

A Yellowstone geotermális rendszer működése és jelentősége

Operation and importance of the Yellowstone geothermal system

Buday Tamás¹ – Krassay Zita²

¹Debreceni Egyetem Ásvány- és Földtani Tanszék, H-4032 Debrecen, Egyetem tér 1.; rvbudayt@freemail.hu

²Chiba University, School of Science and Technology 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8522, Japan

Összefoglalás Napjaink legnagyobb kihívása a világgazdaság gyors átalítása környezetbarát alternatív energiaforrások használatára. Ebben a folyamatban az ipari nagyhatalmak szerepe meghatározó. E tanulmányban rövid áttekintést nyújtunk az Amerikai Egyesült Államok geotermális adottságairól, egy kitüntetett, nagy hőáramú terület bemutatásán keresztül, ahol előrehaladott a földtani megismerés, de a fejlesztésnek korlátozó tényezői is vannak. A bonyolult genetikájú Yellowstone termális rendszer hőbányászatra leginkább alkalmas övezete túlnyúlik a világörökség részét képező nemzeti park határain, és a Snake River Plain irányában lehetőség nyílik geotermikus villamosáram-termelő erőművek telepítésére. Kérdés, hogy hogyan egyeztethetők össze a természetvédelem és az ipari méretű környezetbarát alternatív energiatermelés szempontjai.

Abstract The most important challenge today is to re-organise world economy to consume environment friendly alternative energy resources. The role of industrial world powers is decisive in this process. This paper gives a brief outline on the geothermal conditions of the United States of America via presenting a significant area characterised by great heat-flow where geological investigations are advanced but there are limits of development. The area of the Yellowstone thermal system having complex genetics most suitable for heat excavation extends over the borders of the World Heritage national park and there is a possibility to establish geothermal electricity producing power plants towards the Snake River Plain. The question is, how the interests of nature protection and industrial environment friendly alternative energy production can be adjusted.

Tárgyszavak: hőáram, „hotspot”, Yellowstone, geotermális mező, geotermikus erőmű

Key words: heatflow, hotspot, Yellowstone, geothermal field, geothermal power plant

Előszó

A II. világháborút követő exponenciálisan gyorsuló ipari fejlődés miatt 20-40 év alatt láthatóvá váltak a példátlanul gyors fejlődés kedvezőtlen környezeti hatásokban is megnyilvánuló következményei. A politikai, gazdasági, vallási-etnikai tömbökre tagolódás felgyorsította a nemzetközi politikai szeparálódást és a technológiai versenyt, amelyben így nehezen lehet olyan világméretű megegyezésekre jutni, ami környezettudatos, előrelátó és meggátolhatja, de legalábbis lelassíthatja a jövő felélését.

A szinte megállíthatatlanul növekvő környezet-szennyezés mellett a másik jelentős probléma a kitermelt nyersanyagok és fosszilis energiahordozók mennyiségének fokozódása, amely járulékosan egész sor gazdasági, politikai és környezetvédelmi krízishelyzetet idéz elő. Annak ellenére, hogy egyes tudósok és szervezetek előre jelezték a várható negatív következményeket, nagyon kevés érdemi intézkedés történt az ügyben, hogy globális szinten a fejlődés arányossá, a környezeti kockázat kezelhetővé váljon és mérséklődjene a szabadverseny kezelhetetlen vagy háborús konfliktust okozó következményei.

Ebben az útkeresésben minden alternatív energiaforrás fontos, de a villamosenergia-termelésben a gyökeres változásokat leginkább a napenergia és geotermális energia kiaknázása és technológiáik fejlesztése hozhatja.

E tanulmányban a technológiai fejlettség legmagasabb szintjén álló Amerikai Egyesült Államok példáját vesszük alapul egy olyan gondolatsor levezetéséhez, amely a geotermális energia hasznosításának perspektíváira és annak korlátaira nyújt bizonyos fokú rálátást.

A földhőhasznosítás függése a földtani adottságoktól

Földünkön ma még nem léteznek világméretű és átfogó geotermikus kutatási programok, noha az elmúlt

évszázad tapasztalatai alapján mind a konfliktus megelőzés, mind a gazdaság ésszerű szabályozása érdekében szükség lenne ilyen programokra.

Az Amerikai Egyesült Államok a legnagyobb ipari potenciállal rendelkező ország Földünkön, saját forrásai is óriásiak, de sok esetben a világ egyéb térségeiben folytatott kutatási és termelési tevékenysége számos tekintetben felülmúlja a belföldi kitermelés és feldolgozás mértékét.

A földkéreg szerkezetére és fejlődésére vonatkozóan mélyre ható ismeretek gyűltek össze a geofizikai és mélyfúrásos kutatások, a kapcsolódó ásványtani, geokémiai, kőzettani és technológiafejlesztési tevékenység következtében. Ezekben közvetlenül vagy közvetett módon lényeges elemként szerepel a kéreg alkotóinak hőtani viselkedése, illetve mindazok a termodinamikai folyamatok, amelyek a közciklus fáziskörülményeit meghatározzák.

Elég említenünk a szerek és szénhidrogének fűtőértékének a betemettség és a geotermikus környezet hatására kedvezően felgyorsuló növekedését. A termálvizek létrejöttétől a hidrotermás mineralizációig alig találunk olyan földtani részterületet, ahol a termális adottságoknak és folyamatoknak ne lenne meghatározó szerepe. Ennek ellenére a zárt, vagy félig zárt rendszerű, nagy nyomású és magas hőmérsékletű laboratóriumi modellkísérletek csak durva közelítéssel alkalmasak a földkéreg mélyebb zónáiban zajló folyamatok megismerésére. Sajnálatos módon a sikerrel kecsegtető Moho-projektek is megszakadtak költségigényes voltak miatt. A geotermia fejlődését visszafogta az ellenérdekltség, a kutatás költségigényes volta, a bizonytalan megtérülés és a mélység arányában fokozódó kockázatvállalás. Emiatt Földünknek a nagyszámú mélyfúrással igen jól megkutatott területei – mint a Kárpát-medence, illetve az Amerikai Egyesült Államok nyersanyagban gazdag területei – is csak a viszonylag csekély ismertségű geotermális régiók közé tartoznak.

