, ale při nízkých teplotách je celková účinnost nízká a dosahuje pouze 10 %. Binární elektrárny dosahují výkonu 0,1–1 MWe. Z důvodu nižší teploty, která je rozšířená na více lokacích, se plánuje tento princip nasadit v moderních geotermálních elektrárnách.[60]

T-s diagram v tomto případě není složen z vodní páry, ale jiného média, například isopentanu. Oproti minulým T-s diagramům se jedná o plný cyklus. Z obrázku 2.12 si můžeme všimnout izobarického ohřívání a následného výparu pracovního média mezi body 1 až 3. Dále následuje izoentropická expanze v turbíně mezi body 3 a 4, dochází také k izobarické regeneraci, tedy k předehřátí pracovního média mezi body 4 a 5. Ono předehřátí z pohledu studeného kapalného média je znázorněno mezi body 1 a 2. Mezi body 5 a 6 dochází k izobarické kondenzaci v kondenzátoru a cyklus se opakuje.

[60] GEOTERMIE. Technologie pro geotermální elektrárny.



Obr. 2.11: Princip ORC *(Organic Rankine cycle)*[61]



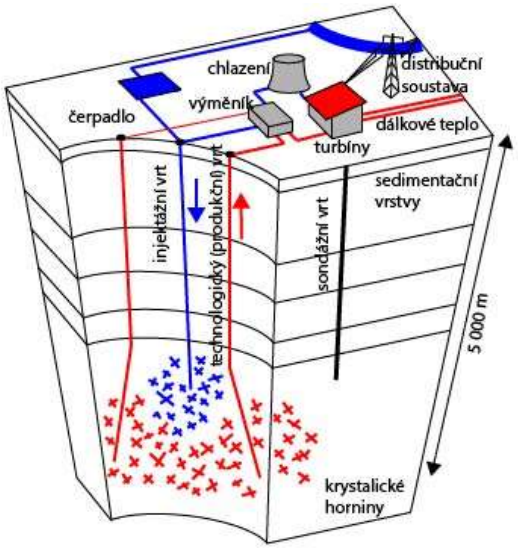
Obr. 2.12: T-s diagram tepelného oběhu elektrárny fungující na principu *OCR*[62]

[61] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

[62] CUKUP, Mulyana. The thermodynamic cycle models for geothermal power plants by considering the working fluid characteristic

Hot Dry Rocks (HDR)

Nejsložitější a nejmodernější možností je princip Hot Dry Rocks. Vrty v této variantě dosahují hloubky až 5 000 m. V těchto hloubkách tedy už není potřeba ani výrazná geotermální oblast, teploty zde dosahují i tak až 200 °C. V těchto hloubkách se nenacházejí ložiska termálních vod, ale právě spíše horké suché horniny Hot Dry Rocks. Aby bylo možné využít teplo z těchto hornin, musí být vytvořeny umělé podzemní dutiny. Do vrtů se tedy vhání voda pod vysokým tlakem, vlivem tepla se rozpíná, vytváří nové trhliny a rozšiřuje stávající spáry. Ty umožňují vodě kontakt s velkým povrchem zahřáté horniny a krom toho se zvětší i jejich objem. Nejefektivnějším způsobem využití geotermální energie z HDR je instalace kogenerační jednotky (KVET), která spojuje výrobu elektrické energie s produkcí tepla pro vytápění okolních objektů.[63]



Obr. 2.13: Princip HDR *(Hot Dry Rocks)*[64]

Studená voda se v případě HDR musí pomocí čerpadla dopravovat jedním vrtem do hloubky, kde se v puklinách horniny ohřívá na danou teplotu až 200 °C. Dalšími vrty se poté už horká voda přivádí zpět na povrch, kde v tepelném výměníku odevzdává své teplo pro výrobu elektřiny. Cílem je, aby oblast mohla poskytovat vodu o požadované teplotě alespoň 30 let. Pokud by teploty klesly pod plánovanou úroveň, výkon geoter-

[63] VOBOŘIL, David. Geotermální energie v ČR.

[64] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

málního zařízení by se snížil a mohlo by dojít až k ukončení činnosti geotermální elektrárny. Je samozřejmě možné postavit blízko této lokace, která je prozkoumaná, novou geotermální elektrárnu, ale s tím se pojí v podstatě většina počátečních nákladů na výstavbu.

Hot Fractured Rock (HFR)

Jedná se o podobný systém jako HDR, akorát jsou horniny už předem rozpraskané samovolně, tedy například v oblastech tektonických pásem. Nevýhodou je nutnost další úpravy horniny hydraulickým štěpením a také to, že danou oblast musíme detailně prozkoumat z důvodu výskytu cirkulujících podzemních vod. V České republice je hydraulické štěpení dokonce dočasně zakázáno. Nevýhodou je také horší ovlivnitelnost ztrát vháněné vody z důvodu rozpraskané horniny.[65]

Tento druh hornin je v České republice přítomen především v oblasti Karlovarska, kde se projevuje prostřednictvím místních horkých pramenů. Teplota vody v Karlovarském vřídle se pohybuje kolem 72 °C. To jej zařazuje mezi nízkoteplotní zdroje podle teplotní klasifikace, ale krom toho je tento zdroj využíván výhradně pro lázeňské účely, a tedy nelze použít pro účely energetické.[66]

2.8.1. Efektivita přeměny na elektřinu

Efektivita přeměny zemského tepla na elektřinu se celosvětově pohybuje kolem 12 % a je silně závislá na teplotě dostupné vody nebo páry. Nejvyšší účinnosti, přibližně 20 %, dosahují systémy využívající horkou páru. S poklesem teploty geotermálního zdroje účinnost klesá. Při teplotě 200 °C je účinnost konverze kolem 17 %, zatímco při 150 °C klesá na necelých 13 %. Systém provozovaný na Aljašce, který pracuje s teplotou 73 °C, dosahuje účinnosti přeměny pouhých 1 %.[67]

[65] VOBOŘIL, David. Geotermální energie.

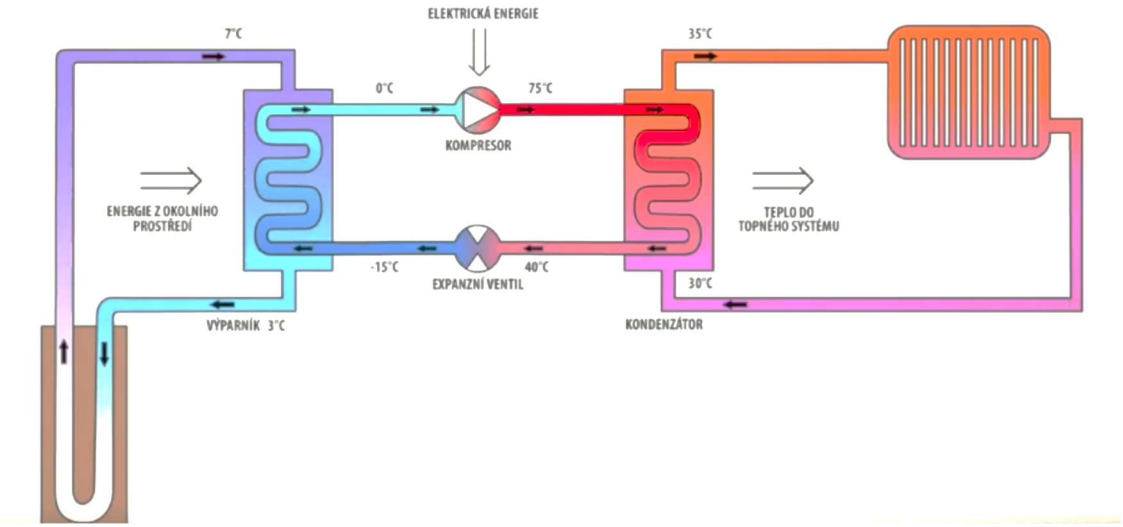
[66] VOBOŘIL, David. Geotermální energie v ČR.

[67] ŠAFANDA, Jan. Jaké jsou možnosti využití geotermální energie v České republice?.

2.9. Tepelná čerpadla

Fenoménem poslední desítky let jsou tepelná čerpadla, která v širší definici získávání energie z vrtu či plošného výměníku splňují označení geotermální zdroj. V posledních letech vzrostlo globální využití zemského tepla při použití tepelných čerpadel o 52 %, přičemž získaná energie dosáhla 91 TWh za rok. To je umožněno zejména schopností tepelných čerpadel čerpat teplo z hloubek těsně pod povrchem, nezávisle na geologických podmínkách a místních teplotách. Nejčastější metody odebírání zemského tepla pro tepelná čerpadla zahrnují svislé tepelné výměníky v 50–150 m hlubokých vrtech a plošné výměníky z trubek uložených ve výkopech 1–2 m pod povrchem.

2.9.1. Princip tepelného čerpadla



Obr. 2.14: Princip tepelného čerpadla[68]

Princip fungování tepelného čerpadla je podobný jako například u ledničky. Tepelné čerpadlo obsahuje výparník, kompresor, kondenzátor a expanzní ventil. Ve výparníku nejdříve dochází k předávání nízkopotenciálního tepla z okolního prostředí teplonosnému kapalnému médiu, to vede k odpařování teplonosné látky, často označované jako chladivo. Po odpaření chladiva se páry této látky adiabaticky stlačují v kompresoru na vyšší tlak, tím se zvyšuje jejich teplota. V kondenzátoru pak dochází k přenosu tepla na další médium, nejčastěji vodu, která se využívá například k vytápění objektu.

[68] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

Při tomto procesu teplota chladiva klesá a chladivo kondenzuje. Následně probíhá expanze chladiva v expanzním ventilu, která způsobí prudké snížení tlaku i teploty. Toto zchlazené chladivo putuje znovu do výparníku. Tím se cyklus uzavírá a chladivo je opět připraveno přijímat teplo z okolního prostředí.

Tepelné čerpadlo se tedy skládá z pomyslných 3 okruhů. Skládá se z primárního okruhu, který zprostředkovává přívod nízkopotenciálního tepla ze zdroje do výparníku. V případě geotermální energie se bude jednat o vrt s teplou vedou. Poté z chladivového okruhu, který umožňuje přesun energie z primárního do sekundárního okruhu a funguje na principu dodávání elektrické energie do kompresoru. A v neposlední řadě ze sekundárního okruhu, který slouží k přenosu tepla v objektu.

2.9.2. Topný faktor

Z hlediska využití primárních zdrojů energie je efektivita tepelných čerpadel pro vytápění budov závislá na jejich topném faktoru, tedy poměru mezi „vyrobenou“ tepelnou energií a energií spotřebovanou na pohon kompresoru.

Topný faktor z definice vypočteme:

$$COP = \frac{Q_2}{W} \qquad (-;\ J;\ J) \tag{5}$$

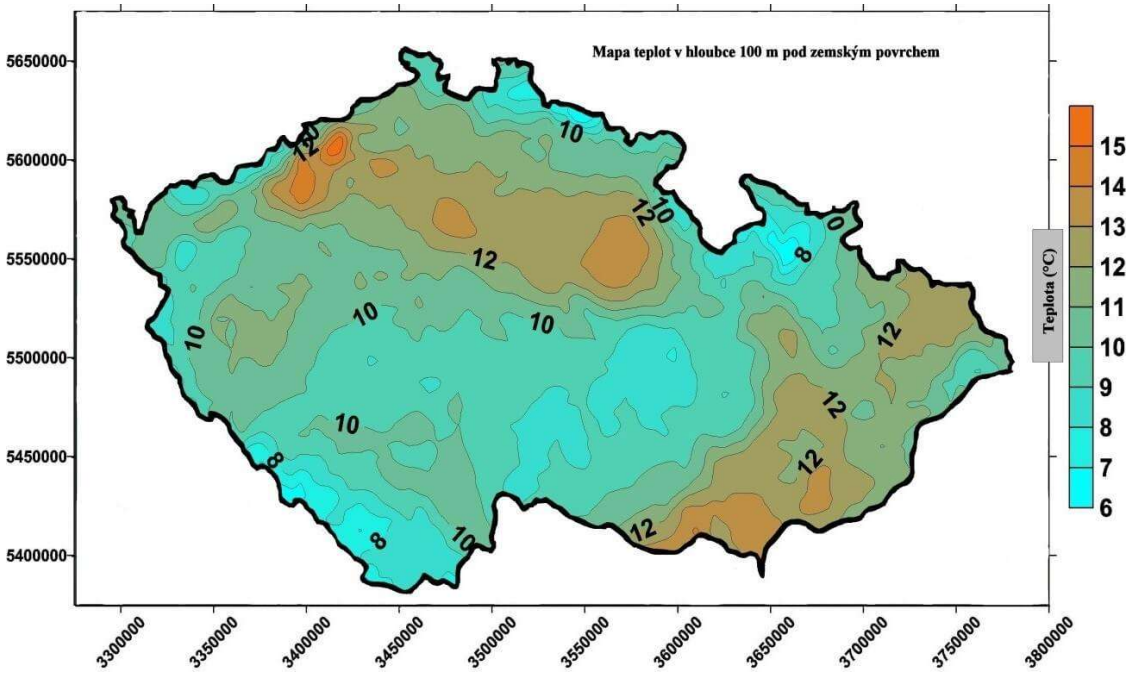
COP je topný faktor, Q_2 je „vyrobené“ odevzdané teplo do sekundárního okruhu a W je práce vykonaná kompresorem. V ideálním případě bez ztrát a 100% účinností musí platit, že odevzdané teplo Q_2 do sekundárního okruhu se musí rovnat součtu tepla přijatého z primárního okruhu Q_1 a práce vykonané kompresorem W.

$$Q_2 = Q_1 + W \qquad (J;\ J;\ J) \tag{6}$$

Průměrný topný faktor současných systémů země-voda je odhadován na 3,5. U nejrozšířenějších elektricky poháněných tepelných čerpadel to znamená, že 71 % dodávaného tepla pochází z geotermálního výměníku a 29 % z elektřiny spotřebované na pohon. Pokud tepelné čerpadlo nahrazuje elektrický kotel s účinností 100 %, dosahuje tedy úspora primární energie 71 %. Při náhradě kotle na fosilní paliva je potřeba zvážit

ale i účinnost tepelných elektráren (energetického mixu) a samotného kotle. Poté může být úspora primární energie 14 až 31 %.[69]

Čím je nižší vstupní teplota v primárním okruhu a vyšší teplota na výstupní straně sekundárního okruhu, tím je topný faktor nižší. Snižuje se účinnost a TČ se stává méně rentabilní. Naopak se zvyšující se teplotou na vstupu a snižující se teplotou na výstupu se hodnota topného faktoru zvyšuje.



Obr. 2.15: Mapa teploty v hloubce 100 m pod povrchem České republiky[70]

Při provozu TČ se svislým výměníkem se ochladí pouze bezprostřední okolí vrtu, a to o několik stupňů Celsia v okruhu 5–10 metrů pod hloubkou sezónních změn. V této hloubce se vytvoří ustálený stav, kdy teplota okolní horniny klesá z roku na rok jen minimálně. Výkonnost systému tak zůstává prakticky nezměněna, což umožňuje jeho dlouhodobý provoz. Využití svislých, mělkých vrtů k chlazení přináší jednoznačné úspory primárních zdrojů energie. Díky teplotám v hloubkách 20–100 m pod povrchem,

[69] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

[70] ŠAFANDA J. Repeated temperature logs from Czech, Slovenian and Portuguese borehole climate observatories.

které se v České republice pohybují mezi 9–13 °C, je možné použít TČ i na přímé chlazení. Použití správně dimenzovaných mělkých vrtů k chlazení v létě a vytápění v zimě nejen výrazně zlepšuje účinnost celého systému, ale také prodlužuje jeho životnost. Ačkoli se podzemní tepelné výměníky využívané v létě k chlazení často nepovažují za využití geotermální energie, jejich implementace vede k významným úsporám energie.

Lídrem v používání tepelných čerpadel v přepočtu na počet obyvatel je Švédsko. V roce 2020 zde bylo v provozu 561 tisíc tepelných čerpadel napojených na podzemní tepelné výměníky. Roční zisk geotermálního tepla je tedy vyšší než 30 TWh. To stačí na vytápění 35 % domácností Švédska.[71] V České republice je odhadováno 27,8 tisíc tepelných čerpadel typu země-voda, která jsou napojena na podzemní tepelné výměníky. Oproti tomu přes 200 tisíc čerpadel využívalo teplo z venkovního vzduchu, tedy se jednalo o čerpadla typu vzduch-voda. Ministerstvo průmyslu a obchodu zjistilo, že roční dodávky tepelných čerpadel země-voda na český trh se v posledních letech pohybují kolem 2,2 tisíce a jejich počet příliš neroste, zatímco dodávky čerpadel vzduch-voda rostou a v roce 2023 dosáhly téměř 53 tisíc. Ve srovnání s podobně velkým Švédskem je ale instalací 2,5krát méně. Nejvýkonnější systém tepelných čerpadel v ČR, s výkonem 2 x 3,28 MWt, je provozován v Děčíně a využívá geotermální vodu o teplotě 30 °C z hloubky 550 m, která proudí v množství 54 $l.s^{-1}$. Tento systém slouží jako centrální zdroj tepla pro část města.[72]

[71] KLOZ, Martin, Antonín TYM a Štěpán CHALUPA. Země má energie na rozdávání, proč ji využíváme tak málo a jak to změnit?.

[72] ŠAFANDA, Jan. Jaké jsou možnosti využití geotermální energie v České republice?.

3. Energetické využití zdroje geotermální energie ve světě

Na celém světě je v provozu přes 260 elektráren a tepláren využívajících geotermální energii. Tyto zařízení se nacházejí v celkem 25 zemích a dosahují celkového instalovaného elektrického výkonu 16 GWe v roce 2023. Roční přírůstek je poté přibližně 350 MWe.[73] Koeficient využití výkonu je průměrně 70 %.

Země	MWe
USA	3 722
Indonésie	2 276
Filipíny	1 918
Turecko	1 710
Nový Zéland	1 035
Mexiko	963
Itálie	944
Keňa	861
Island	754

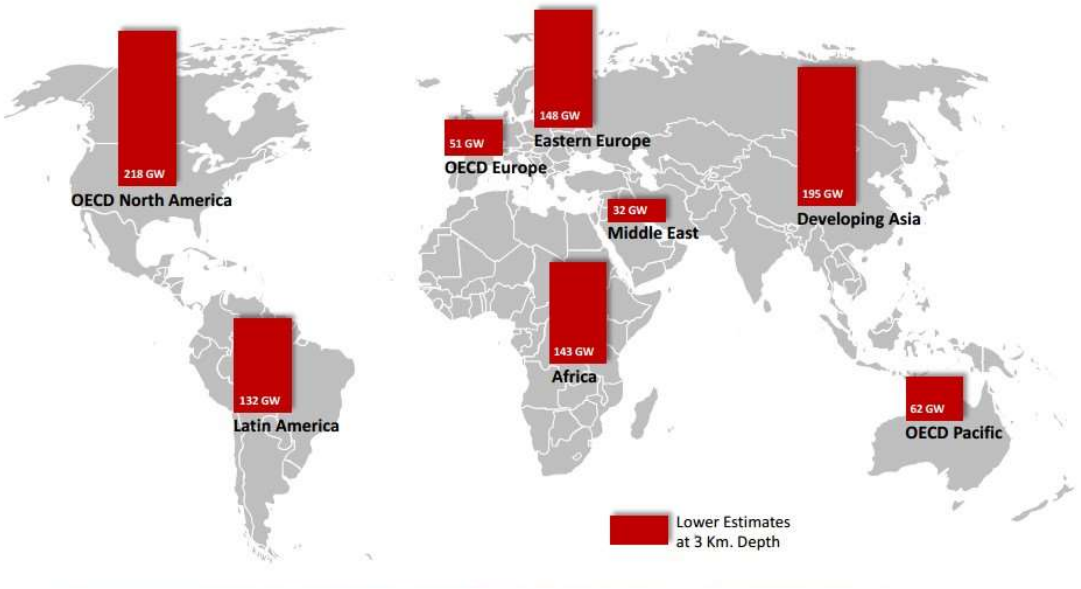
Tab. 3.1: Státy s největší instalovanou kapacitou výroby elektřiny z geotermální energie[74]

V tabulce 3.1 jsou znázorněny státy s největší instalovanou kapacitou výroby elektřiny z geotermální energie na světě dle zdroje z roku 2022. Z tabulky lze vidět, že na prvním místě se drží USA s 3,7 GWe, na druhém a třetím místě následuje Indonésie a Filipíny. Dále lze vidět, že v Evropě je největším producentem geotermální energie Itálie, na druhém místě je následovaná Islandem. Kromě Ruska s 76 MWe na Kamčatce a Portugalska s 31 MWe na Azorských ostrovech se zabývá výrobou geotermální elektřiny v Evropě ještě Francie s 22 MWe, Německo s 50 MWe, Rakousko s 1 MWe a Rumunsko s 0,1 MWe. Kromě zmíněného francouzského případu všechny geotermální elektrárny v Evropě využívají hydrotermální systém. Tento způsob využití je v případě vhodných geologických podmínek nejjednodušší a nejlevnější.

[73] ŠAFANDA, Jan. Jaké jsou možnosti využití geotermální energie v České republice?.

[74] THINKGEOENERGY. Geothermal Energy Production & Utilisation

Celosvětová produkce elektrické energie z geotermálních zdrojů tvoří méně než 0,5 % globální energetické spotřeby. Také se udává, že z celkového potenciálu geotermální energie je ve světě využito jen 1 %.[75] Optimistický scénář rozvoje geotermálních elektráren očekává pro rok 2050 výkon až 140 000 MWe a tedy asi 8% podíl na celosvětové výrobě elektřiny.[76]



Obr. 3.1: Potenciál geotermální energie ve světě[77]

Na obrázku si můžeme všimnout, že největší potenciál geotermální energie má severní Amerika s 218 GWt. Následuje Asie s 195 GWt, poté Afrika, východní Evropa a jižní Amerika. Pevninská Evropa má potenciál relativně malý, a to 51 GWt.

