



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

MOŽNOSTI VYUŽITÍ GEOTERMÁLNÍ ENERGIE

POTENCIAL FOR GEOTHERMAL ENERGY UTILIZING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VOJTĚCH KOHUT

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. JIŘÍ POSPÍŠIL, PH.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2008/09

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Kohut Vojtěch

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Možnosti využití geotermální energie

v anglickém jazyce:

Potencial for geothermal energy utilizing

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá obecným posouzením možností využívání geotermální energie pro výrobu el. energie a zásobování energií tepelnou. Pozornost je zaměřena na možnosti využití nízkopotenciální geotermální energie s užitím tepelných čerpadel.

Cíle bakalářské práce:

1. Zpracovat rešerši o možnostech využití geotermální energie.
2. Charakterizovat realizované geotermálních elektrárny.
3. Popsat možnosti využití geotermální energie jako zdroj tepelné energie pro tepelná čerpadla.
4. Posoudit možnosti využití geotermální energie v systémech zásobování teplem.

Seznam odborné literatury:

M. Cenk, Obnovitelné zdroje energie, FCC Public, 2001

Doc. Karel Brož, Alternativní zdroje energie, skriptum ČVUT, 2003

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne 20.11.2008

L.S.



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je provést rešerži dostupné literatury, na jejímž základě se čtenář seznámí s možnostmi praktického využití geotermální energie. Geotermální energie pochází z nitra naší planety. Jako taková se řadí mezi tzv. obnovitelné zdroje energie. Práce popisuje přímé využití tepla pro systémy zásobování tepelnou energií a výrobu elektrické energie v geotermálních elektrárnách. Je také pojednáno o možnostech využití nízkopotenciální geotermální energie pomocí tepelných čerpadel.

Klíčova slova

Geotermální energie, Obnovitelné zdroje energie, Geotermální elektrárny, Nízkopotenciální teplo, Tepelná čerpadla, Hot-Dry-Rock

Abstract

The main purpose of this bachelor's thesis is to collect all available literature, from which can reader obtain basic knowledge of geothermal energy practical usage possibilities. Geothermal energy comes from heart of our planet. As such it is ranked among renewable energy sources. Thesis describes direct heat utilisation for heat supply systems and electric power generation in geothermal power plants. It is also entertain about possible usage of low-potential geothermal energy by the help of heat pumps.

Keywords

Geothermal Energy, Renewable Energy Sources, Geothermal Power Stations, Low-potential Heat, Heat Pumps, Hot-Dry-Rock

Citace

KOHUT, V. *Možnosti využití geotermální energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 52 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

Možnosti využití geotermální energie

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Pospíšila, Ph.D.

.....
Vojtěch Kohut
29. května 2009

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za odbornou pomoc při tvorbě této práce.

© Vojtěch Kohut, 2009.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém Učení Technickém v Brně, Fakultě Strojního Inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez uděleného oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1	Úvod.....	3
2	Zdroje a použití geotermální energie	4
2.1	Zdroje	4
2.1.1	Mokrý zdroj energie – Hydro-geotermální systémy.....	5
2.1.2	Suchý zdroj energie – Energie teplých suchých hornin.....	6
2.2	Využití.....	6
2.2.1	Výroba elektřiny.....	7
2.2.2	Přímé použití tepla	7
2.3	Ekologie a ekonomika provozu.....	8
2.3.1	Ekonomické zhodnocení	8
2.3.2	Ekologické dopady	10
2.3.3	Výhody a nevýhody použití	10
3	Systémy zásobování geotermálním teplem	11
3.1	Geotermální vrty	11
3.1.1	Technologie vrtání.....	11
3.1.2	Kompletace vrtu	13
3.2	Podzemní část.....	14
3.2.1	Uvedení vrtu do provozu.....	14
3.2.2	Návrh podzemní části systému.....	14
3.3	Nadzemní část	15
3.3.1	Produkce geotermální tekutiny.....	15
3.3.2	Zajištění kvality reinjektované vody	16
3.3.3	Přenos tepla	17
3.3.4	Požadavky na vybavení.....	17
3.3.5	Reinjekce geotermální tekutiny.....	18
3.4	Dálkové vedení tepla.....	18
3.5	Celkové rozvržení systému	18
4	Využívání geotermální energie pro výrobu elektrické energie	20
4.1	Princip funkce geotermální elektrárny	22
4.2	Podzemní část.....	23
4.2.1	Systémy zdrojů využívané při výrobě elektřiny.....	23
4.2.2	Zvýšení produktivity	25
4.3	Nadzemní část	25
4.3.1	Otevřené systémy	25
4.3.2	Uzavřené (binární) systémy	27
4.3.3	Sdružené systémy	29
5	Geotermální tepelná čerpadla a využití nízkopotenciální energie	30
5.1	Problematika tepelných čerpadel	30
5.1.1	Zdroje nízkopotenciálního tepla.....	31
5.1.2	Princip funkce tepelného čerpadla	31
5.1.3	Topný faktor.....	32
5.1.4	Rozdělení tepelných čerpadel.....	32
5.2	Systémy geotermálních tepelných čerpadel	33
5.2.1	Přečerpávání tepla z podpovrchové vrstvy zeminy.....	33
5.2.2	Využití tepla akumulovaného v zemském polomasivu.....	34
5.2.3	Přečerpávání tepla z podpovrchových studničních a geotermálních vod z hloubek.....	35
5.2.4	Vrty pro tepelná čerpadla	37

6	Uplatnění v České Republice	39
6.1	Nízkopotenciální a středněpotenciální energie pro přímé využití tepla.....	40
6.2	Využití vysokopotenciální energie a výroba elektřiny v ČR	40
6.2.1	Geotermální projekt Litoměřice	41
7	Závěr.....	43

1 Úvod

Geotermální energií nazýváme, v obecném slova smyslu, souhrnně všechny druhy energií, které mají původ uvnitř Země, tedy v zemské kůře i jádře. Tyto druhy energie jsou lidem dostupné v mnoha různých formách. Lidstvo je také již od dávných dob využívá k praktickým účelům. Již ve starověku používali naši předkové tuto energii k vytápění obydlí, především v geologicky aktivních oblastech, kde tento způsob přetrval také do dnešní doby. A nejenže přetrval, ale v posledních desetiletích nabral zcela nový rozvoj.

Dnes je geotermální energie svým způsobem moderní záležitostí a mnoho lidí, mezi nimi i vědců se jí zabývá. Hovoří se o ní především jako o vhodné alternativě, pro výrobu tepelné a elektrické energie při postupném úbytku tzv. neobnovitelných zdrojů energie, přičemž se zkoumá z hlediska jak energetického, tak i s uvažováním ekonomických a ekologických dopadů. Předpokládá se, že pro tyto energetické účely, v budoucnu nahradí (spolu s jinými tzv. alternativními zdroji energie) dnes většinou používané neobnovitelné zdroje energie. Ve své práci se pokusím zachytit možnosti využívání geotermální energie především z hlediska výroby energie a tepla, přičemž velice stručně zmíním i ekologické dopady a ekonomickou situaci, protože všechny tyto oblasti spolu vždy souvisí, a pro co nejlepší zhodnocení je nelze zanedbat.

Již jsem zmínil pojmy neobnovitelných a obnovitelných zdrojů energie. Energie zemského jádra, jak se také někdy nepřesně geotermální energii říká, se řadí mezi tzv. alternativní, čili obnovitelné zdroje energie. Tento pojem je však sám o sobě dosti nepřesný. Používá se především jako protiklad k tzv. neobnovitelným zdrojům energie. Tedy zdrojům, které nemají schopnost se obnovovat v takovém množství, v jakém jsou spotřebovány. K těmto zdrojům se řadí fosilní paliva (černé a hnědé uhlí, ropa, zemní plyn atd.) a jaderná energie. Za alternativní zdroje energie se považuje kromě energie geotermální, také energie vodní, větrná a solární a někdy také energie z biomasy.

Proč je rozdělení na obnovitelné a neobnovitelné zdroje nepřesné? Velice obecně se dá shrnout, že neobnovitelné zdroje neexistují, protože všechny zdroje se časem vyčerpají (tedy přemění na jiný typ energie). Stejně tak i energická aktivita Země je časem vyčerpateľná. Uvolněné teplo je však v porovnání s tepelnou kapacitou planety zanedbatelné. K jejímu úplnému vyčerpání může dojít v řádech milionů až miliard let. Rozdíl mezi obnovitelnými a neobnovitelnými zdroji je dán tedy časem, za který se vyčerpají, než dojde k jejich obnovení. I toto rozdělení je svým způsobem relativní, a proto se také můžeme setkat s různými možnostmi rozdělení. Téměř vždy se však termín *alternativní zdroje* používá pro tyto druhy energie: geotermální, větrnou, sluneční a vodní.

V dlouhodobém měřítku má geotermální energie velice dobré vyhlídky na uplatnění, jak v rámci obnovitelných zdrojů, tak globálně. Ať už budeme považovat geotermální energii za obnovitelnou, či nikoliv, nemůžeme popřít, že je v současnosti velice perspektivní energií.

2 Zdroje a použití geotermální energie

Geotermální energie je tedy teplo produkované v nitru Země. Uvádí se, že celkový tepelný obsah Země dosahuje 10^{31} J [1]. Toto teplo se nachází především v zemském jádře, a také plášti. Z nitra naší planety ale proudí směrem k povrchu poměrně silný tepelný tok. Jeho průměrná hodnota v kontinentální zemské kůře činí kolem 57 mW/m^2 [2]. To jistě není zanedbatelné množství. Celkový geotermální výkon naší planety je až 40 – 45 TW. To je asi 3x více než je současná celosvětová spotřeba primárních zdrojů energie. [1]

Původ tohoto tepelného toku je v teplotním gradientu (tj. nárůstu teploty s hloubkou pod zemským povrchem) mezi jádrem a povrchem planety. Uvádí se, že zemské jádro má teplotu až $5000 \text{ }^\circ\text{C}$. Tato vysoká teplota je způsobena teplem uvolněným při vzniku Země, kdy byla kinetická energie srážek materiálů přeměněna v teplo [2]. Jádro a plášť jsou také stále ohřívány teplem, vznikajícím při radioaktivním rozpadu prvků. Jde především o radioaktivní izotopy s dlouhým poločasem rozpadu jako ^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U a ^{238}U [2]. Velká část tepelného toku je ovšem geograficky velice rozptýlena na to, aby byla využita.

Teplo zemského jádra a pláště je k povrchu přenášeno dvěma mechanismy. Prouděním (konvekcí) a vedením (kondukcí). Proudění se uplatňuje především uvnitř pláště, kde za vysokých teplot a tlaků tečou roztavené látky. V blízkosti povrchu, tedy v zemské kůře asi do hloubky 100 km, je tento materiál již příliš studený a viskózní, na to aby se pohyboval. Teplo je zde proto přenášeno především kondukcí. Také teplotní gradienty jsou mnohem vyšší [2]. Ovšem zemská kůra není jedolitým celkem. Je rozlomena na menší celky, které se nazývají litosférické, nebo také tektonické desky. Ty nejsou v klidu, ale pohybují se po polotekutém zemském plášti vlivem konvekčních proudů. Rychlost jejich pohybu je na některých místech až několik cm za rok.

V místech, kde se litosférické desky stýkají a působí na sebe, vznikají velké tlaky. Jsou to geologicky nestabilní oblasti, ve kterých dochází k vývěřům žhavého magmatu. Tato skutečnost se projevuje zvýšenou sopečnou činností i častými zemětřeseními v těchto místech. Jsou tady také mnohem vyšší tepelné gradienty než jinde. Tepelný tok zde dosahuje místy až 300 W/m^2 . [2]

2.1 Zdroje

Za geotermální zdroje energie považujeme lokality s tepelnou energií, kterou můžeme prakticky a při přiměřených nákladech využít. Taková místa ovšem nenajdeme všude. Zdroje energie s největším potenciálem jsou především na hranicích litosférických desek, kde můžeme často spatřit také jejich viditelné projevy (jako např. horké prameny a gejzíry, výdechy kouře, sopečná činnost, atd.).

Pro možnost využití geotermální energie je důležité znát tzv. geotermální teplotní gradient v dané oblasti. Teplotní gradient je za ustáleného stavu (při konstantním tepelném toku k povrchu) závislý na tepelné vodivosti jednotlivých vrstev hornin. Tato závislost není s hloubkou lineární z důvodů různého složení těchto vrstev. Pro praktické účely uvažujeme teplotní gradient v blízkosti povrchu (do několika km), abychom mohli porovnat využitelnost jednotlivých zdrojů energie. Teplotní gradient různých zdrojů se může značně lišit. Jsou místa, kde dosahuje hodnot až nad 100 K/km a místa, kde naopak klesá na 10 K/km . Průměrná hodnota teplotního gradientu je přibližně 30 K/km [2]. Místa s nejvyšší hodnotou teplotního gradientu jsou také často místa s aktivní sopečnou i seizmickou činností. To může být jistým problémem při návrhu zařízení využívajících jinak příznivých geotermálních podmínek.

Z geologického hlediska je lokálním zdrojem tepla nejčastěji průnik masy magmatu, dosahující teplot až 600 – 900 °C, do povrchových vrstev zemské kůry. Mohou to být ovšem také místa s jistými tektonickými anomáliemi, jako zeštíhlení kontinentální kůry apod.

Kromě tepla, pocházejícího z vnitra Země se na zemském povrchu také akumuluje sluneční energie do hloubky přibližně 10 m. Jde spíše o sezónní záležitost, protože teplo se nahromadí v létě, kdy se vlivem slunečního záření povrch otepluje. Během zimy, kdy se zemský povrch ochladí se tato energie zase uvolní. Množství sezónní energie uložená tímto procesem je v celkovém rozsahu mnohem menší než energie mající svůj původ v hlubinách. Avšak teplotní průtoky jsou větší a snadněji přístupné, a také rovnoměrně rozmístěny po celém světě. Navíc je toto teplo dobře využitelné za pomoci tepelných čerpadel. Tepelná čerpadla nám dovolují získat dostatek tepla z malých hloubek v podstatě kdekoli na světě. Velice často se využívají k vytápění domů v zimě (O tepelných čerpadlech bude podrobněji pojednáno v kapitole 5).

Zdroje geotermální energie můžeme v zásadě rozdělit do několika druhů z nichž jsou významné dva systémy:

- Mokrý zdroj energie (Hydrotermální systémy) – Jsou to zdroje energie páry a horké vody. V současné době se k výrobě elektrické energie i v systémech zásobování teplem používají právě tyto zdroje, a to poměrně s dlouhou tradicí (již více než 100 let).
- Suchý zdroj energie – Tyto zdroje se převážinou získávají z hlubokých vrtů. S jejich rozsáhlejším využíváním se začalo v 70. letech minulého století. [2]

V přírodě existují ještě i systémy magmatické a geotlaké. Jejich využití je spíše otázkou budoucnosti. V dnešní době je zanedbatelné. [2]



Obr. 1 Oblasti výskytu geotermálních zdrojů na hranicích tektonických desek [28]

2.1.1 Mokrý zdroj energie – Hydro-geotermální systémy

Jedná se o geotermální vody. Tedy přírodní podzemní vody, nacházející se v dutinách v zemské kůře a v jejich zvodnělých vrstvách. Díky tomu jsou zahřáté zemským teplem natolik, že jejich teplota po výstupu na zemský povrch je vyšší než průměrná roční teplota vzduchu v dané oblasti. Obecně lze ze zemských vrtů využívat nízkopotenciální (pod 150 °C) i vysokopotenciální (nad 150 °C) teplou vodu, která může vystupovat na povrch jak v kapalném, tak v plynné fázi. Podle toho můžeme rozdělit i zdroje na nízkopotenciální a vysokopotenciální. Případně se někdy užívá navíc pojem středněpotenciální zdroje pro zdroje o teplotách do 130 – 150 °C, když uvažujeme nízkoteplotní zdroje, jako zdroje o běžných teplotách kolem 20 °C. Pro přímé energetické využití jsou vhodné vody z kategorie nízkoteplotních tříd o teplotách 30 – 100 °C. Naproti tomu pro výrobu elektrické energie se používají pouze vysokopotenciální zdroje s minimální teplotou 130 °C. Voda se ve většině případů získává hlubinnými vrty. [3]

Část geotermálních vod je využívána jako vody lázeňské. To znamená, že jsou podrobeny zvláštnímu režimu využití a jejich čerpání pouze pro energetické využití není přípustné. [3]

Celosvětové zásoby mokřých zdrojů energie se odhadují na 2 TW [4].

2.1.2 Suché zdroje energie – Energie teplých suchých hornin

Ne vždy, však narazíme na zdroje, ze kterých můžeme získat přímo vodu, ať už v kapalně, či plynné fázi. Jejich výskyt je omezen pouze na určité oblasti. Daleko častější jsou rezervoáry, kde je pouze neprostupná hornina (suchý masiv, či zanesené porézní prostředí), nebo je zde alespoň nedostatečný tlak vody. Pak chybí médium, které by mohlo přenést teplo na zemský povrch. Abychom jej mohli využít, potřebujeme tyto horniny nejprve uměle rozbít, čímž se přemění na propustné, a zavést do nich tekutiny, vhodné pro přenos tepla. Pro tento postup se užívá termín *Hot-Dry-Rock* (Teplá suchá skála). [2]

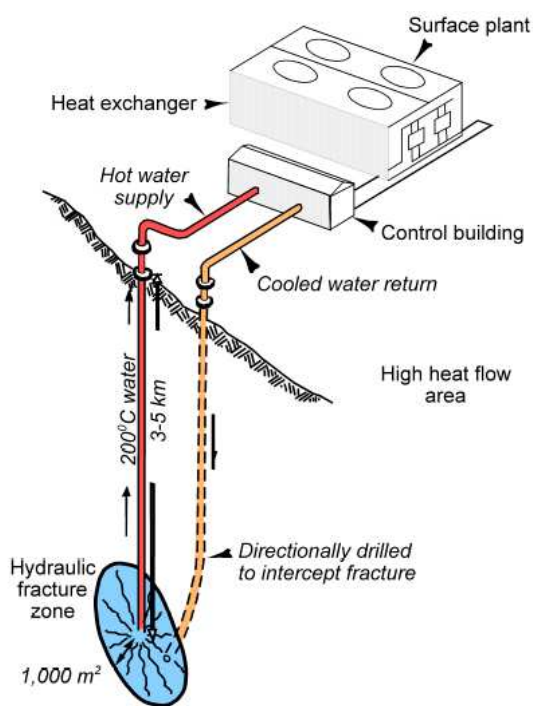
Metoda HDR začíná zavedením nejméně 2 vrtů do horninového podloží. Ty jsou obvykle umístěny několik set metrů od sebe. V případě skalního masivu, je nutné jej nejprve mechanicky rozrušit odstřelem trhaviny, chemickým lámáním, nebo velkým tlakem vody. U porézních, zanesených hornin, stačí obnovit jejich přirozené lomy tlakem vody. Tím v podstatě realizujeme výměník tepla a můžeme dolu zavést tekutinu pro čerpání tepla injekčním (vsakovacím) vrtem. Tekutina pak v hloubce prochází vytvořeným objemem propustných hornin a přijímá jejich teplo. Na povrch se tato energeticky obohacená voda s párou vrací produkčním (čerpacím) vrtem, kde ji využijeme buď přímo, nebo k výrobě páry v tepelném výměníku.

Takto můžeme vlastně přeměnit libovolný objem teplých suchých hornin v dostupných hloubkách na umělý rezervoár. Máme tedy možnost využít geotermální zdroje energie i v oblastech, kde neexistují hydrotermální zdroje.

Systémy HDR většinou pracují v uzavřeném cyklu, tzn. že pracovní tekutina cirkuluje v uzavřeném oběhu, takže voda, která je na povrchu ochlazená, se vede zpět do vrtů.

Výhodami technologie teplé suché skály jsou především její velká dostupnost a široký potenciál využití. Metoda je také šetrná vůči životnímu prostředí. HDR využití teplo suchých hornin se většinou aplikuje při výrobě elektrické energie.

Zdroje suchého tepla v 6 km pod povrchem při teplotách kolem 200 °C jsou větší, než energetická kapacita světových zásob fosilního paliva. Toto teplo je však zatím de facto nevyužitelné, kvůli nízké tepelné vodivosti hornin. Vedením tepla se z horninového podloží dostává na povrch cca 35 TW tepla. [4]



Obr. 2 Technologie HDR [8]

2.2 Využití

Praktické využití energie získané z geotermálních zdrojů pro lidskou činnost je možné buď přímo ve formě tepla, nebo pro výrobu elektrické energie v geotermálních elektrárnách. Její využití k vytápění a koupání bylo známé již od dob starověké Římské říše. Na celém světě je dnes nainstalováno kolem 10 GW elektrické kapacity, což tvoří kolem 0,3 % celosvětové spotřeby elektřiny [1]. Poptávka po geotermální elektřině ovšem vzrůstá ročně asi o 3 % [1]. Další 28 GW přímé geotermální tepelné kapacity se využívá pro rozvod tepla, vytápění budov, lázeňství, průmyslové procesy, či zemědělskou činnost. Spotřeba tohoto zdroje tepla roste ročně asi o 7,5 % [5].

