

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta,
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky

Geotermální energie – zkušenosti z projektu Soultz-sous-Forets

Bakalářská práce

Josef Vlček



Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Tomáš Fischer Ph.D.

Praha 2009

VĚTA' GEOFYZIKA
GEOTERMÁLNÍ ENERGIE
SOULTZ - SOUS - FORETS
HOT DRY ROCK

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu této bakalářské práce, RNDr. Tomáši Fischerovi Ph.D., za jeho pomoc, ochotu a trpělivost, díky kterým tato práce vznikla.

ABSTRAKT

Práce obsahuje dvě různé části. První část této práce je věnována obecným informacím o různých aspektech geotermální energie. Zabývá se tedy zdroji geotermální energie, zejména těmi pocházejícími ze zemské kůry. Dále uvádí, která geologická vodítka mohou vést k nalezení geotermálních struktur. Zmiňuje se také, jak nalezení vhodných struktur může napomoci znalost tepelného toku, vodivosti a gradientu. Následně rozděljuje známé geotermální systémy podle jejich hydrogeologického režimu a zmiňuje se i problémech spjatých s využitím této energie. Ve druhé části práci je podrobně zmíněn Evropský geotermální výzkumný projekt, který se nachází ve francouzském Soultz-sous-Forets. Na tento projekt je následně nahlíženo z hlediska časového, kde je sledováno, jakými způsoby byl tento projekt rozvíjen a využíván od svého počátku až do současnosti.

SUMMARY

The first part of this study summarizes some general aspects of geothermal energy. It is focused on sources of geothermal energy, especially those in the earth's crust. The related topics as heat flow, physical properties of rocks and suitable geological structures that help in finding geothermal reservoir are mentioned as well. The reservoirs are classified also according to their hydrogeological regime. The second part of this study is focused to the particular Hot dry rock reservoir, European geothermal research project, located in Soultz-sous Forets, France. It is based on results of observations and experiments carried out since the beginning of this research project. Among others, the results show that the feasibility of a HDR project depends on a successful creation of a deep heat exchanger. The experience obtained during the Soultz HDR project provide a valuable basis for the further utilization of geothermal energy worldwide.

OBSAH

1. ÚVOD	1
2. PŘEHLED DOSAVADNÍCH VÝZKUMŮ	2
3. OBECNĚ O GEOTERMÁLNÍ ENERGII	3
3.1 Zdroje geotermální energie	3
3.2 Tepelný tok, tepelná vodivost, tepelný gradient	5
3.3 Vhodné geologické struktury	5
3.4 Geotermální systémy	6
3.4.1 Hydrotermální systémy.....	6
3.4.2 Systém Hot dry rock.....	7
3.5 Problémy s využitím geotermální energie	9
4. EVROPSKÝ GEOTERMÁLNÍ VÝZKUMNÝ PROJEKT HOT DRY ROCK, SOULTZ-SOUS-FORETS, FRANCIE	9
4.1 První fáze projektu	10
4.2 Druhá fáze projektu	11
4.3 Třetí fáze projektu	14
4.3.1 Vznik a stimulace vrtu GPK-3.....	14
4.3.2 Vznik a stimulace vrtu GPK-4.....	15
4.4 Čtvrtá fáze projektu	17
5. ZÁVĚR	18
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	19

1. ÚVOD

Geotermální energií by se dalo nazvat teplo zemského nitra. V našem přiblížení máme samozřejmě na mysli teplo, které je pro nás technicky dosažitelné. Tedy takové, ke kterému jsme schopni se dostat pomocí vrtů. Takto dosažitelná energie je poté potenciálně využitelná pro výrobu elektrického proudu či tepla, často dokonce obojího. Geotermální energie bývá řazena mezi zdroje alternativní energie, tedy do stejné skupiny jako například energie solární, větrná nebo energie vyráběná spalováním biomasy. Tento energetický zdroj má z alternativních zdrojů zřejmě nejdelší historii, první elektřina byla pomocí geotermální energie vyrobena v Itálii již v roce 1904, kdy bylo její pomocí rozsvíceno 5 žárovek. Opravdová elektrárna o výkonu 250 kW pak vznikla na témž místě v roce 1912 (Myslil a kol., 2007). Často se o geotermální energii mluví také jako o obnovitelném zdroji, její obnovitelnost však není nekonečná, některé zdroje jsou vyčerpitelné již v horizontu desítek let. Jak uvádí práce Myslil a kol. (2007), ochlazení 1 km³ zemské kůry o 100 °C by mohlo pohánět elektrárnu o výkonu 30 MW po dobu 30 let. Jedná se tedy o velmi atraktivní zdroj energie a zájem o něj je podnícen několika důvody. Zřejmě největším motorem vyhledávání nových potenciálních zdrojů geotermální energie je obava z následků globálního oteplování a s tím spjatá snaha o snížení emisí oxidu uhličitého. Další důvody mohou být například politické, vědecké nebo ekonomické. Při využívání geotermální energie nedochází ke spalování fosilních paliv, takováto energie se tedy dá označit jako čistá a ekologická. Velkým problémem je však velmi nerovnoměrné geografické rozložení míst s potenciálem k výhodnému využití geotermální energie. Většina vhodných míst se nachází v oblastech s vulkanickou aktivitou, které často nejsou vůbec osídleny a tudíž není pro koho v místě danou energii využít. Výjimku v tomto ohledu tvoří například Island, kde je touto energií vytápěna naprostá většina budov a zároveň je vyráběna polovina elektrické energie pro celý ostrov. Ve velké míře je energie způsobená mělkou přítomností vulkanických těles využita také v Itálii, Japonsku nebo na západě Spojených států. Existuje ale i metoda, která není závislá na přítomnosti přehřáté vody v hydrotermálním systému, která se ve většině případů vyskytuje v tektonicky aktivních oblastech. Jedná se o metodu zvanou Hot dry rock (horká suchá hornina). Tato metoda využívá tepla hluboce uložených granitických komplexů, ve kterých se uměle vytvářejí tepelné výměníky, ze kterých je získáváno dostatečné teplo, které kromě vytápění objektů postačí i na výrobu elektrické energie. Této metodě bych rád ve své práci věnoval větší prostor, neboť je potenciálně využitelná nejen v Evropě, ale i přímo u nás v České republice. Výhody, nevýhody a další různé poznatky o metodě Hot dry rock popíšu na případě Evropského geotermálního výzkumného projektu v Soultz-sous-Forets ve Francii, který běží od roku 1987 až do současnosti.

2. PŘEHLED DOSAVADNÍCH VÝZKUMŮ

Jak již bylo zmíněno v úvodu, geotermální energie je využívána již od počátků 20. století, její intenzivnější výzkum však začal v 70. a 80. letech. Od roku 1976 jsou v kalifornském Stanfordu pořádány každoroční konference týkající se geotermální energie ze všech možných úhlů pohledu, a to nejen vědeckých, ale i technických. Každý rok je pak výsledkem těchto setkání sborník obsahující velké množství různých článků ze všech částí světa. Kromě tohoto sborníku je většina těchto článků publikovaná také v časopise „Geothermics“ vydávaném nakladatelstvím Elsevier. Mezinárodní rada redakce tohoto časopisu se skládá z odborníků na jednotlivé aspekty geotermální energie, což zaručuje komplexní pohled vědecký i technický na tento slibný zdroj energie. Časopis publikuje články týkající se teorie, průzkumu, techniky a také všech možných aspektů využití geotermální energie po celém světě, slouží tedy jako důležitý prostředník výměny informací mezi jednotlivými odborníky na geotermální energii. Vzhledem k neustálé snaze o hledání nových, ekologických, zdrojů energie se dá očekávat, že význam tohoto časopisu stále poroste. Co se týká přímo území České republiky, zde vyšla již v roce 1981 výzkumná zpráva „Geotermální energie a její využití“, Hazdrová a kol. (1981), vydané Ústředním ústavem geologickým.. Z novějších výzkumů pak stojí za zmínku projekt Ministerstva životního prostředí s názvem „Možnosti využití geotermální energie pro energetické účely“, řešený firmou Geomedia pod vedením hlavního řešitele V. Myslila. Závěrečná zpráva tohoto výzkumu (Myslil V., 2007) pak kromě jiného přinesla desítky vytipovaných lokalit vhodných jak pro vytápění větších území, tak i pro výrobu elektrické energie.. Na základě této zprávy pak také v roce 2006 začal u severočeských Litoměřic vznikat zatím největší projekt využití této energie u nás. Byl vybudován 2,5 km hluboký ověřovací vrt pro potenciální využití metody Hot dry rock na produkci tepla a elektřiny pro město, které by v případě úspěchu této metody mělo být energeticky soběstačné. V roce 2007, opět za účasti V.Myslila vyšel v časopise „Planeta“ vydávaném Ministerstvem životního prostředí článek o geotermální energii, který je shrnujícím dílem o různých aspektech geotermální energie od fyzikálního principu tepla přes různé geotermální systémy až po čísla shrnující výrobu elektřiny a tepla po celém světě.

