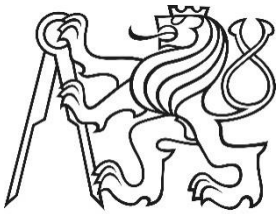
České vysoké učení technické

Fakulta strojní

Ústav energetiky 12115



# Využití geotermální energie v Evropě

# Geothermal Energy Use in Europe

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Michal Kolovratník, CSc.

**Miroslav Donoval**

*Praha 2017*

## Anotační list

| | |
|---|---|
| **Jméno autora:** | Miroslav Donoval |
| **Název BP/DP:** | Využití geotermální energie v Evropě |
| **Anglický název:** | Geothermal Energy Use in Europe |
| **Akademický rok:** | 2016/2017 |
| **Ústav/Odbor:** | Ústav energetiky/Energetika |
| **Vedoucí BP/DP:** | doc. Ing. Michal Kolovratník, CSc. |
| **Konzultant:** | |
| **Bibliografické údaje:** | Počet stran: 55<br>Počet obrázků: 25<br>Počet tabulek: 29<br>Počet příloh: 0 |
| **Klíčová slova:** | Geotermální energie, geotermální elektrárna, SFS, DFS |
| **Keyword:** | Geothermal energy, geothermal power plant, SFS, DFS |


**Anotace:** V první polovině se tato práce zaměří na základní problematiku geotermální energetiky, tedy zdroje geotermální energie a technologie, které se v tomto odvětví využívají. V druhé polovině je práce pojata především jako studie geotermálního potenciálu a aktuálního stavu využití geotermální energie v Evropě. Ve své poslední části má tato práce za cíl ukázat způsob přepočtu tepelných schémat pro SFS a DFS systémy a jejich vzájemné porovnání.

**Abstract:** In the first part, this work deals with the basic issues of the geothermal energetics, which includes the geothermal resources and common technologies used in this area. The second part of this work focuses on Europe and its geothermal potential and the actual use of the geothermal energy. At the end of this work, there are basic calculations for chosen geothermal power plants, which uses SFS and DFS technologies.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Donoval** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **437297**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Využití geotermální energie v Evropě**

Název bakalářské práce anglicky:

**Geothermal Energy Use in Europe**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je zpracovat ucelený přehled geotermálních elektráren (GTE) v Evropě s uvedením typu technologie, parametrů zdroje, technických a provozních dat.
Práce bude obsahovat:
- stručnou rešerši využívání geotermální energie pro výrobu elektřiny v Evropě,
- přehled stávajících GTE v Evropě - aktuální stav/projekty/výhled,
- základní přepočet tepelných schémat vybraných evropských GTE s technologií single a double flash.

Seznam doporučené literatury:

DiPippo, R.: Geothermal Power Plants (3th or 4th Edition)
2015 JRC Geothermal Energy Status Report

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Michal Kolovratník CSc., ústav energetiky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **02.06.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2018**

| Podpis vedoucí(ho) práce | Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry | Podpis děkana(ky) |
|---|---|---|

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

| Datum převzetí zadání | Podpis studenta |
|---|---|


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

# Prohlášení

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

V Praze dne 28. 5. 2017 …….

Miroslav Donoval

# Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Michalu Kolovratníkovi, CSc. za vstřícný přístup, za čas, který mi věnoval a za veškeré cenné rady, které mi umožnily dokončit mou práci.

# Obsah

**Seznam obrázku** ..... 8
**Seznam tabulek** ..... 9
**Seznam zkratek** ..... 10
**1. Úvod** ..... 11
**2. Fyzikální charakteristika tepla, tepelný tok, tepelný gradient a geotermický stupeň** ..... 12
**2.1 Teplo** ..... 12
**3.2 Přenos tepla** ..... 12
**3.2.1 Přenos tepla vodou** ..... 12
**3.2.2 Přenos tepla plynem** ..... 13
**3.3 Geotermický stupeň a tepelný gradient** ..... 13
**3.4 Tepelný tok** ..... 13
**4. Zdroje geotermální energie** ..... 14
**4.1 Aktivní geotermální oblasti** ..... 15
**4.2 Hydrotermální zdroje** ..... 15
**4.3 HDR** ..... 16
**4.4 Zemský tlak** ..... 17
**4.5 Energie magmatu** ..... 17
**4.6 Hlubinné hydrotermální zdroje** ..... 17
**5. Technologie v geotermální energetice** ..... 18
**5.1 Technologie Single-Flash Steam** ..... 18
**5.2 Technologie Double-Flash Steam** ..... 19
**5.3 Technologie Binary Cycle** ..... 20
**5.4 Technologie Dry Steam** ..... 21
**6. Potenciál využití geotermální energie v Evropě** ..... 22
**6.1 Využití geotermální energie v Itálii** ..... 23
**6.2 Využití geotermální energie na Islandu** ..... 24
**6.3 Využití geotermální energie v Turecku** ..... 25
**6.4 Využití geotermální energie v Portugalsku** ..... 26
**6.5 Využití geotermální energie ve Francii** ..... 27
**6.6 Využití geotermální energie v Rakousku** ..... 27
**7. Využití geotermální energie v Německu** ..... 28
**7.1 Geotermální zdroje Německa** ..... 28
**7.2 Oblasti s výskytem geotermální zdrojů** ..... 29
**7.2.1 Severoněmecká pánev** ..... 29

**7.2.2 Pánev Molasse** ..... 30
**7.2.3 Hornorýnská nížina** ..... 30
**7.3 Geotermální zařízení na území Německa** ..... 31
**7.3.1 Geotermální teplárny na území Německa** ..... 31
**7.3.2 Geotermální elektrárny na území Německa** ..... 33
**7.3.3 Shrnutí aktuálního stavu geotermálních elektráren a tepláren v Německu** ..... 35
**8. Budoucnost geotermální energetiky v Evropě** ..... 36
**9. Vstupní parametry pro výpočtovou část** ..... 39
**9.1 Geotermální elektrárna Reykjanes** ..... 39
**9.2 Geotermální teplárna Nesjavellir** ..... 39
**9.3 Geotermální elektrárna Krafla** ..... 40
**9.4 Geotermální elektrárna Germencik** ..... 40
**10. Výpočtová část** ..... 41
**10.1 Seznam rovnic pro přepočet systému SFS** ..... 41
**10.2 Seznam rovnic pro přepočet systému DFS** ..... 42
**10.3 Termodynamická účinnost turbíny - $\eta T$ [%]** ..... 43
**10.4 Účinnost generátoru - $\eta G$ [%]** ..... 43
**10.5 Bilanční přepočet GTE Reykjanes** ..... 44
**10.5.1 Přepočet GTE Reykjanes v případě použití SFS technologie** ..... 44
**10.5.2 Přepočet GTE Reykjanes v případě použití DFS technologie** ..... 44
**10.5.3 Srovnání bilančních přepočtů SFS a DFS pro GTE Reykjanes** ..... 45
**10.6 Bilanční přepočet pro GTE Nesjavellir** ..... 45
**10.6.1 Přepočet GTE Nesjavellir v případě použití SFS technologie** ..... 46
**10.6.2 Přepočet GTE Nesjavellir v případě použití DFS technologie** ..... 46
**10.6.3 Srovnání bilančních přepočtů SFS a DFS pro GTE Nesjavellir** ..... 47
**10.7 Bilanční přepočet pro GTE Krafla** ..... 47
**10.7.1 Přepočet GTE Krafla v případě použití SFS technologie** ..... 47
**10.7.2 Přepočet GTE Krafla v případě použití DFS technologie** ..... 48
**10.7.3 Srovnání bilančních přepočtů SFS a DFS pro GTE Krafla** ..... 48
**10.8 Bilanční přepočet pro GTE Germencik** ..... 49
**10.8.1 Přepočet GTE Germencik v případě použití SFS technologie** ..... 49
**10.8.2 Přepočet GTE Germencik v případě použití DFS technologie** ..... 49
**10.8.3 Srovnání bilančních přepočtů SFS a DFS pro GTE Germencik** ..... 50
**11. Závěr** ..... 51
**Bibliografie** ..... 52

# Seznam obrázku

Obr. 4-1: Složení Země, rozdělení vrstev dle teploty a hloubky [7]
Obr. 4-2: Popis vzájemných pohybů litosférických desek [1]
Obr. 4-3: Schéma cyklu – hydrotermální zdroj [1]
Obr. 4-1: Geopressure – schéma procesu [1]
Obr. 5-1: Schéma zařízení využívající Single-Flash Steam [1; 13]
Obr. 5-2: T-s diagram Single-Flash Steam systému [1; 13]
Obr. 5-3: Schéma zařízení využívající technologii Double-Flash Steam [1; 13]
Obr. 5-4: T-s diagram Double-Flash Steam systému [1; 13]
Obr. 5-5: Schéma zařízení využívající technologie BC [1; 13]
Obr. 5-6: T-s a p-h diagram systému s využitím BC [1; 13]
Obr. 5-7: T-s diagram systému s využitím technologie DS [1]
Obr. 6-1: Oblasti s potenciálem využití z hlediska geotermální energetiky [16]
Obr. 6-2: Mapa Evropy s vyznačenými instalovanými elektrickými výkony pro rok 2013 [16]
Obr. 6-3: Mapa geotermálních zařízení na Islandu včetně vývoje produkce elektrické energie v GWh za rok [23]
Obr. 7-1: Hydrotermální zdroje v Německu [19]
Obr. 7-2: Podpovrchové poruchy jako zdroj geotermální energie v Německu [18]
Obr. 7-3: Krystalické horniny v Německu jako zdroj geotermální energie [18]
Obr. 7-4: Časový vývoj roční produkce elektrické energie z geotermálních elektráren a tepláren na území Německa [20]
Obr. 8-1: Instalovaná kapacita elektrický výkonu [MW] v jednotlivých zemích. Srovnání roku 2015 a předpokladu v roce 2019. [14]
Obr. 8-2: Graf shrnující geotermální zařízení v provozu, ve výstavbě a ve fázi plánování. [14]
Obr. 8-3: Časový průběh výstavby zařízení využívajícího geotermální energii [14]
Obr. 10-1 (Vpravo): Graf závislosti elektrického GTE Reykjanes na tlaku $p_2$ při použití SFS
Obr. 10-2: Graf závislosti elektrického výkonu elektrárny Reykjanes na tlaku $p_6$ při optimálním tlaku $p_2$ za použití DFS technologie
Obr. 10-3 (Vpravo):Graf závislosti elektrického výkonu GTE Nesjavellir na tlaku $p_2$ při použití SFS
Obr. 10-4: Graf závislosti elektrického výkonu GTE Nesjavellir na tlaku $p_6$ při optimálním tlaku $p_2$ za použití DFS technologie
Obr. 10-5 (Vpravo): Graf závislosti elektrického GTE Krafla na tlaku $p_2$ při použití SFS
Obr. 10-6: Graf závislosti elektrického výkonu GTE Krafla na tlaku $p_6$ při optimálním tlaku $p_2$ za použití DFS technologie
Obr. 10-7 (Vpravo):Graf závislosti elektrického výkonu GTE Germencik na tlaku $p_2$ při použití SFS
Obr. 10-8: Graf závislosti elektrického výkonu GTE Germencik na tlaku $p_6$ při optimálním tlaku $p_2$ za použití DFS technologie

# Seznam tabulek

Tab. 4-1: Radioaktivní prvky obsažené v běžných horninách v zemské kůře [1]
Tab. 6-1: Shrnutí a charakterizace geotermálních zařízení v oblasti Travale/Radicondoli [21]
Tab. 6-2: Shrnutí a charakterizace geotermálních zařízení v oblasti Larderello [21]
Tab. 6-3: Shrnutí a charakterizace geotermálních zařízení v oblasti Mount Amiata [21]
Tab. 6-4: Shrnutí a specifikace geotermálních zařízení na Islandu [1; 13; 24; 25]
Tab. 6-5: Potenciálně vhodné geotermální oblasti na území Turecka [26]
Tab. 6-6: Shrnutí geotermálních zařízení na území Turecka a jejich specifikace [27]
Tab. 6-7: Shrnutí geotermální zařízení na území Portugalska a jejich specifikace [28]
Tab. 6-8: Shrnutí geotermální zařízení na území Francie a jejich specifikace [29]
Tab. 6-9: Shrnutí geotermálních tepláren na území Rakouska [30]
Tab. 7-3: Shrnutí geotermálních tepláren na území Německa [18; 20]
Tab. 7-4: Shrnutí geotermálních elektráren na území Německa. Seřazeno dle instalovaného elektrického výkonu [18; 20]
Tab. 7-5: Přehled aktuálního instalovaného elektrického výkonu geotermálních elektráren a tepláren na území Německa [20]
Tab. 8-1: Shrnutí scénářů pro rok 2020, 2030 a 2050 z hlediska roční produkce elektrické energie v TWh pro plánované nově vystavěné geotermální elektárny [31]
Tab. 9-1: Parametry geotermální elektrárny Reykjanes [13; 33]
Tab. 9-2: Parametry geotermální teplárny Nesjavellir [1]
Tab. 9-3: Parametry geotermální elektrárny Krafla [32; 34; 35]
Tab. 9-4: Parametry geotermální elektrárny Germencik [1]
Tab. 10-1 (Vlevo): Shrnutí vypočtených hodnot GTE Reykjanes při použití SFS technologie
Tab. 10-2: Shrnutí vypočtených hodnot GTE Reykjanes při použití DFS technologie
Tab. 10-3 (Vlevo): Shrnutí vypočtených hodnot GTE Nesjavellir při použití SFS
Tab. 10-4: Shrnutí vypočtených hodnot GTE Nesjavellir při použití DFS technologie
Tab. 10-5 (Vlevo): Shrnutí vypočtených hodnot GTE Krafla při použití SFS technologie
Tab. 10-6: Shrnutí vypočtených hodnot GTE Krafla při použití DFS technologie
Tab. 10-7 (Vlevo): Shrnutí vypočtených hodnot GTE Germencik při použití SFS
Tab. 10-8: Shrnutí vypočtených hodnot GTE Germencik při použití DFS technologie

# Seznam zkratek

HDR – Hot Dry Rock

SFS – Single Flash Steam

DFS – Double Flash Steam

FS – Flash Steam

BC – Binary Cycle

DS – Dry steam

NREAP – National Renewable Energy Action Plans

KC – Kalinův cyklus

ORC – Organic Rankine Cycle

NGB – The North German Basin

EEG – Renewable Energy Act

N/A – Neznámá hodnota

GTE – Geotermální elektrárna

# 1. Úvod

Geotermální energii – energii Země – můžeme najít kdekoliv na světě. Avšak přirozené vysokoteplotní zdroje, které mají největší potenciál využití v geotermálních elektrárnách, lze najít pouze v některých oblastech naší planety. Potenciál geotermální energie je obrovský. Udává se, že například v České republice je průměrný tepelný tok geotermální energie přibližně 62,8 $mW/m^2$, čemuž odpovídá přibližně 4952,8 $MW$, vztaženo na plochu České republiky. Země samotná koncentruje geotermální energii v určitých oblastech, typické jsou oblasti, kde hraničí tektonické desky v kůře planety, zde tato energie představuje příhodný zdroj pro využití při výrobě elektrické energie, či vytápění. [5; 9]

Ve své práci se zaměřuji na Evropu, na její síť geotermálních elektráren a na potenciálně vhodné oblasti pro využití geotermální energie v budoucnu. Většina zemí Evropy, vyjma Itálie, Islandu, nebo Turecka, nemá příliš vhodné přirozené podmínky z hlediska geotermální energetiky. I navzdory nepříznivým podmínkám, se některé státy o geotermální energii a její využití zajímají. Například Německo, které v současnosti stojí v čele zemí využívajících obnovitelné zdroje energie, má poměrně rozsáhlý program využití geotermální energie. Právě zmapování Německých plánu na výstavbu sítě geotermální elektráren, představuje jednu z částí této práce. V samém závěru práce se nachází bilanční přepočet tepelných schémat 4 vybraných geotermálních elektráren se systémy SFS a DFS. Cílem tohoto výpočtu je ověřit, jaký poměrný nárůst elektrického výkonu nastane při přechodu ze SFS na DFS.

# 2. Fyzikální charakteristika tepla, tepelný tok, tepelný gradient a geotermický stupeň

## 2.1 Teplo

Teplo lze chápat jako energetický projev pohybu částic hmoty, kde mírou těchto pohybů je kinetická energie. Tepelná energie je z fyzikálního hlediska v podstatě vlnění, kde dochází k neuspořádanému pohybu molekul, které proudí z míst teplejších do míst chladnějších. Čím je těleso teplejší, tím se jeho částice pohybují rychleji. Různé látky se při zahřívání chovají různě, hovoříme zde o takzvaném specifickém teplu. [5;8]

## 3.2 Přenos tepla

Podle fyzikálních zákonů proudí teplo z míst teplejších do míst chladnějších a ze zemského povrchu je tepelná energie vyzařována do atmosféry. Tepelná energie se v rámci geotermální energetiky šíří především dvěma způsoby. Prvním způsobem je kondukce[1], druhým je konvekce[2]. Kondukce spočívá ve vzájemném působení částic hmoty, kdy se částice s vyšší teplotou sráží s částicemi s nižší teplotou a dochází k tomu, že teplejší částice předávají chladnějším částicím část své kinetické energie a vlivem toho se chladnější těleso zahřívá. Tento jev trvá až do vyrovnání teplot obou těles. Konvekce probíhá při vzájemném pohybu dvou hmotných celků. V podstatě se jedná o přenos energie plynem, či kapalinou. Dochází k ní například vlivem rozdílu hustoty tekutiny, při jejím lokálním zahřívání. [5;8]

### 3.2.1 Přenos tepla vodou

Teplé vody lze dělit na dvě skupiny. První skupinou jsou vody meteorické, tedy vody, které mají svůj původ v atmosférických srážkách. Díky metodě izotopové geochemie bylo dokázáno, že většina teplé vody geotermálních systémů má původ právě meteorický. Druhou skupinou jsou vody juvenilní[3], které mají svůj původ v magmatu, z kterého při výstupu uniká voda a případně také pára. Uvažujeme-li oblast oceánského dna, zde oceánské vody po ohřátí v hloubce vystupují na povrch různými tektonickými poruchami, či na riftech oceánských hřbetů. [5]

[1] Princip šíření tepelné energie vedením
[2] Princip šíření tepelné energie prouděním
[3] Podzemní voda, která vzniká při výstupu magmatu

### 3.2.2 Přenos tepla plynem

Díky nejnovějším poznatkům mají v přenosu tepla také kromě vody svůj význam také plyny. Oxid uhličitý má různé vlastnosti v závislosti na tlaku a teplotě. V různých lokalitách byl V. Myslilem zkoumán tepelný tok stejných typů hornin a v místech s výstupem $CO_2$ byly hodnoty tepelných toků až dvojnásobné. [5]

## 3.3 Geotermický stupeň a tepelný gradient

Geotermický stupeň lze definovat jako počet metrů, se kterými se zvýší teplota o 1 $°C$. Při úvahách je nutné uvažovat tzv. neutrální pásmo, které se nachází blízko pod zemským povrchem a je ovlivněno vnějšími vlivy. Jako průměrná hodnota geotermického stupně se uvádí 33 m, platí tedy, že na 100 m hloubky se teplota zvýší přibližně o 3 $°C$. Růst teploty je však ovlivněn typem a vodivostí hornin nebo například prouděním podzemní vody. [8]

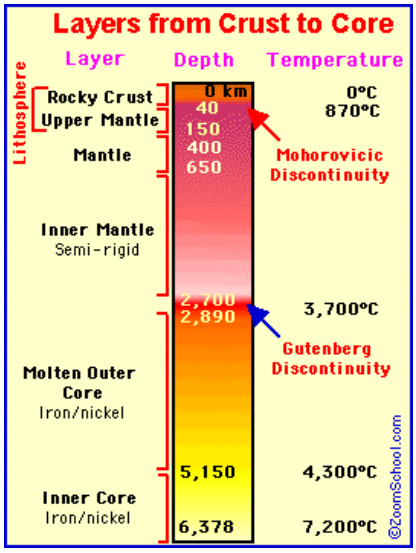
Tepelný gradient je vertikální gradient teploty v zemské kůře. Hodnota tepelného gradientu se pohybuje mezi 0,01-0,1 $°C$ na 1 m hloubky. Tepelný gradient je výrazně vyšší v oblastech vulkanicky aktivních nebo v riftových strukturách, oproti starým konsolidovaným oblastem. [8]