3.1. Island

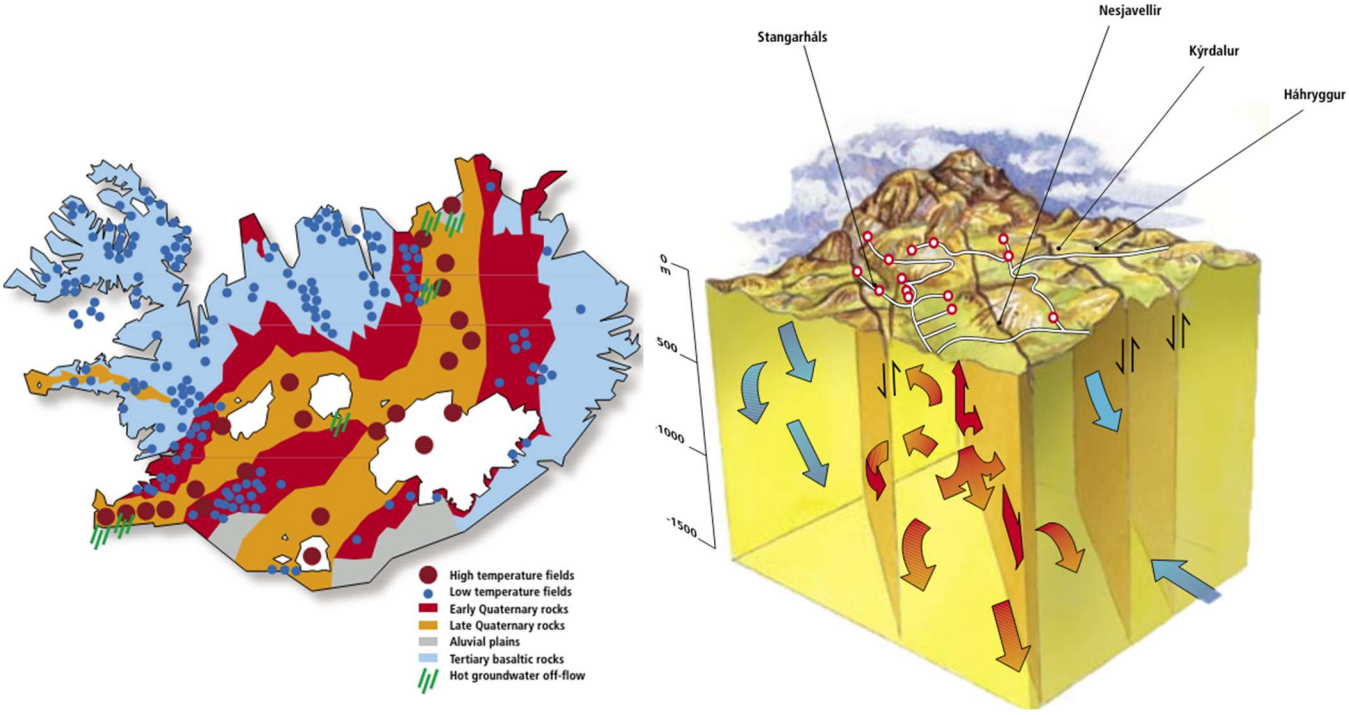
Island je ostrov, který leží na části 2 kontinentálních desek. Island je geologicky součástí středoatlantického hřbetu, což je oblast, kde se formuje nová oceánská kůra. Tato část středoatlantického hřbetu je jedinou částí, která se nachází nad hladinou moře. Hřeben poté představuje hranici mezi eurasijskou a severoamerickou deskou. Island tedy vznikl

[75] VOBOŘIL, David. Geotermální energie.

[76] ŠAFANDA, Jan. Jaké jsou možnosti využití geotermální energie v České republice?.

[77] VOBOŘIL, David. Geotermální energie.

díky riftingu (posuvu litosférických desek) a intenzivnímu vulkanismu podél tohoto hřebene.[78] Island je geologicky velmi aktivní oblastí, což se projevuje přítomností četných sopek jako Hekla, Eldgjá, Herðubreið a Eldfell. Sopečná erupce Laki v letech 1783–1784 měla devastující dopad, místní orná půda už tak omezená (0,7 % z Islandu) byla nejneobhospodařovávatelnější, úroda byla zničena, a to způsobilo hladomor, který vedl k úmrtí téměř čtvrtiny obyvatelstva.[79]



Obr. 3.2: Vlevo vysokoteplotní a nízkoteplotní zóny na Islandu, vpravo nejaktivnější oblast [80]

Tedy můžeme hovořit o Islandu jako „ráji“ geotermální energie, ale být v sopečně aktivní oblasti může být i velice nebezpečné. Například v roce 2010 vybuchla sopka v Eyjafjallajökull a 600 lidí muselo uprchnout ze svých domovů. Velké erupce jsou přitom přítomné několikrát do roka. Ročně je také přítomno deseti tisíce zemětřesení, některé dosahují až střední závažnosti na Richterově stupnici. Je zde totiž přes 200 sopek a přes 600 termálních pramenů. Na Islandu se také nachází množství horkých jezírek, jejichž teplota se pohybuje mezi 20 až 150 stupni Celsia.

[78] ICELAND.IS. Geology of Iceland.

[79] ABER, James. Late Holocene climate.

[80] REYKJAVÍK ENERGY. *Nesjavellir POWERPLANT*.

Ale z pohledu geotermální energie je Island rájem. Energie zde slouží k vyhřívání obytných domů, skleníků, veřejných budov a bazénů. Dokonce se používá k vyhřívání chodníků, aby se v zimě nemusely tolik upravovat. Díky geotermální energii jsou zde pěstovány banány a další tropické a subtropické ovoce. Uvádí se, že až 85 % islandských domů je vyhříváno pomocí této energie. Vrty dosahují hloubky jen několik set metrů díky dobrým geotermickým podmínkám, a tím se podíl ceny vrtů na celkových nákladech snižuje. Díky tomu tvoří geotermální elektrárny přes 50 % všech energetických zdrojů. Vodní elektrárny jsou zastoupeny s 20 %, fosilní paliva z 15 %. Vodní energie pochází z ledovcových řek a vodopádů, jež jsou na ostrově také velmi časté.[81] Fosilních paliv se Island pomalu zbavuje a nahrazuje je vodíkovou technologií a vodíkovými články.

Nutno ale podotknout, že se do toho započítává energie obecně, tedy i ve velké míře teplo. Pokud budeme zkoumat čistě výrobu elektrické energie, vodní elektrárny násobně převyšují výrobu z geotermálních zdrojů a jsou hlavním zdrojem elektřiny na ostrově se 75% zastoupením.[82] Zbylých 25 % tvoří tedy geotermální elektrárny. Island v roce 2013 instaloval i 2 větrné turbíny o celkovém výkonu 1,8 MWe a odhadnutou budoucí vyrobenou roční energií 5,4 GWh[83], ale nebylo dohledáno, že by tyto zdroje byly aktivně využívány.

V roce 2011 byla celková spotřeba elektrické energie na ostrově 17 210 GWh a zároveň se stal Island největším světovým výrobcem tzv. zelené energie v přepočtu na obyvatele.[84] Na druhém místě se pro zajímavost umístilo Norsko a poté Kanada. Z toho ročně geotermální elektrárny vyrobí přibližně 4 600 GWh elektřiny.[85] Celková instalovaná kapacita geotermální energie Islandu je 665 MWe.

[81] Sveinbjorn Bjornsson, Geothermal Development and Research in Iceland

[82] ASKJAENERGY. The Energy Sector.

[83] ASKJAENERGY. Landsvirkjun becomes wind power operator.

[84] ASKJAENERGY. Icelandic energy basics.

[85] VOBOŘIL, David. Geotermální energie.

Obr. 3.3: Geotermální elektrárna Nesjavellir na jihu Islandu[86]

Nesjavellir je největší geotermální elektrárna na Islandu, produkuje 120 MW elektrické energie a zároveň ohřívá 1 800 litrů vody za minutu, tedy výkonem 300 MWt. Celková cena elektrárny v roce 2000 byla necelých 8 miliard korun.[87] Bylo zde provedeno 26 hloubkových vrtů v hloubkách od 1 000 do 2 000 metrů a teplota v této hloubce dosahovala až 380 °C.[88] Měření a odhady předpovídají dobré tepelné podmínky pro využívání elektrárny na více než 30 let.

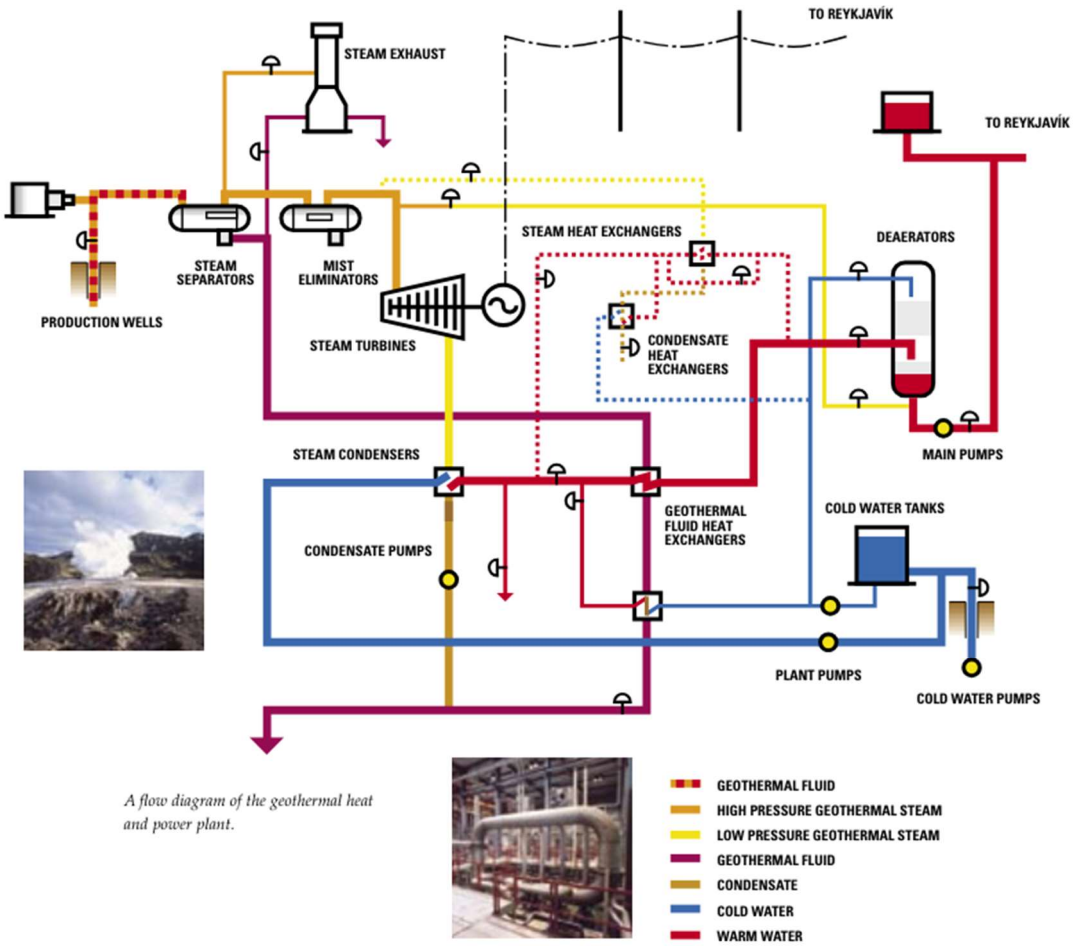
Tepelná energie vyrobená z této elektrárny je poté pumpována 90 cm trubkou schopnou přenést až 1 870 litrů za sekundu o teplotě do 100 °C do hlavního města Reykjavík. Délka trubky činí 23 kilometrů a jsou do ní také zapojeny ostatní geotermální zdroje. Vodě tato cesta trvá přibližně 7 hodin a její teplotní ztráta jsou pouhé 2 °C.[89]

[86] POJAR, Petr. Příprava prvního geotermálního projektu v ČR trvala 20 let, vrty budou hluboké až 4 km.

[87] REYKJAVÍK ENERGY. *Nesjavellir POWERPLANT*.

[88] Tamtéž

[89] Tamtéž



Obr. 3.4: Elektrárna Nesjavellir schéma[90]

Na tomto obrázku si můžete všimnout schématu fungování geotermální elektrárny Nesjavellir. Cyklus využití energie může být rozdělen do tří fází na odběr a zpracování páry z vrtů, ohřev studené vody ze zásobníků a výrobu elektřiny. Nejdříve se pára smíchaná s vodou dopravuje z vrtů přes sběrné potrubí do separátoru, kde se voda oddělí od páry. Nevyužitá voda putuje mimo separátor. Pára pokračuje do elektrárny při tlaku přibližně 12 barů a teplotě 190 °C. Pára je dopravována k turbíně, kde se vyrábí elektřina. Každá turbína vyrábí 30 MWe elektřiny. V kondenzátoru se následně pára využívá k předehřevu studené vody, která bude sloužit pro rozvod tepla. Tato voda se poté dohřeje v druhém výměníku pomocí nevyužité vody ze separátoru.

[90] REYKJAVÍK ENERGY. *Nesjavellir POWERPLANT*.

Studená voda se odebírá z pěti vrtů a čerpá se do vodních nádrží u elektrárny. Voda se ohřívá na 85-90 °C. Studená voda ale obsahuje rozpuštěný kyslík, který způsobuje korozi oceli, proto se tato voda vaří při nízkém tlaku a tím se rozpuštěný kyslík uvolňuje.[91]

3.2. Itálie

Itálie je známá svou geotermální produktivitou díky oblasti Larderello. V oblasti dochází k občasným erupcím a je možno pozorovat krátery o průměru 30-250 m. Největší z nich je kráter Lago Vecchienna, který naposledy vybuchl kolem roku 1282 a nyní je vyplněn jezerem. Je to tedy místo přímo vhodné pro výrobu geotermální energie jako hydrotermální zdroj s parou o teplotě až 202 °C. Navzdory všeobecnému přesvědčení není Larderello sopkou, protože zde nikdy v historii nedošlo k erupci magmatu.[92]

Už starověcí Římané využívali tyto sirné prameny ke koupání. V roce 1827 Francouz François Jacques de Larderel vynalezl způsob získávání kyseliny borité z bahna pomocí kotlů zahřívaných párou. Na počest Larderelova díla bylo založeno město pojmenované Larderello, kde byli ubytováni dělníci z továrny na výrobu této kyseliny. V roce 1904 byl postaven první generátor využívající geotermální energii, který produkoval 10 kWe a bylo tím napájeno 5 klasických žárovek. Jednalo se tedy o první geotermální elektrárnu na světě.

V roce 1911 se poté začala budovat velká elektrárnu. Elektrárna využívala binární systém.[93] V této lokaci je pára z geotermálních vrtů příliš kontaminovaná rozpuštěnými plyny a minerály síry na to, aby mohla efektivně pohánět parní turbínu. Místo toho prochází tepelným výměníkem, kde zahřívá vodu a vytváří páru, která následně roztáčí onu turbínu. Tím se vyřeší problém se znečištěním vody z vrtu. Tato elektrárna byla dokončena za 2 roky, měla instalovaný výkon 250 kWe, zásobovala železnici a obce Larderello a Volterra. [94]

---

[91] REYKJAVÍK ENERGY. *Nesjavellir POWERPLANT*.

[92] ANDREWS, Robin George. An Italian Volcano Turned Out to Be a Fraud.

[93] GEOTERMIE. Technologie pro geotermální elektrárny.

[94] UNWIN, Jack. The oldest geothermal plant in the world.

Obr. 3.5: Geotermální elektrárna Larderello[95]

Elektrárna byla v průběhu let postupně rozšiřována a nyní je oblast Larderello tvořena 34 elektrárnami s 37 výrobními jednotkami a celkovou kapacitou 800 MWe. Nejvýkonnější z nich se jmenuje Valle Secolo, její výkon je 120 MWe instalovaných. Elektrárna se skládá ze dvou identických sekcí, každá o výkonu 60 MWe. Každá obsahuje tedy vlastní kondenzační parní turbínu spojenou s dvoupólovým synchronním alternátorem. Výstupním napětím je pro zajímavost 15 kV.

Obr. 3.6: Larderello – krátery[96]

[95] UNWIN, Jack. The oldest geothermal plant in the world.

[96] Tamtéž

Výrobní cyklus nevyžaduje žádný odběr povrchové vody pro chlazení. Jediný vodní zdroj pochází z geotermálního procesu a tvoří ho asi 40 % kondenzátu geotermální páry, který je reinjektován bez jakéhokoli kontaktu s hladinou povrchové vody. Vše je monitorováno v reálném čase, což přispívá k bezpečnosti a kontrole životního prostředí a řízení oblasti.[97] Současná elektrárna Larderello ročně vyrobí až 4 800 GWh energie. Díky elektrárně Larderello je Itálie pátým největším producentem geotermální energie na světě, přičemž geotermální energie tvoří 2 % energetického mixu této země.[98]

3.3. Německo

V Německu byla první geotermální elektrárna postavena ve městě Neustadt-Glewe nacházejícím se mezi Berlínem a Hamburkem. Tato elektrárna, která pracuje na principu ORC, byla spuštěna v roce 2003 a její výkon činí 230 kWe. Ve stejné lokalitě se od roku 1994 nachází také geotermální teplárna s tepelným výkonem 10,4 MWt. Od roku 2007 byly v Německu uvedeny do provozu další dvě geotermální elektrárny, jejichž vrty dosahují hloubky až 3,5 km.[99]

Německo plánuje do roku 2030 zdesetinásobit dodávky tepla z geotermálních tepláren. Německý kancléř Olaf Scholz při návštěvě budované geotermální teplárny v Bavorsku uvedl, že geotermální energie by měla hrát v Německu významnější roli, do roku 2030 by se objem tepla dodaného z geotermálních tepláren mohl zvýšit až na desetinásobek. Tento projekt v Bavorsku by tedy měl vyrábět 64 MW tepelné a 8,2 MW elektrické energie. Náklady na stavbu se odhadují mezi 250 a 300 miliony eur, z nichž technologický fond Evropské komise přispěje 100 miliony eur. Tato geotermální elektrárna bude poté zajišťovat teplo pro města Geretsried a Wolfratshausen prostřednictvím dálkového vytápění.

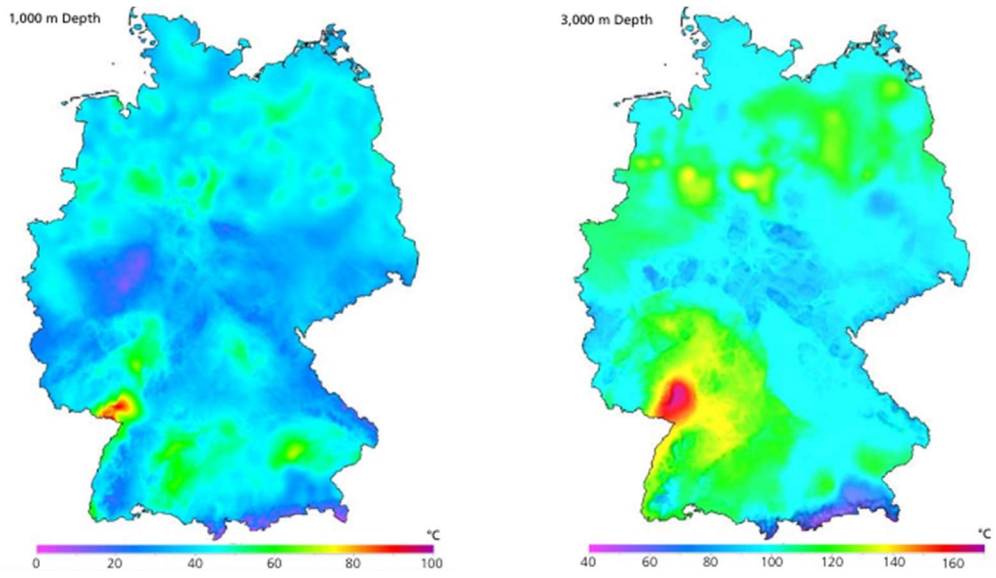
[97] ANDREWS, Robin George. An Italian Volcano Turned Out to Be a Fraud.

[98] UNWIN, Jack. The oldest geothermal plant in the world.

[99] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

Podle loňské studie Fraunhoferova institutu mají hlubinné geotermální zdroje Německa potenciál dodávat až 300 TWh tepelné energie ročně, což by výrazně podpořilo dekarbonizační cíle Německa. Růst podílu geotermální energie je totiž klíčový pro zvýšení podílu obnovitelných zdrojů energie.

Vhodné geologické útvary pro geotermální využití v Německu lze nalézt například v sedimentárních horninách v jižním Německu a v celém západním a severním Německu. Jen v tepelně náročném regionu Rýn-Ruhr je teoreticky využitelný potenciál geotermálních hydrotermálních systémů 20krát vyšší než současná potřeba tepla v celé zemi. Ale podobně jako v ČR je mnoho lokalit nedostatečně prozkoumáno. Energetický průmysl a politici v minulosti neprojevovali dostatečný zájem o tuto oblast energetiky a geologické služby spolkových zemí neměly dostatek prostředků. Je ale v plánu se do geotermální energie zapojit, jednotlivé obce se mají rozhodnout, jestli chtějí na dekarbonizaci využít geotermální energii a tam bude případně docházet k následnému rozvoji. Města nad 100 tisíc obyvatel by měla tyto plány předložit do poloviny roku 2026, menší města a obce do poloviny roku 2028.[100]



Obr. 3.7: Teploty v Německu v hloubce 1 a 3 km[101]

[100] O ENERGETICE. Německo chce do roku 2030 zdesetinásobit dodávky tepla z geotermálních tepláren.