3. OBECNĚ O GEOTERMÁLNÍ ENERGII

3.1 Zdroje geotermální energie

Příliš se nepochybuje o tom, že hlavním zdrojem tepla je rozpad radioaktivních prvků v zemské kůře. Hlavním rozpadovým prvkem je uran, doplňují ho ještě thorium a radioaktivní draslík. Další energie je pak do kůry přinášena konvekčními proudy ze zemského pláště, tato se ale může projevit jen v místech kde je kůra tenká nebo narušená poruchou hlubšího dosahu. Tyto dva zdroje tepla mají podle práce Lowrie (2007) zcela dominantní vliv na teplotní pole zemské kůry. Vzhledem k tomu, že přínos tepla z pláště je závislý na mocnosti a porušenosti zemské kůry, zaměříme se hlavně na rozpad radioaktivních prvků. Různé horniny mají různé obsahy radioaktivních prvků a tomu přímo úměrnou tepelnou produkci. Obsahy radioaktivních prvků v magmatitech ukazuje Tab. 1. Z této tabulky jasně vyplývá, že s rostoucím obsahem SiO₂ a klesajícím množstvím tmavých minerálů klesá procento radioaktivních prvků a tím i producentů tepla. Tepelná produkce rozpadových řad se pak určuje složitým způsobem a to jako součin hustoty a součtu násobků koncentrací prvků tepelné produkce jednotkových hmot radionuklidů podle Myslíl a kol. (2007). Tepelná produkce jednotlivých radionuklidů je uvedena v Tab. 2.

Tabulka 1, Obsah radioaktivních prvků v magmatitech (Myslíl a kol., 2007 cituje Hazdrová a kol., 1981))

Hornina	% K	ppm U	ppm Th
Kyselé magmatity	3,34	3,5	18,0
Intermediární magmatity	2,31	1,8	7,0
Bazické magmatity	0,83	0,5	3,0
Ultrabazické magmatity	0,03	0,003	0,005

Tabulka 2, Tepelná produkce radionuklidů (Myslíl a kol., 2007 cituje Hazdrová a kol., 1981)

Radionuklid	J.g ⁻¹ .rok ⁻¹
Rozpadová řada ²³⁸ U	2,97
Rozpadová řada ²³⁵ U	18,00
Rozpadová řada ²³² Th	0,84
Rozpadová řada ⁴⁰ K	0,92

Z tabulky 2 tedy plyne, že tepelná produkce různých hornin je závislá na obsahu radionuklidů. Tepelná produkce je tedy přímo úměrná jejich gamma aktivitě, což je uvedeno v Tab.3. Tato tabulka ukazuje

zmíněné vlastnosti vybraných vyvřelých hornin s nejvyššími hodnotami a srovnává je s průměrem jak magmatických, tak i sedimentárních a metamorfovaných hornin.

Tabulka 3, Úhrnná gamma aktivita a tepelná produkce hornin (Myslil a kol., 2007 cituje Hazdrová a kol., 1981)

Hornina	Aktivita gamma v mg.kg ⁻¹ eU	Tepelná produkce v μW.m ⁻³
Granit	13,0	2,50
Syenit	28,0	5,91
Fonolit	19,0	3,80
Granodiorit	14,1	2,74
Magmatické horniny, průměr	12,24	2,30
Sedimenty, průměr	7,36	1,38
Metamorfity, průměr	6,74	1,36

Tabulka 3 tedy ukazuje, ve kterých horninách můžeme hledat největší producenty tepla v zemské kůře a tím i jeden z faktorů potenciálního využití geotermální energie. Z výše uvedených tabulek také plyne „neobnovitelnost“ geotermální energie v kontinentální kůře, neboť některé rezervoáry jsou podle práce Myslíla a kol. (2007) vyčerpatelné již v horizontu několika desetiletí.. Produkty rozpadových řad jsou totiž stabilní prvky, což znamená postupný úbytek radionuklidů a tím i snižování tepelné produkce hornin. Rozpad radionuklidů je sice nejvýznamnější producent tepla v kontinentální kůře, ale ne jediný. Další uvažované zdroje jsou pak společné pro kůru oceánskou i kontinentální. Například se bere v potaz zbytkové teplo z kosmické etapy vzniku zemského tělesa. Nikdo ovšem neví, kolik takového tepla mohlo pod povrchem zůstat. Dále je jako o zdroji určitého množství tepla uvažováno o přeměně kinetické energie při tektonických pohybech v kůře. K tomuto možnému původci však nejsou k dispozici přesnější výpočty. Berou se v potaz také fyzikálně-chemické reakce uvolňující teplo, tedy reakce exotermní. Například běžná oxidace, při které dochází ke slučování prvků s kyslíkem a jejich následnému přechodu z nižších mocností na vyšší. V hlubších částech kůry navíc dochází k rekrystalizaci minerálů a jejich změnám na jiné s větší hustotou. I tyto reakce mohou přinášet jisté množství tepla a v současné době se jim přisuzuje podstatný význam. K produkci tepla zemskou kůrou bylo provedeno také několik výpočtů. Bylo spočteno, že z průměrného tepelného toku na Zemi, který bývá uváděn v rozmezí 65 až 70 mW.m⁻², 55% z tohoto čísla pak připadá na rozpad radionuklidů a zbytek na teplo přivedené konvekčními proudy z pláště jak uvádí Lowrie (2007). Pro ostatní výše zmíněné metody produkce tepla není uveden podíl na tepelném toku, neboť k nim chybějí přesnější výpočty.

3.2 Tepelný tok, tepelná vodivost, tepelný gradient

Všechny tři zmíněné veličiny jsou velmi důležité při posuzování a vyhledávání potenciálních zdrojů geotermální energie. Informace o nich pro tuto kapitolu byly čerpány z práce Myslíl a kol. (2007).

Tepelný tok patří v geotermice k nejvyužívanějším. Jeho hodnota se vyjadřuje jako množství tepla procházející jednotkou plochy., nejčastěji v $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$. Tato veličina je z hlediska využití geotermální energie zajímavá zejména tam, kde jsou její hodnoty vysoké, což značí zvýšené teploty v malých hloubkách pod povrchem. Na povrchu je obvykle rozemří tepelného toku mezi 30 a 120 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$, střední hodnota pak bývá určována mezi 65 a 70 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$. Existují však výjimky jako je blízké okolí činných sopek nebo horkých pramenů, kde může hodnota tepelného toku dosahovat až několika tisíc.

Tepelná vodivost je definována jako schopnost horniny vést teplo, jedná se tedy o materiálovou vlastnost různých hornin. Celkově vzato jsou horniny poměrně špatnými vodiči tepla. Hodnota vodivosti je ovlivněna velkým množstvím různých faktorů, jako například vodivost samotných horninotvorných minerálů, charakter tmelu, textura, anizotropie nebo také obsah vody a porozita. Tepelná vodivost se vyjadřuje v $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a jejich nejvyšších hodnot dosahují vyvřeliny a metamorfity, což je dáno velkou hustotou a přítomností dobře vodivých minerálů. U sedimentů je v tepelné vodivosti značný rozptyl daný různými hustotami a různými stupni ztmelení horniny. Obecně se dá říci, že tepelná vodivost klesá s porozitou a roste s obsahem vody.