## 3.4 Tepelný tok

Tepelný tok lze charakterizovat jako množství tepla, které pronikne určitou plochou za jednotku času. Tepelný tok je v geotermice velice důležitým indikátorem, ať už v oblasti využití geotermální energie, tak i z hlediska geofyziky a geologie. Hodnotu tepelného toku společně s dalšími geologickými a geofyzikálními údaji lze využít pro studie hlubších pater zemské kůry v dané oblasti. Oblasti vhodné k využití z hlediska geotermální energie jsou především ty, které mají velký tepelný tok a je zde tedy předpoklad, že v relativně malých hloubkách pod povrchem jsou vysoké teploty. Na zemském povrchu jsou hodnoty tepelného toku v rozmezí 30-120 $mW/m^2$, průměrný tepelný tok na Zemi se udává 70 $mW/m^2$. Tyto hodnoty mohou být však mnohonásobně vyšší a to především v oblastech vulkanicky činných. [5]

# 4. Zdroje geotermální energie

Vznik Země se datuje do doby přibližně před 4,6 miliardami let, tehdy se však jednalo o nestálou a velmi žhavou planetu. Povrch naší planety se v průběhu vývoje Země ochlazoval a nově vzniklá zemská kůra tuhla postupně do větší hloubky. [3]




Země se skládá z jádra, jeho vnitřní a vnější části, z pláště, který je členěn na vnitřní, střední a vnější část, a nakonec ze zemské kůry. Všechny tyto části, jejich teploty a hloubky, do kterých sahají, jsou popsány na obr. 2. [7]

Obr. 4-1: Složení Země, rozdělení vrstev dle teploty a hloubky [7]

Zemské teplo vzniká především díky těmto procesům:

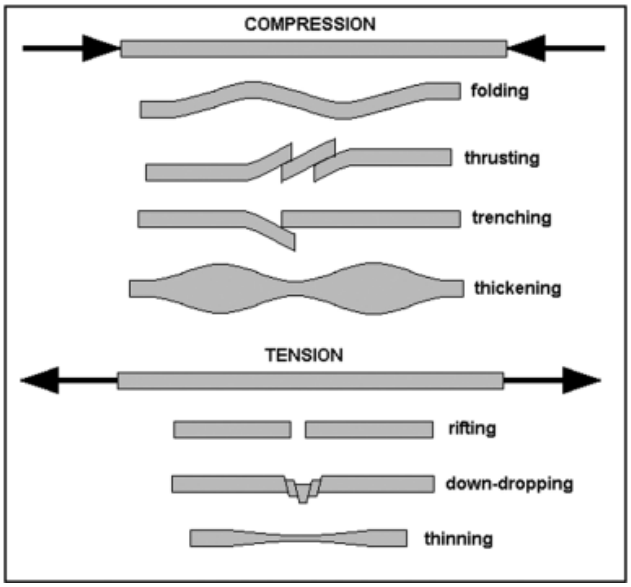
a) Rozpad radioaktivních prvků
   - Je hlavním zdrojem zemského tepla a také dalších nitrozemních procesů jako je například vulkanická činnost, či pohyb tektonických desek
   - V tab. 4-1 jsou zaznamenány radioaktivní prvky v běžných horninách zemské kůry
b) Sluneční záření
   - Je obrovským zdrojem tepelné energie, avšak ohřívá pouze zemský povrch
c) Původní teplo zemského tělesa
   - Teplo, které zbylo z kosmické etapy vzniku zemského tělesa
d) Tepelná energie vznikající přeměnou kinetické energie při pohybech v zemské kůře
e) Fyzikálněchemické endotermní reakce

| Rock | Concentration | | | Heat generation, $10^{-6}$ cal/g·yr | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | U, ppm | Th, ppm | K, % | U | Th | K |
| Granite | 4.7 | 20 | 3.4 | 3.4 | 4.0 | 0.9 |
| Basalt | 0.6 | 2.7 | 0.8 | 0.44 | 0.54 | 0.23 |
| Peridotite | 0.016 | 0.004 | 0.0012 | 0.012 | 0.001 | 0.0003 |

Tab. 4-1: Radioaktivní prvky obsažené v běžných horninách v zemské kůře [1]

## 4.1 Aktivní geotermální oblasti

Nejvyšší vrstvy zemského pláště a zemská kůra společně tvoří litosféru, která se skládá ze sedmi velkých a také několika menších litosférických desek. Litosférické desky na sebe působí silami a vzájemně se vůči sobě pohybují, tyto pohyby jsou popsány níže na obr. 4-2. [1]




Obr. 4-2: Popis vzájemných pohybů litosférických desek [1]

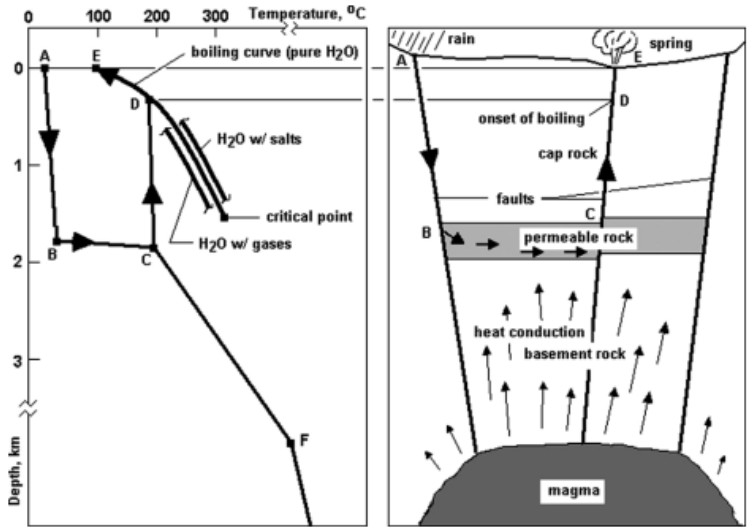
Oblasti, které se nachází na rozhraní litosférických desek, jsou ideální z hlediska využití geotermální energie. Díky pohybu litosférických desek, dochází v těchto oblastech k uvolnění obrovského množství energie a také k vyššímu výskytu vulkanické činnosti. V těchto oblastech lze objevit místa, kde se vysokoteplotní geotermální zdroje nachází ne příliš hluboko pod povrchem a lze je tedy efektivně využívat. [1]

## 4.2 Hydrotermální zdroje

K tomu, abychom mohli využívat hydrotermální zdroj[4] jako zdroj energie, musí oblast, v které se hydrotermální zdroj nachází, splňovat pět následujících podmínek: velký zdroj tepla, propustné podloží, zásoba vody, krycí nepropustná vrstva a spolehlivý, opakující se cyklus – přísun studené vody a její následný ohřev.

Na schématu uvedeném níže, je znázorněn cyklus, při kterém dochází k ohřevu studené vody a vzniku páry. Studená voda, která je přiváděna například prostřednictvím dešťů (bod A), se vsakuje do půdy a postupně se dostává do nižších vrstev, kde přichází do kontaktu se žhavými horninami. Propustná vrstva (bod B), která klade malý odpor průchodu vody, se vlivem ohřívající se vody stává méně hustou a dochází ke vzniku velké poruchy (bod C). Po vzniku poruchy tato vrstva šplhá vzhůru směrem k povrchu, při tomto procesu dochází k poklesu tlaku a následnému dosažení bodu varu (bod D). V tomto místě dochází ke vzniku páry, která uniká povrchem (bod E) v podobě gejsírů, horkých pramenů, či bahnitých jezírek. Schéma cyklu hydrotermálního zdroje je znázorněno na obr. 4-3. [1]

[4] zdroj horké vody




Obr. 4-3: Schéma cyklu – hydrotermální zdroj [1]

## 4.3 HDR

Zdroj geotermální energie známý také jako HDR[5], pracuje s předpokladem, že v určitém místě pod povrchem, se nachází zásoby horkých suchých hornin, které jsou prakticky nepropustné pro vodu. Pro využití takového zdroje je tedy nutné za pomoci vrtů vytvořit systém, který funguje jako tepelný výměník. Do takového systému přivádíme studenou vodu, která odebírá při průchodu teplo okolním žhavým horninám, v důsledku velkého tlaku se však nemění na páru pod povrchem, ale vyvěrá na povrch v podobě přehřáté kapaliny, která se následně přeměňuje na přehřátou páru v povrchovém tepelném výměníku. [1; 5]

Výhody HDR:

a) ekonomicky výhodné i přes vyšší počáteční náklady

b) velmi stálý zdroj energie

c) velmi malá produkce škodlivých látek, malé množství $CO_2$

Aby bylo možno HDR efektivně využít, měla by oblast splňovat následující podmínky:

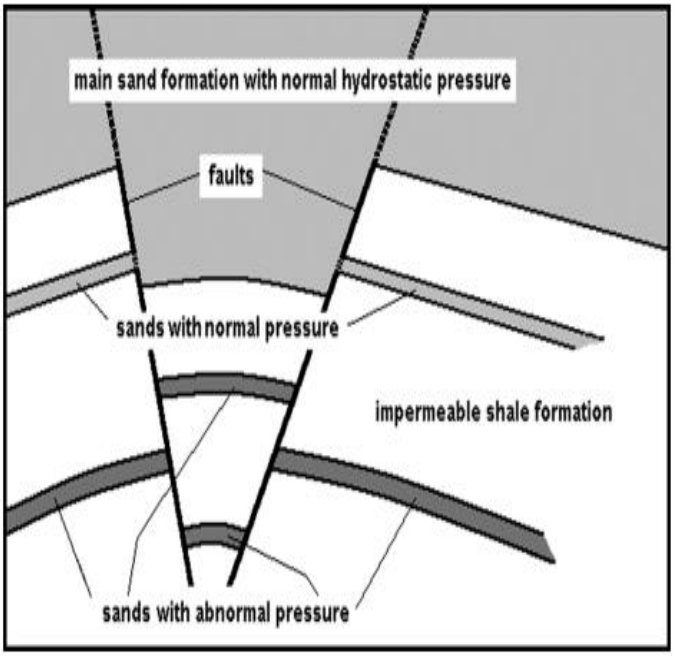
a) hloubka by neměla přesahovat přibližně 5 km, tato hodnota se může lišit v závislosti na gradientu v dané oblasti

b) teplota v dané hloubce alespoň 180 °C

c) plocha by neměla být větší než 3 $km^2$

[5] Hot Dry Rock

## 4.4 Zemský tlak




Obr. 4-1: Geopressure – schéma procesu [1]

Potenciál zemského tlaku[6] lze využít především v severních a západních pobřežních oblastech mexického zálivu. Právě v těchto oblastech vznikly vlivem tohoto tlaku oblasti, které jsou charakteristické třemi velmi atraktivními vlastnostmi, z hlediska geotermální energetiky. Vyznačují se velmi vysokými tlaky, vysokými teplotami a také zásobami rozpuštěného metanu. Princip je znázorněn na obr. 4-1. [1]

## 4.5 Energie magmatu

Magma, jakožto přímý zdroj tepla, se v určitých oblastech nachází velmi blízko povrchu země. Princip je založen na vrtu, který je vedený přímo do magmatu. Tímto vrtem pod velkým tlakem pumpujeme do magmatu studenou vodu, která mění magma v pevný skelný materiál, který má tendenci praskat v důsledku napětí, způsobeného tepelnou změnou. Voda se vrací k povrchu skrze praskliny v tomto velmi žhavém skelném materiálu ohřáta na vysokou teplotu a připravena k použití v elektrárnách pracujících na principu Rankinova cyklu. [1]

## 4.6 Hlubinné hydrotermální zdroje

Hlubinné hydrotermální zdroje jsou známé poměrně krátce. Při hlubinných vrtech v Evropě a Austrálii, které byly uskutečněny pro výstavbu HDR elektráren, bylo zjištěno, že v hloubkách mezi 2500 a 4000 m pod povrchem Země, se nachází v určitých oblastech zásoby horké vody. Teplota této vody závisí na gradientu dané oblasti. Kupříkladu v oblasti, kde gradient je roven 30 $^{o}$C/km, bude mít hydrotermální zdroj v hloubce 4000 m teplotu v rozmezí zhruba 120-140 $^{o}$C. Potenciálně je tento zdroj vhodný především pro systémy, které jsou konstruovány nízkoteplotní geotermální zdroje. [1]

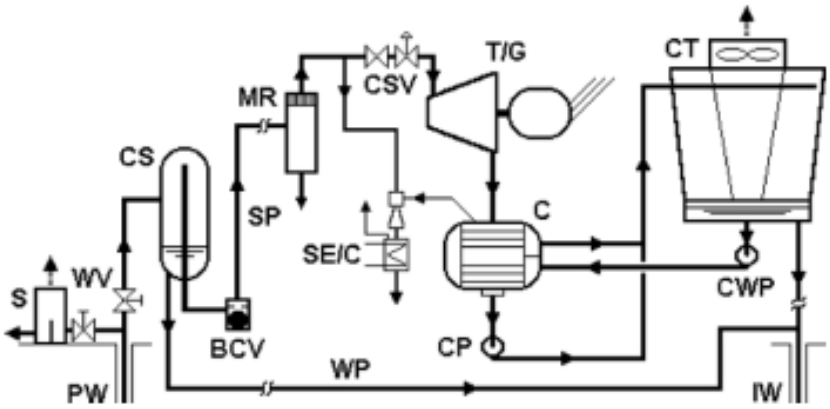
[6] jindy také označováno jako „geopressure“

# 5. Technologie v geotermální energetice

K přeměně geotermální energie v energii elektrickou slouží geotermální elektrárny. Tyto elektrárny využívají především tyto tři základní technologie – Flash steam, Dry steam, Binary Cycle. Tyto jednotlivé technologie se v průběhu posledních 100 let vyvíjely a vznikly tak jejich různé modifikace. V následujících podkapitolách jsou shrnuty nejpoužívanější technologie a jejich modifikace.

## 5.1 Technologie Single-Flash Steam

Technologie Single-Flash Steam[7], neboli SFS, byla vyvinuta v 60. letech na Novém Zélandu a patří mezi nejvyužívanější technologie v oblasti geotermální energetiky. Instalované výkony těchto zařízení se pohybují nejčastěji kolem 30 MW. SFS technologie využívá horké vody z podzemních rezervoárů, která se vlivem velkého tlaku v ložisku pod povrchem nezměnila v páru. Postupně však při jejím pohybu směrem k povrchu tlak klesá a přehřátá kapalina se mění ve směs vody a páry. Pára pohání turbínu a voda, která se nepřeměnila, se vrací zpět do ložiska pod povrchem. Schéma zařízení využívající SFS je uvedeno na obr. 5-1, na obr. 5-2 jsou v T-s diagramu vyznačeny změny stavu charakteristické pro SFS systémy. [1; 12; 13]

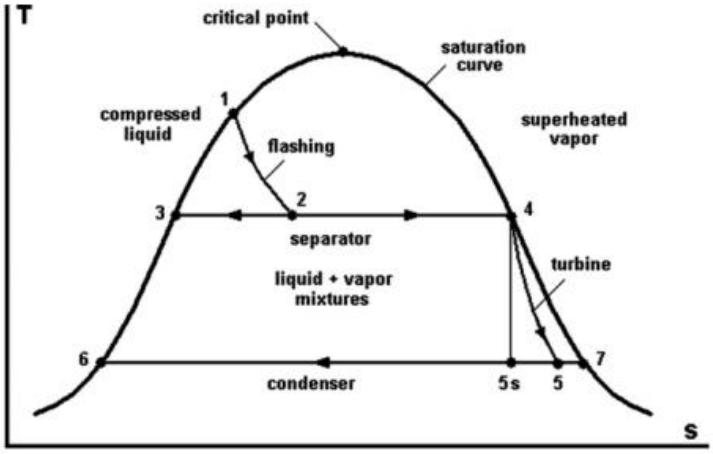



Obr 5-1: Schéma zařízení využívající SFS [1; 13]

**Legenda k Obr 5-1:** [1; 13]

BCV – zpětný kulový ventil, C – kondenzátor, CP – kondenzátní čerpadlo, CS – cyklonový separátor, CSV – rychlouzávěrný a regulační ventil, CT – chladící věž, CWP – čerpadlo chladící vody, IW – injekční vrt, MR – pohlcovač vlhkosti, PW – produkční vrt, S – kompenzátor objemu, SE/C – parní ejektor/kondenzátor, SP – parní potrubí, T/G – turbína/generátor, WP – vodní potrubí, WV – hlavní uzavírací ventil

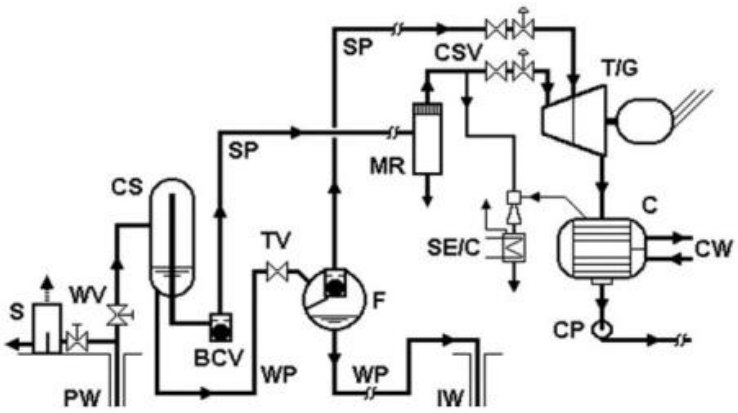
[7] Princip mokré páry s využitím jedné přeměny vody v páru




Obr. 5-2: T-s diagram SFS systému [1; 13]

## 5.2 Technologie Double-Flash Steam

Technologie Double-Flash steam[8] je systému SFS velmi podobná, avšak oproti SFS využívá odpadní vodu k druhotné přeměně v páru. Část vody, která se v cyklonovém separátoru přemění v páru, pohání první turbínu, kdežto voda, která se nepřeměnila, proudí do flash jednotky, v které dochází k druhotné přeměně v páru. Druhotná pára má nižší tlak a pohání nízkotlakou část turbíny. Schéma zařízení využívající technologii DFS, je znázorněno na obr. 5-3. Na obr 5-4 jsou v T-s diagramu vyznačeny změny stavu charakteristické pro DFS systémy. [1; 13]

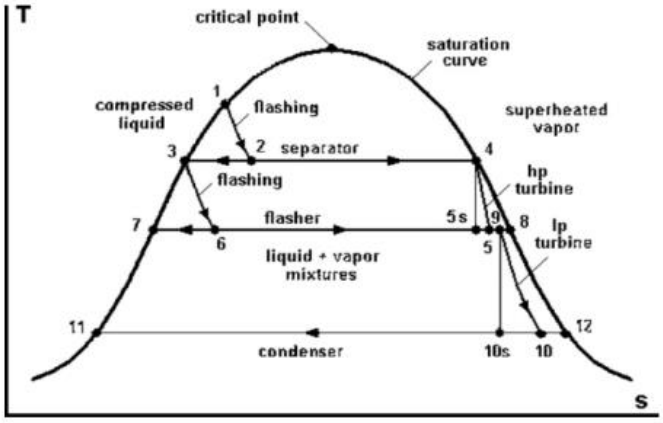



Obr. 5-3: Schéma zařízení využívající technologii DFS [1; 13]

**Legenda k Obr 5-3:** [1; 13]

BCV – zpětný kulový ventil, C – kondenzátor, CP – kondenzátní čerpadlo, CS – cyklonový separátor, CSV – rychlouzávěrný a regulační ventil, CW – chladící voda, F – flash jednotka, IW – injekční vrt, MR – odstraňovač vlhkosti, PW – produkční vrt, S – kompenzátor objemu, SE/C – parní ejektor/kondenzátor, SP – parní potrubí, T/G – turbína/generátor, TV – škrtící ventil, WP – vodní potrubí, WV – hlavní uzavírací ventil

