

GEOTERMÁLNÍ ENERGIE

Ekologická energie z hlubin Země – současné možnosti využívání

Ing. Vlastimil Myslík, CSc., Geomedia s. r. o.
Doc. RNDr. Zdeněk Kukal, DrSc., Česká geologická služba
RNDr. Karel Pošmourný, CSc., Ministerstvo životního prostředí
Mgr. Václav Frydrych, Geomedia s. r. o.

Obsah

Krajinně-ekologické a ekonomické aspekty využívání geotermální energie jako součásti spektra obnovitelných zdrojů energie.....	2
Úvod.....	3
Historie výzkumu a využití geotermální energie.....	4
Planeta Země v kosmickém prostoru.....	4
Fyzikální charakteristiky tepla.....	6
Základní jednotky ve vztahu k teple.....	6
Převodní vztahy.....	6
Přenos tepla.....	6
Přenos tepla vodou.....	6
Přenos tepla plyny.....	7
Geotermický stupeň, růst teploty s hloubkou a tepelný gradient.....	7
Tepelný tok.....	7
Tepelná vodivost hornin.....	9
Geotermální zdroje – zdroje zemského tepla.....	10
Sluneční záření jako zdroj tepelné energie.....	10
Produkce tepla rozpadem radionuklidů.....	11
Význam pohybu podzemních vod.....	13
Teplo v dosahu magmatické činnosti.....	14
Oceánský vulkanismus jako dodavatel tepla.....	14
Tepelná bilance oceánských vod.....	14
Geologické podmínky výskytu geotermálních systémů a zdrojů.....	15
Hodnocení geologických struktur.....	15
Geotermální systémy.....	16
Stabilní a přechodné geotermální systémy.....	16
Systém hydrotermální.....	16
Systém a technologie Hot-Dry-Rock.....	16
Systém Fractured-Hot-Rock.....	17
Příklady využití potenciálu geotermální energie na světě.....	17
Geotermální potenciál Česka.....	21
Využití primárních zdrojů zemského tepla o nižší teplotě.....	22
Systémy získání primárních zdrojů zemského tepla.....	22
Systém voda – voda.....	23
Systém země – voda, svislý výměník.....	23
Systém země – voda, vodorovný výměník.....	24
Technické a ekonomické úvahy o využití tepelných čerpadel.....	23
Výzkum geotermální energie a možnosti jejího využití.....	24
Ekonomické problémy využití geotermální energie.....	26
Metodika hodnocení geotermálních poměrů.....	26
Geotermální atlas Evropy.....	27
Větší územní celky (Česká republika).....	27
Geotermální energie ve vztahu k životnímu prostředí.....	28
Environmentální aspekty vs. technické využití.....	28
Povolování vrtu pro využívání geotermální energie.....	28
Závěrečné úvahy.....	29
Podpora využívání geotermální energie v Česku.....	30
Literatura.....	30

PLANETA

odborný časopis pro životní prostředí

Ročník XV, číslo 4/2007

Vychází 6–12× ročně
Vydává Ministerstvo
životního prostředí
Vršovická 65
100 10 Praha 10

tel.: 267 122 549
fax: 267 126 549

Tisk DOBEL, Lanškroun

Titul PLANETA má registrováno
Ministerstvo životního prostředí
a časopis vychází jako monotematická čísla
věnovaná problematice životního prostředí

MK ČR E 8063

ISSN – tištěná verze 1801-6898

Krajinně-ekologické a ekonomické aspekty využívání geotermální energie jako součásti spektra obnovitelných zdrojů energie

Návrh Operačního programu Životní prostředí pro období 2007–2013 předpokládá v prioritní ose 3 – udržitelné využívání zdrojů energie rozsáhlé využití obnovitelných zdrojů, které spolu s realizací úspor energie přispívá k šetrnému využívání zdrojů přírodních, diverzifikaci nabídky energie, snižování energetické náročnosti a tím je základem udržitelného sociálně ekonomického rozvoje. Ve svém důsledku pomáhá ke snižování zátěže životního prostředí, neboť vyšším využíváním obnovitelných zdrojů energie (dále OZE) a realizací úspor energie lze nahradit spalování fosilních paliv se všemi negativními vlivy, které tato technologie produkuje. V mezinárodním měřítku cíl vychází z Evropské strategie udržitelného rozvoje a z 6. akčního programu EU. Je v souladu s Národním lisabonským programem 2005–2008 přijatým usnesením vlády České republiky. Mezi jeho prioritní opatření patří maximalizace energetické a materiálové efektivity a hospodárné využívání zdrojů.

Racionální využití všech dostupných energetických zdrojů patří mezi priority Státní politiky životního prostředí a Státní energetické koncepce, schválenými usnesením vlády ČR. Na předním místě veškerého úsilí je vyšší využití obnovitelných a druhotných zdrojů energie, maximalizace energetické a elektro-energetické efektivity a prosazování úspor energií.

V přístupové smlouvě se Česká republika zavázala ke zvýšení podílu elektřiny z OZE na hrubé spotřebě elektřiny na 8 % k roku 2010 a ke zvýšení podílu OZE na celkové spotřebě primárních energetických zdrojů na 6 % k roku 2010. Je to závažný úkol uvážíme-li, že podíl spotřeby OZE na spotřebě primárních energetických zdrojů v roce 2000 byl 2 % a v roce 2004 činil 2,9 %.

Zásadní změnu podmínek v podpoře využití obnovitelných zdrojů energie pro výrobu elektřiny přineslo přijetí zákona č. 180/2005 Sb., o podpoře výroby elektřiny z OZE. Na druhé straně vysoká počáteční investice do opatření využívajících OZE je spolu s nedostatečnou kapitálovou vybaveností (zejména obcí) příčinou pomalého rozvoje jejich instalací, protože výše výkupních cen a zelených bonusů je v mnoha případech na hranici návratnosti do jejich investice, navíc zcela chybí legislativní podpora jejich využití pro výrobu tepla.

Operační program Životní prostředí pro období 2007–2013 proto vymezil globální cíl, kterým je udržitelné využívání zdrojů energie, zejména obnovitelných zdrojů energie, a prosazování úspor energie. Dlouhodobým cílem je zvýšení využití OZE při výrobě elektřiny a zejména tepla a vyšší využití odpadního tepla. Tento cíl má být realizován v rámci následujících programů:

- zvýšení kapacity pro výrobu tepla a elektřiny z obnovitelných zdrojů energie,
- zvýšení využití odpadního tepla a úspor energie,
- snížení spotřeby energie na vytápění,
- náhrada spalování fosilních paliv a snížení znečištění životního prostředí.

U strategie pro dosažení cílů je hlavním problémem nedostatečné využívání OZE a pomalé prosazování úspor energie v celém spektru společnosti. Systém investičních podpor je nedostatečný vzhledem k potřebným finančním prostředkům. Malé povědomí veřejnosti o přednostech OZE a úspor energie a nedostatečné investice mohou nastartovat řadu problémů se splněním cílů dle uvedených státních politik.

Proto se předpokládá, že bude potřeba prosazovat úspory energie a zvýšit využití OZE v neziskové sféře (objekty rozpočtové

sféry, veřejná účelová zařízení, obecní objekty apod.) v návaznosti na již existující dokumenty (krajské a místní energetické koncepce, programy snižování emisí a imisí, územní plány apod.). Projekty navržené k podpoře v rámci oblastí podpory je nutné nejdříve odborně vyhodnotit a posoudit jejich přínos ke stanoveným cílům i jejich ekonomickou efektivnost. Pro snížení vysoké energetické náročnosti České republiky se očekává, že se zvýší využití odpadního tepla a bude nutné se orientovat na úspory energie v neziskovém sektoru a v sektoru bydlení, kde je vysoký potenciál nákladově efektivních řešení.

Až potud by bylo možné souhlasit, ale výsledkem všech těchto úvah by mělo být více než programy v oblasti větrné energie, sluneční energie, biomasy, vodní geotermální aj. energie; a v sektoru energetické účinnosti: kogenerace, hospodaření s energií apod. Vcelku lze mechanicky – tak jak to činí mnoho oficiálních dokumentů – tyto problémy rozepsat takto:

- Výstavba nových zařízení a rekonstrukce stávajících zařízení s cílem zvýšení využívání OZE pro výrobu tepla, elektřiny a kombinované výroby tepla a elektřiny. Bude podporováno zvýšení kapacity OZE pro vytápění objektů a ohřev teplé vody v sektoru rozpočtové sféry s vysokým potenciálem nákladově efektivních řešení (např. v obecních objektech, ústavech sociální péče, školách, domovech důchodců, mateřských školách apod.). Důležitým cílem je zvýšení kapacity OZE pro výrobu elektrické energie.
- Realizace úspor energie a využití odpadního tepla u nepodnikatelské sféry. Pro zvýšení úspor energie jsou jako investiční podpora navržena typová technická opatření, zejména podpora snižování spotřeby energie budov neziskového sektoru prostřednictvím energeticky výhodnějšího pláště budov a efektivnějších systémů distribuce energií. Podpora zateplování panelových domů nebude v rámci této oblasti podpory realizována (je součástí Integrovaného operačního programu).
- Environmentálně šetrné systémy vytápění a přípravy teplé vody pro fyzické osoby. Mezi vhodné a podporované aktivity náleží instalace obnovitelných zdrojů energie zejména pro vytápění a přípravu teplé vody, např.: solární systémy, kotle na biomasu, tepelná čerpadla, využití odpadního tepla atd. Pokud jde o formální a verbální vyjádření potřeb, lze toto považovat za obsahově vyčerpávající vymezení budoucího snažení. Stejně jako v jiných oblastech životního prostředí i zde převládá zaměření na ty postupy a technologie, které se zdají být „jednoduché“, „srozumitelné“ a proto „efektivní“. Zavedeme-li do těchto úvah povinnost respektovat relevantní potřeby prostředí, ve kterém se mají tyto procesy odehrávat, a tím je prostor krajiny a zejména její ekologická stabilita, přestávají být strategie jednoduché, srozumitelné i efektivní. Jen pro ilustraci několik příkladů:
 - instalace fototermitických systémů pro přípravu teplé vody a dodávku tepla, resp. pro možnost přitápění a instalace fotovoltaických systémů pro výrobu elektřiny je vždy spojena s potřebou rozsáhlých ploch, které samy o sobě vyžadují poměrně komplikovanou údržbu a vysoké provozní náklady, pokud se nemají stát neživou součástí prostředí;
 - instalace tepelných čerpadel pro dodávku tepla a pro přípravu teplé vody je způsob, jak energii získat – pokud se vyskytuje – a nikoliv kde ji získat;
 - instalace kotlů na biomasu a systémů využívajících biomasu pro výrobu elektřiny, pro dodávku tepla a pro přípravu teplé

vody, eventuálně v kombinaci s výstavbou centrální výroby paliv, včetně technologické linky – toto je jasný způsob pro tradiční výrobu energie na bázi spalování, který má mnoho zastánců již z toho důvodu, že technologické postupy jsou minulostí vyzkoušeny, takže by nic nemělo stát v cestě k jejich realizaci. Doposud však bylo vypracováno jen poměrně málo studií, které by také hodnotily vliv na krajinu a na ekologickou stabilitu lokality, ve které se má celý proces odehrávat. Současně je nutné zdůraznit požadavek, že spalováním biomasy nesmí dojít ke zhoršení kvality ovzduší, což v mnoha případech zcela likviduje relativní ekonomickou výhodnost tohoto způsobu výroby energie;

- instalace kogeneračních jednotek pro kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie z biomasy, skládkového plynu, bioplynu apod. – pomineme-li problémy, které vznikají s využitím v důsledku časového posunu jednotlivých technologií výroby, a tím i snížení možnosti uplatnění ve sféře spotřeby, jedná se o technicky vysoce náročná zařízení, které lze uplatnit pouze v některých specifických oblastech, kde lze manipulovat se spotřebou jednotlivých typů energie;
- instalace větrných elektráren v podmínkách ČR má mnoho zastánců, ale také odpůrců, protože se vždy jedná o drastický zásah do krajinného rázu, pomineme-li i související negativní environmentální důsledky, jako je vliv na snížení biodiverzity a další, které doposud nebyly systematicky vyhodnoceny;
- instalace malých vodních elektráren by byla vysoce environmentálně přínosným způsobem, pokud by orgány schvalu-

jící realizaci měly alespoň elementární ekologické znalosti a tyto promítly do podmínek provozování těchto zařízení. Bohužel – množí se případy, kdy podmínky provozu buď nejsou respektovány provozovateli – a schvalující orgán nemá vůli, ochotu, či sílu prosadit nápravu, nebo jsou nastaveny tak špatně, že umožňují nesprávné environmentální chování provozovatelů. Tato závislost na správních orgánech a jejich kvalitě bohužel ovlivňuje nejen malé vodní elektrárny.

A tak jediným ekologicky nezávadným způsobem řešení využití OZE se stává instalace systémů pro dodávku tepla, včetně přípravy teplé vody, pro dodávku elektřiny a kombinované výroby tepla a elektřiny s využitím geotermálních systémů, které naráží na odpor zejména z titulu kognitivní bariéry mnoha pracovníků decísní sféry. Neznalost, neochota posuzovat problémy komplexně, odmítání environmentálních argumentů a další, jsou největší překážkou pro využívání tohoto nejpřirozenějšího způsobu zajištění energie v rámci OZE.

Proto je tato publikace určena převážně těm lidem, kteří chápou, že nás naši potomci budou hodnotit také podle toho, do jaké míry byly naše plány jen monotónním opakováním minulosti a do jaké míry jsme byli ochotni na sebe převzít odpovědnost i za budoucnost (a její potřeby) a řešení založit na využití technologií budoucnosti.

RNDr. Jan Kender,
ředitel odboru ekologie krajina a lesa MŽP

Úvod

Zemské teplo je jedním z nejatraktivnějších zdrojů obnovitelné alternativní energie. Zájem o ně byl podněcen starostmi a akcemi na omezení emisí oxidu uhličitého a s tím spjatým globálním oteplováním. Využívání takové energie neprovázejí ani další nepříznivé důsledky jako třeba spalování fosilních paliv, a proto jde o energii čistou a ekologickou. Geotermální energie patří podle jiné terminologie k energiím alternativním, do stejné skupiny jako energie solární, větrná, energie vyráběná spalováním biomasy a podle některých autorů i energie atomová.

Studiem zemského tepla se zabývá geotermika, jež je odvětvím geofyziky. Je to věda o tepelném stavu planety Země. S geotermikou souvisí i studium radioaktivity zemského tělesa, tj. rozložení radioaktivních látek v zemi, množství tepla uvolněného jejich rozpadem, rychlost rozpadu, absorpce radioaktivního záření horninami a další přidružené procesy.

Podnětem ke zvýšenému zájmu o geotermální energii bylo i několik stadií ropné krize v druhé polovině 20. století i obavy o vyčerpání klasických energetických zdrojů. Dalším stimulem byly i politické, administrativní i vědecké akce, organizované v obavách o následky globálního oteplování. Význam a prestiž takových akcí se zvýšil na konci 20. století a roste dodnes.

Geotermální energie je přírodní teplo Země, koncentrované v rezervoárech hornin, obvykle nasycených kapalinou. Přitom vzniká potenciálně využitelný zdroj energie.

Geotermální energie je v nitru Země zachována po celou dobu geologické historie. Podle některých autorů (Rummel a Kappelmeier, 1993) by ochlazení 1 km³ horké zemské kůry o 100 °C mohlo dodávat elektrickou energii elektrárně s kapacitou 30 MW po 30

let. Dosavadní využití geotermální energie elektrárnami je jen cca 5800 MW a dalších přibližně 11 000 MW je využíváno z teplých vod pro vyhřívání a balneologické účely.

Původ zemského tepla, jeho hromadění a vztahy k okolnímu prostředí, to jsou především problémy geologické. Geologie, jak známo, se zabývá především historií Země a přírodními procesy, které po toto dlouhé období probíhaly. Zkoumá však i pochody současné a podle hesla „současnost je klíčem k minulosti“ se snaží porozumět geologickým procesům geologické historie. Moderní geologie se dokonce snaží, a to s úspěchem, posoudit, jak budou geologické procesy vypadat v bližší i daleké budoucnosti. Platí to i pro geotermiku. Pokud jsou geotermální systémy činné v současnosti, říkáme jim recentní. Mnohé podobné systémy byly aktivní během dlouhé geologické historie a pokud je rozpoznáme, říkáme jim fosilní. Některé z nich jsou staré i miliardy let, přesto po nich mohly zůstat po zřetelné stopy. Podle jejich geologických záznamů dokonce můžeme soudit, že v určitých geologických obdobích a některých oblastech se na povrchu a nehluboko pod ním projevovaly intenzivněji než dnes. Stopy jejich existence v různých geologických obdobích jsou hlavně tyto:

- a) uložení travertinů nebo křemitých sintrů,
- b) mnoho typů hydrotermálních rudních ložisek,
- c) další stopy hydrotermálních procesů, jako metasomatická dolomitizace, silicifikace, kaolinizace a další přeměny, u nichž byla potvrzena úloha horkých vod,
- d) přítomnost starých otevřených a vyhojených puklin, vyplněných minerály, tvořenými za zvýšené teploty. Nejčastěji křemenem a kalcitem, avšak i barytem, sideritem, ankeritem, zeolity i jinými minerály,

e) přítomnost speciálních proterozoických stromatolitů, sedimentů bakteriálního a řasového původu, u nichž se předpokládá, že se tvořily kolem podmořských horkých pramenů.

Níže se budeme zabývat i klasifikací recentních a fosilních geotermálních systémů, a to podle jejich geologické pozice, hydrologického režimu a typu přenosu tepla.

Z hlediska potenciálního využití tepelné energie se užívá termínu geotermální rezervoár. Primárně je totiž tepelná energie v zemské kůře více či méně rozptýlena a k její koncentraci je třeba využít schopností vody či páry, aby se nahromadila do jednoho místa, tedy geotermálního rezervoáru. Pohyb vody či páry nebo obou je podmíněn rozdílem hustot mezi sestupující chladnější meteorickou vodou a vystupující vodou ohřátou. Při procesu akumulace geotermální energie hraje značnou roli pórovitost (poróznost) a propustnost (permeabilita) horninového prostředí.

Jiné využití zemského tepla je z tzv. „suchých hornin“ (známé pod termínem HDR – Hot Dry Rock – horká suchá hornina). Jsou řešeny dva systémy, jednak přímé využití masívu „suchých“ hornin a jednak soustředěného výstupu zemského tepla na drčených, puklinových a podobně oslabených zónách (FHR – Fractured Hot Rock – teplo z rozpukaných hornin).

V obou případech je pohyb a akumulace zemského tepla zásadně ovlivněn otevřeností, nebo uzavřeností geologických a hydrogeologických struktur.

Historie výzkumu a využití geotermální energie

Tak, jak je nejasné datování prvních zpráv o starých měřeních teploty pod zemským povrchem, jsou i rozporuplné současné údaje o počátcích vědeckého výzkumu zemského tepla. Víme, že již starověcí přírodovědci a filozofové psali o podzemním ohni. Ze středověkých kronik lze vyčíst, že např. v kutnohorských stříbrných dolech několik set metrů pod povrchem byly teploty mnohem vyšší než na povrchu. Další údaj z českého území napovídá, že v příbramském dole Vojtěch, kde se poprvé na světě v roce 1873 prorubali hlouběji než 1000 m pod povrch, byly teploty padesátistupňové.

Často se uvádí, že první známou zmínkou o vědeckém měření teploty pod povrchem je pojednání J. J. D. Maurama, který se snažil přesně zaznamenat teploty v anglických dolech v roce 1733. Bohužel se údaje o naměřených hodnotách nezachovaly. Ojedinelá je zmínka W. Arnolda (1973) o tom, že první vědecká měření teploty v dolech pocházejí z Baňské Štiavnice. V roce 1630, kdy byla známa spíše pod německým jménem Schemnitz a maďarským Selmečbánya, navštívil tamější doly francouzský astronom a fyzik J. B. Morin a podle vlastního pozorování doslova napsal, že s každými padesáti metry hlouběji stoupá teplota o 1 °C.

Zmíníme se i o známých hypotetických úvahách, které počítaly s původně žhavou Zemí, jež postupně vychládala. Pokud byly na počátku teploty zemského tělesa podobné jako na Slunci, tj. kolem 6000 °C, lze prý vypočítat stáří Země podle rychlosti vychladnutí tělesa do teplot současných. Pokoušel se o to např. francouzský matematik a fyzik Jean B. Fourier (kolem roku 1820). Ten ve svých výpočtech dokonce uvažoval hodnoty tepelné vodivosti hornin Země a vycházel z primární teploty, která měla odpovídat teplotě Slunce.

Podobnou metodu použil William Thomson, známý pod jménem lord Kelvin. Upřesnil starší metody a vyšlo mu, že Země je 20 milionů let stará, později však výpočet upravil na 100 milionů let.

K revoluci v názorech došlo při objevu přirozené radioaktivity na konci 19. století. V roce 1903 upozornil J. Joly na to, že se do výše uvedených výpočtů musí zahrnout teplo vznikající rozpadem radioaktivních prvků. Podobně uvažoval lord Rayleigh (vlastním jménem R. J. Strutt), jenž v roce 1906 doplnil výpočty o údaje o koncentracích radioaktivních prvků v kůře.

Význam rozpadu radionuklidů pro výpočet tepelné energetické bilance Země je tak obrovský, že mu níže věnujeme speciální kapitulu.

Sledujeme-li využití geotermální energie, vracíme se až do starého Říma, kde vytápěli své termální lázně přírodní teplou vodou, a to nejen v Itálii, ale i v dnešním Německu, Francii, Španělsku, Řecku, Turecku a dokonce i Anglii. I některé civilizace na Blízkém východě (Jihozápadní Asii) využívaly termální prameny, zprávy jsou i z Dálného východu, jak z Číny, tak z Japonska. Od roku 1888 používali lidé na Islandu teplou vodu k vytápění skleníků, od roku 1928 bylo hlavní město Reykjavík postupně zásobováno teplem z geotermálních zdrojů. V roce 1827 navrhl Ital Francesco Lardelero využití přehřáté páry z fumarol v Toskáně na výrobu kyseliny borité, což zřejmě bylo první průmyslové využití geotermální energie. V roce 1904 na stejném místě Ital Piero Ginori Conti rozsvítil přírodní tepelnou energii 5 žárovek. O několik let později, v roce 1912 byl již v provozu generátor o kapacitě 250 kW elektrické energie.

Svou historii má i historie praktických metod k využití tepelné energie. V literatuře se zde znovu objevuje Rakousko-Uhersko, tentokrát jeho chorvatské území, kde prý probíhalo měření teplot pod povrchem prospekčním způsobem již v roce 1906. Po tomto roce však podobných údajů rychle přibývalo, neboť měření teploty pod zemským povrchem bylo i součástí průzkumů na ropu a zemní plyn.

Planeta Země v kosmickém prostoru

Součástí tepla Země je kosmické teplo, dodávané Zemi v souvislosti se vznikem naší sluneční soustavy. Tak jako u ostatních kosmických těles tvoří horniny jakýsi ochranný obal, který brání rychlému úniku z vnitřních částí a tím jejich celkovému prochlazení.

Slunce je zdrojem veškeré energie, kterou Země přijímá z Vesmíru. Na Zemi však přichází jen zlomek sluneční energie, i když Slunce samo, jež si vytváří svou energii jadernou syntézou, vyzařuje v každém okamžiku obrovské množství energie. Tím se však ochuzuje o miliony tun své hmoty. Sluneční energie je spjata s termonukleárními reakcemi, při kterých se vodík mění na helium. Teplo na slunečním povrchu je kolem 6000 °C, zatímco v nitru má Slunce až neuvěřitelnou teplotu kolem 15 milionů °C. Země jako planetární těleso je též dotována teplem ze slunečního záření (viz str. 11). Srovnáme-li povrch Země s přísunem sluneční energie s hodnotou 0,35 W·m⁻², pak lze množství tepla ze slunečního záření pro Zemi charakterizovat hodnotou $Q_s = 2,5$ milionů MW.

O struktuře a složení zemského tělesa máme dostatek speciálních publikací a proto se těmito otázkami nemusíme podrobně zabývat. Zmíníme se jen o hlavních vrstvách, obklopujících zemské jádro a připojíme stručně jejich fyzikální a petrologickou charakteristiku.

Postupujeme-li od středu Země ven, máme napřed jádro, někdy geofyziky ještě dělené na vnitřní a vnější jádro. To zasahuje do vzdálenosti 3500 km od středu Země. Dále od středu Země je plášť, který se dělí na spodní a svrchní. Vnější slupku zemského tělesa tvoří zemská kůra, tlustá od 6 km pod oceány až po 70 km na pevnině pod nejvyššími pohorími; v Čechách má mocnost 30–

34 km. Rozeznáváme dva typy zemské kůry, méně mocnou oceánskou a mocnější, navíc s granitovou vrstvou, kontinentální.

V nitru Země je dostatek geotermální energie, její zdroje jsou ovšem dosažitelné jen ve svrchní části zemské kůry. Podle odhadů je v nejsvrchnější tříkilometrové vrstvě zemské kůry zakonzervováno teplo jak v horninách, tak ve vodě i páře v množství, které by stačilo pokrýt spotřebu lidstva nejméně na 100 000 let.