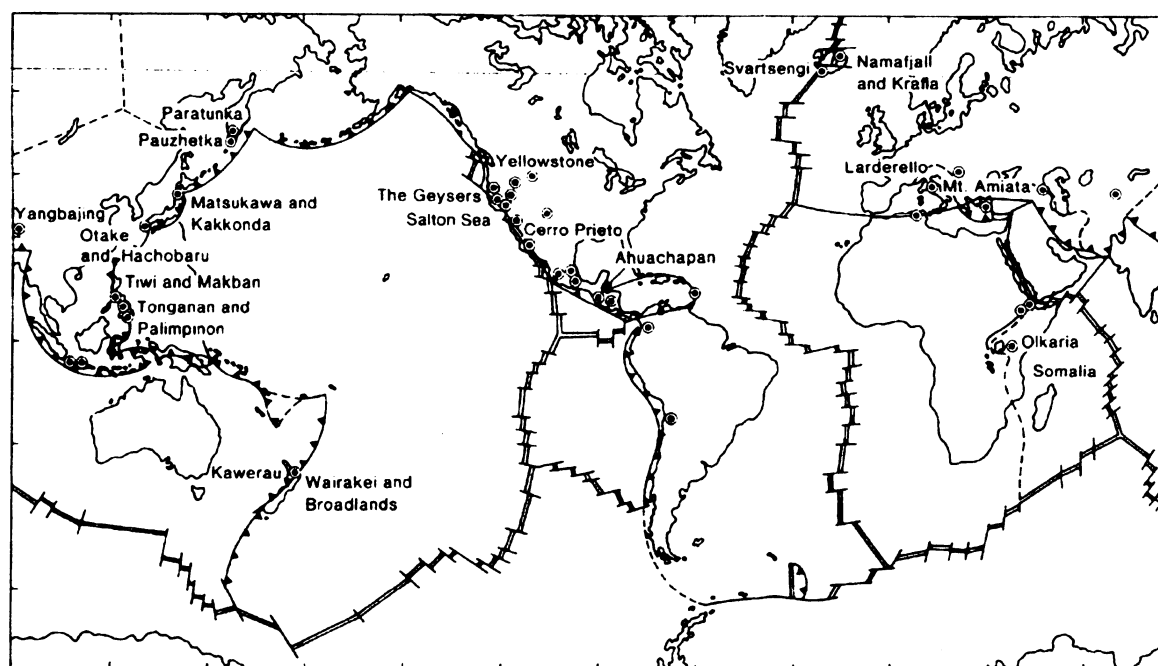
Tepelný gradient je definován jako vertikální gradient teploty v zemské kůře. Vyjadřuje se ve stupních Celsia na metr hloubky. Jeho hodnota je však dosti rozdílná pro různé oblasti. Uvádí se, že průměrná hodnota gradientu je přibližně 0,03 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$. Samozřejmě ale existují i výjimky, například v tektonicky aktivních oblastech nebo v oblastech se snadno oxidujícími ložisky může být až 0,2 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$. Naopak v oblastech stabilních štítů může gradient klesnout až na 0,01 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$. Navíc gradient není s hloubkou konstantní, což může být způsobeno změnami v geologickém složení hornin nebo také zvýšením tlaku s hloubkou. V případě potenciálního využití pak bývá gradient ve vybraných oblastech měřen v ověřovacích vrtech. Obdobou tepelného gradientu je geotermický stupeň, což je veličina udávající, kolik metrů je třeba sestoupit pod povrch, aby teplota stoupla o 1 $^{\circ}\text{C}$.

3.3 Vhodné geologické struktury

Určité struktury jsou méně a jiné zase více vhodné pro nalezení případného tepelného rezervoáru. Mezi tyto struktury mohou patřit například místa se ztenčenou zemskou kůrou, která je díky tomu více ohřívána pláštěm. Pokud se nejedná přímo o ztenčení, může jít alespoň o poruchu, která má hluboký dosah a je vhodná pro přínos tepla z velkých hloubek, což mohou být zejména struktury na okrajích litosferických desek. Rozmístění největších zdrojů pak povětšinou odpovídá tektonicky aktivním okrajům, jak ukazuje obr.1. Další vhodnou strukturou mohou být místa s výskyty granitoidových hornin, zejména kyselějšího charakteru, které mají vyšší obsah radioaktivních prvků a tedy i větší objemovou produkci tepla. Dále mohou k nalezení tepelného rezervoáru vést některá geologická

vodítka, jako například přítomné žilné vyvěřeliny, přítomnost aktivních geotermálních pramenů, přítomnost hydrotermálních rud a jiných pozůstatků dřívějších geotermálních procesů. Dále mohou napovědět také hydrogeologické struktury se zvýšeným obsahem oxidu uhličitého. Pokud nepomohou pouze geologická vodítka, dá se vhodná struktura najít například pomocí vhodné geofyzikální metody. Například granitoidové těleso by bylo možné najít podle zvýšené gamma aktivity, tedy pomocí radiometrie. Podle stejných vodítek se pak dají vytipovat také struktury nevhodné k hledání geotermálního rezervoáru, jako například výskyt podložních hornin s nízkým obsahem radioaktivních prvků, velká mocnost zemské kůry a podobně.

Obrázek 1, Rozmístění největších využívaných geotermálních zdrojů ve světě (Myslil a kol., 2007)



3.4 Geotermální systémy

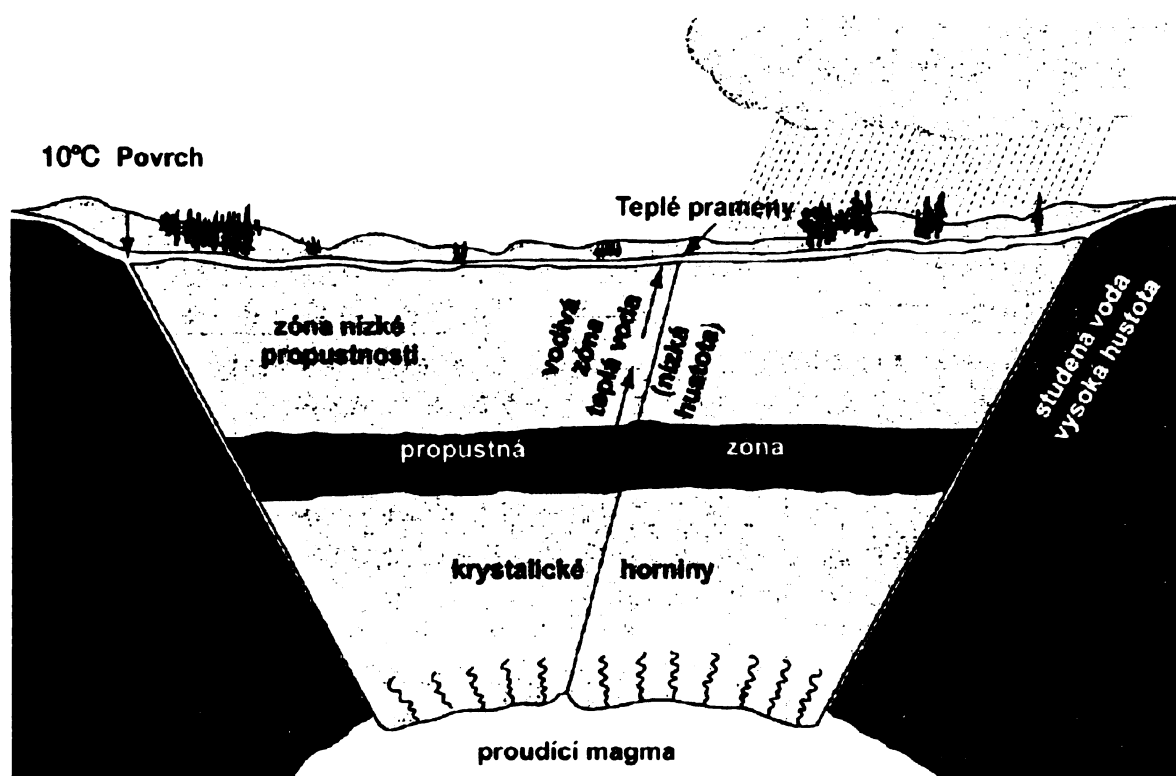
Pokud hovoříme o využití geotermální energie Země, máme samozřejmě na mysli teplo získané z nejsvrchnějších částí kůry, které nám jsou technicky dostupné. Tato část kůry je ale velmi složitá a panují zde velmi různorodé podmínky pro hromadění a využití tepla. K vyčerpání energie na povrch je potřeba využít fluida, která se v hloubce ohřeje a přinesou energii na povrch. Těmito fluidy bývají kapaliny, nejčastěji voda, případně vodní pára. Informace pro celou tuto kapitolu byly čerpány z práce Myslil a kol. (2007).

3.4.1 Hydrotermální systémy

Hydrotermální systémy jsou takové geotermální rezervoáry, kde se vytváří přírodní zvodně obsahující dostatečně ohřátou podzemní vodu, případně vodní páru. Příklad takového hydrotermálního systému je znázorněn na obr.2. Do těchto zvodní se posléze umístí jímací vrt, kterým je teplá voda čerpána na povrch a zde je odebráno její teplo ve výměníku. Pokud se jedná o zvodně uzavřenou nebo s příliš malou přírodní dotací vodou, bývá vytvořen zároveň injektážní vrt vracející vodu zpět k dalšímu

prohřátí. Tyto systémy se dají rozdělit podle teploty čerpaného fluida. Hydrotermální systémy s vysokou tepelnou entalpií jsou takové, kde se vyskytuje velmi vysoký tlak, přehřátá voda či vodní pára. Teplota těchto systémů se pohybuje kolem 200 °C a jsou vhodné jak k vytápění objektů tak k výrobě elektřiny. Tyto systémy jsou většinou ve vulkanicky aktivních oblastech, jak ukazuje předcházející Obr. 1. Hydrotermální systémy s nižší tepelnou entalpií jsou takové, kde se vyskytuje jen voda o teplotách od 40 až do 100 °C. Takové systémy jsou vhodné již jen k tepelnému využití. Mezi takzvané mělké hydrotermální systémy se řadí také mělké zvodně s teplotou do 25 °C zasahující do hloubky přibližně 400m. Tyto jsou pak pomocí tepelných čerpadel využívány individuálně k vytápění rodinných domů.