Már az 1960-as években sok ezer olyan adat állt rendelkezésre a világ jól megkutatott területeiről, amelyek lehetőséget adtak kontinensnyi méretű területek nagyléptékű interpolációval készült hőáramtérképeinek megszerkesztésére (JESSOP et al. 1976, ČERMÁK & RYBACH 1979). E térképek jó áttekintést nyújtanak ugyan a nagyobb geotektonikus régiók geotermikus adottságaira vonatkozóan, de az adatsűrűség rendkívül egyenetlen eloszlása és viszonylag kis értéke miatt a szűkebb régiókra történő vonatkoztatás körülményes és bizonytalan.

Az Amerikai Egyesült Államok földtani társulata által 1991-ben megjelentetett Economic Geology című igen alapos kézikönyv (GLUSKOTER et al. 1991) a geotermikus energiáról és a kapcsolódó termálvizekről mint potenciális nyersanyagokról, illetve energiaforrásokról szót sem ejt, holott ekkor már a működő geotermális erőművek kutatási-fejlesztési-termelési tapasztalatai egyaránt rendelkezésre álltak.

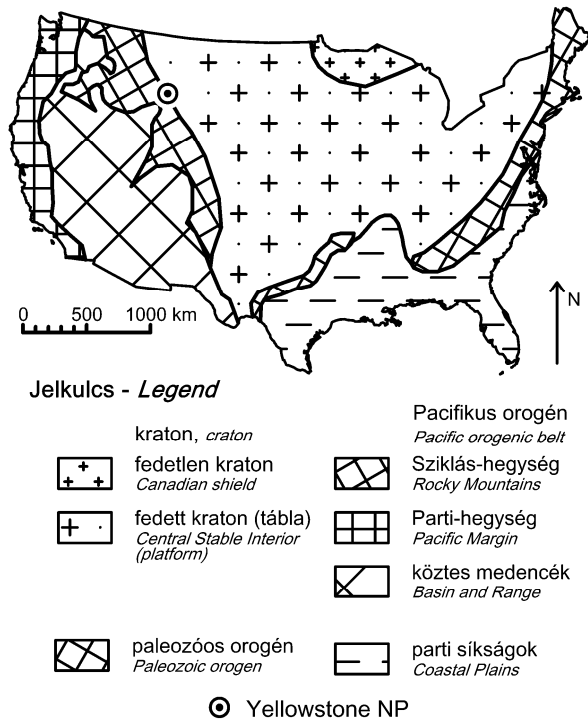
A Massachusetts Institute of Technology 2006-ban összeállított tanulmánya (TESTER 2006) viszont már nagyívű perspektívát lát a geotermális energia hasznosításában, s arról egy sokoldalú és részletes, áttekintő összefoglalást hoz nyilvánosságra, elsősorban az elektromos áram termelésére alkalmas HDR (Hot Dry Rock, azaz „forró száraz kőzet”) technológiákra vonatkozóan.

Szerkezeti adottságok az USA-ban

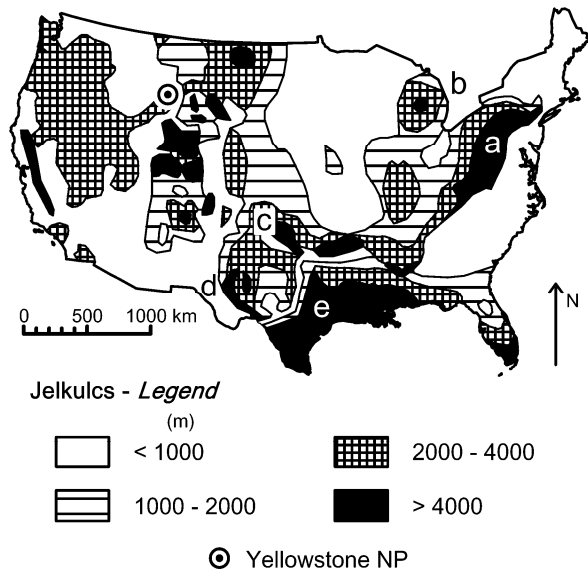
Az ország centrális részét a Kanadai-pajzs idős, kristályos, erősen tönkösödött, átlagos kéregvastagsággal jellemezhető masszívuma képezi, amely helyenként bázisát alkotja az öt körülvevő fiatalabb szerkezeti egységek egy részének is. Ehhez formak hozzá az ország északkeleti részén a Kaledóniai és Variszkuszi paleozóos orogének rögvonulatai, nyugaton pedig a több periódusban fokozatosan kialakuló, részben ma is aktív orogén rendszer a nagy kiterjedésű köztes medencékkel és az előtéri üledékgyűjtőkkel (1. ábra).

A Mississippimedence területén megsüllyedt idős kéregmaradványokra nagy vastagságban rakódtak le a szénben, szénhidrogénben és rétegvízben gazdag medencekitöltő üledéksorok (2. ábra). Míg a Mexikói-öböl területén kimutatható a mezozóos óceáni kéregképződés, addig Florida előterében az árkos süllyedékekkel tagolt kontinensperem Kuba középvonaláig nyúlik le. Utóbbi bizonyítékai a sziget északi parti sávjában kibukkanó rögök (Remedios-öví), valamint a megszakadt orogénfejlődés során dél-délkeletről feltolódó ofiolit-szigetív kevert eredetű szerpentin-melangeba ágyazódó, az aljzatból felszakított, nagy méretű, közel 480 millió éves egzotikus parametamorfit blokkok (KOZÁK 2000).

Az ország geotektonikai aktivitását részben az Atlantikum jura óta tartó erőteljes kinyílása idézi elő, amely intenzív északnyugatra tolódást eredményezett, újra és újra reaktiválva a kevésbé erőteljes pacifikus lemezegységek alátolódásait. A folyamat változó intenzitására utal, hogy az említett nyugati gyűrt hegységek idősebb láncai már ópaleozóos korúak, miközben a parti sáv szeizmikusan és vulkanológiailag ma is több zónában aktív. A kontinensnek a pacifikus riften történő részleges áttolódása nehezen értelmezhető jelenségek sorát idézte elő.



1. ábra Az Amerikai Egyesült Államok területének fő kéregszerkezeti egységei
Figure 1 Main tectonic units of the United States of America



2. ábra Az USA medenceterületeinek üledékvastagsága (TESTER 2006 alapján)
Medencék: a./ Appaleche-m.; b./ Michigan-m.; c./ Anadarko-m.; d./ Permi-m.; e./ Mexikói-öböl északi m.
Figure 2 Sediment thickness of the basins of the USA (after TESTER 2006)
Basins: a./ Appalachian b.; b./ Michigan b.; c./ Anadarko b.; d./ Permian b.; e./ Northern Gulf of Mexico b.