Tepelné pole Země je charakterizováno několika základními parametry:

- geotermálním stupněm
- teplotním gradientem q grad T
- hustotou tepelného toku q
- tepelnou vodivostí hornin k

Tyto parametry jsou v podrobnostech popsány v následujícím textu. Charakteristika jednotlivých zemských sfér je uvedena v tabulce 1

Tabulka 1

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

Z hlediska tepelného režimu zemského tělesa je důležité též složení jednotlivých zemských vrstev, jelikož různé minerály a tím i horniny mají různou tepelnou vodivost. Bohužel nemáme možnost přímo studovat vzorky z celého zemského tělesa. Odkryvy, s jedinou výjimkou, nám umožnily poznat pouze kontinentální a oceánskou kůru. I s těmi nejhlubšími vrty na tom nejsme lépe. Zmíněná výjimka se týká Kajmanského příkopu v Karibském moři. Na jeho strmé stěně jsou odkryty nejen nejsvrchnější části oceánské kůry, nýbrž i nejsvrchnější plášť, jehož petrologické složení lze charakterizovat jako peridotity a dunity, tzn. horniny, tvořené převážně minerálem olivínem. K bližší charakteristice spodnějších částí kůry a svrchního pláště pomohou i xenolity, což jsou kusy hornin, vytržené z hloubky vystupujícím magmatem a vyvržené vulkanickými procesy. Jinak na složení hlubších zemských partií můžeme soudit podle průběhu a rychlosti zemětřesených vln i podle celkového chování zemského tělesa jako planety. K poznatkům může přispět i složení meteoritů. Z toho odvodíme hustotu prostředí i jeho skupenství. Platí to pro zemské jádro a plášť. Vnitřní jádro je zřejmě tvořeno slitinou železa a niklu s menším množstvím, odhadem 8 až 12 % lehkých prvků, zejména síry. Vnější jádro je podle charakteru seizmických vln kapalné. U zemského pláště soudíme, že s hloubkou pod povrchem vlivem rostoucího tlaku jsou horniny těžší a těžší, z minerálů o těsnější krystalografické mřížce a větší hustotě. Řada modelů předkládá různé možnosti, nejpravděpodobnější je peridotitové a dunitové složení svrchního pláště a perowskitové pláště spodního. S hloubkou přibývá minerálu olivínu na úkor pyroxenu. Složení kůry je v podstatě dobře známé, až na některé sporné otázky. Zásadní jsou rozdíly mezi kontinentální a oceánskou kůrou. Rozdíl je v mocnosti a přítomnosti tzv. granitové vrstvy v konti-

nentální kůře. Kontinentální kůra je mocná od 30 do 70 km, nejmocnější je pod horskými pásmy a na geologicky nejstabilnějších částech. Název granitová vrstva neznáčí, že by byla tvořena pouze granitem, ale může sestávat z různých hornin fyzikálně granitu podobných, tzn. i ze zpevněných sedimentů a metamorfovaných hornin, jako rul a svorů. Spodní části kontinentální kůry jsou bazaltové. Granitová vrstva je oddělena od bazaltové Conradovou diskontinuitou, která je sice sledovatelná podle průběhu zemětřesených vln, ale není souvislá, někde je dokonce velmi nezřetelná. Oceánská kůra je bazaltová a mocná od několika do 12 km, místy i 15 km. V nejsvrchnější části je tvořena nezpevněnými sedimenty, pod nimiž jsou sedimenty zpevněné. Pokud sedimentární vrstva chybí, jsou na povrchu bazalty. Jejich svrchní polohy mají charakter žil a polštářových láv, ve spodní části jsou to intruzivní ekvivalenty bazaltů, tzn. gabra. Podle některých názorů jsou spolu s gabry ve spodní kůře i metamorfované horniny, odpovídající zeleným břidlicím.

Fyzikální hranice mezi kůrou a pláštěm jsou ostré, diskontinuitní, a proto se nazývají Mohorovičičovou diskontinuitou (zkratka Moho, či ještě lépe M). V místech, kde dochází k pohybům a reaktivaci procesů, je hranice nezřetelná a mísí se korový materiál s plášťovým. K tomu dochází hlavně pod riftovými zónami, jak na kontinentu, tak v oceánu. Ve svrchním plášti, v hloubkách 80 až 120 km je vrstva, kde jsou horniny zřejmě v poloplastickém stavu, jak bylo pozorováno podle zpomalení seizmických vln. Proto se jí říká low velocity layer, tj. vrstva o snížené rychlosti vln. Je pravděpodobné, že právě tato vrstva je prostředím, podle kterého se pohybují desky. Dochází zde ovšem k mírnému zmatení pojmů. Pevná součást, tj. celá zemská kůra s částí svrchního pláště, včetně vrstvy se sníženou rychlostí vln, až do zmíněné hloubky 80–120 km, se nazývá litosféra. Proto není správné, jak se to mnohdy dělá, postavit rovnítko mezi zemskou kůrou a litosférou.

Toto je velmi zjednodušený popis schématu zemského tělesa s celou jeho pestrostí, dokazující, jak jeho heterogenita ovlivňuje teplotní režim. Teplotu na zemském povrchu známe docela přesně a víme, že kolísá od -90 °C do +60 °C podle klimatického pásu. Vliv slunečního záření zasáhne mělce pod povrch, nejčastěji do hloubky 2 až 5 m, na pouštích až do 20 m. Pod touto hloubkou je přechodná zóna a teprve pod ní se projevuje výstup zemského tepla a růst teploty je charakterizován teplotním stupněm a gradientem (viz str. 7).

Teplota jádra Země, které se dostane až k zemskému povrchu, odhadujeme na 300.10⁹ MW.rok⁻¹, což je o několik řádů více než množství energie dodávané přírodními i umělými procesy. Obvyklé hodnoty růstu teploty do hloubky pod povrch jsou narušeny mnoha anomáliemi, hlavně u okrajů desek s vystupujícím magmatem, tektonických poruch, jež zasahují hlouběji pod povrch až do svrchního pláště a různou vodivostí hornin.

Znalosti o pohybu tepla ve větších hloubkách pod povrchem Země nejsou prakticky ověřeny a jsou odvozovány podle obecných zákonitostí a zčásti podle vyhodnocování geofyzikálních měření, hlavně rychlosti zemětřesených vln a jejich lomu. Přímá měření byla možná jen na několika místech kontinentální a oceánské kůry a v rámci ložiskového průzkumu ložisek ropy a plynu, ovšem jen do hloubky 11 km. Těmito vrty byly některé modelové výpočty a hypotézy upřesněny. Některé poznatky jsou spjaté s pozorováním teploty magmatu, jeho složením a předpokladem roztažení hornin v různých hloubkách. Novější poznatky umožňují srovnání se složením meteoritů a výsledky kosmického výzkumu.

Podrobnější přímá sledování teplot v různých zemských strukturách se provádí do hloubky 4–5 km pod povrchem v rámci programu využití geotermální energie.

Fyzikální charakteristika tepla

Teplu je energetickým projevem pohybu malých částic hmoty. Mírou těchto pohybů je kinetická energie. Tepelná energie je z fyzikálního hlediska ve své podstatě vlněním. Je to neuspořádaný pohyb molekul, které proudí z teplejších míst k chladnějším. Čím je těleso teplejší, tím se jeho atomy a molekuly pohybují rychleji. Různé chování látek při zahřívání se nazývá specifické teplo. Hodnota specifického tepla je závislá na stavu hmoty, jako hornin, kapalin a plynů, dále na tlaku. Specifické teplo některých pevných látek se zvětšuje se stoupající teplotou. Specifické teplo tuhých látek má přibližně shodnou hodnotu $c = 6,2 \text{ cal/g.grad}$, specifická teplota kapalin je jen málo závislá na teplotě, specifická teplota plynů je většinou konstantní, výjimkou je však oxid uhličitý, jenž se výrazně mění jak se změnou teploty, tak tlaku.

Termodynamika studuje teplo jako jednu z energií. Obecně platí zákon o zachování energie, což znamená, že energie nemůže být vytvořena, ani nemůže zaniknout. Může jen přecházet z jedné podoby do druhé. Jakýkoli druh energie, tj. tepelná, elektrická, magnetická i mechanická, může být přeměněn na teplo. Tepelnou energii nelze však beze zbytku přeměnit v jiné druhy energie, vzhledem k tomu, že mají látkovou entropii a nedovolují úplnou přeměnu energie. Pro absolutní nulovou teplotu 0 stupňů kelvina ($K = -273,15 \text{ } ^\circ\text{C}$) je entropie teoreticky rovna nule.

Základní jednotky ve vztahu k teplu

V teoretických i aplikovaných pracích o geotermální energii se používá řada jednotek – veličin – a to starších i novějších, oficiálních i neplatných. Jelikož v tomto pojednání čerpáme ze řady zdrojů, nepřepočítáváme údaje na jedinou jednotku. Proto pokládáme za nutné připojit tabulku přepočtů.

Výkon – množství práce vykonané za jednotku času. Jednotkou SI je watt. Watt (W) je výkon, při němž se rovnoměrně vykoná práce 1 joulu za 1 sekundu.

Wattodina (W.h^{-1}) = jednotka práce (energie). Je definována vztahem $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$.

Násobků wattodiny, hlavně 1 kW.h (kilowattodina), se běžně užívá v energetice.

Tabulka 2

Základní veličiny a jejich přepočty

Veličina	Jednotka SI název a značka	Vztah k základním, popř. jiným jednotkám SI
Síla	newton	Nm.kg.s^{-2}
Tlak	pascal	$\text{Pa N.m}^{-2} = \text{m.l kg.s}^{-2}$
Práce, energie	joule	$\text{JN.m} = \text{m}^2\text{kg.s}^{-2}$
Výkon, tepelný tok	watt	$\text{W J.s}^{-1} = \text{m}^2\text{kg.s}^{-3}$

Kalorie (cal) je dříve užívaná jednotka energie, vyjadřuje energii tepelnou (teplo), $1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J}$.

Erg je stará jednotka pro práci a energii, rovná se 1 J.

Erg.s^{-1} je stará jednotka pro výkon, rovná se 1 W.

Stupeň Celsia $^\circ\text{C}$ při přepočtu na kelvina (K) použijeme přepočtu $T/\text{K} = t \text{ } ^\circ\text{C} + 273,15$,

opačně, při přepočtu kelvina na Celsia: $t/^\circ\text{C} = T/\text{K} - 273,15$.

Převodní vztahy:

$$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J}$$

$$1 \text{ J.s}^{-1} = 1 \text{ W}$$

$$1 \text{ W.cm}^{-3} = 10^{12} \mu\text{W.m}^{-3}$$

$$1 \text{ cal.cm}^{-3}.\text{s}^{-1} = 4,1868.10^{12} \mu\text{W.m}^{-3}$$

Přenos tepla

Teplu na Zemi proudí od míst teplejších k chladnějším a ze zemského povrchu je tepelná energie vyzařována do atmosféry.

Tepelná energie se šíří v prostředí dvěma způsoby, vedením (kondukcí) a prouděním (konvekcí).

Vedení (neboli *kondukcce*), spočívá ve vzájemném působení částic hmoty, tj. molekul, při kterém dochází k vyrovnání jejich tepelné energie. Místa o větší kinetické energii molekul, tedy místa teplejší, předávají energii místům chladnějším, a tím se samy ochlazují. Chladnější místa se ohřívají tak, že kinetická energie jejich molekul roste. Látky, které jsou špatnými vodiči tepla, se označují jako tepelné izolátory, látky s dobrými vlastnostmi přenášení tepla jsou vodiče tepla.

Proudění (neboli *konvekce*) probíhá, dostanou-li se do pohybu hmotné celky větší než molekuly. V podstatě jde o přenos tepla tekutinou nebo plynem. Dochází k němu buď jen rozdílem hustoty tekutiny, např. při jejím lokálním zahřívání a tím vyrovnávání teplot. Podzemní voda se v hloubce ohřívá a stoupá a na povrchu se může objevit jako teplé prameny, či dokonce gejzíry. Pokud tlak a teplota dovolí, mění se voda v páru. Někdy se vody a páry k povrchu nedostanou a tvoří pod povrchem nestabilní systémy, zvláště je-li v jejich nadloží zvodeň s chladnou vodou. Geotermální systémy, kde se šíří teplo prouděním, jsou typické pro vulkanické oblasti, kde jsou horniny v plastickém stavu. Takové současné geotermální systémy jsou obvykle geologicky poměrně mladé.

Kondukcce je typická pro tělesa pevná, konvekce pro kapaliny a plyny. V pevném zemském tělese probíhá hlavně kondukcce, zatímco v zemském plášti konvekce. Plastické, teplem změkklé horniny pláště mohou téci a pohybovat se v podobě obrovských konvečních proudů.

Teplu se převádí též formou zářivé energie různých vlnových délek. Každé těleso totiž přeměňuje část své energie na zářivou a je-li toto záření pohlceno hmotou, přemění se v energii kinetickou, v podstatě v teplo.

Přenos tepla vodou

Teplé vody jsou dvojího původu. Meteorické vody jsou původně vody pocházející z atmosférických srážek, zdrojem vod juvenilních je magma, z něhož při výstupu uniká voda, případně i s parou. Metodami izotopové geochemie bylo dokázáno, že teplé vody geotermálních systémů jsou téměř výlučně meteorického původu. Několik kilometrů pod povrchem se podzemní vody ohřívají až na teplotu $200 \text{ } ^\circ\text{C}$ i vyšší, jejich varu však brání vysoký tlak. Pokud tlak klesne, voda se vaří a uniká pára. V geotermálních systémech na oceánském dně jsou vody původu oceánského, které po ohřátí v hloubce vystupují na povrch jako tzv. černí a bílí kuřáci (black, white smokers) na riftech středooceánských hřbetů i na různých aktivních tektonických poruchách i v oblasti podmořských hor.

Přenos tepla plyny

Podle novějších poznatků mají kromě vody v přenosu tepla určitý význam i plyny, hlavně oxid uhličitý. Oxid uhličitý má specifické charakteristiky pro různé tlaky a teploty. Tak například při zvyšování teploty zvětšuje svůj objem až padesátinásobně a proniká pak velmi rychle i do malých volných prostor v zemské kůře a k povrchu. Tento proces pak může strhávat i zrychlovat výstup zemského tepla z větších hloubek. Na řadě lokalit s výstupem CO₂ byly pozorovány V. Myslílem (2002) i dvojnásobné hodnoty tepelného toku ve stejných typech hornin oproti místům bez tohoto plynu.

Geotermický stupeň a tepelný gradient

Měření teplot v dolech i ve vrtech i modelové výpočty, umožnily charakterizovat tzv. geotermický stupeň. Je to počet metrů, o který musíme sestoupit pod povrch, aby teplota stoupla o 1 °C. Je ovšem nutno počítat s tzv. neutrálním pásmem blízko povrchu, kde se teploty nemění a jsou ovlivněny vnějšími vlivy. Ve starší i novější literatuře se dočteme, že průměrná hodnota geotermického stupně je 33 m, což znamená, že s rostoucí stometrovou hloubkou se zvyšuje teplota o 3 °C, s tisícimetrovou o 30 °C. Je to ovšem hodnota průměrná, o jejíž platnosti někteří autoři v poslední době pochybují. Argumentují totiž tím, že růst teploty s hloubkou byl měřen hlavně v tektonicky aktivních oblastech s aktivní sopečnou činností. Tam totiž geotermický stupeň bývá nižší než 10 m, mnohdy ještě méně, např. na Sicílii pouhých 5 m. Nízký geotermický stupeň bývá i v oblastech se snadno oxidujícími rudními i nerudnými ložisky. V některých hnědohelných pánvích je také kolem 5 m. Naopak, na stabilních štítech a platformách bez mladé sopečné činnosti roste až do 100 m. Z takových oblastí máme totiž daleko menší počet měření. Příkladem je africký, brazilský a indický štít, kde se skutečně geotermický stupeň blíží stovce metrů, jak bylo pozorováno v jihoafrických a indických zlatých dolech, hlubokých i 3 km.

Kromě geotermického stupně je definován i *geotermický gradient – tepelný gradient*, což je vertikální gradient teploty v zemské kůře. Vyjadřuje se v setinách a desetínách stupňů Celsia na metr hloubky. Jeho hodnota kolísá v rozmezí 0,01 až 0,1 °C na metr rostoucí hloubky.

Teplotní údaje z hloubek větších než dosažitelných technickými pracemi spočívají na geofyzikálních modelových výpočtech. O průměrném růstu teploty s hloubkou v globálním měřítku je mezi autory celkem shoda. Shoda je i v tom, že pod oceány v oceánské kůře roste teplota s hloubkou rychleji než v kůře kontinentální. Vyjadřuje to naše tabulka:

Tabulka 3.

Růst teploty s hloubkou v kontinentální a oceánské kůře

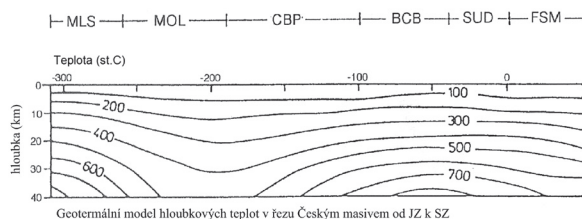
Hloubka pod povrchem	Teplota ve °C	
	uprostřed kontinentu	uprostřed oceánu
50 km	500	750
100 km	750	1100
200 km	1100	1600
300 km	1200	1650
400 km	1400	1750

Přímá měření růstu teploty s hloubkou byla provedena v mnoha hlubokých vrtech. Příkladem je i projekt ultrahlubokého vrtu KTB v Horní Falci u městečka Windischeschenbach nedaleko od českých hranic. Předpověď růstu teploty vycházela z měření v mělkých okolních vrtech, kde dosahovala hodnota tepelného toku 60 mW.m⁻² (Burkhard et al. 1989). Avšak ve vrtu samotném odpovídal teplotní gradient – hodnota tepelného toku 80 mW.m⁻². To mělo dalekosáhlé technické důsledky. Kritická izoterma 300 °C tak byla posunuta o více než 2 km blíže k povrchu, což způsobilo, že plánované hloubky 12 km nebylo možno dosáhnout. (Soffel et al. 1992).

Během prací, přidružených k projektu KTB, byl počítán růst teploty s hloubkou, hlavně s ohledem na hranici kůra/plášť. Modelové výpočty zjistily teplotu 500–550 °C na této hranici v hloubce 35–40 km ve stabilních částech Českého masivu, naopak mezi 600 a 700 °C v hloubce 30–35 km v aktivních oslabených zónách a nedaleko od našeho území v panonské pánvi v hloubce 30 km dokonce 800 °C (Čermák et al. 1991).

Modelové výpočty růstu teploty s hloubkou jsou graficky vyjádřeny na obrázku 1, a to pro moldanubikum, Krušné hory a českou křídovou pánev.

Obr. 1 Geotermální model hloubkových teplot v řezu Českým masivem od JZ k SV.



MLS – Alpská molasa, MOL – moldanubikum, CBP – Centrální pluton Českomoravské vrchoviny, BCB – česká křídová pánev, SUD – lugikum (oblast Sudet), FSM – předsudetická monoklina.

Pro moldanubikum je vypočítáno rozmezí teploty v hloubce 70 km na 600 až 750 °C, pro Krušné hory až 900 °C a pro českou křídovou pánev necelých 1000 °C ve stejné hloubce.

Tepelný tok

Tento termín patří v geotermice k nejužívanějším, neboť jeho hodnota vyjadřuje množství tepla, které prochází jednotkou plochy za jednotku času. Tepelný tok vyjadřujeme v hodnotách mW.m⁻². Dříve se tepelný tok vyjadřoval v jednotkách cal.cm⁻².s⁻¹, někdy i v HFU (tj. Heat Flow Units).

Z hodnoty tepelného toku lze částečně odvodit rychlost růstu teploty s hloubkou, neříká však nic o původu tepla. V geotermice je hodnota tepelného toku nesmírně důležitým indikátorem, a to nejen z hlediska využití geotermální energie, nýbrž i z hlediska geofyziky a obecně i geologie. Hodnotu tepelného toku lze konfrontovat s geologickými i geofyzikálními údaji, což prozradí mnoho o složení hlubších pater zemské kůry i o celkovém geologickém vývoji. Z hlediska využití geotermální energie jsou potenciální možnosti hlavně tam, kde je vysoká hodnota tepelného toku, což též znamená v místech, kde jsou v malých hloubkách pod povrchem zvýšené teploty.

Na zemském povrchu je rozmezí hodnot tepelného toku, až na výjimky, mezi 30 a 120 mW.m⁻². Střední hodnota, vypočítaná z několik desítek tisíc měření, je 70 mW.m⁻². Kolem činných

sopek, výronů horkých vod, může však být číslo mnohem vyšší, až několik tisíc. Uvedenou střední hodnotu najdeme v geologických a geofyzikálních kompendiích i ve speciálních příručkách. Nově někteří autoři upozorňují na to, že střední hodnota je zřejmě nižší, jelikož lokality, kde se měření provádělo, jsou obvykle v „teplejších“ oblastech, tam, kde jsou vyhlídky k využití geotermální energie. Na stabilních „chladnějších“ štítech a platformách je měření méně. Obecně platí, že na stabilních částech zemské kůry, hlavně na štítech a platformách, včetně starých orogénů, je hodnota tepelného toku nižší. Naopak v mladých orogénech, částech zemské kůry s aktivním vulkanismem a silnou seizmicitou, jsou hodnoty vyšší. Je však celá řada výjimek, hlavně v případech, kde jsou oživeny starší části zemské kůry mladou tektonikou a případně i neovulkanismem, tj. třetihorní a čtvrtohorní sopečnou činností. Příkladem takové reaktivované kůry s vyššími hodnotami tepelného toku je v Českém masivu Podkrušnohoří. Riftové zóny, tj. reaktivovaná pásma se silnější seizmickou i vulkanickou činností a znaky rozpínání kůry, mají obvykle vysoké hodnoty tepelného toku. Platí to jak pro pevninské, tak oceánské riftové zóny. Vztahy mezi tepelným tokem a mocností zemské kůry jsou zřetelné – mocnější zemská kůra znamená nižší hodnoty tepelného toku. Oceánská kůra vykazuje v průměru vyšší hodnoty tepelného toku než kontinenty a hodnota tepelného toku roste od starších částí kůry k riftům na středooceánských hřbetech se současným vulkanismem. Vysoké hodnoty tepelného toku jsou i na poruchových zónách, tzv. transformních zlomech.

Vezmeme-li průměrnou hodnotu tepelného toku pro celou zemskou kůru, $q = 50 \text{ mW.m}^{-2}$, pak na celém zemském povrchu uniká přibližně 0,25 milionů MW, což je asi 10krát méně než dodává Země Slunce (viz str. 11).

V tabulce 4 jsou uvedeny typické hodnoty povrchového tepelného toku v Českém masivu a západní části Karpatské soustavy.

Tabulka 4.

Hodnoty povrchového tepelného toku v Českém masivu a západní části Karpatské soustavy (Marušiak – Čermák, 1998, z knihy Ibrmajer – Suk et al. 1989)

Geologická jednotka Český masiv	Tepelný tok (mW.m^{-2})		
	minimum	maximum	průměr
moldanubikum	25	72	54
Barrandien	44	92	60
Krušné hory a Podkrušnohoří	59	121	85
permokarbonské pánve	55	81	83
česká křídová pánev	59	96	73
Jeseníky	23	55	39
Karpatská přehlupeň (sever)	45	124	83

Doplněné údaje, sdružené do modernizovaných souborů, publikovali Šafanda, Čermák a Štulc (1997). Jejich tabulku připojujeme (tab. 5).

Tabulka 5

Hodnoty tepelného toku v různých geologických jednotkách Česka v jednotkách mW.m^{-2} (podle Šafandy, Čermáka a Štulce 1997)

Geologická jednotka	Rozmezí	Střední hodnota
Český masiv, stabilní část		
česká část	43–71	53,4
moravská část	21–41	31,2
moldanubikum, celkově	21–71	40,4
Český masiv (části ovlivněné alpínskou orogenezí)		
Krušné hory	58–185	81,8
oherský prolom	45–121	94,3
saxoturingikum, celkově	45–185	90,8
předkarbonské jednotky	31–72	54,1
permokarbon a křída	52–96	67,9
Barrandien, celkově	31–96	63,3
hornoslezská pánev	55–92	69,6
moravikum, celkově	45–92	66,2

V rámci studií VaV (výzkumu a vývoje) Ministerstva životního prostředí byla zpracována mapa tepelného toku České republiky s použitím více než 3500 bodů – hlubších vrtů než 100 m – jejíž verzi zde připojujeme (viz obrázek na obálce).

Pro celý Český masiv platí, že průměrná hodnota tepelného toku je 68 mW.m^{-2} . V nejstabilnějších částech s mocnější zemskou kůrou, v jižní a střední části Českého masivu, jsou hodnoty nejnižší a mocnost zemské kůry dosahuje až 36 km. Nejnižší tepelný tok je na severním okraji třebíčského plutonu a v Jeseníkách. Směrem k okrajovým částem Českého masivu roste tepelný tok se ztenčující se kůrou. V místech hlubinných zlomů, které Český masiv přesekávají, jsou hodnoty poněkud vyšší.

Velmi zajímavý je problém české křídové pánve, kde je průměrný tepelný tok vyšší a dosahuje až 80 mW.m^{-2} . Čermák (1975). To vysvětluje celkově teplejší kůrou spjatou s intenzivním přínosem tepla ze svrchního pláště. V oživené tektonické zóně je lokální anomálie u Mělníka s hodnotami 80 až 90 mW.m^{-2} . Tato zóna může zasahovat až do Podkrkonoší, kde jsou též zvýšené hodnoty tepelného toku.

Severozápadní část Českého masivu charakterizuje vyšší tepelný tok. Znamé jsou údaje z Karlových Varů, Teplicka i od Cínovce, kde hodnoty mohou převyšovat až 100 mW.m^{-2} . Oblast zvýšených hodnot tepelného toku (přes 80 mW.m^{-2}) pokrývá celé Krušné hory, což např. Matolín (1970) vysvětluje přítomností pozdně variských granitových plutonů v podkladu.

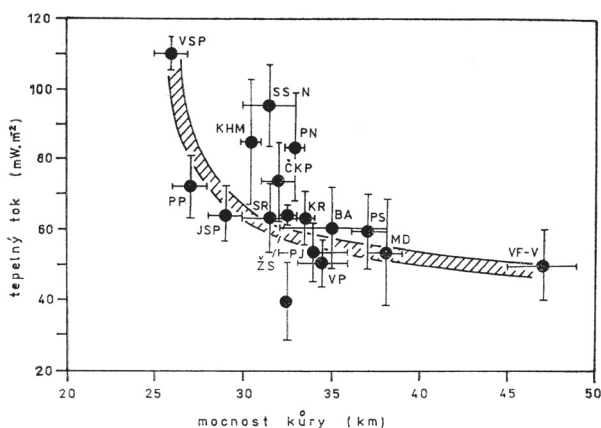
Na styku Českého masivu a vnějších Západních Karpat hodnota tepelného toku roste jihovýchodním směrem až do 72 mW.m^{-2} . V karpatské předhlubni se zvyšuje tepelný tok i severovýchodním směrem. Pro ostravsko-karbonský uhelný revír jsou typické zvýšené hodnoty až do 83 mW.m^{-2} . Tento jev je těžko vysvětlitelný. Představa, že jeho původcem je exotermní reakce při prouhelňování a oxidaci slojí zřejmě neobstojí, neboť pouhá produkce tepla podobným mechanismem by zvýšení hodnoty nevysvětlila. Navíc, v ostatních uhelných pánvích Českého masivu nebyly zjištěny anomálně vysoké hodnoty tepelného toku (viz tabulka 4 a 5).

Jak již bylo uvedeno, existuje poměrně významná pozitivní korelace mezi hodnotou tepelného toku a mocností zemské kůry. V menším měřítku platí tato závislost i pro Českou republiku i okolní země, zejména Slovensko. Vyjadřuje to názorně diagram, publikovaný v kompendiu Geofyzikální obraz ČSSR (editoři

Ibrmajer a Suk, 1989), který vyhodnocuje soubor dat z obou republik (obr. 2).