Obrázek 2, Schéma vzniku hydrotermální zvodně (Myslil a kol, 2007)

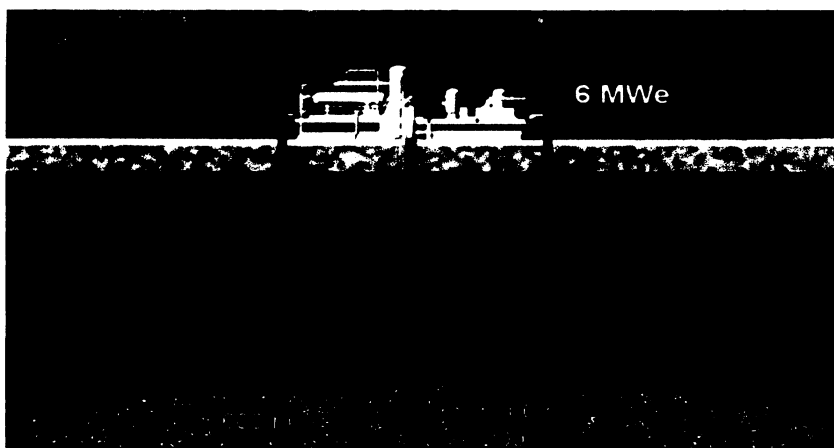


3.4.2 Systém Hot dry rock

Systém Hot dry rock, aneb česky horká suchá hornina, využívá předpokladu, že v určité hloubce pod povrchem je tak velký tlak, který v daném místě brání vzniku pórů a dutin, čímž vytváří prakticky suchou a nepropustnou horninu. Abychom našli takový masiv s dostatečně velkou teplotou, je nutno provrtat se přibližně do 5 km hloubky, kde se při běžném teplotním gradientu dá očekávat teplota asi 180-200 °C. V této hloubce se vyskytují převážně jen granitoidové a metamorfované horniny, ve kterých se může cirkulace fluid omezit na tektonicky drcená pásma. Takové prostory je však potřeba vytvořit uměle tak, aby vznikl námi požadovaný tepelný výměník. Takový výměník se vytváří hydraulickým štěpením, nebo-li vtlačováním vody do vrtu pod velmi vysokým tlakem tak, aby byla

vytvořená síť puklin ve kterých se následně voda může ohřívat. Pokud se nám podaří takový výměník vytvořit, můžeme dále postupovat jako u hydrotermálních systémů. Vtláčíme vodu do výměníku injektážním vrtem, voda tedy pak odebere teplo okolním horninám, ale díky vysokému tlaku se nezmění v páru. V tomto stavu je vyčerpána na povrch, kde je po uvolnění tlaku přeměněna na páru, energeticky a tepelně využita a následně opět vrácena do výměníku. Nejčastěji bývají pro tyto účely využívány tři vrty, z nichž jeden je injektážní a dva jsou čerpací. Zjednodušené schéma i s objemy vody vhodnými pro efektivní využití získaného tepla jsou uvedeny v obr. 3. Proti hydrotermálním systémům má však tato metoda své specifické výhody, ale samozřejmě i nevýhody. Mezi výhody patří zejména, že takovéto vhodné masivy jsou pod povrchem v hloubce cca 5-6 km rozšířeny ve světě poměrně hojně, čili tato energie je využitelná téměř kdekoli. Další výhodou je pak zanedbatelná produkce škodlivých plynů a kapalin, zejména množství uvolněného oxidu uhličitého je velmi nízké. Tato metoda naráží ale i na řadu problémů a překážek. Prvním problémem je najít lokalitu ekonomicky vhodnou k vybudování takového zařízení. Taková lokalita by v ideálním případě měla být již částečně rozpuštěná, aby se omezilo umělé drcení. Dále je nutná blízkost dostatečného zdroje vody, která by byla následně vtačována do výměníku. Samozřejmě by v takové lokalitě mělo být získané teplo a elektrická energie využitelné, čili je vhodné taková zařízení budovat v osídlených oblastech. Dále je nutné si uvědomit, že nelze vytvořit zcela uzavřený tepelný výměník, dochází tedy ke ztrátám kapaliny. Je tedy nutné, aby voda do systému byla stále doplňována. Dalším možným problémem mohou být změny ve struktuře masivu vyvolané hydraulickým štěpením. V některých případech tak mohou při aktivaci rezervoáru vznikat již poměrně silná zemětřesení, což pak může bránit využití tohoto tepla. Výhodnost tohoto systému je tedy limitována tím, že energie vytěžená z výměníku musí být vyšší než energie vynaložená na její získání. Jak již bylo řečeno, tento systém je využitelný na vhodných místech takřka v celé kontinentální kůře, je tedy potenciálně využitelný i v Evropě, Českou republiku nevyjímaje. Níže se na něj proto zaměříme detailněji a složitost vytvoření, monitorování a provozování takového elektrárny si ukážeme na příkladu zařízení ve francouzském Soultz-sous-forets.

Obrázek 3, Schéma geotermální elektrárny fungující na principu Hot dry rock (www.soultz.net)



3.5 Problémy s využitím geotermální energie

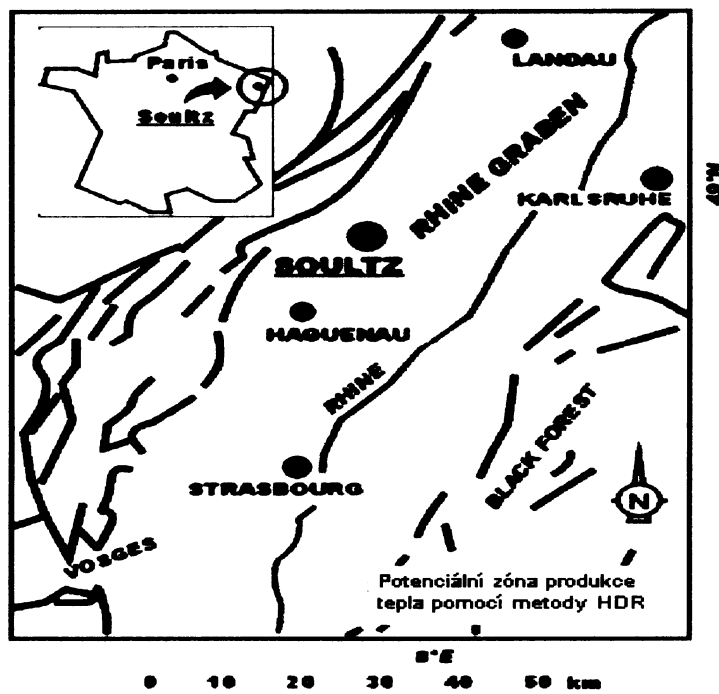
Jak již bylo řečeno, využití geotermální energie je spjato s čerpáním fluid ze zemské kůry, což může způsobovat jisté negativní vlivy. Může tedy během využívání geotermálního rezervoáru dojít ke změně hydrogeologických poměrů, což může vést například až k poklesu povrchu. V případě chemické nestability prostředí může také dojít k rozpuštění některých minerálů. Geotermální elektrárny mohou mít vliv i na ovzduší. Z horkých vod mohou do ovzduší unikat různé plyny, jako například oxid uhličitý nebo sirovodík. Produkce oxidu uhličitého je však zanedbatelná ve srovnání s uhelnými elektrárnami, neboť na 1 kWh geotermální energie připadá 50 g CO₂, zatímco u uhelné elektrárny je to asi dvacetkrát více jak se píše v Myslíl a kol. (2007). Kromě plynů bývá do atmosféry často také uvolňováno značné množství tepla. V některých případech se v okolí zařízení může také šířit značný hluk. Horké vody kolem 150-200 °C využívané pro výrobu elektřiny a tepla většinou obsahují velká množství rozpuštěných látek jako chloridy, sírany, karbonáty, křemičitany a také těžké kovy. Tyto látky pak mohou způsobovat zanášení a v horším případě i korozi zařízení. Úprava takovýchto vod tedy vyžaduje velké množství chemikálií. Využití geotermální energie tedy není zcela bez zátěže pro životní prostředí, avšak tyto elektrárny nejsou v provozu ve větším míře dostatečně dlouho na to, aby bylo možné jejich vliv na prostředí posoudit.