A geotermális adottságok vázlatos áttekintése

Észak-Amerika egészének kontinentális hőáram átlaga a kontinentális világlágtól alig kevesebb, 60mW/m²

(JESSOP et al. 1975), ám jelentős területi eltéréseket mutat. Florida déli részén, Dél-Dakota nyugati felén, a kaliforniai Sacramento- és San Joaquin-völgyekben, illetve Oregon tengerparti részein például a földi hőáram az országos átlag felét sem éri el (BLACKWELL & RICHARDS 2004). Átlag alatti hőáram jellemzi az Amerikai Egyesült Államok keleti felének nagy részét (3. ábra) míg a nyugati felén – a már említett negatív anomáliáktól eltekintve – az átlagnál nagyobb hőáramú területek találhatók.

100mW/m²-nél nagyobb értékű földhőáram jellemzi a Salton-süllyedéket, az oregoni vulkáni lánc térségét, a Snake River Plain területét, a Nagy-Sóstó környezetét, Colorado állam nyugati részét és Dél-Dakota bizonyos részeit. A World Heat Flow Center adatbázisa alapján a legnagyobb hőáramokat a Yellowstone Nemzeti Parkban mérték, ezek elérték az 1500mW/m²-t is (www.heatflow.und.edu).

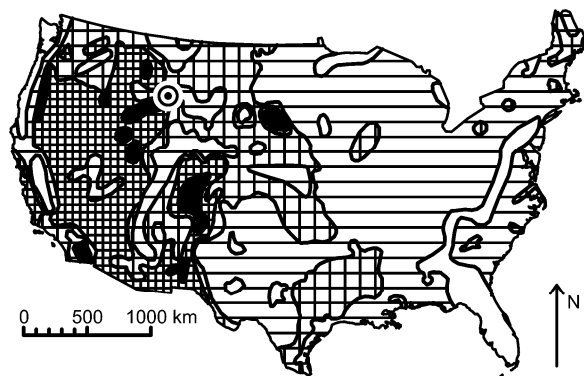
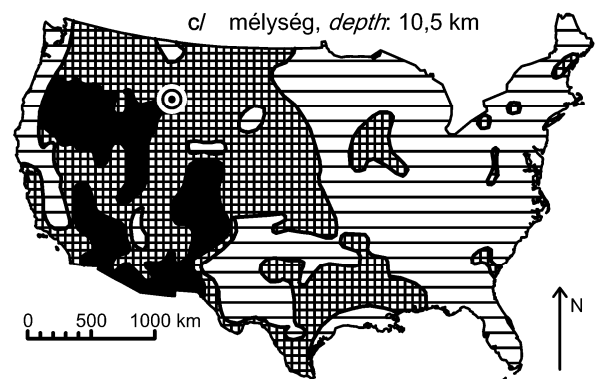
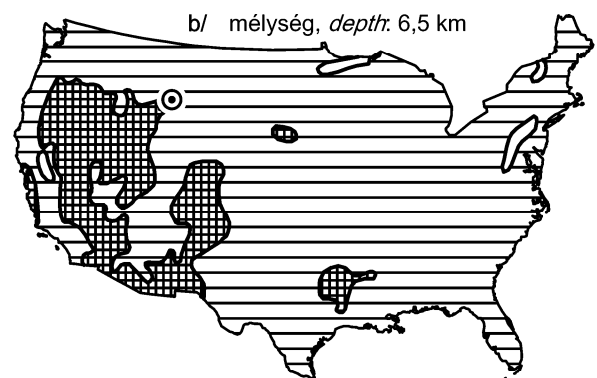
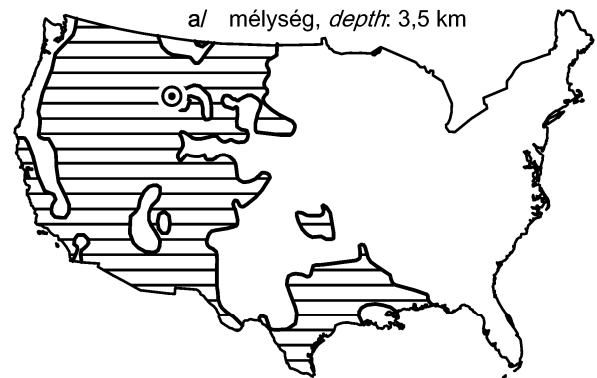
A 4. ábra térképei rámutatnak, hogy a felszín alatti hőmérséklet növekedése a földi hőáramtól nem független. 3,5km mélyen 100°C feletti hőmérséklet található az ország nyugati és déli részén, 10 km-en a geotermikus indirekt energiatermelés szempontjából optimális 300°C feletti hőmérséklet azonban csak korlátozott területeken várható, elsősorban Colorado, Oregon, Idaho államokban és a Yellowstone területén.

A szerkezeti-földtani-geotermikus adottságok következményei

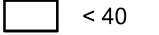
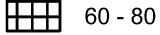


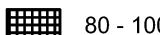
Az eltérő szerkezeti és geotermikus viselkedésű provinciák eltérő mineralizációs folyamatoknak kedveznek. Az ásványkincsek és energiahordozók elhelyezkedése szempontjából elsősorban a medencék, illetve a különböző korú orogén zónák különülnek el egymástól, azaz elsődleges a szerkezeti meghatározottság. Ez természetesen abból is következik, hogy a recens hőáramok szükségszerűen különböznek a paleogeotermikus adottságoktól.

A szerkezetformálódás és az ehhez képest pre-, szün- és posztttektonikus geotermikus adottságok együttes hatása az Amerikai Egyesült Államok karbon szeneinek eltérő

fejlődésében jól nyomon követhető. Kimutatható, hogy a keleti területek egy részén a mainál nagyobb volt a geotermikus gradiens. Ennek megfelelően jelentős minőségbeli különbség van a közel egykorú feketekőszének között, amilyen például az Illinois-i-medence gyengébb minőségű feketekőszene és a pennsylvania-i metaantracit (DAMBERGER 1991). A fiatal nyugati orogén zóna belső (keleti) oldalán kréta–tercier korú, szintén változó minőségű barnakőszéntelepek ismertek.