Údaje o mocnosti kůry, publikované Beránkem a Dudkem (1972), jsou uvedeny na obr. 2. Údaje z Česka, zahrnující Krušné hory, moldanubikum, permokarbonské pánve, karpatskou předhlubeň a Barrandien, jsou doplněny názornými a do korelace zapadajícími údaji ze Slovenska. Musíme si ovšem uvědomit, že z této korelační křivky se vymykají novější údaje o hodnotách tepelného toku z oblastí, kde došlo na konci křídly a hlavně v třetihorách k reaktivaci zemské kůry. Tato reaktivace zahrnuje pohyby podél bloků, natavování hornin a výstup magmatu na povrch.

Obr.2 Vztah mezi hodnotou tepelného toku a mocností zemské kůry na území bývalého Československa. Podle M. Krále a V. Čermáka z knihy Ibrmajer – Suk et al. 1989).



KHM – Krušné hory, ČKP – česká křídlová pánev, KR – kladensko-rakovnická pánev, ŽS – žacléřsko-svatoňovická pánev, BA – Barrandien, MD – moldanubikum, PN – karpatská předhlubeň – sever, PS – karpatská předhlubeň – střed, PJ – karpatská předhlubeň – jih, VSP – východoslovenská pánev, JSP – jihoslovenská pánev, SR – Slovenské rudohoří, VP – Vídeňská pánev, VFR-V – vnější flyš, východ, SSN – středoslovenské vulkanity.

Výše uváděné hodnoty se týkají povrchového tepelného toku. Desítky měření z různých hloubkových intervalů mnoha vrtů v Česku (celkem 79 údajů) jsou v publikaci Hazdrové et al (1981), společně s teplotním gradientem a tepelnou vodivostí.

Tepelný tok, jehož hodnoty měříme na povrchu Země a v mělkých vrtech, ukazuje jen zčásti na hlubinný příron tepla. Tepelný tok z hlubších částí kůry a tím i teplotní pole, teplota hornin a cirkulujících médií jsou ovlivněny řadou dalších faktorů:

- tvarem a stářím geologických struktur ve svrchní části zemské kůry,
- hloubkou uložení struktur,
- prouděním kapalných nebo plyných médií v různých hloubkách pod povrchem,
- hloubkou, v které dochází k tavení hornin,
- vzdáleností od vulkanických center,
- paleoklimatickými poměry.

Výsledky studií tepelného toku na území České republiky v rámci VaV MŽP (Myslil et al., 2002) přinesly značná zpravení starších údajů. Máme k dispozici nový model, jenž je složitější z hlediska celkového charakteru a počtu anomálií. Bylo totiž možno využít dodatečných dat z většího počtu vrtů, kde byly vypočítány hodnoty podle starší karotáže, případně i měření teplot. Karotáž vrtů bylo na mnoha místech prokázáno výrazné prochlazení přípovrchových partií vlivem proudění podzemních vod mělkého oběhu. Nepochybně existují i změny vlivem proudění pod-

zemních vod hlubšího až hlubokého oběhu, které ovšem naopak způsobují prohřátí celého systému.

To všechno jsou poznatky, které dokazují, jak významnou úlohu v úvahách o využívání geotermální energie má geotermální energie jak v průlinovém, tak i v méně prozkoumaném puklinovém systému. Propočtené hodnoty tepelného gradientu, tepelného toku a teplot v hloubce 200 m pod povrchem a pro kótu 0 m n.m. byly porovnány s přímo změřenými hodnotami karotážních měření a interpretací pro taktó získané páry hodnot byla řešena regresní závislost. Pro vztah hodnot tepelného toku vypočtených jednoduchou metodikou a stanovených podle tepelných vodivostí a karotážních měření teplot vychází regresní koeficient $R^2 = 0,9099$ a pro obdobné řešení teplot na úrovni 0 m n.m. je $R^2 = 0,8509$. Regresní přímky jsou přiloženy.

Tepelná vodivost hornin

Zjištění tepelné vodivosti hornin je důležité pro úvahy i modelové výpočty rozmístění teplot v zemské kůře. Horniny jsou poměrně špatnými vodiči tepla. Hodnota vodivosti závisí na obsahu vody, na porositě, na tepelné vodivosti samotných horninotvorných minerálů, množství a charakteru tmelu a matrix, na struktuře i textuře i anizotropii. Hodnota tepelné vodivosti se vyjadřuje v hodnotách $Wm^{-1}.K^{-1}$. Hodnoty tepelné vodivosti hornin Česka jsou shrnuty v kompendiu „Geofyzikální obraz ČSSR“ (ed. Ibrmajer a Suk, 1989). Samostatnou kapitolu o geotermice v této knížce editovali Marušiak et al. Z tabulky 6 lze vyčíst, že nejlépe vedou teplo hlubinné vyvětrání a metamorfity. Je to ovlivněno značnou hustotou, malou porozitou a přítomností minerálů, jež jsou poměrně dobrými vodiči tepla. U sedimentárních hornin je rozptýl hodnot značný. Starší, zpevněné sedimenty o vyšší hustotě jsou lepšími vodiči než sedimenty mladší, méně husté. Sedimenty bohaté křemenem jsou poměrně dobrými vodiči, podobně jako horniny karbonátové. Jílovce, prachovce a slínovce vykazují hodnoty nižší. Velmi slabě metamorfované starší sedimenty jsou poměrně dobrými vodiči tepla. Tepelná vodivost klesá s rostoucí porozitou a zvyšuje se s rostoucím obsahem vody. Hodnoty tepelné vodivosti hornin některých geologických jednotek Česka jsou v tabulce 6.

Tabulka 6

Průměrná tepelná vodivost hornin některých geologických jednotek (Marušiak et al. in Ibrmajer a Suk, 1989)

Geologická jednotka	počet měření	tepelná vodivost $Wm^{-1}.K^{-1}$
Český masiv		
metamorfované horniny	146	2,67
granitoidy	83	2,72
teplý „porfyr“	22	2,50
cínovecký granit, greisen	32	2,70
Jeseníky	74	2,82
sedimenty české křídly	136	1,85
sedimenty permokarbonu	162	2,35
sedimenty uhelných pánví		
kladensko-rakovnická	110	2,28
ostravsko-karvinská	328	2,78
žacléřsko-svatoňovická	39	2,64
karpatská předhlubeň	236	2,86
vídeňská pánev	36	1,53

Geotermální zdroje – zdroje zemského tepla

Geotermální zdroje jsou takové části geotermální energie, jež mohou být v blízké budoucnosti ekonomicky a legálně využívány. Zásoby geotermální energie mohou být využívány již dnes a jsou specifikovány a vyčíslovány pomocí vrtů, geofyzikálních a geochemických údajů. Potenciální geotermální oblasti jsou takové, kde by zdroje mohly být využívány, ale doposud nejsou o nich dostatečná data, aby je bylo možno kvantitativně vyhodnotit.

Využití geotermálních zdrojů je značně ovlivněno geologickým složením, které ovlivňuje perspektivy a možnosti využití. Využívání je též ovlivněno ekonomickou a technickou vyspělostí země a samozřejmě i její péčí o životní prostředí, jakož i snahám o omezení globálního skleníkového efektu. Využití geotermální energie je omezeno především tím, že cena získané energie by neměla převýšit cenu energie vynaloženou na její čerpání. Pro posouzení možnosti využití má význam přítomnost nebo nepřítomnost užitkové vody. Důležité je, že geotermální energie je v podstatě zdrojem pro místní využití. Dosud nejdelší teplovod je pouze 70 km dlouhý a je na Islandu.

Podle teploty dělíme geotermální zdroje na vysokoteplotní, středně teplotní a nízkoteplotní. Vysokoteplotní mají teploty nad 200 °C a jsou výhradně ve vulkanicky aktivních oblastech. Lze je využít na přímou výrobu elektřiny. Středně teplotní zdroje mají teploty v rozmezí 150 až 200 °C. Jsou použitelné jak pro přímé vytápění, tak pro výrobu elektřiny. Nízkoteplotní zdroje mají teplotu pod 150 °C, jsou ze všech zdrojů nejhojnější a najdeme je jak ve vulkanicky aktivních, tak v sedimentárních oblastech. Lze jich využít na vytápění obydlí, skleníků a pro řadu průmyslových procesů i uplatněním tepelných čerpadel.

Geotermální zdroje jsou na světě velmi nerovnoměrně rozšířeny. Vysokoteplotní zdroje jsou v Evropě omezeny pouze na Island, Itálii, Řecko a Azory. Nízkoteplotní a středně teplotní zdroje jsou ve velkých sedimentárních pánvích s větší mocností sedimentů, v některých vulkanických a tektonicky aktivních oblastech, např. ve Francii, Maďarsku, v USA. Řada geotermálních zdrojů byla objevena při vrtání na ropu a zemní plyn.

Velmi zjednodušené dělení geotermálních systémů je na vulkanické a nevulkanické, což do značné míry souhlasí s výše uvedeným dělením podle teploty.

Svrchní, 2–4 km mocná vrstva zemské kůry je obvykle pórovitá nebo rozpukaná a zvodněná díky meteorické vodě, klesající z povrchu. Zvodnělé horizonty – aquifery – mohou být odděleny nepropustnými horninami – akvakludy. Transport tepla k povrchu probíhá převážně prouděním, spjatým s výstupem magmatu. Magma, křemičitanová tavenina, se tvoří částečným tavením hornin pláště i zemské kůry. Žhavotekuté magma chladne v magmatických krbech, které jsou hlavním zdrojem geotermálního tepla, které se pak na povrchu projeví jako gejzíry a horké prameny. Teplo proniká z chladnoucího magmatu především vzhůru k povrchu a pokud se setká ze zvodněnými horizonty, voda je pod tlakem a stoupá k povrchu, přičemž na její místo proudí chladná voda z okolí. Tak vzniká geotermální cirkulace, která zpětně ovlivňuje chladnutí magmatu.

Zdroje zemského tepla

Vnitřní teplo Země je motorem všech endogenních geologických pochodů. Pokud se týká jeho zdroje, přes určité námítky se nepochybuje o tom, že rozpad radioaktivních prvků je hlavním producentem tepla v zemské kůře. Od vzniku Země uran samotný vyráběl přibližně 60 % vnitřní tepelné energie a doplňovaly jej thorium a radioaktivní draslík. To platí pro kontinentální kůru, která je bohatá radioaktiv-

ními prvky. Bez radioaktivního rozpadu prvků by nefungovala desková tektonika, neznali bychom vulkanismus, neexistovala by rudná ložiska a „historie naší planety by byla tak nudná jako měsíce Marsu“. Problémy však nastávají, uvažujeme-li původ tepla v kůře oceánské, v zemském pláští i v hlubších částech zemského tělesa. S pláštěm by větší problémy neměly být, konvekční proudy vynášejí teplo na bázi kontinentální kůry do teplejší a daleko tenčí kůry oceánské. Zdroj několikatisícstupňového tepla v zemských hlubinách je však stále předmětem diskusí a někdy i vášnivých sporů.

Možné zdroje, byť různého významu, jsou tyto:

1. Původní teplo zemského tělesa, které zbylo z kosmické etapy jeho vzniku. Kolik jej zbylo, to přesně nevíme.
2. Sluneční záření. Je sice obrovským zdrojem tepelné energie, ohřívá však pouze povrch.
3. Rozpad radioaktivních prvků. Tento zdroj je tak důležitý, že je mu níže věnována rozsáhlá kapitola.
4. Tepelná energie vznikající přeměnou z kinetické energie při tektonických pohybech v zemské kůře. Takové pochody jsou jistě vážným kandidátem na dodávání určitého množství tepla, avšak přesnější výpočty nemáme k dispozici.
5. Teplo vznikající stlačováním podložních vrstev vahou nadloží a náhlým uvolněním tlaků. Pro takový mechanismus platí totéž, jako pro výše uvedený zdroj.
6. Energie pohlcených seizmických vln. Starší modely a odhady vypadaly velmi optimisticky, ještě B. Gutenberg ve dvacátých letech 20. století udával hodnotu tepla buzeného adsorpční seizmických vln na $10^{10} \text{ cal} \cdot \text{s}^{-1}$. Novější odhady jsou podstatně nižší. Upozorňuje se též na to, že energie tektonických pochodů přenášených na seizmické vlny je ve své podstatě druhotná a vyplývá z nerovnoměrného rozdělení teplot. Proto je nutno hledat příčinu ve své podstatě primární.
7. Fyzikálněchemické reakce, které uvolňují teplo, tedy reakce exotermní. Je to běžná oxidace, při které se prvky slučují s kyslíkem a přecházejí z nižších mocností do vyšších. V hlubších partiích kůry navíc dochází k rekrytalizaci minerálů a jejich změn na jiné, o větší hustotě. Všechny takové procesy jako možné producenty tepla není možné podceňovat a v poslední době se jim přisuzuje podstatný význam.
8. Energie uvolňující se při dopadu meteoritů. Zde se kinetická energie mění na tepelnou, což je prokázáno tavením hornin v místě impaktu. Značná část energie přechází přímo do atmosféry při brzdění tělesa před pádem. Při dopadu se povrch zahřeje, není však jasné, kolik energie se vyžárí do prostoru a kolik se zadrží v Zemi. Pokud jsou k dispozici výpočty, shodují se v tom, že produkce tepelné energie je spíše lokální záležitostí a že její celkové množství, produkované na zemském povrchu, je jen nepatrným zlomkem třeba i ve srovnání se sluneční energií. Musíme ovšem vzít v úvahu, že v raných dobách geologické historie byly dopady mimozemských těles mnohem četnější, uvádí se dokonce, že před třemi miliardami let bylo bombardování Země desetkrát až stokrát intenzivnější než dnes.
9. Energie slapových sil produkovaná třením vodních mas o sebe i o pevný zemský povrch. Takový zdroj energie nepochybně existuje, jeho kvantitativní vyjádření je však obtížné a tak má pouze teoretický význam.

Sluneční záření jako zdroj tepelné energie

Do našeho přehledu o zdrojích zemského tepla popisujeme sluneční záření jen krátce, neboť ovlivňuje jen zemský povrch a prostředí nehluboko pod ním. Solární energie znamená ovšem trvalý přínos tepla. Podle Šafandy (1999) dodává sluneční záření na povrch Země v našich podmínkách přibližně 100 až 800

$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$. Toto teplo proniká jen mělce pod povrch. Při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ na povrchu a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ v hloubce 2 m se do hloubky 1 m pod povrch dostává jen $0,08\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$, do hloubky 2 m jen $0,04$ a do hloubky 4 m pouze $0,01\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Tuto závislost vyjadřuje vzorec

$$T_{(x)} = T_0 - \frac{q}{\lambda} \cdot x$$

kde T_0 = povrchová teplota ve st. C, q = množství tepla ve $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, x = hloubka pod povrchem, λ = hodnota vodivosti hornin či zemin $0,8-1,2$.

V podmínkách našich zeměpisných šířek neproniká sluneční záření do větších hloubek. Pod třímetrovou hloubkou, až do 10 m, je zóna, ve které není přírůstek tepla ani z atmosféry, ani z hloubky. Mocnost této intaktní, čili neutrální vrstvy se poněkud mění v závislosti na:

- geologické situaci, tj. mocnosti pokryvu a hloubce podloží,
- tepelné vodivosti hornin a zemin,
- reliéfu území,
- expozice povrchu ke slunečnímu záření,
- hloubce hladiny podzemní vody,
- hloubce zásahů lidské činnosti.

Počítáme-li s určitým zjednodušením, že povrch Země $P = 5,094208 \cdot 10^6\text{ km}^2$ a průměrná hodnota slunečního záření $0,35\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, dostaneme hodnotu celkové energie pro zemský povrch, a to

$$Q_s = 2,547104\text{ MW (tj. asi 2,5 milionů MW)}$$

Intenzita slunečního záření na horní hranici atmosféry se nazývá solární konstanta. Toto záření ještě není ovlivňováno atmosférou, je konstantní a proto se nazývá konstanta. Závisí totiž jen na schopnosti Slunce vyzařovat energii a na vzdálenosti Země od Slunce. Při střední vzdálenosti Země od Slunce je hodnota solární konstanty blízka $1,4\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Rozmezí naměřených hodnot je od $1,36$ do $1,42\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, za standardní hodnotu se pokládá $1,38\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.

Na osvětlenou polovinu zeměkoule dopadá na horní hranici atmosféry množství energie, která se rovná součinu solární konstanty a plochy kruhu s poloměrem rovným poloměru Země. Z toho vychází, že Země zachytí $1,76 \times 10^{17}\text{ kW}$. Pro srovnání uvedeme, že výkon jednoho bloku velkých jaderných elektráren je kolem 10^9 W . Rozložíme-li dopadající energii na celý povrch Země, dostaneme hodnotu $0,345\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Zhruba 36 % slunečního záření se odráží zpět do prostoru, takže na zahřívání povrchu zůstane $0,22\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Z toho se ještě část pohltí atmosférou (přibližně $0,05\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$), takže na zahřívání povrchu zbude pouze $170\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Z energie pohlcené Zemí slouží 23 % k vypařování vod ze zemského povrchu, z rostlin a vodních ploch do atmosféry, kde se při kondenzaci páry ve vodní kapky teplo opět uvolňuje. K vlastnímu oteplování zemského povrchu tak zbývá pouhých 20 % původní energie, ale i tento zbytek energie je pohlcen a později opět vyzářen v podobě dlouhovlnného tepelného záření. Kdyby tomu tak nebylo, povrch Země by se dávno rozžhavlil do bílého žáru. I když má sluneční záření rozhodující vliv na teplotu zemského povrchu, na celkové tepelné hospodářství zemského tělesa nemá prakticky vliv, a proto se při úvahách o zdrojích zemského tepla neuvazuje.

Produkce tepla rozpadem radionuklidů

Objevem radioaktivity se zcela změnila naše názory na původ zemského tepla. Starší představy o postupném vychládání Země se zcela změnila po tom, co se zjistilo, že rozpad radionuklidů produkuje teplo. Proto se od objevu radioaktivity na počátku 20. století pokládá tento proces za hlavní zdroj zemského tepla.

Poznamenáme jen, že tento názor bývá až dodnes některými autory kritizován a zpochybňován, zřejmě neprávem. Zdroj tepla rozpadem radionuklidů je obnovitelný a prakticky nevyčerpatelný. Základní údaje o tomto problému jsou převzaty z prací Matolína (1970, in Hazdrová et al., 1981), Manové a Matolína (in Ibrmajer a Suk et al. 1989).

Přírodní radioaktivní prvky v horninách jsou zdrojem jaderného záření alfa, beta a gama a neutronového záření. Hlavním zdrojem jaderného záření v horninách jsou draslík, uran a thorium. Poločasy přeměny přírodních radionuklidů jsou tyto:

Izotop	poločas rozpadu
^{40}K	$1,3 \cdot 10^9$ let
^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$ let
^{235}U	$7,1 \cdot 10^8$ let
^{232}Th	$1,4 \cdot 10^{10}$ let

Izotopy ^{238}U , ^{235}U a ^{232}Th jsou mateřskými prvky rozpadových řad, jejichž členy jsou nestabilní a jsou zdroji jaderného záření. Konečnými členy rozpadových řad jsou stabilní izotopy olova.

Průměrné koncentrace draslíku, uranu a thoria v horninách zemské kůry jsou 2,5 % K, 2–3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ U a 8–12 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Th. Tato čísla jsou obecně přijímána, i když v některých literárních zdrojích najdeme hodnoty sice mírně odlišné, ale rozdíly nejsou podstatné. Draslík, uran i thorium tvoří samostatné minerály, jindy mohou být izomorfně přimíšeny v minerálech jiných nebo mohou být rozptýleny v některých minerálních a organických hmotách. Draslík je typický pro minerály jako živec, leucit, nefelin, biotit, muskovit a flogopit. Uran a thorium se vyskytují v akcesorických minerálech, jako jsou zirkon, titanit, apatit, xenotim, monazit, ortit a epidot.

Průměrné obsahy přirozených radioaktivních prvků v magmatitech jsou uvedeny v příložené tabulce 7.

Tabulka 7

Obsahy K, U a Th v magmatických horninách (podle Matolína, in Hazdrová et al., 1981)

Hornina	% K	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ U	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 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

Z tabulky 7 jasně vyplývá, že s rostoucím obsahem SiO_2 a klesajícím množstvím tmavých minerálů klesá procento radioaktivních prvků a tím i producentů tepla. Tepelná produkce rozpadavých řad radionuklidů byla stanovena poměrně složitým způsobem, a to jako součin hustoty a součtu násobků koncentrací prvků a tepelné produkce jednotkových hmot radionuklidů. Vyjadřuje se v $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$.

Tabulka 8

Tepelná produkce jednotkové hmoty radionuklidu (Adams a Gaspariny, 1970, cit. Matolín, 1981), vyjádřeno v původních publikovaných jednotkách

Radionuklid	$\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$	$\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
rozpadavá řada ^{238}U	2,97	
rozpadavá řada ^{235}U	18,00	
U a produkty rozpadu	3,06	$0,97 \cdot 10^{-7}$
rozpadavá řada ^{232}Th	0,84	$0,27 \cdot 10^{-7}$
^{40}K	0,92	
K	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$3,58 \cdot 10^{-12}$

Souborná tabulka 9 shrnuje hodnoty úhrnné aktivity gama v horninách Českého masivu a z nich vyčíslenou tepelnou produkci.

Tabulka 9

Úhrnná aktivita gama a tepelná produkce hornin Českého masivu (podle Matolína, in Hazdrová et al., 1981)

Hornina	Počet vzorků	Aktivita gama v mg. kg ⁻¹ eU	Tepelná produkce v μW.m ⁻³
granit	342	13,0	2,50
pegmatit	12	7,5	1,40
aplit	13	9,0	1,69
granodiorit	160	14,1	2,74
syenit	49	28,0	5,91
fonolit	15	19,0	3,80
diorit	20	3,4	0,62
paleoandezit	12	5,6	1,03
gabro	19	2,0	0,36
bazaltoidy, staropaleozoické	12	5,3	0,97
bazaltoidy, mladopaleozoické	18	4,7	0,86
bazaltoidy, neoidní	63	5,0	0,92
tufy	22	4,1	0,74
magmatické horniny, průměr	727	12,24	2,30
slepenec	48	4,1	0,74
pískovec a písek	314	6,5	0,72
křemenec	23	2,8	0,51
arkóza	7	6,5	1,29
droba	225	7,9	1,47
jíl	36	8,8	1,65
jílovec	170	11,8	2,26
jílová břidlice	191	8,9	1,67
slín a slínovec	71	4,3	0,87
vápenec	69	1,7	0,30
sedimenty, průměr	1174	7,36	1,38
fylit	91	8,0	1,40
svor	31	7,8	1,46
svorová rula	49	8,8	1,65
pararula	48	8,1	1,51
metakvarcit	29	3,2	0,58
krystalický vápenec	103	1,9	0,34
ortorula	386	9,0	1,69
granulit	58	4,2	0,77
amfibolit	94	1,7	0,30
serpentinit	21	6,5	0,09
chloritická břidlice	16	2,2	0,39
migmatizovaná rula	18	8,3	1,55
migmatit	94	9,9	1,69
metamorfity, průměr	100	86,74	1,36

Tabulka 9 obsahuje velmi cenné údaje, jak z teoretického, tak praktického hlediska. Znázorňuje, kde můžeme hledat hlavní producenty tepla v zemské kůře i jeden z faktorů potenciálního využití geotermální energie. Znovu je nutno zdůraznit, že vysoká koncentrace radioaktivních prvků je přímo úměrná produkci tepla.

Údaje o radioaktivitě hornin Česka jsou poměrně hojné, neboť jejich radioaktivita se měří již od čtyřicátých let dvacátého století, nejprve z teoretických důvodů, později i z hlediska ochrany před radioaktivním zářením.

Nejčastěji se určuje měřením záření gama. Podle leteckého i pozemního měření byla sestavena radiometrická mapa České republiky v měřítku 1:200 000 (viz obr. na zadní straně obálky), která znázorňuje radioaktivitu větších horninových celků na povrchu republiky s potlačením lokálních anomálií. Na mapě je radioaktivita vyjádřena jako dávkový příkon v jednotkách nGy.h⁻¹. Z mapy jasně vyplývá, že vysoce radioaktivní jsou variské magmatity, tj. granity, granodiority a syenity a s nimi ještě migmatity, krystalinika i třetihorní vulkanity. Ze sedimentů mají poněkud nadprůměrnou radioaktivitu jílové horniny. K nejméně radioaktivním horninám patří ultrabazické magmatity, z metamorfovaných hornin amfibolity, serpentinity, krystalické vápence a metakvarcity, ze sedimentů vápence a křemenné pískovce. Všechny tyto poznatky je samozřejmě možno aplikovat i na podpovrchové horniny a z tohoto hlediska posuzovat možné zdroje tepla v různých částech zemské kůry.

Souborné zhodnocení radioaktivity hornin Českého masivu a Vnějších Západních Karpat je v pracích Matolína (1970, 1989) a Manové a Matolína (1989).

Při úvahách o tepelném režimu v zemské kůře jsou velmi důležité poznatky o proměnách radioaktivity a tepelné produkce s hloubkou pod povrchem. Z tabulky 9 a našich dalších popisů jasně vyplývá, že radioaktivními prvky jsou nejbohatší magmatické horniny a z nich syenity a různé granitoidy spolu s vulkanickými fonolity.

Ze sedimentů jim mohou konkurovat jen některé arkózy, z metamorfovaných hornin pak některé ruly a případně migmatity. Takové horniny jsou též největšími producenty tepla. Jejich obsah v různých patrech zemské kůry proto mohou prozradit mnoho o korovém tepelném režimu. Podle vrtných i geofyzikálních údajů můžeme rekonstruovat procenta hornin v různých hloubkách pod povrchem. Seříznutím kilometrové vrstvy by se nám zcela změnil geologický povrch, výrazně by se snížilo procento sedimentů, naopak na povrchu by se objevilo na 40 % plutonitů a 30 % metamorfítů. Batolity granitoidů jsou hluboko zakořeněny pod povrchem, a proto jich bude s hloubkou přibývat. I procento metamorfovaných hornin bude narůstat. Suk a Vacek (in Ibrmajer a Suk 1989) se pokusili zkonstruovat řezu ještě hlubšími patry zemské kůry, a to v hloubkách 3, 10 a 15 km. V hloubce 3 km zcela převládou horniny metamorfované, a to jak nízkometamorfované krystalické břidlice, tak horniny postižené vysokým stupněm metamorfózy. Změní se tvar granitoidových plutonů, ze sedimentů zcela zmizí platformní pokryv, v Českém masivu zbudou jen trosky mladopaleozoických permokarbonských usazenin. Ve vnějších Západních Karpatech však zůstanou jak karpatské příkrovy, tak výplň vídeňské pánve. Odhad plošných procent hornin v tříkilometrové hloubce by byl 70 % metamorfítů, 20 % plutonitů, 10 % sedimentů.