4. EVROPSKÝ GEOTERMÁLNÍ VÝZKUMNÝ PROJEKT HOT DRY ROCK, SOULTZ-SOUS-FORETS, FRANCIE

Jedná se o evropský výzkumný projekt, zabývající se využitím zemského tepla pomocí metody Hot dry rock (horká suchá hornina). Tato metoda je také někdy nazývána Enhanced geothermal system (vylepšený geotermální systém). Tento konkrétní projekt je umístěn ve francouzském Alsasku, asi 50 km severně od Štrasburku, v oblasti takzvané Rýnské propadliny, jak je znázorněno na Obr. 4. Tento projekt vznikl za podpory Německa, Francie a Evropské komise v roce 1987 a trvá do dnešních dnů. Záměrem tohoto projektu je vytvořit tepelný výměník v granitických horninách, které tvoří podklad zmíněné Rýnské propadliny. Tento výměník by pak měl mít dostatečné parametry na produkci tepelné i elektrické energie. Vrtné a výzkumné práce v oblasti byly zahájeny již roku 1986 a trvají dodnes. Celý tento časový úsek lze pak vzhledem k vývoji situace rozdělit do 4 fází. Tato lokalita byla vybrána z několika příhodných důvodů. Základem byla vhodná geologie lokality, kde se pod sedimentárním příkrovem skrývá granitové podloží. Jak již bylo řečeno v kapitolách předchozích, granit má z hornin jedny z nejvyšších obsahů radioaktivních prvků, čímž splňuje předpoklad vysoké tepelné produkce. Další důvod vyplynul z měření tepelného gradientu v oblasti, jak se zmiňuje práce Baria a kol. (2004). Podle provedených měření je gradient značně nestálý s hloubkou. Pro prvních 900m je gradient 10,5 °C/100 m. V rozmezí 900-2350 m je gradient jen 1,5 °C/100 m a dále roste na 3 °C/100 m až do maximální měřené hloubky 5000 m. Tato nepravidelnost naznačuje, že existuje zvýšená cirkulace

mezi nadložními sedimenty a granitem. Náhlé snížení a následný nárůst gradientu naznačuje, že zde již cirkulují fluida do větších hloubek, což se jeví z hlediska tvorby geotermálního výměníku jako velice výhodné.

Obr. 4, Lokalizace HDR projektu Soultz-sous-forets (www.soultz.net)



4.1 První fáze projektu

První fáze projektu trvala od roku 1987 do roku 1997 a její součástí bylo vrtání 2 vrtů označovaných jako GPK-1 a EPS-1. V roce 1990 bylo v obou těchto vrtech dosaženo hloubky 2200 m. V této hloubce bylo provedeno několik geochemických testů k určení charakteru fluid, která byla odebrána v granitech. Projekt poté pokračoval dále a to prohloubením vrtu GPK-1 do hloubky 3600 m a vytvořením třetího vrtu, označeného jako GPK-2, hlubokého 3800 m. Poté, co byly tyto vrty vyvrtány, proběhla v roce 1995 masivní hydraulická stimulace, která měla za následek rozšíření již existujících trhlin v obou vrtech. Jak uvádí Baumgärtner a kol. (1996), výskyt trhlin se lišil svou hloubkou v obou vrtech. Ve vrtu GPK-1, který byl určen jako vtačovací, se nachází hlavní pásmo trhlin mezi 2850 a 2960 m, kam má směřovat až 60% veškeré vody. Do zbylých trhlin vyskytujících se mezi 3230 a 3490 m hloubky se pak dostává zbytek injektované vody. Ve vrtu GPK-2 se pak nalézají téměř nepřerušované pásmo trhlin v hloubce 3200 až 3330 m a další přídatné pásmo se vyskytuje v rozmezí 3460 až 3560 m. Po zjištění výskytu jednotlivých trhlin bylo provedeno několik krátkodobých a jeden dlouhodobý cirkulační test. Všechny tyto testy byly provedeny ze 2 hlavních důvodů. Prvním důvodem bylo zjištění charakteru rezervoáru. K tomuto účelu jsou využívány takzvané tracer testy, kdy jsou do jednoho z vrtů injektovány stopovací látky (tracery) a v druhém vrtu je měřena doba, za jakou se tyto stopy detekují. Kromě doby setrvání se také porovnává koncentrace dané látky na vstupu a výstupu ze systému, která určuje stabilitu dané látky při průchodu rezervoárem. Z chování různých chemikálií lze

následně posoudit chemismus daného rezervoáru. Druhým důvodem cirkulačních testů je pak zjištění hydraulického propojení a kapacity obou zmíněných vrtů. Jak se píše v práci Aquilina a kol.(1998), na vrtech GPK-1 a GPK-2 vzdálených od sebe asi 450 m byl v létě roku 1997 proveden dlouhodobý cirkulační test. Tento test trval 4 měsíce a v jeho průběhu byl vrt GPK-1 používán jako vlačovací a vrt GPK-2 jako produkční. Průtok na vstupu i výstupu osciloval mezi 22 a 24 l/s, nebyly tedy pozorovány téměř žádné ztráty kapaliny a tudíž nebyla ani žádná do oběhu přidávána. Zároveň bylo na povrchu pozorováno odplyňování kapaliny, ale i přesto nedocházelo ke korozi. Důležitým sledovaným faktorem při testu byla také teplota vyčerpávané kapaliny. Tato teplota během cirkulace kontinuálně narůstala, až se nakonec ustálila na hodnotě 142 °C. Na provoz pumpy pohánějící tento oběh bylo potřeba asi 250 kW a díky tomu bylo získáno téměř 11 MW tepelné energie, jak uvádí Baumgärtner a kol. (1998). To vše se navíc obešlo bez jakýchkoli dopadů na životní prostředí. Výsledkem první fáze projektu tedy bylo prokázání značného potenciálu této metody. Bylo získáno velké množství tepelné energie a to se zanedbatelnými ztrátami cirkulující vody a s minimální energií nutnou na pohon systému. Nejvyšší dosažená teplota vyčerpané vody však byla stále příliš nízká na výrobu elektrické energie, bylo tedy rozhodnuto o pokračování projektu do další fáze.

Obr. 5, První fáze projektu Soultz-sous-Forets (www.soultz.net)



vrtání +
stimulace +
cirkulace

4.2 Druhá fáze projektu

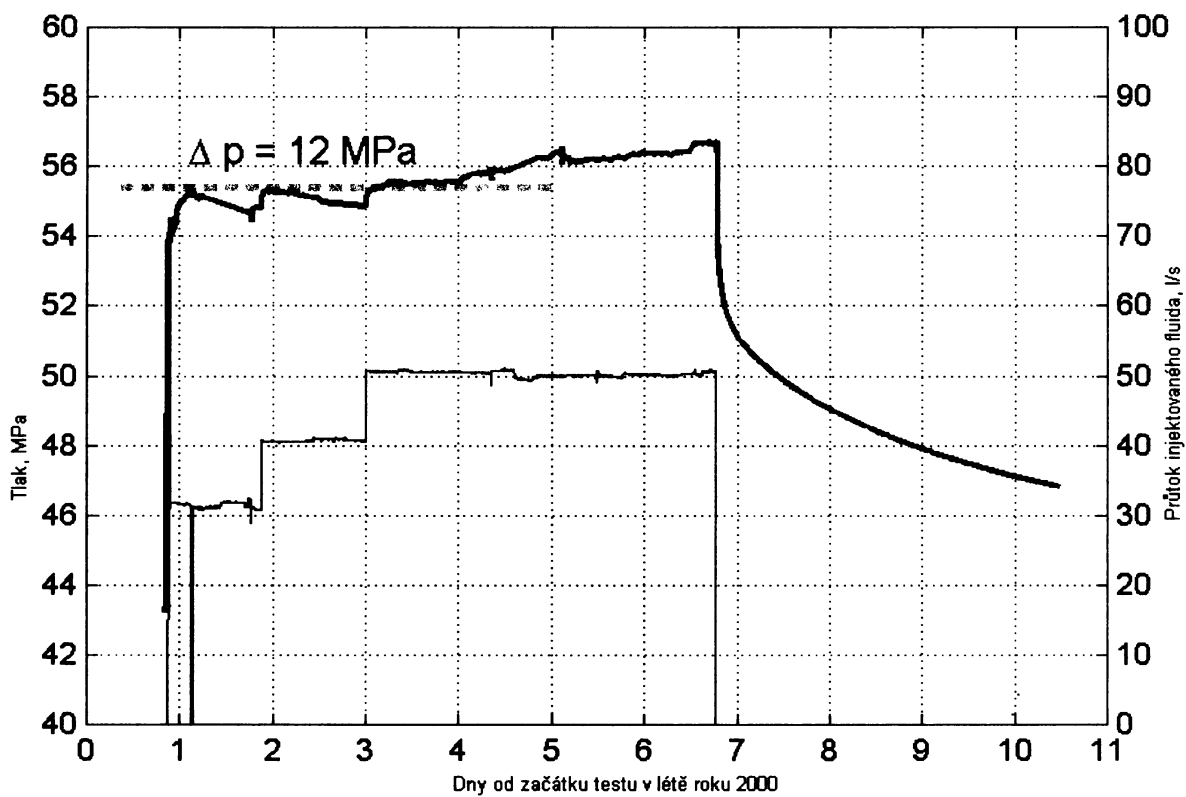
Druhá fáze projektu, zahájená roku 1997, byla zaměřena zejména na dosažení teploty kolem 200 °C. Tato teplota by totiž zaručovala dostatečně efektivní výrobu elektrické energie. Za tímto účelem byl vrt GPK-2 prohlouben do hloubky 5000m, kde byla předpokládána právě teplota 200 °C (± 10 °C), jak uvádí Baumgärtner a kol. (2000). Stav po prohloubení zmíněného vrtu je znázorněn na Obr. 6. Vrt GPK-2 byl do hloubky kolem 5 km prohlouben v roce 1999. Ještě před samotnou hydraulickou stimulací nové části vrtu bylo provedeno geofyzikální měření za použití monitorování slabě indukované