Jelkulcs - Legend

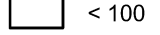
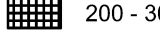

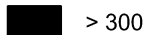
(mW/m ²)		
		
< 40	60 - 80	> 100
		
40 - 60	80 - 100	

⊗ Yellowstone NP

3. ábra Az USA földhőáram-térképe (BLACKWELL & RICHARDS 2004 alapján)

Figure 3 Heat flow map of the USA (after BLACKWELL & RICHARDS 2004)

Jelkulcs - Legend

(°C)	
	
< 100	200 - 300
	
100 - 200	> 300

⊗ Yellowstone NP

4. ábra Hőmérsékleteloszlás a felső kéreg különböző mélységeiben az USA területén (TESTER 2006 alapján)

Figure 4 Average temperature at various depths in the upper crust in the USA (after TESTER 2006)

A posztorogén szénmezők eltérő szénülési fokú szeneinek különbözőségében egyértelműen a hőáramnak, a beágyazó kőzetek eltérő hővezetőképességének és a geotermikus gradiensnek van meghatározó szerepe. Ebből a szempontból előnyös helyzetben vannak a Mexikói-öböl partján található lignittelek.

Az arányos kőolaj-földgáz telepképződés szempontjából csak egy meghatározott hőmérséklettartomány tekinthető optimálisnak, ugyanis a szerves anyag tartalmú üledékekben bizonyos hőmérséklet alatt nem keletkezik a kerogénből szénhidrogén, bizonyos hőmérséklet felett pedig főként földgáz képződik, kőolaj nem, vagy alig. Ezek ismeretében becsülhetővé válnak a paleogeotermikus paraméterek. A legjelentősebb szárazföldi szénhidrogénmezők a nagy mélységig fokozatosan süllyedő és feltöltődő üledékgyűjtőkhöz kapcsolódnak (2. ábra).

Az ércvek elhelyezkedése sokrétű képződési körülményeik miatt elsősorban az orogénekhez köthető. Jelentős részük nagyobb hőmérsékletű körülmények között (olvadékból, oldatból) kristályosodik, illetve poligenetikus származású. Nem elhanyagolható az üledékekben történő felhalmozódás, elsősorban ércartalmú kőzetek mállása, illetve oldatból való kicsapódás következtében (pl. redukív környezetben). A gazdaság és az ipar fémigénye oly mértékben felgyorsította Észak-Amerika belső területeinek megismerését és elfoglalását, hogy annak történelemformáló szerepe lett (pl. aranyláz).

Orogénekhez köthetők elsősorban az arany, az ezüst, a réz, a molibdén, a króm, a nikkel és a kobalt megjelenések, míg elsősorban üledékes érctelepekként jelentősek a vas, a mangán, illetve az Amerikai Egyesült Államok esetében az ólom és a cink előfordulások is (GLUSKOTER et al. 1991, KISVARSÁNYI 2007).

Fontos ércképző faciesek a kontinentális lemezelsőkön kialakuló „hotspot” jellegű bázisos magmás intrúziók (PIRAJNO 2004, JOHN 2001). E magmáknak nagy az ércartalmuk, jelentős a környezetet felfűtő és metasomatózisra, elem-mobilizációra készítő hatásuk. A képződő hidrotermák nagy távolságokra eljutva képesek olyan ércesedéseket kialakítani, ahol az eredet pontos meghatározása már nehézségekbe ütközik.

A Yellowstone geotermális rendszer földtana

Mint az előzőekből kiderült, a Sziklás-hegységben eredő Yellowstone folyó forrásvidéke Észak-Amerika egyik legnagyobb hőáramú területe, és ilyen értelemben kitűnő aktuogeológiai modell a hipertermális felfűtöttségű, tektonikai és magmagenetikai-vulkanológiai folyamatok szempontjából aktív régiók jelenségeinek megfigyelésére. Ismertségét elsősorban látványos hidrotermás tevékenységének, termikus felfűtöttségéből adódó jelenségeinek köszönheti. Egyedi értékeire már korán felfigyeltek, a Yellowstone Vulkanai Plató északkeleti végén egy csaknem négyzet alaprajzú, 8990 km² kiterjedésű területet a világon elsőként már 1872-ben nemzeti parkká nyilvánították Montana, Idaho és Wyoming szövetségi államok határán (5. ábra).

Egy terület geotermikus arculatát igen sok tényező határozza meg. Ilyen például a kéregvastagság, a kéreg szerkezete és kristályossági foka, ebből adódó hővezető

képessége, tektonikus aktivitása, szeizmicitása és vulkanológiai karaktere, valamint mindazok a felsőkőpenyben lejátszódó folyamatok, amelyeknek hatása van a kéreg tektonikai és termikus állapotára. Ezek egy része a történeti régmúltból átöröklött adottság, más része viszont szükségszerűen fiatal, ma is aktív folyamatokhoz kapcsolódik.

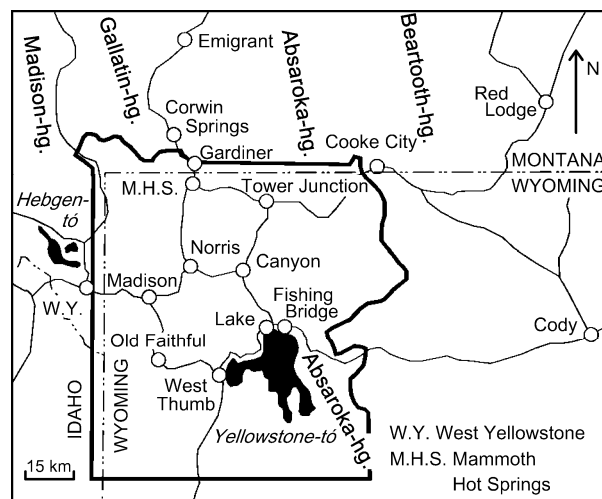
A terület felépítésében prekambriumi, paleozoós, mezozoós üledékes képződmények egyaránt jelen vannak, míg a kainozoikumot elsősorban többsiklusú tektonikus kéregaktivitáshoz kapcsolódó magmatizmus jellemezte. Utóbbiak közül a legfiatalabb ciklus mintegy 17 millió évvel ezelőtt kezdődött, és kisebb megszakításokkal máig tart.