[8] Princip mokré páry s využitím dvou přeměn vody v páru




Obr. 5-4: T-s diagram DFS systému [1; 13]

## 5.3 Technologie Binary Cycle

BC technologie se liší od FS především tím, že po realizaci a připojení vrtu, je v celém okruhu konstantní tlak a vrt tedy není propojen s místy s tlakem nižším nebo atmosférickým. Díky tomu proudí primárním okruhem pouze horká voda, která se nemění v páru. Primární okruh je složen z produkčního a injekčního vrtu a z primární strany výparníku a ohříváku. Sekundární okruh je tvořen sekundární stranou tepelného výměníku, turbínou na páry organického původu, kondenzátorem a oběhovým čerpadlem. Sekundárním oběhem proudí sekundární pracovní kapalina, zpravidla organického[9] původu. Pracovní kapalina se ve výparníku mění v páru, která následně pohání turbínu. [1; 13]

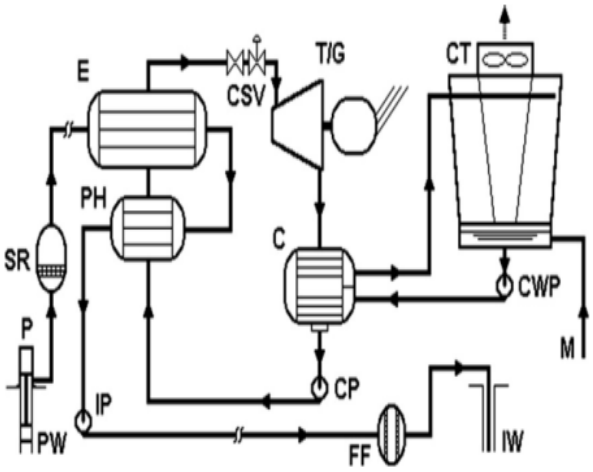
V souvislosti s ORC je vhodné zmínit také jeho modifikaci a tím je Kalina Cycle. KC je charakteristický především tím, že jako sekundární pracovní kapalinu používá směs vody a čpavku. Hlavní výhodou této směsi je její využití pro geotermální zdroje o nižších teplotách, kde může KC dosahovat až o 10-20 % vyšší účinnost než ORC. Konkrétní účinnost je vždy závislá na střední teplotě přívodu a odvodu tepla v cyklu. U KC lze používat klasické parní turbíny, jelikož molekulární hmotnost čpavku je přibližně stejná jako vody, tyto turbíny musí být upraveny proti úniku čpavku. V porovnání s ORC systémy, které zpravidla používají jako sekundární pracovní kapalinu směsi uhlovodíků, má směs čpavku a vody v KC až dvakrát větší měrnou tepelnou kapacitu. Díky tomu lze konstruovat výměníky o menších teplosměnných plochách. [1; 13]

Na obr. 5-5 je uvedeno schéma jednoduchého zařízení využívajícího BC, na obr. 5-6 jsou v T-s a p-h diagramech vyznačeny změny stavu charakteristické pro BC systém. [1; 13]

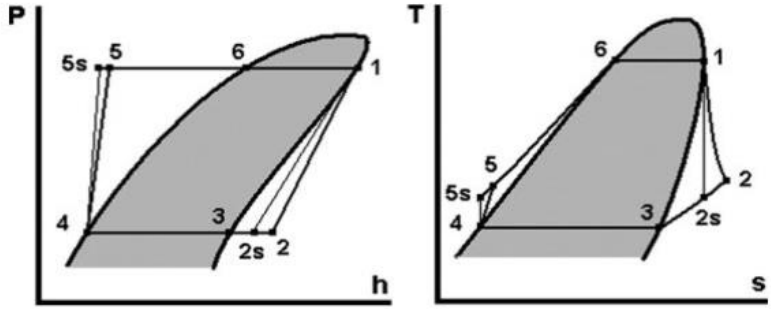
[9] Jestliže je pracovní kapalina organického původu, nazývá se tento cyklus Organic Rankine Cycle, neboli ORC

**Legenda k obr. 5-5:** [1; 13]

C – kondenzátor, CP – kondenzátní čerpadlo, CSW – rychlouzávěrný a regulační ventil, CT – chladící věž, CWP – čerpadlo chladící vody, E – výparník, FF – koncový filtr, IP – injekční čerpadlo, IW – injekční vrt, M – přívod vody pro kompenzaci ztrát, P – čerpadlo, PH – předehřívák, PW – produkční vrt, SR – odstraňovač písku, T/G – turbína s generátorem



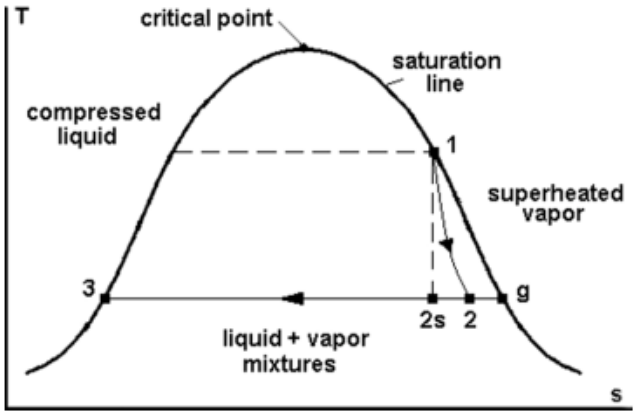

Obr. 5-5: Zjednodušené schéma zařízení využívající BC [1; 13]




Obr. 5-6: Názorný příklad průběhu BC v T-s a p-h diagramech [1; 13]

## 5.4 Technologie Dry Steam

Technologie DS využívá syté páry o teplotě 180-300 °$C$. Exergetická účinnost toho systému se pohybuje mezi 50-65 %. Nevýhodou tohoto systému je, že ho lze využít pouze na určitých místech a tato místa jsou z velké části již vyčerpaná. Na obr. 5-7 jsou znázorněny přeměny DS systému v T-s diagramu. [1; 13]

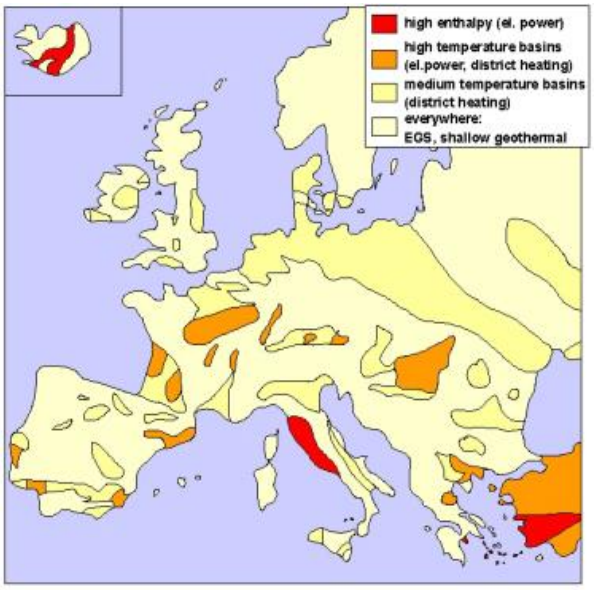



Obr. 5-7: T-s diagram systému s využitím technologie DS [1]

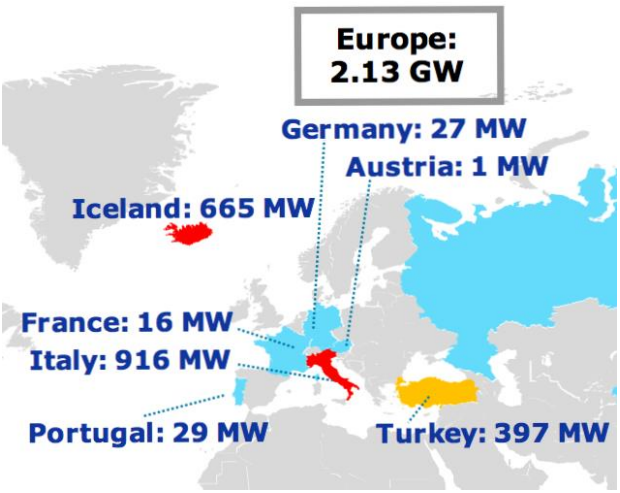
# 6. Potenciál využití geotermální energie v Evropě

Evropa je světovým leaderem ve využití geotermální energie, tento fakt byl uveden na světovém geotermálním kongresu v roce 2005 a je tomu tak dodnes. Tato energie je využívána ve 32 evropských zemích, a to především pro ohřev vody, lázeňství, vytápění budov a konečně také k výrobě elektrické energie. Avšak zařízení, která využívají geotermální energii k výrobě elektrické energie, lze najít pouze v několika zemích. [16]

Hodnoty tepelného toku v Evropě se pohybují průměrně v rozmezí 30-40 $mW/m^2$. Jsou však oblasti, hovoříme zde především o starých geologických oblastech z období Prekambria, kde se hodnoty tepelného toku pohybují v rozmezí 70-80 $mW/m^2$, tento údaj platí také pro oblasti alpského systému. V některých zemích Evropy lze dokonce najít oblasti, kde se hodnoty tepelného toku pohybují i v rozmezí 80-100 $mW/m^2$, tyto oblasti můžeme najít především na území Itálie, Turecka nebo Islandu. Na obr. 6-1 jsou znázorněny evropské lokality s potenciálem využiti z hlediska geotermální energetiky. Na obr. 6-2 je zobrazena mapa Evropy s vyznačenými instalovanými elektrickým výkony pro rok 2013. [15; 16]




Obr. 6-1: Oblasti s potenciálem využití z hlediska geotermální energetiky [16]




V následujících podkapitolách jsou shrnuty geotermální teplárny a elektrárny v jednotlivých zemích Evropy. V rámci své práce jsem se rozhodl věnovat celou jednu kapitolu Německu, a to z toho důvodu, že Německo patří mezi leadery využití geotermální energie, přestože k tomu nemá až tak příhodné podmínky.

Obr. 6-2: Mapa Evropy s vyznačenými instalovanými elektrickými výkony pro rok 2013 [16]

## 6.1 Využití geotermální energie v Itálii

Itálie patří mezi světové leadery v oblasti geotermální energetiky. Skvělé podmínky umožnily vybudovat zařízení o celkovém instalovaném elektrickém výkonu přibližně 916 MW. Elektřina vyrobená díky využití geotermálních zdrojů pokrývá přibližně 2% celkové roční produkce elektrické energie v Itálii. Geotermální zdroje v Itálii se nacházejí v oblasti Toskánska, konkrétně v oblastech Larderello, Mount Amiata a Travale/Radicondoli. V současné době jsou prováděny průzkumy v oblastech Larderello, Travale/Radicondoli a Piancastagnaio. V tab. 6-1 charakterizovány geotermální elektrárny v oblasti Travale/Radicondoli, tab. 6-2 a tab. 6-3 jsou obdobné, pouze jsou v nich shrnuty geotermální elektrárny v oblastech Larderello a Mount Amiata. Tabulky obsahují data z roku 2014. [21]

| Oblast | Název zařízení | Spuštění | Stav | Technologie | Celkový instalovaný výkon |
|---|---|---|---|---|---|
| Larderello | Valle Secolo | 1991 | on | Dry Steam | 120 MW |
| | Farinello | 1995 | on | Dry Steam | 60 MW |
| | Nuova Larderello | 2005 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Nuova Gabbro | 2002 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Nuova Castelnuovo | 2000 | on | Dry Steam | 14,5 MW |
| | Nuova Serrazzano | 2002 | on | Dry Steam | 60 MW |
| | Nuova Sasso | 1996 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Sasso 2 | 2009 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Le Prata | 1996 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Nuova Monterotondo | 2002 | on | Dry Steam | 10 MW |
| | Nuova San Martino | 2005 | on | Dry Steam | 40 MW |
| | Nuova Lago | 2002 | on | Dry Steam | 10 MW |
| | Nuova Lagoni Rossi | 2009 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Cornia 2 | 1994 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Nuova Molinetto | 2002 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Carboli 1 | 1998 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Carboli 2 | 1997 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Selva | 1997 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Monteverdi 1 | 1997 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Monteverdi 2 | 1997 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Sesta | 2002 | on | Dry Steam | 20 MW |
| Sumarizace | | | | | 594,5 MW |

Tab. 6-2: Shrnutí a charakterizace geotermálních zařízení v oblasti Larderello [21]

| Oblast | Název zařízení | Spuštění | Stav | Technologie | Celkový instalovaný výkon |
|---|---|---|---|---|---|
| Travale/ Radicondoli | Nuova Radicondoli | 2002 | on | Dry Steam | 40 MW |
| | Nuova Radicondoli 2 | 2010 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Pianacce | 1987 | off | Dry Steam | 20 MW |
| | Rancia | 1986 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Rancia 2 | 1988 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Travale 3 | 2000 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Travale 4 | 2002 | on | Dry Steam | 40 MW |
| | Chiusdino 1 | 2010 | on | Dry Steam | 20 MW |
| Sumarizace | | | | | 200 MW |

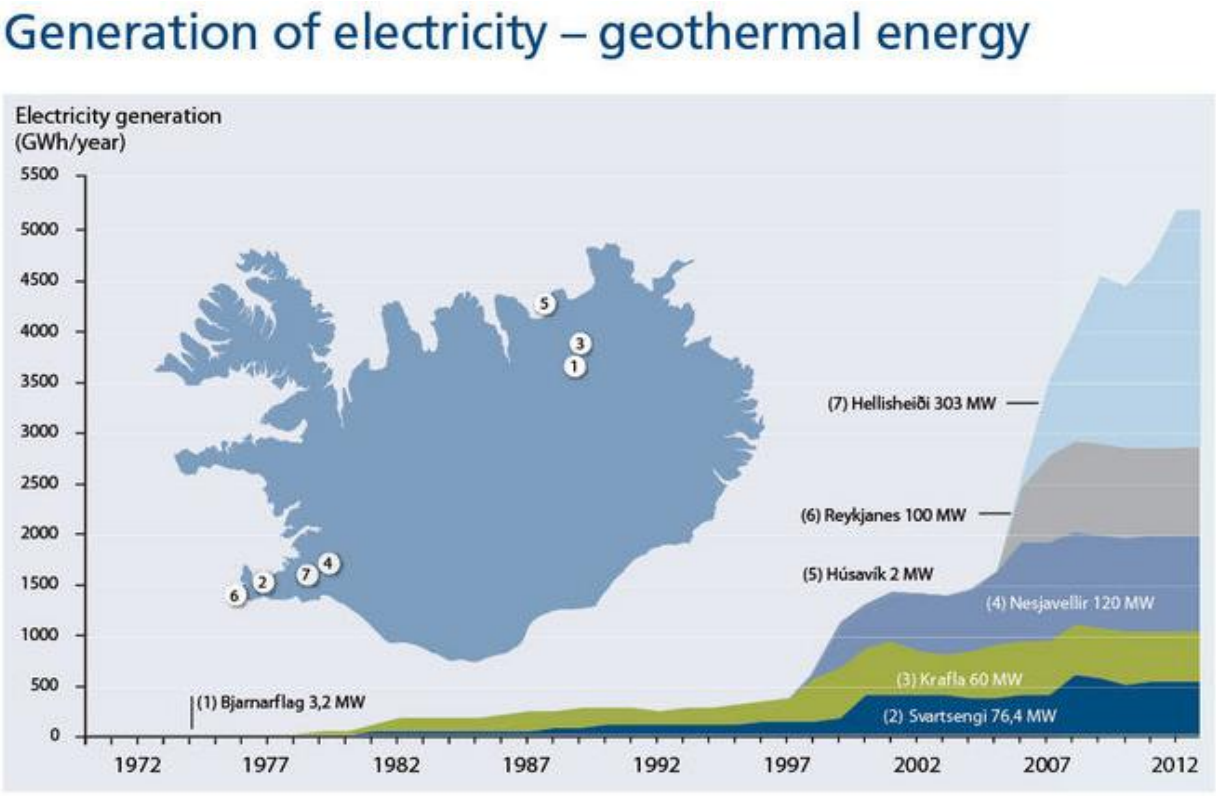
Tab. 6-1: Shrnutí a charakterizace geotermálních zařízení v oblasti Travale/Radicondoli [21]

| Oblast | Název zařízení | Spuštění | Stav | Technologie | Celkový instalovaný výkon |
|---|---|---|---|---|---|
| Mt. Amiata | Bagnore 3 | 1998 | on | Single Flash Steam | 20 MW |
| | Gruppo Binario Bagnore 3 | 2013 | on | Binary cycle | 1,0 MW |
| | Piancastagnaio 3 | 1990 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Piancastagnaio 4 | 1991 | on | Dry Steam | 20 MW |
| | Piancastagnaio 5 | 1994 | on | Dry Steam | 20 MW |
| Sumarizace | | | | | 81 MW |

Tab. 6-3: Shrnutí a charakterizace geotermálních zařízení v oblasti Mount Amiata [21]

## 6.2 Využití geotermální energie na Islandu

Island je vulkanický ostrov a má tudíž obrovský potenciál využití geotermální energie. Island se řadí za Itálii na druhé místo v žebříčku evropských zemí, které využívají geotermální energii k výrobě elektřiny. Na Islandu se momentálně nachází sedm zařízení, která využívají geotermální energii k výrobě elektřiny, s celkovým instalovaným elektrickým výkonem 665 MW. Na obr. 6-3 je znázorněna mapa s polohou jednotlivých elektráren a tepláren a zároveň je zde vyobrazen také graf, který popisuje vývoj produkce elektrické energie v GWh za rok, během uplynulých let. V tab. 6-4 jsou jednotlivá zařízení specifikována. [22]




Obr. 6-3: Mapa geotermálních zařízení na Islandu včetně vývoje produkce elektrické energie v GWh za rok [23]

| Název | Oblast | Rok spuštění | Stav | Technologie | Celkový elektrický výkon [MW] | Celkový tepelný výkon [MW] | Hloubka [m] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hellisheiði | Hengill | 2006 | on | SFS | 303 | 133 | 2200 |
| Nesjavellir | Nesjavellir | 1998 | on | SFS | 120 | 300 | 3000 |
| Reykjanes | Reykjanes | 2005 | on | SFS | 100 | - | 2700 |
| Svartsengi | Keflavík | 1977 | on | ORC | 75 | 150 | 1800 |
| Krafla | Krafla | 1978 | on | DFS | 60 | - | 2222 |
| Bjarnarflag | Mývatn | 1969 | on | SFS | 3,2 | - | 2000 |
| Húsavík | Húsavík | 2000 | on | KC | 2 | - | 2200 |

Tab. 6-4: Shrnutí a specifikace geotermálních elektráren a tepláren na Islandu [1; 13; 24; 25]

## 6.3 Využití geotermální energie v Turecku

Turecko je jednou z nejbohatších zemí, co se týče geotermálního potenciálu. Díky průzkumům bylo zjištěno, že se v Turecku nachází přibližně 227 míst potenciálně vhodných pro využití z hlediska geotermální energetiky a momentálně jsou zde v provozu geotermální zařízení o celkovém instalovaném elektrickém výkonu přibližně 400 MW. V Turecku je o geotermální

energii zájem a počet zařízení, která jsou ve fázi plánování, či ve výstavbě, by se měl nadále zvyšovat. Cílem Turecka je pro rok 2023 aktivně využívat geotermálních zařízení o celkovém instalovaném elektrickém výkonu až 1500 MW. V tab. 6-5 je shrnutí regiónů vhodných z hlediska výroby elektrické energie, včetně teplot geotermálních zdrojů v daných oblastech. V tab. 6-6 jsou shrnuty geotermální elektrárny na území Turecka a jejich základní specifikace. [27]

| *Geothermal region* | *Temperature (°C)* | *Potential of electric energy generation (MW)* |
|---|---|---|
| Denizli Kizildere | 200–242 | 80 |
| Aydin-Germencik | 200–232 | 130 |
| Manisa-Alasehir-Kavaklıdere | 213 | 15 |
| Manisa-Salihli-Gobekli | 182 | 15 |
| Canakkale-Tuzla | 174 | 80 |
| Aydin-Salavatlı | 171 | 65 |
| Kutahya-Simav | 162 | 35 |
| Izmir-Seferihisar | 153 | 35 |
| Manisa-Salihli-Caferbey | 150 | 20 |
| Aydin-Sultanhisar | 145 | 20 |
| Aydin-Yilmazkoy | 142 | 20 |
| Izmir-Balcova | 136 | 5 |
| Izmir-Dikili | 130 | 30 |
| Total | | 550 |