2.2.1 Výroba elektřiny

Výroba elektrické energie vyžaduje zdroje o vysokých teplotách. Ty najdeme většinou ve velkých hloubkách. Teplo se přivádí na povrch oběhem tekutiny, a to různými systémy, či jejich kombinací. Cirkulace tekutiny existuje samozřejmě ve vhodných lokalitách, především v místech zlomů, a tam kde je kontinentální kůra relativně tenká. Proud magmatu vede teplo blízko k povrchu. Vyskytují se zde přirozené horké prameny, které vystupují na povrch. Tohoto efektu lze velice dobře využít. Pokud ovšem na žádný termální pramen nenarazíme, je potřeba zavést vrt do teplé podpovrchové vody. Hloubka, do které musíme vrtat je závislá na místních podmínkách, především na teplotním gradientu. Ten je na hranicích zemských desek průměrně 25 – 30 K/km. Vrty, které nám umožní získat teplo pro výrobu elektřiny, bývají tedy několik kilometrů dlouhé. [1]

V roce 2005 celkem 24 zemí vyrobilo celkem téměř 57 GWh (205 PJ) elektrické energie v geotermálních elektrárnách, což tvoří zmíněných 0,3 % celosvětové spotřeby elektřiny [6]. Podíl spotřeby geotermální elektrické energie stále roste, jak díky rostoucímu počtu závodů, tak i díky zlepšení jejich výrobních kapacit [1].

Zařízení na výrobu elektrické energie byla donedávna postavena výhradně na okrajích tektonických desek, kde jsou k dispozici vysoké teploty zdroje blízko povrchu. Rozvoj binárních cyklů elektráren a zlepšení v oblasti vrtných a těžebních technologií otevřely naději, že by tato zařízení mohla být realizovatelná pro širší geografické oblasti.

Odhady potenciálu výroby elektrické energie se velmi liší přibližně od 35 do 2000 GW, v závislosti na rozsahu investic do výzkumu a rozvoje technologií. Tyto odhady nezahrnují teplo získané kogenerací, tepelnými čerpadly a jiné možnosti přímého využití. [1]

Největšími výrobci geotermální energie v globálním měřítku jsou: USA, Filipíny, Mexiko, Indonésie, Itálie, Japonsko, Nový Zéland, Island, Kostarika a Keňa. [7]

2.2.2 Přímé použití tepla

V roce 2004 přibližně 70 zemí světa používalo celkem 270 PJ geotermálního tepla k přímé aplikaci, což představuje asi 0,07 % světové primární spotřeby energie [1]. Toto množství je rozděleno mezi řadu aplikací. Hlavní kategorie jsou: vytápění, zahrnující dálkové rozvody tepla, zemědělské aplikace (např. vytápění skleníků), průmyslové aplikace (odsolování vody), či použití pro lázeňské a rekreační účely. K přímé aplikaci tepla řadíme také geotermální tepelná čerpadla [8]. V literatuře můžeme najít i podíly těchto aplikací na celkovém využití. Často se však od sebe podstatně liší.

Globální instalovaná kapacita je sice 28 GW, ale využitelnost je poměrně nízká (kolem 20 %), protože teplo je většinou potřebné v zimě. Výše uvedené údaje zahrnují 88 PJ na vytápění, z čehož vyjmeme přibližně milion geotermálních tepelných čerpadel o celkové kapacitě asi 15 GW. Jejich kapacita se zvyšuje o 10 % ročně. [1]

Přímé použití geotermálního tepla je mnohem účinnější než výroba elektrické energie, protože není potřeba změny energie a rovněž má méně náročné požadavky na teplotu zdroje. Teplo může také pocházet z odpadního tepla produkovaného při kogeneraci z geotermální elektrárny, nebo menších vrtů, či tepelných výměníků usazených v mělké zemi. V důsledku toho je lépe realizovatelné v mnohem větším geografickém rozsahu, než výroba elektřiny. Pokud jsou k dispozici přírodní horké prameny o vhodném složení, voda může být vedena potrubím přímo do radiátorů. Pokud je teplo v malých hloubkách dostatečné, ale suché, mohou být zemní kolektory, nebo tepelné výměníky použity bez tepelného čerpadla. Ale i v oblastech, kde je země v malých hloubkách příliš chladná, aby poskytla přímé teplo, má stále vyšší teplotu než vzduch v zimě. Sezónní výkyvy teplot se s hloubkou snižují a v hloubce 10 metrů mizí úplně. Toto teplo lze získat pomocí geotermálních tepelných čerpadel efektivněji, než je možné dosáhnout konvenčním topením [9]. Geotermální tepelná čerpadla lze použít v podstatě kdekoliv.

Existuje široká škála dalších aplikací levného geotermálního tepla. Například na Islandu využívají potrubí s horkou vodou z tepláren lemující silnice a chodníky k rozpuštění sněhu.

V současnosti je ovšem efektivně využito pouze malé procento z celkového energetického potenciálu. [7]



Obr. 3 Potrubí vedoucí z geotermální teplárny v Kostarice [10]

2.3 Ekologie a ekonomika provozu

Použití geotermální energie je ekonomické, spolehlivé a vzhledem k životnímu prostředí šetrné řešení. V minulosti bylo geograficky omezeno na oblasti nacházející se v blízkosti hranic tektonických desek. Nejnovější technologický pokrok rozšířil množství vhodných zdrojů, zejména pokud jde o přímé aplikace, jako vytápění domácností. S tím souvisí také zlepšení ekonomických vlastností, ale také rozšíření dopadů na životní prostředí.

Zajímavé je, že ačkoliv se geotermální energie řadí mezi obnovitelné zdroje energie, nemusí to vždy zcela platit. Některé zdroje geotermální energie jsou vyčerpatelné v horizontu desítek let.

Možná se to zdá v rozporu s uvedenou skutečností, že teplo uvolněné geotermálními procesy je malé v porovnání s tepelným obsahem Země. Dnes už je ale jasné, že uvolňování tepla musí být monitorováno, aby nedošlo k místnímu vyčerpání. Ačkoli geotermální zdroje jsou schopny dodávat teplo po dlouhá desetiletí, jednotlivé rezervoáry se mohou ochladit, nebo případně vyschnout. Tři nejstarší oblasti kde byla využívána geotermální energie jsou Larderello, Wairakei, a Geysers. Ve všech se časem snížila produkce oproti předchozím dosaženým maximům. Není zcela jasné, zda tyto systémy získávaly energii rychleji, než byla nahrazována z větších hloubek, nebo zda zdroje dodávající jim teplo byly vyčerpány.

Pokud se produkce redukuje a voda je reinjektována, tyto zdroje mohou teoreticky získat svůj potenciál zpět. Takovéto strategie již byly realizovány v některých lokalitách. V dlouhodobém horizontu byla udržitelnost produkce geotermální energie prokázána právě ve výše zmíněných oblastech. [11]

2.3.1 Ekonomické zhodnocení

Geotermální elektrárny i teplárny nevyžadují žádné palivo a proto jsou nezávislé na výkyvech v cenách paliv, ale zato mívají vysoké pořizovací náklady. Především ceny vrtní a průzkumu hlubokých zdrojů energie znamenají vysoké finanční riziko. V současné době se náklady na vybudování geotermální elektrárny s vrtem pohybují mezi 2 – 5 mil. € na MW kapacity, zatímco provozní náklady jsou mezi 0,04 – 0,10 € na kWh.[6]

Dnes jsou geotermální vrty málokdy hlubší než 3 km. Některé odhady geotermálních zdrojů počítají ovšem s vrty hlubokými až 10 km. Vrtání v této hloubce je sice technicky realizovatelné, je však velmi nákladné. Využívá se především v ropném průmyslu [1]. U vrtů hloubek větších než 4 km obvykle vznikají náklady v řádu několika desítek milionů dolarů [1].

Samotná geotermální zařízení mohou být realizována v relativně široké škále provedení. Od těch, která jsou schopna elektrifikovat celá města, až po malá zařízení určená k zásobování malých vesnic, či dodávkám tepla do jednotlivých domů.

Vhledem k tomu, že geotermální elektrárny nespolehlají na přechodné zdroje energie, na rozdíl např. od větrné turbíny, nebo solárních panelů, jejich součinitel ročního využití bývá poměrně vysoký. Může sahat až k 90 % [4]. Celosvětový průměr je 73 % [1].

Pro úplné ekonomické zhodnocení musíme posoudit, zda navržený systém splňuje požadavky, které od něj očekáváme. V úvahu bereme především tyto faktory:

Dispozice lokality – To je zdroj tepla (čili jeho geologické, hydrologické a jiné vlastnosti v závislosti na druhu zdroje), umístění zdroje tepla, způsob dopravy tepla ke spotřebiteli a požadavky spotřebitele (jako tepelné a technické vlastnosti spotřebičů tepla).

Geologické a hydrologické podklady – Musíme rovněž zhodnotit vhodnost použití navrhovaného zdroje nejen ve vztahu ke spotřebiteli, ale i k okolí, zvláště životnímu prostředí. Na základě geologického posudku určíme vydatnost zdroje tepla a s tím související náklady na jeho využití. Podklady pro dané posouzení jsou např. hloubka uložení, maximální množství čerpané tekutiny, teplota zdroje a využitelný teplotní spád. U geotermálních systémů je důležité znát mineralizaci na základě chemického rozboru. S tím souvisí navrhovaná technická opatření, jako zařízení pro chemické čištění výměníků, demineralizační stanice apod. V neposlední řadě je důležité také porovnat dobu vyčerpání zdroje a životnost systému. Samostatnou částí posouzení návrhu na využití zdroje geotermálních vod je problém odvodu využitých vod. Jejich vypouštění může vzhledem ke značné mineralizaci ohrozit realizaci projektu. Proto je často nutná jejich reinjektáž, pokud se nemohou vypouštět. Vliv zde má přirozeně legislativa daného státu, protože k tomuto problému se přistupuje rozdílně v rámci zákonů jednotlivých zemí.

Technologie systému – Je nutné vzít v úvahu systém zdroj-spotřebič, ale také samotný zdroj geotermálního tepla (hloubka vrtu, vydatnost, teplota, využitelný rozdíl teplot), provést určení návrhových hodnot pro něž je projektován spotřebič (teplota na vstupu, ochlazení), posoudit výměňkovou část (průtoky, teploty, výkony, hydraulický odpor čistého a zaneseného výměníku), rozsah čerpacích prací a způsob konečné spotřeby vyrobeného tepla (otopná soustava, teplé užitné vody apod.), včetně způsobu připojení ke stávajícímu systému vytápění, či ohřevu teplých užitných vod.

Ohodnocení potenciálu výroby tepla – Zdroj geotermální energie je stabilním zdrojem a obvykle je schopen pracovat řadu let bez výraznějších výchylek ve výrobě. Problém proto představuje spíše spotřeba mineralizovaných vod. Na základě geologického a hydrologického posudku se tedy provede srovnání s odběrem ve spotřebitelské oblasti, čili roční výroba geotermálního zdroje a roční spotřeba energie na výrobu zdroje (jedná se především o čerpací práce). Roční spotřeba elektrické energie je jen částí provozních nákladů. Ty jsou často ovlivněny náklady na údržbu zařízení. Také je třeba myslet na to, že případné poplatky za vypouštění znečištěných vod mohou zcela zvrátit ekonomii projektu. [3]

Realizovaná geotermální elektrárna má také minimální požadavky na využití půdy a sladké vody. Existující geotermální zařízení spotřebují 0,4 – 3,2 ha na MW oproti 2 – 4 ha na MW pro jaderné elektrárny a 7,5 ha na MW pro uhelné elektrárny [11]. Dále při výrobě spotřebují 20 litrů vody na MWh ve srovnání s více jak 1000 litry na MWh u jaderné, či tepelné elektrárny [8].

Možnost stavby elektrárny závisí i na tektonických podmínkách dané lokality, protože geotermální energie je často uvolňována jako doprovodný jev vulkanické činnosti. To samozřejmě klade vysoké nároky na stavbu elektrárny v geologicky aktivních oblastech.

2.3.2 Ekologické dopady

Ačkoli geotermální systémy jsou v porovnání s jinými elektrárnami a teplárnami jedny z neekologičtějších, i u nich se mohou objevit některé ekologické problémy.

Geotermální tekutiny čerpané z hlubin Země často obsahují směsi plynů, zejména oxidu uhličitého a sirovodíku. Při uvolnění do prostředí tyto látky přispívají k zesilování skleníkového efektu, kyselým dešťům i zápachu v okolí elektrárny. Existující geotermální závody vypouštějí v průměru 120 kg CO₂ na MWh elektřiny, což je ale jen malý zlomek emisní náročnosti elektrárny na fosilní paliva [1]. Některé jsou vybaveny systémy pro řízení emisí, které redukuje vypouštění kyselých a těkavých látek.

Kromě rozpuštěných plynů, může horká geotermální voda obsahovat stopová množství nebezpečných prvků, jako je rtuť, arsen, antimon, nebo sloučenin (kyselina boritá aj.), které pokud uniknou do řeky, způsobují znehodnocení pitných povrchových vod. Geotermální zařízení mohou teoreticky vstříknout tyto látky společně s plyny zpět do země, ve formě sloučenin uhlíku [1].

V případě výroby elektřiny metodou HDR jsou pak ekologické následky produkce o něco příznivější, protože nedochází k čerpání mineralizovaných geotermálních vod, ale teplonosným médiem je sladkovodní povrchová voda. Silný zdroj vody se prakticky vyžaduje pouze při uvedení do provozu, protože pak již voda obíhá stále dokola.

Výstavba elektráren a tepláren může negativně ovlivnit stabilitu půd v okolní oblasti. Objevily se např. propady půdy ve Wairakei na Novém Zélandu, či na jiných místech [7]. Četná geotermální zařízení byla obviněna z vyvolání zemětřesení, jako součásti procesu hydraulického rozrušování.

2.3.3 Výhody a nevýhody použití

Výroba geotermální energie má řadu výhod oproti jiným alternativním zdrojům energie. Jsou to především dobré výkonové parametry, také značná dostupnost (stálá dodávka energie nezávislá na klimatických podmínkách ve srovnání se solární a větrnou energií), a také nízké emise (oproti biomase). Zdá se tedy, že má nejlepší výhled na uplatnění mezi alternativními zdroji energie.

Obecně má geotermální elektrárna poměrně vysoký výkon za stálé práce. I když v minulosti byly tyto elektrárny omezeny pouze na omezený počet vhodných lokalit, s rozvojem metody Hot-Dry-Rock vzrostlo také množství lokalit, využitelných pro produkci. Dnes může elektrárna stát kdekoli na pevnině, kde je dostatek tepla. Po technické stránce jde o zbudování rovnoměrně rozmístěných decentralizovaných zdrojů elektrické energie, které užívají všech výhod decentralizovaných systémů. Mohou pracovat nepřetržitě a přitom jsou dobře regulovatelné. [2]

Nevýhodami jsou především již zmíněné ekologické následky: zvýšené riziko zemětřesení, zvláště v tektonicky nestabilních oblastech, či riziko uvolňování jedovatých sloučenin z vrtu. A samozřejmě také relativně vyšší náklady na zbudování zařízení.

3 Systémy zásobování geotermálním teplem

V této kapitole bude blíže pojednáno o realizovaných systémech zásobování teplem. Obvykle je geotermální tekutina čerpána až k povrchu z podzemí pomocí vrtu, kde je teplo využito potencionálními spotřebiteli. S výjimkou případů, ve kterých je geotermální tekutina spotřebována jako taková, bývá vrácena zpět pod zem druhým vrtem. Tento uzavřený oběh pomáhá uchovat celkovou rovnováhu a tím se vyhnout hydraulickým problémům. Navíc z ekologických důvodů, zvláště vysoké mineralizace, geotermální tekutiny nemohou být normálně použity nad povrchem.

Při popisu systému rozlišujeme mezi podzemní a nadzemní části oběhu geotermální tekutiny a systémem rozvodu tepla, který začleňuje geotermální teplo do rozvodných sítí. Nedílnou součástí celého systému je také geotermální vrt.

Text této kapitoly je zpracován z velké části na základě literatury [12].

3.1 Geotermální vrty

Kvůli náročným podmínkám ve vysokých teplotách, zvláště v geotermálních horninách s vysokou teplotou, nebo pro vrtání tvrdých skal (jako pro Hot-Dry-Rock rezervoáry), je hloubení geotermálního vrtu obvykle náročnější co do provedení ve srovnání s naftovými a plynovými vrty.

3.1.1 Technologie vrtání

Technologie vrtání geotermálních zdrojů je velmi podobná jako u naftových a plynových vrtů. Téměř výlučně se aplikuje metoda rotačního vrtání. Vrtacím nástrojem je ve většině případů trikónický břit. Nástroj se roztáčí skrz trubku vrtáku, což je ocelová trubka mnohem menšího průměru než břit, rotační deskou v přízemí vrtné soupravy. Kusy skály jsou přepravované k povrchu "vrtným výplachem", čili proudem tekutiny, který je pumpován dolů skrz vrtnou trubku a stoupá vzhůru v prstenci mezi vrtací trubkou a stěnami vyvrtané díry. Kvůli relativně velké ploše příčného řezu tohoto prstence jsou požadovány vysoké průtoky, aby se dosáhlo rychlostí proudu nutných pro přepravu částic horniny.

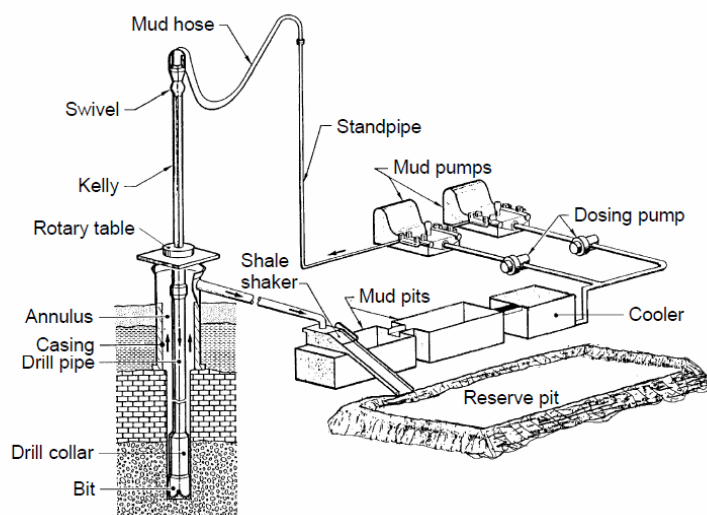
Během vrtání, váha vrtné trubky visí na háku ve věži vrtné soupravy. Řada silných, zděných kroužků velkého průměru usazených na vrtné hlavici zajišťuje podpůrnou zátěž na vrtáku. Váha těchto límců a jejich velký průměr stabilizuje směr vrtání a způsobuje vertikální trend pramenu. Další stabilizace směru vrtání a vyhlazení stěn vyvrtané díry je realizována výstružníky umístěnými mezi zátěžnými kroužky a vybavenými tvrdými kovovými válci odvalujícími se po stěnách vyvrtané díry.

Materiál vrtáku závisí na vlastnostech skály, a je vybrán podle zkušeností nabytých během dřívějších vrtacích prací v odpovídajícím typu horniny. Pro měkčí skalní formace jako jílovec, plně postačují tvrdé kovové vrtáky. Pro tvrdou horninu se používají břity vybavené wolframem nebo dokonce diamantovými částicemi. Životnost vrtacích hlavic leží v rozsahu od několika desítek metrů k několika stům metrů vrtání. Doba existence kousku je jedním z nejdůležitějších faktorů pro vrtací výdaje. Není to kvůli cenám břitů samotných, ale kvůli výdajům na jejich výměnu (vytahování a spouštění vrtacího řetězu), nutnou pro nahrazení opotřeбенé hlavice vrtáku.

Tradiční vrtné soupravy pro hloubky větší než 3 000 m jsou těžké stavby. Výška jejich věže se pohybuje mezi 40 a 60 m. Zatížení na tažném háku často dosahuje i 600 t. Když zahrneme nádrže, čerpadla, a potrubí pro cirkulaci a čištění vrtného výplachu, nakládací rampy a sklady pro vrtné trubky, různé nádoby pro vybavení, materiál a registrační jednotky, celá stavba pokrývá oblast až jednoho hektaru.

Jsou vyžadovány silné motory pro oběhová čerpadla, rotační desku a zdvihací zařízení. Jejich celkový příkon se rovná několika MW. Prostor pro kompletní zařízení vrtu a velký hluk může být problémem v hustě obydleném území. Situaci lze zlepšit například použitím elektromotorů namísto naftových motorů.