seismicity (mikroseismicity). Soma a kol. (2000) přináší ve své práci výsledky tohoto měření. Z jeho výsledků vyplývá přítomnost několika poruchoých struktur v hloubkách od 3850 až po 4950 m. Z hlediska tvorby hlubšího geotermálního rezervoáru pak byla objevena velmi zajímavá zóna v rozmezí 4575 až 4775 m, která je tvořena velmi silně porušenými granity. Po prohloubení vrtu a zjištění možných fraktur přišel tedy na řadu další krok a tím byla hydraulická stimulace, kterou popisuje Weidler a kol. (2002). Hlavním úkolem tohoto experimentu bylo zjistit, zda se v hloubkách kolem 5 km dají úspěšně použít stejné postupy, které vedly k vzniku fungujícího rezervoáru v mělčích částech vrtů. Tato hydraulická stimulace proběhla v létě roku 2000 a to s průtoky 30, 40 a nakonec až 50 l/s. Během tohoto procesu trvajícím 6 dní bylo vtlačeno přes 23 000 m³ vody a solných roztoků do hloubek 4400 až 5000 m. Tato operace postihla velký objem horniny, který byl po celou dobu bedlivě pozorován, zejména z hydraulického a mikroseismického hlediska. Hydraulické hledisko kromě jiného obnášelo také sledování tlaku ve vrtu, v tomto případě byl tlak měřen na horní hraně stimulované oblasti, čili v hloubce 4400 m. Během vtlačení fluid do rezervoáru došlo podle očekávání ke vzniku přetlaku, jeho hodnota se pohybovala kolem 12 MPa, maximální hodnota pak byla 13 MPa. Po ukončení stimulace došlo k pozvolnému uvolňování přetlaku. Tato pozvolnost pak byla ve zmíněné práci vysvětlena tak, že slabě propustné hranice rezervoáru dovolují jen malé úniky kapaliny, proto je pokles tlaku tak pomalý. Vývoj tlaku během stimulace a krátce po ní je znázorněn na Obr. 7. Monitorování mikroseismicity pak ukázalo, že byl zasažen blok horniny, který měl přibližně 2,5 km na délku, 0,5 km na šířku a 1,5 km na výšku, tedy téměř 2 km³. Jednalo se o do té doby největší horninový útvar zasažený jednorázovou hydraulickou stimulací. Během stimulace bylo také zaznamenáno celkem 31 511 mikrozemětřesení, z nichž bylo asi 14 000 přesně lokalizováno. Zajímavý je ale zejména fakt, že po ukončení stimualce došlo sice k prudkému snížení počtu otřesů, nedošlo však k jejich úplnému vymizení. Nejméně po dobu dalších 3 týdnů bylo možno zaznamenat další mikrootřesy, jak znázorňuje Obr. 8. Podstatu tohoto jevu se doposud nepodařilo stoprocentně vysvětlit, ale mohl by být indikátorem toho, že se rezervoár nachází na pokraji kritického napětí. Výsledkem celého experimentu pak bylo, že pomocí hydraulické stimulace v hloubkách 4 až 5 km je možné trvale zvýšit teplotu i kapacitu geotermálního rezervoáru. Díky tomuto zjištění pak celý projekt mohl postoupit do své třetí fáze.

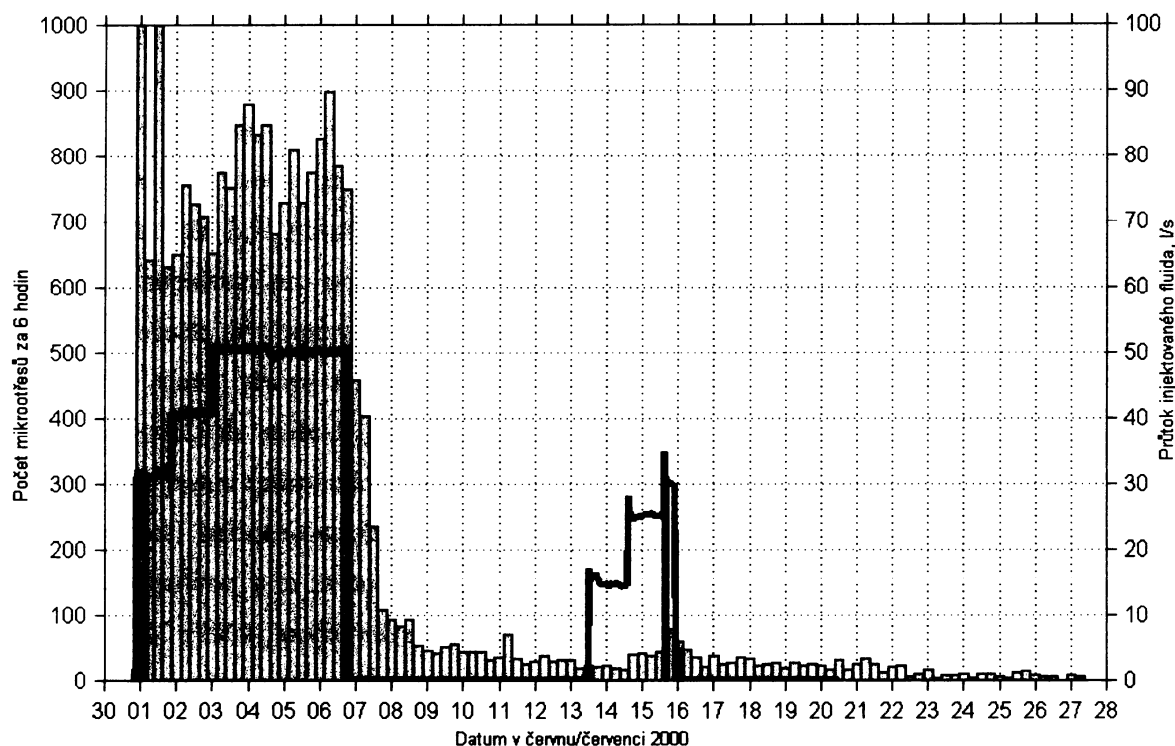
Obr. 6, Druhá fáze projektu Soultz-sous-Forets (www.soultz.net)



Obr. 7, Vývoj tlaku během druhé stimulace v roce 2000 (Weidler a kol., 2002)



Obr. 8, Počet mikrootřesů během stimulace v roce 2000 a v dnech následujících (Weidler a kol., 2002)



4.3 Třetí fáze projektu

Třetí fáze projektu, která běžela od roku 2001, zahrnovala vytvoření dalších 2 vrtů, pojmenovaných GPK-3 a GPK-4, které by spolu s již existujícím vrtem GPK-2 vytvořily propojený systém dvou vrtů produkčních a jednoho vtačovacího. Výsledná poloha všech vrtů je zobrazena na Obr. 9. Jak se píše v práci Hettkamp a kol. (2004), na konci roku 2005 je očekávána plná funkčnost takto koncipovaného systému. Na místě by v takovém případě mělo být vyprodukováno až 50 MW termální energie při teplotách kolem 180 °C a k tomu ještě 6 MW elektřiny, z čehož by 1,5 MW sloužilo k pohonu pump a 4,5 MW by odešlo do elektrické sítě.