Tab. 6-5: Potenciálně vhodné geotermální oblasti na území Turecka [26]

| Oblast | Název zařízení | Spuštění | Stav | Technologie | Celkový instalovaný výkon |
|---|---|---|---|---|---|
| Denizli | Kizildere | 1984/2003 | on | SFS, DFS, ORC | 95 MW |
| Aydin | Dora 1, 2, 3 | 2006/2013 | on | ORC | 50,86 MW |
| Aydin | Germencik 1 | 2009 | on | DFS | 47,4 MW |
| Çanakkale | Tuzla | 2010 | on | ORC | 7,5 MW |
| Aydin | Hidirbeyli | 2011/2013 | on | ORC | 92 MW |
| Aydin | Pamukoren | 2013 | on | ORC | 45 MW |
| Denizli | Kizildere | 2007 | on | ORC | 6,85 MW |
| Manisa | Alasehir | 2014 | on | ORC | 24 MW |
| Aydin | Gümüşköy | 2014 | on | ORC | 6,6 MW |
| Denizli | Gerali | 2014 | on | ORC | 2,52 MW |
| Aydin | Germencik 2 | 2014 | on | ORC | 22,5 MW |

Tab. 6-6: Shrnutí geotermálních zařízení na území Turecka a jejich specifikace [27]

## 6.4 Využití geotermální energie v Portugalsku

Využití geotermální energie v Portugalsku je zaměřeno především na vysokoteplotní geotermální zdroje, které se nachází na vulkanických Azorských ostrovech, jež leží na pomezí tří tektonických desek – Severoamerické desky, Euroasijské desky a Africké desky. Geotermální elektrárny jsou v provozu na ostrově Saint Miguel v oblasti Ribeira Grande, avšak díky dobrým výsledkům z průzkumných vrtů, se v současnosti plánuje využití geotermální energie také na

ostrově Terceira. Současný celkový instalovaný elektrický výkon geotermální zařízení na území Portugalska je přibližně 29 MW. V tab. 6-7 jsou shrnuty geotermální elektrárny na území Portugalska včetně základní specifikace [28]

| Oblast | Název zařízení | Spuštění | Stav | Technologie | Celkový instalovaný výkon |
|---|---|---|---|---|---|
| Ribeira Grande | Ribeira Grande (Phase A) | 1994 | on | ORC | 6 MW |
| | Ribeira Grande (Phase B) | 1998 | on | ORC | 9 MW |
| | Pico Vermelho | 2006 | on | ORC | 13,5 MW |

Tab. 6-7: Shrnutí geotermálních zařízení na území Portugalska a jejich specifikace [28]

## 6.5 Využití geotermální energie ve Francii

Díky svým potenciálně vhodným oblastem z hlediska využití v geotermální energetice si Francie vytyčila poměrně ambiciózní cíle v oblasti využití geotermální energie. Tyto cíle se zaměřují především na vytápění měst a obcí, avšak ve fázi jednání jsou i některé teplárny, které by měly vzniknout na území samotné Francie, ale také jsou v jednání zařízení, která by se měla nacházet v zaoceánských oblastech, jakými jsou ostrovy La Reunion, Martinik a Guadeloupe. Na území Francie se momentálně nachází geotermální zařízení o celkovém instalovaném elektrickém výkonu přibližně 17 MW. V tab. 6-8 jsou shrnuta geotermální zařízení na území Francie a jejich základní specifikace. [29]

| Oblast | Název zařízení | Spuštění | Stav | Technologie | Celkový instalovaný výkon |
|---|---|---|---|---|---|
| Guadeloupe | Bouillante | 1986/2004 | on | DFS/SFS | 15,5 MW |
| Alsace | Soultz-sous-Forets | 2010 | on | ORC | 1,5 MW |

Tab. 6-8: Shrnutí geotermálních zařízení na území Francie a jejich specifikace [29]

## 6.6 Využití geotermální energie v Rakousku

Rakousko využívá geotermální energii především k vytápění měst a obcí. Teplárna Simbach-Braunau s instalovaným elektrickým výkonem 1 MW, je v současnosti mimo provoza tak je na území Rakouska v provozu pouze teplárna Blumau, s celkovým instalovaným elektrickým výkonem 0,25 MW. V tab. 6-9 se nachází shrnutí zařízení v Rakousku. [30]

| Oblast | Název zařízení | Spuštění | Stav | Technologie | Celkový instalovaný výkon |
|---|---|---|---|---|---|
| Altheim | Simbach-Braunau | 2002 | off | ORC | 1 MW |
| Bad Blumau | Blumau | 2001 | on | ORC | 0,25 MW |

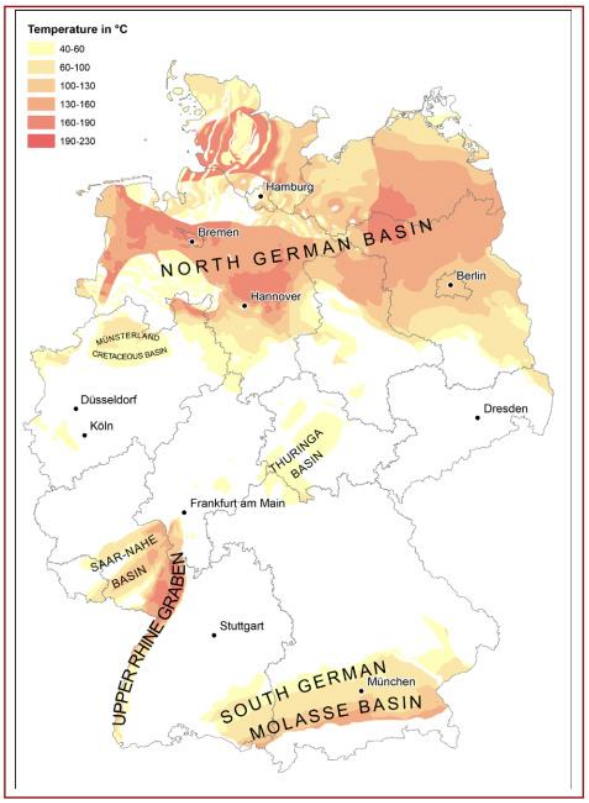
Tab. 6-9: Shrnutí geotermálních tepláren na území Rakouska [30]

# 7. Využití geotermální energie v Německu

Ve své práci jsem se rozhodl více zaměřit na Německo, které jakožto propagátor obnovitelné energie, je jedním z leaderů v oblasti využití geotermální energie v Evropě, přestože k tomu nemá příliš vhodné podmínky. Německo má díky svému dynamickému růstu v této oblasti řadu velkých zařízení využívajících geotermální energii k vytápění obydlených oblastí, v lázeňství, či vytápění skleníků. Podstatně menší počet zařízení pak slouží k výrobě elektrické energie. Mimo tato zařízení se však na území Německa nachází také velké množství malých, či středně velkých geotermálních zařízení, jako jsou například tepelná čerpadla pro domácnosti. [16; 18]

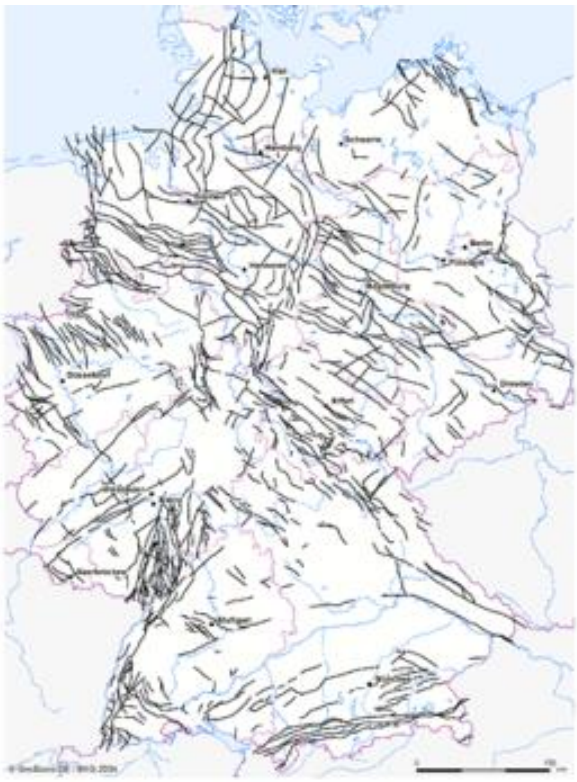
## 7.1 Geotermální zdroje Německa

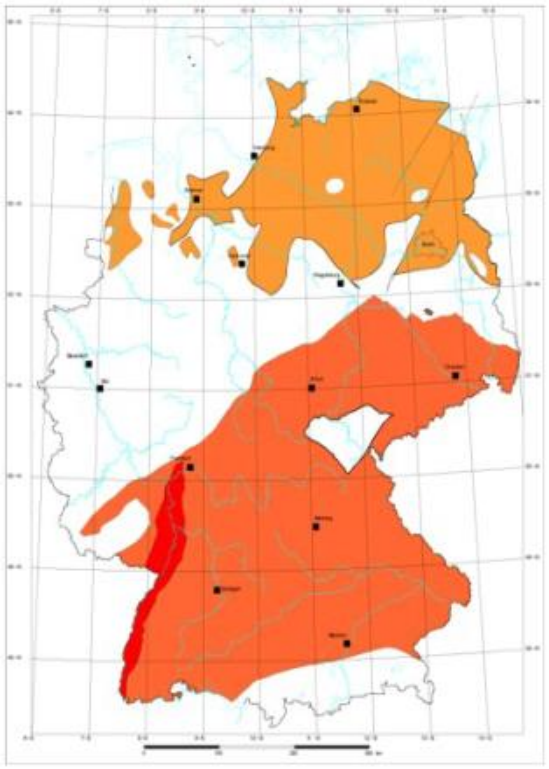
Díky zařízením využívajícím technologii ORC[10] a KC[11] lze vyrábět elektrickou energii i ze zdrojů o relativně nízkých teplotách, hovoříme zde o zdrojích o teplotě okolo 100°$C$. Díky tomu se otevírá možnost výroby elektrické energie za pomocí geotermální energie i zemím, jako je právě Německo. Zdroje geotermální energie v Německu můžeme rozdělit do tří typů – zdroje hydrotermální, podpovrchové poruchy a krystalické horniny. Energetický potenciál hydrotermálních zdrojů se odhaduje na 10 EJ, u podpovrchových poruch je tento energetický potenciál roven přibližně 45 EJ a krystalické horniny, nacházející se v daných lokalitách přibližně v hloubce 3000-7000 m, mají energetický potenciál dokonce 1 100 EJ. Hydrotermální zdroje Německa jsou znázorněny na obr. 7-1, výskyt podpovrchových poruch v Německu je znázorněn na obr. 7-2, lokality s výskytem krystalických hornin jsou zaznamenány na obr. 7-3.




Obr. 7-1: Hydrotermální zdroje v Německu [19]

[10] Organic Rankine Cycle
[11] Kalina Cycle





(Vlevo) Obr. 7-2: Podpovrchové poruchy jako zdroj geotermální energie v Německu [18]

(Vpravo) Obr. 7-3: Krystalické horniny v Německu jako zdroj geotermální energie [18]

**Legenda k obr. 7-3: [18]**

Tmavě červená barva – hloubka 3 km a teplota přibližně 130 °$C$

Červená barva – hloubka 3 km a teplota přibližně 100 °$C$

Oranžová barva – vulkanické horniny o teplotě přesahující 100 °$C$

## 7.2 Oblasti s výskytem geotermální zdrojů

### 7.2.1 Severoněmecká pánev

Severoněmecká pánev, neboli NGB[12] je centrální oblastí centrální evropské pánve. Současná tloušťka sedimentu v této oblasti je v rozmezí 2-10 km. Pohyb evaporitů[13] nazývaných Upper Permian Zechstein[14] způsobil intenzivní a komplexní deformaci mezozoických a kenozoických[15] útvarů. Díky tomu vznikla v této oblasti řada geotermálních zdrojů o různých teplotách. Mezozoická vrstva se skládá ze siliciklastických[16] hornin a uhličitých hornin s příměsí evaporitů. Akvifery[17] s vysokou permeabilitou jsou hlavní příčinou atraktivnosti těchto oblastí

[12] The North German Basin
[13] Sedimentární horniny, které vznikly odpařením vody z roztoků, obvykle mořské vody
[14] Horní vrstva horniny Zechstein z období permu
[15] Mezozoikum a kenozoikum jsou geologická období
[16] Sedimentární horniny, které se skládají především z křemenných zrn
[17] Zvodeň - hydraulicky jednotná a souvislá akumulace gravitačních podzemních vod v hornině

z hlediska geotermální energetiky. Pórovité sedimenty akviferů, které jsou vhodné z hlediska využití v geotermální energetice, by měly splňovat následující podmínky – tloušťka vrstvy akviferů minimálně 20 m, pórovitost minimálně 20 % a minimální permeabilita 250 mD. Některé formace obsahují pískovcovou vrstvu, u které se předpokládá, že podmínky výše uvedené splňuje. Potenciální ložiska hornin s teplotou vhodnou pro využití v geotermální energetice, se nachází především v mezozoických pískovcových formacích. [18]

### 7.2.2 Pánev Molasse

Molasse je asymetrická pánev v jižním Německu, která je spjata s Alpským systémem. Rozkládá se v délce přibližně 300 km a zasahuje kromě Německa i na území Švýcarska a Rakouska. Pánev je tvořena především třetihorními sedimenty pojmenovaných podle pánve Molasse, horními (Malm[18]) a spodními (Dogger) křídovými sedimenty z období jury a triasu[19]. Malm je jedním z nejvýznamnějších hydrotermálních zásobišť ve střední Evropě a to z toho důvodu, že obsahuje vysoce produktivní akvifery, které navíc pokrývají prakticky celou pánev. Rozmezí teplot geotermálních zdrojů v pánvi Molasse se pohybují od 40 $°C$ na severu až po 160 $°C$ na jihu v blízkosti Alp. V důsledku toho se zařízení, které využívají tuto energii k přímému vytápění budov, nachází na severu. Kdežto směrem na jih se využívají zařízení, která jsou kombinovaně elektrárnami a zároveň teplárnami. Zařízení využívající geotermální energii k výrobě elektrického proudu se nachází především na jih od Mnichova. [18]

### 7.2.3 Hornorýnská nížina

Hornorýnská nížina leží v oblasti velké evropského geologického zlomu[20]. V šířce přibližně 30-40 km se tato oblast táhne od hor poblíž Basileje, které vznikly v období jury, až po Frankfurt. Tato oblast vznikla opakovanými komplexními poruchami. Zemská kůra se zde v období před 45-60 miliony let rozšiřovala a vznikly tak hluboko uložené zdroje geotermální energie. Tento děj je spjat s pohyby zemské kůry důsledku průniku magmatu v hloubce přibližně 80-100 km. Tlak, který provázel tento jev, způsobil celkový vertikální posuv o 4,8 km. V Hornorýnské nížině jsou významné především oblasti Horní Muschelkalk, Bunter, Grafenberg nebo Hauptrogenstein a Rotliegend.

[18] Krasovo-dolomitové porušené vrstvy uhličitých hornin v horních vrstvách vzniklých v období jury
[19] Jura a trias jsou geologická období
[20] Large European rift system

## 7.3 Geotermální zařízení na území Německa

V Německu se nachází přibližně 180 velkých zařízení, která fungují jako geotermální teplárny a výtopny. Celkový výkon těchto zařízení je přibližně 650 MW s geotermálním výkonem přibližně 260 MW. Mimo tato velká zařízení se na území Německá nachází přibližně 286 000 malých zařízení, jako jsou tepelná čerpadla, která vytápí domácnosti a kancelářské prostory. Celkový instalovaný výkon těchto malých zařízení je přibližně 3500 MW a jejich geotermální výkon je přibližně 2850 MW. Vytápění obcí a měst má v Německu minoritní podíl ve srovnání s ostatními způsoby vytápění. Procentuálně se jedná přibližně o 13,2 % všech obydlených oblastí. Z hlediska využití geotermální energie v Evropském měřítku jde však o velmi významný podíl a podle NREAP se má trend využití geotermální energie k přímému vytápění nadále zvyšovat. Z celkových 180 velkých zařízení je v Německu v provozu přibližně 26 geotermálních tepláren. Více jak 60 možných nových výstaveb je však ve fázi jednání a plánování. Zařízení, která by využívala geotermální energie pouze k výrobě elektřiny, je v Německu podstatně méně než zařízení sloužících jako výtopny, či teplárny. Největší operující geotermální elektrárny jsou Dürrnhaar (2012) a Kirchstockach (2013), instalovaný výkon těchto elektráren je 5,5 MW. Instalovaný výkon 5 MW má i další nová elektrárna - Insheim (2013). Celkový instalovaný výkon Německých geotermálních elektráren je v současné době přibližně 35,76 MW. V podkapitole věnující se právě geotermální elektrárnám jsou jednotlivá zařízení blíže specifikována. [18]

### 7.3.1 Geotermální teplárny na území Německa

#### Sauerlach

Teplárna Sauerlach se nachází v oblasti Molasse poblíž Mnichova a její primární funkcí je výroba elektrické energie, na rozdíl od většiny tepláren v Německu, které mají jako primární funkci výrobu tepelné energie. Toto zařízení bylo uvedeno do provozu v roce 2013 a využívá technologie ORC. Bližší informace jsou uvedeny v tab. 7-3. [18; 20]

#### Traunreut

Teplárna Traunreut se nachází na jihu oblasti pánve Molasse poblíž města Trostberg. Zařízení využívá technologii ORC a v porovnání s ostatními zařízeními má zdejší vrt největší hloubku. V současné době neprodukuje elektrickou energii. Bližší informace jsou uvedeny v tab. 7-3. [18; 20]

## Taufkirchen

Teplárna Taufkirchen byla uvedena do provozu v roce 2014 a nachází se opět v blízkosti předchozích dvou zmiňovaných tepláren, tedy v oblasti Molasse poblíž Mnichova. Teplárna využívá technologie Kalinova cyklu. Bližší informace jsou uvedeny v tab. 7-3. [18;20]

## Grünwald

Grünwald, někdy také nazýváno Laufzorn se nachází nedaleko od již zmiňované teplárny Unterhaching. Zařízení bylo uvedeno do provozu roku 2014 a využívá technologie ORC. Bližší informace jsou uvedeny v tab. 7-3. [18; 20]

## Unterhaching

Unterhaching je teplárna v oblasti Molasse poblíž Mnichova. V provozu je od roku 2007 a využívá technologie Kalinova cyklu. Bližší informace jsou uvedeny v tab. 7-3. [18; 20]

## Grünwald

Grünwald, někdy také nazýváno Laufzorn se nachází nedaleko od již zmiňované teplárny Unterhaching. Zařízení bylo uvedeno do provozu roku 2014 a využívá technologie ORC. Bližší informace jsou uvedeny v tab. 7-3. [18; 20]

## Landau in der Pfalz

Teplárna Landau in der Pfalz se nachází v Hornorýnské nížině poblíž města Landau in der Pfalz a byla uvedena do provozu v roce 2007. Teplárna využívá technologie ORC. V současné době neprodukuje elektrickou energii. Bližší informace jsou uvedeny v tab. 7-3. [18; 20]