Nezbytným prvkem vrtacích prací je výplach vrtu. Jeho funkcí je nejen doprava rozdrčené horniny. Důležitý význam má i jeho schopnost stabilizovat stěny vyvrtané díry a předejít tak invazi vzniklých proudů do vrtu. Obě funkce jsou zajištěny tlakem vyplývajícím z váhy tekutého sloupce a vyžadují dostatečnou hustotu výplachu. Na druhé straně ztráty výplachu ve skalních formacích musí být minimalizovány.



Obr. 4 Vrtací zařízení a jeho součásti [12]

To může být realizováno vhodnou volbou vrtného proudu, který vytváří tenkou vrstvu nánosů na stěně vrtu, stejně jako řádnou volbou hustoty výplachu. Reálná hustota výplachu vrtu je proto kompromis a potřebuje pečlivé zvážení. V úvahu musíme také vzít možnost náhodného rozrušení skály vlivem vody, mající za následek totální ztrátu oběhu. Ke ztrátě oběhu může také dojít ve vysoce propustných skalních formacích, zlomech nebo poruchových (zlomových) zónách. V neposlední řadě je vrtný výplach potřebný také pro chlazení vrtné hlavice a pro snížení tření mezi stěnou vrtu a vrtnou trubkou. Většina vrtných výplachů je vodní podstaty a obsahuje bentonit nebo další tixotropní materiály. Úpravy hustoty tekutiny dosáhneme přidáním solí nebo síranu barnatého. Použití bentonitových výplachů se stává problematickým při teplotách nad 150 °C, protože začínají významně degenerovat. Hranicí pro vodní výplachy je teplota přibližně 190 °C. To však neznamená, že nemohou být použity v horninách těchto teplot, v případě že jsou skály chlazené, dokud je udržován stálý oběh tekutiny. Problém může ale nastat během delších poruch oběhu. V tvrdých krystalických skalních formacích se prokázal být velmi účinný solný roztok s redukčním třecím účinkem, a to v teplotách až 200 °C.



Obr. 5 Vrtná hlavice [33]

Mnohdy je nutné aplikovat směrově řízené vrtání. Tato technika byla hnána vpřed rozvojem vrtání v naftových a plynových ložiscích v moři, kde se vrtají vícenásobné vrty ze dna jednoho vrtu. Dnes je možné i vrtání několik kilometrů dlouhých horizontálních profilů ze dna vertikálního vrtu. Za těchto okolností jsou většinou užity speciální motory, umístěné přímo na jednotce vrtné hlavice, s hnací silou často větší než 1000 kW. Řízené vrtání je možné také s konvenční vrtací technikou.

Směr vrtání je průběžně sledován použitím metody MWD (Measuring while drilling). Metoda spočívá v tom, že tlakový generátor impulsů přenáší signály z řídicích senzorů nainstalovaných na spodní části vrtné trubky přes vrtný výplach k povrchu. Zpětný přenos signálu a hydraulický akční člen dovolí úpravu směru vrtání prakticky kdykoliv a v kterékoli hloubce.

Technika je úspěšně aplikovaná v měkkých skalních formacích v teplotách až 150 °C. Je však malá zkušenost s použitím této techniky v tvrdé krystalické hornině, při vyšších teplotách a ve větších hloubkách. Aplikace v Hot-Dry-Rock (HDR) projektech ukázaly, že intenzivnější vibrace vrtáku vyžadují zlepšení této technologie.

3.1.2 Kompletace vrtu

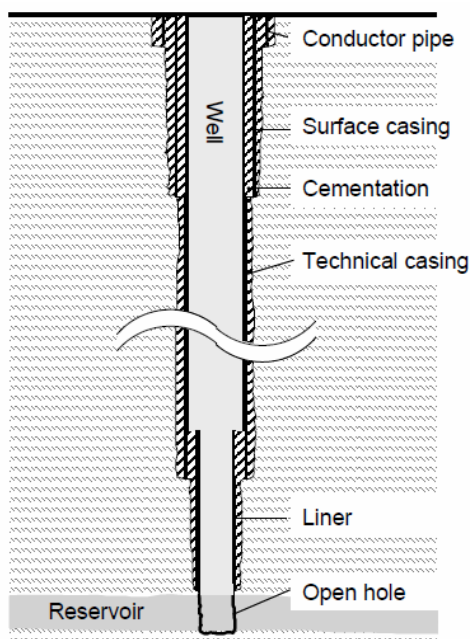
Aby se předešlo zborcení vyvrtané díry, a také abychom chránili sladkovodní zdroje v mělkých hloubkách, je geotermální vrt stejně jako jiný hlubinný vrt vyplněn usazenými ocelovými trubkami. Obvykle v několika stupních.

Po vrtání prvních přibližně 15 m se vloží a upevní první podpurná trubka velkého průměru (8 až 10 m). Jejím účelem je poskytnout konstrukční podporu vrtu a ústí vrtu. Po navrtání dalších přibližně 30 až 100 m se vloží další trubka, která má za účel zajistit lepší základ pro sondu a také chránit sladkovodní zdroje při povrchu před znečištěním.

Poté co dosáhneme zdroje, usadíme třetí trubku (technická výplň). Její usazení potřebuje asi nejkompexnější návrh. Musíme brát v úvahu předpokládané síly mechanicky nestabilních horninách, hydrostatické tlaky v různých vrstvách, včetně rezervoáru, předpokládaný průtok tekutin ze zdroje, korozivní a abrazní vlastnosti proudu, tepelné roztažení během produkce a další faktory. Tepelné roztažení je zvláště důležitým faktorem. Může vést k deformacím, či dokonce trhlinám ve výplni, speciálně v částech, kde je průměr vrtu zvětšený díky nestabilním podmínkám podloží, a neúplnému upevnění.

Uvnitř rezervoáru se používají dva různé způsoby provedení:

- Otevřené zakončení – Provádí se ve stabilních útvarech. V tomto případě končí poslední výplň vrtu nad rezervoárem, přičemž samotný zdroj zůstává otevřený, čili není chráněný žádnou výplní. Část vrtu uvnitř zdroje tedy zůstává holá. To je možné když jsou horniny rezervoáru stabilní. Případně může být použit dodatečný štěrkový obsyp v pískovcovém podloží, aby se předešlo infiltraci malých částic písku či hlíny. Otevřené dokončení je nejlevnější řešení, umožňuje maximální přístup k nádrži mající za následek vyšší výrobní efektivitu. Ale vždy sebou nese riziko, že otevřená část vrtu může být ucpána uvolněnými skalními částicemi nebo úlomky vrtu během produkce.
- Uzavřené zakončení – Pro nestabilní skalní formace je nutné rezervoárovou část vrtu chránit výplní. Prostor mezi trubkovou výplní a nádrží bývá naplněn pojivem. Zakončení může být provedeno trubkou vedoucí až k povrchu, nebo vložkou vedoucí jen do spodní části technické výplně. Přístup k tekutině rezervoáru je umožněn perforací trubky či vložky a vrstvy pojiva.



Obr. 6 Schéma kompletace produkčního vrtu [12]

Pro geotermální vrty je nezbytné dobré zpevnění výplně. Neúplné upevnění může mít za následek deformace, vedoucí až k trhlinám, či dokonce ke kolapsu části výplně kvůli tepelnému roztažení tekutiny uvězněné v dutinách za výplně, nebo k porušení výplně vlivem korozivního účinku tekutin, které jsou v kontaktu s vnějším výplňových trubek. Ve většině případů se užívají teplotně stabilizované pojivové směsi s nízkým obsahem vody. Tyto směsi obsahují látky zabraňující pohybům působením síly, zajišťující vysokou pevnost za tepla při poměrně malé hustotě a mírné hodnotě viskozity. Také látky udržující pojivo dostatečně dlouho schopné injektáže i při zvýšených teplotách.

Pojivo je mícháno na místě a vstřikováváno dovnitř do mezery mezi výplňovou trubkou a horninou. Obsah pojiva potřebný k naplnění je vypočítán použitím výsledků měření.

3.2 Podzemní část

Podzemní část geotermálního oběhu tekutiny má za úkol především čerpat teplou nebo horkou tekutinu z rezervoáru nahoru a tím ji učinit dostupnou pro energetické použití.

3.2.1 Uvedení vrtu do provozu

Požadovaný koncový průměr vrtu umístěného uvnitř hornin rezervoáru je určen požadovaným objemovým průtokem geotermální tekutiny a kolísá mezi 200 a 300 mm.

Při počátku vrtací etapy by měly být provedeny specifické testy (s ohledem na stanovení hydrodynamických vlastností geotermálních zdrojů), měření a rozbory za účelem ohodnocení kapacity zdroje pro zásobení energií. Nejdůležitějšími faktory jsou hlavně eventuální vydatnost produkce, stejně jako teplota geotermální tekutiny.

Jakmile jsou vrtací práce dokončeny a hydraulické podmínky ověřeny výkonnostní zkouškou, produkční a injekční vrty se opatří nezbytnou výplní. Ta je nedílnou částí protikorozního systému celého oběhu geotermálních tekutin. Obvykle se používají trubky z plastických hmot, nebo chromované oceli.

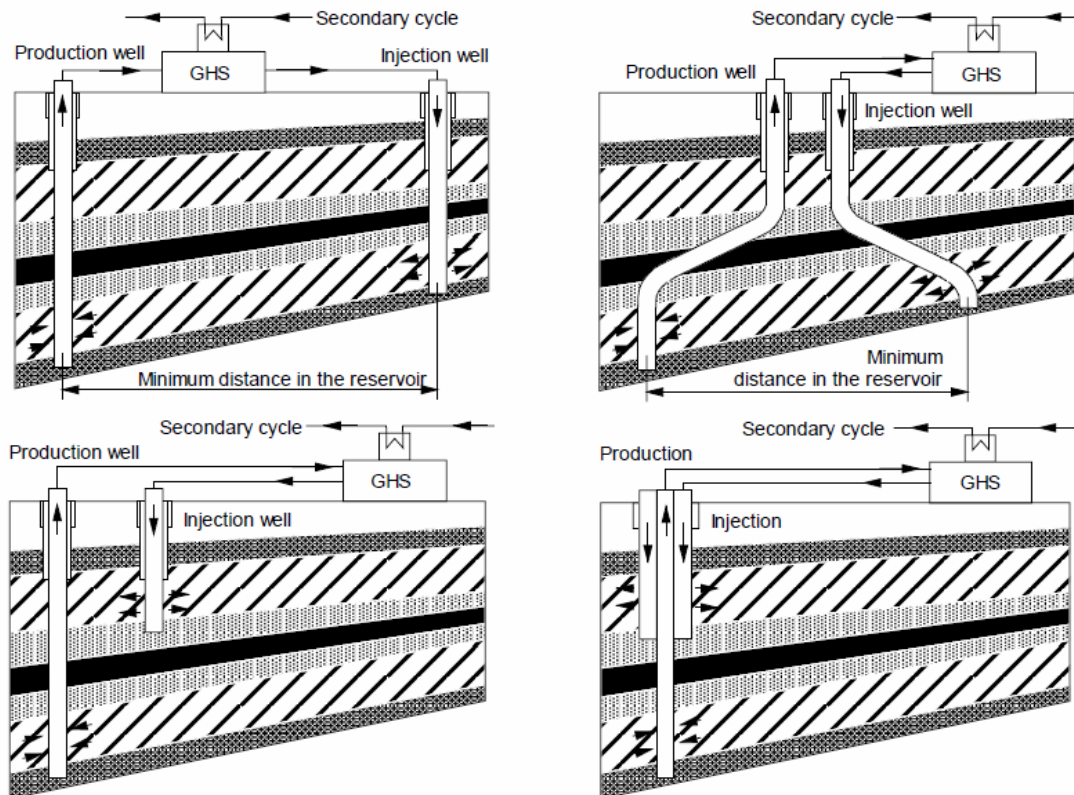
Nakonec, poté co je pod vodní hladinu instalováno produkční čerpadlo, se vrt naplní inertním plynem (např. dusík), což pomáhá předejít korozi.

V rámci realizace je ještě před spuštěním produkce nutné provést několik testů a měření, vyhodnocujících hydrodynamické vlastnosti daného geotermálního zdroje, výkonnost a propustnost rezervoáru, teplotu a tlak produkovaného geotermálního toku, chemického vlastnosti geotermální tekutiny a obsah plynů v ní, mechanickou stabilitu hornin atd.

3.2.2 Návrh podzemní části systému

Pokud se ukáže, že se oběh geotermální tekutiny významněji podílí na nákladech geotermální teplárny, je potřeba se zaměřit na zjištění cenově efektivnějšího řešení než je klasický systém dvou vrtů (viz obr. 7 vlevo nahoře). Rozsah nadzemního potrubního spojení může být minimalizován, jestliže produkční a vtačený vrt jsou vrtány jak rozbíhající se vrty z jednoho místa (viz obr. 7 vpravo nahoře).

Jestliže bylo v jedné lokalitě nalezeno několik rezervoárů, je obecně možné také tzv. paralelní využívání (viz obr. 7 vlevo dole). Takové rozvržení systému může minimalizovat vzdálenost mezi produkčním a vtačeným vrtem. Dodatečně, je také znemožněno poškození zdroje kontaminovanou geotermální tekutinou, například kvůli použití uvnitř veřejného plaveckého bazénu. Omezeny jsou tyto tzv. dvouvrstvé systémy především z důvodu neexistujícího udržování rovnováhy tekutin, a tedy očekávané změny tlaku uvnitř rezervoáru. Zkušenosti ukazují, že pro omezené objemy těžby (asi 30 až 60 m³/h), produkce i injekce geotermální tekutiny může být provedena jediným vrtem (viz obr. 7 vpravo dole).



Obr. 7 Různé možnosti čerpání geotermálního zdroje [12]

3.3 Nadzemní část

Nadzemní oběh geotermální tekutiny, čili vlastně reálná geotermální teplárna připojená k produkčnímu a injekčnímu vrtu, propojuje dostupnou geotermální energii s poptávkou po teple na vytápění, teplou vodu aj. Ta však podléhá významným místním a časovým změnám. Nadzemní část oběhu má splňovat následující požadavky:

- produkce a přenos geotermální tekutiny
- přestup tepla do sekundárního tepelného okruhu
- zpracováním geotermální tekutiny zabezpečit příslušnou kvalitu injekční vody
- nárůst tlaku před injektáží
- injektáž geotermální tekutiny
- bezpečnost procesu

3.3.1 Produkce geotermální tekutiny

Geologické poměry často vyžadují použití čerpadla pro produkci geotermální tekutiny. Možná jsou dvě základní řešení, a to buď tzv. mamutové čerpadlo, využívající změnu hustoty sloupce tekutiny vytvořením směsi kapaliny a vzduchu, nebo čerpadla mechanická.

Použití mamutových čerpadel, pracujících podle zmíněného principu, je nutně spojeno s provzdušňováním geotermálních tekutin. To by mohlo mít za následek změnu chemických vlastností a možné srážení pevných látek. Proto je omezeno na testy provedené během vrtací fáze. Kvůli své vysoké ceně, ani čerpání založené na inertních plynech (dusík aj.) nepředstavuje proveditelné řešení pro nepřetržitý provoz. Navíc jsou tato čerpadla méně výkonná, než mechanická.

Z těchto důvodů se pro produkci geotermální tekutiny používají výlučně ponorná čerpadla umístěná pod vodní hladinou v produkčních vrtech.

Jestliže jsou možné nízké instalační hloubky, používají se čerpadla hřídelová. U nich je hnací mechanismus umístěný nad povrchem a spojený s čerpadlem hřídelí. Tato zařízení umožňují čerpat tekutinu téměř z celého průřezu vrtu.

Pro velké instalační hloubky, se užívají motorová čerpadla. Ta jsou pokud možno poháněna elektromotorem. Celý systém motorového čerpadla pro vrt se obvykle skládá z čerpadla, ochranného zařízení a motoru. Čerpadlo je nainstalováno uvnitř produkčního vrtu pod úroveň geotermální tekutiny. K pohonu je čerpadlo připojeno kabelem vedeným prostorem mezi produkční trubkou a výplní vrtu.

Čerpadlo bývá obvykle vícestupňové a odstředivé. Počet stupňů souvisí s výškovým rozdílem, který má být překonán a návrhem lopatkového kola, majícím vliv na objemový průtok. Pro pohon se většinou užívají asynchronní trojfázové motory mazané speciálním olejem. Abychom předešli vniknutí vody do motoru, čerpadlo je opatřeno systémem vyrovnání tlaků, pracujícím na bázi tlakového vyrovnání mezi vstupním (sacím) tlakem geotermální tekutiny a vnitřním tlakem oleje.

Požadovaná hloubka instalace čerpadla závisí na očekávaném maximálním poklesu vodní hladiny za provozu. Během činnosti čerpadla klesne vodní hladina pod svou klidovou úroveň a závisí na dodávaném objemovém průtoku. Důvodem jsou třecí tlakové ztráty mezi neovlivněnou částí nádrže a vnitřní částí s čerpadlem.

Rozměry čerpadla závisí na požadované produkci. V úvahu se musí vzít také tlakové ztráty uvnitř produkčního potrubí a výrobní hladina, tak aby byl zajištěn požadovaný průtok nadzemní částí systému. V závislosti na geologických podmínkách, zařízení vrtu a typu čerpadla může instalační hloubka kolísat mezi 100 až 400 m, i více.

Za účelem přizpůsobení produkce geotermální tekutiny okamžitému požadavku tepla, je čerpadlo řízeno měnicími se otáčkami elektromotoru. Ačkoli nejlépe by geotermální výtopny měly být provozovány v základním zatížení, tj. se stálým objemovým průtokem.

3.3.2 Zajištění kvality reinjektované vody

Reinjekce čili „znovuvstříknutí“ ochlazené geotermální tekutiny do rezervoáru je srovnatelná s filtrováním (tzn. že geotermální tekutina je pumpována skrz vtlačný vrt, horniny rezervoáru ovlivněné vrtacími pracemi a neporušené skály). Z toho důvodu se musí zabránit znečišťujícím drobným částicím vstupu do rezervoáru, nebo jejich vstup musí být aspoň zpožděn.

Uvnitř neovlivněné části nádrže existuje chemická rovnováha mezi geotermální tekutinou a horninou rezervoáru. Nicméně, uvnitř geotermálního oběhu realizovaného v teplárně, může být tato rovnováha ovlivněna tlakovými a teplotními změnami. Jako například pokles tlaku během těžby, snížení teploty a potencionální oxidace v nadzemní části oběhu, nárůst tlaku během reinjektáže, smíšení tekutin z produkčního a injekčního vrtu, které nemusí být totožné z hlediska chemického složení a nárůst teploty v injekčním vrtu.

Se snižováním tlaku během produkce se může objevit dodatečné odplynění, což vede ke změnám chemických vlastností tekutiny (hodnoty pH atd.). Předem určená kvalita reinjektované geotermální tekutiny je zajištěna především prevencí před znečištěním uvnitř průchodu vody teplárnou a filtrováním reinjektované vody.

Většina geotermálních tekutin se dá charakterizovat jako slané nenasycené roztoky s nízkým obsahem rozpuštěných plynů. Geochemické modely ukázaly, že za předpokladu, že je zabráněno smíšení geotermální tekutiny s cizími vodami, bude tato tekutina vystavena především vylučování železa. Neočekává se srážení jiných solí. Celý systém musí být pečlivě chráněn před vnikem kyslíku, což dodatečně pomáhá i předejít korozi. Proto musí být udržován pod stálým přetlakem. To má na starost vysoce sofistikovaný ochranný systém. Vhodným opatřením se musí předejít i vniku olejů a maziv během spouštění (např. z motorového čerpadla).

Navzdory všem preventivním opatřením reinjektáž rezervoáru musí být neustále chráněna filtrováním geotermální tekutiny.

3.3.3 Přenos tepla

Teplu obsažené v geotermální tekutině musí být přeneseno do topného systému, nebo oběhu topné vody co nejúčinnějším i nejekonomičtějším způsobem. K tomu se používají hlavně deskové tepelné výměníky, které mají následující výhody:

- Nízké rozdíly teplot – až k 1 K mezi oběma médii
- Vysoké součinitele prostupu tepla
- Malé rozměry a hmotnosti
- Dostatečný tlakový odpor při běžných geotermálních tlacích
- Nízký obsah vody
- Snadná údržba povrchu desek díky snadnému rozebírání

Nejčastěji se setkáme s titanovými výměníky tepla, protože tento materiál je vysoce odolný proti často velice korozivní geotermální tekutině.

Abychom se vyhnuli možnosti vstupu geotermální tekutiny do oběhu topné vody, výměníky tepla jsou přetlakovány na straně topného systému. Pokud to není účinné musí se přijmout další opatření, která ovšem zhoršují výměnu tepla a vedou k vyšším nákladům.

3.3.4 Požadavky na vybavení

Vybavení užívané uvnitř oběhu geotermální tekutiny musí splňovat jisté požadavky v rámci bezpečnosti provozu, ochrany životního prostředí a cenové efektivity.