[101] BRACKE, R. a E. HUENGES. *ROADMAP FOR DEEP GEOTHERMAL ENERGY FOR GERMANY*.

Na obrázku nelze přehlédnout nejteplejší oblast v hloubce 3 000 metrů v Německu. Jedná se o Hornorýnský hřbet. Hornorýnský hřbet se rozkládá podél Rýna mezi švýcarskou Jurou na jihu a Taunem na severu. Šest v současnosti komerčně provozovaných výtopen vyrábí horkou termální vodu především z hornin o teplotě od 130 °C do 180 °C. V této oblasti se nalézají také puklinové oblasti v podloží, které lze použít jako zásobníky tepla s celkovým potenciálem až 10 TWh za rok.[102]

Na rozdíl od geotermicky bohatých regionů jako je Island nebo Sicílie, musí se ve střední Evropě vrtat do mnohem větších hloubek, aby se dosáhlo podobných teplot. V Německu se výzkumy vrtů soustředily právě na oblast Rýnské pánve, kde se v hloubce 3 000 metrů nacházejí teploty kolem 150 °C. Průměrný teplotní nárůst v celé zemi činí 3 °C na 100 metrů, tedy ve 3 000 metrech dosahuje teplota přibližně 90 °C, což odpovídá obrázku mapy. Na Islandu jsou pro představu podobné teploty již v hloubce menší než 100 metrů.

3.4. Francie

V současnosti se ve Francii nachází asi 70 geotermálních tepláren, z nichž zhruba 80 % se nachází v okolí Paříže. Tyto teplárny zásobují teplem více než 200 000 bytů. Typická geotermální jednotka ve Francii zahrnuje dva vrty o hloubce přibližně 1,7 km, jeden slouží k čerpání vody, druhý k jejímu doplňování. Jednotlivé vrty jsou od sebe vzdálené asi 5 až 10 km. Tepelná kapacita těchto jednotek dosahuje až k 10 MWt a voda zde cirkuluje rychlostí 40 až 80 litrů za sekundu.[103]

3.5. USA

V roce 1847 bylo v údolí Napa v Kalifornii objeveno geotermální pole známé jako The Geysers. První vrty zde byly provedeny v roce 1920 a elektřina z páry se začala vyrábět v roce 1960. V současnosti je zde 20 hlubinných vrtů o hloubce 2-3 km (nejhlubší dosahuje 3,2 km), které produkují až 10 MW elektrické energie. Tyto vrty generují 1-2 mili-

---

[102] BRACKE, R. a E. HUENGES. *ROADMAP FOR DEEP GEOTHERMAL ENERGY FOR GERMANY*.

[103] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

ony kg přehřáté páry o teplotě 250 °C za hodinu, přičemž efektivita výroby tepelné energie je kolem 15 %. Tím se stává The Geysers největším producentem energie z geotermálních zdrojů na světě, s celkovým počtem 600 vyhloubených vrtů a 22 elektráren s celkovým výkonem 1 517 MWe[104] a roční výrobou 6 516 GWh.[105]

Další oblastí v USA je například Imperial Valley. Tyto oblasti využívají páru z podzemních rezervoárů přímo, to umožňuje přímé využití tepla bez potřeby dalších tepelných výměníků. Ve zbytku USA ale většina geotermálních elektráren využívá zejména binární cyklus. Tento systém je ideální pro geotermální zdroje s nižšími teplotami, které jsou v USA rozšířené. Tedy fungují tak, že horká voda ohřívá sekundární pracovní médium s nižším bodem varu, která umožňuje efektivnější konverzi tepla na elektrickou energii.[106]

3.6. Slovensko

I na Slovensku je několik lokalit, které se se jeví jako nadějné pro využití geotermální energie. Plánuje se zde výstavba prvních geotermálních elektráren s kapacitou až 20 MWe v blízkosti Žiaru nad Hronom. Tento projekt nedávno získal majetkovou podporu od vlastníka Stredoslovenské energetiky. Očekává se, že první elektrárna zahájí provoz v roce 2026.[107]

[104] GEYSERS. *About Geothermal Energy*.

[105] GEOTERMIE. Přehled: geotermální elektrárny v USA. Je jich 31.

[106] GEYSERS. *About Geothermal Energy*.

[107] TRAMBA, David. Čekání na první geotermální elektrárnu v Česku. Potenciál by tu byl.

4. Energetický potenciál a využití geotermální energie v ČR

V České republice neexistuje žádné naleziště horké vody, které by bylo vhodné pro výrobu elektrické energie. Prameny horké vody, které vyvěrají v lázeňských městech, nejsou vhodné pro komerční využití v této oblasti, krom toho jejich teplota například v Karlových Varech dosahuje pouhých 72°C.[108] Je tedy problematické vymyslet, jaké projekty mohou být ekonomicky i technicky proveditelné. Vzhledem k podobným podmínkám pro výstavbu geotermální elektrárny na různých místech České republiky se odhaduje investice na 1,4 miliardy korun s návratností mezi 25 až 30 lety. Taková elektrárna by měla být schopna dodávat přibližně 50 MW tepelné energie a 5 MW elektrické energie.

V České republice se tedy zdá jako nejefektivnější metoda výroby geotermální elektřiny především metoda HDR. Hydro-geotermální zdroje jsou zde k dispozici v omezené míře a jejich teplota je relativně nízká, jejich využití jsou maximálně tedy pouze teplárenské aplikace. Na druhé straně jsou zdroje typu HFR, ty jsou ale ještě méně běžné a využívají se především pro lázeňské účely.[109] Jedinou možností zůstává tedy technologie HDR, která je ale velmi nákladná a nepříliš prozkoumaná, zejména pro vrty velkých hloubek.[110]

V České republice měli investoři vyhlídnuté desítky lokalit pro potenciální výstavbu geotermálních elektráren, ale realizace těchto projektů byla nejistá kvůli nedostatečného zisku. Banky se také zdráhali investovat do tohoto rizikového sektoru, protože není díky novým hromadně nepoužívaných technologií moc prozkoumaný.

---

[108] VOBOŘIL, David. Geotermální energie.

[109] VOBOŘIL, David. Geotermální energie v ČR.

[110] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

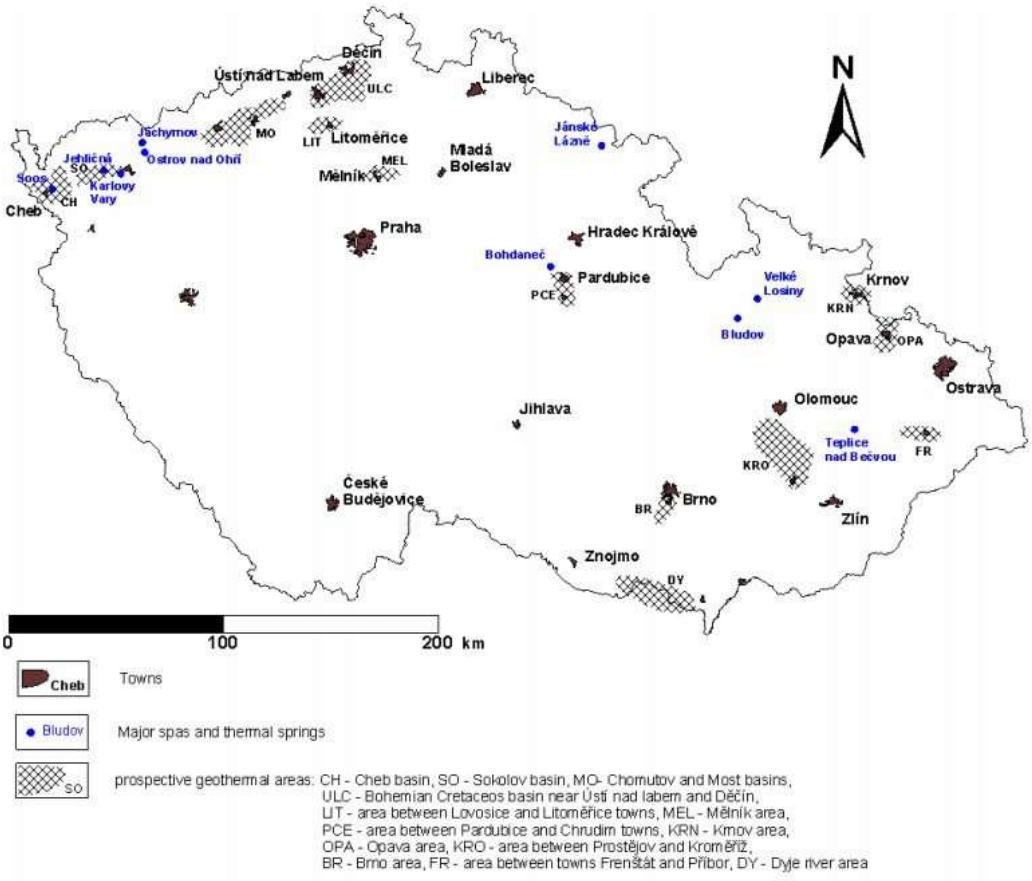
4.1. Momentální využití geotermální energie v ČR

Česká republika zaostává ve využijí geotermální energie, v ČR zatím není ani jedna geotermální elektrárna. Do roku 2030 bylo plánováno, že by v Česku mohlo vzniknout pět geotermálních elektráren a deset výtopen. Ministerstvo životního prostředí připravuje strategii pro rozvoj tohoto zdroje energie, který je zatím využíván primárně v tepelných čerpadlech pro domy a menší průmyslové stavby. Jako větší geotermální projekty je v ČR realizováno pouze vytápění zoologické zahrady v Ústí nad Labem nebo výtopna v Děčíně.[111]

Na našem území dosud není v provozu žádná geotermální elektrárna. Když Nezávislá energetická komise (NEK I) ve své zprávě z roku 2008 předpokládala zprovoznění první geotermální elektrárny v České republice v roce 2011 a odhadovala roční produkci na 0,29 TWh v roce 2018, skutečnost se ukázala být zcela mylná. Ačkoli Národní akční plán pro energii z obnovitelných zdrojů Ministerstva průmyslu a obchodu ČR z konce roku 2015 očekával spuštění první geotermální elektrárny v roce 2018 s roční výrobou 0,04 TWh, nebyl proveden žádný geotermální vrt za tímto účelem.[112] Všechny pokusy zatím byly neúspěšné a otázkou zůstává, jestli se aktuální projekty z následující kapitoly doberou pozitivního konce.

[111] ČTK. *ČTK: Česko zaostává ve využití geotermie, do r. 2030 by mohly vzniknout první elektrárny*.

[112] POJAR, Petr. Příprava prvního geotermálního projektu v ČR trvala 20 let, vrty budou hluboké až 4 km.



Obr. 4.1: Výskyt lázní a horkých pramenů v ČR[113]

Na obrázku si můžeme všimnout jednotlivých lázní a horkých pramenů v České republice. Můžeme si všimnout, že odhadnuté dobré lokality pro geotermální elektrárnu korespondují s lokalitou geotermálních pramenů. Tato mapa pochází z roku 2015 a tedy tam například není zastoupeno mnoho „objevů“ dobrých lokalit jako například v Českých Budějovicích.

Je zdůrazňována rostoucí důležitost geotermální energie s ohledem na příklon k obnovitelným zdrojům energie, zejména pro vytápění menších a středních měst. Největší potenciál je v mělké geotermální energii, konkrétně v tepelných čerpadlech. Podle studií má největší potenciál pro geotermální energii severní Morava, Semilsko, Liberecko, Podkrušnohoří, Ašsko a Českobudějovicko. Zjištěný potenciál v České republice je

[113] VOBOŘIL, David. Geotermální energie v ČR.

podle oborových zástupců zhruba evropský průměr.[114] Česká republika zatím patří mezi nejméně rozvinuté země v Evropě v oblasti geotermální energie, a to i přesto, že má srovnatelný potenciál s většinou evropských států. Tím přichází o významnou příležitost snížit emise skleníkových plynů, zvýšit podíl obnovitelných zdrojů energie, dosáhnout klimatických cílů a zároveň posílit vlastní energetickou bezpečnost a nezávislost.[115]

4.2. Energetický potenciál geotermální energie v ČR

V České republice lze geotermální vrt vyhloubit téměř kdekoliv. Lokalit je mnoho, potenciál této technologie je značný. Existují jak hluboké, tak mělké geotermální systémy, které se liší podle typu půdy a použité technologie. Na základě těchto faktorů může být geotermální energie využita buď pouze k vytápění, nebo přímo k výrobě elektřiny. Možnosti pro hloubení vrtů jsou v oblasti Českého středohoří, východních Čech, Pardubicka, Beskyd a jižní Moravy, poté také v okolí Plzeňska. Až na malé výjimky nenajdeme v Česku místo, kde by se nedaly vrty hloubit.[116] Podle studie, kterou představili zástupci Geofyzikálního ústavu Akademie věd ČR a České geologické služby, mají severovýchodní Čechy, Poohří, okolí Českých Budějovic a východní Morava nejlepší podmínky pro využívání geotermální energie.[117]

Geofyzikální ústav Akademie věd ČR a České geologické služby pracoval tři roky na projektu, který byl financována částkou 7 milionů korun. Pomocí dat ze starších vrtů vytvořili veřejně přístupnou aplikaci, umožňující ověřit potenciál geotermální energie do hloubky 5 kilometrů a zkontrolovat možné střety zájmů s ochranou přírody, podzemních vod a stavbami na povrchu.[118]

---

[114] ČTK. *ČTK: Česko zaostává ve využití geotermie, do r. 2030 by mohly vzniknout první elektrárny*.

[115] ROZSYPALOVÁ, Michaela. Geotermální projekt pokračuje: Vrtná souprava se zakousla do země v Jiříkových kasárnách.

[116] ELEKTŘINA.CZ. Geotermální energie: Jakou budoucnost má v Česku?: Jakou budoucnost má v Česku?.

[117] TRAMBA, David. Čekání na první geotermální elektrárnu v Česku. Potenciál by tu byl.

[118] Tamtéž

V mnoha lokalitách se objevily pozitivní výsledky, zejména ty pro Jižní Čechy, Broumovsko a Pardubicko. Nejslabší lokality naopak byly Vysočina, Plzeňsko a oblast Jeseníků. Nicméně, přechod od zmapování potenciálu ke komerčnímu využití geotermální energie je stále na počátku.[119]

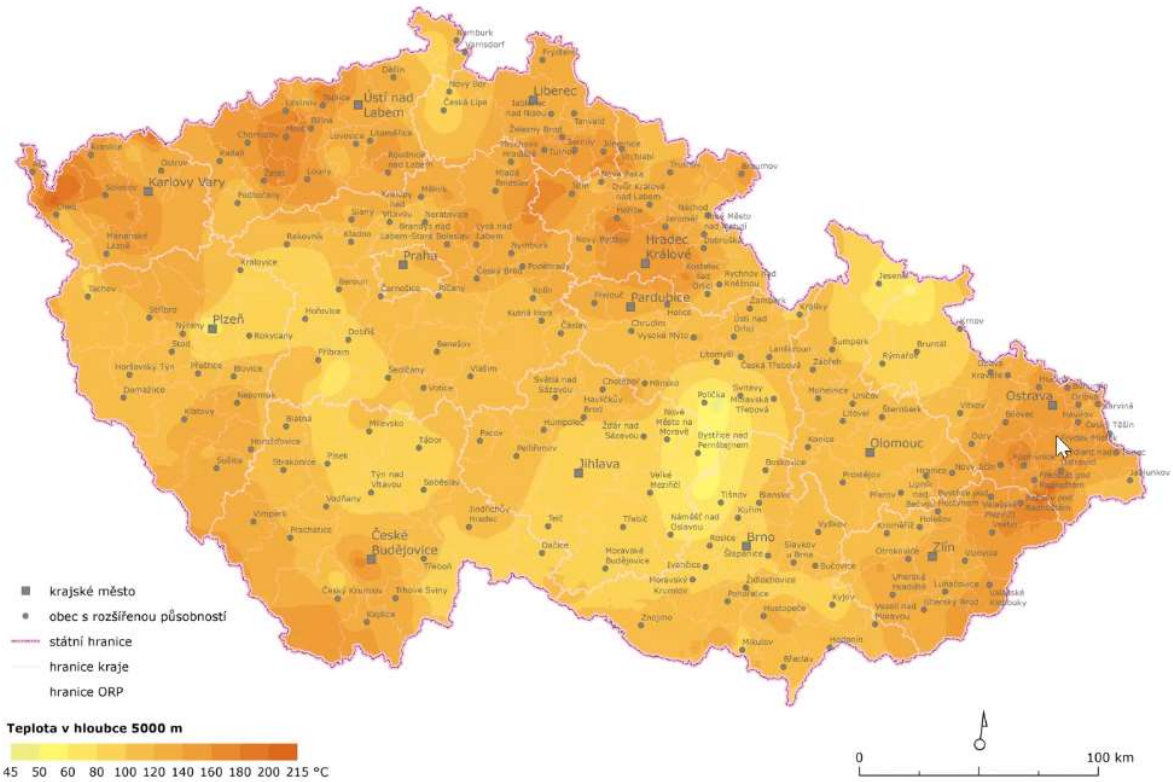
Tato aplikace vizualizuje geotermální potenciál a omezující faktory na území České republiky. Geotermální potenciál je zobrazen prostřednictvím mapových vrstev, které ukazují teplotní rozložení (ve °C) v různých hloubkách od 400 m do 5000 m. Aplikace zahrnuje také tematické vrstvy představující omezení a střety zájmů. Tato omezení mohou být způsobena přírodními riziky, jako jsou záplavová území, oblasti s rizikem sesuvů a nestabilním podložím, technickými omezeními, například existující infrastrukturou či těžbou surovin, a legislativními překážkami, jako je ochrana přírody a vod. I když aplikace zahrnuje většinu běžných omezení, mohou existovat i další faktory, které nejsou zahrnuty. [120]

Geotermální mapy byly vytvořeny na základě měření z 362 hlubokých vrtů v ČR a přilehlých oblastech. Byla využita znalost o hloubkovém a prostorovém rozsahu sedimentárních pánví a geologické stavbě území. Vzhledem k nerovnoměrnému rozmístění vrtů je přesnost větší v jejich blízkosti a přesnost menší ve větší vzdálenosti.[121]

[119] TRAMBA, David. Čekání na první geotermální elektrárnu v Česku. Potenciál by tu byl.

[120] ČGS. Geotermální potenciál ČR.

[121] Tamtéž

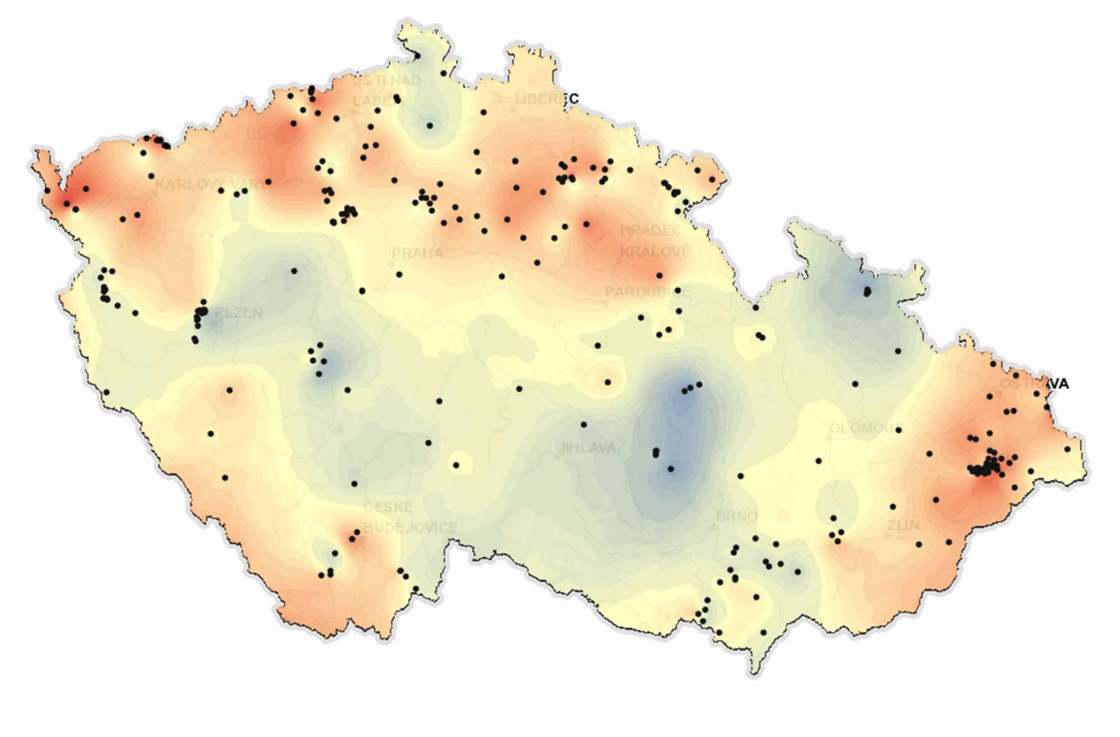


Obr. 4.2: Potenciál geotermální energie v Česku v hloubce 5000 metrů[122]

Na tomto obrázku si můžeme všimnout, že v Českých Budějovicích je například v hloubce 5 km teplota 175 °C, respektive nejvyšší teplota je v obci Mokré. V okolí Českých Budějovic je teplota 140 °C.[123] Nejvyšší teploty v 5 km hloubce dosahují Františkovy lázně, kde teplota dosahuje 215 °C. Oproti tomu například Plzeňsko dosahuje pouze teploty 76 °C. Je tedy patrné, že na lokalitě záleží a rozdíly mohou dosahovat až 175 °C. Nicméně pokud by byla technologie geotermálních elektráren ekonomicky i technologicky výhodná, velmi dobrých míst by bylo v ČR mnoho. Při nejmenším by se tato energie dala v mnoha lokalitách využít lokálně jako tepelná energie, na ohřev vody, na vytápění. A v lokalitách s vyšší teplotou by se dala využít na výrobu elektřiny, která by v menší míře, ale nezanedbatelně doplnila energetický mix o čisté zdroje energie.