Prekambriumi aljzat

A Yellowstone-vidék legidősebb kőzetei közé a prekambriumi aljzat 2,7 milliárd éves kőzetei tartoznak (FRITZ 1996), melyek a Teton, Wind River, Gros Ventre térségében figyelhetők meg. Legszebb előfordulásuk a Beartooth-fennsíkban található, ahol a kiemelkedés miatt a fedőrétegek teljesen lepusztultak. Előbukkannak még a területen húzódó szerkezeti redők eróziósan feltárt belsejében, például a Gallatin River-kanyonban, a Yankee Jim-kanyonban (Gardiner-től északra), a Rattlesnake-hegység antiklinálisában (Codytól nyugatra), valamint a nemzeti parktól ÉK-re található Lamar-kanyonban.

Ezek nagyrészt plutonitok, valamint orto- és parametamorf kőzetek. A plutonitok többsége világos vagy halvány vöröses gránit, a metamorfítok között gneiszek, csillámpalák az uralkodóak, de egyéb kristályos palák is előfordulnak. A savanyú granitoid és gneisz kőzetek repedéseibe sötétebb diabáz dyke-ok nyomultak be.

A prekambriumi magmás és metamorf kőzetek kialakulását kiemelkedés és hosszan tartó lepusztulás követte, melynek során sziliciklasztos üledékes rétegek jöttek létre. Maradványaik ma Montana állam nyugati felén és Idaho állam északi területein ismertek.



5. ábra A Yellowstone Nemzeti Park és környezetének fontosabb topográfiai és helység nevei

Figure 5 The important topographic features and placenames of the Yellowstone National Park and its surroundings

Paleo-mezozoós kőzetek

A lepusztulási időszakot követően a területen ismétlődő tengerelöntésekből származó üledékek képződtek (FRITZ 1996). A paleozoikum képviselőiben a parktól északnyugatra sekélytengeri üledékek jelennek meg, legszebb képviselőjük a közel 300 millió éves Madison-mészkö.

A mezozoikumot Codytól északra triász vörös homokkővek, erre települő fehér evaporitok, valamint néhány helyen a kréta korú fekete színű tengeri palák képviselik.

Az üledékek lerakódása a 100–50 millió évvel ezelőtt lezajlott Larámi-orogenezissel zárult. Ekkor az Észak-amerikai lemez a Csendes-óceáni lemezzel és még legalább két másik, mára már az Észak-amerikai lemez ÉNy-i részét képező mikrolemezzel ütközött. Ez az ütközéssorozat gyúrta fel a Sziklás-hegységet. A területet formáló erők hatására a Cooke City környékén lerakódott paleozoós kőzetek elszakadtak az aljzattól, és Cody környékén a fiatalabb kőzetekre tolódtak.

A kainozoikum eseményei

A kainozoikum elején a mai Yellowstone területe az Észak-amerikai lemez aktív szegélyén helyezkedett el, melynek alátolódási övében a lemezszegéllyel párhuzamosan mészkalkáli jellegű andezites vulkanizmus játszódott le. Ennek egyes felnyomulásai a szubdukciós ároktól viszonylag távol is megjelentek.

Az eocénben ilyen folyamatok hozták létre az Absaroka vulkáncsoportot, amely a park keleti részét ÉÉNy-DDK-i csapással átszelő Absaroka-hegységben ma is megtalálható. A vulkáni csoportot számos andezit és bazalt lávafolyás, vulkáni portufa, iszapárral összesodort konglomerátum, valamint vegyes anyagú folyami kavics és homok építi fel. Néhány helyen a nagy tömegben mozgó és fölhalmozódó törmelék fákat temetett be, amelyek megkövesedett maradványai jelenleg DNy-Montanában és ÉNy-Wyomingban ismertek.

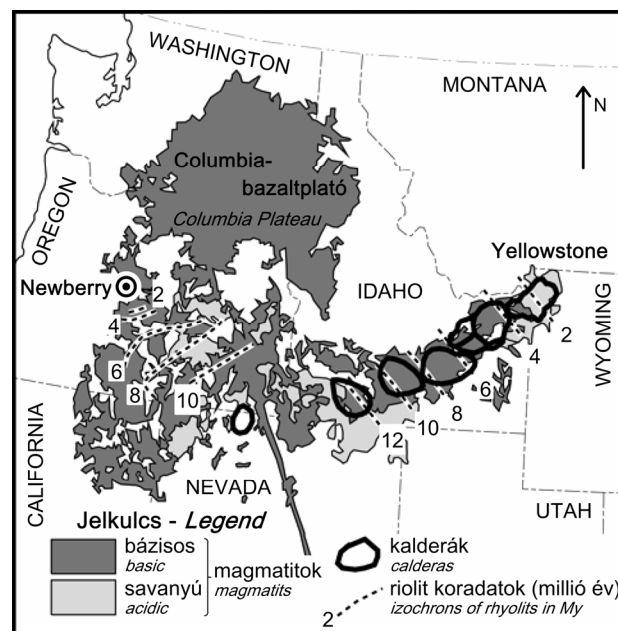
Közel 30 millió éve a tektonikai kép megváltozott, az észak-amerikai kontinens nyugati része áttolódott a Kelet-Pacifikus-rífhátság egy részén (CHRISTIANSEN 2001). Ezt követően a vulkanizmus egy keskenyebb, északabbra fekvő sávra koncentráldott a mai Cascade-ok területén.

A további közeledés hatására alakult ki a mai Csendes-óceáni-lemez és Észak-Amerikai-lemez érintkezési zónája, melyet jobbos laterális relatív mozgás jellemez. A két lemez relatív mozgása azonban nagyobb, mint amit a lemezhatár egyes részein, például a Szent András-törésvonalnál észlelni lehet.

E probléma feloldására a kutatók kijelöltek egy úgynevezett belső „puha lemezszegélyt” (ATWATER 1970), amely a kontinensen belül húzódó széles zóna, s itt a „hiányzó” térrövidüléssel mozgás végbe tud menni. E zóna aktiválódásával a korábbi intermedier vulkanizmus egy más típusú, alkáli-mafikus, bazaltos vulkanizmusként folytatódott.

A területet összetett tágulás jellemzi. A harmadidőszak eleji extenzió még kis területeket érintett, de mintegy 17 millió éve az extenzió helye, intenzitása és kiterjedése jelentősen megváltozott, a Snake River Plain-től és a High Lava Plain-től délre fekvő ún. Basin and Range terület extenziója 10 millió éve indult meg.