## Kirchweidach

Teplárna Kirchweidach se nachází v oblasti pánve Molasse v blízkosti města Kirchweidach a do provozu byla uvedena v roce 2015. Zařízení využívá technologie ORC a hloubka vrtu přesahuje 4000 m. V současné době neprodukuje elektrickou energii. Bližší informace jsou uvedeny v tab. 7-3. [18; 20]

## Neustadt-Glewe

Teplárna Neustadt-Glewe je nejstarší geotermální zařízení na území Německa a nachází poblíž města Ludwigslust. Zařízení využívá ORC a původně se jednalo pouze o výtopnu, která byla uvedena do provozu v roce 1995. V roce 2003 bylo rozšířeno o jednotku k výrobě elektrické energie. V současné době funguje pouze jako výtopna a část zařízení sloužící k výrobě elektrické energie je mimo provoz. Bližší informace jsou uvedeny v tab. 7-3. [18; 20]

**Legenda k tab. 7-3 a tab. 7-4.:**

$P_t$ - instalovaný tepelný výkon, $P_e$ – instalovaný elektrický výkon, t – teplota vody, h – hloubka vrtu, $E_t$ – roční produkce tepelné energie, $E_e$ – roční produkce elektrické energie

**Pozn. k tab. 7-3 a tab. 7-4:** Některé hodnoty instalovaných elektrických výkonů jsou uvedeny v závorkách, protože tato zařízení v současné době nevyrábějí elektrickou energii.

| Název | Lokace | Stav teplo/elektřina | Technologie | $P_t$ | $P_e$ | t | h | m | $E_t$ | $E_e$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | MW | MW | $^o$ C | m | kg/s | GWh /rok | GWh /rok |
| Sauerlach | Mnichov | on/on | ORC | 4 | 5,5 | 140 | 4480 | 110 | 4,74 | 28,17 |
| Traunreut | Trostberg | on/off | ORC | 12 | (5,5) | 120 | 4655 | 165 | 31 | N/A |
| Taufkirchen | Mnichov | on/on | KC | 35 | 4,3 | 136 | 3696 | 120 | 65 | 26 |
| Grünwald | Mnichov | on/on | ORC | 40 | 4,3 | 135 | 3755 | 140 | 59,58 | 10,65 |
| Unterhaching | Mnichov | on/on | KC | 38 | 3,36 | 123,7 | 3350 | 140 | 85,95 | 7,33 |
| Landau in der Pfalz | | on/off | ORC | 5 | (0,79) | 159 | 3291 | 40 | 3 | N/A |
| Kirchweidach | | on/off | ORC | 12 | (0,68) | 127 | 4000 | 105 | 48,5 | N/A |
| Neustadt-Glewe | Ludwigslust | on/off | ORC | 4 | (0,5) | 99 | 2450 | 35 | 18,33 | N/A |
| Suma | - | - | - | 150 | 17,46 | - | - | - | 316,1 | 72,15 |

Tab. 7-3: Shrnutí geotermálních tepláren na území Německa. Seřazeno dle instalovaného elektrického výkonu [18; 20]

### 7.3.2 Geotermální elektrárny na území Německa

#### Kirchstockach

Geotermální elektrárna Kirchstockach se nachází v oblasti Molasse poblíž Mnichova a jedná se o zařízení s největší roční produkcí elektrické energie v Německu. Tato elektrárna byla uvedena do provozu v roce 2013 a využívá technologie ORC. Bližší informace jsou uvedeny v tab. 7-4. [18; 20]

#### Dürrnhar

Elektrárna Dürrnhar byla uvedena do provozu v roce 2012 a nachází se poblíž již zmiňované elektrárny Kirchstockach, tedy v oblasti Molasse poblíž Mnichova. Stejně jako tato

elektrárna i Dürrnhar využívá technologie ORC a roční produkce elektrické energie v obou elektrárnách jsou velmi podobné. Bližší informace jsou uvedeny v tab. 7-4. [18; 20]

## Brühl

Elektrárna Brühl se nachází poblíž stejnojmenného města Brühl v oblasti Hornorýnské nížiny. Elektrárna dosud nebyla uvedena do provozu a je ve fázi výstavby. Plánovaný elektrický výkon tohoto zařízení je 6 MW. Bližší informace jsou uvedeny v tab. 7-4. [18; 20]

## Insheim

Elektrárna Insheim byla uvedena do provozu v roce 2012 a nachází se v Hornorýnské nížině poblíž města Insheim, zařízení využívá technologie ORC. Bližší informace jsou uvedeny v tab. 7-4. [18; 20]

## Bruchsal

Elektrárna Bruchsal se nachází v Hornorýnské nížině poblíž města Bruchsal. V soušasnosti tato elektrárna neprodukuje elektrickou energii. Její instalovaný elektrický výkon je 0,44 MW. V současné době neprodukuje elektrickou energii. Bližší informace jsou uvedeny v tab. 7-4. [18; 20]

| Název | Lokace | Stav | Technologie | $P_e$ | t | h | m | $E_e$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | MW | $^{o}$ C | m | kg/s | GWh/rok |
| Kirchstockach | Mnichov | on | ORC | 7 | 141 | 3882 | 135 | 31,5 |
| Dürrnhar | Mnichov | on | ORC | 7 | 141 | 3926 | 115 | 30,5 |
| Brühl | Trostberg | off | ORC | (6) | 153 | 3290 | 70 | N/A |
| Insheim | Mnichov | on | ORC | 4,3 | 165 | 3600 | 80 | 22,89 |
| Bruchsal | Mnichov | off | ORC | (0,44) | 131 | 2542 | 28 | N/A |
| Suma | - | - | - | 18,3 | - | - | - | 84,89 |

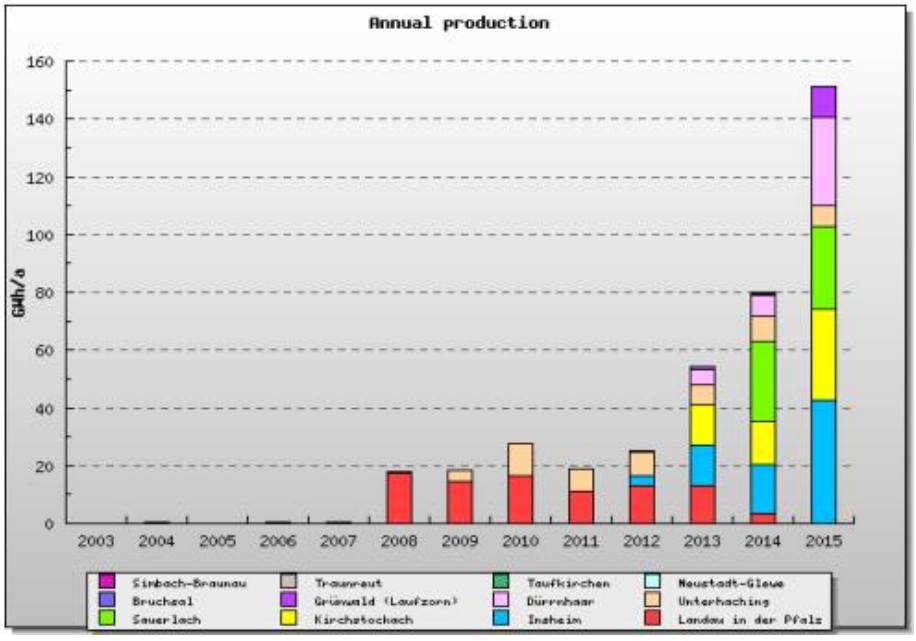
Tab. 7-4: Shrnutí geotermálních elektráren na území Německa. Seřazeno dle instalovaného elektrického výkonu [18; 20]

### 7.3.3 Shrnutí aktuálního stavu geotermálních elektráren a tepláren v Německu

Díky přehledům uvedených v předchozích podkapitolách lze konstatovat, že instalovaný elektrický výkon geotermálních tepláren a elektráren na území Německa, vyjma zařízení, která v současné době nevyrábí elektrickou energii, je roven přibližně 35,76 MW a roční produkce elektrické energie se pohybuje kolem hodnoty 157 GWh/rok. V tab. 7-5 se nachází srovnání instalovaných elektrických výkonů tepláren a elektráren na území Německa. Na obr. 7-4 je znázorněn časový vývoj roční produkce elektrické energie z geotermálních tepláren a elektráren v Německu. [20]

| | Instalovaný elektrický výkon zařízení | | |
|---|---|---|---|
| | aktuálně v provozu | aktuálně mimo provoz | všech |
| Teplárny | 17,46 MW | 7,47 | 24,93 |
| Elektrárny | 18,3 MW | 6,44 | 24,74 |
| Celkem | 35,76 | 13,91 | 49,67 |

Tab. 7-5: Přehled aktuálního instalovaného elektrického výkonu geotermálních elektráren a tepláren na území Německa [20]




Obr. 7-4: Časový vývoj roční produkce elektrické energie z geotermálních elektráren a tepláren na území Německa [20]

# 8. Budoucnost geotermální energetiky v Evropě

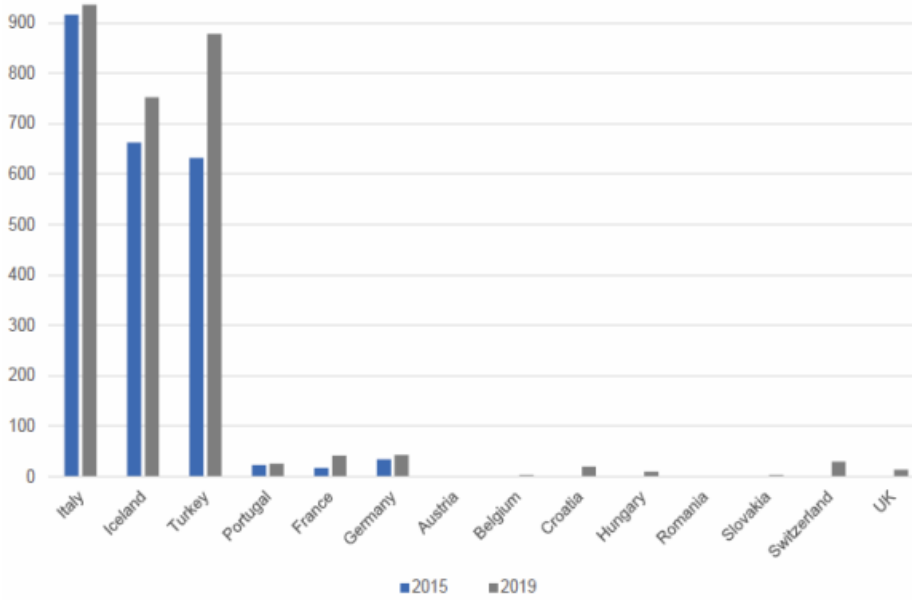
Budoucnost geotermální energetiky v Evropě je spjata s plány NREAP[21], které představila Evropská komise v roce 2009. Tyto plány předpokládají, že členské státy EU budou schopny v roce 2020 pokrýt 20 % své energetické spotřeby obnovitelnými zdroji. V současné době je celkový instalovaný elektrický výkon zařízení v zemích, které jsou členy EU, přibližně 1 G a roční produkce elektrické energie z těchto zařízení se pohybuje okolo 6 TWh. Evropské země, které nejsou členy EU, hovoříme zde především o Islandu a Turecku, provozují aktuálně geotermální elektrárny a teplárny o celkovém instalovaném elektrickém výkonu přibližně 1,1 GW. Díky plánům NREAP by se měla hodnota instalovaného elektrického výkonu v zemích EU pro rok 2020 zvýšit až na 1,5 GW a roční produkce elektrické energie při využití geotermální energie by měla dosahovat hodnoty 12 TWh. V zemích, které jsou aktuálně mimo EU, by se měla podle těchto plánů zvýšit roční produkce elektrické energie z geotermálních zdrojů pro rok 2020 až na hodnotu 123 TWh. Plány NREAP zahrnují také další scénáře, které jsou zaměřeny na rok 2030 a 2050. V roce 2030 je předpoklad, že roční produkce elektrické energie z geotermálních zdrojů v zemích EU, by měla dosahovat hodnoty 34 TWh, čímž by měla takto získaná elektřina pokrýt 1 % celkové evropské produkce elektrické energie. V zemích mimo, které jsou aktuálně mimo EU, by měla hodnota roční produkce elektrické energie z geotermálních zdrojů dosahovat hodnoty 136 TWh. Scénář pro rok 2050 je poměrně ambiciózní a uvažuje, že celková roční produkce elektrické energie z geotermálních zdrojů v EU by měla dosahovat hodnot až 2570 TWh, čímž by pokrývala téměř 50% celkové produkce elektrické energie v EU. Zároveň tento scénář poukazuje na země mimo EU, aktuálně se jedná o Island, Turecko, Velkou Británii a Švýcarsko. Jestliže budeme uvažovat globálně celou Evropu, tak dle scénáře pro rok 2050, by měla hodnota roční produkce elektrické energie z geotermálních zdrojů, dosahovat hodnoty až 4000 TWh. Scénář pro rok 2050 uvažuje především klesající cenu elektřiny získané z geotermálních zdrojů a nové inovativní technologie, které by měly být pilířem tohoto ambiciózního plánu. Právě cena elektrické energie z geotermálních zdrojů v současnosti svazuje toto odvětví od většího rozmachu. Po ekonomických studiích však odborníci došli k závěru, že ceny elektřiny z geotermálních zdrojů pro scénáře 2020, 2030 a 2050 by měly klesnout na hodnoty 200 EURO/MWh, 150 EURO/MWh a 100 EURO/MWh. V tab. 8-1 jsou shrnuty scénáře pro rok 2020, 2030 a 2050 z hlediska roční produkce elektrické energie v TWh pro nově plánované geotermální elektrárny. [14; 31]

[21] National Renewable Energy Action Plans

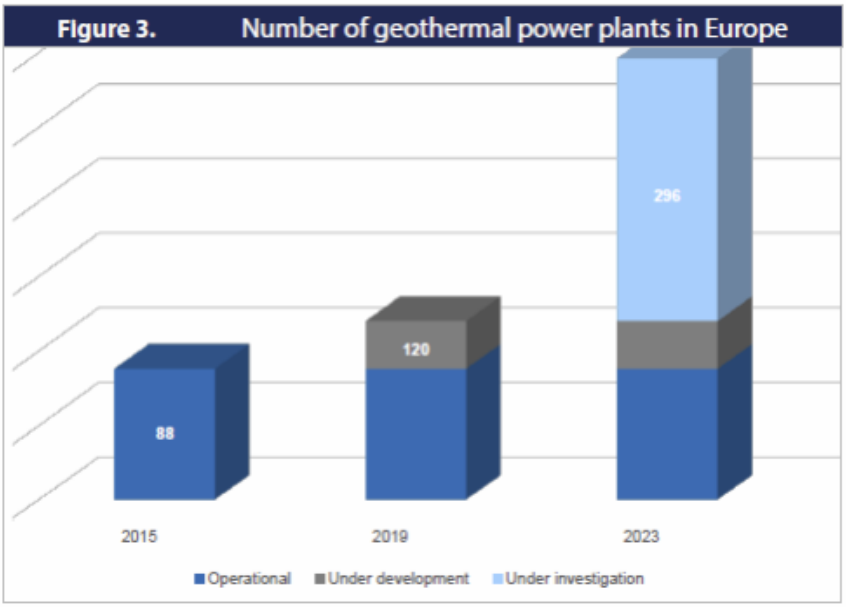
| Country | Economic Potential (in TWh) | | |
|---|---|---|---|
| | 2020 | 2030 | 2050 |
| AUSTRIA | 0 | 0 | 67 |
| BELGIUM | 0 | 0 | 22 |
| BULGARIA | 0 | 0 | 72 |
| CROATIA | 1 | 3 | 50 |
| CZECH REPUBLIC | 0 | 0 | 31 |
| DENMARK | 0 | 0 | 29 |
| ESTONIA | 0 | 0 | 2 |
| FRANCE | 0 | 0 | 653 |
| GERMANY | 0 | 1 | 346 |
| GREECE | 0 | 0 | 81 |
| HUNGARY | 9 | 17 | 174 |
| ICELAND | 73 | 74 | 322 |
| IRELAND | 0 | 0 | 27 |
| ITALY | 11 | 12 | 226 |
| LATVIA | 0 | 0 | 3 |
| LITHUANIA | 0 | 0 | 19 |
| LUXEMBOURG | 0 | 0 | 3 |
| POLAND | 0 | 0 | 144 |
| PORTUGAL | 0 | 0 | 63 |
| ROMANIA | 0 | 0 | 105 |
| SLOVAKIA | 0 | 1 | 55 |
| SLOVENIA | 0 | 0 | 8 |
| SPAIN | 0 | 1 | 349 |
| SWEDEN | 0 | 0 | 1 |
| SWITZERLAND | 0 | 0 | 43 |
| THE NETHERLANDS | 0 | 0 | 52 |
| TURKEY | 50 | 62 | 966 |
| UNITED KINGDOM | 0 | 0 | 42 |

Tab. 8-1: Shrnutí scénářů pro rok 2020, 2030 a 2050 z hlediska roční produkce elektrické energie v TWh pro plánované nově vystavěné geotermální elektárny [31]

Na obr. 8-1 je v grafu znázorněn instalovaný elektrický výkon geotermálních elektráren v Evropě pro rok 2015 a také předpokládaný instalovaný elektrický výkon pro rok 2019. Na obr. 8-2 je v grafu znázorněn celkový počet geotermálních elektráren pro rok 2015 a také předpokládaná výstavba do roku 2023. [14; 15]

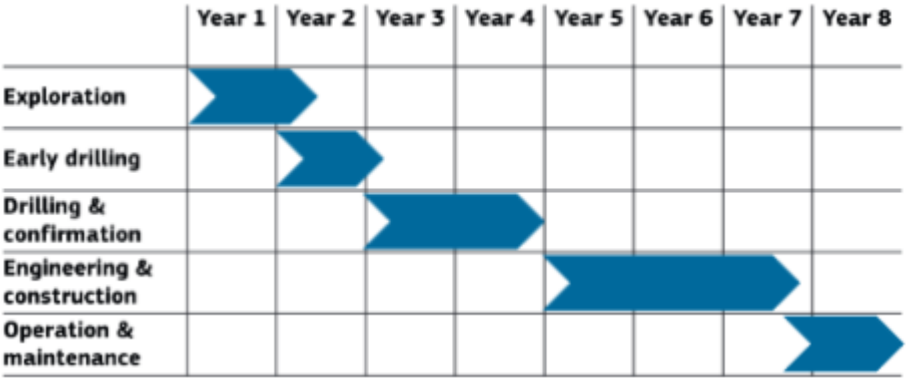



Obr. 8-1: Instalovaná kapacita elektrických výkonu [MW] v jednotlivých zemích. Srovnání roku 2015 a předpokladu v roce 2019. [14]




Obr. 8-2: Graf shrnující počet geotermálních zařízení v provozu, ve výstavbě a ve fázi plánování. [14]

V kontextu s předchozím s předchozím grafem, v kterém je uveden počet zařízení, která jsou ve výstavbě, či ve fázi plánování, bych rád zmínil, že celý proces realizace projektu výstavby geotermální elektrárny, od průzkumu oblasti až po její spuštění do provozu trvá přibližně 8 let. K tomuto času je však nutno přičíst i dobu, než je samotný projekt schválen. Jednání ohledně projektu a jeho následné schválení trvá minimálně 3 roky, obvykle je tomu však mnohem déle. Na obr. 8-3 je znázorněn časový plán výstavby geotermální elektrárny. [14]




Obr. 8-3: Časový průběh výstavby zařízení využívajícího geotermální energii [14]

# 9. Vstupní parametry pro výpočtovou část

Pro výpočtovou část ve smyslu zadání byly zvoleny následující evropské geotermální elektrárny a teplárny, které využívají technologie SFS a DFS. Parametry použité ve výpočtové části pro vybraná zařízení, jsou uvedeny v jednotlivých podkapitolách níže.