Mapa hypotetického povrchu v hloubce 10 km pod povrchem je již zcela odlišná. Převládají ruly a migmatity s různými jinými metamorfovanými horninami středních a vyšších stupňů metamorfózy. Ve středních a západních Čechách by se ještě objevily kořeny variských vulkanitů, na jižní Moravě prekambričské plutonity brunovistulika.

Z tohoto přehledu o hloubkovém rozmezí hornin v kůře České republiky jasně vyplývá, že nejvíce tepla je produkováno v nevelkých hloubkách pod povrchem, kde převládají granitoidy. Teoreticky by měla kůra produkovat více tepla tam, kde je mocnější svrchní granitoidová vrstva kůry. Horniny spodních částí pláště, jeho bazaltové vrstvy, jsou ochuzeny radioaktivními prvky, a proto nejsou velkými producenty tepla. Z tohoto důvodu předpokládáme, že zdrojem jejich tepla jsou konvekční proudy z plášťových zdrojů. Hypotetický výnos tepla z pláště pod M diskontinui-

tu je pod Českým masivem 17–21 mW.m⁻². Čermák (in Ibermajer a Suk, 1989) uvádí, že v těchto hodnotách jsou regionální rozdíly. Pod Krušnými horami předpokládá tepelný tok ze svrchního pláště 21–25 mW.m⁻², pod českou křídou však až 25–29 mW.m⁻².

Přímé údaje o obsahu a rozložení radioaktivních prvků nehluboko pod povrchem máme z karotážních a laboratorních měření ve vrtech (viz Matolín, 1981). V hlubokých vrtech, provedených převážně v granitoidech, koncentrace radioaktivních prvků s rostoucími hloubkami do několika tisíc metrů mírně roste. Maximální zjištěné koncentrace radioaktivních prvků jsou tyto: draslíku do 5 %, uranu do 35 mg.kg⁻¹ a thoria do 70 mg.kg⁻¹. Podle dosavadních názorů nebyly mělce pod povrchem na území Česka nalezeny horniny s neobvykle vysokou radioaktivitou.

Podrobnější údaje publikovali např. Adams a Gasparini (in Hazdrová et al. 1981), kteří v 13 vrtech vyhloubených hlavně granitoidech nenalezli výraznější rozdíly mezi povrchovými a hlubinnými koncentracemi.

Jak bylo uvedeno, je průměrný tepelný tok na povrchu 65 mW.m⁻². Podle výpočtů je rozpad radioaktivních prvků odpovědný za 37 mW.m⁻². Zbylé množství se do zemské kůry dostává tepelnými konvekčními proudy z pláště.

Matolín (1981) publikoval také úvahu o využití radiogenního tepla českých hornin. Především vycházel z tepelné produkce jednotlivých koncentrací draslíku, uranu a thoria, která je tato:

Koncentrace	tepelná produkce v $\mu\text{W.m}^{-3}$
1 mg.kg ⁻¹ U	0,258
1 mg.kg ⁻¹ Th	0,071
1 % K	0,096

Za předpokladu, že hornina granitoidového složení má obvyklý obsah draslíku, uranu a thoria, tj. 2,6 % K, 4 mg.kg⁻¹ U a 13 mg.kg⁻¹ Th, je její tepelná produkce 2,21 $\mu\text{W.m}^{-3}$.

Krychle takové horniny o hraně 100 m má pak tepelnou produkci 2,21 W, o hraně 1000 m 2,21 kW a hraně 10 000 m 2,21 MW. Poznamenáváme přitom, že výkony efektivních jaderných elektráren jsou stovky MW.

Za předpokladu, že hornina obsahuje 5 % K, 40 mg.kg⁻¹ U a 70 mg.kg⁻¹ Th, což by odpovídalo horninám Českého masivu s extrémně vysokou radioaktivitou, by byla její tepelná produkce 15,79 $\mu\text{W.m}^{-3}$. Krychle takové horniny o hraně 21 544 m by měla tepelnou produkci 157 MW.

Jelikož nebyly v Česku zjištěny horniny o extrémně vysoké radioaktivitě ani na povrchu, ani v menších hloubkách a nic nenasvědčuje tomu, že by radioaktivita rostla do hloubek větších, výpočty ukazují, že pro získání efektivních zdrojů tepelné energie by bylo třeba využít tepla produkovaného geologickým tělesem o objemu 10²³ m³ s odpovídajícími rozměry 10–20 km. Pokud je známo, dosud neexistují systémy, které by radioaktivní teplo z takových objemů hornin využívaly.

Jelikož se nestabilní přirozené radionuklidy rozpadem mění v izotopy stabilní, je jasné, že s geologickým mládnutím Země tepelná produkce ubývá. Předpokládá se, že před několika miliardami let byla přibližně poloviční než dnes a hlavními producenty tepla byly izotopy s kratším poločasem rozpadu.

Není pochyb o tom, že povrchový tepelný tok je přímo úměrný produkci tepla z povrchových a mělce uložených granitoidů. Lokální i regionální rozdíly jsou ovlivněny různě velkým obsahem radioaktivních minerálů. Jak vyplývá z geologických modelů zemské kůry, radioaktivního zdroje tepla ubývá s hloubkou. Ze svrchního pláště se do spodní kůry dostává z pláště tzv. reziduální teplo. Oceánská kůra nemá granitovou vrstvu obohacenou ra-

dioaktivními prvky a proto je u ní hlavním zdrojem tepla svrchní plášť. Nutno poznamenat, že pod pojmem granitová vrstva rozumíme svrchní část zemské kůry, jež nemusí být tvořena přímo granitem, ale i horninami podobnými granitoidům z geofyzikálního hlediska, tedy např. rulami, migmatity i sedimenty.

Význam pohybu podzemních vod

Na teplotní charakteristiku oblasti má značný vliv pohyb podzemních vod, tj. konvekce. V lokálním měřítku může proudění podzemních vod značně ovlivnit geotermální systémy. Kvantitativní přístup a vyčíslení jsou však velmi obtížným problémem. Pokusy o takový přístup publikovali např. Šafanda, Čermák a Štulc (1997) z české křídové pánve, z níž známe poměrně podrobné hydrogeologické i geotermální údaje. Vliv proudění byl sledován podél 15 km dlouhého profilu na severním okraji pánve. Není pochyb o tom, že změny ovlivněné prouděním podzemní vody jsou místy tak velké a dokonce prioritní, že zastírají jiné vlivy jako jsou lokální fyzikální vlastnosti hornin, jako radioaktivita, vodivost, tepelná propustnost apod. Dokonce mohou zastírat i globální vlivy, jakými jsou mocnost kůry, vzdálenost od granitoidů, osy riftu i charakteru zemského pláště.

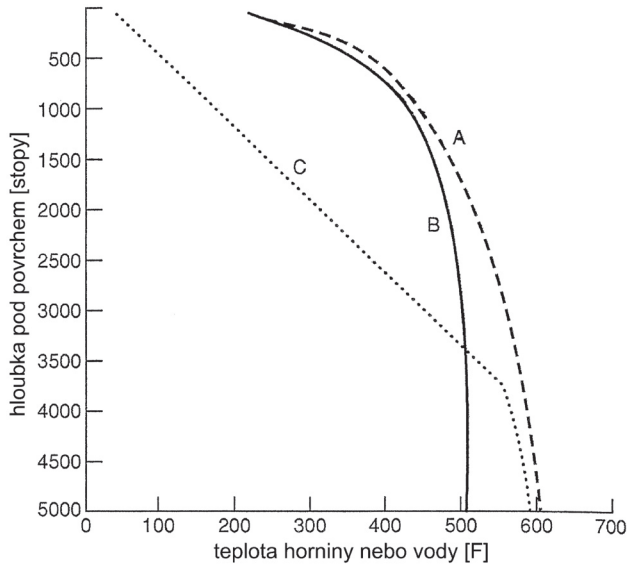
Zmínění autoři se též zabývali změnami teplotního pole vlivem změn klimatu od skončení poslední doby ledové. Podobná studia prováděl i Rybach (1992) na profilu ultrahlubokým vrtem KTB. Výpočty potvrdily, že k určitému porušení systému a oteplení došlo před 13 900 lety. Čermák et al. (2000) měřili teploty ve dvou experimentálních vrtech v Praze-Spořilově a jižních Čechách (Sušice). Účelem bylo sledování atmosférického oteplování podle teplotních změn v čtyřicetimetrové hloubce pod povrchem. Hodnota z Prahy (0,025–0,03 K.a⁻¹) je o poznání vyšší než z okolí Sušice, což potvrzuje i lokální vlivy na trend klimatických změn.

Proudění vod je nejlepším mechanismem pro přenos a hromadění tepelné energie. Jak bylo uvedeno, termální vody jsou téměř výlučně meteorického původu. Několik kilometrů pod povrchem se mohou ohřát i na 200 °C, vysoký tlak však zabraňuje varu. Pokud tlak klesne, voda se vaří a uniká pára. Vodní páry se mísí s plyny, které obsahují síru ve formě oxidů síry a sirovodíku. Průduchy, kterými unikají sírné páry na povrch, se nazývají solfatary. Projevují se zřetelně usazováním žluté ryzí síry v jejich okolí. Obecný název solfatar je odvozen z místního názvu sopky Solfatar v Pozzuoli nedaleko Neapole v Itálii. Na rozdíl od solfatar v mofettách převládá oxid uhličitý, který probublává vodou. Mohou v nich ovšem být i oxidy dusíku a některé inertní plyny. Mezi solfatarami a mofettami je ještě jeden velmi nebezpečný rozdíl. Zatímco sírné plyny lidské smysly rozpoznají okamžitě, větší koncentrace oxidu uhličitého jsou nezachytitelné, a proto smrtelně nebezpečné. To se stalo osudné obyvatelům okolí Lake Nyos v Kamerunu roku 1986, kde výrony oxidu uhličitého z kráterového jezera usmrtily 1700 lidí.

Horké vody, pokud jsou pod tlakem, prorazí na povrch a vystřikují jako gejzíry. Tento obecný název je odvozen z místního islandského jména. V některých známých případech vystřikuje voda s parou v určitých intervalech, tak jak se hromadí tlak a poruší povrchové napětí vodní hladiny. Slavný Old Faithful (Starý věrný) v Yellowstone National Parku v americkém Wyomingu stříká každých 60 minut do dvacetimetrové výšky a atrakce trvá 5 minut. Dělá to od nepaměti až s neuvěřitelnou pravidelností. Podobný je Strokkur na Islandu. Lake Bogoria (dříve Hannington) v Keni vybuchne každých 10 minut, zatímco třeba Rotorua na Novém Zélandu jen čtyřikrát týdně, a to dost nepravidelně. Na cyklus mají značný vliv i srážky. Velký Gejzír na Islandu je aktivní již po 8000 let, v posledních letech však potřebuje povzbuzení mýdlovým práškem.

Teoretický růst teploty vod s hloubkou pod povrchem je vyjádřen křivkami v grafu na obrázku 3. Ukazuje též růst bodu varu v třech různých podmínkách.

Obr. 3. Vztah mezi teplotou horniny nebo vody k hloubce pod povrchem. Podle originálu McCalla (2005), s původními jednotkami (stopy a stupně škály Fahrenheit).



Křivka A – Teoretický růst bodu varu, B – Bod varu v podmínkách vulkanické oblasti, kde magma nebo horké horniny jsou blízko povrchu, C – Bod varu v prostředí, kde nepropustné horniny zabraňují výstupu magmatu.

Teplu v dosahu magmatické činnosti

Podrobně byl studován i vliv intruzí magmatu na teplotní pole kůry. Modelové výpočty prováděli Šafanda, Čermák a Štulc (1997) na oherském riftu na podkladě geologického modelu Kopeckého (1986), který předpokládá třicetikilometrovou mocnost kůry a původní tepelný tok $60 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$ a přítomnost dvou magmatických krbů. Růst povrchového tepelného toku a rychlost chladnutí byla znázorněna v grafech.

O modelový výpočet rychlosti chladnutí magmatu se pokoušela řada autorů. Např. Jaeger (1968) vypočítal, že těleso plutonitu o průměru 700 m, intrudující 350 m pod povrch, potřebuje 9000 let, aby vychladlo na $850 \text{ }^\circ\text{C}$. Podle Carmichaela et al. (1974), deskovité těleso granitu 2 km tlusté, jež intrudovalo za osmisetstupňové teploty do okolní horniny $100 \text{ }^\circ\text{C}$ teplé, potřebuje dokonce 64 000 let na to, aby vychladlo na $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dodáváme i některé údaje o rychlosti chladnutí vulkanitů po výlevu. Již Daly v roce 1933 uváděl, že vytékající láva o teplotě $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ vychladne do $750 \text{ }^\circ\text{C}$ za 12 dní, pokud je její vrstva 1 m mocná, avšak za 3 roky, pokud je 10 m tlustá a až za 30 let, pokud je její tloušťka 100 m. Potvrzuje to i Bullard (1976), který vypočítal, že doba potřebná k vychladnutí roste exponenciálně s mocností lávového příkrovu. Velmi podrobné údaje jsou i z Havaje, kde bazaltové lávy chladly poměrně rychle a na vulkánu Kilauea se za 5 let vytvořila na žhavé lávě až 20 m tlustá chladná kůra. Gray (1978) uvádí, že láva v havajských lávových jezerech chladne průměrnou rychlostí $20 \text{ }^\circ\text{C}$ za rok. Modelové výpočty jsou i z fosilních lávových proudů a mělkých intruzí. U čedičových žil se např. uvádí neobyčejně pomalá rychlost chladnutí, a to $1 \text{ }^\circ\text{C}$ za 10 000 let. (Philipotts a Reichenbach 1985). Uvedené údaje jsou citovány v práci Kukala (1990).

Oceánský vulkanismus jako dodavatel tepla

Podle zasvěceného odhadu se ročně na oceánské dno vylije $30 - 50 \text{ km}^3$ vulkanických hornin, z toho nejvíce na riftových zónách, o něco méně na transformních zlomech a podmořských horách. Na riftových zónách, jak lze změřit podle rychlosti rozpínání oceánského dna, by se ročně mělo vylít $2,4 \times 10^5 \text{ m}^3$ bazaltových láv. Sopečná činnost na oceánské dně probíhá nepřetržitě, jak dokazují přímá pozorování, navíc i nepřímé důkazy, jako jsou vařící vody, vody zbarvené či plovoucí kusy pemzy. Takto však můžeme registrovat jen asi tisícinu případů podmořské vulkanické činnosti.

Na oceánské dně jsou i vývěry horkých vod, zvané oceánské hydrotermální prameny. Jejich teploty jsou až $380 \text{ }^\circ\text{C}$. Vyskytují se v centrech rozpínání – riftových zónách – na poruchách i kolem podmořských hor. Center s horkými vývěry je dnes známo na 40, objevují se však stále nová. Některé horké prameny jsou vydatné, až $50 - 100$ litrů za sekundu, na tepelné bilanci oceánů to větší význam nemá, neboť horké vody jsou okamžitě ochlazovány a jejich přítok je ve srovnání s objemem chladných oceánských vod nicotný. Předpokládá se, že dodávka tepla jednoho horkého pramene, černého kuřáku (black smoker) je 2 až 5 MW, černých kuřáků jsou ovšem tisíce. Odhaduje se, že přínos horkých vod z oceánského dna do mořské vody je $1,8 \times 10^{12} \text{ W}$. V podstatě jsou však výrony hydrotermálních vod z hlediska rozlohy oceánů lokální záležitostí. Bylo totiž zjištěno, že pouhých 50 m nad nejintenzivnějšími výrony je zředění těchto vod již 1:500, i když rychlost výronu je značná, od 30 do 240 cm za sekundu.

Tepelná bilance oceánských vod

Při rozboru tepelné bilance Země nesmíme opomenout oceány, jejichž rozloha značně převyšuje rozlohu souše (poměr 2,44:1).

Oceánskou vodu ohřívá sluneční záření, dodávání tepla vulkanickou činností na dně oceánů, přeměna kinetické energie na tepelnou, ohřívání chemickými i biologickými procesy, přímý přenos tepelné energie z atmosféry, kondenzace vodních par i rozpad radioaktivních prvků.

Největší význam má sluneční záření, které je však adsorbováno nejsvrchnější vodní vrstvou. Do metrové hloubky tak proniká jen 85 % záření. Oceánský vulkanismus dodává jen asi tisícinu tepla ve srovnání se slunečním zářením. K oteplení mořské vody dochází i třením větru o mořskou hladinu a při tření vodních mas za přílivu a odlivu. Opět však jde o nepatrné hodnoty, odpovídající jen asi desetitisícině energie slunečního záření.

Proti dodávání tepla do oceánských vod působí i tepelné ztráty. To způsobuje vyzařování tepla z povrchu oceánů, konvekční proudění teplejších mas a jejich ochlazování i odpařování mořské vody.

Oceány jsou obrovskými zásobárnami tepelné energie. Přijímají více tepla než souš, neboť sluneční paprsky se odrážejí od vody méně intenzivně než od suchého zemského povrchu.

V oceánech probíhá přenos tepla ve směru horizontálním i vertikálním. V zásadě se teplo přenáší z nižších zeměpisných šířek do vyšších. Hlavním činitelem jsou oceánské proudy, např. Golský a jeho pokračování Severoatlantský, analogický proud Kurošio v Pacifiku i proudy jiné. Ty značně ovlivňují teplotní bilanci oceánů. Ještě poslední výběžky Severoatlantského proudového systému v Severním ledovém oceánu přenášejí $12 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}$ za den.

Vertikální přenos tepla je složitější. Tepelná vodivost vody velkou roli nehraje a tak je důležitější konvekční proudění vodních mas. Při něm se pohybují vodní částice větší než molekuly. Teplejší vody na povrchu mají větší obsah soli, jsou hustší a tak klesají, čímž ohřívají hlubší vodní masy. Chladné vody se pohybují v hlubinných proudech a jako výstupné proudy se mohou dostávat na povrch.

Kromě konvekčních proudů se přenáší teplo i turbulencí, při které se mechanicky přemísťují vodní částice. Turbulence však zasahuje maximálně do hloubky několika desítek metrů.

Teplota vod světového oceánu kolísá od 1,9 °C do 60 °C. Nejvyšší teploty jsou jen v některých tropických lagunách, jinak se vody otevřeného oceánu na povrchu neohřejí na větší teplotu než 33 °C. Průměrná celoroční teplota povrchové vrstvy celého oceánu je 17,4 °C. Pouze 35 % plochy světového oceánu má na povrchu průměrnou roční teplotu 25 °C, zatímco 53 % procent povrchu pak nad 20 °C.

Pokusy o využití tepelné energie z mořské vody jsou poměrně úspěšné. Jsou založeny na rozdílech teplot vod povrchových a vod z hloubek 600–1000 m pod hladinou. Potenciálně jsou využitelné takové vody, kde je rozdíl teplot nejméně 20 °C. Metoda je známá pod zkratkou OTEC (Ocean thermal energy conversion).

Metoda je poměrně jednoduchá. Povrchová teplá voda se odpařuje, pára může pohánět turbínu. Tlak se snižuje, voda se ochlazuje vodou čerpanou z hloubky. Je to systém uzavřený.

První reálné návrhy pocházejí od Francouze A. d'Arsonvala, který se zaměřil na možnosti využití rozdílu teplot chladné atlantské vody a teplejší vody Seiny. Později byla na tomto principu postavena malá elektrárna v zálivu Matanzas na Kubě o výkonu 22 kW. Rozdíl mezi teplotami povrchové a hlubinné vody byl pouze 14 °C. Další pokusné stanice jsou na různých místech na světě, aktivní je v Japonsku a dokonce i u Abidžanu (Pobřeží Slonoviny). Lze použít i systém otevřený, kde je vedlejším produktem odsolená voda. OTEC zařízení mohou stát na pobřeží, v mělké vodě nebo na lodi. Požadavky na rozdíl teploty nejsou tak přísné, vyhovuje jim velká plocha oceánu, přesněji 60 x 10⁶ km². Kdyby OTEC systémy byly rozmístěny po takové ploše a každé zařízení vyrábělo 200 MW energie, pak by se mohlo produkovat až 10 x 10⁶ MW. Pro srovnání, celková produkce energie elektráren Spojených států v r. 1987 byla 165 x 10³ MW. Poměrně úspěšné jsou pokusy využít tepelné energie oceánských vod, a to rozdílů v teplotě vod povrchových a z hloubky 600–1000 m. Je potřeba, aby rozdíl v teplotě byly nejméně 20 °C. V uzavřeném systému se teplá povrchová voda odpaří, pára pohání turbínu. Když se tlak sníží, voda se ochlazuje chladnou vodou čerpanou z hloubky. Pak se proces opakuje. V otevřeném systému se velká množství vody odpařují (jen asi 0,5 procent z objemu). Pak se voda ochlazuje chladnou čerpanou vodou, produktem je odsolená voda, což může být velmi důležitým zdrojem pro karibské a některé pacifické ostrovy.

Odhadnutý potenciál OTEC je 0,2 MW použitelné energie z čtverečního kilometru povrchu tropického oceánu.

Metody bylo použito na Havaji na Keahole Point, je to na pevnině a v roce 1993 produkoval 50 kW energie. Byl to jediný systém, pumpující pro tyto účely hlubinnou vodu z hloubky 1600 m. Celý proces stojí 30 milionů dolarů, což je asi desetkrát tolik jako konvenční tepelná uhelná nebo ropná elektrárna. Ovšem údržba stojí stejně, případně je i méně nákladná než u atomových elektráren.

O použití zmíněného principu se uvažuje i na Taiwanu.

Geologické podmínky výskytu geotermálních systémů a zdrojů

Zhruba platí, že známé geotermální systémy jsou rozloženy podél mladých orogénů a v oblastech mladého vulkanismu. Jsou však výjimky, neboť v některých mladých orogénech geotermální systémy známy nejsou nebo jsou vyvinuty jen rudimentárně. Je to např. v Alpách, části Karpat, v Jižním Atlasu a východní části amerických Kordiller. Naproti tomu jsou některé geotermální systémy v oblastech, kde není znám mladý vulkanismus, ani nepatří mezi mladé orogény. Jsou charakterizovány zvýšenými hodnotami tepelného toku (viz str. 7). Sem by patřily geologické struktury, kde dochází k oživení kůry, případně i svrchního pláště podél hlubinných zlomů a poruchových zón, kde nastává oživení pohybů. Takové zóny neumožňují jen výstup magmatu z pláště, nýbrž i vertikální pohyby horkých vod. V některých stabilnějších oblastech jsou geotermální systémy definovány velkými kapacitami kolektoru, i když geotermální stupeň a hodnota tepelného toku nepřevyšuje průměr. Uvádějí se příklady ze západosibiřské platformy a předpolí Kavkazu. V geologických jednotkách s velkou mocností sedimentů a tím i dlouhodobě klesajícího podloží pánve přínos tepla závisí především na pozici a kapacitě geotermálního kolektoru. Nestabilita podkladu se může projevit i zvýšeným tepelným tokem a vyšším geotermálním stupněm. Příkladem je panonská pánev v Maďarsku, zasahující na Slovensko. Takové charakteristice v České republice částečně odpovídá i karpatská předhlubeň.

Hodnocení geologických struktur

Z geologického hlediska je možno hodnotit vhodnost nebo nevhodnost určité struktury:

Příznivé podmínky jsou zejména:

- přítomnost poruchových struktur hlubšího dosahu. Ty jsou často využívány pro přírodní přenos tepla z hloubky,
- relativně menší mocnost kůry a tím mělká hranice mezi zemskou kůrou a pláštěm,
- relativně nižší nadmořská výška, jako jsou hluboce zaříznutá údolí současných nebo starších toků,
- přítomnost granitoidových hornin, zejména kyselějšího charakteru, které mají vyšší obsah radioaktivních prvků,
- přítomnost žilných vyvřelin,
- území se současnou zvýšenou geotermální aktivitou s přívodními drahami teplých vod,
- území s geologicky starší geotermální aktivitou, která lze rozpoznat podle hydrotermálních rud a jiných geologických kritérií (viz str. 3),
- přítomnost hydrogeologických struktur s větším obsahem oxidu uhličitého ve vodách,
- území tvořená metamorfovanými horninami s granitoidy v podloží. Zde jsou nadějně zejména partie s vrcholovými částmi granitoidových elevací, případně i spjaté s výskytem hydrotermálních rud,
- území prohrátá mladou vulkanickou činností, s přívodními drahami neovulkanitů, přednostně s poruchami, zasahujícími hluboko do kůry.

Nepříznivé podmínky mohou být zejména:

- na území je větší mocnost zemské kůry a tím zjištěné a předpokládané nižší hodnoty tepelného toku,
- lokality jsou na úbočích vyvýšenin a na jejich vrcholových partiích,

- uvažovaná lokalita je tvořena metamorfovanými horninami, hlavně svory a fylity, které jsou dobrými izolátory, málo porušenými. Nejsou přítomny poruchové zóny a úklony foliačních ploch nejsou vertikální nebo strmé, proto jsou takové podmínky nepříznivé,
- v oblasti jsou horniny s nízkými obsahy radioaktivních prvků,
- v podloží sedimentů nebo metamorfik nejsou přítomny granitové horniny s vysokým obsahem radioaktivních prvků.

Geotermální systémy

Nejsvrchnější části zemské kůry, které jsou ve středu zájmu z hlediska využití geotermální energie, mají velmi složitou strukturu. Proto jsou v nich různé podmínky pro hromadění a využití zemského tepla.

Teplu Země je možno získat nejčastěji využitím fluid cirkulujících v zemské kůře. Těmito fluidy jsou plyny, vodní pára, podzemní vody. Je ovšem možno využít i přímo tepla samotných hornin.