Nevada északi határától, a mai McDermitt kalderától kiindulva a miocén óta két hasonló kifejlődésű, ellentétes irányban fiatalodó vulkánoszor képződik (CHRISTIANSEN & YEATS 1992) (6. ábra). Ennek nyugati ága északnyugat felé, a mai Newberry vulkánig terjed, míg az északkeleti ág a Snake folyó bazaltplatójának keleti részén kersztül (East Snake River Plain) a Yellowstone vulkáni platóig húzódik. E vonulatoktól délre található az a késő kainozoós Basin and Range tektonikai mintázat, amely dél felé a Nagymedencében folytatódik. Az itt található vetődések jelentős kéregtágulásra utalnak, amit intenzív szeizmikus aktivitás kísér.



6. ábra A bimodális Newberry–Yellowstone aszeizmikus vulkáni öv helyzete és kronológiai jellemzői (CHRISTIANSEN et al. 2002 alapján)

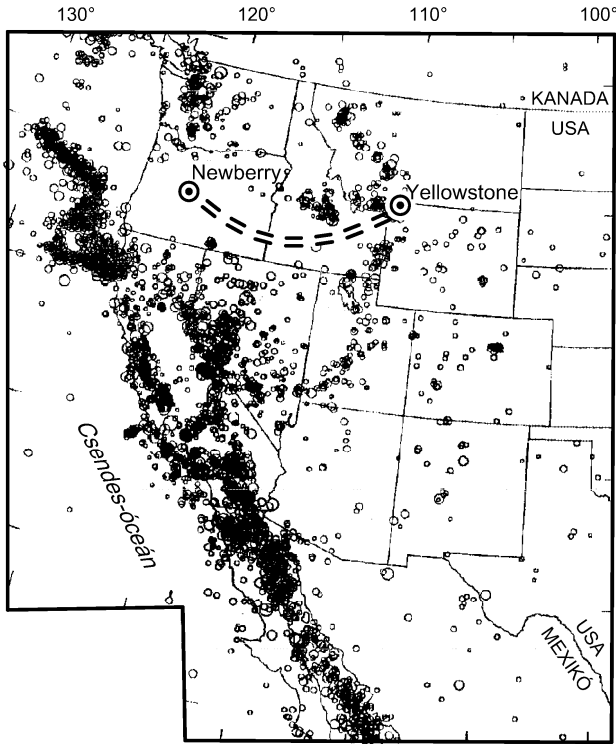
Figure 6 Position and chronological characteristics of the bimodal Newberry–Yellowstone aseismic volcanic zone (after CHRISTIANSEN et al. 2002)

Az említett bazalt vulkánoszortól északra kisebb mennyiségben található normál és horizontális vetők, domborzatalakító szerepük csak néhány 10km-nyi távolságig jelentős. A földrengések ezen a területen is jellemzők, de számuk és nagyságuk a peremtől távolodva csökken. Maga a Newberry–Yellowstone határvonal viszont az előtereivel ellentétben aszeizmikus (7. ábra), melyet a kéregben uralkodó magasabb hőmérséklettel és az olvadt kőzetanyaggal lehet magyarázni.

A Newberry–Yellowstone határvonal felfogható úgy, mint az említett puha lemezszegély, amely mentén az északra és délre fekvő, szerkezetileg eltérő viselkedésű területek feszültségtete feloldódik és kiegyenlítődik (CHRISTIANSEN 2001).

A Yellowstone vulkanizmusának eseményei

Az 12 millió éve kezdődött bimodális (bazaltos-riolitos) vulkanizmus az East Snake River Plain formálva 2,1 millió éve érkezett a mai Yellowstone vidékhez. A nagy



7. ábra Földrengés epicentrumok eloszlási sűrűsége az USA nyugati felén (CHRISTIANSEN 2001 alapján)

Szaggatottal jelölve a Newberry–Yellowstone aszeizmikus zóna.

Figure 7 Spatial distribution of the earthquake epicentres in the western USA (after CHRISTIANSEN 2001)

The Newberry–Yellowstone aseismic zone is marked with a dashed double line

hőáram hatására a felszín alatt kis mélységben a kéreg részlegesen megolvadt, így kialakult egy kéregbeli magmakamra, melynek térfogatnövekedésből származó, felfelé irányuló nyomása miatt a terület megemelkedett.

E folyamat a felszín közeli kőzetekben repedéseket, töréseket eredményezett, melyek létrejöttét földrengések kísérték. A nagyobb felnyílásokon keresztül a magma felnyomult, a magmakamrában a nyomás lecsökkent, s az így felszabaduló gázok szétterjedtek.

A fenti folyamatsor végeredményeként hatalmas kitörés következett be, melynek során vulkáni por és gáztömeg került a levegőbe, a felszínen pedig piroklaszt árák söpörtek végig. A magmakamra kiürülésével a felszín berogyott, és létrejött a Huckleberry Ridge-kaldera (8. ábra). A süllyedék területét később kisebb lávafolyások töltötték fel (CHRISTIANSEN 2001).

Az ekkor kibocsátott anyagmennyiség becslések szerint mintegy 2400-szorosa lehetett a Mount St. Helens 1980-as kitörésekor levegőbe került anyagnak. Az első Yellowstone vulkáni aktivitást a mai ismereteink szerint Földünk legtöbb anyagot szolgáló kitöréseként tartják számon. Az ekkor képződött összesült tufarétegeket többek közt Mammothtól délre tárták fel, míg hasonló korú bazaltoszlopokat Tower Junction és Mammoth környékén találunk (CHRISTIANSEN 2001, FRITZ 1996).

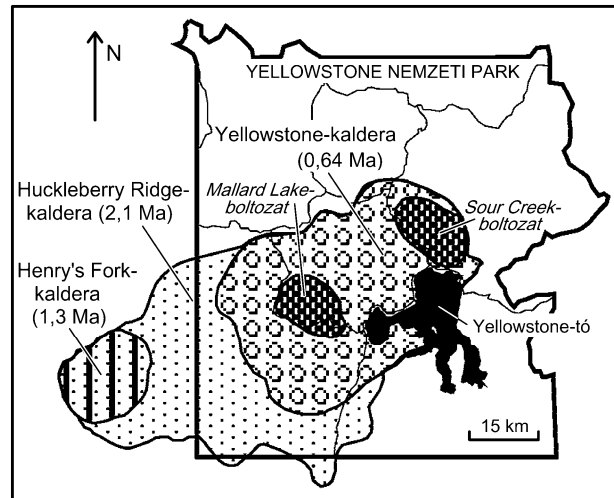
Kb. 800000 évvel ezután a Huckleberry Ridge-kaldera délnyugati peremén újabb kitörés következett be, amely egy újabb magmatektonikai süllyedék létrejöttét eredményezte

(Henry’s Fork-kaldera). E kitörés során nagy mennyiségű összesült tufa képződött (Mesa Falls tufa).