[122] TRAMBA, David. Čekání na první geotermální elektrárnu v Česku. Potenciál by tu byl.

[123] KLOZ, Martin, Antonín TYM a Štěpán CHALUPA. *Podklad ke krajským energetickým koncepcím*.

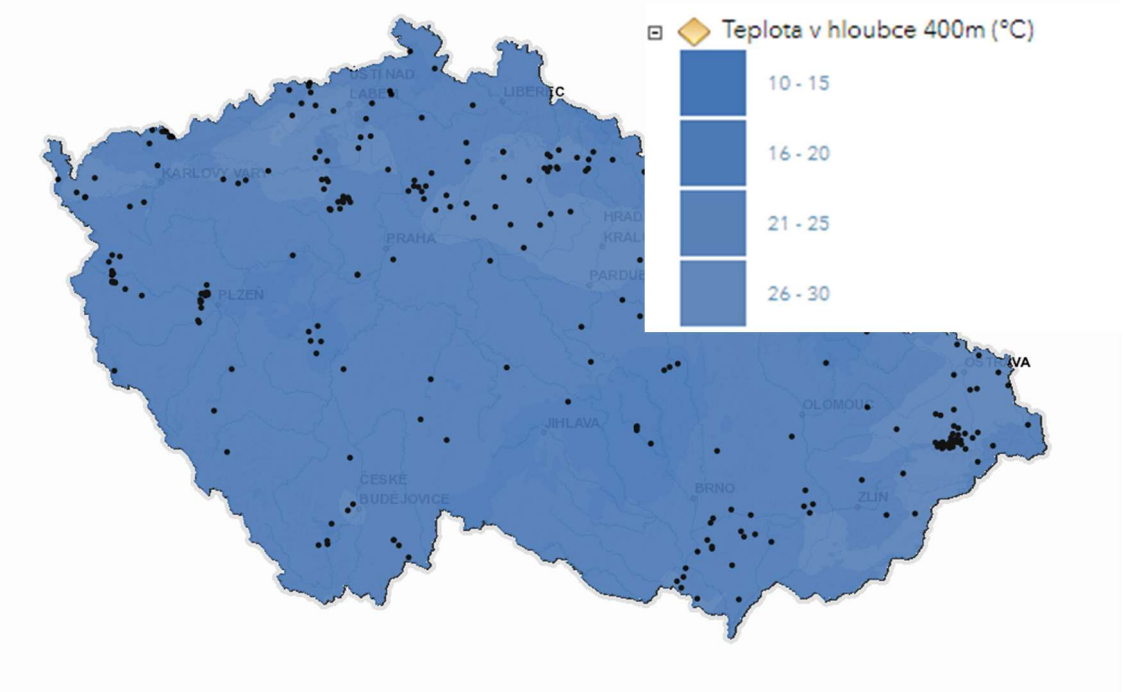


Obr. 4.3: Potenciál geotermální energie v Česku v hloubce 5000 metrů s vrty[124]

Na této mapě si můžeme všimnout jednotlivých vrtů provedených na území ČR. Zajímavé jsou vrty v lázeňských městech Františkovy lázně, Mariánské lázně. To jsou vrty primárně používané pro termální vodu a lázeňské účely. Vrty na východní Moravě okolo Frenštátu pod Radhoštěm a Rožnovem pod Radhoštěm vznikly kvůli předpokládané těžbě uhlí v 70. letech. V té době vzniklo přibližně 50 průzkumných vrtů v této lokalitě. Tyto vrty jsou ale i potencionálně nebezpečné, může z nich unikat plyn metan, který už během let několikrát vzplál. Odstranění posledních následků stálo přibližně 50 milionů korun a není vyvrácené, že nějaké nebezpečí znovu vznikne. Například v roce 2013 v Trojanovicích opravovali starý vrt, protože z něj právě unikal metan.[125]

[124] ČGS. Geotermální potenciál ČR.

[125] ČTO. V Trojanovicích opravují starý vrt. Unikal z něj metan.



Obr. 4.4: Potenciál geotermální energie v Česku v hloubce 400 metrů s vrty[126]

Na této mapě si můžeme všimnout, že v hloubce 400 metrů jsou teploty velmi nízké a pro elektrárenské účely nepříliš zajímavé. Zajímavé ale je, že rozdíly v jednotlivých lokalitách zůstávají podobné, tedy v okolí Mostecka, Budějovicka, Františkových lázní, Rožnova pod Radhoštěm je teplota vyšší než ve zbytku ČR. Z toho plyne, že při průzkumných vrtech není potřeba hloubit kilometry daleko, ale stačí nižší stovky metrů pro odhadnutí dané lokality.

[126] ČGS. Geotermální potenciál ČR.

4.3. Plánované a nedokončené projekty v ČR

Česká republika zatím využívá geotermální energii především pro vytápění rodinných domů, průmyslových budov nebo jedné zoologické zahrady. Technická náročnost a vysoké investiční náklady činí realizaci těchto projektů složitou, přičemž návratnost investice nelze potvrdit, dokud nejsou provedeny první zkušební vrty, které jsou samy už o sobě drahé.[127] Ve všech plánovaných případech se nemá využívat hydrotermální zdroj (horká voda nebo pára pod povrchem), ale suché horniny (Hot Dry Rock) nacházející se v hloubce přibližně 5 km s teplotou okolo 200 °C.

4.3.1. Litoměřice

Projekt v Litoměřicích je největší a nejrealističtější projekt geotermální elektrárny v ČR. Příprava tohoto projektu započala už před více než 20 lety. V Litoměřicích byly vyhloubeny dva průzkumné vrty pro geotermální energii v areálu Jiříkových kasáren v Litoměřicích. Tyto vrty mají poskytnout data pro návrh hlavních vrtů, které mají sloužit pro vytápění i výrobu elektrické energie. Poskytnutá data pomohou pro návrh konstrukce, celkového počtu a hloubku hlavních vrtů, které budou sloužit i pro ukládání tepla do hornin. S analýzou dat pomáhají také vědecké týmy z Německa, Nizozemí a Belgie. Tím dojde k ekonomické optimalizaci a vyšší účinnosti úložišť a budou se používat pouze nejlepší možné principy a postupy.[128]

Litoměřice jsou ideální lokalitou také díky dvěma křížícím se tektonickým zlomům, které by měly zvyšovat tepelný výnos z hlubších magmatických vrstev. V hloubce jednoho kilometru se také nacházejí permokarbonské sedimenty, které izolují žulové podloží a brání úniku tepla k povrchu. Nevýhodou je obtížnější prostředí pro vrtání hlubin-

[127] NAZELENO.CZ. První geotermální elektrárna v ČR: Liberec nebo Litoměřice?.

[128] ROZSYPALOVÁ, Michaela. Geotermální projekt pokračuje: Vrtná souprava se zakousla do země v Jiříkových kasárnách.

ného vrtu. Další výhodou je přítomnost řeky Labe, která poskytuje dostatek vody potřebné pro cirkulaci tepla v podzemním puklinovém výměníku.[129] Celková výměna stávajícího tepelného zdroje na fosilní paliva by také eliminovala primární zdroj znečištění ve městě.

Data budou také analyzována na složení hornin, rozložení puklin, teplotní vlastnosti a vydatnost spodní vody. Vydatnost spodní vody a směr proudění je totiž klíčový pro hloubku vrtů a jejich celkovou účinnost. "*Spodní voda totiž může úložiště ochlazovat. Je proto nutné použít pro daný horizont speciální izolaci. Na druhou stranu, pokud se část vrtů použije ke chlazení např. v budovách, je proudění vody přínosem*," vysvětluje Tomáš Fischer.[130]

Průzkumné vrty mají být hluboké 200 a 550 metrů, náklady na ně jsou hrazeny z evropských dotací a činí 20 milionů korun. Vrt hluboký 550 metrů bude zjišťovat složení hornin, rozložení puklin pod zemí, teplotní vlastnosti, vydatnost spodní vody a směr jejího proudění, zatímco vrt hluboký 200 metrů bude zjišťovat vydatnost a proudění podzemních vod. Jejich hloubení mělo trvat přibližně měsíc, kdy měly být poté zkoumány odebírané vzorky[131], ale pokud se tomu tak stalo, nešlo dohledat navazující novější informace, jestli a co bylo z prvotních měření a vzorků zjištěno.

Hlubší vrt bude poté jádrový, což umožní vědcům získat podrobná geologická a geotermická data z celého jeho profilu, odhadem asi 500 metrů jádra. Toto detailní zkoumání přinese klíčové informace, mimo jiné pro určení celkové tepelné kapacity úložiště. „*Oba vrty budou následně sloužit k dlouhodobému monitoringu okrajových podmínek, což zajistí bezpečný provoz celého zařízení. Získaná data budou také užitečná pro budoucí*

[129] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

[130] ROZSYPALOVÁ, Michaela. Geotermální projekt pokračuje: Vrtná souprava se zakousla do země v Jiříkových kasárnách.

[131] POJAR, Petr. Příprava prvního geotermálního projektu v ČR trvala 20 let, vrty budou hluboké až 4 km.

úpravy legislativy," zmiňuje Zdeněk Venera, ředitel České geologické služby. Tím podporuje význam hydrogeologického průzkumu a dlouhodobého monitoringu geologických podmínek.[132]

Tyto poznatky by tedy mohly přinést rozvoj a dynamický vývoj v tomto energetickém odvětví. V rámci pokračujících prací bude monitorovací síť rozšířena o další geotermické a hydrogeologické vrty umístěné nejen na okrajích vrtných polí, ale také v jejich středu. Tento projekt bude disponovat funkčními zdroji tepla, které budou už v rámci monitoringu dodávat energii do stávajícího systému dálkového vytápění a tím se ještě více zvýší významnost tohoto projektu. V Litoměřicích bude teplo dodáváno veřejným budovám i domácnostem. Počítá se, že toto ekologické a levné teplo bude dostupné až 90 % obyvatel města.[133] Politici považují tento projekt za klíčový pro zachování dlouhodobě únosné ceny tepla a také pro udržení kvality ovzduší v okolí města.[134]

V roce 2007 byl realizován vrt do hloubky 2 km, který byl úspěšný a potvrdil dobré geotermální podmínky. Tento vrt nyní slouží jako testovací a monitorovací prostředek, monitoruje mimo jiné i seismické aktivity. Teplota na dně vrtu je 63 °C.[135] Technicky i cenově nejnáročnější budou ale plánované hlubinné vrty do 3 až 4 kilometrů pod zem, které budou dodávat vodu teplou až 100 °C, odhadované náklady (v roce 2024) jsou 1,25 miliardy korun.[136] V roce 2010 byly odhadované náklady 1,1 miliardy korun s návratností 30 let, v roce 2021 byly odhadovány náklady 1,5 miliardy korun.[137] Dle jiného

---

[132] ROZSYPALOVÁ, Michaela. Geotermální projekt pokračuje: Vrtná souprava se zakousla do země v Jiříkových kasárnách.

[133] DŘÍMAL, Petr. Tepelná čerpadla, geotermalní energie.

[134] POJAR, Petr. Příprava prvního geotermálního projektu v ČR trvala 20 let, vrty budou hluboké až 4 km.

[135] Tamtéž

[136] O ENERGETICE. V Litoměřicích hloubí dva průzkumné vrty kvůli geotermální energii.

[137] BACHORÍK, Jan. Vědci chtějí v Litoměřicích ukládat vyrobené teplo do země. Pomáhat by mělo během topné sezony.

zdroje je odhadována celková cena projektu 2 miliardy korun, a to v časovém horizontu 5 let.[138]

Financováno by to mohlo být z tzv. Fondu spravedlivé transformace, který má pomoci regionu s odchodem od těžby uhlí. „*Zdroje alokované pro Ústecký kraj budou ve výši 15,8 miliardy. Určeny jsou přímo na inovativní projekty, což tento projekt v Litoměřicích splňuje. Považuji ho za jeden z nejlépe připravených projektů v celé republice, nejen v Ústeckém kraji*," uvedl bývalý litoměřický místostarosta Karel Krejza.[139] Tyto vrty budou spolu s mělkými úložišti tepla, jež využijí přebytečné teplo v letním období, sloužit jako dva hlavní zdroje energie.

Pokud vědci v Geotermálním centru v Litoměřicích potvrdí svůj výzkum jako ekonomicky i technologicky funkční, plánují za šest let napojit systém na centrální zásobování teplem. Chtějí ukázat, že tento model lze aplikovat i v dalších lokalitách, kde je systém zásobování teplem založen převážně na uhlí nebo v kombinaci se zemním plynem. Výsledky tohoto výzkumu by mohla využít i další města v celé Evropě, což by umožnilo změnu dosavadního systému vytápění a přechod k udržitelné a čisté energetice. Projekt má tedy v prvních fázích převážně vědecký a výzkumný charakter. Nicméně, jeho finálním cílem je vybudování energetického systému, který propojí dodávku bezemisního tepla a elektrické energie pro veřejné budovy a tepelnou síť.[140]

Ukládání tepla bude poté součástí systému dálkového vytápění, který bude postupně přecházet na nízkoteplotní síť založenou na efektivní kombinaci různých, především obnovitelných zdrojů energie. Horninové prostředí se v létě nahřeje do tvaru válce, v zimě se proces otočí a ze stejných vrtů bude teplo čerpáno zpět a využíváno přes tepelné čerpadlo pro vytápění a ohřev užitkové vody. Studená voda bude vháněna jedním vrtem do země, kde se ohřeje, a poté bude druhým vrtem čerpána zpět na povrch.

---

[138] POJAR, Petr. Příprava prvního geotermálního projektu v ČR trvala 20 let, vrty budou hluboké až 4 km.

[139] BACHORÍK, Jan. Vědci chtějí v Litoměřicích ukládat vyrobené teplo do země. Pomáhat by mělo během topné sezony.

[140] ROZSYPALOVÁ, Michaela. Geotermální projekt pokračuje: Vrtná souprava se zakousla do země v Jiříkových kasárnách.

Odhadovaný výkon je 50 MW tepelné energie a 5 MW elektrické energie ročně. [141] To by zajistilo energii pro 8 000 obyvatel neboli třetinu města. Zásoby geotermální energie pod Litoměřicemi by mohly vydržet přibližně 30 let. Tento relativně krátký časový horizont je způsoben potřebou neustálého ochlazování podzemních hornin studenou vodou. Nicméně, horniny by se měly zároveň ohřívat z okolních vrstev půdy, což by mohlo prodloužit dobu využívání geotermální energie o několik let.

Litoměřice jsou také jediným městem v ČR, které mají povolen zvláštní zásah do zemské kůry a mohou realizovat kilometrové hlubinné vrty. Díky jedinečnosti projektu hlubinných vrtů by se Litoměřice mohly stát centrem výzkumu geotermální energie v celé Evropě, tento typ vrtů je totiž ve světě jedinečný a byl by prvním na světě. To by přilákalo vědeckou komunitu z celé Evropy a mohlo by podpořit význam české vědecké komunity. Na vzniku se podílí i Univerzita Karlova. Vědci chtějí získávat energii z různých obnovitelných zdrojů a ukládat ji pod zem, odkud by se mohla v zimě opět čerpat a pomáhat tak během topné sezóny ve městě.[142] „*Víme, že když nejvíc svítí v létě, energie je relativně málo potřeba. Solární zisky tak musíme někam uložit. Energie se může uložit do zemních vrtů, do horninového prostředí. Prostě pod naše nohy*," představuje projekt uložení sluneční a zemské energie Antonín Tym.[143]

V plánu je vybudovat 60 mělkých vrtů od 100 do 500 metrů, 2 hlubinné vrty od 2 do 4 km poskytujících 10 MWt, podzemní uložiště tepla s 10 GWt, laboratoře, jednotku na výrobu zeleného vodíku v případě přebytků.[144] Také je počítáno s fotovoltaickými panely a jinými obnovitelnými zdroji energie, které budou dodávat přebytečné teplo do podzemních horninových zásobníků. V případě potřeby bude toto teplo odebíráno a využíváno. Odhady z roku 2022 byly, že by první podzemní zásobníky tepla mohly být hotové v roce 2025. Druhý hlubinný vrt by mohl být hotový do roku 2026.[145] Nyní je

---

[141] NAZELENO.CZ. První geotermální elektrárna v ČR: Liberec nebo Litoměřice?.

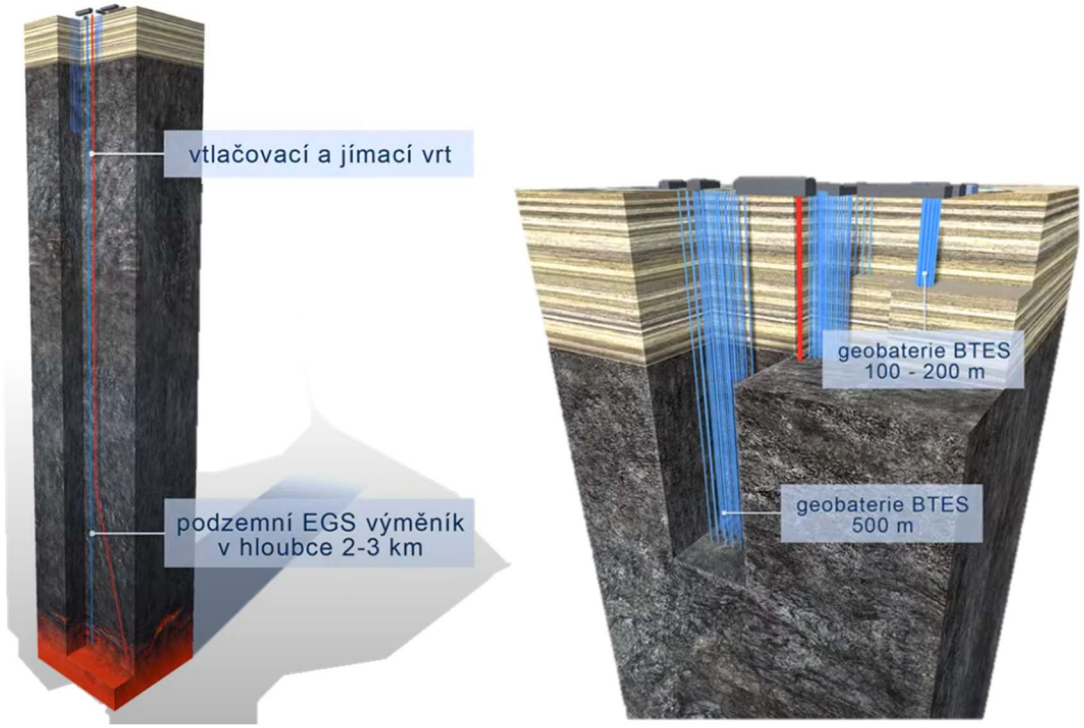
[142] BACHORÍK, Jan. Vědci chtějí v Litoměřicích ukládat vyrobené teplo do země. Pomáhat by mělo během topné sezony.

[143] Tamtéž

[144] TYM, Antonín. *SYNERGYS animace technologických součástí*.

[145] ČTK. Geotermální energie v Česku? V Litoměřicích začnou s výzkumem, pilotní vrty půjdou do hloubky 500 metrů.

situace taková, že v roce 2027 má dojít ke zkušebnímu provozu.[146] Tedy došlo ke 2 letům zpoždění. Práce na vyhloubení prvních dvou mělkých vrtů (550 a 200 metrů) začaly s téměř ročním zpožděním.[147] Počet vhodných firem je totiž omezený. Navíc je vrtný sektor přetížený, je málo nabídek a hodně poptávek.