Musí se například předejít porušení zdiva a následnému znečištění životního prostředí. Při reinjektaci geotermální tekutiny mohou produkty koroze poškodit rezervoár, a tak se zvyšovat nároky na filtraci. Proto má velký význam pečlivější výběr materiálu. Také je nutné zabránit vstupu kyslíku do systému. Geotermální tekutiny sice obsahují málo kyslíku, ale zato mají vysoký obsah agresivní kyseliny uhličitě nebo chlorových iontů. Díky tomu se koroze stává nekontrolovatelnou při vstupu kyslíku do systému. Volba materiálů závisí hlavně na povaze a teplotě geotermální vody, a také výrobních požadavcích.

Vhodné jsou např. plasty, kompozitní materiály a potažené, či pogumované kovy, stejně jako některé kombinace vysokolegovaných ocelí.

Musíme také chránit systém proti netěsnostem a rychle zadržet geotermální tekutinu když dojde k jejímu úniku. K tomu slouží antikorozní krytový materiál, bezpečná technologie zakrytování a monitorovací zařízení (kromě výměníků tepla vyžaduje pozornost také monitorování produkčních a vstřikovacích potrubí ukrytých v hloubkách).

Teplárna je také vybavená sběrným systémem, který shromažďuje geotermální tekutinu, nacházející se vně oběhu. Tento systém znovu zpracuje tyto tekutiny a vrací je zpět do oběhu. Úniky vod jsou výsledkem především různých oprav, výměn filtrů, proplachování produkčního vrtu a nadzemního systému po prvním spuštění, či celkového prosakování systému. Sběrný systém se skládá z mnoha vhodně umístěných sběrných nádob, hlavní je umístěna u vtačného vrtu. Nádoby pohltní velké množství vody. Obsahují také sedimentační nádrže aj.

3.3.5 Reinjektáž geotermální tekutiny

Během opětovného vstřikování geotermální tekutiny do rezervoáru, musíme překonat tlakové ztráty v injekčním vrtu. Proto se vyžaduje zajistit přetlak mezi vtlačným vrtem a neovlivněnou částí rezervoáru. V klidném stavu dosahuje voda ve vtlačném vrtu jisté hladiny. Ta závisí na teplotě tekutiny a tedy i hustotě. Během činnosti zařízení, hladina stoupá vlivem tlakových ztrát. Při jistém objemovém průtoku existuje riziko nižšího tlaku než atmosférického na ústí vrtu. Tomu se musíme vyhnout pomocí vhodných opatření (např. ventily).

Úroveň tlaku na ústí vrtu je odvozena z tlaku, vytvořeného motorovým čerpadlem v produkčním vrtu a z dovolené tlakové úrovně celkového nadzemního systému. Jen když potřebujeme zajistit vyšší tlak, začleníme do oběhu vstřikovací čerpadla.

3.4 Dálkové vedení tepla

S výjimkou zásobování průmyslových spotřebitelů, charakterizovaného specifickými požadavky na teplo, domácí zákazníci mohou pomocí rozvodných systémů užívat geotermální teplo pro vytápění budov a přípravu teplé užitkové vody. Za tím účelem jsou aplikovány systémy rozvodu tepla, obvykle pracující s vodou, vybavené jedním až čtyřmi potrubími. Nicméně v současnosti převládají dvoupotrubní systémy.

Technická struktura topných rozvodných systémů závisí především na daných místních podmínkách (hustota zástavby, uspořádání domů, silnic atd.), velikosti rozvodné sítě a počtu (geotermálních) tepláren, dodávajících teplo do sítě.

Samotné potrubí vedoucí teplo se vede buď nad zemí v teplovodech, nebo pod zemí. Použití nadzemního potrubí je omezeno nedostatkem prostoru v hustě obydlených územích. Proto převládají potrubí vedená v zemi v rozsahu do 20 MW tepelné kapacity (typické pro geotermální systémy), díky menším nákladům (malá spotřeba prostoru a krátký čas instalace) ve srovnání s nadzemním vedením.

K připojení centrálního rozvodu tepla na topný systém v domě se používá výměnných stanic. Ty mohou být přímé (zde proudí teplá voda z dálkového topného systému skrz rozvodný systém v příslušném domě, teplota je řízena přidáváním chladnější vody), či nepřímé (ty mají výměník tepla mezi dálkovým topným systémem a domácím rozvodem tepla, takže příslušný dům je nezávislý na tlakových poměrech a vlastnostech vody dálkového systému).

3.5 Celkové rozvržení systému

Kvůli vysokým investičním nákladům na čerpání geotermálních zdrojů energie, musí být geotermální teplárny nutně připojeny k velkým topným systémům. Z toho důvodu, je vhodné nejdříve ověřit všechny možnosti pro vznik, nebo rozšíření lokálního topného systému v plánovaném místě. Tedy ještě předtím, než uvážíme geotermální dodávky tepla. Dolní mez pro zásobování (hlavně malých zákazníků) představují rozvodné sítě tepelné kapacity 5 MW. Toto omezení nemusí být nutně splněno, pokud je v lokalitě opravdu příznivá roční spotřeba dodaného tepla s vysokým počtem hodin plného provozu (například za nízké teploty spotřeba tepla velkou společností s nepřetržitou výrobou). Nebo může být geotermální tekutina použita (částečně) jako surovina (pro produkci minerální vody nebo k lázeňským účelům).

Geotermální teplárny operují v základním zatížení. Pro dosažení optimálního výkonu tepelné kapacity je cílem vždy dosáhnout velkého množství hodin plného zatížení. Nadto, aby byla účinnost co největší, teplo by se mělo přenést přímo z geotermální tekutiny do topné vody uvnitř systému dálkového rozvodu tepla. Kvůli teplotám geotermální tekutiny obecně mezi 40 a 80 °C, získané teploty topného systému budou pod 40 °C. Jen v případě nižších teplot by měla být použita tepelná čerpadla k dalšímu chlazení geotermální tekutiny.

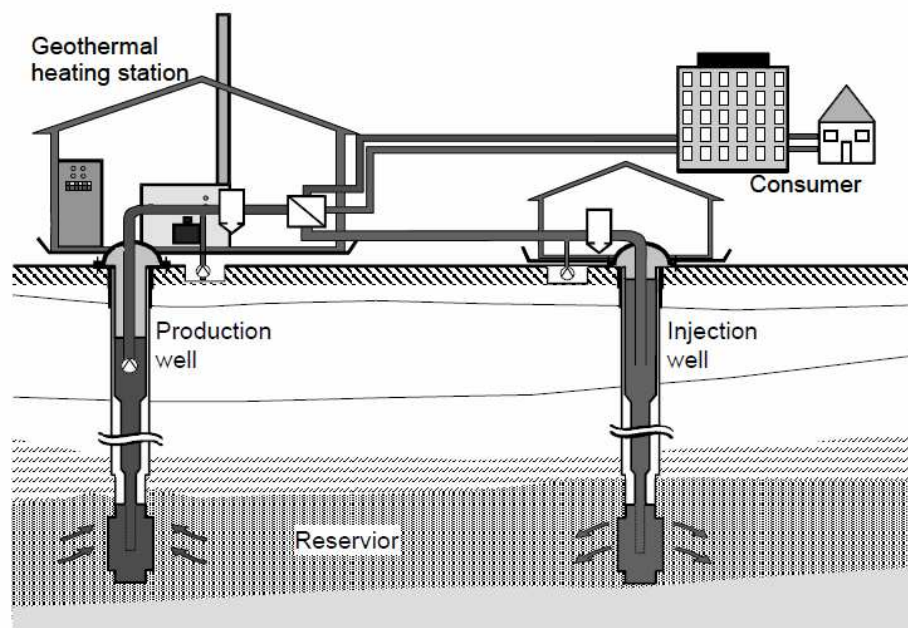
Zařízení se mohou skládat, podle zatížení a cenové efektivity, z jednoho, nebo několika výměníků tepla pro přímý přestup tepla. Případně, mohou být uvnitř systému integrována tepelná čerpadla v závislosti na teplotách média. Aplikované technologie závisí na specifických podmínkách v dané lokalitě. Jsou dány jak cenami fosilní palivové energie, tak konkrétním vztahem cen mezi elektřinou a palivy.

Aktuálně se preferují parou hnaná absorpční tepelná čerpadla, protože parní kotel může být také ekonomicky dimenzován pro plné zatížení. Kotel tak může plně realizovat zásobování teplem v případě selhání geotermálního oběhu.

Mnoho geotermálních tepláren je vybaveno kogeneračními stanicemi. Takovéto systémy pokryjí požadavek na geotermální produkci elektřiny pro 80 až 200 kW s vysokým množstvím hodin plného zatížení. Dodatečně vyprodukované teplo může být integrováno po celém systému.

Úplný topný systém obvykle doplňuje kotel pro nárazové zatížení a rezervní kotel, spalující fosilní palivovou energii (lehký topný olej, zemní plyn). Kotle jsou proto navrženy podle maximálního tepelného zatížení celého systému.

Geotermální teplárny jsou navrženy podle místních specifických požadavků. Návrh závisí velkou měrou na vlastnostech příslušného geotermálního zdroje a vytěžené tekutiny (geologické charakteristicky zdroje, vlastnosti geotermálního toku). Kvůli velkému množství dalších působících faktorů (požadavky a chování spotřebitele, parametry topné sítě, místní ceny fosilní a obnovitelné energie, organizační struktura provozovatele zařízení), mohou celkové údaje sloužit jen jako přibližné hodnoty.



Obr. 8 Geotermální teplárna čerpající energii z hydro-geotermálního zdroje tepla [12]

4 Využívání geotermální energie pro výrobu elektrické energie

Ač je to překvapivé, výroba geotermální elektřiny má relativně dlouhou historii. První geotermální elektrárna byla postavena v Lardarellu v Itálii a spuštěna 4. července 1904. Již v roce 1913 byla rozšířena [13]. Geotermální produkce elektřiny od té doby v Toskánsku pokračuje dodnes. Elektrárna postupně také zvyšovala množství vyrobené energie na 128 MW instalovaného výkonu v roce 1942 a až na 790 MW v roce 2003. K využití geotermální výroby elektrické energie dochází ve větší míře až v 60. letech. V roce 1958 začala vyrábět elektřinu (teprve jako druhá na světě) geotermální elektrárna ve Wairakei na Novém Zélandu. O rok později jiná v mexickém Pathe [8] a roku 1960 byla zahájena komerční výroba geotermální elektrické energie v USA v oblasti Geysers Field v Kalifornii, kde je dnes největší geotermální elektrárna typu „suchá pára“ s výkonem 950 MW, a také největší skupina geotermálních elektráren na světě [3] [8]. Dnes přibližně 25 zemí světa používá ve významnější míře geotermální energii k produkci elektřiny. Celosvětová instalovaná kapacita přesahuje již 9 MW [7].

Geotermální výroba elektřiny je ekonomicky proveditelná, jen když najdeme vysoké teploty v relativně malé hloubce. V regionech s normálním nebo mírně nadprůměrným gradientem asi 3 K/100m, se musí vrtat víc než 5 000 m hluboko, aby se dosáhlo teplot nad 150 °C. Takové hlubinné vrty jsou však drahé a existuje zde vysoké riziko poruchy. Z tohoto ekonomického důvodu je geotermální výroba elektřiny omezena hlavně na geotermální zdroje s extrémně vysokými teplotními gradienty a vysokými hodnotami tepelného proudění. [12]

V těchto místech často najdeme typické povrchové projevy geotermální aktivity jako fumaroly nebo horké prameny. Zdrojem tepla jsou žhavé masy magmatu, které stoupají v zemské kůře z větší hloubky (často několik desítek kilometrů). Vysoké proudění tepla v povrchových vrstvách ohřeje vodu v pórovitých, nebo roztříštěných horninách, které jsou ve většině případů kryté povrchovou skálou nízké propustnosti. Díky vztlácnosti se voda začne koncentrovat uvnitř horniny a přináší tak vysoké teploty blíž k povrchu.

V závislosti na teplotě a tlaku v hloubkách může tekutina začít vařit, čímž vzniká pára. Množství páry charakterizuje vzniklé systémy jako zdroje s převahou kapaliny, či páry. Typické kapalné teploty se pohybují v rozsahu od 150 do 300 °C v hlubinách mezi několika sty metry až 3 km. Ve větších hloubkách se objevily i ještě vyšší teploty.[12]

Většina dnes využívaných geotermálních zdrojů je v oblastech s aktivní sopečnou činností. Obecně, to nejsou vulkány, které zchladnou, ale zásobárny magmatu ukryté pod vulkány, které jsou zdroji tepla pro geotermální projevy po dlouhotrvající časové období, a proto nepřímými zdroji pro geotermální výrobu elektřiny. Tyto zásobárny magmatu obsahují místy až 10^5 km^3 materiálu. Jejich tepelný obsah je ohromující (až 10^{23} J) [12].

Geotermální oblasti bývají doprovázeny sopečnou činností. Můžeme je nalézt podél aktivních kontinentálních okrajů, kde se tenká oceánská kůra tlačí pod kontinentální kůru.

Příklady těchto lokalit můžeme nalézt podél Pacifiku v Mexiku, na Novém Zélandu, na Kamčatce, v části Japonska, Indonésie a Filipín. Sopečné oblasti se nacházejí také mimo tyto zóny nad geologickými anomáliemi, tj. „výčnělky“ pláště do zemské kůry apod. Příkladem je i kalifornská oblast Geysers nebo Yellowstoneá sopečná pole [12].

Kontinentální trhliny jsou také oblastí s nedávnou sopečnou činností. „Trhání“ kontinentální kůry nastává v regionech, kde je proudění magmatu horním pláštěm ve směru k zemskému povrchu, což způsobuje posunutí hranice mezi pláštěm a kůrou a ředění kůry. Ukázkovým příkladem kontinentálního zlomového systému s vysokým geotermálním potenciálem je Východoafrická propadlina, která se táhne od Rudého moře až k Mosambiku na jihu Afriky. Největší masa horkého magmatu stoupá podél středních oceánských hřbetů.

Většina center geotermální aktivity se tak nachází pod vodou. Je nicméně několik regionů kolem těchto hřbetů, které jsou nad vodou, a tedy přístupné pro těžbu geotermální energie. Nejznámějším příkladem je právě Island.

Potenciál pro geotermální výrobu elektřiny z geotermálních oblastí doprovázených vulkanickou činností je ohromující.



Obr. 9 Rozmístění geotermálních elektráren na světě [13]

Mnoho zemí ležících v těchto oblastech by mohlo pokrývat hlavní část své spotřeby elektřiny geotermální výrobou z takových geotermálních oblastí. Geotermální oblasti jsou obecně charakterizované na jedné straně teplotami nad 150 °C v relativně malých hloubkách (často pod 1 000 m), a na druhé straně vysokým stupněm hydraulické propustnosti. Ačkoli jejich potenciál je ohromný, v globálním měřítku jsou jen malou tečkou na mapě. Většina kontinentálního území postrádá takové příznivé podmínky a mnoho geotermálních oblastí se nachází na odlehlých místech, daleko od spotřebitelů. Geotermální výroba elektrické energie proto čelí dvěma zásadním výzvám:

1. Musíme využívat geotermální zdroje relativně nízkých teplot v relativně velkých hloubkách
2. Je třeba vyvinout koncepty, které dovolí ekonomicky zpřístupnit geotermální energii z horkých skalních formací ve velkých hloubkách [12]

Kvůli relativně nízké tepelné vodivosti skály, která se pohybuje mezi 1 až 5 W/mK, je vrt sám příliš slabým výměníkem tepla, na to aby odebral teplo ekonomicky zajímavého množství. Hlubinné vrty jsou drahé a pro návratnost investic je požadována výhřevnost řádově přinejmenším 10 MW. Toho může být dosaženo, když má tekutina, těžená z rezervoáru produkční vrtem, průtoky větší než 100 m³/h. [12]

Významnějším technickým problémem, spojeným s geotermální výrobou elektrické energie, je obecně nízká propustnost hlubokých skalních formací. Existuje jen několik málo druhů hornin, jako vysoce pórovitý pískovec, intenzivně roztržštěná skála, nebo krasový vápenec, které poskytují dostatečnou propustnost pro dosažení výrobních průtoků, nutných pro efektivní výrobu elektřiny [12].

4.1 Princip funkce geotermální elektrárny

Rozlišujeme několik typů zařízení pro výrobu geotermální elektřiny. Jejich schémata se liší především na základě vlastnosti geotermálního zdroje.

Všechny však pracují na principu redukce tlaku v pracovním stroji – většinou parní turbíně. Tím, že se tlak páry provozní kapaliny, tedy nosiče geotermálního tepla, snižuje, předává svou energii stroji. Turbína se roztáčí a takto vygenerovaná mechanická energie rotační osy je pak generátorem transformována na elektrickou energii. Turbína může být s generátorem elektrického proudu spojená pomocí převodů. Nebo jsou turbína a generátor umístěny na jedné hřídeli a tvoří spolu jedno zařízení – tzv. turbogenerátor. Elektrický proud vzniklý v generátoru jde pak přes transformační stanici do rozvodné elektrické sítě.

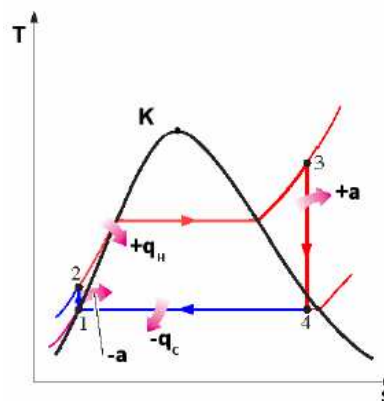
Pracovní kapalinou může být přímo geotermální kapalina, nebo pára získaná z hlubinného vrtu anebo se použije dalšího média.

Příslušným termodynamickým procesem je Rankin-Clausiovův cyklus, který je typický pro konvenční elektrárny. Pára je zahřátá při konstantním tlaku (izobaricky) a vypařuje se, izoentropicky vykoná práci a následně znovu izobaricky kondenzuje. Nakonec proběhne adiabatická komprese (viz obr. 10).

Různé systémy užívané pro výroba elektřiny z geotermálních zdrojů, založené na tomto Rankin-Clausiově cyklu, se liší především vzhledem k dosažitelné účinnosti a rozsahu využití zdroje.

Pára, která projde turbínou je většinou odvedena do kondenzátoru, kde předá své teplo chladicí vodě a zkondenzuje. Může se pak odvádět do atmosféry, v případě otevřených systémů, anebo pokračuje do vsakovacího vrtu, kde se vrátí zpět pod zem (binární systémy). Také je možné její další využití, např. v lázeňství.

Výroba energie je také často spojena se současnou výrobou tepla (kogenerací), kdy chladicí voda z turbíny prochází ještě výměníkem tepla, ve kterém odevzdá své zbytkové teplo. To se pak rozvádí stejně jako v klasické geotermální teplárně.



Obr. 10 Rankin-Clausiovův cyklus [34]



Obr. 11 Geotermální elektrárna v Nesjavellíru na Islandu [35]

Schéma geotermální elektrárny můžeme rozdělit na dvě části:

- Podpovrchová část pro přivedení tepla na povrch, obsahující vrt
- Část na povrchu sloužící k výrobě elektřiny

4.2 Podzemní část

Pro úspěšné zpřístupnění podzemního zdroje jsou dostupné různé možnosti, které musí splňovat potřeby příslušných geologických podmínek.

Technologie geotermálního vrtání, je v podstatě stejná jako u systémů zásobování teplem, Vrtvy ovšem bývají hlubší. V závislosti na zdroji existuje několik vhodných systémů využití.

4.2.1 Systémy zdrojů využívané při výrobě elektřiny

Geotermální naleziště (oblasti)

Většina současné produkce geotermální elektrické energie pochází z oblastí s převahou páry. Taková geotermální pole jsou nejnázve využitelná. V těchto oblastech se zbuduje více, či méně hustá skupina vertikálních produkčních vrtů a pára vyčerpaná z těchto vrtů se (po odstranění kapalné fáze) přepravuje izolovaným potrubím nad povrchem k vlastní elektrárně.

Kapalná složka, a zkondenzovaná geotermální pára z elektrárny se často vypouští do povrchových vod. Takové jednání ale způsobilo v některých oblastech ekologické problémy a vedlo k postupnému snížení tlaku v rezervoáru. To byl i příklad geotermálních oblastí The Geysers a Lardarella. Z toho důvodu začali mnozí provozovatelé vrtat reinjekční vrtvy a vrátet geotermální tekutiny zpět anebo vodu do rezervoáru doplňovat (např. v Lardarellu mořskou vodu). Toto opatření nejenže zastavilo předtím pozorovaný pokles produkce, ale vedlo také k postupnému obnovení výrobního toku tekutiny, a tedy výroby elektřiny na předchozí úrovni.

Schéma využití v oblastech s převahou kapaliny je v podstatě stejné. Podobně jako v místech, kde dominuje pára, není se geotermální tekutina většinou aktivně netěží pomocí ponorných čerpadel, ale výtlačným efektem, v důsledku varu geotermální tekutiny v produkčních vrtech. V oblastech s převažující kapalnou složkou je reinjektáž geotermální tekutiny ještě více žádoucí, kvůli vyššímu obsahu minerálních látek produkovaných tekutin.