Ezt követően, 640000 évvel ezelőtt, a Yellowstone-vidék központi részén – egy, az első kitörésnél kisebb méretű működés során – jött létre a Yellowstone-kaldera. Ekkor főként összesült tufarétegek és bazaltláva-folyások borították be a felszínt. Az aktivitás késői szakaszában riolitláva jutott a felszínre, mely Canyontól északra táru fel.

A Yellowstone-kaldera kialakulását és részleges kitöltődését követően egyes időszakos repedések mentén, 600000 évtől kezdődően, több mint fél millió éven keresztül ún. poszt-kaldera kitörések következtek be. Ekkor jött létre például Norristól északra egy 180000 éves obszidián szirt. E kitörések egyike mintegy 150000 éve egy újabb kis méretű kaldera kialakulását idézte elő, melynek süllyedéke a jelenlegi Yellowstone-tó medencéjének nyugati részét (West Thumb) alkotja.

A Yellowstone-vidék jelenleg is nagy hőáramú terület, amely alatt a meghúzódó magma és fluidumainak mozgása a terület viszonylag gyors emelkedését (és süllyedését) eredményezi. Ez a táguló emelkedő mozgás a felszínen két nagy tectonikus felbontozódást hozott létre (Sour Creek és Mallard Lake). A folyamatos vizsgálatok arra utalnak, hogy a Yellowstone-vidék kéregszerkezete olyan dinamikus rendszer, ahol a kaldera aljzata csaknem folyamatos mozgásban van (HARRIS 1980, DZURISIN et al. 1999).



8. ábra Negyedidőszaki vulkanizmus kalderaszerkezeteinek helyzete a Yellowstone körzetben (kor millió évben)

Figure 8 Position of the calderas of Quaternary volcanism in the area of Yellowstone (ages in My)

A Yellowstone vulkanizmus modelljei

A Snake River Plain-től Yellowstone-ig húzódó vulkáni ív kialakulására és fejlődésére vonatkozóan számos elméletet dolgoztak ki, de mindmáig hiányzik egy minden részletben koherens értelmezés. A modellek egy része már az 1970-es években egy a lemezbelsőben működő forró foltot tételezett fel, amelynek felfűtési zónája felett alakult ki egy egyre fiatalodó vulkánoszor (MORGAN 1972).

A hotspotokkal kapcsolatos elméletek azóta szerteágazóak és árnyaltak lettek, de az alapvető kérdés, a

földhő eredetének és okának értelmezése továbbra is nyitott maradt. A vita feloldásához az vezethet, ha különválasztják a különböző típusú földhőfeláramlásokat, esetleg teljesen új nevezéktant vezetnek be (CHRISTIANSEN et al. 2002).

A nagy hőáram egyik lehetséges oka, hogy a köpenybeli permanens konvekciós cellákban felemelkedő, a környezeténél forróbb magma okozza a vulkáni jelenségeket. Más elképzelés szerint a magma a köpeny és a mag határáról származik, ám a Yellowstone esetében valószínűsíthető egy sokkal kisebb mélységben működő hőforrás is (PIERCE & MORGAN 1992, SMITH & BRAILE 1994). A hotspot elméletet támogató kutatók egy csoportja elfogadva a forró folt rendszerek szakaszos működésének modelljét, a Yellowstone hotspotot már 130 millió éve szakaszosan működő köpenycsókaként értelmezi (JOHNSTON & THORKELSON 2000).

A kutatók másik csoportja azonban a Yellowstone esetében elveti a klasszikus hotspot elméleteket, mivel értelmezhetetlennek látják a forró folt váratlan megjelenését, és azt a tényt, hogy a rendszer nem csak a Yellowstone vulkanikus plató felé, hanem a Newberry vulkán felé is egyidejűleg fiatalodik. A kétirányú fiatalodást nem lehet kizárólag az Észak-amerikai lemez mozgásával értelmezni. Emellett számos egyéb kutatás sem támasztja alá a feláramlást és a magma köpeny eredetét (HUMPHREY et al. 2000, CHRISTIANSEN et al. 2002). A szeizmikus mérések ugyanis nem tudtak a köpenyig lenyúló, jelentős kiterjedésű, kis sebességű olvadátkömeget kimutatni a Yellowstone alatt.

Az izotópos vizsgálatok eredményei vegyes képet adnak. A területen előforduló bazaltok $^3\text{He}/^4\text{He}$ arányait korábban egyértelműen az alsó köpenyből való származás bizonyítékainak tekintették, ugyanakkor a nagy szórás miatt akár a felső köpeny eredetét is alátámaszthatják. A riolitok $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ aránya túl csekély ahhoz, hogy a magma időszialikus kéreg újraolvadásából származzon, viszont az izotóp arány változatos, ami keveredésre is utalhat. Hasonló a helyzet a Nd és az Pb izotópok esetében. Ezek alapján tehát az anyag egyidejűleg származhat részben a felső köpenyből, másrészt a felső kéregből, míg az alsó köpeny eredet valószínűleg kizárható (CHRISTIANSEN 2001). Másrészről viszont NASH et al. (2006) Nb és Hf vizsgálataik alapján valószínűsítik az alsó köpenyből származó feláramlás létét.

CHRISTIANSEN et al. (2002) szerint a nagy hőáramlás az ellentétes irányban fejlődő Newberry és Yellowstone rendszer esetében magyarázható a tektonikus környezettel. Az Észak-Amerikai-lemez a mezozoikumban és a korai terciárban erősen felfűtött és deformált volt, a nyomás a középső miocénben lecsökkent, így a már korábban is táguló régiók extenziója megnőtt és kiterjedt a medenceterületekre is.