## 9.1 Geotermální elektrárna Reykjanes

Geotermální elektrárna Reykjanes byla uvedena do provozu v roce 2006. V současné době jsou v provozu dvě turbíny o výkonu 50MW, avšak v plánu je rozšíření výkonu o dalších 80 MW. Celkový průtok ze všech produkčních vrtů se v oblasti Reykjanes poměrně výrazně mění s časem, hodnota použitá pro výpočet byla naměřena v roce 2013, téměř jistě se liší od současného stavu. V tab. 9-1. jsou uvedeny další údaje. [13; 33]

| **Základní parametry** | |
|---|---|
| Lokalita | Reykjanes, Island |
| Technologie | SFS |
| Počet turbín | 2 |
| Výkon elektrárny [MW] | 100 MW |
| Průměrná teplota vody z vrtu [$^{o}$C] | 290 |
| Průměrný tlak vody z vrtu [MPa] | 7,4 |
| Tlak v kondenzátoru [MPa] | 0,01 |
| Průměrný celkový průtok [kg/s] | 518 |
| Hloubka vrtu [m] | 2700 |

Tab. 9-1: Parametry geotermální elektrárny Reykjanes [13; 33]

## 9.2 Geotermální teplárna Nesjavellir

Geotermální teplárna Nesjavellir vznikla jako výtopna zásobující hlavní město Islandu Reykjavík, roku 1996 byla však spuštěna i dvojice turbín o elektrickém výkonu 2x30 MW. Dnes má instalovaný elektrický výkon 120 MW a instalovaný tepelný výkon 300 MW. I přes rozsáhlou rešerši se mi nepodařilo přesně určit celkový hmotnostní tok pro teplárnu Nesjavellir. V knize Ronalda DiPippa [1] lze nalézt schéma teplárny Nesjavellir, ve kterém je uveden průtok pro jednotky 1 a 2. Tuto hodnotu jsem tedy přepočítal pro 4 jednotky a využil ji při svém výpočtu. Bližší informace jsou uvedeny v tab. 9-2. [1]

| **Základní parametry** | |
|---|---|
| Lokalita | Nesjavellir, Island |
| Technologie | SFS |
| Počet turbín | 4 |
| Elektrický výkon elektrárny [MW] | 120 MW |
| Tepelný výkon elektrárny [MW] | 300 MW |
| Průměrný tlak vody z vrtů [MPa] | 6,9 |
| Tlak v kondenzátoru [MPa] | 0,0215 |
| Průměrný celkový průtok [kg/s] | 1060 |
| Průměrná teplota vody z vrtů [$^{o}$C] | 285 |
| Hloubka vrtu [m] | 3000 |

Tab. 9-2: Parametry geotermální teplárny Nesjavellir [1]

## 9.3 Geotermální elektrárna Krafla

Geotermální elektrárna Krafla se nachází poblíž vulkánu Krafla na Islandu a byla uvedena do provozu v roce 1977. Celkový instalovaný elektrický výkon je v současnosti 60 MW. V průběhu rešerše jsem byl schopen určit pouze průtok páry v jedné turbíně, celkový hmotnostní tok je tedy pouze přibližný a vychází právě z průtoku páry turbínou. Elektrárna využívá technologie DFS. Další informace jsou uvedeny v tab. 9-3. [32; 34; 35]

| **Základní parametry** | |
|---|---|
| Lokalita | Krafla, Island |
| Rok spuštění | 1977, 1996 |
| Technologie | DFS |
| Počet turbín | 2 |
| Elektrický výkon elektrárny [MW] | 60 MW |
| Průměrný tlak vody z vrtů [MPa] | 6,41 |
| Tlak v kondenzátoru [MPa] | 0,0119 |
| Průměrný celkový průtok [kg/s] | 273 |
| Průměrná teplota vody z vrtů [$^{o}$C] | 300 |
| Hloubka vrtu [m] | 2200 |

Tab. 9-3: Parametry geotermální elektrárny Krafla [32; 34; 35]

## 9.4 Geotermální elektrárna Germencik

Geotermální elektrárna Germencik se nachází v oblasti Aydin v Turecku a byla uvedena do provozu v roce 2009. Její instalovaný elektrickým výkon je 47,4 MW. Elektrárna využívá technologie DFS. Tlak v kondenzátoru se mi i přes rozsáhlou rešerši nepodařilo určit, hodnota byla tedy zvolena na základě běžného rozsahu hodnot tohoto tlaku u jiných geotermálních elektráren s DFS. Další informace jsou uvedeny v tab. 9-4. [1; 26; 27]

| **Základní parametry** | |
|---|---|
| Lokalita | Aydin, Turecko |
| Rok spuštění | 2009 |
| Technologie | DFS |
| Počet turbín | 1 |
| Elektrický výkon elektrárny [MW] | 47,4 MW |
| Průměrný tlak vody z vrtů [MPa] | 2,21 |
| Tlak v kondenzátoru [MPa] | 0,01 |
| Průměrný celkový průtok [kg/s] | 674,4 |
| Průměrná teplota vody z vrtů [$^{o}$C] | 218 |
| Hloubka vrtu [m] | - |

Tab. 9-4: Parametry geotermální elektrárny Germencik [1; 26; 27]

# 10. Výpočtová část

V této části práce je proveden zjednodušený bilanční přepočet tepelných schémat 4 vybraných evropských GTE s technologií single a double flash. Výpočty vycházejí z dostupných parametrů geotermálních zdrojů a elektráren v daných lokalitách. Cílem je ověřit jaké poměrné navýšení výkonu umožňuje přechod od SFS ke složitějšímu DFS. Dělicí tlaky jsou dílčím způsobem optimalizovány na dosažení maximálního výkonu. Ostatní neznámé parametry jsou voleny v rozsahu obvyklých hodnot. Výpočty jsou podstatně zjednodušené - zanedbávám tlakové ztráty v potrubí při přepravě vody z vrtu, veškerá pára je využita v turbíně - neřeším problematiku odsávání nekondenzujících plynů, uvažuji páru vzniklou v separátoru bez kapek vody a příměsí, tedy čistou sytou páru a přepočet dělám pouze v rámci jedné imaginární turbíny, která zahrnuje výkon všech jednotlivých turbín a jako vstupní hodnoty používám hodnoty ze všech produkčních vrtů.

## 10.1 Seznam rovnic pro přepočet systému SFS

K bilančním přepočtům SFS systémů byly použity níže uvedené rovnice (10.1 až 10.5) a také T-s diagram, který je uveden na obr. 5-2. Při výpočtu byl zvolen tlak $p_2$ v určitém rozsahu vhodném pro danou elektrárnu. Vypočtené hodnoty v tabulkách a grafy závislosti elektrického výkonu $P_{el}$ a tlaku $p_2$ jsou uvedeny v jednotlivých podkapitolách.

$$\boldsymbol{h_1 = h_2} \tag{10.1}$$

$\mathrm{h}_1$ – entalpie vody na mezi sytosti kapaliny před separováním [kJ/kg] (bod 1 na obr. 5-2)

$\mathrm{h}_2$ – entalpie mokré páry při tlaku $\mathrm{p}_2$ v separátoru [kJ/kg] (bod 2 na obr. 5-2)

$$\boldsymbol{x_2 = \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_3}} \tag{10.2}$$

$\mathrm{x}_2$ – suchost mokré páry [%]

$\mathrm{h}_3$ – entalpie vody na mezi sytosti kapaliny při tlaku $\mathrm{p}_2$ v separátoru [kJ/kg]

(bod 3 na obr. 5-2)

$\mathrm{h}_4$ – entalpie páry na mezi sytosti páry při tlaku $\mathrm{p}_2$ v separátoru [kJ/kg]

(bod 4 na obr. 5-2)

$$\boldsymbol{\dot{m}_4 = \dot{m} \cdot x_2} \tag{10.3}$$

$\dot{\mathrm{m}}_4$ – hmotnostní průtok páry expandující v turbíně [kg/s]

$\dot{\mathrm{m}}$ – celkový hmotnostní průtok [kg/s]

$$\boldsymbol{h_5 = -\eta_T \cdot (h_4 - h_{5S}) + h_4} \quad (10.4)$$

$h_{5S}$ – entalpie páry po izoentropické expanzi při emisním tlaku (tlaku v kondenzátoru) [kJ/kg] (bod 5S na obr. 5-2)

$h_5$ – reálná entalpie páry po expanzi v turbíně [kJ/kg] (bod 5 na obr. 5-2)

$$\boldsymbol{P_{el} = \dot{m}_4 \cdot (h_4 - h_5) \cdot \eta_G} \quad (10.5)$$

$P_{el}$ – elektrický výkon při použití systému SFS [MW]

## 10.2 Seznam rovnic pro přepočet systému DFS

K bilančním přepočtům tepelných schémat systémů s DFS byly použity níže uvedené rovnice (10.6-10.15) a T-s diagram na obr. 5-4. Při přepočtu byl volen tlak $p_2$ a $p_6$ tak, aby bylo dosaženo pokud možno nejvyššího elektrického výkonu.

$$\boldsymbol{h_1 = h_2} \quad (10.6)$$

$$\boldsymbol{h_3 = h_6} \quad (10.7)$$

$h_1$ – entalpie vody na mezi sytosti kapaliny před separováním [kJ/kg] (bod 1 na obr. 5-4)

$h_2$ – entalpie mokré páry při tlaku $p_2$ v separátoru [kJ/kg] (bod 2 na obr. 5-4)

$h_3$ – entalpie vody na mezi sytosti kapaliny při tlaku $p_2$ v separátoru [kJ/kg] (bod 3 na obr. 5-4)

$h_6$ – entalpie mokré páry při tlaku $p_6$ ve flash jednotce [kJ/kg] (bod 6 na obr. 5-4)

$$\boldsymbol{x_2 = \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_3}} \quad (10.8)$$

$$\boldsymbol{x_6 = \frac{h_3 - h_7}{h_8 - h_7}} \quad (10.9)$$

$x_2$ – suchost mokré páry pro DFS [%]

$x_6$ – suchost mokré páry pro DFS [%]

$h_4$ – entalpie páry na mezi sytosti páry při tlaku $p_2$ v separátoru [kJ/kg] (bod 4 na obr. 5-4)

$h_7$ – entalpie vody na mezi sytosti kapaliny při tlaku $p_6$ ve flash jednotce [kJ/kg] (bod 7 na obr. 5-4)

$h_8$ – entalpie páry na mezi sytosti páry při tlaku $p_6$ ve flash jednotce [kJ/kg] (bod 8 na obr. 5-4)

$$\dot{m}_4 = \dot{m} \cdot x_2 \tag{10.10}$$

$$\dot{m}_8 = (1 - x_2) \cdot x_6 \cdot \dot{m} \tag{10.11}$$

$\dot{m}_4$ – hmotnostní průtok páry expandující ve VT části turbíny [kg/s]

$\dot{m}_8$ – hmotnostní průtok páry expandující v NT části turbíny [kg/s]

$\dot{m}$ – celkový hmotnostní průtok [kg/s]

$$h_5 = -\eta_T \cdot (h_4 - h_{5S}) + h_4 \tag{10.12}$$

$h_{5S}$ – entalpie páry po izoentropické expanzi ve VT části turbíny při emisním tlaku (tlaku v kondenzátoru) [kJ/kg] (bod 5S na obr. 5-4)

$h_5$ – reálná entalpie páry po expanzi ve VT části turbíny [kJ/kg] (bod 5 na obr. 5-4)

$$h_9 = \frac{x_2 \cdot h_5 + (1 - x_2) \cdot x_6 \cdot h_8}{x_2 + (1 - x_2) \cdot x_6} \tag{10.13}$$

$h_9$ – reálná entalpie páry před expanzi v NT části turbíny [kJ/kg] (bod 9 na obr. 5-4)

$$h_{10} = -\eta_T \cdot (h_9 - h_{10S}) + h_9 \tag{10.14}$$

$h_{10S}$ – entalpie páry po izoentropické expanzi při emisním tlaku (tlaku v kondenzátoru) [kJ/kg] (bod 10S na obr. 5-4)

$h_{10}$ – reálná entalpie páry po expanzi v NT části turbíny [kJ/kg] (bod 10 na obr. 5-4)

$$P_{el} = [\dot{m}_4 \cdot (h_4 - h_5) + (\dot{m}_4 + \dot{m}_8) \cdot (h_9 - h_{10})] \cdot \eta_G \tag{10.15}$$

$P_{el}$ – elektrický výkon při použití systému DFS [MW]

## 10.3 Termodynamická účinnost turbíny - $\eta_T$ [%]

Lze charakterizovat jako podíl skutečného entalpického spádu a ideálního entalpického spádu. Pro turbíny v oblasti geotermální energetiky se účinnost pohybuje okolo 85 %. Ve výpočtech je tedy použita právě tato hodnota. [13]

## 10.4 Účinnost generátoru - $\eta_G$ [%]

Jedná se o účinnost vztaženou vůči ztrátám v generátoru. V oblasti geotermální energetiky se tyto účinnosti pohybují v rozmezí 96-99 %. Ve svých výpočtech uvažuji generátor s účinností 99 %. [13]

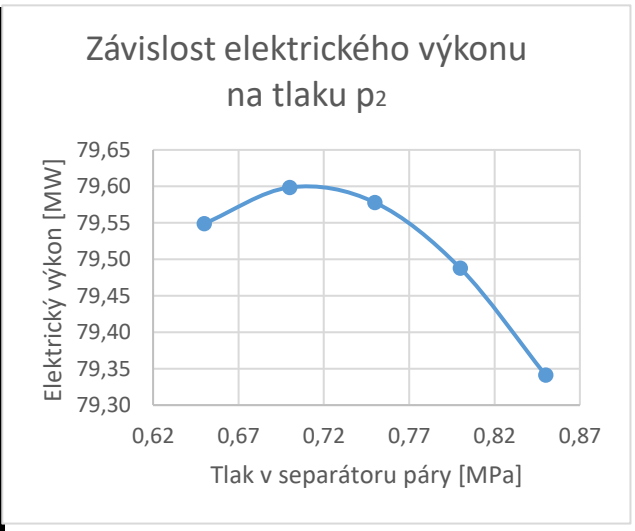
## 10.5 Bilanční přepočet GTE Reykjanes

$p_1 = 7{,}4\ MPa$ - průměrný tlak vody z vrtů
$p_k = 0{,}01\ MPa$ - průměrný tlak v kondenzátoru
$t_1 = 290\ ^0C$ - průměrná teplota vody z vrtů
$\dot{m} = 518\ kg/s$ - průměrný celkový průtok
$\eta_T = 0{,}85$ - účinnost turbíny
$\eta_G = 0{,}99$ - účinnost generátoru

Při bilančním přepočtu GTE Reykjanes je při použití SFS volen tlak $p_2$ v rozmezí 0,65-0,85 MPa při kroku 0,05 MPa. Při použití DFS technologie hledám optimální tlak $p_2$ v rozmezí 1,7-1,9 MPa při kroku 0,1 MPa a tlak ve flash jednotce $p_6$ volím v rozmezí 0,18-0,22 MPa při kroku 0,02 MPa. Spočtené hodnoty jsou shrnuty v tab. 10-1 a tab. 10-2 a grafy závislostí elektrických výkonů na tlaku $p_2$, resp. $p_6$ jsou znázorněny na obr. 10-1 a obr. 10-2.

### 10.5.1 Přepočet GTE Reykjanes v případě použití SFS technologie

| $p_2\ [MPa]$ | 0,65 | 0,7 | 0,75 | 0,8 | 0,85 |
|---|---|---|---|---|---|
| $h_2\ [kJ/kg]$ | 1287,7 | 1287,7 | 1287,7 | 1287,7 | 1287,7 |
| $h_3\ [kJ/kg]$ | 684,2 | 697,1 | 709,4 | 721,0 | 732,1 |
| $h_4\ [kJ/kg]$ | 2759,6 | 2762,7 | 2765,6 | 2768,3 | 2770,8 |
| $h_{5s}\ [kJ/kg]$ | 2132 | 2124 | 2116,5 | 2109,5 | 2102,9 |
| $h_5\ [kJ/kg]$ | 2226,1 | 2219,8 | 2213,9 | 2208,3 | 2203,1 |
| $x_2$ | 0,291 | 0,286 | 0,281 | 0,277 | 0,273 |
| $m_4\ [kg/kg]$ | 150,6 | 148,1 | 145,7 | 143,4 | 141,2 |
| $P_{el}\ [MW]$ | 79,55 | 79,60 | 79,58 | 79,49 | 79,34 |



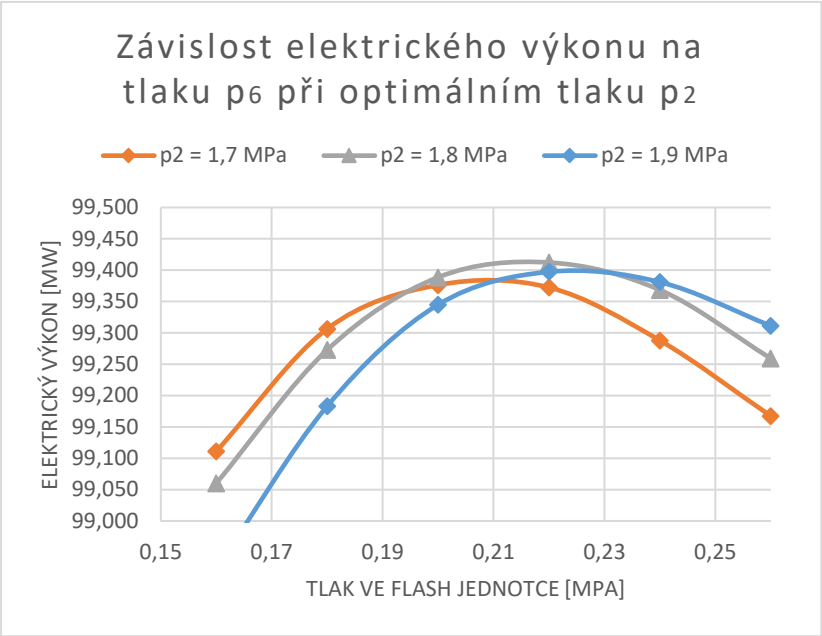

Tab. 10-1 (Vlevo): Shrnutí vypočtených hodnot GTE Reykjanes při použití SFS technologie

Obr. 10-1 (Vpravo): Graf závislosti elektrického GTE Reykjanes na tlaku $p_2$ při použití SFS

### 10.5.2 Přepočet GTE Reykjanes v případě použití DFS technologie

| $p_2\ [MPa]$ | 1,7 | | | 1,8 | | | 1,9 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $p_6\ [MPa]$ | 0,18 | 0,2 | 0,22 | 0,2 | 0,22 | 0,24 | 0,2 | 0,22 | 0,24 |
| $h_5\ [kJ/kg]$ | 2462,2 | 2475,9 | 2488,4 | 2469,2 | 2481,7 | 2493,2 | 2462,8 | 2475,2 | 2486,7 |
| $h_6\ [kJ/kg]$ | 871,9 | 871,9 | 871,9 | 884,6 | 884,6 | 884,6 | 896,8 | 896,8 | 896,8 |
| $h_7\ [kJ/kg]$ | 490,7 | 504,7 | 517,6 | 504,7 | 517,6 | 529,6 | 504,7 | 517,6 | 529,6 |
| $h_8\ [kJ/kg]$ | 2696 | 2701,4 | 2706,2 | 2706,2 | 2710,6 | 2714,6 | 2706,2 | 2710,6 | 2714,6 |
| $h_9\ [kJ/kg]$ | 2226,1 | 2219,8 | 2213,9 | 2561,8 | 2569,5 | 2576,6 | 2561,6 | 2569,1 | 2576,0 |
| $h_{10}\ [kJ/kg]$ | 2209,2 | 2204,4 | 2200,0 | 2204,0 | 2199,5 | 2195,5 | 2203,8 | 2199,2 | 2195,0 |
| $x_6$ | 0,172 | 0,167 | 0,162 | 0,173 | 0,167 | 0,162 | 0,178 | 0,173 | 0,168 |
| $m_8\ [kg/kg]$ | 69,91 | 67,62 | 65,49 | 70,44 | 68,31 | 66,32 | 73,19 | 71,05 | 69,06 |
| $P_{el}\ [MW]$ | 99,31 | 99,38 | 99,37 | 99,39 | 99,41 | 99,37 | 99,34 | 99,40 | 99,38 |

Tab. 10-2: Shrnutí vypočtených hodnot GTE Reykjanes při použití DFS technologie




Obr. 10-2: Graf závislosti elektrického výkonu GTE Reykjanes na tlaku $p_6$ při optimálním tlaku $p_2$ za použití DFS technologie

### 10.5.3 Srovnání bilančních přepočtů SFS a DFS pro GTE Reykjanes

Z předchozích podkapitol věnovaných bilančním přepočtům GTE Reykjanes lze konstatovat, že při použití SFS technologie je optimální tlak v separátoru páry přibližně 0,71 MPa a elektrický výkon při tomto tlaku je roven přibližně 79,6 MW. Při použití DFS technologie byl určen optimální tlak v separátoru páry přibližně 1,8 MPa a v závislosti na této hodnotě byl určen také tlak ve flash jednotce přibližně 0,22 MPa. Při těchto hodnotách tlaků byl dosažen elektrický výkon přibližně 99,41 MW. Z těchto výsledků lze konstatovat, že při přechodu z DFS na SFS získáme poměrné navýšení elektrického výkonu přibližně 25%. Vypočtené hodnoty se liší od reálných pravděpodobně kvůli celkovému zjednodušení výpočtu, avšak výpočet SFS i DFS byl proveden se stejnými vstupními parametry a se stejnými zjednodušeními, tudíž výsledné poměrné navýšení tyto faktory výrazně neovlivnily.