Horké vodní prameny

K využití tohoto druhu rezervoáru jsou potřebné přinejmenším dva vrtvy (tj. jeden produkční a jeden injekční), protože geotermální tekutina (často vysoce mineralizovaná) nesmí být vypuštěna do povrchových vod. Reinjektáž může být žádoucí také kvůli udržování rezervoárového tlaku. Produkční a injekční vrtvy musí být umístěny ve vzdálenosti alespoň cca 1 km, abychom se vyhnuli rychlému návratu reinjektované studené vody do produkčního vrtu a zabezpečili dlouhou technickou životnost systému. U vertikálních vrtů tato vzdálenost od sebe odděluje zařízení na ústí jednotlivých vrtů, takže se musí propojit dlouhým izolovaným potrubím. V hustě zalidněných regionech to není vždy možné a výskyt potrubí nemusí být vždy přípustný. Navíc se musí po celou dobu provozu systému udržovat dvě lokality vrtu.

Náklady, spojené s takovým rozvržením systému, je v mnoha případech lepší investovat do řízeného vrtání. Řízené vrtání dovolí vrtat oba vrtvy z jednoho místa. Pro vrtvy dosahující hloubek 3 000 m nebo více, se v hloubce snadno dosáhne minimální vzdálenosti 1 km při mírném vychýlení od svislého směru. Potřebná vzdálenost je zaručena i v případě, že jeden vrt je šikmý a druhý se vyhloubí svisle. V mnoha případech to může být také neekonomičtější řešení. Svislé vrtání prvního vrtu je často výhodné, protože dovolí lepší naplánování sklonu druhého vrtu a minimalizaci finančních rizik. [12]

K čerpání geotermální tekutiny se většinou používá odstředivých čerpadel umístěných v produkčním vrtu. Čerpání je nutné z několika důvodů. Jednak, hladina vody ve vyvrtané díře může být příliš hluboko na to, aby byla vyvážena výtlačným efektem a voda samovolně unikala na povrch. Za druhé, propustnost zdroje je zřídka dostatečná, aby sama umožnila ekonomické průtoky. Za třetí, var vysoce mineralizovaných tekutin zdroje může vést

k poškozování vrtu a potrubí (např. vylučováním vápence). V neposlední řadě musí být v geotermálním oběhu udržován určitý přetlak, aby nedošlo k infiltraci kyslíku způsobujícího korozi povrchových zařízení a výplně reinjekčního vrtu [12].

Zlomové zóny

Většina zlomů, či zlomových oblastí je několik desítek nebo stovek kilometrů dlouhá a dosahuje hloubek až 10 km i víc. Na rozdíl od víceméně horizontálních hydrogeotermálních zdrojů jsou zlomové zóny vertikální nebo velice strmé.

Většinou se i pro tento typ rezervoáru hloubí aspoň jeden produkční a injekční vrt. Vzdálenost mezi vrty musí být zhruba stejná jako u horkovodních pramenů. Nicméně, vertikální rozsah zlomů počítá s realizací ve svislém směru, vyhloubením jednoho hlubšího (produkčního) vrtu a druhého méně hlubokého (injekčního) vrtu. To může významně snížit výrobní náklady. Vertikální vrty mohou být sice v mnoha případech dostačující, ale lepší kontroly protnutí se vrtu a zlomu dosáhneme řízeným vrtáním. Zvláště pokud přesně neznáme orientaci a sklon zlomové zóny v jisté hloubce. Řízené vrtání také zvětšuje šanci na protnutí většího množství jednotlivých zlomů tvořících zlomovou oblast [12].

Ve většině případů se požaduje aktivní těžba tekutiny použitím odstředivých čerpadel v produkčním vrtu, aby se dosáhlo požadovaných průtoků.

Krystalické skalní podloží

Krystalické skalní podloží ve velké hloubce sice není zcela nepropustné, díky přítomnosti různých prasklin, zlomenin, nebo poruch, jeho celková propustnost je ale obecně příliš nízká pro geotermální výrobu elektřiny.

Základní koncept Hot-Dry-Rock (HDR) technologie tak sestává z vytvoření velkého povrchu uměle utvořených poruch, spojujících přinejmenším dva vrty. Vzniklým systémem prasklin cirkuluje voda vstříknutá jedním vrtem. Během cirkulace se v teplé skále zahřeje a v druhém vrtu se pak čerpá. Aby se předešlo varu je v geotermálním okruhu udržován přetlak. Pára pro výrobu elektřiny je produkovaná v sekundárním oběhu na základě přestupu tepla z primárního oběhu v tepelném výměníku. V závislosti na hloubce vrtání (obvykle nad 5 km) a teplotě (často nad 150 °C) bude běžně užívaný binární systém pracovat s průtoky mezi 30 a 100 l/s při instalované elektrické kapacitě od 2 do 10 MW. Pro zajištění životnosti zařízení přinejmenším 20 let se vyžaduje vzdálenost v hloubce mezi vrty přibližně 1 000 m (při celkové ploše prasklin 5 až 10 km²). [12]

Kvůli vysokým hodnotám průtoku v prasklinách, zvláště v blízkosti obou vrtů, bude pro výkon systému důležitý tzv. průtokový odpor horniny. Z energetických a ekonomických důvodů by průtokový odpor systému (tedy rozdíl mezi vstupním a výstupním tlakem dělený průtokem proudu) neměl přesahovat 0,1 MPa·s/l [12].

Důležitým faktorem pro účinnost HDR systémů jsou i ztráty tekutiny v porušených horninách. Ztráty nad 10 % oběhu tekutin již nejsou v dlouhodobém měřítku přijatelné. Nejen kvůli velkému množství takto ztracené sladké vody, ale také z důvodu potřeby větších čerpacích příkonů nutných pro doplnění vody. Problému celkových ztrát se můžeme vyhnout nebo jej minimalizovat aktivním čerpáním v produkčním vrtu. Tímto způsobem se tekuté ztráty v oblasti vysokého tlaku na injekční straně kompenzují vzrůstem toku v nízkotlaké oblasti na produkční straně.

V mezinárodních projektech provedených během posledních dekad se zkoušelo několik různých HDR systémů. Rozdíly mezi nimi spočívají hlavně ve způsobech získání výměníku tepla z nepropustných hornin. Ten závisí na různých podmínkách v hloubce vrtu, kde se mohou nacházet buď různě uspořádané drobné praskliny, které se poté rozšíří. Nebo existuje zlom, či pásmo zlomů, s kterými se vrty propojí. K porušení horniny se téměř vždy používá technologie hydraulického lámání. [12]

4.2.2 Zvýšení produktivity

Kvůli relativně nízkému energetickému obsahu páry nebo horké vody ve srovnání s uhlovodíky, vyžadují geotermální vrty velmi silný hmotnostní průtok, za účelem dosažení ekonomicky realizovatelného výrobního výkonu. Komerční vrty ve zdrojích s převahou páry produkují až několik 10 t/h suché páry. V rezervoárech s převažující kapalinou je z hospodářských důvodů požadován hmotnostní průtok až několika set t/h horké vody. Takového průtok můžeme dosáhnout jen ve vysoce porézních, roztržitých, nebo krasových skalních formacích s velmi vysokou propustností. [12]

Proto se produktivita geotermálních vrtů do jisté míry uměle zvyšuje. K tomu se nejčastěji používají hydraulické štěpení a lámání, nebo zpracování kyselinou.

4.3 Nadzemní část

Zde se realizuje vlastní přeměna tepelné energie v elektřinu. Rozlišujeme několi systémů výroby elektrické energie, které můžeme rozdělit následujícím způsobem:

- Otevřené systémy, které přímo užívají geotermální tekutinu jak provozní kapalinu uvnitř elektrárny
- Uzavřené systémy, které přenášejí teplo geotermální tekutiny k další provozní kapalině, která pak proudí uvnitř elektrárny a vyrábí elektřinu
- Sdružené systémy, které jsou kombinací obou předešlých systémů

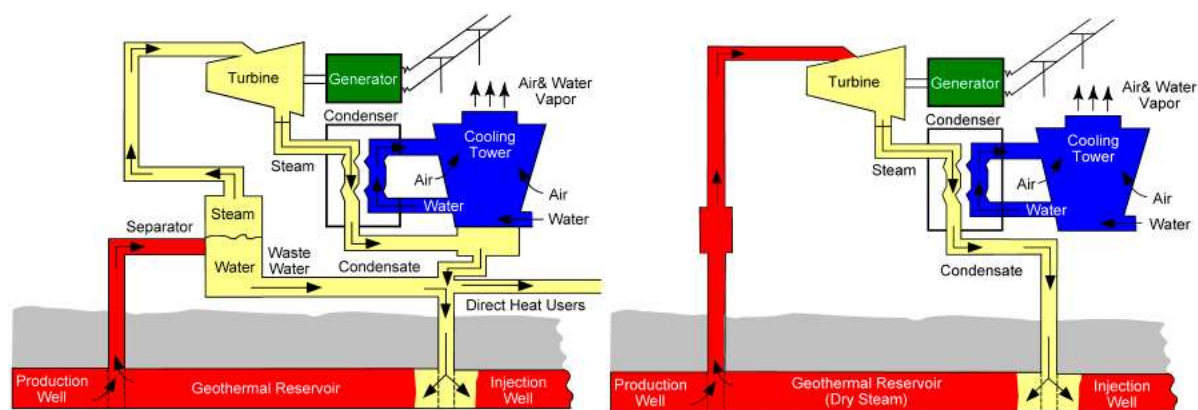
4.3.1 Otevřené systémy

V závislosti na vlastnostech geotermálního zdroje je možné buď přímé využití páry, nebo systémy využívající mokré páry.

Přímé využití páry - Systém suché páry

Na některých místech jsou geologické poměry tak příznivé, že z podzemního tepelného zdroje uniká přímo přehřátá pára, (nebo aspoň představuje velkou část produkované geotermální energie). Ta pak (po odfiltrování kapiček vody a nečistot) pohání turbíny elektrárny. Po ochlazení a zkondenzování se vrací sousedními vrty zpět do země. Tento postup je poměrně jednoduchý, je však použitelný pouze v případě dostupného, dostatečně vydatného zdroje o vysoké teplotě, tlaku i relativní čistotě.

Takové schéma využití geotermálního zdroje je typické pro geotermální oblasti, jako již zmíněné The Geysers. Pracuje tak i většina geotermálních elektráren na Islandu, tedy v zemi, kde má geotermální energie obrovský potenciál a téměř dominantní postavení ve výrobě elektřiny i tepla. Toto uspořádání je energeticky i ekonomicky sice výhodné, ale vhodná místa lze nalézt jen na několika místech planety.



Obr. 12 Srovnání systému suché páry (vlevo) a systému mokré páry (vpravo) [8]

Systémy mokré páry

Obvykle není možné získat z podzemních zdrojů páru s tak dobrými parametry, aby mohla přímo pohánět turbínu. V místech, kde voda v podzemí dosahuje teploty od 180 do 350 °C (a díky vysokému tlaku se nezměnila v páru), musíme tuto vodu nejdříve přivést do odtlakovací nádrže, kde se po snížení tlaku část vody změní v páru. Ta se následně vede opět na turbínu stejně jako v systému suché páry [4].

Systémy mokré páry můžeme dále rozdělit na:

Jednoduchý proces bez kondenzace

Poté co jsou pára vzniklá v odtlakovací nádrži a zbylá kapalina od sebe odděleny, se voda ve většině případů vstříkuje zpět pod zem. Pára koná práci v turbíně a souběžně s tím je její tlak redukován na atmosférický. Poté se pára rozptýlí do atmosféry přes rozptylovač.

Kvůli redukci tlaku na atmosférický, je energetická účinnost takových systémů nízká. Avšak, geotermální elektrárny takto pracující jsou ekonomicky výhodné, protože nepotřebují kondenzátory ani chladicí věže. Tyto systémy jsou proto rozumné, pokud můžeme dosáhnout velkých objemových průtoků, nebo vysoké teploty tekutiny.

Jednoduchý proces s kondenzací

Vroucí kapalinu, kterou jsme získali ze zdroje opět přivedeme do odtlakovací nádrže. Za tlaku menšího, než je tlak v produkčním vrtu, je produkováno malé množství suché nasycené páry a velké množství vroucí vody. Jakmile je pára oddělena od kapaliny, přivede se do turbíny, kde koná práci.

Minimální konečný tlak páry, který je ve většině případů velice nízký, je určen chladicími parametry kondenzátoru. Zda je možné využít tak nízké hodnoty tlaku, závisí na objemu nezkondenzovaných plynů.

Kromě technických a zčásti i ekologických problémů, kdy se uvolní nezkondenzované plyny do atmosféry, jsou jednotlivé procesy charakterizované nevýhodnou produkcí pevných sloučenin během procesu. Tyto sloučeniny se usazují a vytvářejí povlak na vybavení, což má nepříznivý účinek na bezpečnost, a proto potřebují být odstraněny.

Energeticky významnější část geotermální tekutiny (tedy tekutina, která byla oddělena uvnitř odtlakovací nádrže a znovu vrácena pod zem) není využita. To je také důvodem proč je rozsah použití tohoto systému relativně nízký.

Dvojitý proces s kondenzací

Nevýhody relativně nízkého rozsahu použití jednoduchých systémů mohou být napraveny vhodným doplněním. V tomto případě je vařící voda vyčerpaná z první odtlakovací nádrže (separátoru) odtlakována podruhé a vzniklá pára je znovu odseparována v další nádrži

a využita další (nízkotlakou) turbínou nebo uvnitř doplňkového nízkotlakého stupně vysokotlaké turbíny.

Účinnost dodatečné redukce tlaku uvnitř druhé nádrže závisí na teplotě uvnitř kondenzátoru a stavu tlaku při počátku redukce. Při běžných pracovních teplotách (160 °C) je využití zdroje značně vyšší, než je tomu u předchozích systémů mokré páry.

Ačkoli systémy mokré páry nebývají běžně aplikovány v teplotách nad 180 °C, dvojitě procesy jsou vhodné pro zvládnutí problémů, souvisejících k nízkými teplotami zdroje, jako nízký tlak a nízké množství páry. Z toho důvodu, díky jednoduchému návrhu, nízkým operačním i udržovacím nákladům a schopnosti produkovat svou vlastní chladicí vodu, jsou tyto systémy velmi výhodné, zvláště ve srovnání s binárními systémy. Na druhou stranu potřebují být optimalizovány ekonomicky, protože vyžadují vyšší investiční náklady oproti alternativním systémům, kvůli potřebě další turbíny, nebo turbínového stupně, nádrže, potrubí, řídicího systému apod. [12]

4.3.2 Uzavřené (binární) systémy

Termín uzavřený systém se týká geotermálních elektráren, které využívají geotermální zdroje nepřímo. To znamená, že k výrobě elektrické energie nepoužijí získanou páru, ale jiný sekundární prostředek. Uvnitř těchto systémů přijímá geotermální teplo sekundární médium ve výměnících tepla (výparnících). Kvůli nízké teplotě geotermální kapaliny, nebo směsi kapaliny a páry, musí mít sekundární prostředek nízkou teplotou varu.

Tyto cykly jsou aplikovány především, pokud primární prostředek není dostatečně teplý, nebo má příliš nízký tlak, aby nám dovolil vytvořit vhodné tlakové poměry pro rozumnou termodynamickou redukci tlaku. Použití druhé pracovní kapaliny přichází v úvahu také, pokud získaná termální voda má nepříznivé chemické vlastnosti (např. silná mineralizace, obsah plynů atd.), které buďto nemůžeme přímo upravit, nebo jen za cenu vysokých výdajů. [4] [12]

Organický Rankinův cyklus

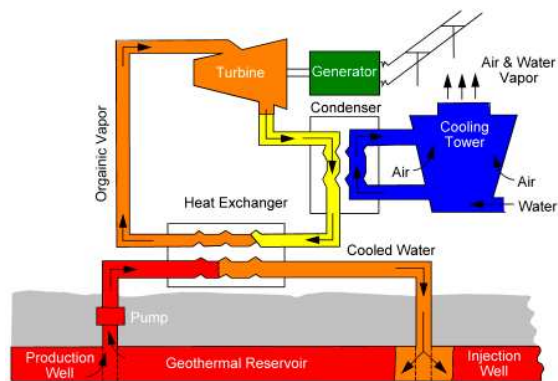
S výjimkou použité pracovní kapaliny (a tedy realizovaných teplotních a tlakových parametrů) se organický Rankinův cyklus (ORC) jen mírně liší se od klasického Rankinova procesu založeného na páře a realizovaného v mnoha konvenčních elektrárnách.

Jako u běžných elektrárenských cyklů, provozní kapalina je přehřátá (v tomto případě energií poskytnutou geotermální tekutinou), vypařuje se, a expanduje průchodem turbínou. Pak je ochlazená v rekuperačním výměníku tepla (ve srovnání s párou je stále přehřátá), zkondenzuje ve vodou chlazeném kondenzátoru, nebo vzduchovém chladiči a je recyklována do výparníku čerpadlem pro oběh pracovní látky.

Pracovními kapalinami jsou obvykle uhlovodíky (n-pentan, isobutan aj.) použité podle teploty geotermálních tekutin získaných z vrtu. V minulosti se používaly také freony (jako C₅F₁₂). Nadto, se uvažuje o použití směsí uhlovodíků. Ty nám slibují zvýšení efektivity díky svým nízkým výparným teplotám.

Při použití provozní kapaliny organického původu, musí být tomu přizpůsoben návrh zařízení. Turbíny se liší od těch užívaných pro vodní páru kvůli různé molekulové hmotnosti a nižší měrné tepelné kapacitě. Navíc, musíme brát ohled na vyšší korozivnost výměníků tepla i turbín a v neposlední řadě i na utěsnění systému vzhledem k atmosféře.

Průměrná účinnost závisí na teplotě geotermální tekutiny. Pro kapalinu o teplotě 80 °C je přibližně 5,5 %, při teplotě 180 °C se již pohybuje kolem 12 %, přičemž až do teploty cca 135 °C nedosáhne 10 %. Při horní mezi rozsahu uvažovaných teplot (až 200 °C), je možná účinnost i mezi 13 a 14 %, za předpokladu, je dobře využit tepelný potenciál geotermální tekutiny a za dosažení optimálních chladících teplot. [2] [12]



Obr. 13 Schéma binárního cyklu (ORC) [8]

Kalinův cyklus

Tento poměrně nový systém pracuje opět na principu Rankinova cyklu. Stejně jako u ORC, je u Kalinova cyklu pracovní kapalina, cirkulující uvnitř oběhu, izolována od geotermální tekutiny. Pracovní látkou je zde směs čpavku a vody.

Provozní kapalina, složená ze směsi dvou komponent, je přehřívána a vypařena uvnitř tepelného výměníku (výparníku). Různá teplota varu z dvou složek uvnitř provozní kapaliny vyhovuje hladkému přechodu k výparné teplotě. Vznikne pára bohatá na čpavek a zůstane kapalina, která má naopak nízký obsah čpavku. Pára poté expanduje ve vysokotlakém stupni turbíny a znovu se ohřívá před vstupem do nízkotlakého stupně turbíny. Po druhé expanzi jsou zbylá pára a kapalina, chudá na čpavek, znovu smíšeny a přivedeny do vodou chlazeného kondenzátoru, kde směs zkapalní. Čerpadlem se pak kapalina přivede k výparnému tlaku. Pro zlepšení energetické účinnosti, jsou uvnitř cyklu instalovány ještě rekuperátory.

Dosažitelná účinnost je pro teplotu geotermální tekutiny 80 °C asi 8,5 %, a pro teplotu 160 °C víc jak 15 %. Tento cyklus dosahuje tedy vyšší termodynamické účinnosti než ORC. Nicméně, těchto poměrně vysokých účinností se jen zřídka dosáhlo při výrobě, protože Kalinův cyklus je stále ještě ve vývoji a dosud existuje jen málo modelových zařízení s ním pracujících. [2] [12]

Velkou výhodou tohoto cyklu je že vypařování a kondenzace nejsou realizovány izotermicky, jako u čistých látek (ORC proces). Díky směsi dvou složek je možný pozvolný teplotní přechod během vypařování a kondenzace. Změny teploty geotermální tekutiny a pracovní kapaliny mohou tak být teoreticky navzájem přizpůsobeny. Toto pomáhá redukovat průměrnou teplotu mezi oběma toky, a tedy i snižovat ztráty při přestupu tepla.

Ve srovnání s použitím čistých látek také vzroste průměrná výparná teplota, zatímco průměrná kondenzační teplota se sníží. Toto opět zlepší účinnost cyklu.

Kromě energetických výhod tento proces také umožňuje výhodnou realizaci. Protože čpavek i voda mají podobné fyzikální vlastnosti, mohou být využity standardní parní turbíny, opatřené proti úniku čpavku. Navíc směsi čpavku s vodou mohou být po jistou dobu užity pro další technické účely (jako chlazení).