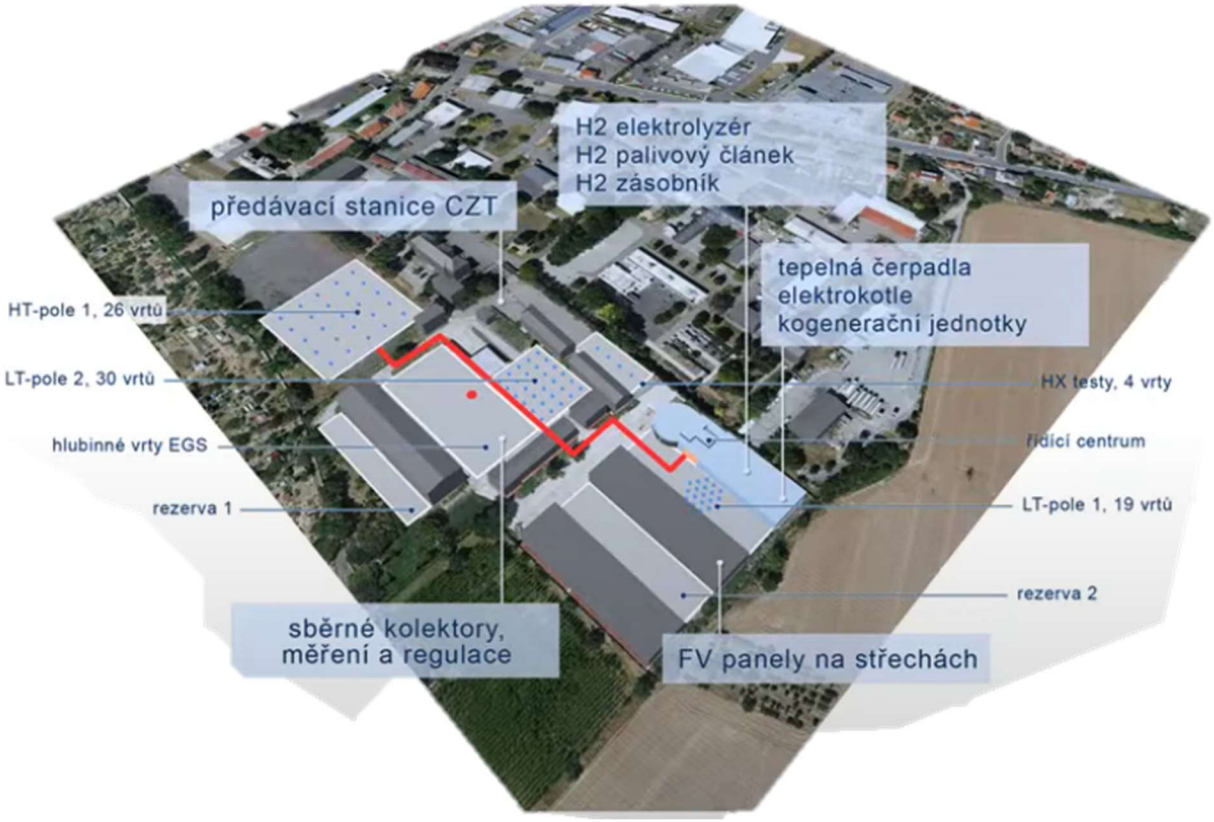
Obr. 4.5: Detail na plánovaný hlubinný vrt 5 km a mělké vrty Litoměřice[148]

Na tomto obrázku si můžeme všimnout jednotlivých vrtů, ať už mělkých v hloubce 100–200 m, nebo hlubších v hloubce 500 m. Na levé straně jsou znázorněny hlubinné vrty v hloubce 5 000 metrů a barvami je znázorněn vtlačovací a jímací vrt. Jímací vrty pro přívod páry na povrch by měly být ale 2.

[146] ROZSYPALOVÁ, Michaela. Geotermální projekt pokračuje: Vrtná souprava se zakousla do země v Jiříkových kasárnách.

[147] Tamtéž

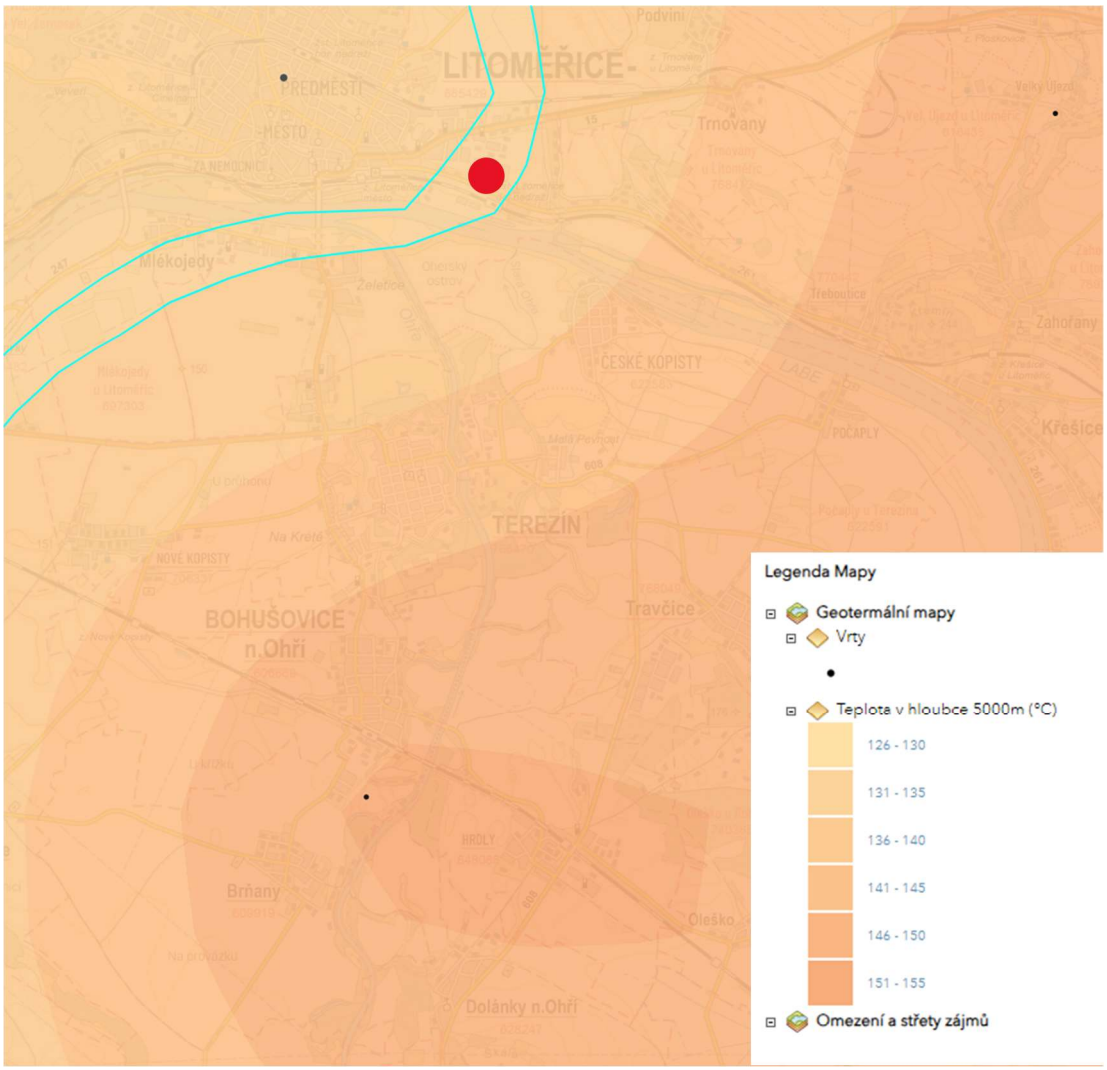
[148] TYM, Antonín. *SYNERGYS animace technologických součástí*.



Obr. 4.6: Detail na plán kasárna Litoměřice[149]

Na tomto obrázku si můžeme všimnout plánu revitalizace starých kasáren v Litoměřicích, každý prostor bude využit. Na západní straně na obrázku vlevo je plánováno hloubení jednotlivých vrtů, v centrální části jsou poté umístěny sběrné kolektory, měření a regulace. Východní strana na obrázku vpravo slouží pro řídící centrum, fotovoltaickou elektrárnu, výrobu zeleného vodíku s elektrolyzérem, palivovým článkem i zásobníkem a v neposlední řadě tepelná čerpadla, elektrokotle a kogenerační jednotky. Tedy si můžeme všimnout, že se nejedná čistě o geotermální elektrárnu, ale o „energetický komplex“ složený s mnoha technologií, které se mají vzájemně doplňovat a využívat potenciál všech prvků s co nejvyšší efektivitou. Otázkou zůstává, jestli tento projekt a komplikované propojování jednotlivých technologií nebude natolik drahé, že se ekonomicky nevyplatí. Nejvyšší efektivita technologie totiž automaticky neznamená nejvyšší ekonomická výtěžnost, často to totiž znamená vyšší investiční náklady a je to spíše naopak.

[149] TYM, Antonín. *SYNERGYS animace technologických součástí*.



Obr. 4.7: Potenciál geotermální energie Litoměřice, červeně označený vrt v kasárnách[150]

Na tomto obrázku si můžeme všimnout detailu na vrt v kasárnách v Litoměřicích označený červeně, ve kterém je teplota v hloubce 5 000 metrů 135 °C. Paradoxně dřívější odhady předpokládaly teplotu až 180 °C. Pokud by byl vrt ale provedený u obce Hrdly jižně od Litoměřic, teplota v hloubce 5 000 metrů by byla 155 °C a geotermální elektrárna by zde měla více energie a potenciálu. Nejlepší teplota v lokalitě je ale pouze jedním z mnoha bodů, které se vyhodnocují a jelikož nejsou geotermální elektrárny rozšířené na území ČR vůbec, prvním krokem je funkční fungující prvotní projekt, poté se můžeme zaobírat rozšiřováním a stavěním více elektráren.

[150] ČGS. Geotermální potenciál ČR.

4.3.2. Liberec

V Liberci se také pustili do zkušebních vrtů v roce 2010, cena dosahovala 250 milionů korun. Hlavním investorem byl ČEZ. Nebylo jasné, kolik energie by mohly liberecké vrty produkovat před dokončenými zkušebními vrty. ČEZ odhadoval, že by se mohlo jednat o jednotky až desítky MWe.[151] V roce 2011 ale ČEZ pozastavil přípravy na výstavbu geotermální elektrárny. "*Projekt jsme museli stopnout. Nebyl by výnosný oproti jiným projektům, proto ho v současné době nerozvíjíme*," uvedla bývalá mluvčí ČEZ Eva Nováková.[152] Celá stavba měla stát přes 1 miliardu korun.

4.3.3. Děčín

V Děčíně je geotermální energie již několik let využívána k vytápění téměř poloviny města. Jedná se o největší projekt využití hydrotermální energie v Česku, zahrnující teplárnu s vrtem do hloubky 550 metrů a výkonem 2 x 3,28 MWt.[153] Tento projekt zahrnoval přípravné práce, geotermální vrt, výstavbu zdroje, rozvodnou síť a přívod pitné vody do městského vodojemu. Stál okolo 550 milionů korun. Tepelnou energii město získává z podzemního jezera, odkud vytéká voda o teplotě 30 °C a je vedena potrubím k výměníkovým stanicím. Odtud je dalším potrubím dopravována do předávací stanice, kde se připravuje pro vytápění obytných domů. Spotřebováváno je při tom méně energie než při přímém ohřevu vody o teplotě 12 °C z vodovodní sítě.[154] Voda je ohřívána v děčínské teplárně spalováním zemního plynu, spojení s geotermální výtopnou ušetří až třetinu zemního plynu, tedy 10 000 tun CO_2. Čistě ekologické teplo to tedy není, ale cena tepla oproti bývalé výtopně na hnědé uhlí a mazut klesla a lokálně se i zlepšila kvalita ovzduší v Děčíně.[155]

---

[151] NAZELENO.CZ. První geotermální elektrárna v ČR: Liberec nebo Litoměřice?.

[152] TRDLA, Martin. ČEZ stopl výstavbu geotermální elektrárny v Liberci, byla by drahá.

[153] KLOZ, Martin, Antonín TYM a Štěpán CHALUPA. Země má energie na rozdávání, proč ji využíváme tak málo a jak to změnit?.

[154] NAZELENO.CZ. První geotermální elektrárna v ČR: Liberec nebo Litoměřice?.

[155] TRAMBA, David. Čekání na první geotermální elektrárnu v Česku. Potenciál by tu byl.

4.3.4. ZOO v Ústí nad Labem

V Čechách je geotermální energie využívána také k vytápění ZOO v Ústí nad Labem. V okolí Ústí nad Labem se nachází několik zdrojů geotermální vody, což město motivovalo k využití tohoto přírodního tepla pro místní zoologickou zahradu. Tradiční způsob vytápění fosilními palivy, který zatěžoval životní prostředí, byl nahrazen ekologičtějším řešením.[156]

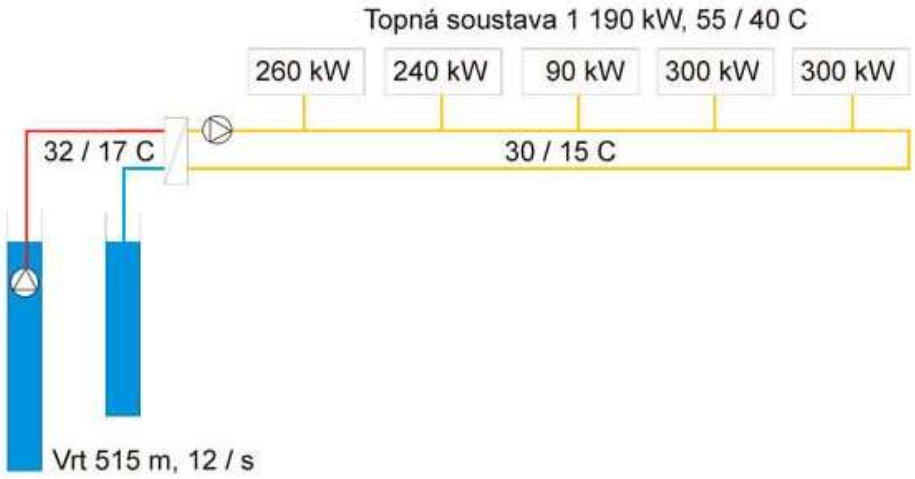
V ústecké ZOO byl instalován systém, který prostřednictvím výměníkových stanic přenáší teplo z geotermálních pramenů do jednotlivých pavilonů. Pavilonů je celkem 30 a jsou rozmístěny v 6 hektarech a převýšením 100 metrů. Proto je nutno mít rozvody vody natlakované na 16 barů. Přípravy projektu začaly v roce 1998 studiemi, energetickými audity a strategickými záměry. V roce 2000 byla zahájena realizace a byla slíbena finanční podpora projektu. V roce 2002 byl vybudován vrt, který dodává až 12 litrů geotermální vody za sekundu o teplotě 32 °C. Vrt je hluboký 514 metrů. Ve druhé fázi byla instalována centrální výměníková stanice pro spodní vodu a první strojovna s kapacitou 260 kWt. V závěrečné fázi projektu byly položeny rozvody po celém areálu, upraveny topné systémy a dokončeny čtyři další strojovny vybavené tepelnými čerpadly.[157] Byla zvolena varianta s meziokruhem, systém obsahuje uzavřený okruh upravené vody, který přenáší energii z centrálního výměníku ke 5 samostatným strojovnám s tepelnými čerpadly. Tyto strojovny pak zajišťují napojení všech vytápěných objektů. Toto řešení minimalizovalo délku rozvodů, které přicházejí do styku s agresivní spodní vodou, a zároveň snížilo tepelné ztráty díky nižší teplotě vody v externích rozvodech. Celkový instalovaný výkon tepelných čerpadel činí 965 kWt, skládá se z jednotlivých modulů o velikosti 40 a 50 kWt. Použití chladiva R134a umožňuje tepelným čerpadlům dosáhnout výstupní teploty až 65 °C, přičemž maximální teplota na primární straně je 30 °C. Většinou se vytápí na 45–55 °C. Při přípravě nabídky pro veřejnou soutěž byla tato čerpadla u výrobce specificky testována pro podmínky této zakázky. Výsledky měření ukázaly, že topný faktor těchto tepelných čerpadel je v rozmezí 4,5 až 6.[158] Celkový areál ZOO

[156] HÝL, Filip. Statutární město Ústí nad Labem.

[157] PETERKA, Michal. GEOTERMÁLNÍ VYTÁPĚNÍ ZOO V ÚSTÍ NAD LABEM.

[158] PROTC. Geotermální vytápění areálu ZOO.

potřebuje až 1 200 kWt tepla, tedy v ideálním případě je skoro celý napájen teplem právě z tohoto projektu. Voda z vrtu je následně vedena do strojovny s výměníky, kde se ochladí na 14 až 9 °C a následně je vracena zpět do země prostřednictvím několika vsakovacích vrtů.



Obr. 4.8: Schéma vytápění ZOO v Ústí nad Labem [159]

Celá stavba byla dokončena v srpnu 2005.[160] Provoz potvrdil očekávané parametry a plně nahradil zastaralé dálkové vytápění z teplárny, teplo je z tohoto zdroje také levnější. V případě tvrdých zim a teplotách nižších než 10 °C je možné výkon elektrárny doplnit o dalších 298 kWt pomocí elektrokotlů, které se také nacházejí ve strojovnách. Tento systém stále funguje i po 18 letech provozu.

Celkové investiční náklady na projekt dosáhly 48,5 milionů Kč. Na počátku realizace byla uzavřena smlouva se Státním fondem životního prostředí, který poskytl podporu ve výši 15,4 milionů Kč. Polovina této částky byla formou dotace, druhá polovina jako nízkoúročená půjčka splatná do 7 let od úspěšného dokončení projektu. Během výstavby byly přidány další finanční zdroje ve výši 3 milionů Kč od České energetické agentury, zbytek nákladů pokrylo město.[161]

[159] PROTC. Geotermální vytápění areálu ZOO.

[160] USTI.CZ. ZOO vytápí geotermální energie.

[161] Tamtéž

4.3.5. Semily

V Semilech se také uvažovalo o výstavbě geotermální elektrárny. Město mělo v plánu stát se průkopníkem v oblasti využívání geotermální energie k výrobě elektřiny a tepla pomocí vrtu hlubokého až pět kilometrů. Prodej elektřiny by mělo vylepšit městský rozpočet a odpadní teplo mělo vytápět domácnosti. Stavba geotermální elektrárny byla připravována 5 let a do příprav se investovalo zhruba 1 milion korun. Město mělo každý rok od investora obdržet zhruba šest milionů korun z tržeb za vyrobenou elektřinu, které by využilo k rozvoji města.[162] Společnost také slibovala místním obyvatelům dostupnější teplo. K realizaci se ale nedostalo.[163]

Tento projekt totiž narazil na silný odpor části obyvatel, a nakonec byl zastaven po referendu. Přestože účast v referendu nebyla dostatečná, aby bylo závazné, zastupitelé se rozhodli ukončit přípravy na výstavbu geotermální elektrárny s výtopnou. Zastupitelstvo města zároveň upravilo územní plán tak, aby v budoucnu nebylo možné podobnou elektrárnu na území Semil postavit.[164]

Obyvatelé Semil totiž nebyli spokojeni s plánem umístit geotermální vrty poblíž sídliště Řeky pár stovek metrů od obytných domů. Měli obavy z hluku a vibrací během hloubení 5 kilometrů hlubokých vrtů a následných otřesů. Podobný projekt ve švýcarské Basileji způsobil totiž otřesy až o síle 3,4 stupně Richterovy škály.

4.3.6. Praha – ČSOB – Československá obchodní banka, a. s.

Nové sídlo ČSOB v Praze na Radlické ulici je jeden z největších projektů použití tepelných čerpadel země-voda v rámci střední Evropy. Byla zde využita tepelná čerpadla země-voda s geotermálními vrty, které jsou situovány pod samotným objektem. Tepelná čerpadla mají celkový instalovaný výkon 1 300 kWt se 179 vrty o hloubce 150 m. Zajišťují zimní vytápění i letní chlazení. Zároveň vrtné pole funguje jako velký podzemní akumulátor, který se sezónně nabíjí teplem, například využitím odpadního tepla při chla-

[162] ČTK. První česká geotermální elektrárna u Semil nebude. Lidé se báli otřesů při vrtání.

[163] TRDLA, Martin. ČEZ stopl výstavbu geotermální elektrárny v Liberci, byla by drahá.

[164] ČTK. První česká geotermální elektrárna u Semil nebude. Lidé se báli otřesů při vrtání.

zení a pasivním chlazením, a následně vybíjí odběrem tepla při vytápění pomocí tepelných čerpadel. Toto zařízení je navrženo jako monovalentní zdroj vytápění, schopný pokrývat i výkonové špičky během topné sezóny. Z tohoto důvodu nebylo nutné systém doplňovat plynovou kotelnou ani připravovat prostor pro její budoucí instalaci.[165]

Požadovaný chladicí výkon v letních měsících je téměř dvojnásobný oproti výkonu potřebnému pro vytápění, a tedy je nereálné, aby tepelná čerpadla zvládla špičkové výkony potřebné pro chlazení. Proto byly geotermální vrty doplněny o hybridní chladicí věže. Ty budou ale využity pouze během špiček v létě, většinu chlazení zvládnou sama tepelná čerpadla. Projekt zahrnuje také referenční vrty, které budou měřit teplotu pomocí teplotních čidel v přesně definovaných hloubkách. [166]

[165] GEROTOP. Nová budova ČSOB bude vytápěna a chlazena zemními tepelnými čerpadly, přenášející výkon až 1300 kW.

[166] Tamtéž

5. Technicko–Ekonomické vyhodnocení konkrétního projektu v ČR

Na technicko–ekonomické vyhodnocení byl vybrán projekt ZOO v Ústí nad Labem, protože je to, kromě jednoho z mála uskutečněných geotermálních projektů na území České republiky, také dobře zmapovaný projekt, který má veřejně dostupné vstupní informace i následné vyhodnocení projektu po realizaci dostupné ze stránek MPO vypracované konzultantskou firmou TEBODIN.[167] Z dostupných informací byl tedy následně projekt vyhodnocen.

5.1. Technické informace – ZOO v Ústí nad Labem

ZOO byla založena v roce 1908 p. Heinrichem Lumpem, nachází se na místě bývalé cihelny na svahu Mariánské skály v Ústeckém kraji s rozlohou 30 ha. Areál má velký výškový rozdíl, mezi dolní a horní části je výškový rozdíl 100 metrů. Areál tvoří 34 budov a pavilonů, z toho je 16 vytápěných. Objekty jsou rozmístěny nesouměrně v areálu a každý má specifické požadavky na vnitřní prostředí z důvodu například exotických zvířat a rostlin. Provoz areálu je celoroční.

Obr. 5.1: Areál ZOO v Ústí nad Labem[168]

[167] TEBODIN. Zhodnocení efektu projektu využití geotermální energie pro vytápění ZOO v Ústí nad Labem.