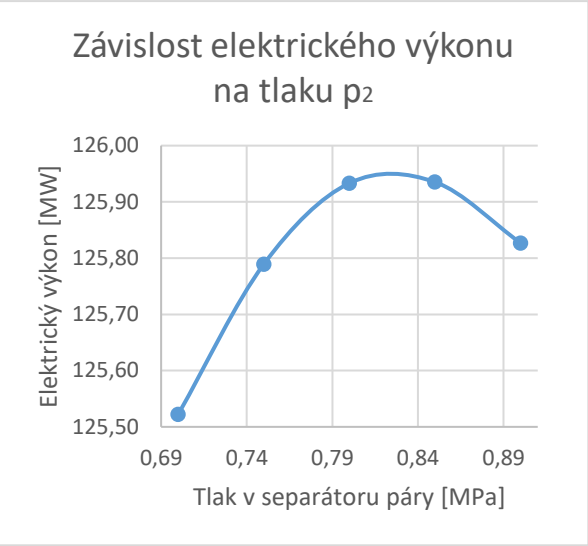
## 10.6 Bilanční přepočet pro GTE Nesjavellir

$p_1 = 6{,}9\ MPa$ - průměrný tlak vody z vrtů
$p_k = 0{,}0215\ MPa$ - tlak v kondenzátoru
$t_1 = 285\ ^0C$ - průměrná teplota vody z vrtů
$\dot{m} = 1000\ kg \cdot s^{-1}$ - celkový hmotnostní tok ze všech vrtů
$\eta_T = 0{,}85$ - účinnost turbíny
$\eta_G = 0{,}99$ - účinnost generátoru

Při bilančním přepočtu GTE Nesjavellir je při použití SFS volen tlak $p_2$ v rozmezí 0,7-0,9 MPa při kroku 0,05 MPa. Při použití DFS technologie hledám optimální tlak $p_2$ v rozmezí 1,8-2 MPa při kroku 0,1 MPa a tlak ve flash jednotce $p_6$ volím v rozmezí 0,26-0,32 MPa při kroku 0,02 MPa. Spočtené hodnoty jsou shrnuty v tab. 10-3 a tab. 10-4 a grafy závislostí elektrických výkonů na tlaku $p_2$, resp. $p_6$ jsou znázorněny na obr. 10-3 a obr. 10-4.

### 10.6.1 Přepočet GTE Nesjavellir v případě použití SFS technologie

| $p_2\ [MPa]$ | 0,7 | 0,75 | 0,8 | 0,85 | 0,9 |
|---|---|---|---|---|---|
| $h_2\ [kJ/kg]$ | 1263 | 1263 | 1263 | 1263 | 1263 |
| $h_3\ [kJ/kg]$ | 697,1 | 709,4 | 721,0 | 732,1 | 742,7 |
| $h_4\ [kJ/kg]$ | 2762,7 | 2765,6 | 2768,3 | 2770,8 | 2773 |
| $h_{5s}\ [kJ/kg]$ | 2218,2 | 2210,4 | 2203 | 2196,1 | 2189,5 |
| $h_5\ [kJ/kg]$ | 2299,9 | 2293,7 | 2287,8 | 2282,3 | 2277,0 |
| $x_2$ | 0,274 | 0,269 | 0,265 | 0,260 | 0,256 |
| $m_4\ [kg/kg]$ | 273,95 | 269,24 | 264,73 | 260,41 | 256,26 |
| $P_{el}\ [MW]$ | 125,52 | 125,79 | 125,93 | 125,94 | 125,83 |

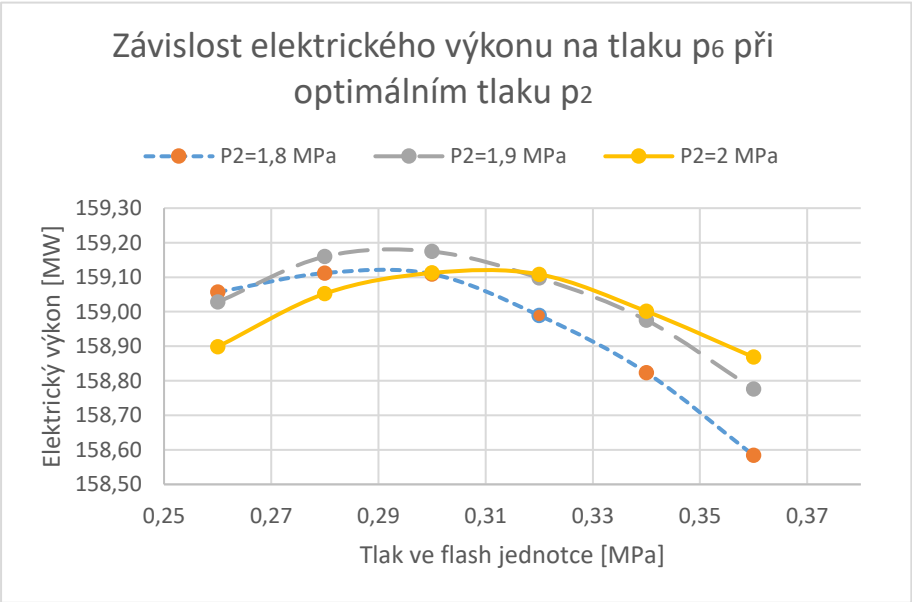



Tab. 10-3 (Vlevo): Shrnutí vypočtených hodnot GTE Nesjavellir při použití SFS
Obr. 10-3 (Vpravo):Graf závislosti elektrického výkonu GTE Nesjavellir na tlaku $p_2$ při použití SFS

### 10.6.2 Přepočet GTE Nesjavellir v případě použití DFS technologie

| $p_2\ [MPa]$ | 1,8 | | | 1,9 | | | 2 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $p_6\ [MPa]$ | 0,26 | 0,28 | 0,3 | 0,28 | 0,3 | 0,32 | 0,28 | 0,3 | 0,32 |
| $h_5\ [kJ/kg]$ | 2503,9 | 2514,0 | 2523,3 | 2507,4 | 2516,7 | 2525,6 | 2501,1 | 2510,4 | 2519,2 |
| $h_6\ [kJ/kg]$ | 884,6 | 884,6 | 884,6 | 896,8 | 896,8 | 896,8 | 908,6 | 908,6 | 908,6 |
| $h_7\ [kJ/kg]$ | 540,9 | 551,5 | 561,5 | 551,5 | 561,5 | 570,9 | 551,5 | 561,5 | 570,9 |
| $h_8\ [kJ/kg]$ | 2718,3 | 2721,7 | 2724,9 | 2721,7 | 2724,9 | 2727,9 | 2721,7 | 2724,9 | 2727,9 |
| $h_9\ [kJ/kg]$ | 2587,6 | 2593,6 | 2599,3 | 2593,1 | 2598,7 | 2604,0 | 2592,9 | 2598,4 | 2603,5 |
| $h_{10}\ [kJ/kg]$ | 2275,6 | 2272,0 | 2268,5 | 2271,5 | 2268,0 | 2264,8 | 2271,3 | 2267,7 | 2264,4 |
| $x_6$ | 0,158 | 0,154 | 0,149 | 0,159 | 0,155 | 0,151 | 0,165 | 0,160 | 0,157 |
| $m_8\ [kg/kg]$ | 126,61 | 123,12 | 119,80 | 128,5 | 125,2 | 122,0 | 133,71 | 130,38 | 127,20 |
| $P_{el}\ [MW]$ | 159,06 | 159,11 | 159,11 | 159,16 | 159,17 | 159,10 | 159,05 | 159,11 | 159,11 |

Tab. 10-4: Shrnutí vypočtených hodnot GTE Nesjavellir při použití DFS technologie




Obr. 10-4: Graf závislosti elektrického výkonu GTE Nesjavellir na tlaku $p_6$ při optimálním tlaku $p_2$ za použití DFS technologie

### 10.6.3 Srovnání bilančních přepočtů SFS a DFS pro GTE Nesjavellir

Z předchozích podkapitol lze konstatovat, že při použití SFS technologie je optimální tlak v separátoru páry přibližně 0,82 MPa a elektrický výkon při tomto tlaku je roven přibližně 125,96 MW. Při použití DFS technologie byl určen optimální tlak v separátoru páry přibližně 1,9 MPa a v závislosti na této hodnotě byl určen také tlak ve flash jednotce přibližně 0,3 MPa. Při těchto hodnotách tlaků byl dosažen elektrický výkon přibližně 159,17 MW. Z těchto výsledků lze konstatovat, že při přechodu z DFS na SFS získáme poměrné navýšení elektrického výkonu přibližně 26,3 %. Vypočtené hodnoty se liší od reálných pravděpodobně kvůli celkovému zjednodušení výpočtu, avšak výpočet SFS i DFS byl proveden se stejnými vstupními parametry a se stejnými zjednodušeními, tudíž výsledné poměrné navýšení tyto faktory výrazně neovlivnily.

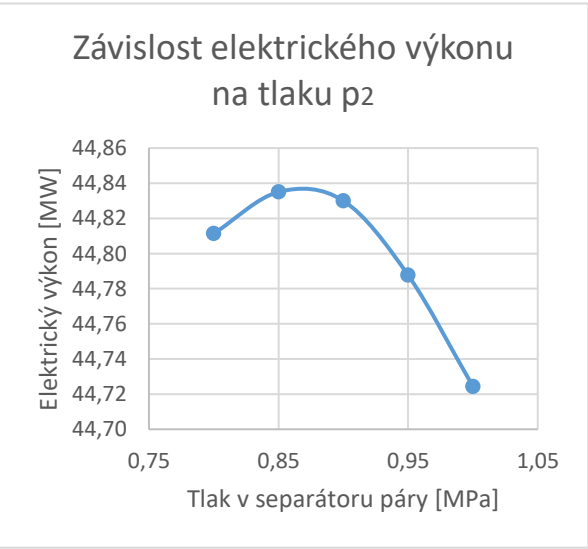
## 10.7 Bilanční přepočet pro GTE Krafla

$p_1 = 8{,}5\ MPa$ - průměrný tlak vody z vrtů
$p_k = 0{,}0119\ MPa$ - tlak v kondenzátoru
$t_1 = 300\ ^0C$ - průměrná teplota vody z vrtů
$\dot{m} = 273\ kg \cdot s^{-1}$ - celkový hmotnostní tok ze všech vrtů
$\eta_T = 0{,}85$ - účinnost turbíny
$\eta_G = 0{,}99$ - účinnost generátoru

Při bilančním přepočtu GTE Krafla je při použití SFS volen tlak $p_2$ v rozmezí 0,7-0,9 MPa při kroku 0,05 MPa. Při použití DFS technologie hledám optimální tlak $p_2$ v rozmezí 1,8-2 MPa při kroku 0,1 MPa a tlak ve flash jednotce $p_6$ volím v rozmezí 0,26-0,32 MPa při kroku 0,02 MPa. Spočtené hodnoty jsou shrnuty v tab. 10-5 a tab. 10-6 a grafy závislostí elektrických výkonů na tlaku $p_2$, resp. $p_6$ jsou znázorněny na obr. 10-5 a obr. 10-6.

### 10.7.1 Přepočet GTE Krafla v případě použití SFS technologie

| $p_2\ [MPa]$ | 0,8 | 0,85 | 0,9 | 0,95 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|
| $h_2\ [kJ/kg]$ | 1344,8 | 1344,8 | 1344,8 | 1344,8 | 1344,8 |
| $h_3\ [kJ/kg]$ | 721,0 | 732,1 | 742,7 | 752,9 | 762,7 |
| $h_4\ [kJ/kg]$ | 2768,3 | 2770,8 | 2773 | 2775,2 | 2777,1 |
| $h_{5s}\ [kJ/kg]$ | 2128,1 | 2121,4 | 2115,1 | 2109,1 | 2103,4 |
| $h_5\ [kJ/kg]$ | 2224,1 | 2218,8 | 2213,8 | 2209,0 | 2204,5 |
| $x_2$ | 0,305 | 0,301 | 0,297 | 0,293 | 0,289 |
| $m_4\ [kg/kg]$ | 83,18 | 82,04 | 80,96 | 79,90 | 78,89 |
| $P_{el}\ [MW]$ | 44,81 | 44,84 | 44,83 | 44,79 | 44,72 |

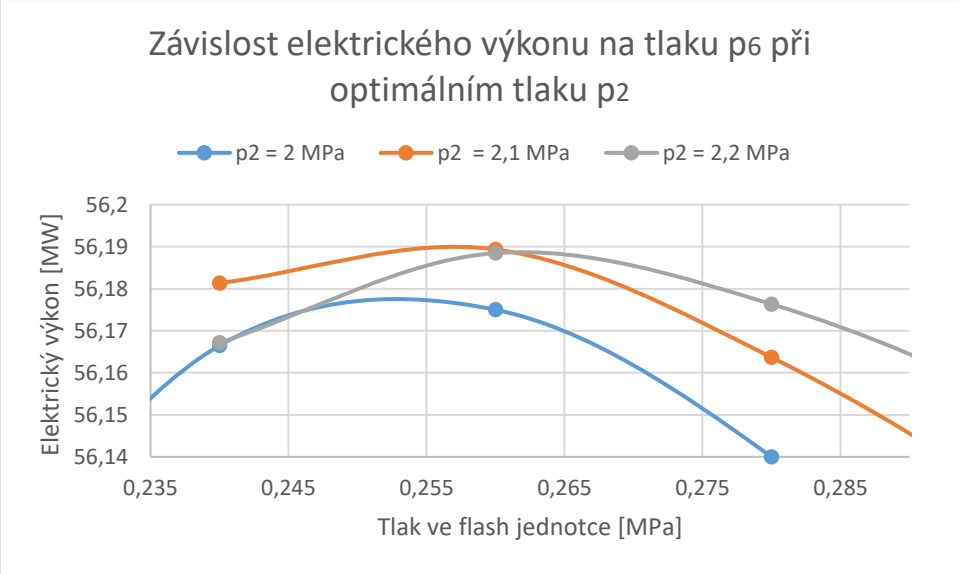



Tab. 10-5 (Vlevo): Shrnutí vypočtených hodnot GTE Krafla při použití SFS
Obr. 10-5 (Vpravo):Graf závislosti elektrického výkonu GTE Krafla na tlaku $p_2$ při použití SFS

### 10.7.2 Přepočet GTE Krafla v případě použití DFS technologie

| $p_2\ [MPa]$ | 2 | | | 2,1 | | | 2,2 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $p_6\ [MPa]$ | 0,22 | 0,24 | 0,26 | 0,28 | 0,3 | 0,32 | 0,28 | 0,3 | 0,32 |
| $h_5\ [kJ/kg]$ | 2469,1 | 2480,6 | 2491,2 | 2507,4 | 2516,7 | 2525,6 | 2501,1 | 2510,4 | 2519,2 |
| $h_6\ [kJ/kg]$ | 908,6 | 908,6 | 908,6 | 896,8 | 896,8 | 896,8 | 908,6 | 908,6 | 908,6 |
| $h_7\ [kJ/kg]$ | 517,6 | 529,6 | 540,9 | 551,5 | 561,5 | 570,9 | 551,5 | 561,5 | 570,9 |
| $h_8\ [kJ/kg]$ | 2710,6 | 2714,6 | 2718,3 | 2721,7 | 2724,9 | 2727,9 | 2721,7 | 2724,9 | 2727,9 |
| $h_9\ [kJ/kg]$ | 2559,1 | 2566,3 | 2573,0 | 2593,1 | 2598,7 | 2604,0 | 2592,9 | 2598,4 | 2603,5 |
| $h_{10}\ [kJ/kg]$ | 2202,8 | 2199,3 | 2202,8 | 2271,5 | 2268,0 | 2264,8 | 2271,3 | 2267,7 | 2264,4 |
| $x_6$ | 0,178 | 0,173 | 0,169 | 0,159 | 0,155 | 0,151 | 0,165 | 0,160 | 0,157 |
| $m_8\ [kg/kg]$ | 37,44 | 36,42 | 35,46 | 128,5 | 125,2 | 122,0 | 133,71 | 130,38 | 127,20 |
| $P_{el}\ [MW]$ | 56,155 | 56,185 | 56,185 | 56,184 | 56,195 | 56,162 | 56,163 | 56,186 | 56,183 |

Tab. 10-6: Shrnutí vypočtených hodnot GTE Krafla při použití DFS technologie




Obr. 10-6: Graf závislosti elektrického výkonu GTE Krafla na tlaku $p_6$ při optimálním tlaku $p_2$ za použití DFS technologie

### 10.7.3 Srovnání bilančních přepočtů SFS a DFS pro GTE Krafla

Z předchozích podkapitol lze konstatovat, že při použití SFS technologie je optimální tlak v separátoru páry přibližně 0,86 MPa a elektrický výkon při tomto tlaku je roven přibližně 44,85 MW. Při použití DFS technologie byl určen optimální tlak v separátoru páry přibližně 2,1 MPa a v závislosti na této hodnotě byl určen také tlak ve flash jednotce přibližně 0,258 MPa. Při těchto hodnotách tlaků byl dosažen elektrický výkon přibližně 56,19 MW. Z těchto výsledků lze konstatovat, že při přechodu z DFS na SFS získáme poměrné navýšení elektrického výkonu přibližně 25,3 %. Vypočtené hodnoty se liší od reálných pravděpodobně kvůli celkovému zjednodušení výpočtu, avšak výpočet SFS i DFS byl proveden se stejnými vstupními parametry a se stejnými zjednodušeními, tudíž výsledné poměrné navýšení tyto faktory výrazně neovlivnily.