Nicméně, nízké rozdíly teplot uvnitř výměníku tepla a horší vlastnosti přenosu tepla (měrná tepelná kapacita směsi čpavku s vodou je více než dvojnásobná v porovnání s uhlovodíky používanými v ORC) vyžadují mnohem lepší vybavení ve srovnání s konvenčními elektrárnami založenými na parním cyklu. Podstatnou nevýhodou bránící širšímu využití tohoto cyklu v geotermálních aplikacích jsou i vlastnosti čpavku. Ten je zdraví vysoce nebezpečný a má korozivní účinky. [2] [12]



Obr. 14 Aplikovaný Kalinův cyklus v Husaviku na Islandu [7]

4.3.3 Sdružené systémy

V těchto systémech se kombinují různé procesy v závislosti na výrobních požadavcích a specifických podmínkách v dané lokalitě. Např. jednoduchý odtlakovací proces lze kombinovat s dvojitým. Obecně jsou možné různé kombinace jednotlivých cyklů. Například, jakmile prošla pára parní turbínou a snížila svůj tlak, může sloužit jako zdroj tepla pro ORC proces. Další možností je, že vyčerpaná kapalina z prvního separačního kroku není redukována podruhé uvnitř druhé odtlakovací nádrže, ale vytápí výparník ORC zařízení. Sdružené systémy nabízejí poměrně vysoké hodnoty účinnosti. [12]

5 Geotermální tepelná čerpadla a využití nízkopotenciální energie

5.1 Problematika tepelných čerpadel

Až doposud byla zaměřena pozornost spíše na tzv. vysokopotenciální zdroje energie, tedy zdroje geotermálního tepla o vysokých teplotách a jejich využití, ať už přímé, při zásobování teplem, nebo nepřímé, při výrobě elektřiny. Použití geotermální energie k takovým účelům však vyžaduje právě zdroje o velmi vysokých teplotách, aby bylo energeticky efektivní. Proto je u těchto systémů často nezbytné realizovat vrty do velkých hloubek. V mnoha případech ale není možné přímé použití tepla uloženého v zemi, nebo je jeho využití energeticky i ekonomicky nevýhodné. Především pro nízkou teplotu, která je způsobena malými teplotními gradienty v dané oblasti. Zdroje takové nízkopotenciální energie umožňuje prakticky využít právě tepelné čerpadlo.

Tepelné čerpadlo (TČ) je obecně zařízení, které slouží k „čerpání“ tepla z jednoho místa na druhé za vynaložení dodané vnější práce. Jeho hlavní výhodou, spočívá v tom, že dokáže odnímat teplo, které by bylo jinak energeticky nevyužitelné, okolnímu prostředí a převádět je na vyšší teplotní hladinu.

Technologie TČ tedy umožňuje ekonomicky realizovatelné aplikace vytápění kdekoli na Zemi a není omezena na lokality s vhodnými geologickými podmínkami, jako systémy operujících s vysokopotenciálními zdroji. V současnosti se na celém světě odhaduje použití více než milionu tepelných čerpadel s celkovou kapacitou větší než 15 GW, využívající přibližně 88 PJ geotermální energie pro vytápění. Tato kapacita roste asi o 10 % ročně [1].

Výhody použití TČ jsou rovněž ekologické, neboť se jedná o zcela bezodpadovou technologii. Navíc, pokud je TČ poháněno elektrickou energií ušetří průměrně až 65 % této energie (ve srovnání s přímým vytápěním elektrickou energií). S nižší spotřebou elektřiny souvisí i nižší spotřeba primárního paliva (např. uhlí, pokud elektrická energie pochází z tepelné elektrárny), a tím i nižší hodnoty emisí [14]. Stejně tak je výhodou šíře možných aplikací. Tepelných čerpadel se zpravidla užívá pro celoroční vytápění budov, přípravu teplé užitkové vody, případně další účely, jako ohřev vody v bazénech, vytápění skleníků apod. Lze také využít možnost reverzního chodu, kdy TČ naopak místnost ochlazuje, tedy je možné jejich použití i v klimatizaci stavebních objektů. V případě, že zdrojem tepla je půda, toto vrácení tepla zlepšuje energetickou rovnováhu, neboť zmenšuje pravděpodobnost rychlého vyčerpání zdroje tepla.

TČ mohou vést teplo proti přirozenému směru tepelného toku, ale mohou také zlepšit a zefektivnit odvod tepla z teplejších oblastí do chladnějších. Toho se také využívá např. když máme geotermální zdroj o teplotě sice vyšší, než je okolní prostředí, ale příliš nízké na to, aby byla efektivně využita. TČ dodáním části energie dokáže toto teplo zpracovat a přivést do energeticky vyššího stavu, kde jej již můžeme přímo využít.

Všechny tyto výhody tepelných čerpadel platí samozřejmě i pro TČ geotermální. Proto jsou dnes geotermální tepelná čerpadla (GTČ) jednou z nejrychleji se rozvíjejících aplikací využití geotermální energie na světě.

Tepelné čerpadlo může pracovat buď jako jediný zdroj tepla (monovalentní provoz), nebo je možné jej kombinovat s dalšími zdroji tepelné energie (plynový kotel, elektrokotel), který obvykle slouží jako záložní zdroj energie. To se nazývá bivalentní provoz TČ.

Velkou výhodou TČ je, že mohou využít entalpii geotermálních vod případně až pod teplotu svého okolí, což u rekuperačních výměníků není nikdy možné. Jejich obecnou nevýhodou je, že ke svému pohonu potřebují další energii. Navíc jsou investičně nákladnější než rekuperační výměníky tepla, a proto jejich efektivní využití v určité lokalitě musí být nejdříve pečlivě uváženo na základě specifického ekonomického šetření [14].

5.1.1 Zdroje nízkopotenciálního tepla

Zdroje tepla s nízkým potenciálem jsou v širším pojetí všude kolem nás. V zásadě je můžeme rozdělit na dva základní typy:

- Přírodní obnovitelné zdroje – tj. okolní vzduch, povrchová a podpovrchová voda, horniny a zeminy.
- Průmyslové a odpadní zdroje – Jedná se například o teplý odpadní vzduch z ventilace, nebo odpadní vody a jiné kapaliny, či teplo z různých průmyslových procesů dolů apod.

Dále se těmito zdroji nebudu zabývat v širším kontextu, ale zaměřím se pouze na ty, které mají vztah ke geotermální energii. Z tohoto hlediska jsou důležité tyto zdroje:

Půda – Jde o velmi rozšířený způsob využívání. Zdrojem tepla je ale spíše sluneční záření, než geotermální energie.

Podpovrchová voda a geotermální voda z hlubin – Zdroj tepla je buď podzemní studniční voda, nebo geotermální pramen o nízké teplotě.

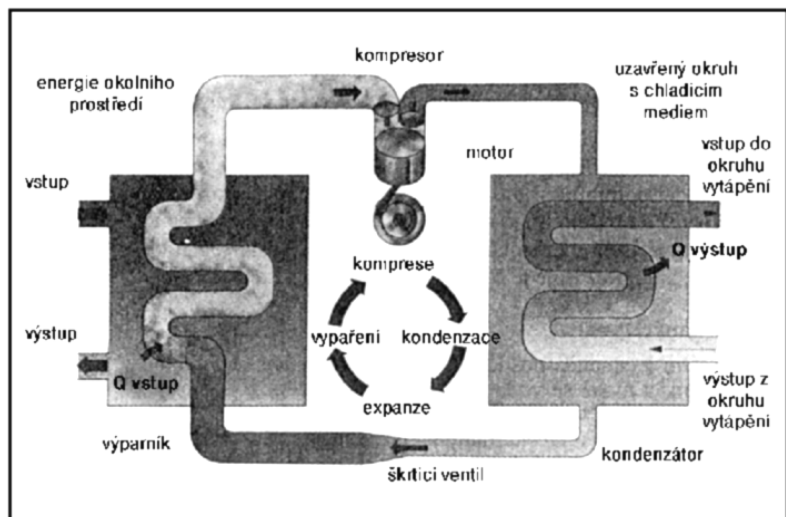
Teplo suchých hornin v hloubce – Teplo se v horninách akumuluje jak slunečním zářením, tak vedením tepla z nitra planety.

5.1.2 Princip funkce tepelného čerpadla

Tepelná čerpadla pracují na principu výměny tepelné energie mezi dvěma systémy. Z jednoho tepla odebíráme (většinou z venkovního prostředí) a do druhého systému pak po dodání aktivační energie (nejčastěji elektrické) přivádíme teplo o mnohem vyšší teplotě, než byla teplota prostředí, z něhož jsme teplo odebírali.

Princip TČ je v podstatě stejný, jako u chladničky (ta je vlastně také tepelným čerpadlem, protože skrz výměník tepla na své zadní straně vytápí místnost), pouze s tím rozdílem, že nám nejde o ochlazování prostředí, ale naopak o produkci co největšího množství tepla, za dodání co nejmenšího množství aktivační energie. Předávka tepla se realizuje v uzavřeném chladicím okruhu.

Činnost tepelného čerpadla využívá fyzikální jevy spojené se změnou skupenství pracovní látky - chladiva. Nejčastěji se setkáváme s tzv. kompresorovými čerpadly. Jejich činnost vypadá následovně: Ve výparníku odebírá chladivo při nízkém tlaku a teplotě teplo zdroji nízkopotenciálního tepla. Dochází k varu, při kterém se kapalné chladivo postupně mění v páru. Páry jsou pak nasávány kompresorem, který je stlačením výrazně zahřívá. V kondenzátoru páry chladiva předají své kondenzační teplo do topného systému. Tím se opět ochladí se a zkapalní. Oběh je uzavřen odvodem chladiva do výparníku přes expanzní ventil, ve kterém se snížením tlaku chladivo prudce rozepíná a ochlazuje. Celý cyklus se pak opakuje. [15] [16]



Obr. 15 Princip činnosti kompresorového tepelného čerpadla [17]

Tepelná čerpadla mohou přivádět teplo jak z prostředí s vyšší teplotou do prostředí s teplotou nižší, ale dokonce i naopak z chladnějšího prostředí do teplejšího. Zdánlivě tedy působí proti 2. Zákonu termodynamiky. Ten říká, že teplo nemůže samovolně přecházet ze systému o nižší teplotě, do systému s vyšší teplotou. Tepelné čerpadlo ovšem nepřepřavuje teplo samovolně, ale dodáním jistého množství energie zvenčí, do tepelného oběhu. Tato energie musí mít vyšší kvalitu než, má systém s vyšší teplotou, do kterého tepelné čerpadlo energii dodává. Pak všechny děje, které v TČ probíhají, jsou již v souladu s druhou termodynamickou větou. [14]

5.1.3 Topný faktor

Zřejmě nejdůležitějším parametrem TČ je topný faktor ε , neboť přímo souvisí s výkonem. Vyjadřuje poměr dodaného tepla k množství spotřebované energie.

$$\varepsilon = \frac{Q}{E} = k \frac{T_k}{T_k - T_0} \quad [-]$$

kde:

Q = teplo dodané do vytápění [kWh]

E = energie pro pohon TČ [kWh]

T_k = kondenzační teplota [K]

T_0 = vypařovací teplota [K]

k = korekční součinitel [-]

Rozlišujeme topný faktor teoretický a skutečný. Teoretický topný faktor lze odvodit z Carnotova cyklu, platí tedy pro ideální termodynamický děj. Ve skutečnosti je topný faktor menší. Proto, abychom tento reálný faktor získali, teoretický topný faktor se vynásobí korekčním součinitelem k , který respektuje skutečný průběh ($k = 0,4 - 0,6$) [15].

Typická hodnota topného faktoru se pohybuje mezi hodnotami 2,5 - 4. To znamená, že běžná tepelná čerpadla dodávají 2,5 - 4 kWh tepla, při spotřebě 1kWh elektřiny [14].

5.1.4 Rozdělení tepelných čerpadel

Tepelná čerpadla můžeme rozdělit podle několika hledisek.

Z hlediska způsobu, jakým probíhá termodynamický děj a uskutečňuje se odsávání par z výparníku a zvýšení jejich tlaku známe TČ:

- *Kompresorová* – Nejběžnější typ TČ. Pracuje podle uvedeného principu. U tohoto typu je to právě kompresor, který umožňuje transformaci nízkopotenciální tepelné energie na vyšší energetickou hladinu.
- *Absorpční* – Tato čerpadla pracují bez kompresoru. Zvýšení tlaku par se dosahuje absorpcí chladiva do roztoku. Tato tepelná čerpadla mají spotřebu energie 2,5 - 4 krát větší než kompresorová, a proto se téměř nepoužívají.
- *Hybridní*

Podle realizovaného pohonu:

- *Tepelná čerpadla poháněná plynem*
- *Elektřinou poháněná tepelná čerpadla*
- *Tepelná čerpadla poháněná kapalnými palivy*

Podle druhu nízkopotenciálního zdroje tepla a ohřívané látky:

- *vzduch – vzduch*
- *vzduch – voda*
- *voda – vzduch*
- *voda – voda*
- *země – voda*

V geotermálních aplikacích uvažujeme systémy země – voda a voda – voda, kdy zdrojem tepla je půda, či suché horniny v hloubce, nebo podpovrchové vody a geotermální vody.

Oproti ostatním TČ mají geotermální řadu výhod: hlavně menší závislost tepelného výkonu na počasí a zachovávají si celoročně velmi výhodný poměr energie dodané do zařízení a získané ze země. Naproti tomu jejich nevýhodou je, že jsou nákladnější, kvůli výkopovým a vrtným pracím a nutným geologickým i hydrologickým průzkumům.

Jako teplonosné médium slouží nejčastěji voda, či ekologická nemrznoucí směs.

5.2 Systémy geotermálních tepelných čerpadel

Geotermální tepelná čerpadla, beroucí energii z půdy, či vody jsou vlastně systémy složené z tepelného čerpadla umístěného na povrchu a výměníku tepla v zemi [18]. Existují různé možnosti realizace tohoto výměníku.

Systémy můžeme podle zdroje opět rozdělit stejně jako jiné zdroje geotermálního tepla na mokré – podzemní a hlubinné vody a suché horniny – půda nebo teplo v hloubkách.

Rozlišujeme rovněž systémy:

- *Otevřené:* Tyto systémy se využívají pro extrakci tepla z podpovrchových vod, Jde většinou o systém dvou studní – jedné sací a druhé vsakovací (obdobně jako u hydrogeotermálních vrtů pro teplárny a elektrárny).
- *Uzavřené:* Zde jsou trubky výměníku uloženy v zemi buď horizontálně (zemní kolektory), nebo jsou kolektory vedeny ve vertikálním směru (zemní sonda) (obdobně jako zdroje geotermálního tepla pro teplárny a elektrárny). Uzavřené protože vůbec nedochází ke styku pracovního média s horninovým prostředím. Uzavřené systémy slouží pro extrakci suchého zemského tepla. Jejich

Všechny tyto systémy mohou být využity pro obytné budovy i komerční aplikace [19].

5.2.1 Přecherpávání tepla z podpovrchové vrstvy zeminy

V tomto případě zdrojem tepla rozumíme vrchní vrstvu půdy do hloubky asi 2 m. Pro odběr tepla z půdy se používá nejčastěji tepelný výměník z polyetylenového potrubí. Trubky jsou uloženy horizontálně (proto horizontální zemní kolektory). Plní se nemrznoucí směsí. Půdní kolektor se umísťuje poblíž objektu v nezámrné hloubce (1,2 – 1,5 m). [14]

Odčerpáváním tepla se půda ochlazuje, ale geotermální tepelný tok stačí její teplotu vyrovnávat vedením tepla ze vzdálenějších míst polomasivu. Je však potřeba dodržet rozteč trubek, která to umožní. Trubky se ukládají ve vzdálenostech 0,5 až 1 m [20]. Na 1 kW výkonu tepelného čerpadla je pak potřeba 5 až 8 metrů délky výkopu [14].

Výhoda spočívá ve skutečnosti, že teplota půdy je od hloubky 1,5 m poměrně konstantní. Nevýhodou je především potřeba dostatečně velkého pozemku, aby byl systém efektivní. Také teplotní děje jsou nestacionární vlivem měnících se teplotních podmínek v okolí trubek. Výkonnost je silně závislá na složení a kvalitě půdy. Pohybuje se mezi 10 – 40 W/m² [14].

Tento způsob přečerpávání tepla akumulovaného v povrchových vrstvách zeminy využívá tepla geotermální energie pouze okrajově. Jen malá část tepla uloženého v povrchových vrstvách má totiž svůj původ v zemském jádře. Mnohem větší podíl tepla pochází z akumulované sluneční energie. Název geotermální tepelná čerpadla pro tento druh čerpání tepla není tedy zcela přesný.

V polovině 80. let se také objevily první systémy přímého odpařování. Princip spočívá v tom, že v půdě jsou položeny trubky měděné. Pracovní látka se po odpaření vede přímo do kompresoru. To umožňuje dosáhnout vyššího topného faktoru. Systém se nejvíc používá u tepelných čerpadel s malým výkonem. [20]



Obr. 16 Schéma systému Horizontální kolektory [13]

5.2.2 Využití tepla akumulovaného v zemském polomasivu

V hloubkách větších než dva metry je vliv slunečního záření slabší a prohřátí půdy méně výrazné. Přesto pracují vertikální jímače (kolektory) obecně s vyššími teplotami teplonosného média než horizontální zemní kolektory (díky stabilnější teplotě horniny v hloubce i geotermálnímu tepelnému toku). [20]

Vzhledem k tomu, že tepelné čerpadlo při napojení na kolektor ve vrtu vyvolá v okolí teplotní nerovnováhu, dochází neustále k přenosu tepla v horninách směrem k vrtu. Tento přenos tepla se uskutečňuje především vedením (kondukcí). [16]

Teplo z hlubin lze čerpat pomocí suchých vrtů, neboli zemních sond. Tyto vrty mohou dosahovat hloubky až 150 m. Uvádí se, že jednotlivé vrty by měly být vzdáleny alespoň 15 m přičemž při nedostatečné ploše na povrchu lze zvolit vrty šikmé, či vějířovitě rozložené. [20]

Do otvoru vrtu se vloží dvě dvojice trubek ve tvaru U, tzv. U – kolektory (představují v podstatě prodloužený primární výměník - výparník) a vrt je po celé délce vyplněn injektážní směsí. Dvě trubky jsou přívodní a dvě vratné. Pokud je potřeba dosáhnout většího výkonu, zavádí se i několikanásobné trubky pro jeden zdroj.

Většinou se používají trubky DN 25 pro vrty do hloubky 75 m a DN 32 pro hloubky do 150 m. Trubky mohou být i plastové (nejčastěji polyetylenové) s příslušnou odolností v tlaku. Pro zajištění stabilního spojení zemní sondy s okolní horninou se vrt zpevní suspenzí s velkou tepelnou vodivostí (např. bentonit). [20] [14]

Teplonosné médium odnímá horninám nízkopotenciální tepelnou energii o teplotě 2 – 4 °C a předává ji přes výměník (výparník) chladivou, cirkulujícímu ve vnitřním okruhu tepelného čerpadla. Vrtaný otvor má průměr 120 až 150 mm [14].

Vrty se umísťují v blízkosti stavby alespoň v minimální potřebné vzdálenosti. Je možno je umístit i pod stavbou, zvláště jde-li o novostavbu. Na 1 kW výkonu tepelného čerpadla je potřeba 12 až 18 m hloubky vrtu, podle geologických podmínek [21].

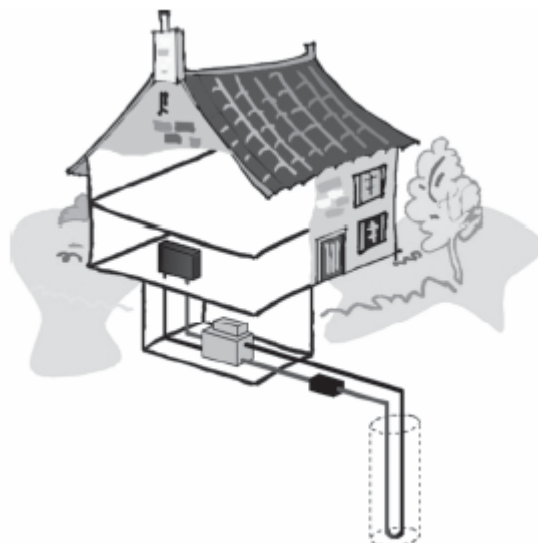
Tepelný výkon vrtu závisí na jeho hloubce, teplotním rozdílu mezi teplotou horniny a střední teplotou nemrznoucí kapaliny proudící v trubkách a následujících parametrech horniny:

- měrná tepelná kapacita c [kJ/kg.K] – pohybuje se v rozmezí 0,9 – 2,9 kJ/kg.K
- hustota ρ [kg/m³] – obvykle mezi 1600 – 2400 kg/m³
- měrná tepelná vodivost λ [W/m.K] – závisí hlavně na vlhkosti. Rozmezí hodnot je mezi 0,9 W/mK (suché písčité půdy) a 2,45 W/mK (jíl s 10% obsahem vlhkosti) [14]

Měrná tepelná vodivost hornin λ je pro danou horninu v homogenním prostředí konstantní. Je to velice důležitá veličina, charakterizující schopnost horniny vést teplo. Vyjadřuje množství tepla, které projde jednotkovou plochou za jednotku času při jednotkovém teplotním rozdílu.