4.3.1 Vznik a stimulace vrtu GPK-3

Jak uvádí práce Baria a kol. (2004), nejprve byl k již existujícímu vrtu GPK-2 vyvrtán vrt GPK-3. Vrt byl dokončen v roce 2002 a jeho umístění bylo zvoleno s pomocí mikroseismických dat. GPK-3 byl také hluboký 5 km, na jeho dně byla změřena teplota 200,6 °C a vzdálenost od GPK-2 u dna činila 600 m. Nový vrt byl následně stimulován za účelem zvýšení jeho průtočnosti. Zároveň byla použita metoda cílené stimulace, kdy byly stimulovány oba hluboké vrty zároveň. Tak jako ve fázích předchozích byly samozřejmě stimulace pozorně sledovány měřením průtoku, mikrootřesů a dalších veličin. Výše zmíněná práce Baria a kol. (2004) pak přináší výsledky těchto měření. Celkem byla během této fáze stimulována masa hornin o objemu přibližně 3 km³, což překonalo i původní stimulaci vrtu GPK-2 z roku 2000. Zároveň se podařilo vytvořit výměník, kde byla dosud největší vzdálenost

mezi injektážním a produkčním vrtem, a to 650 m. Dále bylo během této operace zaznamenáno přes 20 000 mikrootřesů, které stejně jako v případě stimulace v roce 2000 (viz. Obr. 8) nezmizely ihned po ukončení procesu, ale ještě jistou dobu byly zaznamenávány. Kromě těchto otřesů, které nejsou na povrchu takřka cítit, ale vzniklo také několik otřesů silnějších, které již bylo možno pocítit. Zaznamenáno bylo kolem třiceti otřesů, jejichž magnitudo přesáhlo magnitudo 2, největší naměřená hodnota pak byla 2,9. Ačkoli byla stimulace z roku 2002 považována za úspěšnou, vznik silných otřesů byl podnětem pro podrobnější zkoumání vzniku a uzavírání trhlin v horninovém masivu. Následně musela být upravena také strategie jednotlivých stimulací tak, aby nevznikaly další nežádoucí silné otřesy a tato technologie mohla být používána v městském prostředí. Z mikroseismických měření pak stejně jako v případě stimulace vrtu GPK-2 vyplynulo, že dominantním jevem způsobujícím zvýšení permeability rezervoáru je zvětšování již přítomných trhlin vlivem zvýšení střížného napětí. Zjištěné propojení vrtů GPK-2 a GPK-3 bylo poté také ověřeno stopovací zkouškou, a to za použití látek Na-benzoát, 1,5- a 2,7-naftalín disulfonát. Jak uvádí práce Sanjuan a kol. (2004), podle měření koncentrace těchto látek bylo zjištěno, že ve daném výměníku téměř nedochází ke ztrátám kapaliny a hydraulické spojení mezi vrty skutečně existuje. V této fázi projektu, kdy byl vytvořen výměník mezi dvěma vrty v hloubce 5 km, se práce autorů André, Vuataz (2005), zabývala interakcí mezi fluidem kolujícím v rezervoáru a granitovým masivem. Takováto cirkulace samozřejmě narušuje tepelnou i chemickou rovnováhu v prostředí, může tedy docházet k rozpouštění nebo naopak vysrážení některých látek. V tomto ohledu se ukázaly jako nejproblematičtější karbonáty. Ty, jak zmíněná práce uvádí, mají tendenci rozpouštět se v okolí injektážního vrtu, což vede ke zlepšení permeability výměníku. Na druhou stranu se ale jistá část tohoto množství opětovně sráží v blízkosti produkčního vrtu, což může permeabilitu mírně snižovat. Kromě karbonátů dochází také ke srážení a rozpouštění některých silikátů a aluminosilikátů, ve srovnání s karbonáty jde však o zanedbatelná množství. Chemické chování karbonátů má tedy zásadní vliv na permeabilitu a tím i na produktivitu výměníku.

4.3.2 Vznik a stimulace vrtu GPK-4

Dalším krokem v tvorbě kompletního systému tří vrtů tedy bylo vyvrtání vrtu GPK-4. Tento vrt byl dokončen v roce 2004 a krátce po jeho dokončení byl stejně jako jeho předchůdci stimulován hydraulickým štěpením. Jak uvádí Baria a kol. (2005), vzhledem k obavám ze vzniku silnějších seismických otřesů byl však stimulován menšími objemy fluid kolem 30 l/s, která nezpůsobovala v hloubce tak velký přetlak a tím pádem snižovala riziko silnějších otřesů. Tento předpoklad se naplnil, avšak během této první stimulace se nepodařilo mezi vrtem GPK-4 a sousedním GPK-3 navázat dostatečně silné hydraulické spojení. Navíc musela být tato stimualce předčasně ukončena, neboť v horní části vrtu došlo ke zborcení pažení. Bylo tedy nutné provést další stimulaci k vytvoření propojení se zbylými vrty. Pokus o vznik takového spojení proběhl hned v roce 2005. Během této druhé cirkulace došlo ke zvýšení objemu injektovaných fluid. Přehled stimulací všech 3 vrtů je uveden

v Tab.4. Při této stimulaci bylo využito znalostí o interakci granitu s roztokem a kromě běžně používané vody a solných roztoků byly použity roztoky kyselin a chelatační činidla. Tyto látky měly za úkol rozpustit bariéru, která podle předpokladů práce Baria a kol. (2006) bránila dostatečnému hydraulickému propojení vrtů GPK-3 a GPK-4. Po použití této chemické stimulace došlo k mírnému zlepšení situace, propojení stále však nebylo zcela ideální. Jedním z možných důvodů horšího propojení bylo zjištění, že se tento vrt při stimulaci chová jinak, než dva vrty předchozí. Jak uvádí Tischner a kol. (2007), na rozdíl od nich došlo při napouštění vrtu GPK-4 k mírnému, ale ustálenému snižování tlaku, což obvykle doprovází proces tahového štěpení. Teprve po vytvoření takovýchto tahových trhlin docházelo k jejich zvětšování a tím i zlepšení průtočnosti, tak jako v případě vrtů GPK-2 a GPK-3. Slabé spojení vrtů GPK-3 a GPK-4 se potvrdilo také provedením krátkého cirkulačního testu, kde byl vrt GPK-3 použit jako injektážní a zbylé 2 vrty jako produkční. Během tohoto pokusu bylo do země prostředním vrtem vtačováno 15 l/s fluid. Nerovnoměrnost tepelného výměníku se pak projevila tím, že z vrtu GPK-2 bylo vyčerpáváno 11 l/s, zatímco z vrtu GPK-4 pouze 4 l/s. Vznikl tedy nerovnoměrně rozložený systém. Pozitivním faktem zůstalo alespoň to, že nedošlo ke ztrátám kapalin. V tuto chvíli pak bylo nutné využít všechny dostupné prostředky pro stimulaci vrtu GPK-4. Pro vyřešení této situace se nabízelo několik možných řešení. Mezi nimi byla například cílená stimulace, která byla použita již u vrtu GPK-3, při níž jsou stimulovány oba sousední vrty zároveň. Tato stimulace vede ke zvýšení tlaku ve středu mezi oběma vrty a mohla by tudíž vést k úspěšnému prolomení bariéry mezi GPK-4 a GPK-3. Další potenciální řešení pak Baria a kol. ve zmíněné práci z roku 2006 vidí například ve stimulaci velkým množstvím fluid (až 120 l/s) nebo v použití viskózních gelů. Stimulace vrtu GPK-4 a případné další testy se staly náplní čtvrté fáze projektu. Původní předpoklad třetí fáze tedy sice nebyl naplněn, ale přesto se podařilo získat množství užitečných dat a zkušeností, které mohou posloužit při řešení podobných problémů s vytvářením jiných Hot dry rock rezervoárů.

Obr. 9, Třetí fáze projektu Soultz-sous-Forets (www.soultz.net)



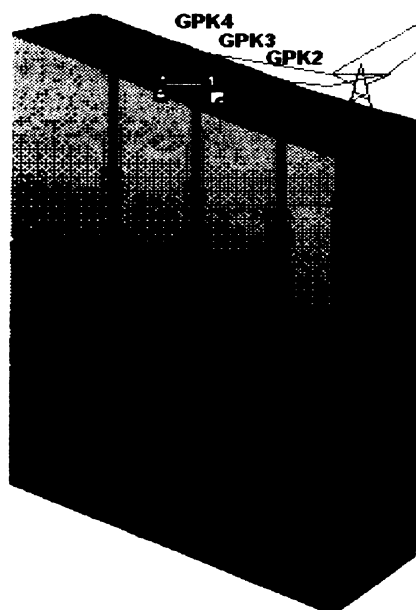
Tab. 4, Přehle hydraulických stimulací vrtů v Soultz-sous-Forets (Tischner a kol., 2007)

Vrt	Rok	Doba trvání (dny)	Objem injektovaných fluid (m ³)	Průtok (l/s)	Počet lokalizovaných mikrootřesů
GPK-2	2000	6	23 400	50	14 000
GPK-3	2003	11	34 000	50	21 600
GPK-4	2004	3,5	9 300	30	5700
	2005	4	12 300	45	3000

4.4 Čtvrtá fáze projektu

Tato fáze projektu započala v roce 2005 a jejím hlavním cílem bylo dostatečně stimulovat vrt GPK-4 tak, aby vznikl uceleně propojený geotermální výměník a mohla být instalována a spuštěna geotermální elektrárna. Podle oficiálních internetových stránek projektu (www.soultz.net) bylo provedeno několik dalších stimulací a průtokových testů a to nejen na vrtu GPK-4, ale i na zbylých 2 vrtech. Zejména v roce 2006 a na počátku roku 2007 bylo provedeno několik různých pokusů o zlepšení propojení vrtů GPK-3 a GPK-4. Během těchto pokusů došlo zejména k několika injektážím různých kyselin, které měly vést k rozpuštění případných usazenin bránících zvýšení permeability. Zároveň bylo u vyčerpávaných fluid dosaženo potřebné teploty kolem 180 °C. Toto zlepšení situace v létě roku 2007 vedlo k rozhodnutí o instalaci geotermální elektrárny o výkonu 1,5 MW. O rok později, v létě roku 2008, byla elektrárna uvedena do provozu a tento projekt tak vyrobil první elektrický proud. Schéma současného provozu je ukázáno na Obr. 10.