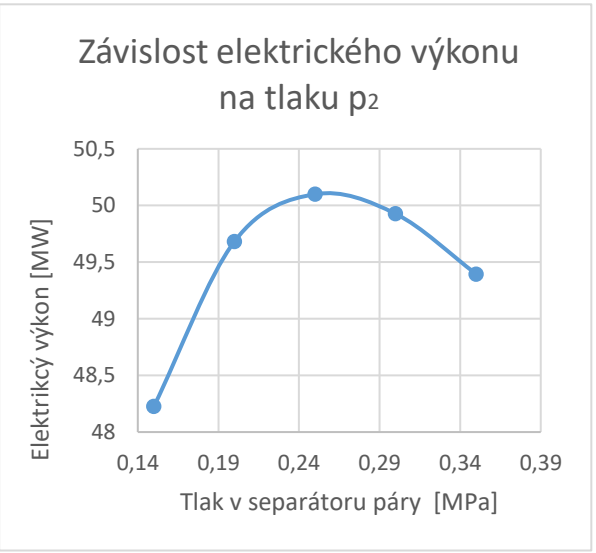
## 10.8 Bilanční přepočet pro GTE Germencik

$p_1 = 2{,}23\ MPa$ - průměrný tlak vody z vrtů
$p_k = 0{,}01\ MPa$ - tlak v kondenzátoru
$t_1 = 218\ ^0C$ - průměrná teplota vody z vrtů
$\dot{m} = 674{,}7\ kg \cdot s^{-1}$ - celkový hmotnostní tok ze všech vrtů
$\eta_T = 0{,}85$ - účinnost turbíny
$\eta_G = 0{,}99$ - účinnost generátoru

Při bilančním přepočtu GTE Germencik je při použití SFS volen tlak $p_2$ v rozmezí 0,7-0,9 MPa při kroku 0,05 MPa. Při použití DFS technologie hledám optimální tlak $p_2$ v rozmezí 1,8-2 MPa při kroku 0,1 MPa a tlak ve flash jednotce $p_6$ volím v rozmezí 0,26-0,32 MPa při kroku 0,02 MPa. Spočtené hodnoty jsou shrnuty v tab. 10-7 a tab. 10-8 a grafy závislostí elektrických výkonů na tlaku $p_2$, resp. $p_6$ jsou znázorněny na obr. 10-7 a obr. 10-8.

### 10.8.1 Přepočet GTE Germencik v případě použití SFS technologie

| $p_2\ [MPa]$ | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 |
|---|---|---|---|---|---|
| $h_2\ [kJ/kg]$ | 934,4 | 934,4 | 934,4 | 934,4 | 934,4 |
| $h_3\ [kJ/kg]$ | 467,1 | 504,7 | 535,4 | 561,5 | 584,3 |
| $h_4\ [kJ/kg]$ | 2693,1 | 2706,2 | 2716,5 | 2724,9 | 2732 |
| $h_{5s}\ [kJ/kg]$ | 2288,5 | 2257,9 | 2234,2 | 2214,8 | 2198,3 |
| $h_5\ [kJ/kg]$ | 2349,2 | 2325,1 | 2306,5 | 2291,3 | 2278,4 |
| $x_2$ | 0,210 | 0,195 | 0,183 | 0,172 | 0,163 |
| $m_4\ [kg/kg]$ | 141,65 | 131,70 | 123,44 | 116,31 | 109,98 |
| $P_{el}\ [MW]$ | 48,23 | 49,68 | 50,10 | 49,93 | 49,39 |

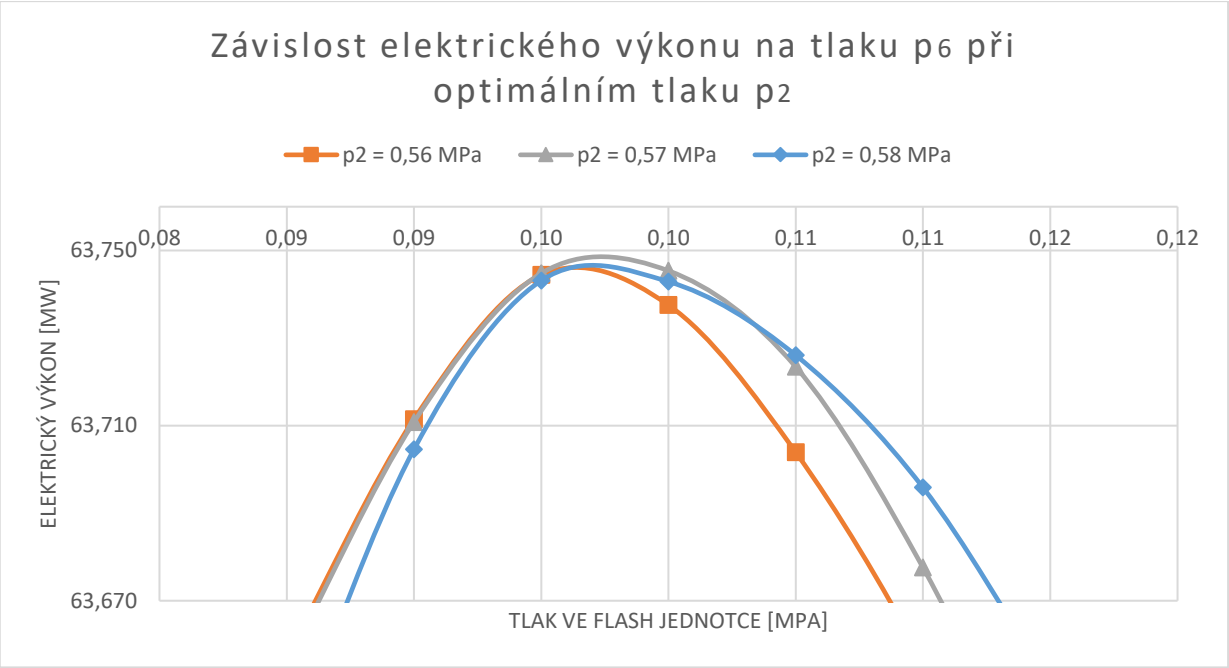



Tab. 10-7 (Vlevo): Shrnutí vypočtených hodnot GTE Germencik při použití SFS
Obr. 10-7 (Vpravo):Graf závislosti elektrického výkonu GTE Germencik na tlaku $p_2$ při použití SFS

### 10.8.2 Přepočet GTE Germencik v případě použití DFS technologie

| $p_2\ [MPa]$ | 0,56 | | | 0,57 | | | 0,58 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $p_6\ [MPa]$ | 0,09 | 0,095 | 0,1 | 0,095 | 0,1 | 0,105 | 0,095 | 0,1 | 0,105 |
| $h_5\ [kJ/kg]$ | 2490,4 | 2497,3 | 2504,1 | 2488,7 | 2495,7 | 2502,3 | 2493,9 | 2500,6 | 2506,9 |
| $h_6\ [kJ/kg]$ | 658,9 | 658,9 | 658,9 | 661,8 | 661,8 | 661,8 | 664,8 | 664,8 | 664,8 |
| $h_7\ [kJ/kg]$ | 405,1 | 411,4 | 417,4 | 405,1 | 411,4 | 417,4 | 411,4 | 417,4 | 423,2 |
| $h_8\ [kJ/kg]$ | 2670,3 | 2672,7 | 2674,9 | 2670,3 | 2672,7 | 2674,9 | 2672,7 | 2674,9 | 2677,1 |
| $h_9\ [kJ/kg]$ | 2566,9 | 2570,9 | 2574,8 | 2566,9 | 2570,9 | 2574,7 | 2570,9 | 2574,7 | 2578,4 |
| $h_{10}\ [kJ/kg]$ | 2300,9 | 2298,0 | 2295,4 | 2300,9 | 2298,1 | 2295,4 | 2298,1 | 2295,4 | 2292,9 |
| $x_6$ | 0,112 | 0,109 | 0,107 | 0,113 | 0,111 | 0,108 | 0,112 | 0,110 | 0,107 |
| $m_8\ [kg/kg]$ | 65,62 | 64,10 | 62,65 | 66,47 | 64,94 | 63,50 | 65,82 | 64,37 | 62,96 |
| $P_{el}\ [MW]$ | 63,711 | 63,744 | 63,738 | 63,745 | 63,745 | 63,723 | 63,743 | 63,743 | 63,726 |

Tab. 10-8: Shrnutí vypočtených hodnot GTE Germencik při použití DFS technologie




Obr. 10-8: Graf závislosti elektrického výkonu GTE Germencik na tlaku $p_6$ při optimálním tlaku $p_2$ za použití DFS technologie

### 10.8.3 Srovnání bilančních přepočtů SFS a DFS pro GTE Germencik

Z předchozích podkapitol lze konstatovat, že při použití SFS technologie je optimální tlak v separátoru páry přibližně 0,25 MPa a elektrický výkon při tomto tlaku je roven přibližně 50,1 MW. Při použití DFS technologie byl určen optimální tlak v separátoru páry přibližně 0,57 MPa a v závislosti na této hodnotě byl určen také tlak ve flash jednotce přibližně 0,102 MPa. Při těchto hodnotách tlaků byl dosažen elektrický výkon přibližně 63,75 MW. Z těchto výsledků lze konstatovat, že při přechodu z DFS na SFS získáme poměrné navýšení elektrického výkonu přibližně 27,2 %. Vypočtené hodnoty se liší od reálných pravděpodobně kvůli celkovému zjednodušení výpočtu, avšak výpočet SFS i DFS byl proveden se stejnými vstupními parametry a se stejnými zjednodušeními, tudíž výsledné poměrné navýšení tyto faktory výrazně neovlivnily.

# 11. Závěr

Práce se zaměřuje na geotermální elektrárny a teplárny v Evropě. Úvod pojednává o důležitých fyzikálních veličinách, využívaných v geotermální energetice. V další části je práce zaměřena na zdroje geotermální energie, jejich výskyt a procesy, které zapříčinily vznik geotermálních rezervoárů. Následně se práce zaměřuje na technologie, které se využívají v oblasti geotermální energetiky a jejich principy. Práce poté přechází do své hlavní části a tou je zmapování geotermálních tepláren a elektráren v Evropě. Zmapování Evropy z hlediska geotermální energetiky je realizováno v podobě podkapitol, kde každá podkapitola je zaměřená právě na jednu zemi Evropy, která využívá geotermální energii k výrobě elektrické energie. Samostatná kapitola je věnována Německu, které nemá příliš vhodné podmínky pro využití geotermální energie, přesto však patří do čela zemí Evropy, které tuto energii využívají. Kapitola zaměřená na evropské geotermální elektrárny a teplárny je zakončena pojednáním o budoucnosti tohoto odvětví energetiky v rámci plánů NREAP. V úplném závěru této práce je umístěna výpočtová část, v které jsou uskutečněny zjednodušené bilanční přepočty tepelných schémat pro 4 konkrétní geotermální elektrárny a teplárny. Výpočty obsahují množství zjednodušení a hodnoty, které byly výpočty získány, jsou shrnuty v tabulkách a grafech, které jsou uvedené v jednotlivých podkapitolách. Pro každou z vybraných GTE je proveden bilanční výpočet pro SFS i DFS technologie. Souhrnně lze na základě získaných výsledků konstatovat, že v použité oblasti parametrů geotermálních zdrojů umožňuje přechod od SFS ke složitější DFS technologii poměrné navýšení výkonu elektrárny o cca 25-27 %.

# Bibliografie


[1] DIPIPPO, Ronald. *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*. Third Edition. 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA: Elsevier, 2012. ISBN 978-0-08-098206-9.

[3] DŘÍMAL, Petr. *Tepelná čerpadla, geotermální energie* [online]. publi.cz, 2016 [cit. 2017-03-04]. ISBN 978-80-88058-05-2. Dostupné z: https://publi.cz/books/93/Cover.html

[4] ŠPIČKOVÁ, Iveta, Jana ŠTURCOVÁ a Martina ŠUDŘICHOVÁ. *Využití geotermální energie* [online]. , 20 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: http://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/vyuziti_geotermalni_energie.pdf

[5] MYSLIL, Vlastimil, Zdeněk KUKAL, Karel POŠMOURNÝ a Václav FRYDRYCH. Geotermální energie: Ekologická energie z hlubin Země - současné možnosti využívání. *Planeta: odborný časopis pro životní prostředí* [online]. Vydává Ministerstvo životního prostředí Vršovická 65 100 10 Praha 10: Tisk DOBEL, Lanškroun, 2007, **XV**(4/2007), 32 [cit. 2017-03-04]. ISSN tištěná verze 1801-6898. Dostupné z: https://prvnigeotermalni.cz/upload/4084e9a33cc28c0fe8e25501a8bcbc01/geotermalni_energie_myslil_4.pdf

[7] Layers from Crust to Core. *Enchanted Learning* [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: http://www.enchantedlearning.com/egifs/Earthlayers.GIF

[8] BLAŽKOVÁ, Miroslava. *Metodika k hodnocení geotermálního potenciálu v modelovém území Podkrušnohoří* [online]. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem Fakulta životního prostředí, 2010, , 91 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: https://prvnigeotermalni.cz/upload/4084e9a33cc28c0fe8e25501a8bcbc01/metodika_ujep_4.pdf

[9] ŠKORPÍK, Jiří. *Využití tepla Země* [online]. 2014, (8), 1 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: http://www.transformacni-technologie.cz/vyuziti-tepla-zeme.html

[10] LUND, John. *100 Years of Geothermal Power Production - Trends and the Future* [online]. Geo-Heat Center 3201 Campus Drive Klamath Falls, Oregon, 97601, USA, 2005, , 10 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2005/lund.pdf

[11] VOBOŘIL, David. Geotermální energie. *O energetice* [online]. 2015, , 1 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: http://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/geotermalni-energie/

[12] SABATELLI, Fabio. Flash steam geothermal power plants: Main features and issues. *GEOELEC* [online]. 2013, , 95 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: http://www.geoelec.eu/wp-content/uploads/2013/07/Presentazione-Sabatelli-final.pdf

[13] SOBOTKA, Lukáš. *Základní porovnání flash a binární geotermální elektrárny* [online]. Praha, 2015 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63326/F2-BP-2015-Sobotka-Lukas-Zakladni%20porovnani%20flash%20a%20binarni%20geotermalni%20elektrarny.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. ČVUT v Praze – Fakulta strojní – Ústav energetiky (12115). Vedoucí práce Doc. Ing. Kolovratník Michal, CSc.

[14] STIBŮREK, Šimon. *Využití geotermální energie v Evropě a ČR* [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65661/F2-BP-2016-Stiburek-Simon-Vyuziti%20geotermalni%20energie%20v%20Evrope%20a%20CR.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. ČVUT v Praze – Fakulta strojní – Ústav energetiky (12115). Vedoucí práce Doc. Ing. Michal Kolovratník, CSc.

[15] About Geothermal Electricity. *Geoelec* [online]. 2016 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: http://www.geoelec.eu/about-geothermal-electricity/

[16] KĘPIŃSKA, Beata. GEOTHERMAL ENERGY USE IN EUROPE. *GEOTHERMAL TRAINING PROGRAMME* [online]. 2008, **2008**, 14 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: http://www.os.is/gogn/unu-gtp-30-ann/UNU-GTP-30-40.pdf

[17] DUMAS, Phillipe a Angelina BARTOSIK. Geothermal DH Potential in Europe. *GEODH* [online]. 2014, , 63 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: http://geodh.eu/wp-content/uploads/2014/11/GeoDH-Report-D-2.2-final.pdf

[18] WEBER, Josef, Britta GANZ, Ruediger SCHELLSCHMIDT, Burkhard SANNER a Ruediger SCHULZ. Geothermal Energy Use in Germany. *Proceedings World Geothermal Congress* [online]. Leibniz Institute for Applied Geophysics, Stilleweg 2, D-30655 Hannover, Germany, 2015, **2015** [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/01045.pdf

[19] STOBER, Ingrid, Thomas FRITZER, Karsten OBST, Thorsten AGEMAR a Rüdiger SHULZ. *Deep Geothermal Energy: Principles and Application Possibilities in Germany* [online]. 2.

Stilleweg 2, 30655 Hannover, Germany: Leibniz Institute for Applied Geophysics (LIAG), 2017 [cit. 2017-03-07]. ISBN 978-3-9817896-1-4. Dostupné z: https://www.geotis.de/homepage/Ergebnisse/LIAG_Deep_Geothermal_Energy.pdf

[20] Geothermal Information System for Germany. *Geothermal Information System for Germany* [online]. 2015 [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: https://www.geotis.de/homepage/project.php?loc=en_US

[21] RAZZANO, Francesco a Maurizio CEI. Geothermal Power Generation in Italy 2010-2014 Update Report. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia: Enel Green Power, via Andrea Pisano, 120, 56122 Pisa (Italy), 2015, , 10.

[22] *Geothermal power in Iceland* [online]. In: . 2015, s. 1 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_power_in_Iceland

[23] Generation of Electricity. In: *Orkustofnun: National Energy Authority* [online]. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: http://www.nea.is/media/jardhiti/popup/13-generation.jpg

[24] NIELSEN, Gunnlaugur, Runólfur MAACK, Ásgrímur GUDMUNDSSON a Gunnar Ingi GUNNARSSON. COMPLETION OF KRAFLA GEOTHERMAL POWER PLANT. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*. Kyushu - Tohoku, Japan, 2000, , 6.

[25] RAGNARSSON, Árni. Geothermal Development in Iceland 2010-2014. *Proceedings World Geothermal Congress 2015* [online]. Melbourne, Australia, 2015, **2015**, 15 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/01077.pdf

[26] KILIC, Fatma Canka Kilic. Geothermal Energy in Turkey. *Energy and Environment* [online]. Department of Electrical and Energy Technologies, Kocaeli Vocational School, Kocaeli University, Turkey, 2016, , 17 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: http://akademikpersonel.kocaeli.edu.tr/fckilic/sci/fckilic02.03.2016_17.46.32sci.pdf

[27] MERTOGLU, Orhan, Sakir SIMSEK a Nilgun BASARIR. Geothermal Country Update Report of Turkey (2010-2015). *Proceedings World Geothermal Congress 2015* [online]. Melbourne, Australia, 2015, , 9 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/01046.pdf

[28] CARVALHO, José Martins, Luís COELHO, João Carlos NUNES, Maria do Rosário CARVALHO, João GARCIA a Rita CERDEIRA. Portugal Country Update 2015. *Proceedings World*

*Geothermal Congress 2015* [online]. Melbourne, Australia, 2015, , 11 [cit. 2017-04-30].: https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/01065.pdf

[29] VERNIER, Romain, Philippe LAPLAIGE, Alain DESPLAN a Christian BOISSAVY. France Country Update. *Proceedings World Geothermal Congress 2015* [online]. Melbourne, Australia, 2015, , 8 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/01082.pdf

[30] GOLDBRUNNER, Johann. Austria – Country Update. *Proceedings World Geothermal Congress 2015* [online]. Melbourne, Australia, 2015, , 13 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/01070.pdf

[31] A prospective study on the geothermal potential in the EU. *Geoelec* [online]. 2013, **2013**, 97 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: http://www.geoelec.eu/wp-content/uploads/2011/09/D-2.5-GEOELEC-prospective-study.pdf

[32] FRIDLEIFSSON, Gudmundur Ómar, Halldór ÁRMANNSSON a Anette K. MORTENSEN. Geothermal conditions in the Krafla caldera with focus on well KG-26: A review in relation to the Iceland Deep Drilling Project. *ÍSOR* [online]. 2006, , 38 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://iddp.is/wp-content/uploads/2006/11/Krafla_IDDP-Review-Report_ISOR-2006-030.pdf

[33] KAJUGUS, Shakiru Idrissa. Geothermal Reservoir Evaluation Using Well Testing and Analytical Modelling - Case Example: Reykjanes Geothermal System, SW Iceland. *Faculty of Earth Sciences University of Iceland* [online]. Reykjavik, Island, **2015**, 95 [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: http://skemman.is/stream/get/1946/21515/49825/1/Geothermal_Reservoir_Evaluation_Using_Well_Testing_and_Analytical_Modelling_Case_Example_Rekjanes_Geothermal_System.pdf

[34] NIELSEN, Gunnlaugur, Runólfur MAACK, Ásgímur GUDMUNDSSON a Gunnar Ingi GUNNARSSON. COMPLETION OF KRAFLA GEOTHERMAL POWER PLANT. *World Geothermal Congress*. Kyushu - Japonsko: https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2000/R0689.PDF, 2000, **2000**, 6.

[35] MOON, Hyungsul a Sadiq J. ZARROUK. EFFICIENCY OF GEOTHERMAL POWER PLANTS: A WORLDWIDE REVIEW. *New Zealand Geothermal Workshop 2012* [online]. Department of Engineering Science, University of Auckland, New Zealand, 2012, , 13 [cit. 2017-05-28].: https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/NZGW/2012/46654final00097.pdf