Bez údajů o vlastnostech půdy lze uvažovat měrný výkon 55 W/m [14].

Výhodou je opět především celoročně stálá teplota zdroje (cca 8 °C), takže TČ pracuje efektivně. Nevýhodou může být vyšší pořizovací cena vrtu.



Obr. 17 Schéma systému Zemní sonda [13]

5.2.3 Přečerpávání tepla z podpvrchových studničních a geotermálních vod z hloubek

Zdrojem nízkopotenciální tepelné energie jsou v tomto případě podzemní vody. Aby bylo možné využít tepla spodních vod je potřeba zřídit alespoň dvě studny, jednu odčerpávací a jednu vsakovací, protože vrácením ochlazené vody zpět do odběrové studny, by se tato neustále ochlazovala. Ochlazenou vodu lze za určitých podmínek odvádět i do kanalizace, nebo potoka, či jiné vodoteče. Z ekologického hlediska to však není příliš vhodné.

Teplonosným médiem je tedy samotná podpvrchová voda, která cirkuluje mezi oběmi studnami. Jedná se proto o systém otevřený.

Vzdálenost mezi studnami by měla být alespoň 15 m. K zajištění potřebného výkonu je třeba znát vydatnost zdroje. Ta musí být nejdříve potvrzena čerpací zkouškou. Potom je nutné ověřit také teplotu vody, která by neměla během zkoušky klesnout a obsah minerálních látek s ohledem na vznik koroze a usazenin.

Pokud splní požadované předpoklady (tedy vhodné složení, čistota a celoroční potřebná teplota), lze vodu zavádět přímo do výparníku tepelného čerpadla, kde se ochladí o cca 4 až 5 °C. V případě silněji mineralizovaných vod se tyto čerpají do předřazeného výměníku, aby nebylo nutné složitě čistit výměník tepelného čerpadla. Čerpání vody se obvykle realizuje prostřednictvím ponorného čerpadla.

Zdroj vody však musí být dostatečně vydatný (přibližně 20 - 25 l/min pro TČ s výkonem 10 kW). Vhodných lokalit je proto k dispozici relativně málo [22].

Hloubka vrtů je závislá na hladině spodní vody. Většina studní vyžaduje hloubky mezi 5 a 15 m. Pokud to dovolují hydrologické poměry, postačuje někdy zřídit pouze jednoduchou vsakovací šachtu [14].

Velkou předností použití studničních vod je jejich stálá teplota. Další výhodou této aplikace jsou i vysoké dosažitelné hodnoty topného faktoru (i 4 a více) v případě, že zdroj vody má i v zimě minimálně 10 °C [23].

Nevýhody jsou následující: Požadavek na silný a stabilní výkon, konstantní vydatnosti a teploty. Požadavek na čistotu vody. V případě silné mineralizace nutnost opatřit systém speciálními filtry, což je velice nákladné. Nutnost provedení dlouhodobých čerpacích zkoušek a vypracování odborného hydrologického posudku.



Obr. 18 Schéma systému voda – voda [13]

K energeticky využitelným geotermálním vodám patří také vody čerpané na činných rudných, či uhelných dolech. V těchto zařízeních je nutné vodu odčerpávat, aby byla umožněna vlastní těžba surovin [20]. Oproti klasickému čerpání podzemních vod systémem dvou studní bývá však topný faktor výrazně nižší v důsledku potřeby velkého příkonu pro ponorné čerpadlo.

Zdrojem tepla mohou být také geotermální vody z hloubek, jelikož nehomogenní struktura zemské kůry představuje pro zavodněné vrstvy obrovský výměník tepla o velkém povrchu. Skrz tento výměník může voda přijímat velkou část geotermálního toku a při umělém vychlazení i velkou část místně akumulovaného tepla. Vody se mohou dostávat na povrch buď přirozenou cestou (lázeňské prameny) nebo technickými prostředky (čerpáním) – vždy jsou ale teplejší, než vody povrchové.

Teplé geotermální vody (o teplotách 50 °C a vyšších) lze využívat k vytápění a ohřívání užitkové vody většinou přímo, pouhou výměnou tepla v rekuperačním výměníku. Tepelný potenciál vod s nižší teplotou lze využít jedině tepelnými čerpadly.

5.2.4 Vrtý pro tepelná čerpadla

Největší část geotermálního tepla s nízkým energetickým potenciálem se využívá pomocí vrtů pro tepelná čerpadla. Vrtý zajišťují vlastně výměník tepla v zemi, ve kterém cirkulující nosič tepla odebírá tepelnou energii hornině. Teplonosné médium je poté přeneseno do výměníku v tepelném čerpadle, kde odevzdává svoji energii chladivu ve vnitřním okruhu tepelného čerpadla.

Vrt a jeho správné dimenzování i vystrojení mají vliv na topný faktor tepelného čerpadla a tedy i účinnost celého systému.

Z hlediska funkce rozlišujeme dva typy vrtů:

- Vrtý systému země – voda: Jsou výrazně početnější skupinou. Energetický potenciál horninového prostředí je využíván prostřednictvím vertikálních kolektorů (viz 5.2.1)
- Vrtý systému voda – voda: Tvoří méně početnou skupinu vrtů pro TČ. Energetický potenciál představuje volně tekoucí podzemní voda (viz 5.2.2). Její teplota je obvykle o 2 – 4 °C vyšší než je střední roční teplota na povrchu.

Vrtý pro tepelná čerpadla nesmíme zaměňovat s geotermálními vrtý, které jsou obecně mnohem hlubší. O geotermálních vrtech bylo podrobně pojednáno v předešlých kapitolách. Vrtý pro tepelná čerpadla mají řadu specifík. Především nejsou tak svázané s určitými lokalitami s výskytem vhodného zdroje (médiu), či geologickými podmínkami jako vrtý geotermální. Tato jistá univerzálnost však spočívá z velké části na vysokém podílu sluneční energie na teplotě zdroje. Slunce je hlavním zdrojem obnovitelné nízkopotenciální energie ve svrchních horninách zemské kůry. Vliv geotermálního tepla zde je malý a stoupá s hloubkou. Také v oblastech zvýšené geologické aktivity (nebo v horninách se zvýšeným obsahem radioaktivních prvků) budou podíly jednotlivých zdrojů vypadat jinak. Konkrétně vzroste podíl energie geotermální. Díky tomu má horninový masiv v hloubce poměrně stálou teplotu a není tak ovlivněn sezónními výkyvy tepla jako povrchové vrstvy. [16]

Při vytápění pomocí tepelného čerpadla dochází k ochlazení horninového podloží. To se v dostatečně velkých hloubkách stabilizuje (což znamená, že teplota teplonosné látky je na vstupu do oběhu tepelného čerpadla téměř konstantní). V době, kdy nepotřebujeme teplo pro vytápění, tedy mimo topnou sezónu se postupně obnovuje tepelný potenciál hornin, zčásti i vedením geotermálního tepla. Tepelná čerpadla budou v tomto období produkovat pouze teplo pro ohřev teplé užitkové vody.

Z toho důvodu je i velice výhodná aplikace tepelného čerpadla při klimatizování objektů. Pomáhá vlastně uchovat energetickou rovnováhu. Tím, že se přebytečné teplo odvede zpět do vrtu se hornina ohřeje a vrátí se jí část tepla, které jsme předtím odebrali. V praxi to znamená dosažení vyššího topného výkonu. Pokud máme k dispozici dostatečně velký počet vrtů, vyloučíme prakticky případný dlouhodobý pokles teploty hornin v masivu, protože vrtý se budou navzájem teplotně ovlivňovat [24].

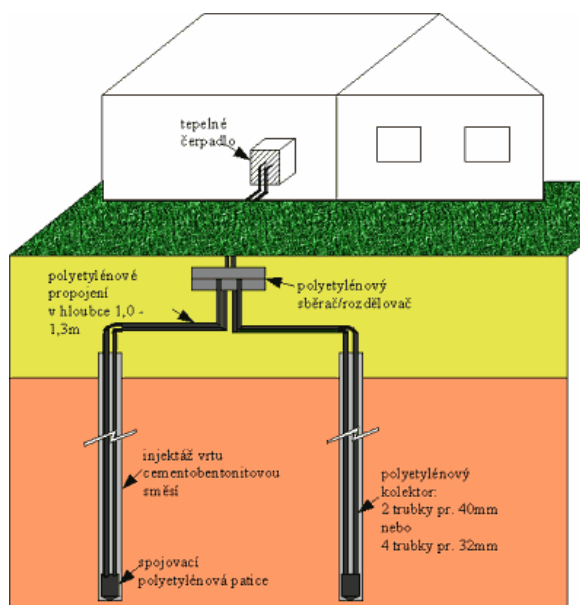
Pokud by docházelo ke stálému ochlazení vrtu tepelné čerpadlo by sice pracovalo dál, ale jeho topný faktor by významně klesl. To sníží jeho efektivitu systému a návratnost investic. Takový stálý pokles teploty většinou ukazuje na špatně dimenzovaný vrt pro danou lokalitu. Proto je nezbytné provést dimenzování vrtu pro TČ velice pečlivě. [16]

Dimenzování vrtů zahrnuje stanovení počtu a hloubky každého vrtu, vzdálenosti mezi dvěma a více vrtý a v případě více než dvou vrtů i stanovení způsobu rozmístění. Je důležité znát, nebo zjistit celkový teplotní odpor vrtu proti přestupu tepla z hornin do nemrznoucí směsi v kolektoru. Tento odpor je závislý na mnoha faktorech. Především jsou to: materiál výplně vrtu, materiál trubek kolektoru, poloha trubek kolektoru ve vrtu a režim proudění chladiva v kolektoru. Z hlediska účinnosti je žádoucí aby byl teplotní odpor co nejmenší. Toho je dosaženo, pokud je materiál výplně vrtu co nejvíce tepelně vodivý a trubky kolektoru jsou co nejbližší vrtu, pokud možno při stejné rozteči. Režim proudění nemrznoucí kapaliny by měl být turbulentní. Tyto parametry jsou technického charakteru. Jsou tedy snadno

určitelné a ovlivnitelné. Zásadní význam pro dimenzování mají ještě podmínky v dané lokalitě, tedy tepelná vodivost hornin a průměrná teplota nad povrchem. Naopak zemský tepelný tok na dimenzování hloubky významný vliv nemá.[16]

Samotná realizace vrtu pro TČ je v mnoha ohledech obdobná jako u geotermálních vrtů. Nejčastěji je užitá technologie založená na rotačně příklepném vrtání s vodovzdušným výplachem. Jen v jílových horninách bývá aplikována technologie rotačního vrtání s listovým dlátem. Vrtná drť se odvádí pryžovou hadicí do přistaveného kontejneru. Technologie umožňuje dosáhnout hloubek asi 150 m. Naproti tomu použitím vodního výplachu je možné realizovat i větší hloubky. Vrtání je však nákladnější, protože klade vysoké nároky na množství a čistotu technické vody.[25]

Vystrojení vrtů pro tepelná čerpadla tvoří uzavřený okruh potrubí. Jako materiál vystrojení se nejčastěji používají polyetylény (PE). Po zapaštění je PE-kolektor napuštěn nemrznoucí směsí (většinou směs vody a technického lihu). Následně se vrt vyplní cemento-bentonitovou směsí. Ta chrání kolektor před poškozením, zlepšuje přestup tepla z horniny do kolektoru, tím, že vytváří homogenní výplň bez dutin a zabráňuje kontaminaci zvodnělých vrstev ve vrtu. Ještě se provede tlaková zkouška těsnosti PE-kolektorů, které vyčnívají z vrtu asi 1 m na úroveň terénu. Na konci vystrojení je použito vratné U koleno. Nakonec se kolektory napojí na tepelné čerpadlo ve stavebním objektu. Realizovaný vrt není na pozemku vůbec patrný (viz obr. 55). [26]



Obr. 19 Schéma napojení hloubkových vrtů pro tepelné čerpadlo v objektu [23]

Ačkoliv je použití tepelných čerpadel z hlediska životního prostředí poměrně šetrné řešení, vrtý s sebou nesou i jisté i jisté ekologické problémy, na které by se nemělo zapomínat. Představují riziko především pro podzemní vody, do jejichž rovnováhy zasahují. Také může dojít ke změně vlastností základové půdy v podloží odvodněním. Naproti tomu pokud je vrt pro tepelné čerpadlo správně dimenzován v dané lokalitě (jeho hloubka je vzhledem ke geologickým podmínkám dostatečná), nehrozí prakticky žádné nebezpečí nevratného ochlazení horninového masivu.



Obr. 20 Dva 36 tunová geotermální tepelná čerpadla použita na College of Southern Idaho [27]

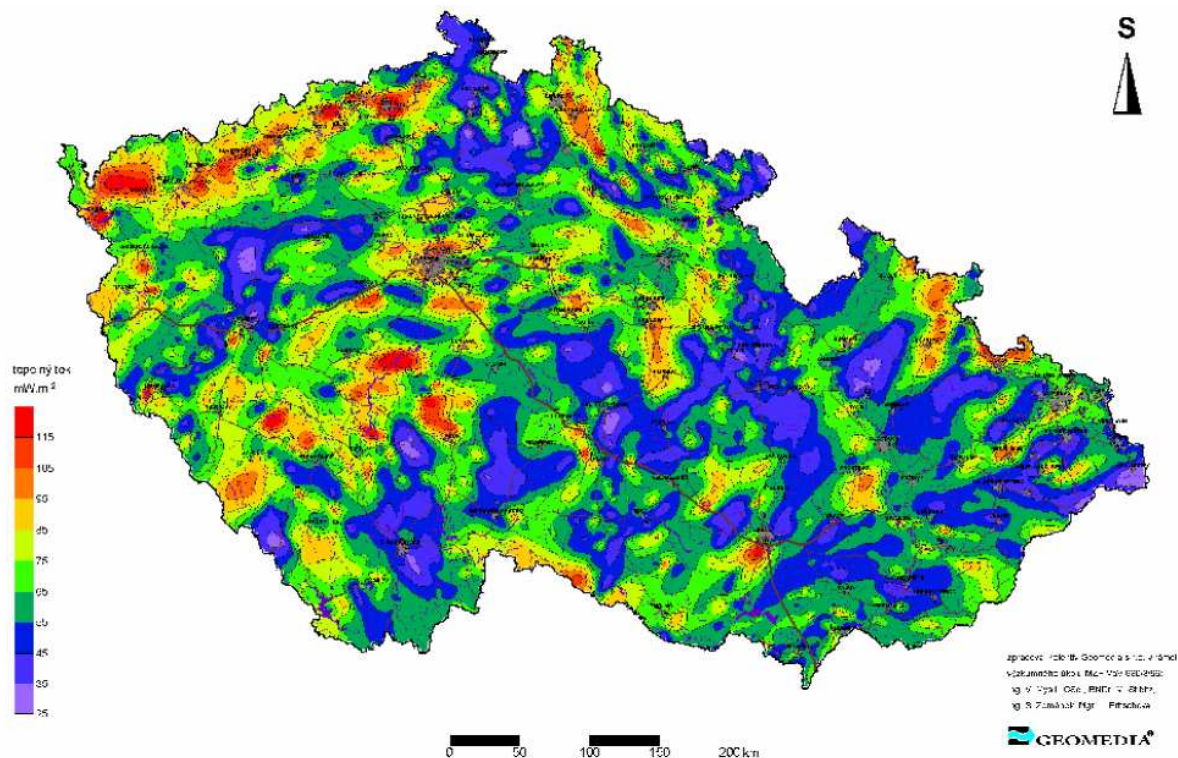
6 Uplatnění v České Republice

Území České republiky nemá příliš vhodné podmínky pro využívání geotermální energie. Zdroje energie, umožňující užití geotermálního tepla pro výrobu elektrické energie nebo jako zdroje pro centrální vytápění, které jsou využívány např. na Islandu, či v Itálii na území ČR prakticky nenajdeme [20]. Na druhou stranu je však možné velmi úspěšně využívat nízkopotenciální teplo prostředí v systémech geotermálních tepelných čerpadel.

Průměrný tepelný tok z hlubin českého masivu je kolem 65 W/m^2 . Nejvyšších hodnot dosahuje oblast Podkrkonoší a Krušných hor. Naproti tomu např. v Jižních Čechách jsou tepelné toky v hodnotách kolem $20 - 30 \text{ W/m}^2$. [20]

Poměrně dlouho tradici má u nás použití termálních vod pro lázeňské účely. Jedná se především o oblast Karlovarska, kde najdeme četné termální prameny. Ty dosahují teplot až 72°C . Karlovarské termální prameny jsou nejteplejší v ČR a mají navíc poměrně dobrou vydatnost bez umělého čerpání (až 40 l/s). Jejich nevýhodou je ale silná mineralizace (cca $6,5 \text{ g/kg}$). Nižší teplotu, mají geotermální prameny v Teplicích, (kolem 40°C), přesto patří k nejteplejším v ČR. V další lokalitách, ve kterých se termální voda využívá k lázeňským účelům, jsou již teploty nižší, tedy kolem 30°C . [14] [20]

Na většině území však termální prameny ani těchto teplot nenajdeme. Ostatní minerální prameny v našich podmínkách mají teploty do 20°C . Jejich tepelný potenciál proto můžeme využít pouze prostřednictvím tepelných čerpadel. [20]



Obr. 21 Mapa tepelného toku ČR podle proměnné tepelné vodivosti hornin, rozsah stupnice je od 25 do 120 mW/m^2 [29]

6.1 Nízkopotenciální a středněpotenciální energie pro přímé využití tepla

Přímé využití geotermální energie na území České republiky je tedy ve větším měřítku dost omezené. K vytápění nebo ohřevu teplé užitkové vody lze použít geotermální vody o teplotách 50 °C a víc. K tomu slouží pouhý rekuperační výměník. Většina zdrojů geotermálních vod v ČR v dostupných hloubkách má ale příliš nízké teploty (Průměrně se uvádí 25 – 35 °C) a není tedy přirozeně vhodná pro energetické účely. Proto se u nás počítá především s využitím tepelných čerpadel podle mechanismů popsanych v předchozích kapitolách. Je třeba uvést také možnost využití geotermálních vod, čerpaných v činných dolech, které se u nás nacházejí. U této aplikace je výhodné, že v dole se udržuje stálá teplota i v zimě. Předpokládá se, že zhruba 50 % potenciálu geotermálního tepla bude využito centrálními systémy a 50 % v individuálních aplikacích [30].

Na druhé straně výhodou vod na území našeho státu je poměrně nízký obsah solí v této vodě, čímž i odpadá nutnost reinjektáže. Je tedy možnost využít je po úpravě jako pitnou vodu. [30]

Přestože potenciál pro tento zdroj energie v České republice existuje, využití nízkoteplotních zdrojů dosud zaostává za úrovní v okolních západoevropských státech, kde je v chodu několik set tisíc tepelných čerpadel, zatímco u nás jen cca 12 tisíc s průměrnou hodnotou 10 kW, které představují potenciál 1,2 MW.[31]

Co se týče využití středně teplých hydrotermálních zdrojů energie pro vytápění i tomto zaostáváme za jinými státy. Zatímco v zemích Západní Evropy je již realizováno velké množství geotermálních výtopen měst, či průmyslových objektů, v České republice funguje zatím jen jediná významnější instalace v Děčíně. Tady se uskutečnil zatím největší projekt na využití hydrotermální energie u nás – teplárna s vrtem do hloubky 550 m. Vrtem vytéká na povrch přirozeným přetlakem z rozsáhlého podzemního jezera voda o teplotě asi 30 °C. Vydatnost je asi 54 l/s. Protože teplota této vody je příliš nízká pro přímé vytápění, jsou zde použita tepelná čerpadla. Ta se umožní předehřátí doplňovací vody v topném potrubí z 55 °C na asi 72 °C. Elektřina pro pohon tepelných čerpadel se vyrábí kogeneračních motorech spalujících uhlí. Odpadní teplo z těchto generátorů se pak použije k ohřevu vody na 90 °C. Systém je ještě doplněn dvěma plynovými kotli, které zabezpečí ohřev vody na teplotu 110 °C, která se požaduje pro distribuci do sítě. Kotle jsou navrženy tak, aby sloužily nezávisle jako záložní zdroj pro pokrytí celkové spotřeby při výpadku tepelných čerpadel, či motorů, nebo při špičkovém odběru. Díky své dobré kvalitě je voda z podzemního jezera po ochlazení v TČ cca na 10 °C a úpravě odvedena do vodojemu a dodávána do městské vodovodní sítě, jako voda pitná (v objemu přibližně 1 milion m³ za rok). Náklady pro zbudování projektu se vyšplhaly něco přes 550 milionů Kč. Roční množství vyprodukovaného tepla ze zdroje je asi 250 – 260 TJ. Asi 45 % pochází z geotermálního tepla zdroje. Použití hydrotermálního zdroje pro vytápění vedlo také k mnohem nižší spotřebě CO₂, protože nahradilo předchozí výtopen na zemní plyn. Uvádí se že roční úspora vyprodukovaného množství CO₂ je 10 000 tun. [32]

6.2 Využití vysokopotenciální energie a výroba elektřiny v ČR

Zatímco ve světě se používají k výrobě elektřiny hlavně hydro-geotermální systémy, u nás pro ně nejsou příliš vhodné geologické podmínky. Co se týče výroby elektřiny z geotermálních zdrojů, v ČR se uvažuje využití metody Hot-Dry-Rock, tedy tepla suchých hornin [2].