Z hlediska geotermálních struktur a využití fluid se systémy dělí takto:

- Hydrotermální systémy s vysokou tepelnou entalpií. Jsou to systémy s vysokým vodním tlakem, systémy s vodní parou a systémy s přehřátou vodou.
- Hydrotermální systémy s nižší tepelnou entalpií, což jsou zvodně s horkou vodou (nad 100 °C) teplou vodou (40–100 °C), zvodně nízkoteplotní (25–40 °C) a termální prameny s teplotou vod nad 20 °C.
- Petrofyzikální systémy, jež mají zakonzervované teplo v horninách, magmatická tělesa a suché zemské teplo (Hot Dry Rock – HDR, Fractured Hot Rock – FHR).
- Mělké geotermální systémy do teploty 25 °C a do hloubky cca 400 m. Jsou to zemní kolektory, svislé kolektory ve vrtech, podzemní voda ve vrtech a studních.
- Jiné systémy, kam patří vrty hlubší než 400 m, betonové piloty nebo základy staveb, sezónní ukládání tepla v horninách v kombinaci s jinými alternativními zdroji, ukládání tepla ve zvodních, teplo v podzemních prostorách (v šachtách, tunelech apod.), teplo povrchových vod, přímé využívání tepla vzduchu prohřátého slunečním zářením.
- Systémy hlubokých vrtů pro velké odběratele pro 2 MW tepelného výkonu. Ty se v posledních letech uplatňují hlavně v Německu, Švýcarsku, Rakousku a Itálii. Systém je založen na spojení principu využití vyšších teplot zemského tepla v hloubkách 3 km, kde jsou teploty nad 100 °C se sezónním ukládáním tepla ze solárních baterií a akumulací tepla v nadzemních rezervoárech. Jednou z hlavních podmínek pro uplatnění tohoto systému je vhodná lokalizace hlubokého vrtu, využití stávajícího systému vytápění, což zahrnuje vhodný tepelný spád otopného systému i malou vzdálenost tepelného zdroje od uživatele.

Stabilní a přechodné geotermální systémy

Z hlediska stability geotermálních pochodů se u geotermálních systémů používá jednoduché dělení na systémy stabilní a přechodné.

Stabilní geotermy (stable, steady state) jsou v místech, kde došlo k vyrovnání tepelné bilance litosféry, tedy zemské kůry a svrchního pláště. V takových oblastech je růst teploty s hloubkou pod povrchem pravidelný, jelikož došlo k vyrovnání tepelného režimu. Podle

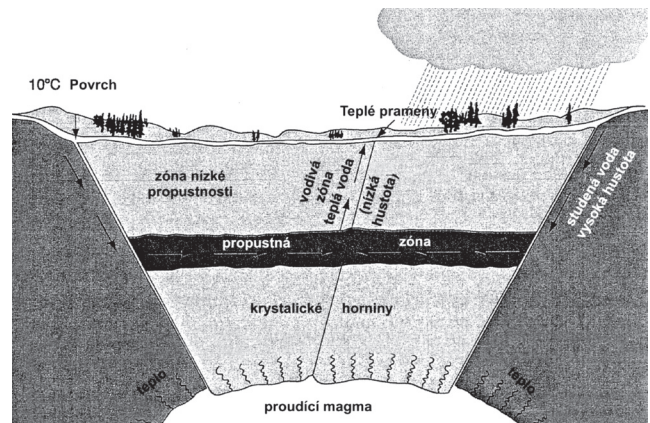
některých autorů k takové stabilizaci je třeba nejméně 100 milionů let. Takový stabilní systém je typický pro štíty a platformy.

Přechodné, čili nestabilní geotermy (transient) jsou takové systémy, kde nedošlo ještě ke stabilizaci a vyrovnání teplotního režimu vlivem geologických pochodů. Typický je případ příkrovové stavby, kde se režim odlišně vyvíjí v příkrovech a podložním autochtonu.

Systém hydrotermální

Systémy hydrotermální jsou vázány na geologické či hydrogeologické struktury, kde jsou vytvořeny zvodně uzavřené nebo otevřené (s doplňováním zvodnění) s teplou vodou. Do těchto zvodní se hloubí jímací vrty, kterými se teplá podzemní, někdy až minerální či fosilní (reliktní) voda čerpá a její teplo se odeberá ve výměnících na povrchu pro vytápění, nebo při vysokých teplotách zvodní i pro energetické využití.

Obr. 4 Schéma struktury podrobně popsané v textu.



Pokud je zvodně uzavřená anebo pokud přírodní dotace zvodně je malá nebo pomalá, je nutné ochlazenou vodu zpětně injektovat, aby se kapacita takového zdroje tepla nezměňovala s časem.

Struktury tohoto typu jsou známé v pánvích různého stáří. Tak je využíváno zemské teplo v rozsáhlé hluboké druhohorní sedimentární pánvi pařížské ve Francii, terciérní pánvi panonské v Maďarsku a v poslední době v menších pánevích strukturách na Slovensku, Bulharsku i Rumunsku.

U nás je již využíváno teplo zvodní hlavně z bazálních sedimentů v české křídové pánvi v Děčíně a Ústí nad Labem s teplotami 32 až 35 °C a na Moravě je připravován projekt na využití terciérních zvodní karpatských předhlubní a sedimentů vídeňské pánve s teplotami 50 až 70 °C.

Systém a technologie Hot – Dry – Rock

Tento systém známý pod zkratkou HDR, což značí Hot – Dry – Rock (česky horká suchá hornina) vychází z předpokladu, že v určité hloubce pod povrchem jsou horniny prakticky suché a nepropustné pro kapaliny. Tlak nadložních hornin je totiž tak velký, že zabraňuje vzniku porů a větších dutin.

Při normálním geotermickém stupni je v hloubkách kolem 6 km pod povrchem teplota hornin až 180 °C, tlaky jsou až 165 megapascalů. V těchto hloubkách jsou již převážně jen granitoidové a metamorfované horniny, ve kterých se může cirkulace fluid omezit jen na tektonicky drcená pásma.

Proto se takové prostory vytvářejí uměle, čímž v hloubce vzniká tepelný výměník. V takovém podzemním výměníku by

voda pod velkým tlakem zůstala přehřátou kapalinou. Kapalina cirkuluje a odebírá teplo okolním horninám. Povrchovým výměníkem se pak za nízkého tlaku přeměňuje voda na přehřátou páru použitelnou pro výrobu elektrické energie. Nejvhodnější teplota pro výrobu elektrické energie je 150 °C, přičemž se z ekonomických důvodů dává přednost současné výrobě elektrické energie i využití tepla pro vytápění.

Základní výhodou tohoto systému jsou:

- získání prakticky neovlivnitelného energetického potenciálu,
- získání energie kdekoli a kdykoli,
- zanedbatelná produkce škodlivých kapalin a plynů, hlavně malého množství oxidu uhličitého.

Podle modelových výpočtů je tento systém schopen produkovat 50 až 100 MW po dobu 20 let a lze jej proto považovat za ekonomicky výhodný. Taková produkce ovšem vyžaduje výměník o ploše 5 až 10 km² a vtláčování 50 až 100 litrů vody za sekundu při tlacích až 40 MPa. Je nutno počítat s velkými ztrátami kapaliny, a to hlavně na začátku procesu. Bylo prakticky ověřeno, že ztráty mohou být do 10 l.s⁻¹, což je možné jen v případě použití cirkulujících vod. Testováno bylo několik druhů tohoto systému:

- základním modelem jsou dva vrty propojené jednou širokou puklinou. Nejprve se vyvrtá vrt první, ze kterého se hydraulickým procesem vytvoří v hloubce jedna puklina. Po ověření jejího směru se do tohoto prostoru vyvrtá druhý vrt. Vzdálenost zakončení obou vrtů je minimálně 1 km. V mnohých případech mohou však nastat pochybnosti o nachečování puklinové kapaliny druhým vrtem;
- model, spočívající ve vytvoření většího množství puklin, propojených dvěma vrty, přičemž vzdálenost mezi vrty musí být nejméně 300 m. Ukázalo se, že ekonomicky je nejvhodnější vytvoření systému deseti puklin pro dva vrty.

První projekt na využití systému HDR byl zahájen v roce 1970 v Los Alamos Scientific Laboratory (LASL) v New Mexiku v USA. Geofyzikové navrhli propojení paty dvou vrtů umělým štěpením hornin a do jednoho vrtu vhanět vodu a z druhého těžit horkou páru jako z výměníku tepla. Tento systém narážel zpočátku na celou řadu technických problémů, později se však ukázaly možnosti jeho uplatnění. Výpočty ukázaly, že ochlazení 1 km³ horniny umožní provoz tepelné elektrárny o výkonu 30 MW elektrické energie po dobu 30 let. Obdobný systém je prakticky možno uplatnit kdekoli a je jen otázkou výběru lokalit, kde by bylo podobný systém možno uplatnit případně i v menších hloubkách. Vliv odběru zemského tepla neovlivňuje životní prostředí. Výhodné by bylo, aby na zvolené lokalitě byly horniny již částečně primárně rozpukány, aby propojení umělou cirkulací bylo snazší a méně nákladné. Je však nutno si uvědomit, že v každém případě dojde při cirkulaci vodního média ke ztrátám, jelikož v podzemí nelze prostředí uzavřít.

Z nejdůležitějších projektů Hot – Dry – Rock jmenujeme tyto:

Falkenberg Geothermal Project, Německo, 1977–1986,
 Urach Geothermal Project, Německo, od r. 1977 dodnes,
 Geothermal Energy Project, Camborne School of Mines, Cornwall, Velká Británie, v letech 1977–1990,
 Project Mayet de Montagne, Francie, v letech 1978–1989,
 Fjallbaeck HDR Project, Švédsko, v letech 1986–1990,
 Hijiori Geothermal Project, Japonsko, v letech 1974–1991,
 European Geothermal Research Project Soultz-sous-Forêts, Francie, od roku 1986 dodnes.

V rámci téhož projektu byly v roce 1976 zahájeny práce v Cornwallu ve Velké Británii za spoluúčasti Britské geologické služby a společnosti RTZ i dalších účastníků. Je zaměřen na kaledonské granity, vrty byly hloubeny do 3 km s očekávanou teplotou 80 °C.

Výzkumný charakter má model řešený firmou Geotechnik Consult Passau v Německu, jenž simuluje fyzikální procesy i jejich ekonomické hodnocení. Takový model je vhodný pro první krok k vyhodnocení efektivity systému HDR pro výměníky v různých hloubkách, různé typy hornin a jejich teploty, cirkulaci vod i hydraulické vodivosti puklinového systému. Výsledkem je i výpočet ceny produkce elektrické energie.

Podle tohoto modelu i jiných výzkumů lze požadavky na uplatnění systému HDR formulovat takto:

- hloubka výměníku by neměla být větší než 5 km, a to s ohledem na současné možnosti vrtné technologie a na náklady vrtání,
- teplota v zásobníku tepla musí být vyšší než 180 °C, což by zaručovalo dostatečnou efektivitu přeměny tepla na elektrickou energii,
- plocha výměníku by neměla být větší než 3 km²,
- systém puklin v horninách by měl být otevřen přibližně na 1,5 mm, což by odpovídalo vynaložené energii na cirkulaci kapalin,
- poměr mezi minimálním a maximálním horninovým napětím nemá být větší než 0,75, aby byl systém stabilní a ztráty vody při cirkulaci byly co nejmenší,
- minimální množství cirkulujícího média je 78 l.s⁻¹, což by stačilo k transportu dostatečného množství tepelné energie do povrchových výměníků. Nejvhodnější jsou tři shodné instalace výměníků o ploše 1 km² a cirkulaci vody v hodnotě 25 l.s⁻¹. Za těchto podmínek se odhaduje cena výroby jedné kWh přibližně na 0,13 Euro, což je ekonomicky přijatelné.

Systém Fractured–Hot–Rock

Tento systém (FHR – Rozpukaná horká hornina) se vyděluje teprve v poslední době, protože v podstatě využívá také teplo suchých hornin, ale hlavně takových, které jsou přírodně rozpukány nebo drceny v tektonických pásmech zasahujících hlouběji do zemské kůry, odkud je zjištěn rychlejší a mohutnější výstup zemského tepla. Nezbytné je detailní poznání geotermální struktury, vyžaduje však většinou v omezené míře hydraulické štěpení hornin. Na strukturách tohoto typu je obvyklý i hlubší oběh podzemních vod do hloubek až několika kilometrů. V našich podmínkách lze k tomuto typu přiřadit přírodní výstup termálních, minerálních a poplyněných vod v Karlových Varech.

Příklady využití potenciálu geotermální energie na světě

Z hlediska produkce tepla je důležité zdůraznit, že ochlazení 1 km³ hornin ze zemské kůry o 100 °C může dodat energii pro elektrárnu o výkonu 30 MW po dobu 30 let.

Jak již bylo uvedeno v části Geotermální systémy, můžeme rozlišit tři hlavní systémy. První dva jsou klasické a jsou využívány již dávno, a to systém s horkou parou a systém s horkou vodou. Jako třetí je systém suchého tepla – HDR, Hot Dry Rock. Geotermální energie se nevyužívá jen pro výrobu elektřiny, využití je dalekosáhlé a závisí na tom, zda jde o páru, či horkou vodu, a na tom, jak horká voda je. V tab. 10 jsou schematicky znázorněny možnosti využití.

Tabulka č. 10: Možnosti uplatnění zemského tepla podle teploty

	°C	
P Á R A	200	
	190	Výroba papíru
	180	
	170	
	160	Sušení rybiho masa
	150	Destilace alkoholu
	140	Sušení zemědělských produktů
	130	
	120	Destilace pro pitnou vodu
V O D A	110	
	100	Praní a sušení vlny
	90	Sušení ryb
	80	Vytápění objektu
	70	Chlazení
	60	Vytápění skleníků
	50	Pěstování hub
	40	Terapeutické lázně
	30	Vyhřívání plaveckých bazénů
	20	

Geotermální systémy s horkou parou jsou považovány za neefektivnější, nejsou však tak časté. Jejich příklady jsou zejména Larderello v Itálii (viz. 4) a The Geysers v údolí Napa v severní Kalifornii.

Ve městě Lardarello, ležící v Apeninách, byla v r. 1904 postavena dnes nejstarší geotermální elektrárna. Vodní pára tam byla extrahována z hloubky 3000 m z třetihorních sedimentů. Na samém počátku rozsvítila elektrina přímo vyrobená z páry 4 žárovky. V roce 1913 byla elektrárna rozšířena a dosáhla výkonu 250 kW. Současná produkce elektrické energie je 545 MW.

Geotermální pole The Geysers, nedaleko od San Franciska, bylo objeveno již v roce 1847. S vrtným průzkumem se tu začalo v roce 1920, ale výroba elektřiny z páry tam začala o čtyřicet let později, v roce 1960. Ze dvou stovek vrtů uniká pára, z některých neobyčejnou silou, dokonce takovou, že se vrty nepodařilo uzavřít. Dnes se zde získává elektrická energie v kapacitě až 10 MW z dvaceti vrtů z hloubek 2–3 km (nejhlubší byl 3,2 km), které produkují 1–2 miliony kg přehřáté páry o teplotě 250 °C za hodinu. Efektivita výroby tepelné energie je však nízká, pouze asi 15 %. The Geysers vyrábí nejvíce geotermální energie na celém světě, výroba energie z páry může zásobovat elektřinou milionové město. Na tomto poli bylo vyhloubeno celkem 600 vrtů.

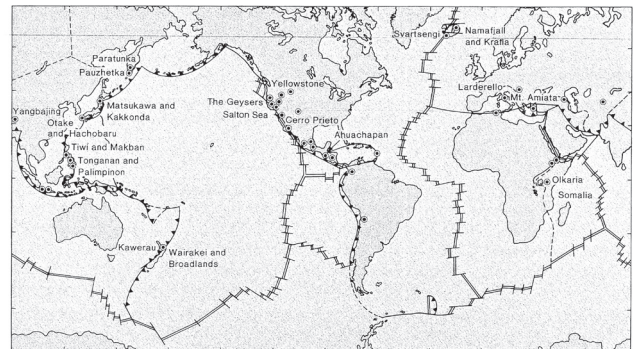
Podrobné údaje jsou o Japonsku. První geotermální elektrárna tam byla postavena v roce 1966 u města Matsukawa. V současné době je v této zemi osm geotermálních energetických centrál o výkonu 1 až 50 MW. Jsou tam využívány jak hydrotermální, tak vulkanické systémy. V posledních letech se uplatňují i systémy HDR. Produkce elektrické energie z geotermálních zdrojů byla 215 MW v roce 1990, dnes se zvýšila na 500 MW.

V Německu je větší využití geotermální energie hlubších zvodní vázáno jen na některé městské lokality. Ve východní části země je to oblast Braniborska, kde bylo v roce 1993 instalováno vytápění domů s výkonem 22 MW. Celkový geotermální potenciál je vypočítán na 1000 MW. Spolková geologická služba Německa vypočítala pro severoněmeckou nížinu geotermální potenciál 7800 MWm, který by bylo možno využít pomocí menších zařízení s výkonem od 5 do 10 MW. Výhodné podmínky jsou i v rýnském prolomu, kde např. u města Bruchsal severně od Karlsruhe je ověřena zvedná s teplotou 120 °C. Zařízení pro vytápění objektů jsou

dnes instalována i u měst Gaetze, Erding, Schirding, Unterhaching i dalších. Uvádí se rovněž, že v Německu byla v roce 1990 instalována kapacita 33,5 MW, převážně z hydrotermálních zdrojů.

Projekt na využití geotermální energie probíhá v Brandenburku na lokalitě Gross Schönebeck. Podle projektu Geoforschungszentrum Potsdam za teoretického i praktického příspěví koncernu Vattenfall Europe je hotov jeden vrt injekční do hloubky 4300 m. Počítá se s náklady 10,1 milionů Euro, kterými přispívá Spolkové ministerstvo životního prostředí. Dalším sponzorem je Zemské ministerstvo hospodářství v Brandenburku. Výhodou je neustálá dodávka energie, na rozdíl od solární a větrné energie.

Obr. 5 Rozmístění geotermálních elektráren velkých geotermálních zdrojů ve světě.



Zkušenosti s využíváním teplých vod ve Francii jsou podobné jako v Německu. Jedná se o pánevní struktury nevolkanického charakteru. Velmi zajímavou je pařížská pánev s mocnou výplní jurských a křídových uloženin. Tisíce sídel je tam zásobeno a vyhříváno teplou vodou, přičemž většina zařízení pochází již z doby mezi roky 1981 a 1986. Horká voda se soustřeďuje převážně v jurských vápencích, a to nejen v pórech, ale i v krasových dutinách. Z hlediska zmírnění nepříznivých vlivů na životní prostředí i z hlediska snižování tlaku horkých vod se vody po odběru části tepla opětne injektují do systému dvojic vrtů – čerpacího a vsakovacího.

Dnes je ve Francii 66 geotermálních výtopen, z nichž je 54 v okolí Paříže. Tato zařízení dodávají teplou vodu do více než 200 000 bytů, což znamená úsporu více než 200 000 t topného oleje za rok. Typická vytápěcí jednotka jsou dva vrty hluboké přibližně 1,7 km, jeden je čerpací – produkční a druhý vsakovací – injektážní. Vrty jsou přibližně 5 až 10 km od sebe. Takový systém je většinou uzavřený, jelikož při čerpání vod v množství několika set litrů za sekundu by mohlo docházet k vzájemnému ovlivňování jednotlivých odběrových center, též k oxidaci a navíc i korozi a inkrustaci potrubí, neboť teplé vody mají poměrně vyšší mineralizaci, od 6,5 do 35 g.l⁻¹, zejména zvýšený obsah NaCl, KCl, CaCO₃, SO₄ i dalších složek a z plynů větší množství oxidu uhličitého a sirovodíku. Při procesu musí být proto zachována chemická rovnováha. Tepelná kapacita jednotky je 10 MW a recirkulace je 150 až 300 m³ za hodinu, čili 41,6 až 83,3 l.s⁻¹. Náklady na zařízení nejsou malé, výtopny jsou však z ekonomického hlediska výhodné a počítá se, že jejich provoz bude trvat 25 až 40 let.

Britská geologická služba iniciovala projekt u Southhamptonu, kde jsou zachyceny vody o teplotě 76 °C v triasových vápencích.

Využití termálních vod ze sedimentů pánvi je v Evropě známé také z panonské pánve v Maďarsku, ze severoněmecké křídové a třetihorní pánve i v předalpských molasových pánvích v Bavorsku a Rakousku. V posledních letech se začínají využívat i horké vody v předhůří Karpat v Polsku, ve středobulharské pánvi a několika

pánvích v Rusku, na Kamčatce a Kurilských ostrovech, dále v Gruzii, Kazachstánu a Uzbekistánu.

V Indii je vytipováno na 250 lokalit pro výrobu teplých vod a definováno 12 geotermálních oblastí.

Indonézie, jako země s současným vulkanismem, má řadu využitelných zdrojů geotermální energie, vrtné práce tam začaly již v letech 1926–1928. Vyskytují se jak systémy s parou, tak horkou vodou.

Nový Zéland patří ke klasickým oblastem s geotermálními systémy. Kolektory horkých vod jsou vulkanity.

V Turecku byly hodnoceny jak vulkanické, tak nevulkanické, vesměs slibné zdroje.

V Keni po určitých neúspěších byly zahájeny programy na využití geotermální energie v roce 1970, v roce 2003 zde zahájila Britská geologická služba projekt, spočívající ve využití tepelných zdrojů spjatých s mohutnou magmatickou činností, která ohřívá podzemní vody. Zdroje jsou v asociaci s vulkány ve Východoafrickém prolomu. Využívá se i kondenzovaných par jako užitkové i pitné vody. Cirkulace vod je stopována pomocí izotopů, a to od východoafrických jezer až po fumaroly, vzdálené od nich až několik desítek kilometrů. Výstup vod je sledován po kilometrové dráze z hloubek k povrchu.

Jordánský geotermální projekt je ve stadiu studia. Jsou tam velmi vhodné podmínky, neboť prameny teplých vod jsou kolem Mrtvého moře a sledují mladou a aktivní poruchovou zónu.

V Řecku jsou velké potenciální zdroje geotermální energie na vulkanických ostrovech v Egejském moři, jmenovitě na ostrovech Milos a Nisyros. Návrhy na využívání narážejí na environmentální problémy i podporu turistického ruchu.

V Chile je významná geotermální oblast v provincii Antofagasta. V Peru jsou možnosti využití fumarolového pole neovulkanické oblasti stratovulkánu Ubina.

Důležité je, že i v oblastech bez větších teplotních anomálií je určitý teplotní potenciál, a to v případě, že horniny mají schopnost vytvořit zásoby podzemních vod. Takové podmínky známe z některých zmíněných struktur s velkou mocností sedimentární výplně.

Přehledná tabulka 11. shrnuje využití geotermální energie na světě podle údajů, uveřejněných McCallem (2005), rozdělené na výrobu elektrické energie a na přímé použití.

Tabulka 11

Použití geotermální energie v různých zemích světa v roce 2001 (McCall, 2005)

Země	Výroba elektřiny MW	Přímé použití	roční výroba v GWh	MW roční produkce-GWh
Alžír	-	-	1	5
Argentina	0,7	3,5	-	-
Austrálie	0,4	0,8	-	-
Belgie	-	-	3,9	19
Bosna a Hercegovina	-	-	33	230
Bulharsko	-	-	95	346
Česko	-	-	2	15,4
Čína	32	175	1914	4717
Dánsko	-	-	3,2	15
El Salvador	105	486	-	-
Filipíny	1848	8000	-	-

Francie	4	24	309	1359
Gruzie	-	-245	2145	
Guatemala	5	-	-	-
Chorvatsko	-	-	11	50
Indonésie	590	4385	-	-
Irsko	-	-	0,7	1
Itálie	768	3762	314	1026
Island	140	375	1443	5878
Izrael	-	-	42	332
Japonsko	530	3530	1159	7500
Kanada	-	-	3	13
Keňa	45	390	-	-
Kostarika	120	447	-	-
Maďarsko	-	-	750	3286
Makedonie	-	-	75	151
Mexiko	743	5682	28	74
Německo	-	-	307	806
Nikaragua	70	250	-	-
Nový Zéland	345	2900	264	1837
Polsko	-	-	44	144
Portugalsko	11	52	0,8	6,5
Rakousko	-	-	21,1	84
Rumunsko	2	-	237	528
Rusko	11	25	210	673
Řecko	-	-	22,6	37,3
Slovensko	-	-	75	375
Slovinsko	-	-	24	217
Srbsko a Černá Hora	-	-	86	670
Švédsko	-	-	47	351
Švýcarsko	-	-	190	420
Thajsko	0,3	2	2	8
Tunisko	-	-	70	350
Turecko	20	71	160	1232
Ukrajina	-	-	12	92
USA	2850	14600	1905	3971
Evropa celkem	936	4309	4368	20505
Amerika celkem	3883	21529	1908	3984
Asie celkem	3031	16092	3075	12225
Oceánie celkem	345	2901	264	1837
Afrika celkem	453	90	71	355
svět celkem	8240	45220	96686	38906

Naše tabulka 11 rozlišuje z hlediska použití geotermální energie giganty a trpaslíky. Geotermální elektrickou energii nevyrobí mnoho zemí, je to ovšem omezeno typem systémů a přítomností vysokoteplotních zdrojů s parou. Jsou to země s tradičním a klasickým využitím, jako USA, Itálie, Japonsko a Nový Zéland, k nimž

přibývají Filipíny, Mexiko, El Salvador a Indonésie, dokonce i Nikaragua a Turecko. Zajímavý je růst produkce i v Keni a Číně. Geotermální energii pro přímé použití, tedy pro vytápění, průmyslové a jiné účely používá ovšem mnoho dalších zemí, jak vyplývá z tabulky. Z našich sousedů mají slušné postavení Maďarsko a Německo, daleko za nimi je Polsko a Rakousko. Slovensko má mezi nimi střední pozici.

Podobnou tabulku v současnosti publikoval Fridleifsson (2006) s odkazem na Hutterera (2001). Následující tabulka je zajímavá též tím, že uvádí procentuální účast geotermální energie na celkové výrobě energie v jednotlivých zemích (tabulka 12).