[168] Tamtéž

Stav před projektem – tepelná energie

Areál je napojen na systém CZT z místní teplárny Trmice a obsahuje 7 protiproudých výměníků. Roční odběr tepla ze systému CZT činí průměrně 11 000 GJ za rok. Teplo je používáno převážně pro vytápění, ale i na vaření. Celý systém je zastaralý a ve špatném technickém stavu. Tepelná ztráta v rozvodu tohoto systému činí až 35-40 %. Celkové tepelné ztráty byly stanoveny přibližně na 3 950 GJ za rok v rozvodech tepla a 450 GJ za rok ve výměníkových stanicích.[169]

Stav před projektem – elektrická energie a plyn

Areál je napojen z trafostanice 22/0,4 kV a transformátoru o jmenovitém zdánlivém výkonu 400 kVA. Roční odběr elektrické energie je průměrně 630 MWh za rok. Elektřina je využívána na vytápění, přípravu teplé vody, osvětlení, elektrické pohony a spotřebiče. Dále je areál připojen na plynovod a spotřebovává přibližně 146 GJ energie v přepočtu za rok. Plyn je využíván pouze ve 2 objektech pro přípravu teplé vody.

Energetická bilance původní		
	MWh.r^{-1}	GJ.r^{-1}
Teplo CZT	3 056	11 000
Elektrická energie	630	2 268
Zemní plyn	41	146
Celkem:	**3 726**	**13 414**

Tab. 5.1: Souhrnná energetická bilance ZOO v Ústí nad Labem[170]

Celkem tedy areál spotřebovává 13 414 GJ energií za rok.

Projekt geotermální výtopny

V oblasti ZOO byl objeven geotermální rezervoár s přítokem termální vody z okolního prostředí, který je přímo vhodný pro hlubinný vrt. Bylo zjištěno, že pokud se provede hlubinný vrt o hloubce 515 metrů, bude z něj možné získat až 12 litrů vody za sekundu. Teplota tohoto hydrotermálního zdroje se pohybuje okolo 32 °C, jedná se o nízkopotenciální tepelnou energii. Proto byly vypracovány jednotlivé varianty tohoto projektu, jak lze tento vrt využít. Žádná z variant se ale nezabývá zemním plynem, ten zůstane nezměněn a bude nadále využíván. To je také způsobeno jeho výrazně nižší spotřebou a aktuální rozvody jsou stále vyhovující. Proto by se investice nevyplatila.

[169] TEBODIN. Zhodnocení efektu projektu využití geotermální energie pro vytápění ZOO v Ústí nad Labem.

[170] Vytvořeno autorem práce

5.2. Varianty projektu[171]

Varianta 1: První variantou je zachovat zásobování CZT a instalování 2-3 TČ voda-vzduch o instalovaném výkonu 50 kWt. CZT by poté mělo dodávat teplo při nízkých venkovních teplotách a při vyšších teplotách by byla zastoupena kombinace CZT a TČ v závislosti na spotřebě. Tato varianta byla kritizována za malé využití termální vody a za použití teplovzdušného vytápění, které by bylo v mnoha místech těžké nainstalovat kvůli citlivým živočichům na hluk či malému prostoru u některých objektů. Dále se odhadovalo, že by cena TČ voda-vzduch byla příliš drahá.

Varianta 2: Tato varianta počítá s 3 TČ voda-voda s výkonem 160 kWt a jednoho elektrokotle o výkonu 100 kWt pro špičkový odběr tepla. Dále počítá s rekonstrukcí vytápěcího systému jednotlivých budov, který by mohl být využit při nižší teplotě z TČ, a tedy i nižších ztrátách. Stávající systém CZT by byl zachován. Část nejbližšího areálu u vrtu by byla tedy vytápěna pomocí vrtu a zbytek pomoci CZT. Také bylo počítáno s nahrazením parních varných kotlů za elektrické, které by také snížily využití z CZT.

Varianta 3: Tato varianta se od varianty 2 liší vyšším zastoupením tepla odebíraného z vrtu, a to díky použití 5-6 stanic TČ voda-voda. Větší část areálu v blízkosti vrtu by tedy byla napájena pomocí TČ a zbytek pomocí CZT. Mělo dojít také k instalaci zásobní nádrže termální vody, která by poskytovala zásobování pro TČ dále od vrtu. Počítalo se i s využitím odebírané vody pro koupání živočichů.

Varianta 4: Tato varianta je nejradikálnější a počítá s úplným odpojením od CZT, tedy že celý areál bude napájen pomocí geotermálního vrtu a 8 stanic TČ. Jinak vychází z varianty 3 a dále ji upravuje. Dále bylo předpokládáno, že při volbě této varianty budou překročeny výkonové parametry stávajícího transformátoru kvůli příkonu TČ i elektrokotlů a bude nutno provést jeho výměnu za transformátor s vyšším zdánlivým výkonem 630 kVA. Došlo by ke zrušení veškerých parních rozvodů. Geotermální vrt by byl v tomto případě využíván na maximum, a to by také představovalo určité riziko, protože není zaručeno, že postupem několika let jeho teplota neklesne.

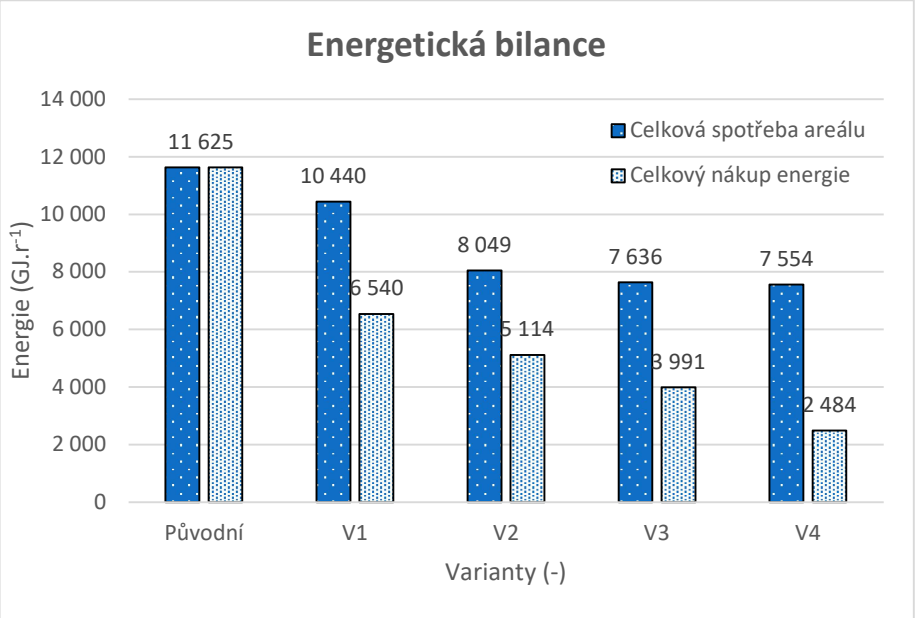
---

[171] TEBODIN. Zhodnocení efektu projektu využití geotermální energie pro vytápění ZOO v Ústí nad Labem.

Energetická bilance jednotlivých variant						
	Jednotky	Původní	V1	V2	V3	V4
Teplo z CZT	GJ.r^{-1}	11 000	5 100	3 530	2 155	0
Geotermální energie z vrtu	GJ.r^{-1}	0	3 900	2 935	3 645	5 070
Spotřeba el. Energie na TČ a el. kotle	GJ.r^{-1}	625	1 440	1 584	1 836	2 484
Celková spotřeba areálu	GJ.r^{-1}	11 625	10 440	8 049	7 636	7 554
Celkový nákup energie	GJ.r^{-1}	11 625	6 540	5 114	3 991	2 484
Celková úspora nakoupené energie	**GJ.r^{-1}**	**0**	**5 085**	**6 511**	**7 634**	**9 141**

Tab. 5.2: Energetická bilance jednotlivých variant ZOO v Ústí nad Labem[172]

V tabulce 5.2 je znázorněn rozdíl jednotlivých variant. Čím vyšší číslo varianty, tím větší oproštění od tepla z CZT, větší využití tepelných čerpadel a energie z geotermálního vrtu. Z této tabulky také plyne, že čím je větší využívání geotermálního vrtu, tím je nižší celkový nákup energie a tím vyšší celková úspora energie. Vyšší úspora energie ale znamená vyšší náklady viz tabulka celkových investičních nákladů vyznačená dále.



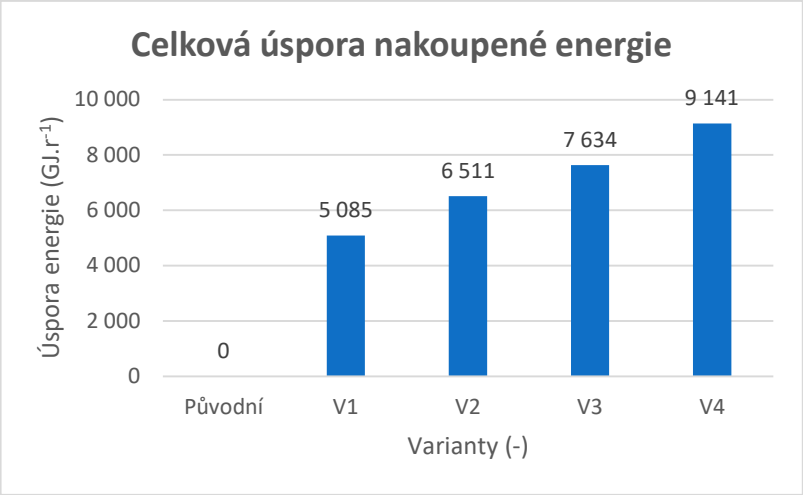
Graf 5.1: Graf energetické bilance v ZOO v Ústí nad Labem[173]

Z grafu Graf 5.1 si můžeme všimnout poklesu celkové potřebné energie areálu za rok. Velký pokles u varianty 2,3,4 je způsoben převážně efektivností nového vytápěcího rozvodu, kratších cest ohřáté vody a lokálního ohřevu. A dále je také kvůli nevyhovujícímu

[172] Vytvořeno autorem práce

[173] Vytvořeno autorem práce

současnému stavu se špatným tepelným těsněním. Také si můžeme všimnout, že u radikálnějších variant klesá celkový nákup energie. To je způsobeno tím, že většina energie je u nich získávána z geotermálního vrtu. Ve variantě 4 je celá nakupovaná energie rovna energii elektrické, která je potřeba na funkci tepelných čerpadel a záskokových elektrokotlů. Tedy varianta 1 potřebuje pouze 56 % nákupu energie oproti původní variantě, u varianty 4 je to dokonce pouhých 21 %.



Graf 5.2: Graf celkové úspory nakoupené energie v ZOO v Ústí nad Labem[174]

V grafu Graf 5.2 je vidět celková úspora energie oproti původnímu stavu. V původním stavu byla celková spotřeba 11 625 GJ za rok. Tedy oproti tomu ušetří například varianta 4 celých 80 % energie anebo varianta 2 celých 60 %.

Emise variant						
	Jednotky	Původní	V1	V2	V3	V4
Tuhé	$t.r^{-1}$	0,21	0,27	0,27	0,28	0,32
SO_2	$t.r^{-1}$	7,43	7,07	5,84	4,88	3,58
NO_X	$t.r^{-1}$	2,25	2,12	1,75	1,45	1,03
CO	$t.r^{-1}$	0,90	0,74	0,54	0,37	0,10
C_XH_Y	$t.r^{-1}$	0,25	0,23	0,18	0,14	0,09
CO_2	$t.r^{-1}$	1 118,42	1 012,13	804,14	633,77	338,79
Celkové emise	**$t.r^{-1}$**	**1 129,46**	**1 022,56**	**812,72**	**640,89**	**343,91**

Tab. 5.3: Tabulka emisí variant v ZOO v Ústí nad Labem[175]

[174] Vytvořeno autorem práce

[175] Vytvořeno autorem práce

Podobný průběh má i tabulka emisí 5.3. Vysoké emise původní varianty jsou způsobeny především odebíráním tepla z CZT vyráběné teplárnou na fosilní paliva. Proto variantám, které CZT omezují, klesají emise. Emise produkované energetickým mixem pro tepelná čerpadla i záskokové elektrokotle jsou výrazně nižší. To je způsobeno nejenom ekologičtějším energetickým mixem oproti samotné teplárně, ale především díky mnohem menší energetické potřebě nákupu plynoucí z toho, že většina energie bude brána z geotermálního vrtu. Nepatrné nezměněné množství zemního plynu je přítomno ve všech variantách. Plyn je ale používán jen lokálně ve 2 objektech. Emise varianty 4 oproti původní variantě klesly o 70 %.

Poté bylo provedené ekonomické zpracování konzultantskou firmou a bylo doporučeno, aby zvítězila varianta číslo 4, výpočty od autora práce v následujících kapitolách ukážou vyvrácení či potvrzení této hypotézy.

5.2.1. Varianta 4 upravená pro realizaci

Varianta 4 byla po doporučení upravena pro stavební řízení. Byly specifikovány dodatečné požadavky na projekt, které měly dopad na zvýšení velikosti investice. Příkladem je úprava teplotních podmínek ve vybraných pavilonech či úprava pozemních komunikací. Dále měla být vybudována vodovodní přípojka z Ústí nad Labem, která původně s projektem nesouvisela. Projekt obsahoval i rekonstrukci vytápěcího systému budov v hodnotě 14 milionů Kč, která by musela být jednou realizována bez ohledu na změnu systému vytápění. Tyto změny ve výpočtech ekonomických ukazatelů působí negativně, zhoršují ekonomickou efektivitu projektu pro stavební řízení a zhoršují návratnost celého projektu. Naproti tomu působí finanční pomoc ve formě dotace v hodnotě 7,7 milionů Kč ze Státního fondu životního prostředí.

Je nutné podotknout, že od tohoto bodu není možné porovnávat tento reálný uskutečněný projekt s navrhnutými projekty před výstavbou. Tento projekt v sobě zahrnuje další služby a požadavky, které nesouvisí s čistým vyměněním nejdůležitějších komponent jiného typu vytápění, ale zároveň celý areál ZOO modernizují a opravují. Tedy je nutné projekt posuzovat nejenom ekonomicky, ale i technicky, ekologicky a pragmaticky. Jedná se přeci o „zábavní centrum“ města, které lidem přináší radost. Tedy vizuál je pro tento areál možná ještě důležitější než ekonomická výhodnost dané varianty.

5.3. Ekonomické zpracování

Ekonomické zpracování je provedeno na základě několika předpokladů. Hodnocení je provedeno po jednotlivých rocích, porovnávají se fiktivní náklady, které by bylo nutné vynaložit na nákup energie, kdyby se zachoval původní stav, tedy tepla ze systému CZT a elektrické energie v příslušném roce. Inflace je považována za 2 % v celém období. Životnost investice je stanovena na 15 let, mohla být stanovena na 20-25, ale u rizika lokálního zdroje geotermální energie je lepší být kritičtější. Krom toho odhadovaná životnost TČ je 20 let a poté by bylo nutné provést další reinvestice do výměny a údržby techniky. Údržba a provozní náklady krom energií jsou také zanedbány.

Bylo zjednodušeno, že se projekt postavil za 1 noc (overnight) a že od prvního dne splňoval plné parametry výkonu. Aby byl výpočet porovnatelný s reálným projektem, byly uvažovány cenu z roku 2006. Ceny energií jsou uvažovány bez DPH a elektrické daně. Ceny energií na počátku výpočtového období byly z oficiálních dat stanoveny ve výši 258,5 Kč.GJ^{-1} za teplo z CZT a 1,92 Kč.kWh^{-1} za elektrickou energii zahrnující obchodní i distribuční část odrážející ceny v roce 2006. Je počítáno s jednosložkovou cenou elektřiny, respektive průměrnou cenou elektřiny s přihlédnutím na nízký a vysoký tarif. Meziroční růst cen energií byl stanoven na 3 % pro teplo z CZT a 4 % pro elektřinu, což zahrnuje reálný růst cen za života projektu.

Byl zanedbán fixní roční poplatek za elektřinu i odběr z CZT. Odběr elektrické energie i tepla areálu ZOO byl stanoven stejný každý rok dle průměrné hodnoty a také bylo počítáno s 4 % hodnotou diskontu odrážející inflaci, riziko spojené s geotermálním vrtem a oportunity cost. Nebyl stanoven poplatek pro odpojení z CZT u varianty 4.

Nebylo počítáno s žádnými reinvesticemi do projektu postupem let. Počáteční investice započítává náklady za technologie, stavební a montážní práce i náklady na vytvoření projektové dokumentace. Odpisy nejsou udány, protože je brán výpočet z pohledu zákazníka, tedy samotné ZOO. Financování bylo také zjednodušeno a nebyla použita žádná půjčka od banky. Je počítáno se zahrnutím dotace v hodnotě 7,7 milionů Kč u uskutečněné varianty, která je zjednodušená tím, že tato celá částka bude pouze odečtena od investičních výdajů v roce 0.

5.3.1. Měřitelné ukazatele

Pro měřitelné porovnání byly využity tyto ukazatele: Kumulovaný (diskontovaný) tok hotovosti (CCF), čistá současná hodnota (NPV), vnitřní výnosové procento (IRR) a reálná doba návratnosti.

Tok hotovosti, CashFlow (CF)

Tok hotovosti představuje rozdíl mezi peněžními příjmy a výdaji v daném roce. V tomto případě se jedná o finanční úspory jednotlivých variant oproti variantě původní za daný rok. Tedy se jedná především o úsporu energie nepoužíváním CZT, ale používáním efektivních TČ a geotermálního vrtu. V roce 0 je tok hotovosti investiční výdaj a jako příjem je u reálné varianty uvedena dotace.

Tok hotovosti tedy vypočteme:

$$CF_t = U_t - IN_t \tag{7}$$

Kde:

CF_t je tok hotovosti v roce t (Kč)

U_t je finanční úspora v roce t (Kč)

IN_t jsou investiční náklady v roce t (Kč)

t značí daný rok (rok)

Kumulovaný tok hotovosti (CCF)

Kumulovaný tok hotovosti je v každém roce nasčítávaný celkový tok hotovosti. Tento ukazatel se například používá k určení bodu zlomu neboli době návratnosti, tedy v jakém roce se díky příjmům dostane projekt po počáteční investici na NPV = 0 Kč. NPV je vysvětleno na další straně.

Kumulovaný tok hotovosti tedy vypočteme:

$$CCF_t = \sum_{t=0}^{Th} CF_t \tag{8}$$

Kde:

CCF_t je kumulovaný tok hotovosti v roce t (Kč)

CF_t je tok hotovosti v roce t (Kč)

Th je doba hodnocení (rok)

t značí daný rok (rok)

Diskontovaný (kumulovaný) tok hotovosti

Diskontovaný (kumulovaný) tok hotovosti bere v úvahu časovou hodnotu peněz, tedy že hodnota peněz v čase přirozeně klesá. Pro přepočtení hotovostních toků z různých let na současnou hodnotu se používá diskontovaný kumulovaný tok hotovosti. Diskont představuje procentní výnos investice do jiného projektu se stejnou mírou rizika, či v našem případě diskont odráží inflaci, riziko spojené s geotermálním vrtem a oportunity cost. Z pohledu zákazníka je v našem případě diskont nízký, ale z pohledu investora může být mnohem vyšší a hraje důležitou roli při výběru investic. Je jedním z faktorů, podle čeho si investor vybírá, do čeho bude investovat.

Diskontovaný tok hotovosti se vypočte:

$$DCF_{\mathrm{t}} = \frac{CF_{\mathrm{t}}}{(1+p)^{\mathrm{t}}} \tag{9}$$

Kde:

DCF_t je diskontovaný tok hotovosti v roce t (Kč)

CF_t je tok hotovosti v roce t (Kč)

p je diskont (%)

t značí daný rok (rok)

Diskontovaný kumulovaný tok hotovosti se poté vypočte:

$$CDCF_t = \sum_{t=0}^{Th} \frac{CF_{\mathrm{t}}}{(1+p)^{\mathrm{t}}} \tag{10}$$

Kde:

$CDCF_t$ je kumulovaný diskontovaný tok hotovosti v roce t (Kč)

CF_t je tok hotovosti v roce t (Kč)

Th je doba hodnocení (rok)

p je diskont (%)

t značí daný rok (rok)

Čistá současná hodnota (NPV)

Čistá současná hodnota je jedna z nejdůležitějších metod při hodnocení výnosnosti investic. Zohledňuje budoucí finanční toky a počítá, kolik financí ve zvolené době životnosti projekt přinese. Záporná hodnota NPV znamená ztrátovost projektu. Kladná hodnota značí vyšší návratnost investice, než se kterou je počítáno. Při porovnávání projektů

pomocí NVP je nutno dodržet stejnou dobu životnosti daných projektů. Obecně se hodnota NPV stanoví pomocí kumulovaného diskontovaného toku hotovosti za celou dobu životnosti projektu.

Čistá současná hodnota se vypočte:

$$\mathrm{NPV} = \sum_{t=0}^{Tž} \frac{CF_t}{(1+p)^t} \tag{11}$$

Kde:

NVP je čistá současná hodnota (Kč)

CF_t je tok hotovosti v roce t (Kč)

Tž je doba života projektu (rok)

p je diskont (%)

t značí daný rok (rok)

Vnitřní výnosové procento (IRR)

Vnitřní výnosové procento je také jedno z důležitých metod při hodnocení výnosnosti investic. Číselně se rovná diskontní sazbě, při které je NPV rovno nule. Platí, že investice je výhodná, pokud je IRR větší nebo rovno diskontní sazbě. Čím vyšší IRR je, tím vyšší je návratnost investice. Často ale platí, že čím vyšší IRR je, tím je také investice rizikovější.