Obr.10, Současný stav projektu Soultz-sous-Forets, www.soultz.net



5. ZÁVĚR

Geotermální energie bývá často zmiňována jako jeden z možných zdrojů energie pro budoucnost. Možnosti jejího potenciálního využití jsou obrovské, v současné době ale nejsou příliš využívány. V dnešní době, kdy je velká snaha o nalezení velkých a ekologických zdrojů energie, není ani geotermální energie opomíjena. Prakticky po celém světě se vyhledávají lokality, kde by se dal tento druh energie využít, ať už jen pro vytápění nebo i pro výrobu elektřiny. Vhodná místa pro využití pak často bývají špatně technicky dostupná, případně značně nerovnoměrně rozdělená. Z tohoto důvodu se hledal způsob, jak využít teplo hluboce uložených suchých horninových masivů, které se ve světě vyskytují o poznání rovnoměrněji. Tento způsob byl však finančně a technicky velice náročný. Za tímto účelem ve francouzském Soultz-sous-Forêts vznikl pilotní projekt na využití této tepelné energie. Celý projekt se dá rozdělit do 4 fází, během nichž bylo dosahováno dílčích úspěchů. Již během první fáze bylo z hloubek necelých 4 km získáváno velké množství tepla s minimálními energetickými nároky na pohon zařízení. Druhá fáze pak přinesla poznatek, že stejný postup jakým byl vytvořen výměník v hloubce necelé 4 km lze aplikovat i v hloubce 5 km, odkud je díky vyšším teplotám možno získat více tepelné energie. Cílem třetí fáze pak bylo vytvořit systém tří hlubokých vrtů do výměníku, kde by centrální vrt pracoval jak vtlačovací a krajní vrty jako produkční. Tento záměr se však během této fáze nepodařilo stoprocentně splnit. První dva vrty se podařilo stimulovat podle předpokladů, čtvrtý vrt ale ukázal, jak se na relativně malém území ve stejné hloubce mohou horniny chovat rozdílně. Tento fakt sice celý projekt zkomplikoval, ale opět přinesl řadu užitečných informací. Ve čtvrté fázi bylo nakonec dosaženo původního záměru, tedy instalace geotermální elektrárny. Ta zatím sice pracuje pouze na čtvrtinu předpokládaného výkonu, celý projekt však zatím není u konce a jsou na něm i nadále prováděny další experimenty a výzkumy. Celkově vzato, výsledkem tohoto projektu je množství užitečných dat a zkušeností, spojených s tvorbou a provozem tepelného výměníku fungujícího ve velkých hloubkách. Tyto informace jsou nyní využitelné pro vznik dalších podobných projektů. Díky těmto informacím by se v budoucnu mohlo podařit realizovat podobné projekty v kratším čase a za méně peněz, což by mělo vést k širšímu využití této ekologické formy energie.

Dle mého názoru má geotermální energie velký potenciál pro budoucí využití. Jak již bylo zmíněno, využívání této energie je sice finančně a technicky velmi náročné, i přesto je tento zdroj energie velmi důležitý. Jedná se sice o zdroj, který není zcela obnovitelný, přesto je jeho potenciál pro nadcházející desítky a stovky let veliký. Zásadní výhodou tohoto zdroje alternativní energie je fakt, že narozdíl od energie solární nebo větrné není závislý na vnějších podmínkách a je tedy v průběhu času stabilnější. Velkou nadějí na zlepšení využití geotermální energie ve světě pak přinesl Evropský výzkumný Hot dry rock projekt. Myslím si, že díky tomuto projektu a jeho výsledkům je velká šance na budování většího počtu takových geotermálních elektráren i v zemích, kde se o tom doposud příliš neuvažovalo, Českou republiku nevyjímaje. Doufám, že výsledky získané výzkumem nevyzní naprázdno a skutečně dojde k většímu využití zemského tepla a tím i zmenšení zátěže pro životní prostředí.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Aquilina L., Rose P., Vaute L., Brach M., Gentier S., Jeannot R., Jacquot E., Audigane P., Tran-Vie T., Jung R., Baumgärtner J., Baria R., and Gérard A., 1996. A tracer test at the Soultz-sous-Forets Hot dry rock geothermal site, In: *Proceedings, Twenty-first Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, Stanford University, California, USA, January 22-24, 1996, str. 343-347

André L., Vuataz F.-D., 2005. Simulated evolution of reservoir properties for the enhanced geothermal system at Soultz-sous-Forets: The role of hot brine-rock interactions, In: *Proceedings, Thirtieth Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, Stanford University, California, USA, January 31-February 2, 2005, str. 283-290

Baria R., R.Jung, T.Tischner, J.Nicholls, S.Michelet, B.Sanjuan, N.Soma, H.Asanuma, B.Dyer and J.Garnish, 2006. Creation of an HDR reservoir at 5000 m depth at the European HDR project, In: *Proceedings, Thirty-first Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, Stanford University, California, USA, January 30-February 1, 2006, str. 364-371

Baria R., Michelet S., Baumgärtner J., Dyer B., Gérard A., Nicholls J., Hettkamp T., Teza D., Soma N., Asanuma H., Garnish J., Megel T., 2004. Microseismic monitoring of the World's largest potential HDR reservoir, In: *Twenty-ninth Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, Stanford University, California, USA, January 26-28, 2004, str. 194-201

Baria R., Michelet S., Baumgärtner J., Dyer B., Nicholls J., Hettkamp T., Teza D., Soma N., Asanuma H., Garnish J., Megel T., Kohl T., Kueperkoch L., 2005. A 5000 m deep reservoir development at the European HDR site at Soultz, In: *Proceedings, Thirtieth Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, Stanford University, California, USA, January 31-February 2, 2005, str. 291-298

Baumgärtner J., Gérard A., Baria R., Garnish J., 2000. Progress at the European HDR project at Soultz-sous-Forets: Preliminary results from the deepening of the well GPK-2 to 5000 m, In: *Proceedings, Twenty-fifth Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, Stanford University, California, USA, January 24-26, 2000, str.16-24

Baumgärtner J., Jung R., Gérard, A., Baria R., and Garnish J., 1996. The European HDR project at Soultz-sous-Forets: Stimulation of the second deep well and first circulation experiments, In: *Proceedings, Twenty-first Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, Stanford University, California, USA, January 22-24, 1996, str. 267-274.

Baumgärtner J., Gérard A., Baria R., Jung R., Tran-Vieta T., Gandyn T., Aquilina L., Garnish J., 1998. Circulating the HDR reservoir at Soultz: Maintaining production and injection flow complete balance, In: *Proceedings, Twenty-third Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, Stanford University, California, USA, January 26-28, 1998, str. 11-20

Hazdrová a kol. (1981) Geotermální energie a její využití, Ústřední ústav geologický, str. 1-127

Hettkamp T., Baumgärtner J., Baria R., Gérard A., Gandy T., Michelet S., Teza D., 2004. Electricity production from hot rocks, In: *Twenty-ninth Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, Stanford University, California, USA, January 26-28, 2004, str. 184-193

Lowrie W., 2007. *Fundamentals of Geophysics*, Cambridge Univ. Press

Myslil V., Kukul Z., Pošmourný K., Frydrych V., 2007. Geotermální energie, *Planeta*, č.4, str. 1-32

Sanjuan B., Rose P., Foucher J.-C., Brach M., Braibant G., 2004. Tracer testing at Soultz-sous-Forets (France) using Na-Benzoate, 1,5- and 2,7-Naphthalene disulphonate, In: *Twenty-ninth Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, Stanford University, California, USA, January 26-28, 2004 str. 222-229

Soma N., Niitsuma N., Baria R., 2000. Estimation of deep subsurface structure in European Hot dry rock test site, Soultz-sous-Forets, France, by use of the AE reflection method, In: *Proceedings, Twenty-fifth Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, Stanford University, California, USA, January 24-26, 2000, str. 244-251

Tischner T., Schindler M., Jung R., Nami P., 2007. HDR Project Soultz: Hydraulic and seismic observations during stimulation of the 3 deep wells by massive water injections, in: *Proceedings, Thirty-second Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, Stanford University, California, USA, January 22-24, 2007, str. 322-328

Weidler R., Gérard A., Baria R., Baumgärtner J., Jung R., 2002. Hydraulic and microseismic results of a massive stimulation test at 5 km depth at European Hot dry rock test site, Soultz, France, In: *Proceedings, Twenty-seventh Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, Stanford University, California, USA, January 28-30, 2002, str. 95-100

www.soultz.net, 1.8.2009