Tabulka 12.
Instalovaná zařízení na výrobu elektřiny (podle Hutterera, 2001)

Země	Instalované kapacity MW _e	Výroba energie GWh	% z celkové výroby energie
Austrálie	0,17	0,9	-
Čína	29,17	100	-
El Salvador	161	800	20
Ethiopie	8,52	30,05	1,85
Filipíny	1 909	9 181	21,52
Francie	4,2	24,6	2
Guatemala	33,4	215,9	3,69
Indonésie	589,5	4 575	5,12
Island	170	1 138	14,73
Itálie	785	4 403	1,68
Japonsko	546,9	3 532	0,36
Keňa	45	366,47	8,41
Kostarika	142,5	592	10,21
Mexiko	755	5 681	3,16
Nikaragua	70	583	17,22
Nový Zéland	437	2 268	6,08
Portugalsko	16	94	-
Rusko	23	85	0,01
Thajsko	0,3	1,8	-
Turecko	20,4	119,73	-
USA	222,8	15 470	0,4
Celkem	7 974,06	49 261,45	

Tabulka 13
Pořadí zemí s přímým použitím geotermální energie (tzv. pro vytápění, rekreační účely apod., Lund a Freeston, 2001)

Země	Instalovaná zařízení MW _t	Produkce GWh za rok
Čína	2 282	10 531
Japonsko	1 167	7 482
USA	3 766	5 640
Island	1 469	5 603
Turecko	820	4 377
Nový Zéland	308	1 967
Gruzie	250	1 752

Rusko	308	1 707
Francie	326	1 360
Švédsko	377	1 147
Maďarsko	473	1 135
Mexiko	164	1 089
Itálie	326	1 084
Rumunsko	152	797
Švýcarsko	547	663

Přímé použití využívá jak vysokoteplotních tak nízkoteplotních zdrojů, a proto je na světě daleko rozšířenější než výroba elektřiny z geotermálních zdrojů. Má ovšem svá specifika z hlediska oblastí, prostředí a trhu, neboť páru a horkou vodu můžeme dopravovat na větší vzdálenosti od zdroje jen s obtížemi. Nejdelší zařízení tohoto druhu je na Islandu a měří 70 km. Odhady nákladů na přímé použití se různí, podle většiny názorů je to většinou pod 3 US centů na kWh.

Z hlediska možností přímého použití mají některé země vydatné zdroje. Například v Číně jsou horké vody téměř v každé provincii. Přímé využití v celé zemi roste každoročně přibližně o 10 %, hlavně jako náhrada za uhlí pro vytápění, rekreační a turistické účely, při chovu ryb a v zemědělství. V Japonsku se zdroje využívají z 80 % pro rekreaci a turismus. V této zemi je ovšem potenciál využití mnohokrát vyšší. V posledních letech se dostává do popředí i Turecko. Z oblastí subtropického pásu se mezi země využívající geotermální energii zařazuje i Mexiko. Zajímavá je účast Švýcarska a Švédska v našem přehledu. Zdroje tam jsou ovšem nízkoteplotní s využíváním tepelnými čerpadly.

Podle statistik vyráběly v roce 1990 na celém světě geotermální elektrárny 5827 MW, z toho v USA 2770 MW, na Filipínách 891 MW, v Mexiku 700 MW, v Itálii 545 MW, v Japonsku 215 MW, na Novém Zélandu 283 MW, v El Salvadoru 95 MW, v Keni 45 MW a na Islandu také 45 MW. V roce 1993 byla celková instalovaná kapacita z hydrotermálních systémů na celém světě asi 5800 MW. V posledních letech jsme však zaznamenali nejméně desetiprocentní roční růst. Proto již v roce 1995 byla registrována kapacita 9000 MW elektrického výkonu.

Údaje z roku 2000, uveřejněné v pracích Hutterera (2001) a Lunda a Freestona (2001) odpovídají předpokládanému trendu růstu (tabulka 14).

Tabulka 14
Výroba elektřina a přímé použití geotermální energie v roce 2000 (Hutterer, 2001), Lund a Freeston (2001)

Kontinent	Výroba elektřiny		Přímé použití
	Instalovaná kapacita MW _e	Celková produkce GWh za rok	Celková produkce GWh za rok
Afrika	54	397	504
Amerika	3 390	23 342	7 270
Asie	3 095	17 510	24 235
Evropa	998	5 745	18 905
Oceánie	437	2 269	2 065
Celkem	7 974	49 263	52 979

Sečteme-li celkové množství vyráběné elektrické energie získávané z geotermálních zdrojů na celém světě, dojdeme k číslu, které

se mnohým zdá malé, ale jiným slibné. Konkrétně řečeno, jde přibližně o 10% spotřeby ve Velké Británii. V roce 2003 kryla geotermální energie méně než 0,02% světové energetické potřeby, což je skutečně číslo, které by se mohlo zdát zanedbatelným. Potěšitelný je však zvyšující se trend v posledních letech.

Názorné je též srovnání produkce geotermální energie se světovou spotřebou energie. Např. Spojené státy spotřebují více než 200 000 miliard J na jednoho obyvatele za rok. Kanada, celá Evropa, Jižní Amerika, Afrika, Jihozápadní Asie, Indie a země východní a jihovýchodní Asie méně než 50 000 miliard J na obyvatele za rok. Např. v samotné Indii je spotřeba jen 3000 miliard J na jednoho obyvatele za rok za rok.

Elektrinu z geotermálních systémů vyrábí dnes 21 zemí ze všech kontinentů. Srovnáním situace z konce 20. století se současností vidíme, že dnes jsou v tomto ohledu nejpokročilejší Filipíny, které dokonce plánují do roku 2008 přidat k stávající výrobě 526 MW_e. V této zemi pochází přibližně pětina z vysokoteplotních zdrojů při použití přehřáté páry. Přibližně desetiprocentní až dvacetiprocentní nárůst je plánován v Kostarice, El Salvadoru, na Islandu a v Nikaragui. Etiopie a Guatemala oznámily otevření svých prvních geotermálních elektráren.

Pravidlem je, že v zemích s teplejším podnebím se při využívání geotermální energie uvažuje spíše o výrobě elektriny, naopak v zemích s chladnějším klimatem se klade do popředí vytápění obydlí, průmyslových podniků a skleníků. O použití pro rekreační, lékařské a sportovní účely se usiluje ve všech zemích.

V rámci Evropského Hot - Dry - Rock programu byl v roce 1976 zahájen projekt v Anglii, v Cornwallu, zaměřený na kaledonské granity za spoluúčasti Britské geologické služby a společnosti RTZ i jiných. Bylo vrtáno do hloubky cca 3 km s očekávanou teplotou 80 °C.

Z téhož programu pak ve Francii v Alsasku v roce 1987 začal projekt Soultz-sous-Forêts. V oblasti hornorýnského prolomu byl vyhlouben vrt do 2 km. Dále následovaly vrty až do hloubky 5 km, vesměs do granitu. Na bázi sedimentárního pokryvu byla teplota 124 °C, v granitu až 200 °C. Program pokračoval provedením dalších 2 vrtů a vytvořením podzemního výměníku tepla, do kterého se injektuje voda. HDR výměník vytváří průměrnou teplotu 200 °C (v hloubce 3,5–5 km), efektivním průtokem 25–35 l/s na ploše cca 0,5–1 km².

Geotermální potenciál Česka

V hodnocení geotermálního potenciálu nezůstává naše republika pozadu za jinými zeměmi světa.

Geotermální potenciál v jednotlivých částech našeho území je značně proměnlivý, hlavně ve vztahu ke geotermálním, geologickým a hydrogeologickým podmínkám. Při zpracovávání území určitého regionu je nutné rozdělení na plochy nevhodnější pro využití geotermální energie pro jednotlivé objekty a na plochy vhodné pro větší zdroje využitelné pro hromadné zásobení teplem nebo výrobu elektrické energie.

V místech koncentrované zástavby je však nutné detailně propočítat potenciální možnosti omezených ploch, aby nedocházelo k rychlému prochlazování svrchní části zemské kůry.

Využití potenciálu geotermální energie v současné době předpokládá o něco vyšší investiční náklady, než u jiných zdrojů tepelné energie. Tyto investice mohou mít návratnost úsporami provozu za 5 až 7 let. Za předpokladu obecného zvyšování cen energie se návratnost takovéto investice může ještě zkrátit.

V poslední době byl počítán potenciál geotermální energie jak pro obce, tak i pro okresy či kraje, a to pro potřeby energetických studií i pro vybudování lokálních geotermálních elektráren.

V tabulce 14 jsou ukázkově uvedeny hodnoty využitelného nízkoteplotního potenciálu pro některá zpracovaná území.

Tabulka 14

Území	Využitelný jako „suché“ zemské teplo	Využitelný z podzemní vody	Energetický potenciál celkem MW
Karlovy Vary (okres)	94.8	38.0	132.8
Mělník (okres)	18.6	41.1	59.7
Most (okres)	28.8	7.7	36.5
Potůčky (obec)	2.0	1.3	3.3
Ústí nad Labem (aglomerace)	7.0	11.6	18.6
Chomutov (okres)	71.9	21.1	93.0
Krkonošský národní park	88.5	37.6	126.1
Šumavský národní park	28.5	25.1	53.6
Celkem	340.1	83.5	523.6

Vyčíslení potenciálu geotermální energie bylo řešeno řadou výzkumných a průzkumných organizací.

Podle současných znalostí je možné vyčlenit:

Pro vyčíslení potenciálu geotermální energie bylo využito výsledků projektu výzkumu a vývoje MŽP/630/3/99, která se zpracováním podkladů pro stanovení potenciálu využití geotermální energie v ČR precizně zabývala (Myslil et al., 2002).

Potenciál využití obnovující se nízkopotenční energie horninového prostředí a mělkých podzemních vod je dosažitelný všude na území ČR potenciálem energie využitelné tepelnými čerpadly. Tento potenciál je nutné lokálně řešit „zdola“, tj. z hlediska technických, geotermálních a hydrogeologických možností a vhodnosti využití nízkopotenčního tepla individuálně pro každého u konečného spotřebitele. Jeho stanovení je předmětem vhodné provedené nastavené multikriteriální analýzy.

Odhad teoretického potenciálu energie hornin („suché zemské teplo“) vysoké teploty (>130 °C) pro výrobu elektrické energie je 2 385 900 MW. Tento potenciál však nebude možné nikdy plně využít. Technicky dostupný energetický potenciál je možné podle zahraničních zkušeností odhadovat na 2%, tedy cca 50 000 MW.

Výpočet teoretického potenciálu geotermálního tepla obsaženého v horninách svrchní části zemské kůry maximálně dosažitelného současnou vrtnou technikou v ČR, zpracovaný V. Myslíkem a J. Motlíkem v roce 2006, dává následující hodnoty:

Podle vzorce (Jung et al. 2002) uveřejněného nově v TAB (Büro für Technikfolgen – Abschätzung beim Deutschen Bundestag).

$$EGT = c \cdot \rho \cdot V \cdot T_{stř}$$

kde

E_{GT} obsah tepla (J)

c specifická tepelná kapacita hornin (J/kg K)

ρ hustota hornin (kg/m³)

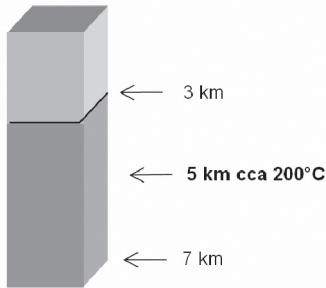
O objem hornin (m³)

$T_{stř}$ teplota hornin střední (°C)

Pro výpočet je uvažováno:

$c = 840 \text{ J/kg.K}$

$\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$



$$E_{GT} = 118 \times 10^{21} \text{ J}$$

$$E_{GT} = 118\,000\,000 \text{ PJ}$$

Uvažujeme využitelný geotermální potenciál jen hodnotou 50 % z výše uvedené vypočítané hodnoty, tedy 59 000 000 PJ (pro srovnání, roční spotřeba primárních energetických zdrojů v ČR je 1 800 PJ).

Podle materiálu TAB je uvažován technický potenciál pro HDR systém jako 50 % této hodnoty (prostorový faktor zvažuje plochu pro jednu instalaci 2 km²).

Technický potenciál na ploše Českého masívu je proto $E_{GT} = 73,783E+21 \text{ J} = 73,783+6 \text{ PJ}$

Uvažujeme-li minimální mocnost jen 2 km, tj. od 3 do 5 km, tedy teplotně pouze první dvě vrstvy, potom

$E_{GTMin} = 52,441E+21 \text{ J}$ a z toho využitelné zemské teplo $E_{GTVyužitelné} = 26,22 \text{ E}+6 \text{ PJ}$. I tato hodnota je několikatisíckrát vyšší, než je celková potřeba energie v ČR za rok anebo odpovídá energií na několik set let.

Využití primárních zdrojů zemského tepla o nižší teplotě

Nemůže být pochyb o tom, že ve všech plánech a projektech se v naší republice musíme soustředit na využití primárních zdrojů o nižší teplotě. Vyplývá to nejen z geologické situace v naší republice, ale i ze zkušeností jiných zemí.

Využití zemského tepla je však nutno důkladně posoudit v každé oblasti, jelikož jeho rozložení v zemské kůře v hloubkách 1 až 2 km je velmi nepravidelné.

V současné době se lidstvo již naučilo využívat zemskou geotermální energii přenášenou hlavně vodou a zemské teplo nízkoentalpické pomocí tepelných čerpadel.

Přímé využití geotermálního tepla hlubších zvodní na vytápění má přednost před převodem tepla podzemní vody pro výrobu elektrické energie. Teplota kolem 100 °C může být využita ekonomicky přímo pro vytápění. Tento způsob však vyžaduje zvodně s porovnatelným prostředím a s dostatečným napájením.

Pro využití zemského tepla o nižší teplotě se uplatňují buď výměníky tepla (v rozsahu 40–70 °C), anebo tepelná čerpadla. Tepelné čerpadlo je stroj na přeměnu tepelné energie získané z primárního obnovitelného zdroje tepla. Celkový topný výkon tepelného čerpadla je součtem energie získané a energie dodané (příkon). Podíl topného výkonu a příkonu se nazývá topný faktor. Čím větší je tedy teplota nízkoenergetického primárního zdroje tepla, tím větší je topný faktor. Čím vyšší je hodnota topného faktoru, tím větší je tepelný zisk a tedy levnější provoz vytápění. V porovnání s přímotopným vytápěním lze náklady na vytápění snížit o 55 % a více.

Primární zdroje pro tepelné čerpadlo obecně jsou:

- zemské teplo získávané z půdy, hornin, mělké i hlubší podzemní vody,
- získávané z povrchové vody rybníků, jezer, potoků a řek,
- ze vzduchu v podzemních prostorách, tj. sklepení, podzemních chodeb, dolů, tunelů, šachet, jeskyní,
- z okolního vzduchu,
- z odpadního tepla z výroby, odpadních vod apod.

U nás dodává a instaluje tepelná čerpadla celá řada firem jak zahraniční výroby (IVT, G-Therm), tak i výroby domácí. Princip tepelného čerpadla je poměrně jednoduchý: primární zdroj předává teplo ve výměníku v uzavřeném okruhu nemrznoucí směsi, která se tím zplyní, plyn se v kompresoru stlačí a tím zvýší teplotu. Tato vyšší teplota se pak v dalším výměníku předá vodnímu oběhovému systému vytápění.

Projekty o využití geotermální energie musí obsahovat i srovnávací studie, ve kterých by měly být údaje o porovnání alternativních zdrojů s klasickými zdroji tepelné energie, s ohledem na nejnovější cenové relace. Ze všeobecného hlediska můžeme tvrdit, že ceny alternativních energetických zdrojů jsou srovnatelné se zdroji klasickými a také návratnost primárních investic je zcela přijatelná, a to v časovém rozmezí tří až pěti let. Vzhledem k tomu, že se ceny klasických zdrojů stále zvyšují, můžeme předpokládat rostoucí význam zdrojů alternativních, včetně geotermální energie.

Při využívání nízkoenergetických a nízkoentalpických zdrojů geotermální energie musíme mít na zřeteli tyto základní okolnosti:

- možnosti využití takových zdrojů jsou v podstatě kdekoli na Zemi,
- využití takových zdrojů je ekologické a navíc šetří zdroje ostatní,
- zábor plochy pro využití je ve srovnání s jinými zdroji minimální,
- hmotnost tepelného čerpadla je nízká,
- provoz je bezpečný a automatizovaný, obsluha čerpadla je jednoduchá,
- provozní náklady na činnost tepelného čerpadla jsou nízké.

Při vytápění teplem z malých hloubek lze využít následujících technologií:

- Plošných kolektorů, lineárních či spirálových.
- Mělkých vrtů s dostatečnou vydatností zásob podzemních vod, ve kterých by bylo zaručeno jen nevelké kolísání teplot, nejlépe 3 až 8 °C. Vzdálenost zdroje vody od místa konstrukce tepelného čerpadla by měla být malá s ohledem na teplotní ztráty a dodávání energie na její transport. Důležitá je též vhodná nižší mineralizace vody, neboť vyšší mineralizace může způsobit zanášení výměníků.
- Hlubších hydrogeologických vrtů, využívajících teplé zvodně vhodných hydrogeologických struktur.
- Vrtů mělkých, do 100 m na suché teplo, přičemž hloubka a počet vrtů má odpovídat hodnotám tepelného toku. V případě relativně nižších teplot je možno tepelnou energii využívat kdekoli jako suché zemské teplo pro jednotlivé rodinné domy i malé odběratele, a to z hloubek do 100 až 150 m.

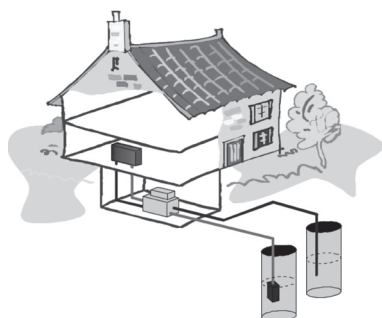
Systémy získání primárních zdrojů zemského tepla

Tepelná čerpadla se dělí podle typu primárního zdroje tepelné energie na systémy:

1. voda – voda (vzduch)
2. země – voda (vzduch)
3. vzduch – voda (vzduch) dále nepopisujeme.

Systém voda – voda

Obr. 6 Primární zdroj pro systém voda – voda.



Tento systém je výhodně uplatnitelný v místech s výskytem podzemních vod anebo teplejších hlubších zvodní. Princip tohoto systému spočívá v odebírání tepla z vody jímané čerpadlem z jímacího vrtu nebo studny. Po jejím ochlazení v tepelném čerpadle se voda vsakuje zpět do podzemního oběhu vsakovacím vrtem nebo drémem.

Požadavky:

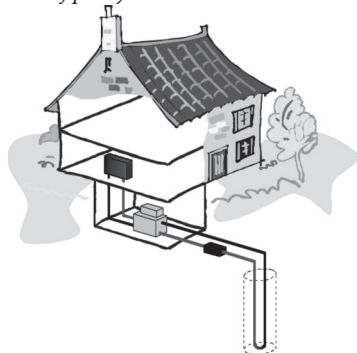
- nutnost získání konstantního zdroje podzemní vody potřebné konstantní vydatnosti a teploty,
- podzemní voda bez znečištění a bez vyšších obsahů některých nevhodných látek (železo, mangan, sírany, uhličitany a plyny),
- přiměřená transportní vzdálenost a tlaková výška,
- nutnost vracení vody po průchodu tepelným výměníkem zpět do podzemního oběhu,
- údržba filtru na vstupu vody do výměníku tepelného čerpadla,
- vypracování odborného hydrogeologického posouzení.

Výhody:

- trvalý zdroj geotermální energie – tepla bez sezónního kolísání,
- vysoký konstantní topný faktor nezávislý na venkovní teplotě,
- snadné získání potřebné menší vydatnosti malými finančními náklady na mělké vrty nebo studny,
- možnost využití stávající studny po ověření vydatnosti a chemizmu vody,
- možný odběr větší hodnoty K (kelvina) při vyšší teplotě podzemní vody a tím snížení potřeby množství.

Systém země – voda svislý výměník

Obr. 7 Primární zdroj pro systém země – voda.



Možné uplatnění kdekoli odebíráním tepla z půdy nebo z hornin cirkulací nemrznoucí směsi ve svislém vrtném kolektoru. Vhodné pro instalace s malou rozlohou pozemku.

Požadavky:

- vybudování svislých vrtných výměníků do hloubek podle zemského tepelného toku,

- stanovení nutných hloubek pro získání potřebného množství tepla odborným geotermickým posudkem,
- použití ve vrtném výměníku nemrznoucí směsi neohrožující životní prostředí i při případném úniku,
- trvalý příron zemského tepla po celou dobu životnosti systému,
- přístup vrtné soupravy na místa navržených geotermálních vrtů,
- posouzení nutného odstupu geotermálních vrtů.

Výhody:

- konstantní sezónně neovlivněný příron primárního tepla pro výměníky tepelného čerpadla,
- malá potřeba elektrické energie pro oběh nemrznoucí směsi v geotermálním svislém vrtném výměníku,
- malá plocha pro svislé geotermální vrtné výměníky.

Systém země – voda vodorovný výměník

Obr. 8 Primární zdroj pro systém země – voda.



Možné uplatnění kdekoli odebíráním tepla z půdy nebo z hornin cirkulací nemrznoucí směsi ve vodorovném podzemním kolektoru. Vhodné pro instalace s odpovídající rozlohou pozemku.

Požadavky:

- uložení trubkových horizontálních výměníků do nezámrazné hloubky,
- stanovení potřebné délky trubkového výměníku,
- větší potřebná plocha pro uložení horizontálního trubkového výměníku,
- rozpojení velkého množství zemin při terénních pracích.

Výhody:

- snadné technické práce pro uložení horizontálních výměníků,
- méně nákladné technické práce,
- malá potřeba elektrické energie pro oběh nemrznoucí směsi v plošném geotermálním výměníku.

Technické a ekonomické úvahy o využití tepelných čerpadel

Optimální využití geotermální energie vyžaduje vhodné technické řešení obvykle společné:

- s jinými zdroji alternativní energie,
- s využitím pokud možno stávajícího systému vytápění,
- s uplatněním nejmodernějších technologií,
- s použitím strojů a látek šetřících životní prostředí,
- s přihlédnutím k lokálním přírodním podmínkám,
- s omezením stavebních zásahů při instalaci.

Tepelná čerpadla jsou konstruována moderními technologiemi a jsou většinou:

- odhlučněna, provozně bezprašná,

- minimálních rozměrů,
- snadno montovatelná a instalovatelná,
- vybavena kompresory a výměníky světových výrobců,
- plněna nemrznoucí směsí šetrné k životnímu prostředí,
- osazena digitálním kontrolním systémem chodu stroje s automatickým řízením připojených oběhových čerpadel v závislosti na venkovní teplotě a automatickým zapojováním doplňkových zdrojů s řízeným programovatelným provozem,
- vyrobená a zkoušena s pečlivostí.

Pro posouzení vhodnosti různých uvažovaných lokalit jsou nutné tyto základní znalosti:

- **Teploty vody.** Tepelná čerpadla, i když mohou pracovat s využitím tepelného spádu 5 K, potřebují malé výkyvy v absolutních hodnotách, a proto je nutné hydrogeologické posouzení dlouhodobého vývoje teplot, a to hlavně rozdílů v zimním – letním období. Jelikož se předpokládá, že ochlazená podzemní voda bude buď vrácena pod povrch nebo vypuštěna do povrchového oběhu, musí být též posouzeno, zda by nedošlo k nadměrnému prochlazení hornin nebo povrchových vod. V druhém případě by hrozilo nebezpečí porušení přírodních procesů.
- **Vydatnost zdroje.** Tepelná čerpadla potřebují pro provoz ustálený průtok zdrojové teplé vody na vstupním výměníku. Požadovaný průtok je dán teplotním spádem a velikostí výměníku. Pro výpočet parametrů tepelného čerpadla je potřeba znát nejnížší využitelnou vydatnost.
- **Celková mineralizace podzemních vod.** Systém tepelného čerpadla vyžaduje takovou konstrukci výměníku, která by nebyla ohrožena nadměrnou mineralizací vod a tím inkrustací v potrubí. Podzemní vody s vyšším obsahem rozpuštěných látek vyžadují konstrukční řešení dvou výměníků, což celý proces značně prodraží. Obecně platí, že vody s nižší celkovou mineralizací než 1 g.l^{-1} jsou vhodné. Mineralizace také ovlivňuje hospodaření s ochlazenou vodou, hlavně její vypouštění do povrchových vod. Pro ně platí určitá omezení.
- **Technická náročnost.** Ta omezuje zásadním způsobem využití podzemních vod. Je-li hladina podzemní vody hluboko pod povrchem, je nutné ji čerpat výkonným čerpadlem, čímž stoupají energetické a tím i provozní náklady a snižuje se efektivnost celého systému.

Z tohoto výčtu by se mohlo zdát, že využití mělkých podzemních vod je nesnadné, bývá však většinou řešitelné. V mnoha případech je ale využití podzemních vod omezeno výše uvedenými požadavky a za některých okolností naprosto vyloučeno. Je proto nutné každou lokalitu nechat posoudit odborníkem, a to jak s ohledem na charakteristiku vodního zdroje, tak i z hlediska technických parametrů tepelného čerpadla. Každý případ využití je nutno posoudit především ze tří hledisek:

- propočtu technických parametrů výhřevného systému a výpočet tepelné bilance systému,
- posouzení nejvhodnějšího typu primárního zdroje zemského tepla,
- doporučení tepelného čerpadla o potřebném výkonu a systému využití.

Velkou výhodou uplatnění tepelných čerpadel pro výrobu tepla pro otopný systém s primárním geotermálním zdrojem je úspora energie i čistota provozu.

Podle současných zkušeností jsou tepelná čerpadla bezporuchová a pracují spolehlivě. Jsou to čistě ekologické a efektivní systémy, které nepoškozují životní prostředí. Proto by bylo záhodno je uplatnit i v rizikových oblastech Chomutovska, Sokolovska a Ostravska, případně ve všech městských aglomeracích, kde se vytápějí rodinné domky nebo kde jsou lokální vytápny používající pevná

paliva či plyn. Využití tohoto systému je obzvláště žádoucí v přírodně nejceněnějších oblastech naší republiky, jako jsou národní parky a chráněné krajinné oblasti i ochranná pásma lázní.

Výzkum geotermální energie a možnosti jejího využití

Výzkumem geotermální energie se intenzivně zabývá zejména geotermické oddělení Geofyzikálního ústavu České akademie věd. Jde o široce založený výzkum, spočívající na hodnocení teplotních poměrů v zemské kůře a svrchním plášti.

Teplotní poměry jsou studovány jednak přímým měřením teploty na povrchu i ve vrtech, jednak modelováním a extrapolací dat do větších hloubek pod povrchem. Tato extrapolace spočívá v řešení rovnice přenosu tepla v geotermických modelech a určitých částech zemského tělesa. K sestavení modelu se využívají informace o rozložení tepelných zdrojů, tepelné a teplotní vodivosti a o hraničních podmínkách (povrchová teplota a její gradient). Přístrojové vybavení zahrnuje přenosný teploměr pro teplotní karotáž ve vrtech, umožňující přímé měření do hloubky 1 km, laboratorní přístroje na měření tepelné a teplotní vodivosti hornin a gamma-spektrometr pro určování množství radioaktivních izotopů uranu, thoria a draslíku a z toho odvozené hodnoty radiogenní produkce tepla v horninách. K dispozici je rovněž software pro analytické a numerické řešení rovnice vedení tepla v modelech horninového prostředí.