Vnitřní výnosové procento se vypočte:

$$0 = \sum_{t=0}^{Tž} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} \tag{12}$$

Kde:

IRR je vnitřní výnosové procento (%)

CF_t je tok hotovosti v roce t (Kč)

Tž je doba života projektu (rok)

t značí daný rok (rok)

Doba návratnosti (Ts, Tsd)

Doba návratnosti udává počet let, po kterých jsou kumulované toky hotovosti rovné nule. Tedy tento ukazatel znázorňuje, po kolika letech se díky příjmům projekt splatí. Doba návratnosti může být prostá (Ts) bez diskontování peněžních toků a diskontovaná (Tsd) se započtením faktoru času s diskontovanými peněžními toky.

5.4. Ekonomické vyhodnocení

5.4.1. Vyhodnocení původního projektu pomocí dat z roku 2006

Byly propočteny jednotlivé varianty projektu ZOO pomocí měřitelných ukazatelů NPV, IRR, nediskontované a diskontované doby návratnosti. Bylo využito stejných vstupních parametrů, ale vypočtené výstupy se od skutečných výstupů reálného projektu velmi rozchází. K výpočtu byl použit výpočetní program v Microsoft Excelu, který byl navrhnut autorem práce. Byly zde využity vzorce z podkapitoly Měřitelné ukazatele.

Ekonomické vyhodnocení variant				
	V1	V2	V3	V4
NPV (Kč) - 15 let	-1 612 517	4 815 289	1 562 247	-1 056 636
IRR (%) - 15 let	3	8	5	3
Ts (let)	13	9	11	12
Tsd (let)	**17**	**11**	**14**	**16**

Tab. 5.4: Tabulka Ekonomického vyhodnocení variant v ZOO v Ústí nad Labem[176]

Byla vypočtena následující tabulka, ve které je porovnání jednotlivých NVP, IRR, Ts a Tsd pro jednotlivé varianty. Barevně je vyznačeno, které hodnoty jsou v jednotlivých řádkách nejvyšší a které naopak nejnižší.

Z tabulky Tab. 5.4 je tedy patrné, že z výpočtů vychází celkově nejlépe varianta 2. NPV vyšlo kladné při využitém diskontu 4 % u druhé i třetí varianty. U druhé varianty je ale NVP větší a rovno 4,8 milionu Kč. Ukazatel IRR také poukazuje na stejnou variantu V2. Vnitřní výnosové procento u této varianty je rovno 8,3 % a je až překvapivě vysoké, bereme-li v potaz, že se cíleně nejednalo o investici s maximalizací zisku, ale o využití ekologického zdroje a prototypového projektu. Nicméně všechny varianty mají IRR vyšší než 2 %, tedy nad hodnotou inflace. Pokud by se ani jeden z projektů nezkomplikoval a jeho investice by se nezvýšila, žádný z těchto projektů není přímo špatně navrhnutý.

U vypočtených variant projektů V1-4 nebyla využita dotace, v prvotní přípravě projektu se s ní totiž nepočítalo. Životnost investice byla stanovena na 15 let, stejně jako si ji

[176] Vytvořeno autorem práce

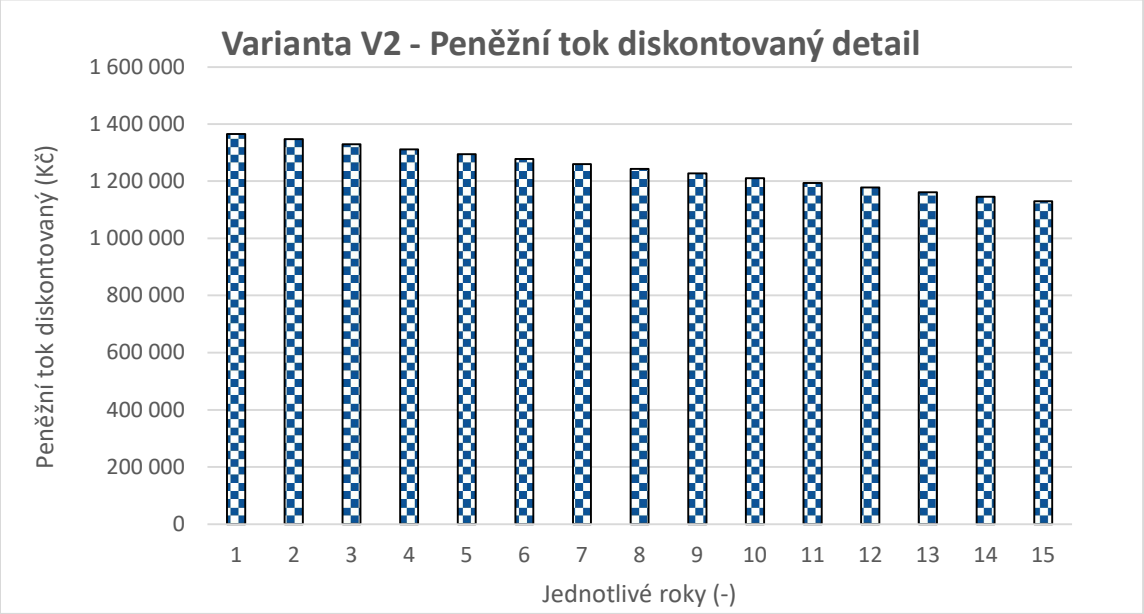
zvolila konzultantská firma TEBODIN, ze které byly čerpány vstupní data. U rizika lokálního zdroje je lepší volit dobu životnosti nižší, s výběrem delší doby životnosti roste riziko, že nějaká část technologie odejde a projekt nadále nebude ekonomicky vycházet. Odhadovaná životnost TČ je 20 let a poté by bylo nutné provést další reinvestice do jejich výměny a do další údržby. 20 let je tedy hranice tohoto projektu tak, jak byl nadefinován, tedy bez reinvesticí a údržby.

Z tabulky Tab. 5.4 je také vidět prostá doba návratnosti Ts, která nebere v úvahu časovou hodnotu peněz. U varianty 2 se rovná 9 rokům, u nejhorší varianty 1 se rovná 13 rokům. Pokud by se neuvažovala časová hodnota peněz, všechny projekty by byly v mezích ekonomické návratnosti vzhledem k době životnosti projektu. Oproti tomu diskontovaná doba návratnosti Tsd, která bere v potaz časovou hodnotu peněz znevýhodňuje variantu 1 a 4, při které varianta 1 je za hranicí návratnosti dané dobou životnosti projektu a varianta 4 je přímo na pomezí, tedy 15 let. Varianta 2 a 3 jsou v přijatelných mezích.

Graf 5.3: Graf varianty V2 – Peněžní tok diskontovaný[177]

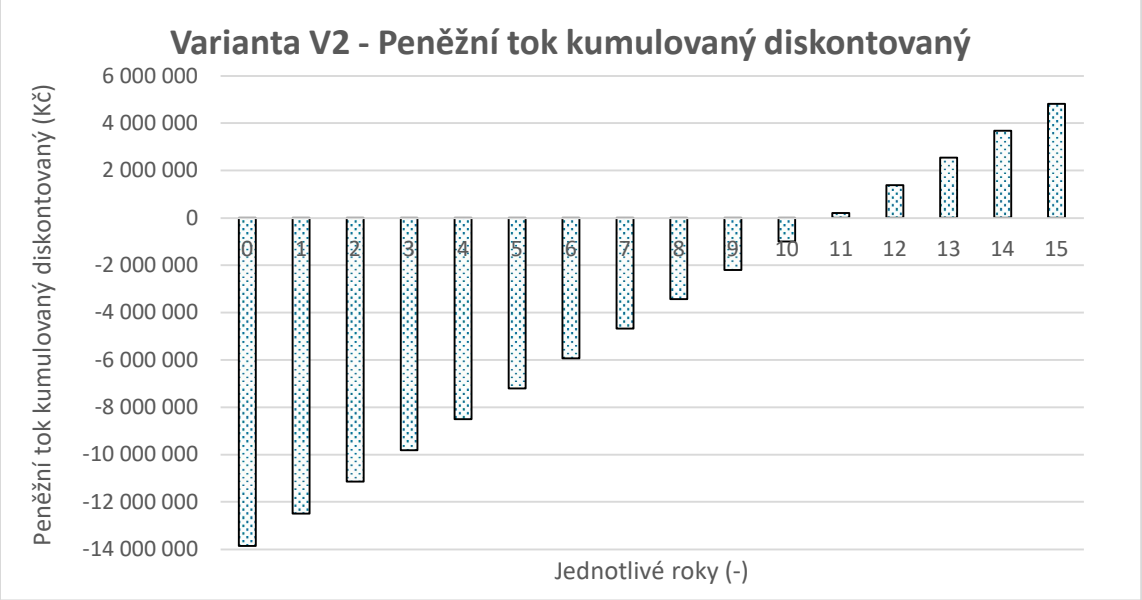
Na grafu 5.3 je znázorněn diskontovaný peněžní tok v každém roku u varianty V2. Je na něm vidět počáteční investice v hodnotě 13,9 milionů Kč v roce 0 a jednotlivé roční úspory v hodnotě okolo 1,3 milionu Kč v letech 1 až 15.

[177] Vytvořeno autorem práce



Graf 5.4: Graf varianty V2 – Peněžní tok diskontovaný detail[178]

Na grafu 5.4 je znázorněn detail diskontovaného peněžního tok u varianty V2. Jsou na něm viditelné jednotlivé roční úspory od roku 1. Je znázorněn pokles způsobený převážně 4% diskontem, tedy ztrátou časové hodnoty peněz. V roce 1 byla tato úspora 1,4 milionu Kč, zatímco v roce 15 byla úspora už pouze 1,1 milionu Kč.



Graf 5.5: Graf varianty V2 – Peněžní tok kumulovaný diskontovaný[179]

[178] Vytvořeno autorem práce

[179] Vytvořeno autorem práce

V grafu 5.5 je znázorněn diskontovaný kumulovaný peněžní tok. V roce 0 je znázorněna samotná investice, ke které se každý rok přičítají jednotlivé úspory za energie. Bod, ve kterém tato hodnota protíná nulu, zobrazuje dobu návratnosti. V tomto případě se jedná o desátý rok tohoto projektu. Hodnoty nad nulou poté značí příjem po splacení samotné investice či reinvestice a údržby.

Ekonomické vyhodnocení Tebodin				
	V1	V2	V3	V4
Investiční náklady (Kč)	15 920 000	13 860 000	19 970 000	25 120 000
NPV (Kč) - 15 let	-6 875 400	1 397 000	1 345 700	1 829 500
IRR (%) - 15 let	-1	11	10	10
Tsd (let)	**Nesplatí se**	**12**	**13**	**13**

Tab. 5.5: Tabulka Ekonomické vyhodnocení Tebotin v ZOO v Ústí nad Labem[180]

Z ekonomického vyhodnocení provedené společností Tebodin vychází nejlépe varianta 4. Varianta 1 vychází podstatně nejhůře. Varianta 1 byla vyprojektována konkurenční společností, varianty V2-4 byly vyprojektovány firmou Tebodin. Z toho si je možné domýšlet, jestli náhodou nechtěla tato firma upřednostnit sama sebe ve výběrovém řízení, a naopak nechtěla uškodit svojí konkurenci. Jejich výpočetní program nebyl k dispozici, jedná se tedy pouze o domněnku a je samozřejmě více pravděpodobné, že zjednodušující předpoklady v této práci jsou použity nekorektně či jich bylo zjednodušeno příliš.

Vnitřní výnosové procento IRR vyšlo vyšší u varianty 2 než u varianty 4. To je zajímavá situace, při které se musíme rozhodnout, který ekonomický ukazatel upřednostníme. V praxi se vždy rozhoduje pomocí NVP. Pokud bychom ale upřednostnili ukazatel IRR, dostali bychom větší výnos z naší investice. Ale kvůli tomu, že investice byla nižší než u varianty 4, dostali bychom v absolutní hodnotě méně kapitálu. Proto upřednostníme ukazatel NPV, vybíráme čistě podle množství kapitálu, tedy jeho absolutní hodnoty. Jelikož pohlížíme na projekt z pohledu zákazníka ZOO a nyní vybíráme projekt čistě z ekonomického hlediska, upřednostníme ukazatel NPV. Z pohledu vyhodnocení provedené společností Tebodin tedy pomocí tohoto ukazatele vybereme variantu 4.

[180] Vytvořeno autorem práce

Diskontovaná doba návratnosti je u variant V2-4 podobná. Varianta 2 se splatí do 12 let, varianty 3 a 4 do 13 let. Tedy pokud reálná životnost projektu bude nad 15 let bez potřeby reinvestice, všechny tři projekty jsou ekonomicky výhodné. Varianta 1 se nesplatí, tedy diskontovaná doba návratnosti je více než 15 let.

Varianta s delší dobou životnosti projektu

Pokud uvažujeme, že by projekt mohl mít delší dobu životnosti s ohledem na stálou funkčnost TČ a nepotřeby reinvestice ani údržby, je možné zkusit výpočet pro dobu životnosti 20 a 25 let. 25 let je už ale velmi nereálné, vzhledem k chování parametrů je ale zajímavé se na tento případ také podívat.

Ekonomické vyhodnocení životnosti NPV a IRR 15,20,25 let				
	V1	V2	V3	V4
NPV (Kč) - 15 let	-1 612 517	4 815 289	1 562 247	-1 056 636
NPV (Kč) - 20 let	2 520 109	10 234 467	7 785 401	5 777 726
NPV (Kč) - 25 let	6 359 280	15 282 102	13 568 621	12 064 969
IRR (%) - 15 let	3	8	5	3
IRR (%) - 20 let	6	11	8	6
IRR (%) - 25 let	7	12	9	8

Tab. 5.6: Tabulka Ekonomické vyhodnocení variant pro delší dobu životnosti projektu[181]

Z tabulky Tab. 5.6. je patrné, že se změnou doby životnosti projektu se ukazatele nezměnily příliš. Stále vychází podle obou kritérií NPV i IRR ve prospěch projektu V2. Myšlenka u nákladnějších investic byla, tedy v případě V3 a V4, že její úspory vyváží velkou investici v pozdějších letech. Rozdíl se mezi variantami V2-V4 sice snižuje, ale ne dostatečně rychle. Pokud by byla životnost projektu alespoň 20 let, vyplatil by se jakýkoli projekt z těchto 4. Nejvýhodnější ale stále zůstává projekt V2.

Z ukazatele IRR plyne to samé, nejvýhodnějším projektem je V2 i při životnosti 20 i 25 let. Z toho plyne, že ekonomicky se vždy nejvíce vyplatí projekt V2, i pokud by nebyla potřeba reinvestice či údržba a životnost projektu by byla delší.

[181] Vytvořeno autorem práce

5.4.2. Vyhodnocení reálného projektu

Pro reálný projekt byla k roku 2006 doporučena a zvolena varianta V4, která byla následně upravena dle podkapitoly *Varianta 4 upravená pro realizaci*. Výsledky tedy nelze porovnávat, protože projekt nabyl na velikosti a zaměřil se i na modernizaci a opravy areálu ZOO. Nejedná se pouze o výměnu zdroje energie, a tedy nelze očekávat, že se investice vrátí čistě z úspor energií. Možná se projeví ve vyšší návštěvnosti ZOO a vyšším příjmům ze vstupenek, ale jelikož se jedná o projekt financovaný statutárním městem Ústí nad Labem, projekt městské ZOO je nejspíše ztrátový a potřebuje finanční podporu pro svoje fungování.

Ekonomické vyhodnocení reálné varianty		
	V. Reálná	V. Reál. bez otop. sys.
NPV (Kč) - 15 let	-16 736 636	-10 436 636
IRR (%) - 15 let	-2	-1
Ts (let)	18	16
Tsd (let)	28	23

Tab. 5.7: Tabulka Ekonomické vyhodnocení reálné varianty[182]

Tabulka 5.7 odráží stanovené předpoklady. Investice v uskutečněné variantě činila 48,5 milionů Kč, popřípadě varianta bez otopného systému 34,5 milionů Kč. Dále byla tato částka snížena o dotaci v hodnotě 7,7 milionů Kč v obou případech. Je to tedy projekt, který nemůže být ekonomicky výhodný. Doba životnosti byla stanovena stejně, tedy na 15 let. Poté NVP vychází záporné u obou variant. Verze se započítaným otopným systémem do investice je ještě více záporná. Ukazatel IRR je také záporný, tedy nejenom že investice není ekonomicky výhodná, ale dokonce je více ztrátová, než kdyby nebyly finanční prostředky využity vůbec. Ukazatel Tsd poté říká, že diskontovaná doba návratnosti je pro reálnou variantu 27 let a pro verzi bez otopného systému je 22 let. Tedy se znovu jedná o nereálně dlouhé doby.

[182] Vytvořeno autorem práce

Ekonomické vyhodnocení reálné varianty s životností 15,20,25 let		
	V Reálná	V Reál bez otop. sys.
NPV (Kč) - 15 let	-16 736 636	-10 436 636
NPV (Kč) - 20 let	-9 902 274	-3 602 274
NPV (Kč) - 25 let	-3 615 031	2 684 969
IRR (%) - 15 let	-2	-1
IRR (%) - 20 let	1	3
IRR (%) - 25 let	3	5

Tab. 5.8: Tabulka Ekonomické vyhodnocení reálné varianty, delší doba životnosti projektu[183]

Z tabulky Tab. 5.8 je zřejmé, že reálný projekt by nebyl ekonomicky výhodný ani po 25 letech, a to bez jediné reinvestice či údržby. Pokud nebudeme uvažovat otopný systém, po 25 letech by teoretická návratnost byla, ale životnost projektu bude nejspíše o několik let nižší nebo bude potřeba nemalé reinvestice.

Krom smlouvy se Státním fondem životního prostředí, který poskytl podporu ve výši 15,4 milionů Kč, jehož polovina byla formou dotace a druhá polovina jako nízkoúročená půjčka splatná do 7 let od úspěšného dokončení projektu, přibyly 3 miliony Kč od České energetické agentury a zbytek nákladů, tedy většinu, pokrylo samotné město Ústí nad Labem. Tedy žádný ze subjektů neměl tento projekt jako čistou investici, která se musí finančně splatit, ale spíše jako ekologický a prototypový projekt výtopny na geotermální energii.

Provedením navrženého projektu byla dosažena roční energetická úspora nakupované energie v hodnotě přibližně 9 000 GJ. Úspora je především z nepotřeby tepla z CZT v hodnotě 11 000 GJ ročně, ale k této hodnotě je nutné připočítat spotřebu TČ a elektrokotlů, tedy tuto hodnotu odečíst. Ta činí necelé 2 000 GJ ročně. To odpovídá odhadům doporučeného řešení, konkrétně variantě č. 4. Realizace projektu tedy také vedla ke snížení nákladů na nákup energie, a to přibližně o 1,9 milionu Kč ročně.

[183] Vytvořeno autorem práce

5.5. Technické vyhodnocení

Technické řešení zahrnuje využití geotermální vody o teplotě 32 °C z vrtu hlubokého 514 metrů, umístěného na pozemku investora. Tepelná energie se předává pomocí primárního okruhu deskovým výměníkům, které následně předávají teplo sekundárnímu okruhu. Tento okruh spojuje pět tepelných stanic v areálu ZOO, který má převýšení 100 metrů. Z důvodu chemického složení geotermální vody je tato voda oddělena od vytápěcího systému a po předání tepelné energie je vrácena zpět do podloží.

Vytápění 26 hektarové zoologické zahrady je zajištěno pěti tepelnými stanicemi s celkovým instalovaným výkonem 1 140 kW. Tyto stanice obsahují kaskádovitě řazená tepelná čerpadla. Ta jsou osazena systémem měření a regulace, který vyhodnocuje aktuální potřebu výkonu jednotlivých stanic v závislosti na venkovní teplotě, což umožňuje tepelným čerpadlům efektivní regulaci a snižuje potřebu velkých akumulačních nádrží, který by tento projekt ještě více prodražily. Díky tomu se také prodlužuje životnost samotných tepelných čerpadel, respektive kompresorů v nich obsažených. Zároveň se díky přebudování původního vytápěcího systému kvůli jeho neefektivitě snížily ztráty energie až o 30 %.

Řešení umožňuje tepelným čerpadlům pracovat optimálně s nízkým rozdílem teplot na výparníku, což maximalizuje výkon i topný faktor. Výsledky měření ukázaly, že topný faktor těchto tepelných čerpadel je v rozmezí 4,5 až 6, někdy dosahuje až 6,52. Čerpadla jsou dimenzována na pokrytí 80 % tepelné ztráty objektů a zajišťují teplo až do teploty -6 °C. V případě nižších teplot, které nastávají průměrně 8,6 dnů ročně, se aktivuje doplňkový zdroj, kterým je elektrokotel o instalovaném výkonu 120 kWt. Elektrokotel není ekonomicky efektivní na provoz, ale z důvodu využití pouze několik dnů v roce se vyplatí více než naddimenzování tepelných čerpadel. Emise tepelných čerpadel i elektrokotle závisí především na energetickém mixu elektřiny, kterou odebírají. Ta je z velké části stále vyráběna fosilními zdroji.

Hlavním technickým nedostatkem je špatně provedený vsakovací vrt pro odvod ochlazené geotermální vody zpět do podzemí. Během provozu nového systému došlo k podmáčení půdy v okolí vrtu, které vedlo k nutnosti získat povolení od místních vodohospodářských orgánů k vypouštění ochlazené vody do řeky Labe.

Tento problém se vsakovacím vrtem je nutné vyřešit, aby se geotermální voda mohla vracet zpět do podzemních prostor a mohla dále cirkulovat. Současné vypouštění vody do Labe totiž ohrožuje vodní rovnováhu geotermálního zdroje. To by v nejhorším případě mohlo vést i k jeho trvalému poškození.