Výhodou je, že technologii pro výrobu elektrické energie metodou HDR znají i české firmy. Jedná se např. o systém ORC, původně vyvinutý právě pro geotermální aplikace, který se u nás používá při výrobě elektřiny z biomasy. Potřebnou vrtací techniku mohou naopak dodat např. Moravské naftové doly. [2]

Úvahy o možnostech geotermálních projektů v ČR zahrnují předpokládaný standardní teplotní gradient 30 K/km a hloubky vrtů okolo 5 km. Z toho plyne, že se uvažuje s pracovní teplotou média 150 °C. Předpokládaný průtok je asi 150 l/s. Takto vytěžená tekutina se dá použít, jak pro produkci tepla na vytápění, tak k výrobě elektřiny. V našich podmínkách ale nejde geotermální tekutinu získanou z vrtů použít jako pracovní médium v elektrárně, protože má pro klasický Rankin-Clausiusův cyklus nevhodné parametry. Proto přichází v úvahu aplikace binárních systémů (ORC, nebo Kalinův cyklus), které lépe využijí energetický potenciál geotermální tekutiny. [2]

Na území našeho státu lze podle četných studií najít minimálně 60 vhodných lokalit pro výrobu elektřiny s celkovým výkonem cca 250 MW a tepelné energie dokonce 2000 MW. Tomu odpovídá roční výroba 2 TWh elektřiny a 4 TWh tepla pro vytápění [2].

Pro vzdálenější budoucnost se dokonce předpokládá s možností zbudování elektráren o celkovém výkonu až 3 200 MW a roční výrobou asi 26 TWh s poměrně rovnoměrným rozmístěním po republice [2]. To jsou zatím ale jen úvahy.

V minulosti bylo na území ČR provedeno mnoho hlubokých vrtů sloužících ke geologickému průzkumu při hledání ložisek fosilních a jaderných paliv, tedy uhlí, ropy, zemního plynu a uranu. K nejhlubším vrtům v ČR patří Jablůnka-1 s hloubkou 6 506 m. Technicky reálné je (s dobrým vybavením) uskutečnit vrt hloubky až 8 km. Dnes je na území státu vyvrtáno přibližně 2000 vrtů s hloubkou přes 1 km. Vrty jsou rozmístěny velice nepravidelně. [2]

6.2.1 Geotermální projekt Litoměřice

Jde o nejrozsáhlejší a nejpropracovanější projekt na využití geotermální energie v České Republice. Zatím je to také projekt ojedinělý.

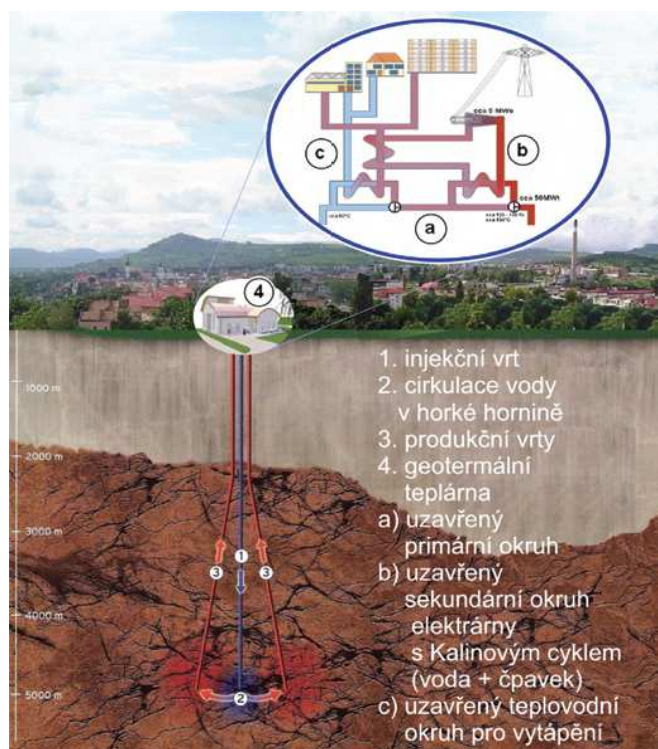
Město Litoměřice se nachází v oblasti, kde jsou pro aplikaci HDR poměrně vhodné podmínky. Leží totiž v místě křížení dvou velkých tektonických zlomů v ČR (zlom podkrušnohorský a zlom ležící v ose řeky Ohře). Na naše poměry geologicky aktivní ráz oblasti je patrný i z okolí města. Hned za ním se zvedají kopce Českého středohoří, které jsou sopečného původu. V blízkém okolí Litoměřic bylo v nedávné době provedeno několik menších vrtů. Z těch se získaly údaje o složení hornin, včetně měření teploty. Vrtání bylo vždy ukončeno, když vrt dosáhl úrovně žulové horniny. Zatím tedy není známý teplotní gradient v žulovém masivu. Více má zjistit komplexní geofyzikální průzkum, a také průzkumný vrt, který právě probíhá. Vrt má skončit v hloubce 2 500 metrů (tj. v polovině předpokládané celkové hloubky vrtu). V této hloubce se pak provedou všechny náležitá měření a testy, jako fyzikální analýzy, laboratorní zkoušky a seizmická měření. Jejich výsledky se porovnají s hodnotami naměřenými na povrchu.

Současný návrh celého projektu počítá s vyvrtáním 3 vrtů (jeden injekční a dva produční) hloubek přibližně 5 km. Počítá se se získáním média o teplotě asi 150 °C a průtocích až 140 l/s. Při ochlazení na 70 °C bude výrobní výkon cca 50 – 55 MW. Návrh projektu počítá s výrobou jak elektřiny, tak tepla. Při předpokládané účinnosti Kalinova cyklu 12 % by elektrárna dosáhla výkonu asi 5 MW. Na výstupu tepelného výměníku bychom pak dostali vodu o teplotě 70 °C pro vytápění. Není vyloučeno ani použití technologie ORC). [2] [33]

Výkon elektrárny sice není příliš velký, ale i tak stačí na to, aby elektrárna zásobovala částečně město s téměř 30 tisíci obyvateli, jako Litoměřice. Navíc teplo na vytápění je potřebné jen v zimě. Poměr produkce tepla a elektřiny se tedy bude během roku měnit.

Investiční náklady se předpokládají v rozsahu 1,1 mld. Kč, když nezahrneme horkovodní rozvody. Největší část nákladů tvoří opět cena vrtu. Především jsou to vrtné hlavice, které se kvůli velkému opotřebení musí vyměnit po 100 metrech vrtání. Jejich cena je přitom 0,5 milionu. Předpokládané dokončení elektrárny je stanoveno na rok 2010, nejpozději 2013.

Úspěch celého projektu závisí na několika podstatných okolnostech. Jednak se nejprve musí potvrdit teoretické úvahy. Systém nesmí mít velké tepelné ztráty. Kromě tepelné a elektrické energie jsou možné také některé další varianty využití jako rekreační centrum s bazénem, nebo vyhřívání silnic a vytápění skleníků. [33]



Obr. 22 Schéma projektu využití metody HDR v Litoměřicích [33]

7 Závěr

Možností pro využití geotermální energie je celá řada. V práci se proto čtenář seznamuje s těmi základními a nejvíce používanými.

Geotermální energie vzniká především v zemském jádře jako energie uvolněná srážkami těles při vzniku Země. Je tedy vlastně nejstarším druhem energie na naší planetě. K povrchu se dostává prouděním roztavené horniny v plášti a vedením v zemské kůře. Zdroje geotermální energie můžeme rozdělit na dvě základní skupiny: suché a mokré. Větší tradici má využívání mokrých zdrojů geotermální energie – hydro-geotermálních systémů. Jejich potenciál je však omezen na vhodné oblasti. Budoucnost má využití tepla suchých hornin. Jedná se především o metodu Hor-Dry-Rock. Se zavedením této metody se začalo v 70. letech minulého století v souvislosti s ropnou krizí, kdy se začaly hledat nové zdroje energie jako alternativa k převládajícím fosilním palivům. Teplo suchých hornin má mnohem větší potenciál než hydro-geotermální zdroje. Bývá však nákladnější a složitěji využitelné. Aplikace můžeme rozdělit na přímé a nepřímé využití. K přímému využití tepla se řadí zásobování teplem, ohřev tepelné vody, různé lázeňské, zemědělské a průmyslové aplikace, ale také využití tzv. nízkopotenciálního tepla tepelnými čerpadly. Nepřímým využitím můžeme nazvat výrobu elektřiny. V závěru kapitoly je stručně shrnuta ekonomika provozu i ekologické následky aplikace produkce geotermální energie.

V další části se práce podrobněji zabývá realizovanými systémy zásobování teplem. Ty můžeme rozdělit na několik částí. Proces získávání tepla začíná v geotermálním vrtu. Na jeho provedení bude záviset také účinnost zařízení. Navíc vrt a sním spojený výzkum představuje největší část nákladů pro zbudování celého zařízení. Proto je vrtům věnována velká pozornost. Z vrtů se teplo obsažené v geotermální tekutině čerpá do budovy teplárny. Tady probíhá vlastní výměna tepla. Geotermální teplárna musí být velice dobře navržena, aby mohla efektivně dodávat teplo. Poslední částí toku energie je rozvodný systém, který dodává teplo ke konečné spotřebě.

V další kapitole je pojednáno o možnostech využití geotermální energie při výrobě elektřiny. Nejprve je pozornost věnována geotermálním zdrojům ve vztahu k výrobě této energie. Podobně jako v systémech zásobování teplem i geotermální elektrárnu můžeme rozdělit na část podzemní, kde se realizuje čerpání teplonosného média na povrch, a nadzemní, tedy vlastní geotermální elektrárnu produkující elektřinu. Podle vlastností tekutiny, kterou ze zdroje získáme bude i vypadat proces výroby elektřiny. Rozlišujeme systémy využívající suchou, nebo mokrou páru, nebo systémy binární.

Dále se pozornost obrací k využití geotermální energie pomocí tepelných čerpadel. Ta umožňují využít i zdroje o příliš nízkých teplotách, které bychom jinak zužitkovat nedokázali. Je vysvětlen i samotný princip čerpání tepla. Tepelných čerpadel je řada druhů. Geotermální energii využívají pouze některé a to ještě většinou jen částečně.

Poslední kapitola se zaměřuje na využití energie zemského nitra v podmínkách České republiky. Její použití je však spíše okrajové ve srovnání s jinými druhy energie, protože k němu nejsou geologicky vhodné podmínky.

Geotermální energie je dnes jednou z nejrychleji se rozvíjejících oblastí tzv. obnovitelných zdrojů energie. Její rostoucí význam spočívá v ekonomicky i ekologicky vhodném nahrazení stále převládajícího spalování fosilních paliv. Navíc, na rozdíl od ostatních obnovitelných energií, je geotermální energie zdroj stálý a nezávislý na sezónních podmínkách. Dostupnost zdrojů geotermálního tepla se stále zlepšuje díky rozvoji v oblasti výzkumu a ovládnutím nových technologií. Ty umožňují využívat i zdroje tepla, které byly v minulosti nepřístupné a tím i snížit nákladnost použití, která bránila jejímu výraznějšímu využití. Geotermální energie se proto stává významnou alternativou dalším zdrojům energie a do budoucna má nezanedbatelný potenciál.

Literatura

- [1] FRIDLEIFSSON, Ingvar B., et al. The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. In *IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources, Luebeck, Germany, 20-25 January 2008* [online]. 2008 [cit. 2009-4-21]. Dostupné z: <http://iga.igg.cnr.it/documenti/IGA/Fridleifsson_et_al_IPCC_Geothermal_paper_2008.pdf>
- [2] MOTLÍK, Jan et al. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR* [online]. Praha: ČEZ, a. s., 2007 [cit. 2009-4-21], *Elektrina z geotermální energie*, s. 147-150. Dostupné z: <<http://www.cez.cz/edee/content/file/o-spolecnosti/oze-cr-all-17-01-obalka-in.pdf>>
- [3] *Geotermální energie* [online]. [2000-] [cit. 2009-5-20]. Dostupné z: <<http://www.spvez.cz/pages/geoterm.htm>>
- [4] *Geotermální energie* [online]. [2000-] [cit. 2009-5-14]. Dostupné z: <<http://sf.zcu.cz/rocnik07/cislomm/1-5def.html>>
- [5] LUND, John W. , FREESTON, Derek H. , BOYD, Tonya L. Direct application of geothermal energy: 2005 Worldwide review. *Geothermics* [online]. 2005, vol. 34, is. 6 [cit. 2009-05-12], s. 691-727. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/>>. ISSN 0375-6505.
- [6] BERTANI Ruggero. World geothermal power generation in the period 2001–2005. *Geothermics* [online]. 2005, vol. 34, is. 6 [cit. 2009-05-12], s. 651-690. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/>>. ISSN 0375-6505
- [7] BERTANI Ruggero. *World Geothermal Generation in 2007* [online]. September 2007 [cit. 2009-05-12]. Dostupné z: <<http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull28-3/art3.pdf>>
- [8] LUND, John W. Characteristics, *Development and Utilisation of Geothermal Recourses* [online]. June 2007 [cit. 2009-05-12]. Dostupné z: <<http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull28-2/art1.pdf>>
- [9] *Geothermal Technologies Program: Geothermal Basics* [online]. 10/3/2008 [cit. 2009-05-15]. Dostupné z: <http://www1.eere.energy.gov/geothermal/geothermal_basics.html>
- [10] TESTER, Jefferson W., et al. *The Future of Geothermal Energy : Impact of Enhanced Geothermal Systems (Egs) on the United States in the 21st Century: An Assessment*. [online]. Massachusetts Institute of Technology, c2006. 372 s. [cit. 2009-05-26]. Dostupné z: <http://geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdf>. ISBN 0-615-13438-6.
- [11] *Geothermal Technologies Program: Geothermal FAQs* [online]. 01/13/2006 [cit. 2009-05-13]. Dostupné z: <<http://www.eere.energy.gov/geothermal/faqs.html>>

- [12] KALTSHMITT , Martin, STREICHER , Wolfgang, WIESE , Andreas. *Renewable Energy* [online]. Springer Berlin Heidelberg, c2007 [cit. 2009-04-21]. Utilisation of Geothermal Energy, s. 437-496.
Dostupné z: <<http://www.springerlink.com/content/g656n20k43871413/?p=2bb76627defc452787dc142833ed89cf&pi=12>>. ISBN 978-3-540-709
- [13] MYSLIL, Vlastimil, et al. Geotermální energie : Ekologická energie z hlubin Země – současné možnosti využívání. *Planeta* [online]. 2007, roč. 15, č. 4 [cit. 2009-05-21], s. 1-32.
Dostupné z: <[http://www.env.cz/osv/edice.nsf/4BE8C2DA7BE810F6C125725900456E0A/\\$file/planeta4_korektura3.pdf](http://www.env.cz/osv/edice.nsf/4BE8C2DA7BE810F6C125725900456E0A/$file/planeta4_korektura3.pdf)>. ISSN 1801-6898
- [14] BROŽ Karel, ŠOUREK, Bořivoj. *Alternativní zdroje energie*, 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. 213 s. ISBN 80-01-02802-X.
- [15] CENEK, Miroslav. *Obnovitelné zdroje energie*, 2. upr., dopl. vyd. Praha: FCC Public, 2001. 208 s. ISBN 80-901985-8-9
- [16] BUJOK, Petr et al. *Studie odezvy horninového masivu pro instalace tepelných čerpadel* [online]. 2005 [cit. 2009-05-22].
Dostupné z: <<http://www.mpo-efekt.cz/dokument/5136.pdf>>
- [17] *Tepelná čerpadla* [online]. [2000-] [cit. 2009-5-22].
Dostupné z: <<http://sf.zcu.cz/rocnik07/cislomm/2-10def.html>>
- [18] RYBACH, Ladislaus, et al. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europ. *Geothermics* [online]. 2003, vol. 32, is. 4-6 [cit. 2009-05-22], s. 579-588 . Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/>>. ISSN 0375-6505.
- [19] *Geothermal Technologies Program: Geothermal Power Plants — Minimizing Land Use and Impact* [online]. 1/17/2006 [cit. 2009-05-27].
Dostupné z: <http://www1.eere.energy.gov/geothermal/geopower_landuse.html>
- [20] ZLATAREVA, Veneta. *Tepelná čerpadla* [online]. 2008 [cit. 2009-05-22].
Dostupné z: <<http://www.mpo-efekt.cz/dokument/1185.pdf>>
- [21] BERANOVSKÝ, Jiří, et al. *EkoWATT Centrum pro obnovitelné zdroje a úspory energie* [online]. c2007 [cit. 2009-05-24].
Dostupné z: <<http://www.ekowatt.cz/en/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-prostredi-geotermalni-energie-tepelna-cerpadla>>
- [22] TRNOBRANSKÝ, Karel, et al. *Využití a efektivnost tepelných čerpadel v klimatických podmínkách ČR* [online]. 2006 [cit. 2009-05-22].
Dostupné z: <<http://www.mpo-efekt.cz/dokument/25.pdf>>
- [23] RYŠKA, Jiří. *Vrty do horninového masivu - zdroj energie pro tepelná čerpadla (III) - TZB-info* [online]. 8.11.2006 [cit. 2009-5-26].
Dostupné z: <<http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3658&h=280&pl=49>>

- [24] RYŠKA, Jiří. *Vrty do horninového masivu - zdroj energie pro tepelná čerpadla (V) - TZB-info* [online]. 13.11.2006 [cit. 2009-5-26].
Dostupné z: <<http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3665&h=280&pl=49>>
- [25] RYŠKA, Jiří. *Vrty do horninového masivu - zdroj energie pro tepelná čerpadla (VIII) - TZB-info* [online]. 4.12.2006 [cit. 2009-5-26].
Dostupné z: <<http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3735&h=280&pl=49>>
- [26] RYŠKA, Jiří. *Vrty do horninového masivu - zdroj energie pro tepelná čerpadla (IX) - TZB-info* [online]. 8.1.2007 [cit. 2009-5-26].
Dostupné z: <<http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3802>>
- [27] *Geothermal Technologies Program: Geothermal Heat Pumps* [online]. 3/20/2009 [cit. 2009-05-24]. Dostupné z: <<http://www1.eere.energy.gov/geothermal/heatpumps.html>>
- [28] *Geothermal electricity - Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 15.2.2009 [cit. 2009-05-12]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Geothermal_hotspots.JPG#file>
- [29] MYSLIL, Vlastimil, STIBITZ, Michal, FRYDRYCH, Václav. *Potenciál využití geotermální energie v České republice* [online]. c2003 [cit. 2009-5-26].
Dostupné z: <<http://www.aea.cz/?download=3konference/2-blok/potencial-vyuziti-geotermalni-energie.pdf>>
- [30] *Czech RE Agency - Energie prostředí, geotermální energie a tepelná čerpadla* [online]. c2003-2007 [cit. 2009-05-24].
Dostupné z: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/geotermika>>
- [31] MYSLIL, Vlastimil. *Zájem o využívání geotermální energie roste - TZB-info* [online]. 27.4.2009 [cit. 2009-5-26].
Dostupné z: <<http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=5589>>
- [32] *Užití geotermální energie ve městě Děčín* [online]. [2005] [cit. 2009-05-21].
Dostupné z: <http://www.ruse-europe.org/IMG/pdf/Decin_CZ.pdf>
- [33] TÁBORSKÝ, Jan. *Metoda hot dry rock v Litoměřicích. Časopis stavebnictví* [online]. c2007, roč. 2007, č. 02/07 [cit. 2009-05-22].
Dostupné z: <<http://www.casopisstavebnictvi.cz/archiv.php?detail=82&arch=5>>
- [34] ŠTĚTINA, Josef. *Oběhy tepelných elektráren* [online]. říjen 2008 [cit. 2009-05-27].
Dostupné z: <<https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=52009>>
- [35] *Nesjavellir - Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 27.3.2009 [cit. 2009-05-27].
Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:NesjavellirPowerPlant_edit2.jpg>