V roce 1981 sestavil V. Čermák mapu tepelného toku na území Československa. V mapě jsou informace o geotermické aktivitě jednotlivých geologických jednotek Českého masivu, vnějších Západních Karpat a okolních jednotek a tak ji lze využít při výpočtu teplotního rozdělení v zemské kůře a plášti. Geotermické oddělení Geofyzikálního ústavu ČAV se významně podílelo na sestavení mapy tepelného toku v Evropě a na koordinaci geotermického výzkumu v rámci Mezinárodní unie geofyzikální a geodetické.

V rámci tříletého projektu „Časové a prostorové změny teplotního pole litosféry Českého masivu“ (1997–1999, podpora GAČR) se studovalo rozložení teplot v české křídové pánvi v severovýchodních Čechách. Projekt byl zaměřen zejména na migraci tepla přicházejícího z podloží pánve konvekci podzemní vody v propustných vrstvách pánevních sedimentů. Podpovrchové teploty byly měřeny v osmi vrtech v hydrogeologicky aktivní oblasti, kde jsou dva horizontální kolektory, oddělené nepropustnou vrstvou. Reliéf oblasti je poměrně členitý, avšak rozdíly nejsou v teplotním poli pod povrchem patrné. Teplota naměřená v jednotlivých vrtech je všude stejná a nezávisí na hloubce pod povrchem. Tato skutečnost odpovídá výsledkům numerické simulace proudění vody v horizontálním kolektoru. Naproti tomu vertikální teplotní gradient v nepropustné vrstvě a spodním kolektoru není výrazněji ovlivněn prouděním podzemní vody a odpovídá tepelnému toku $90\text{--}100 \text{ mW.m}^{-2}$, což souhlasí s naměřenými zvýšenými hodnotami v ostatních částech pánve.

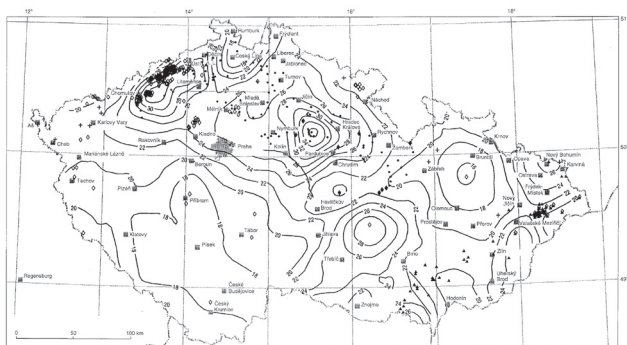
V české křídové pánvi byly rovněž studovány teplotní profily ve 46 vrtech v okolí uranových dolů. Bylo zjištěno, že větší odchylky od obvyklého průběhu teploty, jež byly zachyceny v mnoha vrtech, souvisejí s těžbou suroviny. Kladné anomálie se vyskytují ve vyluhovacích polích, kde byla do uranonosných sedimentů cenomanu vhnána velká množství kyseliny. Záporné anomálie jsou vázány na místa hydraulické bariéry kolem oblasti těžby, kde čistá voda vhnána do cenomanského kolektoru brání šíření znečištění. Prostorové rozložení anomálií umožnilo zmapování rozsahu oblasti, kam zmíněné kapaliny, tj. voda a kyselina, pronikly. Porušení

teploty postupuje od cenomanského kolektoru nahoru nepropustnými sedimenty. Shoda mezi teplotami vypočtenými za předpokladu čistě konduktivního přenosu tepla a teplotami naměřenými vylučuje přenos tepla advekcí. To znamená, že vzestupný pohyb vody a tedy i znečištění směrem k svrchnímu, střednoturonskému kolektoru není pravděpodobný.

Použití teplotních rozdílů k zjištění údajů o proudění podzemní vody či o starších klimatických změnách vyžaduje přesnější znalost vlivu reliéfu na podpovrchové teplotní pole. Vztah mezi průměrnou roční teplotou povrchu a jeho expozicí vzhledem ke světovým stranám byl studován na souboru dat ze sedmi teplotních profilů z vrtů v Krušných horách. Extrapolované povrchové teploty závisejí na nadmořské výšce, sklonu svahů a jejich orientaci.

Pětiletý projekt, podporovaný Grantovou agenturou Akademie věd, probíhající v letech 1997 až 2001, měl název „Tepelná historie sedimentárních pánví České republiky a její vztah k tektonickým procesům“. První výsledky paleogeotermických studií ve staropaleozoické barrandienské pánvi naznačily, že tepelná historie jejich sedimentů byla složitá a můžeme ji charakterizovat dvěma náhlými teplotními pulzy. Ty mohly být způsobeny silurským synsedimentárním vulkanismem nebo i intruzemi magmatu středoevropského plutonického komplexu. Numerická simulace vlivu chladnutí plutonu ukázala, že vzdálenost pánve od plutonu, která je 15 km i více, je příliš velká na to, aby magmatity přímo ovlivňovaly pánevní sedimenty. Zdrojem prohrátí však mohl být zvýšený přínos tepla z pláště v širším okolí plutonu v době vmísťování magmatu. Stejný postup byl použit při odhadu teplotních podmínek kontaktní přeměny černých silurských břidlic litenského souvrství bazaltovou, 4 m mocnou žílou, což bylo studováno v lomu Kosov u Berouna. Zóna prohrátí o více než 120 °C, což je teplota, na kterou se prohrálo širší okolí žily, je omezena jen na její několikametrové okolí. Teplota intruze se přitom odhaduje na 800 °C. Teploty horninového prostředí v hloubce 500 m pod povrchem v Česku je na obr. 9.

Obr. 9 Mapa se zakreslenými konturami teploty horninového prostředí v hloubce 500 m pod povrchem. Upozorňujeme na výrazné anomálie v podkrušnohorské oherské riftové zóně a v české křídové pánvi.



26. Mapa s konturami zalesňovací teploty horninového prostředí v hloubce 500 m pod povrchem. Účinnost geotermických podmínek horninového prostředí České republiky a vztahy anomálií v oherské riftové zóně a české křídové pánvi. Malé tečky – vrty v české křídové pánvi, plné trojúhelníčky – vrty v karpatské předhlubni, prázdné kosočtverečky – oherská riftová zóna a síť měření Geofyzikálního ústavu AV ČR, křížky – lázně. Se-stavili J. Burda a V. Myslil pro Geotermální atlas Evropy.

Malé tečky – vrty v české křídové pánvi, plné trojúhelníčky – vrty v karpatské předhlubni, prázdné kosočtverečky – oherská riftová zóna a síť měření Geofyzikálního ústavu AV ČR, křížky – lázně. Se-stavili J. Burda a V. Myslil pro Geotermální atlas Evropy.

Rekonstrukce starších klimatických změn podle současných profilů teploty pod povrchem bylo tématem tříletého projektu, podporovaného Grantovou agenturou Akademie věd, nazvaného „Klimatické změny v minulosti určené teplotní inverzí vrtného

záznamu a korelace s meteorologickými daty“. Analýzou křivek teploty v závislosti na hloubce lze odvodit historii dlouhodobých změn povrchových teplot v minulosti. K tomu, aby takové křivky mohly být správně interpretovány jako historie změn teploty vzduchu, je třeba ukázat, že v dlouhodobém pojetí se rozdíl mezi ročními průměrnými povrchovými teplotami a teplotami ovzduší nemění. Sběr dat probíhal pět let monitorovacím systémem, jehož hlavní součástí byl 40 m hluboký experimentální vrt na pozemku Geofyzikálního ústavu ČAV v Praze. Ve vrtu byly sledovány teploty půdy a skalního podkladu a srovnávány s teplotou ovzduší. Analogický systém byl zřízen již v roce 1998 na meteorologické stanici Kocejovice, 80 km jižně od Prahy. Tato oblast byla zvolena proto, že je poměrně málo ovlivněna lidskou činností. Interpretace měření se opírala o časové řady meteorologických dat, získaných během třicetileté existence stanice. Pětiletá teplotní řada z hloubky 38,3 m, naměřená pracovníky Geofyzikálního ústavu, ukazuje jasně na dlouhodobé oteplení rychlostí 0,029 °C za rok. To souhlasí s průměrným růstem teploty ovzduší na meteorologické stanici Praha-Karlov, který je 0,025 °C za rok pro období 1961–1998. Tato problematika byla řešena i v pětiletém projektu v letech 1998–2002, probíhajícím pod názvem „Minulé změny klimatu odvozené analýzou podpovrchového teplotního pole“ (program UNESCO, Mezinárodní korelační program IGCP č. 428). Výzkumné práce na projektu dokázaly, že jde o novou nezávislou metodu, dobře použitelnou při doplňování měřených a odvozených dat o změně klimatu. Dosavadní výsledky z různých oblastí ukazují na oteplení o 1,2 °C od počátku 20. století. Existují samozřejmě místní odchylky.

V r. 1999 byl zahájen pětiletý projekt VaV MŽP č. 630/3/99 „Možnosti využití geotermální energie pro energetické účely“, řešený firmou Geomedia (hlavní řešitel V. Myslil), který v závěrečné zprávě v r. 2002 přinesl nové podklady o tomto zdroji a ukázal na možnosti využívání geotermální energie v České republice. Kolektiv řešitelů zmíněné VaV studie pak dále sledoval a dokumentoval potenciál geotermální energie, využitelné lokálně i v širším měřítku, v celé řadě následných zpráv. Na území ČR tak byly vytipovány desítky lokalit, vhodných jak pro výrobu elektrické energie, tak i pro vytápění větších skupinových celků.

Z těchto podkladů také vyšel zpracovaný a uskutečněný projekt z r. 2006, podporovaný MPO, pro vybudování geotermální elektrárny a výtopny pro město Litoměřice. Pro získání potřebných detailních znalostí byl pro celý záměr proveden terénní povrchový geofyzikální průzkum, jenž byl hrazen z prostředků MŽP.

V současné době se na okraji městské litoměřické aglomerace hloubí první hlubinný vrt do hloubky 2,5 km na ověření geotermálních charakteristik a pro přípravu projektu HDR systému se dvěma těžebními a jedním vtačovacími vrty (schéma viz. obr. na 3. straně obálky).

V České republice nechceme zůstat jen u získávání geotermální energie z nízkoteplotních zdrojů tepelnými čerpadly. V roce 2006 se započalo s projektem, který by využil zakonzenované teplo v horninách a fungoval v systému HDR (Hot Dry Rock – horká suchá hornina) a využíval této technologie. Jeho konečným cílem je vybudování geotermální elektrárny a výtopny pro město Litoměřice (viz též 3. strana obálky). V této etapě je hlouben první ověřovací vrt do hloubky 2,5 km na okraji městské litoměřické aglomerace, který poslouží pro ověření řady geotermálních charakteristik, a využít pro přípravu další etapy projektu, a to již se dvěma těžebními a jedním vtačovacími vrty (všechny do hloubky cca 5 km). Projekt předpokládá získání cca 45 MW tepelné energie, případně 4 MW elektrické energie, které by garantovaly energetickou soběstačnost města.

Pro využití geotermální energie s uplatněním zmíněného HDR systému existuje v okolí litoměřické městské aglomerace několik přírodních a společensky příznivých faktorů:

- vhodná geologická pozice na křížení významných tektonických struktur, zejména starého „barrandienského“ systému směru SV-JZ a hlubinného litoměřického zlomu, jednoho z nejvýznamnějších v Českém masivu. Současně se tu předpokládá i křížení systému východozápadního a severojižního směru, který je hercynského stáří,
- zakrytí geotermální příznivé granitové struktury s metamorfity platformními sedimentárními formacemi (permokarbonskými a křídovými sedimenty),
- existence této geotermální struktury prakticky na území městské aglomerace,
- snadné získání zdroje vody pro naplnění podzemního výměníku tepla z blízkého toku Labe,
- zájem města o vybudování ekologického zdroje energie náhradou za dosavadní uhelné vytápění,
- blízkost od současného centra vytápění města Litoměřice.

Ekonomické problémy využití geotermální energie

Jak vyplývá z našeho pojednání, problém využití geotermální energie souvisí s mnoha vědeckými, technickými, společenskými, politickými a ekonomickými jevy.

Jak již bylo zdůvodněno výše, teplo z nízkoteplotních zdrojů z menších hloubek pod povrchem může být převedeno na zdroje s vyšší teplotou pomocí tepelných čerpadel. Tepelná čerpadla pracují převážně s elektromotorem a výjimečně mají i pohon benzínový či dieselový, případně i plynový. Obecně platí, že teplo získané tepelnými čerpadly je třikrát až pětikrát větší než nutná energie pro pohon tepelného čerpadla.

Prodej tepelných čerpadel pro získávání tepla z malých hloubek, užívaného pro vytápění objektů, roste každým rokem, a to zejména v Německu, Švýcarsku, v poslední době i ve Švédsku a Norsku. Počet instalací roste hlavně tam, kde jsou nižší ceny elektrické energie nebo tam, kde je drahý dovoz topných olejů či plynů. Větší rozmach instalací tepelných čerpadel typu voda – voda pro vytápění budov je mnohdy regulován na ochranu a využití podzemní vody. Tento problém je proto nutno zahrnout do plánů potenciálního využití podzemních vod. Další rozvoj využití tepla tepelnými čerpadly vidíme v efektivnějších výměnících tepla při nižších nákladech a vyřešených možnostech ukládání tepla letního období pro využití v zimě.

Ekonomové a technici někdy srovnávají zdroje geotermální energie s využitím ložisek ropy tak, že ekonomicky výhodné jsou pouze oblasti, kde je horká voda či pára koncentrována v hloubkách do 3 km pod povrchem. Tento názor se však nyní změnil v souvislosti s vývojem tepelných čerpadel nové generace. Připočteme k tomu i podporu drobných podnikatelů a majitelů domů s jejich úspěšnými snahami o využití teplých vod pro vytápění menších objektů a případné chlazení v létě. Ve Spojených státech bylo v roce 1999 v provozu na 400 000 tepelných čerpadel (4800 MWt) s výrobou energie kolem 3300 GWh ročně. Roční nárůst je kolem 10 %.

I takové „chladné“ země, rozuměno z hlediska geologie, kde nenajdeme ani jeden gejzír nebo pramen horkých vod, se zařazují mezi „geotermální elitu“. Máme na mysli Švýcarsko, kde byla v roce 1999 roční výroba energie z geotermálních zdrojů 434 GWh a roční nárůst je nejméně 12 % (Rybach et al., 2000).

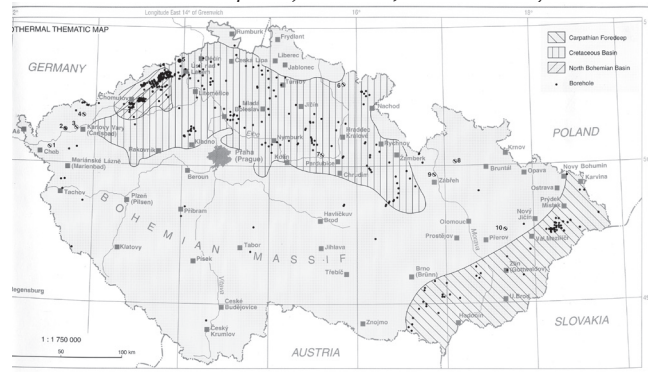
Přímé využití geotermálního tepla hlubších zvodní pro vytápění má přednost před převodem na výrobu elektrické energie. S teplotou 100 °C můžeme velmi ekonomicky hospodařit přímo pro vytápění. Tento způsob však vyžaduje přítomnost zvodní s porovitých prostředím s dostatečným napájením.

Metodika hodnocení geotermálních poměrů

Geotermální atlas Evropy

V roce 1988 financovala Evropská unie vydání geotermálního atlasu zemí Evropské unie a několika dalších zemí přizvaných. Vstup nových zemí do unie způsobil, že geotermální údaje bylo nutno rozšířit na celou Evropu. Nového vydání v roce 2002, nazvaného „Atlas geotermálních zdrojů Evropy“, se zúčastnila i Česká republika (editoři publikace byli S. Hurter a R. Haenel, za Českou republiku spolupracovali V. Myslík a J. Burda – viz obr. 10). Metodika a druhy map pro tuto publikaci byly sjednoceny. Každá ze zúčastněných zemí na svých mapách zobrazuje hodnotu tepelného toku, teploty v různých hloubkách pod povrchem pomocí izoterm a podrobnější údaje o využitelných zdrojích geotermální energie.

Obr. 10 Originál tematické geotermální mapy republiky z Geotermálního atlasu zemí Evropské unie. Zakresleny jsou vrty a zajímavé geologické jednotky (česká křídová pánev, karpatská předhlubeň a severočeská třetihorní pánev). Sestavili J. Burda a V. Myslík.



Pro obraz teplotních poměrů je důležitá mapa izoterm v hloubce 500 m pod povrchem (viz obr. 9). V geologicky starém a tektonicky stabilním moldanubiku, tj. v celých jižních Čechách a části Moravy nepředpokládáme v hloubce 500 m pod povrchem teploty větší než 20 °C. V pásu od Krušných hor do severovýchodních Čech je to 24 až 30 °C a podobné teploty jsou i pro Moravu od Ostravy po Hodonín podél slovenských hranic. Celá tato území se zvýšenou teplotou je možno považovat za místa potenciálně využitelné geotermální energie. V Atlase jsou i podrobnější údaje vybraných zájmových oblastí, a to zejména západočeských lázní, Ústecka a Teplicka, české křídové pánve i jihovýchodní Moravy.

I ze základních geologických poznatků vyplývá to, co potvrzuje „Atlas“. Slovensko i Maďarsko mají „teplejší“ kůru a tím větší možnosti využití geotermálních zdrojů. Tektonický vývoj těchto zemí ještě neskončil, přítomen je mladý vulkanismus a tektonické struktury umožňují výstup horkých vod k povrchu. Na Slovensku jsou zcela běžné třicetistupňové, ba i čtyřicetistupňové teploty v hloubce 5 km pod povrchem. Nejteplejší je jižní Slovensko při ústí Hronu do Dunaje, část povodí Váhu i Hronu, okolí Banské Bystrice a jihovýchodní část země při řekách Uh a Ondava. Zemská kůra v prakticky celém Maďarsku je ještě teplejší,

kolem Budapešti jsou v pětisetmetrové hloubce dokonce padesátistupňové teploty, na severovýchodě při Hornádu dokonce šedesátistupňové. Pod Vihorlatem byly zastíženy v hloubce 3 km teploty až 130 °C. Ve známé balatonské lázeňské oblasti jsou teploty mezi 30 °C a 40 °C. V Německu je rozdíl mezi poměrně chladným severem a živým rýnským prolomem zejména v okolí Stuttgartu a Karlsruhe a zvláště vulkanickým pohořím Eifel, podhůřím Alp a kupodivu dosti teplým severovýchodem země až k polským hranicím. V Polsku jsou zvýšené třicetistupňové teploty v širším pásu od severozápadní oblasti Štětína, přes Toruň a Lodž až k Radom a na jihu podél styku s Českým masivem.

Zobrazíme-li z tohoto hlediska v menším měřítku celou Evropu, a to standardními barvami od červené pro teplou kůru přes zelené až po nejchladnější modré, projeví se nám nápadný rozdíl mezi západem s jihem a východem se severem. Pro geologa je takový obraz srozumitelný. Na západě jsou mladá pohoří i s mladým vulkanismem, třetihorní a čtvrtohorní tektonikou. Celý jih je stále ovlivněn srážkou africké a eurasijské desky, tektonickými pohyby a mohutným vulkanismem. Na východě a severu, včetně Velké Británie je naopak starý a pevný skandinávský štít s ruskou platformou. Naprostou „horkou“ anomálií je Island, ležící na Středoatlantském hřbetu, se svým mohutným současným vulkanismem.

Takový pohled ze stejného geologického hlediska můžeme rozšířit i na celý svět. Horká je kůra v zóně, které říkáme „pás ohně kolem zeměkoule“, jenž se táhne přes Japonsko k Filipínám přes Východoindické souostroví do Východoafrického prolomu, na protější straně Atlantiku pak přes jihoamerické Andy, vulkanickou Střední Ameriku, severoamerické Kordilery až na Aljašku. V oceánu rozhoduje o teplotním režimu stáří oceánské kůry a oceánský vulkanismus. Jak Kanárské ostrovy a Azory, tak i zmíněný Island, jsou součástí aktivního středooceánského hřbetu, vyčnívajícího nad hladinu. Nad hladinu vyčnívají i některé podmořské hory na horkých skvrnách, jejichž skvělým příkladem je Havaj.

Pro jiné účely, než byla konstrukce map pro Atlas, byly prognózovány teploty v různých hloubkových úrovních pod povrchem. Tematické mapy z území ČR, s izohypsami různých teplot na území ČR, převážně 130 a 180 °C, byly zkonstruovány Čermákem (1989).

V Českém masivu je průměrná teplota na rozhraní kůry a pláště v hloubce 35–40 km 500–550 °C. O něco vyšší, 600–700 °C je pod oblastmi oslabené kůry a vyššího povrchového tepelného toku, jako jsou Krušné hory a oblast české křídové pánve (Čermák, 1989). V panonské pánvi na území Maďarska jsou v třicetkilometrové hloubce teploty až 800 °C.

Větší územní celky (Česká republika)

Základní parametry hodnocení základních parametrů vhodnosti území s ohledem na využití tepelného potenciálu jsou znázorněny mapou. Ta je doplněna geostatickou analýzou. Účelem je vyjádřit plošně vhodnost částí geologických jednotek ve vztahu k teplotnímu potenciálu ověřenému vrty i k tepelnému toku. Jeho hodnoty jsou získávány přímým měřením i z přepočtů tepelné vodivosti horninového prostředí.

Posouzení ploch vyústí v třístupňové klasifikaci jak pro teploty, tak pro tepelné vodivosti hornin. To umožní členění území Česka na plochy vhodné, méně vhodné a nevhodné.

V další etapě byla zpracována mapová vyjádření pro dva typy využitelnosti ploch tepelnými čerpadly typu voda – voda a země – voda.

Geotermální energie ve vztahu k životnímu prostředí

Využití geotermální energie pro vytápění nebo výrobu elektrické energie je spjata s produkcí horké vody nebo přehřáté páry z vrtů. Podobně jako při využití jiných zdrojů energie musí být každá lokalita posouzena z hlediska možných změn s ohledem na nepříznivé vlivy na životní prostředí.

Po využití je větší část páry či vody znovu zaváděna do podzemí. Jak ohromné množství vody je třeba pro takové operace dokládá tento příklad: Geotermální elektrárna s tepelnou kapacitou 100 MW_e vyžaduje při ochlazení o 100 °C 240 l vody za sekundu. Taková spotřeba vody je pak nejdůležitějším faktorem při úvahách o vlivu na životní prostředí, a to z těchto důvodů:

- může se narušit bilance podzemních vod při změně tlaků v pórech hornin, v případě, že není opatrně zavedení kapalin pod zem provedeno odborně, může dojít i k poklesům povrchu,
- může dojít k prochlazení hornin a s tím spojenými změnami v geotermálním rezervoáru,
- do ovzduší mohou unikat plyny jako sirovodík a oxid uhličitý,
- může dojít k rozpouštění minerálů hornin,
- do atmosféry se může uvolňovat značné množství tepla,
- může docházet k nepřiměřeným změnám povrchu při stavbě chladicích věží a potrubí,
- okolí může být postiženo nadměrným hlukem.

Současné analýzy rizika definuje standard č. 85/337/EEC Evropské unie, nazvaný „riziková analýza veřejných projektů, které mají vliv na životní prostředí“, přičemž článek 1, oddíl 2 tohoto standardu definuje, že těžba minerálních zdrojů a tedy i geotermální energie spadá do tohoto okruhu.

Riziková analýza zahrnuje popis procesu a hodnocení jeho vlivu na zájmy obyvatel a okolního prostředí se všemi složkami. Musí být doloženo, že projektant a provozovatel mají zkušenosti s projektem využití geotermálních zdrojů. Ekonomické, environmentální a politické složky projektu musejí být srovnány s jinými zdroji energie a rozdíly specifikovány z hlediska technických parametrů, jednotlivých složek a druhotných rizik. Geotermální energie se získává z geologických formací, které mají horké vody s plyny a bývají silně mineralizované. Na zemský povrch se tak dostanou i škodlivé látky, z plynů pak hlavně oxid uhličitý a sirovodík. Z rozpouštěných látek ve vodě jsou to sodík a draslík ve formě chloridů, síranů i karbonátů, spolu s menším množstvím křemičitanů a těžkých kovů. Využívání chladnější vody pod 60 °C je spjata s nižšími obsahy plynů i minerálních látek, přičemž ovšem takové složky mohou být v balneologii využívány pro léčebné účely. Vody teplejší než 70 °C, získávané z hloubek 1–2 km mají naproti tomu často více než 100 g rozpouštěných minerálních látek v litru. Taková voda pak může intenzivně inkrustovat potrubí, případně je korodovat. Úprava takových vod vyžaduje značné množství chemikálií. Na lokalitách, jež využívají pro výrobu elektrické energie horké vody nebo přehřáté páry o teplotě nad 150 °C se někdy produkuje velké množství odpadu. Např. v geotermální elektrárně The Geysers v Kalifornii (viz str. 18) připadlo v roce 1989 na výrobu 1000 MW energie 10 000 t odpadu. Srovnáváme-li však geotermální a uhelné elektrárny z hlediska produkce oxidu uhličitého, vyznívá výsledek ve prospěch elektráren geotermálních. V nich připadá jen 50 g oxidu uhličitého na 1 kWh, zatímco uhelná elektrárna jej produkuje dvacetkrát tolik. Systém Hot – Dry – Rock je v tomto ohledu ještě příznivější, jelikož neprodukuje prakticky žádný plyn.

Emise oxidu uhličitého z vysokoteplotních geotermálních zdrojů využívaných pro výrobu elektřiny (13–380 g/kWh) jsou mnohem nižší než v případě spalování zemního plynu (453 g/kWh), ropy

(906 g/kWh) a uhlí (1042 g/kWh). Totéž platí i pro oxidy síry, i když přesné údaje nejsou k dispozici. Při využití nízkoteplotních geotermálních zdrojů jsou pak emise oxidu uhličitého a oxidů síry ještě daleko nižší než u zdrojů vysokoteplotních. Pokud termální vody jsou nasyceny oxidem uhličitým, reinjektují se, a tak jsou emise prakticky nulové, jako v pařížské pánvi ve Francii.