Geotermální způsob vytápění ve větších objektech je v České republice ojedinělý, v zoologických zahradách úplně první a zároveň je šetrnější k životnímu prostředí oproti původnímu fosilnímu zdroji místní teplárny. Tento krok lokálně vylepšil místní ovzduší a přispěl ke zlepšení životních podmínek v celých severních Čechách. Emise všech sledovaných znečišťujících látek klesly o 25 až 65 %. Realizace vedla také k výraznému snížení produkce CO_2, konkrétně o 780 tun ročně, což představuje pokles o 61 %. Zejména v severních Čechách je tento krok velmi vítaný, protože kvůli vysoké koncentraci chemického průmyslu je ekologická zátěž v Ústeckém kraji značná. Zároveň bylo ukázáno, že větší projekty geotermální energie jsou funkční a pro více areálů a objektů by mohly být v ČR inspirací. Poslední velký projekt pokračující ve využívání geotermální energie, i když ne geotermální vody, bylo nové sídle ČSOB v Praze na Radlické ulici, kde se použila tepelná čerpadla země-voda.

Proto si myslím, že i přesto, že v mém výpočtu nevyšla varianta V4 jako ekonomicky nejvýhodnější možnost, technologicky i energeticky nejvýhodnější je. Bylo ukázáno, že se celý objekt může úplně odpojit od CZT, které pokrývalo naprostou většinu tepelné energie v areálu do té doby, a to pouze pomocí geotermální výtopny z termálního pramenu. Je to zároveň varianta s největším ušetřením nakoupené energie, a to o 9 000 GJ ročně. Objekt se stal mnohem více nezávislý na dodávkách energie a ukázal, že geotermální energie má svůj potenciál a je možné ji využít.

6.Závěr

Geotermální energie je nedílnou součástí naší planety poskytující nepřeberné množství energie, která může být lidstvem využita k prospěchu. Její nevýhodou je špatná dostupnost a velké náklady na hluboké geotermální vrty. Zatímco hydro-geotermální elektrárny, využívající termální horkou vodu, nalezneme v optimálních lokalitách v geologicky aktivních oblastech, elektrárny využívající pokročilé technologie, jako například HDR, nejsou rozšířené vůbec. Hlavním důvodem je upřednostňování vývoje jiných zdrojů, především solárních a větrných elektráren. I přesto, že je geotermální energie charakterizována jako neemisní zdroj, nejsou provedeny v žádném státě podrobné průzkumy potenciálně vhodných lokalit. Přitom má tato energie především jednu výhodu oproti zmiňovaných, nejedná se o intermitentní zdroj a lze ji využívat bez odstávky celý rok.

Některé státy včetně České republiky se v posledních letech snaží geotermální energii podporovat. Největší připravovaný projekt v ČR je projekt geotermální elektrárny typu HDR v Litoměřicích, který je nejenom prototypovým projektem spojující geotermální energii, úschovu tepelné energie do horniny, solární panely, bateriová uložiště i výrobnu vodíku, ale zároveň je celosvětovým výzkumným centrem. Technologie HDR má ale bohužel dlouho cestu vývoje před sebou, jejím hlavním rizikem je vznik (opakovaných) zemětřesení o střední až vyšší síle, která nejsou předem očekávaná v žádném ze simulačních programů týkajících se vrtů. Znalosti lidstva o zemské kůře, plášti, natož jádře jsou totiž stále velmi omezené.

Se zemětřesením má v Evropě zkušenost především „ráj“ geotermální energie, Island. Jedná se o zemi, která je největším světovým výrobcem tzv. zelené energie v přepočtu na obyvatele, ale zároveň o zemi, která zažívá deseti tisíce zemětřesení ročně až se střední závažností na Richterově stupnici. V tomto případě se nejedná o problémy spojené s technologií HDR, všechny zdroje geotermální energie na Islandu jsou hydro-geotermálního typu. Problém je se sopečnou aktivní lokalitou. Krom toho toto zelené prvenství spočívá pouze v energetické výrobě zelené energie, ale nepřipočítává vyprodukovaný oxid uhličitý, metan, oxid síry a jiné plyny z fumarol či sopek přítomných hned vedle zelených energetických vrtů. Proto je úsměvné používat argument, že každá evropská země by se měla Islandu připodobnit.

Dalším možným konzervativním využitím v České republice je geotermální výtopna, tedy je to varianta, u které není potřeba vysokopotenciální teplo a technologie je v tomto případě připravená. Tyto výtopny by mohly najít uplatnění především jako zdroj tepla pro města a obce, pokud bude zakázané uhlí i zemní plyn pro energetické účely. Takových projektů vzniká více, často jsou tyto výtopny kombinovány s tepelnými čerpadly pro docílení vyšší teploty vody na výstupu do topné soustavy. Díky vysokému topnému faktoru tepelných čerpadel je využití energií mnohem nižší a v závislosti na energetickém mixu dané země také ekologičtější a ekonomičtější.

V této práci bylo zpracováno technicko – ekonomické vyhodnocení takového projektu v ZOO v Ústí nad Labem. V konečném důsledku byl tento projekt sice ekonomicky ztrátový, nicméně ekonomická stránka byla pouze jednou z mnoha kritérií. Díky geotermální energii se mohla ZOO úplně odpojit od CZT, tedy krom elektrické energie je nyní energeticky nezávislá. Realizováním projektu byla dosažena roční energetická úspora nakupované energie přibližně 9 000 GJ, to odpovídá úspoře 79 % oproti původnímu řešení. Náklady na nákup energie se snížily přibližně o 1,9 milionu Kč ročně.

Také díky tomuto projektu klesly emise oproti původní variantě o 25-65 %. Nejvýraznější snížení bylo u produkce CO_2, konkrétně o 780 tun ročně, což představuje pokles o 61 %. Pokud by energetický mix ČR využíval v budoucnu méně fosilních zdrojů, emise ZOO v Ústí nad Labem by dále klesaly. V neposlední řadě tento projekt ukázal, že využití geotermálního tepla pro větší areál či budovu je možné a za určitých podmínek i výhodné. Pokud by cílem projektu ZOO nebyla také modernizace i vylepšení samotného areálu, projekt mohl být i do 13 let ekonomicky návratný.

7. Seznam literatury a elektronických zdrojů

[1] ABER, James, 2013. Late Holocene climate. [online]. [cit. 2024-07-19]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20110613164351/http://academic.emporia.edu/aberjame/ice/lec19/holocene.htm

[2] ANDREWS, Robin George. An Italian Volcano Turned Out to Be a Fraud. The Atlantic [online]. 2019 [cit. 2024-07-23]. Dostupné z: https://www.theatlantic.com/science/archive/2019/08/larderello-isnt-actually-volcano/596038/

[3] ASKJAENERGY, 2012. Icelandic energy basics. Askja Energy - The Essential Perspective on Energy in the Northern Atlantic and Arctic Region [online]. [cit. 2024-07-19]. Dostupné z: https://askjaenergy.com/2012/12/10/icelandic-energy-basics/

[4] ASKJAENERGY, 2013. Landsvirkjun becomes wind power operator. Askja Energy - The Essential Perspective on Energy in the Northern Atlantic and Arctic Region [online]. [cit. 2024-07-19]. Dostupné z: https://askjaenergy.com/2013/02/18/landsvirkjun-becomes-wind-power-operator/

[5] ASKJAENERGY, 2020. The Energy Sector. Askja Energy - The Essential Perspective on Energy in the Northern Atlantic and Arctic Region [online]. [cit. 2024-07-19]. Dostupné z: https://askjaenergy.com/iceland-introduction/iceland-energy-sector/

[6] BACHORÍK, Jan, 2021. Vědci chtějí v Litoměřicích ukládat vyrobené teplo do země. Pomáhat by mělo během topné sezony. IROZHLAS [online]. [cit. 2024-07-06]. Dostupné z: https://www.irozhlas.cz/veda-technologie/veda/vedci-litomerice-teplarenstvi-ukladani-tepla-vyzkum_2105081055_tzr

[7] BOUČEK, Bedřich; KODYM, Odolen. Geologie.1. díl: Všeobecná geologie. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1958. S. 188.

[8] BRACKE, R. a E. HUENGES, 2022. ROADMAP FOR DEEP GEOTHERMAL ENERGY FOR GERMANY. 2022.

[9] BROŽ, Karel a Bořivoj ŠOUREK. Alternativní zdroje energie. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02802-X.

[10] CUKUP, Mulyana, 2016. The thermodynamic cycle models for geothermal power plants by considering the working fluid characteristic. [online]. [cit. 2024-08-14]. Dostupné z: https://pubs.aip.org/aip/acp/article/1712/1/020002/801270/The-thermodynamic-cycle-models-for-geothermal

[11] ČGS, 2024. Geotermální potenciál ČR. [online]. [cit. 2024-07-08]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/geotermalni_potencial/

[12] ČTK, 2024. ČTK: Česko zaostává ve využití geotermie, do r. 2030 by mohly vzniknout první elektrárny [online]. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: https://www.geotermie.cz/ctk-cesko-zaostava-ve-vyuziti-geotermie-do-r-2030-by-mohly-vzniknout-prvni-elektrarny/

[13] ČTK, 2022. Geotermální energie v Česku? V Litoměřicích začnou s výzkumem, pilotní vrty půjdou do hloubky 500 metrů. IROZHLAS [online]. [cit. 2024-07-06]. Dostupné z: https://www.irozhlas.cz/veda-technologie/veda/geotermalni-energie-vrt-litomerice-vrt-synergys_2210150712_ban

[14] ČTK, 2013. První česká geotermální elektrárna u Semil nebude. Lidé se báli otřesů při vrtání. Hospodářské noviny (HN.cz) [online]. [cit. 2024-07-08]. Dostupné z: https://byznys.hn.cz/c1-59809650-prvni-ceska-geotermalni-elektrarna-u-semil-nebude-lide-se-bali-otresu-pri-vrtani

[15] ČTO, 2013. V Trojanovicích opravují starý vrt. Unikal z něj metan. [online]. [cit. 2024-07-09]. Dostupné z: https://ct24.ceskatelevize.cz/clanek/archiv/v-trojanovicich-opravuji-stary-vrt-unikal-z-nej-metan-314662

[16] DIPIPPO, Ronald. Geothermal power plants: principles, applications, case studies, and environmental impact. 3rd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, c2012. ISBN 978-008-0982-06-9.

[17] DŘÍMAL, Petr, 2016. Tepelná čerpadla, geotermalní energie. [online]. [cit. 2024-07-09]. Dostupné z: https://publi.cz/books/93/Impresum.html

[18] DUFKA, Jaroslav. Vytápění netradičními zdroji tepla: biomasa - tepelná čerpadla - solární systémy. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-079-2.

[19] ELEKTŘINA.CZ, 2023. Geotermální energie: Jakou budoucnost má v Česku?: Jakou budoucnost má v Česku? Elektřina.cz [online]. [cit. 2024-07-06]. Dostupné z: https://www.elektrina.cz/geotermalni-energie-jakou-budoucnost-ma-v-cesku

[20] ENEL. The "Valle Secolo" geothermal power plant in Larderello, Italy. Enel Green Power [online]. 2022 [cit. 2024-07-23]. Dostupné z: https://www.enelgreenpower.com/our-projects/operating/geothermal-power-plant-larderello

[21] ENTERGEO, 2015. Co je geotermální energie [online]. [cit. 2024-07-20]. Dostupné z: http://www.entergeo.com/co-je-geotermalni-energie.html

[22] GEOTERMIE. Technologie pro geotermální elektrárny. Geotermie [online]. 2024 [cit. 2024-07-24]. Dostupné z: https://www.geotermie.cz/3-technologie-pro-geotermalni-elektrarny/

[23] GEROTOP. Nová budova ČSOB bude vytápěna a chlazena zemními tepelnými čerpadly, přenášející výkon až 1300 kW. Gerotop.cz [online]. 2022 [cit. 2024-07-25]. Dostupné z: https://www.gerotop.cz/nova-budova-csob-bude-vytapena-a-chlazena-vrty

[24] GEOTERMIE. Přehled: geotermální elektrárny v USA. Je jich 31. Geotermie [online]. 2018 [cit. 2024-07-23]. Dostupné z: https://www.geotermie.cz/prehled-geotermalni-elektrarny-v-usa/

[25] GEYSERS. About Geothermal Energy [online]. 2024 [cit. 2024-07-23]. Dostupné z: https://geysers.com/geothermal

[26] HÝL, Filip, 2023. Statutární město Ústí nad Labem. Ústí nad Labem [online]. [cit. 2024-07-20]. Dostupné z: https://zakazky.usti-nad-labem.cz/contract_display_1667.html

[27] ICELAND.IS, 2009. Geology of Iceland. Gateway to Iceland [online]. [cit. 2024-07-19]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20090414113144/http://www.iceland.is/country-and-nature/nature/Geology/

[28] KLOZ, Martin, Antonín TYM a Štěpán CHALUPA. Podklad ke krajským energetickým koncepcím [online]. 2022 [cit. 2024-07-24]. Dostupné z: https://www.mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/vyzkum-a-vyvoj-v-energetice/resene-dokoncene-projekty-a-jejich-vystupy/projekty-podporene-v-ramci-2-verejne-souteze-programu-theta/2023/2/Podklad-ke-krajskym-energetickym-koncepcim-_priloha-k-vystupu-V2_.pdf

[29] KLOZ, Martin, Antonín TYM a Štěpán CHALUPA. Země má energie na rozdávání, proč ji využíváme tak málo a jak to změnit? MPO [online]. 2022 [cit. 2024-07-24]. Dostupné z: https://www.mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/vyzkum-a-vyvoj-v-energetice/resene-dokoncene-projekty-a-jejich-vystupy/projekty-podporene-v-ramci-2-verejne-souteze-programu-theta/2023/2/Shrnuti-a-doporuceni-pro-rozvoj-geotermalni-energetiky-v-CR-_vystup-V2_.pdf

[30] MYSLIL, Vlastimil, Zdeněk KUKAL, Karel POŠMOURNÝ a Václav FRYDRYCH, 2007. Geotermální energie. 2007. Praha: Ministerstvo životního

prostředí, s. 32. ISBN 1801-6898. Dostupné také z: https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/4BE8C2DA7BE810F6C125725900456E0A/$file/planeta4_korektura3.pdf

[31] MYSLIL, V. et al. (2002): Závěrečná zpráva úkolu VaV MŽP 630/3/ 99: Možnosti využití geotermální energie pro energetické účely. Praha.

[32] MYSLIL, V., Kukal, Z., Pošmourný, K., Frydrych, V. Geotermální energie. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2007. ISSN: 1801-6898.

[33] NAZELENO.CZ, 2010. První geotermální elektrárna v ČR: Liberec nebo Litoměřice? Nazeleno.cz [online]. [cit. 2024-07-05]. Dostupné z: https://www.nazeleno.cz/energie/energetika/prvni-geotermalni-elektrarna-v-cr-liberec-nebo-litomerice.aspx

[34] O ENERGETICE, 2023. Německo chce do roku 2030 zdesetinásobit dodávky tepla z geotermálních tepláren. OEnergetice.cz [online]. [cit. 2024-07-05]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/nemecko/nemecko-chce-do-roku-2030-zdesetinasobit-dodavky-tepla-z-geotermalnich-teplaren/

[35] O ENERGETICE, 2024. V Litoměřicích hloubí dva průzkumné vrty kvůli geotermální energii. OEnergetice.cz [online]. [cit. 2024-07-04]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/teplarenstvi/v-litomericich-hloubi-dva-pruzkumne-vrty-kvuli-geotermalni-energii/

[36] ŠAFANDA, J., Rajver D., Correia A., Dědeček P. (2007): Repeated temperature logs from Czech, Slovenian and Portuguese borehole climate observatories. Climate of the Past 3, 453–462. doi: 10.5194/cp-3-453-2007

[37] ŠAFANDA, Jan, 2018. Jaké jsou možnosti využití geotermální energie v České republice? OEnergetice.cz [online]. [cit. 2024-07-20]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/nazory/jake-jsou-moznosti-vyuziti-geotermalni-energie-cesku/

[38] PETERKA, Michal, 2023. GEOTERMÁLNÍ VYTÁPĚNÍ ZOO V ÚSTÍ NAD LABEM. Tepelná čerpadla IVT [online]. [cit. 2024-07-20]. Dostupné z: https://www.cerpadla-ivt.cz/cz/geotermalni-vytapeni-zoo-v-usti-nad-labem

[39] PETRÁŠ, Dušan. Nízkoteplotní vytápění a obnovitelné zdroje energie. Bratislava: Jaga, 2008. ISBN 978-80-8076-069-4.

[40] POJAR, Petr, 2024. Příprava prvního geotermálního projektu v ČR trvala 20 let, vrty budou hluboké až 4 km. ČESKÉSTAVBY.cz [online]. [cit. 2024-07-06]. Dostupné z: https://www.ceskestavby.cz/clanky/priprava-prvniho-geotermalniho-projektu-v-cr-trvala-20-let-vrty-budou-hluboke-az-4-km-33029.html

[41] PROTC, 2008. Geotermální vytápění areálu ZOO. PROTC [online]. [cit. 2024-07-20]. Dostupné z: https://www.projektuj-tepelna-cerpadla.cz/cz/reference/4.geotermalni-vytapeni-arealu-zoo

[42] QUASCHING, V. Obnovitelné zdroje energií. Havlíčkův Brod: Grada Publishing, a. s., 2010. ISBN: 978-80-247-3250-3

[43] REYKJAVÍK ENERGY, 2009. Nesjavellir POWERPLANT [online]. [cit. 2024-07-19]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20110717114431/http://www.or.is/media/PDF/Nesjavellir_Enska.pdf

[44] ROZSYPALOVÁ, Michaela, 2024. Geotermální projekt pokračuje: Vrtná souprava se zakousla do země v Jiříkových kasárnách: Vrtná souprava se zakousla do země v Jiříkových kasárnách. Www.litomerice.cz [online]. [cit. 2024-07-06]. Dostupné z: https://www.litomerice.cz/aktuality/geotermalni-projekt-pokracuje-vrtna-souprava-se-zakousla-do-zeme-v-jirikovych-kasarnach

[45] RYBÁR, P. (2007): Zdroje geotermálne energie a možnosti ich využitie. Acta Montanistica Slovaca,

[46] SVEINBJORN Bjornsson, Geothermal Development and Research in Iceland (Ed. Helga Bardadottir. Reykjavik: Gudjon O, 2006

[47] SVOBODA, Josef. Encyklopedický slovník geologických věd, Sv. 1, A–M. Praha: Academia, 1983. S. 391–392

[48] ŠAFANDA, J. (1999): Ground surface temperature as a function of slope angle and slope orientation and its effect on the subsurface temperature field. Tectonophysics.,

[49] ŠPONAR, P. (2005): Geotermální vrty. Uhlí, Rudy, Geologický průzkum, Praha.

[50] TEBODIN. Zhodnocení efektu projektu využití geotermální energie pro vytápění ZOO v Ústí nad Labem. MPO [online]. 2007 [cit. 2024-07-25]. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Zhodnoceni_efektu_projektu_vyuziti_geotermalni_energie_pro_vytapeni_ZOO_v_Usti_nad_Labem_2220047234.pdf

[51] TECHNICKYTYDENIK. Jak elektrárna může „vyrobit“ zemětřesení. *Technický týdeník* [online]. 2018 [cit. 2024-07-30]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/energetika-teplo/jak-elektrarna-muze-vyrobit-zemetreseni_44687.html

[52] THINKGEOENERGY, 2022. Geothermal Energy Production & Utilisation. Thinkgeoenergy.com [online]. [cit. 2024-08-13]. Dostupné z: https://www.thinkgeoenergy.com/geothermal/geothermal-energy-production-utilisation/

[53] TRDLA, Martin, 2011. ČEZ stopl výstavbu geotermální elektrárny v Liberci, byla by drahá. In: IDNES.cz [online]. [cit. 2024-07-06]. Dostupné z:

https://www.idnes.cz/liberec/zpravy/cez-stopl-vystavbu-geotermalni-elektrarny-v-liberci-byla-by-draha.A110210_135455_liberec-zpravy_alh

[54] TRAMBA, David, 2022. Čekání na první geotermální elektrárnu v Česku. Potenciál by tu byl. Ekonomický deník [online]. [cit. 2024-07-08]. Dostupné z: https://ekonomickydenik.cz/cekani-na-prvni-geotermalni-elektrarnu-v-cesku-potencial-by-to-byl/

[55] TYM, Antonín. SYNERGYS animace technologických součástí [online]. [cit. 2024-07-06]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=dfsEjDEIvq0

[56] UNWIN, Jack, 2019. The oldest geothermal plant in the world. Power Technology [online]. [cit. 2024-07-22]. Dostupné z: https://www.power-technology.com/features/oldest-geothermal-plant-larderello/

[57] USTI.CZ, 2006. ZOO vytápí geotermální energie. Statutární město Ústí nad Labem [online]. [cit. 2024-07-20]. Dostupné z: https://www.usti.cz/cz/seznamy-zprav/aktualni-informace/zoo-vytapi-geotermalni-energie.html

[58] VOBOŘIL, David, 2015. Geotermální energie v ČR. OEnergetice.cz [online]. [cit. 2024-07-15]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/geotermalni-energie-v-cr/

[59] VOBOŘIL, David, 2015. Geotermální energie. OEnergetice.cz [online]. [cit. 2024-07-15]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/elektrina/geotermalni-energie/

8. Seznam příloh

Příloha 1: Výpočetní program – karta: *1. Energetická bilance*

Příloha 2: Výpočetní program – karta: *2. Emise*

Příloha 3: Výpočetní program – karta: *3. Ekonomické vyhodnocení*

Příloha 4: Výpočetní program – karta: *4. Ekonomické vyhodnocení test*

Příloha 5: Výpočetní program – karta: *5. Ekonomické vyhodnocení Tebodin*

Přílohy jsou uvedeny pouze v elektronické verzi a pouze v informačním systému ČVUT.