Environmentální aspekty vs. technické využití

Starší geotermální elektrárny, hlavně v rozvojových zemích, nepočítaly s injektáží vody zpět pod povrch, a to hlavně z ekonomických důvodů. To často vyústilo v nadměrné znečištění vod povrchových. U novějších projektů našly neinjektované odpadní vody jiné využití. Např. v testovacím území Twenty Nine Palms v Kalifornii, v oblasti polosuchého podnebí, se reliktní teplá voda využívá k zavlažování, čímž se šetří zásoby pitné vody.

Přes značné environmentální přednosti geotermálních elektráren je jasné, že z technického hlediska nejsou příliš efektivní, neboť využívají jen 10–20 % možností, což je daleko méně, než elektrárny konvenční. Ke zvýšení efektivity se navrhuje zejména kombinované využití výroby tepla a elektřiny. Studie proveditelnosti vypracovaná firmou Siemens ukazuje, že je možné produkovat 10 kW tepla, jestliže je výroba elektrické energie snížena o 1 kW. Kombinovaný systém výroby tepla a elektřiny je neefektivnější pro produkci 10 až 100 MW. Podmínkou ovšem je, že teplo musí být využito v blízkosti elektrárny.

Je dobře známo, že odpadní teplo je obecným problémem většiny elektráren. Jsou však možnosti likvidovat odpadní teplo chlazením při míchání s povrchovou říční vodou nebo chladicími věžemi. Likvidace tepla je nutná z hlediska životního prostředí, a proto hledání zmíněných metod kombinovaného využití je velmi perspektivní.

Známé a mnohokrát diskutované je porušení rázu krajiny chladicími věžemi elektráren a rozvodů zemními i nadzemními potrubími. Velmi nešetrný k životnímu prostředí je i nadměrný hluk při vrtnání nebo stavbě čerpacích stanic. Přesto však konvenční elektrárny jsou z tohoto hlediska méně ohleduplné, neboť vyžadují transport energetických zdrojů, případně i použití různých metod k ukládání vysoce radioaktivního odpadu.

Geotermální elektrárny nejsou v provozu tak dlouho, aby bylo možno podrobně posoudit jejich vlivy na životní prostředí. Dnes je však již dobře známo, že z hlediska dlouhodobého vývoje je využití tepla horkých vod z hlubokých horninových pórovitých struktur zřejmě méně rizikové, než systém Hot – Dry – Rock. Jeho aplikace může totiž vyvolat změny tlaku a jiných podmínek v těchto hlubších geologických strukturách.

Technicky nejdostupnějším zdrojem geotermální energie je využití tepla prvního zvodnění pod povrchem Země. Využívání takového zdroje je však více méně omezeno na vytápění obytných budov, skleníků a na sportovní či balneologické účely. Podzemní vody mají v každém místě teplotu, která zhruba odpovídá průměrné teplotě vzduchu na tomto místě.

Povolování vrtu pro využívání geotermální energie

Využití geotermální energie pro vytápění domů se v poslední době značně rozmáhá. Takové projekty však narážejí na složitou právní problematiku, jejíž dosah není obecně znám. K objasnění

takových problémů přispěla stať Šponara (2005), jejíž výtah zde uveřejňujeme:

Geotermální vrt je vrt, pomocí něhož je využíván zdroj geotermální energie. Za geotermální vrt se nepovažuje vrt uskutečněný v rámci výzkumných či průzkumných geologických prací, jehož účelem je získat geologické údaje o stavbě horninového masivu a jeho vlastnostech.

Zdroje geotermální energie jsou různé a podle jejich typů a způsobu využívání se liší i právní kvalifikace vedoucí k využívání geotermální energie. Rozlišují se tyto případy:

1. Geotermální energie je vázána na podzemní termální vodu, (20 °C a teplejší), jejíž zdroj byl podle lázeňského zákona (zákon č. 164/2001 Sb., ve znění pozdějších předpisů) osvědčen jako přírodní léčivý zdroj.
2. Geotermální energie je vázána na podzemní vody, které nejsou současně přírodním léčivým zdrojem. Přitom nezáleží na teplotě vody. Geotermální vrty, které čerpají takovou podzemní vodu k využití její tepelné energie, jsou vodním dílem. Nezáleží na tom, zda je teplo získáváno průmyslovým způsobem.
3. Geotermální energie není vázána na zdroj podzemní vody („suché“ teplo hornin). Teplo přenáší technologické médium, které cirkuluje v umělém uzavřeném oběhu, přes tepelné čerpadlo. Jelikož v místě geotermálního vrtu není zdroj podzemní vody, pak využití geotermální energie nespadá pod zákon o vodách. Pokud se zdroj využívá neprůmyslovým způsobem, jsou tyto vrty, včetně jejich zařízení, stavbou nebo příslušenstvím stavby.
4. Geotermální energie není vázána na zdroj podzemní vody, jedná se o „suché“ teplo hornin. Pokud se využívá průmyslovým způsobem, jsou geotermální vrty podle horního zákona zvláštním zásahem do zemské kůry (zákon č. 44/1988 Sb., ve znění pozdějších předpisů).

Lokalizace místa geotermálního vrtu

Pro lokalizaci geotermálního vrtu je potřeba získat územní rozhodnutí vydané příslušným stavebním úřadem podle paragrafu 32–42 stavebního zákona. Stavební úřad posoudí případné střety zájmů a vydá územní rozhodnutí, ve kterém lokalizuje geotermální vrt jako stavbu nebo vodní dílo na konkrétní místo a konkrétní pozemek a stanoví podmínky pro jeho realizaci ve vztahu k ochraně zákonem chráněných zájmů. Tento postup je nutno dodržet i v případě, že tento vrt již existuje, protože byl součástí geologických prací.

Povolování geotermálního vrtu a využívání geotermální energie

U zdroje geotermální energie, uvedeného sub 1 (viz výše uvedená klasifikace případů ze stať Šponara, 2005), spadá povolování pod lázeňský zákon. Realizace vrtu a využívání termální energie přírodního léčivého zdroje povoluje Ministerstvo zdravotnictví. Tyto případy však nejsou právně ani fakticky považovány za využívání geotermální energie, ale za výstavbu lázní a lázeňskou činnost.

- U zdroje sub 2 spadá povolování pod zákon o vodách. Postup je stejný jako u povolování studny.
- U zdroje uvedeného sub 3 spadá povolování pod stavební zákon. Jeho realizace je povolována jako součást realizace stavby a jejího příslušenství ve stavebním řízení, které je vedeno příslušným stavebním úřadem.
- U zdroje uvedeného sub 4 spadá povolování pod zákon o hornické činnosti.

Poznámky:

Častým problémem je rozpoznání, kdy je geotermální teplo vázáno na podzemní vody a kdy jde o „suché“ teplo, nevázané na podzemní vody. K rozpoznání je nutno vyjít z definic uvedených v paragrafu 2 zákona č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). V něm jsou tyto definice:

Podzemními vodami jsou vody přirozeně se vyskytující pod zemským povrchem v pásmu nasycení v přímém styku s horninami; za podzemní vody se považují též vody protékající drenážními systémy a vody ve studních.

Nakládání s povrchovými nebo podzemními vodami je jejich vzdouvání pomocí vodních děl, využívání jejich energetického potenciálu, jejich využívání k plavbě nebo k plavení dřeva, k chovu ryb nebo vodní drůbeže, jejich odběr, vypouštění odpadních vod do nich a další způsoby, jimiž lze využívat jejich vlastnosti nebo ovlivňovat jejich množství, průtok, výskyt nebo jakost.

Z uvedených definic vyplývá, že do vrtu dodávané technologické médium, uzavřené a cirkulující ve vystrojeném vrtu, není podzemní vodou (nejde o přirozený výskyt pod zemským povrchem) a odebíráním tepla hornin zprostředkovaného tímto médiem není nakládání s podzemními vodami.

Dalším problémem může být, zda organizace, která hloubí vrt, který má sloužit k využití geotermální energie, musí mít zpracovaný samostatný projekt na realizaci vrtu projektantem s osvědčením vydaným podle zákona č. 61/1988 Sb. Tento zákon pro vrty k využití geotermální energie samostatný projekt nevyžaduje, protože vrty jsou součástí činností prováděných podle stavebního, vodního nebo lázeňského zákona. Projekt vrtu je součástí dokumentace, která je předpokládána k žádosti o povolení stavby nebo povolení stavby vodního díla a povolení k nakládání s podzemními vodami nebo povolení k využívání přírodního léčivého zdroje a je zpracována osobou autorizovanou podle zákona č. 360/1992 Sb. Pouze v případech, kdy vrt je prováděn z podzemního báňského díla nebo jde o velkopřůměrový vrt, musí projekt vrtu zpracovat projektant s odbornou způsobilostí. Takové případy se však v praxi nevyskytují.

Závěrečné úvahy

Dnes využívá geotermální energii nejméně 64 světových zemí, a to bezesporu pro blaho svých obyvatel. Využití je však velmi nerovnoměrné, hlavně z hlediska celkové výroby energie. Nejinenzivněji je geotermální energie využívána na Islandu, kde geotermální zdroje tvoří 50 % ze všech možných energetických zdrojů a daleko převyšují úlohu vodních zdrojů, ropy a uhlí. Srovnáme-li toto číslo s průměrem zemí Evropské unie, pak je rozdíl propastný, v EU je to jen 5%, sečteme-li ovšem všechny obnovitelné zdroje. Z tohoto průměru se vymykají pouze Rakousko, Švédsko (22%) a Portugalsko (cca 19%). V těchto jmenovaných zemích je ovšem z obnovitelných zdrojů na prvním místě vodní energie.

Na Islandu se geotermální energie spotřebovává hlavně na vytápění (86%), zbytek je na výrobu elektřiny, s malým množstvím na rekreační a sportovní účely, chov ryb a odsněžování. Pozoruhodné jsou údaje o počtu návštěvníků v zastrešených i otevřených bazénech s přírodní teplou vodou (např. v Rejkjavíku na největším otevřeném koupališti 36 000 návštěvníků za měsíc). Na Islandu je dovážena ropa s malým množstvím uhlí užívána jen pro dopravní účely.

Na celém světě se denně spotřebuje okolo 320 miliard kWh, což se dá přirovnat k dvaadvaceti stowattovým žárovkám na každého obyvatele naší planety, svítících bez přestávek.

Pokrok ve využití solární energie podpořila použití nanočástic v solárních panelech. Tato energie se zlevňuje a mohla by při ceně kolem 10 Kč za W prorazit i mezi široce používané zdroje energie. Dnes sluneční energie zajišťuje kolem 1 % energie vyráběné na světě. Pokud by tato energie měla výrazněji zasáhnout do světové produkce energie, pak by např. pro uspokojení potřeby ve Spojených státech bylo potřeba 26 000 km² solárních panelů, což je přibližně třetina plochy Česka. I když toto srovnání vypadá dost neuskutečnitelně, není to zas tak beznadějně, neboť by se panely nemusely umísťovat do otevřených krajiny, stačilo by je zasadit na 7 % střech a asfaltových ploch v městech Spojených států.

Větrná energie je odvozena též ze slunečního záření, pracuje však, i když je Slunce pod mraky. Dánsko je příkladem neobyčejného využití takové energie, neboť ta tam zásobuje z 20 % potřeby státu. Celá Evropa vyrábí tolik větrné energie jako pět velkých uhelných elektráren, tj. asi 35 000 MW. Spojené státy vyrábějí pouze 7 000 MW větrné energie. Vítr je proto pokládán zcela právem za nejslibnější ze zdrojů alternativních energií, i když z hlediska geografické a klimatické pozice Česka je využití značně omezeno. V Evropě je většina vhodných míst již zabrána, v Česku ještě ne. Rozšiřování brání i zájmy ochrany přírody.

Pro sluneční a větrnou energii platí společný jmenovatel: Jak uchovávat energetické požadavky je stále problematické, daří se sice energii měnit na paliva jako vodík, etanol, ale zvyšuje to náklady a snižuje rentabilitu.

Spalování biomasy v moderním pojetí znamená etanol, bioplyn, bionaftu, k výrobě se používá i kukuřice, v Brazílii např. cukrová třtina, v Evropě řepka, mezi biomasu se již nepočítá spalování dřeva, i když by to tam logicky patřilo. Rostliny jako zdroj energie jsou však daleko méně perspektivní než solární panely, jelikož pěstování biomasy zabírá velké plochy. Podle propočtů by bylo potřeba zdvojnásobit rozlohu všech zemědělsky využívaných půd, aby mohla na biopaliva jezdit všechna vozidla na světě.

O atomové energii toho bylo napsáno již dost, podotkneme jen, že dnes 440 atomových elektráren vyrábí 16 % světové elektrické energie.

O geotermální energii se v různých přehledech příliš neuvažuje, výjimkou je zdroj US Energy Information Administration and International Energy Agency. Podle této organizace kryla v roce 2003 geotermální energie méně než 0,02 % světové produkce energie.

International Energy Agency (2005, viz též M. Parfit, 2005) uvádí zajímavé srovnání odhadu cen za energii v roce 2013. Autoři do svého přehledu nezapočítávají energii geotermální, avšak srovnávají klasické zdroje se energií větrnou, jadernou a solární. Vychází jim, že v uhelných elektrárnách bude cena 5,5 USD, v elektrárnách na zemní plyn jen o maličko vyšší. U větrných se bude cena pohybovat kolem 6 USD, u jaderných kolem 7 USD, avšak u solárních vyskočí na 22 USD za 1 kilowatthodinu.

Neméně zajímavé jsou odhady produkce oxidu uhličitého při výrobě elektřiny z různých zdrojů. Alternativní zdroje jsou posuzovány hromadně (jaderná, hydroelektrická, biomasa, vítr, solární, geotermální, přílivová), tedy včetně energie geotermální. Čísla jsou přepočítávána kupodivu na Btu (Britské termální jednotky, přičemž 1 Btu je přibližně takové množství energie, které se uvolní spálením dřevěné zápalky).

V roce 2002 byla světová spotřeba energie 410 kvadrilionů Btu, přičemž na alternativní zdroje připadalo přibližně 80 kvadrilionů Btu. Pokud bude pokračovat stejný trend v čerpání zdrojů energie, pak bude v roce 2030 situace vypadat takto: Světová spotřeba bude 654 kvadrilionů Btu, z čehož na alternativní zdroje připadne přibližně 125 kvadrilionů Btu.

Povážlivý je ovšem vývoj vedlejší produkce oxidu uhličitého. V roce 2002 to bylo 2,6 miliardy tun za rok, odhad pro rok 2030 by to bylo 4,2 miliardy tun za rok. Je to velmi vážné varování, ke kterému se připojují téměř všichni odborníci na energetiku. Podpora alternativních energií znamená též podporu snižování škodlivých emisí CO₂. Jak dokazují některá výše uvedená čísla (viz str. 28), je i z tohoto hlediska využívání geotermální energie nutné.

Podrobná zpráva (The World Energy Assessment Report), zpracovaná agenturami UNDP, EN-DESA a Světovou radou pro energetiku (World Energy Council) srovnává situaci ve výrobě energií na prahu 3. tisíciletí. Některé údaje jsou uvedeny v tabulce 16.

Tabulka 16

Výroba energie z obnovitelných zdrojů
(World Energy Assessment Report, WEA 2000)

Obnovitelný zdroj	Produkce energie v roce 1998 TWh(e)	%	náklady US c/kWh
Vodní	2600	92,00	2–10
Spalování biomasy	160	5,53	5–15
Geotermální	46	1,63	2–10
Větrný	18	0,64	5–13
Solární	1,5	0,05	4–25
Přílivový	0,6	0,02	8–15

Tato tabulka nepotřebuje komentář, překvapující je ovšem poměrně nízké procento z celkové výroby u větrných a solárních elektráren. Úloha geotermálních zdrojů je v této analýze velmi optimistická.

Můžeme srovnat též přímou produkci tepla z obnovitelných zdrojů (tab. 17).

Tabulka 17.

Přímá produkce tepla z obnovitelných zdrojů v roce 1998
(World Energy Assessment Report, WEA 2000)

Zdroj	Výroba energie TWh(e)	Náklady US c/kWh
Spalování biomasy	přes 700	1–5
Geotermální	70	0,5–5
Solární	14	2–10

Pozn. V kolonce u spalování biomasy není možno určit celkovou hodnotu, jelikož nemůže být započítáno spalování palivového dříví i jiných zdrojů.

Podpora využívání geotermální energie v Česku

Geotermální energie byla před r. 2002 převážně podporována jen dotacemi při uplatňování tepelných čerpadel. Dotační podpora byla vázána zateplením objektů podle platných norem předložením energetického auditu a vybudováním primárního zdroje tepla podle projektu respektujícího další hlavně vodohospodářské předpisy. Předložené projekty byly v této době orientovány převážně na výrobu tepla z geotermálních zdrojů. Podpora využití geoter-

mální energie jako obnovitelného zdroje energie (OZE) byla tedy uplatňována hlavně u domácností (rodinných domků), penzionů a menších průmyslových objektů.

Do počátku roku 2002 nebyla výroba elektrické energie z geotermálních zdrojů příliš uplatňována. Teprve poté byly cenovým rozhodnutím Energického regulačního úřadu (ERÚ) stanoveny výkupní ceny elektřiny pro jednotlivé OZE. V souvislosti se zákonem č. 180/2006 Sb. byly stanoveny nové výkupní ceny elektřiny v r. 2006 od 1. 1. 2007, které se budou upravovat o vliv inflace. Tak je stanovena cena pro výkup elektřiny z výroby na bázi geotermálních zdrojů na 4,50 Kč/kWh a přiznání „zeleného bonusu“ 3,51 Kč/kWh. Toto zákonné ustanovení dává vyšší až patnáctiletou jistotu vložených investic. Výrobce má garantován výkup vyrobené energie za garantovanou cenu.

Nadále je počítáno s dotacemi ze Státního fondu životního prostředí (SFŽP) při MŽP pro výrobu tepla z geotermálních zdrojů.

Literatura

Albu, M., Banks, D, Nash, H. (1997): Mineral and thermal groundwater resources. Chapman and Hall, London..

Arnold, W. (1972): Eroberung der Tiefe. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1–225, Leipzig.

Arnorsson, S. (2000): Geothermal energy. In: Hancock, P., Skinner, P. (eds): Oxford companion to the Earth, 437–440, Oxford Univ. Press, New York.

Bobok, E. – Tóth A. (2007): First geothermal pilot power plant in Hungary. – Acta montanistica Slovaca, 12, 176–180.

Bodri, L. – Čermák, V., (1997): Climate changes of the last two millennia inferred from the borehole temperatures: Results from the Czech Republic. Part II. Global Planet. Change, 11, 111–125.

Bodri, L. – Čermák, V., (1998): Last 250 years climate reconstruction inferred from geothermal measurements in the Czech Republic. Tectonophysics, 291, 251–261.

Bodri, L. – Čermák, V. (1998): Climate change inferred from borehole temperatures: How to improve the solution by using additional information. Physics and Chemistry of the Earth, 23, 873–882.

Čermák, V. (1967): Země a její tepelná historie. Cesta k vědění. Academia, 1–207.

Čermák, V. (1975): Combined heat flow and heat generation measurement in the Bohemian Massif, Geothermica, 4, 19–26, Piosa.

Čermák, V. (1981): Heat flow investigation in Czechoslovakia. In: Zátoupek, A. (Ed.): Geophysical syntheses in Czechoslovakia. 427–439, Veda, Bratislava.

Čermák, V., Šafanda, J., Kresl, M., Dědeček, P. (2000): Climate warming: Evidence monitored in the subsurface. Geolines, 11.23–24, Prague.

- Demagne, J., Jaudin, F., Lemale, F., Munjuz, A. (1995): The use of low-enthalpy geothermal resources in France. In Barbier et al. (Eds) Proc. World Geothermal Congress, vol.1, 105–109
- Energy from the Earth (2006): Geoenergy, the newsletter of the EneRG Network, Czech Geological Survey, Prague.
- Friedemann, G. (2006): Perspektiven der geothermischen Strom- und Wärmeerzeugung in Sachsen (Deutschland). Geothermische Energie, 50, Freyberg, 28–29.
- Fridleiffson, I.B. (2006): Geothermal energy for the benefit of the people. In Renewable and sustainable energy reviews, Elsevier.
- Geothermics 94 in Europe. Research to Development BRGM. 1–232, Orléans.
- Haenel, R. – Staroste, E. (Eds 1988): Atlas of geothermal resources in the European Community, Austria and Switzerland. 1–74, 110 tab., Th.Schafer, Hannover.
- Hazdrová et al. (1981): Geotermální energie a její využití. Knihovna ÚÚG, 56, 1–127, Ústřední ústav geologický.
- Hurter, S. – Haenel, R. (2002): Atlas of geothermal resources in Europe. European Commission, Research Directorate-Gener. 1–90, 89 map, European Communities, Luxembourg.
- Hurtig, E., Čermák, V., Haenel, R., Zuie, V. (Eds, 1992): Geothermal atlas of Europe. Hermann Haag.
- Huttrer, G.W. (2000): The status of world geothermal power generation 1995–2000. In Iglesias, E. et al. (eds). Proc. World Geothermal Congress 2000, 10, 23–37. Kyusho-Tohoku.
- Huttrer, G.W. (2001): The status of world geothermal power generation 1995–2000. Geothermics, 30, 1–27.
- Ibrmajer, J. – Suk, M. et al. (1989): Geofyzikální obraz ČSSR. 1–354, Ústřední ústav geologický.
- Info-Geothermie, (2003). Energie Schweiz, 5, 2–12.
- Jung, C. et al. (2002). Heat and temperature. Continental geotherms. 1–335. Oxford Univ. Press.
- Kabus, F. – Seibt, P. (2002): Stand und Perspektiven der Erdwärmenutzung in Deutschland. Geothermie Neubrandenburg (GTN).
- Kellaway, G.W. (1991): Hot springs of Bath: Investigation of thermal waters of the Avon Valley. Bouth City Council.
- Kohl, T. – Andenmatten, N. – Rybach, L. (2003): Geothermal resource mapping – example from northern Switzerland. – Geothermics, 32, 721–732.
- Kopecký, L. (1986): Geological development and block structure of the Cenozoic Ohře Rift (Czechoslovakia). Proc. of the 6th Int.Conf. of basement tectonics, 114–124, Santa Fe.
- Kukal, Z. (1990): The rate of geological processes. Earth Sci.Rev., 28, 1–284.
- Lumsden, G.,I. (Ed. 1992): Geology and the environment in Western Europe. 1–314, Clarendon Press, Oxford.
- Lund, J.W.(2000): World status of geothermal energy use, overview 1995–2000. In: Iglesias, E. et al.,(eds): Proc. World Geothermal Congress. Kyushu-Tokoku.
- Lund, J.W. (2005): Ground heat – worldwide utilization of geothermal energy. – Renewable energy world.
- Lund, J.W. – Freeston, D.H. (2001): World-wide direct uses of geothermal energy 2000. Geothermics, 30, 29–68.
- Matolín, M.(1970): Radioaktivita hornin Českého masivu. Knihovna Ústř. Úst. Geol., 41, 1–102.
- Mehr Energie von Unten. 9. Geothermische Fachtagung 2006. Tagungsband. Karlsruhe 2006, 1–415.
- McCall G.J.H. – de Mulder E.F.J., Marker, B.R. (1996): Urban geoscience. Balkema, Rotterdam and Brookfield.
- McCall, J. H. G. (2005): Geysers and hot springs. In: 105–110.
- Myslil V., Pošmourný K., Stibitz M. (1998): Pomůže zemské teplo vytápět Krkonoše? Krkonoše – Jizerské hory, 7, 14–15. Vrchlabí.
- Myslil, V. et al. (1999): Voda – Země – Život. MŽP, Praha
- Myslil, V. et al. (2002): Závěrečná zpráva úkolu VaV MŽP 630/3/99: Možnosti využití geotermální energie pro energetické účely. Praha.
- Pipkin, B.W. – Trent, D.D. – Hazlett, R. (2005): Geology and the environment., 4th Ed., 1–315. Thomson Books/Cole, Australia etc.
- Parfit, M.(2005): Svoboda! Budoucí energie. National Geographic – Česko, srpen, 86–109, Praha.
- Reimer, W. (2006): Erster Sächsischer Geothermietag des Geokompetenzzentrums Freiberg. Gmit, Geowissenschaftliche Mitteilungen. 23, Marz, 104–105.
- Rollin, K. (2003): Low-temperature geothermal energy. Earthwise,19, 24–25. British Geol. Survey.
- Rybach, L., Brunner, M., Gorham, H. (2000): Swiss geothermal energy update 1995–2000. WGC2000, CD-Rom, 413–423.
- Rybár, P. (2007): Zdroje geotermální energie a možnosti ich využitie. Acta Montanistica Slovaca, 12, 31–41.
- Stobger, I. (2006): Fortbildungsveranstaltung „Geothermie“, Freiburg 11.10.2006. Gmit, Geowiss.Mitt., 24, 42.
- Šafanda, J. (1999): Ground surface temperature as a function of slope angle and slope orientation and its effect on the subsurface temperature field. Tectonophysics., 74, 624–635.

- Šafanda, J., Čermák, V., Štulc, P., in Vrána, S., Štědrá V. (1997): Geological model of Western Bohemia related to the KTB borehole in Germany. *Sb. Geol. Věd*, 47, 196–204.
- Šafanda, J. – Suchý, V. (1998): Thermal effect of the Central Bohemian Granitic Pluton (Czech Republic) on the adjacent sediments: Results of computer simulation. In: Abstract, XXIII. General Assembly of the EGS, *Annales Geophysicae*, Supplement I to Volume 16, P. I, 65.
- Šponar, P. (2005): Geotermální vrty. Uhlí, Rudy, Geologický průzkum, 8, 19–20, Praha.
- Štulc, P. (1998): Combined effect of topography and hydrogeology on subsurface temperature – implications for aquifer permeability and heat flow. A study from the Bohemian Cretaceous Basin. *Tectonophysics*, 284, 161–174.
- Štulc, P. – Stojan V. – Kopecký, P., (1999): Dynamics of subsurface temperature field associated with human induced change in hydrogeological regime. *Tectonophysics*, 5, 84, 835–842
- Štulc, P. – Šafanda, J. – Krešl, M. – Čermák, V., Šír, M. (1988) Monitoring climate change in the Earth's subsurface. In: Abstract XXIII General Assembly of the EGS, *Annales Geophysicae*, Supplement I to volume 16, P. I., C 23.
- U.S. Energy Information Administration and International Energy Agency (2005)
- Vrána, S. – Štědrá V. (ed. 1997): Geological model of Western Bohemia related to the KTB borehole in Germany. *J. Geol. Sciences, Geology* 47, 1–239, Czech Geol. Survey.
- Weber, K. (2003): Hot rock geothermal energy in Australia. *AIG News*, 71,9–12.