A regionális tektonikus extenzió a litoszféra vékonyodását okozta, ami miatt a felső köpeny megemelkedett, és az alsó kéregbe bazalt intrúziók nyomultak be, amelyek megnövelték a kéreg hőmérsékletét, plaszticitását és felfokozott hőáramot generáltak. Ennek következtében alakult ki egy északnyugat-délkeleti csapású rift jellegű rendszer, amely létrehozta a nyugati országrész miocén bazalt platóit. E folyamat 3 millió év múltán kiterjedt, s nyugat-keleti irányban egyaránt távolodott a rift

tengelyétől. Eközben a centrális rész bazaltos vulkanizmusa – feltehetően a csökkenő hőáram miatt – fokozatosan inaktiválódott. A folyamat napjainkig önfenntartó maradt.

A Snake River Plain–Yellowstone bimodális vulkáni lánc jellemzése

A vulkanizmus tovaterjedése több, mint 100 nagy méretű kalderát hozott létre Nevada-Oregon határától a Snake River-fennsíkon keresztül a Yellowstone-vidék központi részéig. A Yellowstone hőmérsékleti anomália az elmúlt 12,5 millió év alatt 450km-t vándorolt északkelet felé, így sebessége átlagosan 4cm/év.

A vulkanizmus alapvetően bazaltos-riolitos jellege és az intermedier kőzetek hiánya felveti a kérdést, hogy a különböző magmák azonos helyről származnak-e, és egyazon olvadátkból differenciálódtak vagy különböző helyekről származó olvadátkok eltérően fejlődött termékei. Az izotópos vizsgálatok ez utóbbit támasztják alá.

Geokémiai kutatások szerint a Yellowstone alatt mafikus-intermedier kéreg található, nagy kiterjedésű piroxén granulit tömegekkel. Így – e mérési eredményekkel összhangban – a bazaltos magma származhat a tektonikus folyamatok hatására megolvadó felső köpenyből, ahonnan felemelkedve átfűti a kérget, részlegesen újraolvadva annak legkisebb olvadáspontú részeit, a granitoidokat. Az így létrejövő kétféle magma csak esetlegesen találkozott, amikor egyazon töréseken nyomultak a felszín irányába. Közöttük és a felső kéreg között egyaránt jelentős lehetett a kontaminatív kölcsönhatás.

A vulkáni aktivitás minden időszaka kis kálium-tartalmú bazaltos vulkanizmussal kezdődött, mivel a differenciálódás korai szakaszában a kisebb viszkozitású bázisos magmatestek gyorsabban mozoghattak a felszín irányában.

Ezeknek a korai felnyomulásoknak a felfűtő hatására létrejött riolitos kéregolvadátkok lassú mozgásuk során instabil környezetekbe jutva, hirtelen kigázósodtak, finomszemű savanyú tufaárakat hozva létre. Esetünkben az intruzív/extruzív arány 10 körüli értékű (SMITH & SHAW 1975).

A kezdeti jelentősebb magmafelnyomulásokat a kaldera beszakadása, majd kitöltődése követte. A vulkáni mező peremén főként bazaltlávák kerültek felszínre, míg a lassabban emelkedő, magmakamrában rekedt savanyú olvadék a terület felfűtöttsége miatt lassan szilárdult gránitplutonokká.

E mélységi testek kihűlési repedésein keresztül a visszamaradt, lefojtott, bazaltos összetételű magma felnyomulva nagy kiterjedésű lávaárakat hozott létre. Ez utóbbi bazaltok összetétele azonban különbözik a sorozatot indító, kalderaperemi helyzetű bázisos magmától. K, Ti és P tartalomban gazdagabb, viszont Ca-ban szegényebb, s emellett nagyobb Fe/Mg arány jellemzi (STONE 1967).

Analógiák alapján a savanyú mélységi magma megszilárdulásához az adott esetben kb. 1 millió év időtartam szükséges. Ennek alapján a Yellowstone vidék harmadik fázisban lejátszódó magmatizmusa még a pluton kialakulás stádiumában van, amit a földrengésvizsgálatok (HUSEN et al. 2004), a magnetotellurikus (STANLEY et al. 1977) és mágneses mérések (SMITH et al. 1977) is

mege erősítenek, ugyanis a kaldera alatt 5-6km mélyen olvadt anyagot mutattak ki. Ez a ma is aktív folyamat nagy felfűtöttséget és intenzív hőáramot indukál, amely a Föld kontinentális kérgének egyik legjelentősebb geotermális/hidrotermális mezőjét alakítja ki.

Negyedidőszaki eljegesedés nyomai

A harmadik kitérőt követően két eljegesedési időszak formálta a területet. 140000 évvel ezelőtt a Bull Lake időszaki gleccserek borították a vidéket. Ez az eljegesedés délebbre és nyugatabbra jobban kiterjedt, mint a következő, 70000–14000 éve lezajlott Pinedale eljegesedés. Az előbbi nyomát északon és keleten nem találták, aminek az lehet a magyarázata, hogy ezeken a területeken a Pinedale eljegesedés elpusztította a korábbi Bull Lake eljegesedés nyomait. Legnagyobb kiterjedésekor, 25000 éve a jég beborította majdnem az egész jelenlegi nemzeti park területét. A jégmező azonban nem a kanadai jégmező déli nyúlványa volt, hanem valószínűleg azért alakult ki, mert az emelkedő magma megemelte a területet, és a hidegebb éghajlatú, magasabb területen több csapadék hullott, mint a környező térszíneken (PIERCE 1979). Ennek valószínűségét csekélynek tartjuk, mivel több száz méteres emelkedésnek kellett volna bekövetkeznie, amire nem látunk valószínűsíthető bizonyítékot. Az okot feltehetőleg a terület orogén emelkedésére, regionális klimatikus okokra, változásokra lehet visszavezetni.

Az eljegesedés nyomait a park területén számos helyen megfigyelhetjük. Ettől északra a Yellowstone-folyó völgyében az egykori Yellowstone-gleccser végmorénájának maradványai tanulmányozhatók. Livingstone-tól délre, a Yellowstone-völgy keleti felében nagy végmoréna-halmok gátolják el az Absaroka-hegység felől érkező völgyek bejáratát, ami azt bizonyítja, hogy e völgyeket egykor gleccserek mélyítették.

Cooke Citytől nyugatra, Tower Junction közelében hatalmas, jég szállította prekambriumi gránittömbök találhatóak. A Lamar-folyó és mellékvizei mentén számos csuszamlás és sárfolyás utal az egykori eljegesedésre, s ilyen eredetű jég szállította hordalékkal találkozhatunk a Yellowstone-folyó Grand Canyonjában is (FRITZ 1996).

A Yellowstone hidrotermás jelenségei

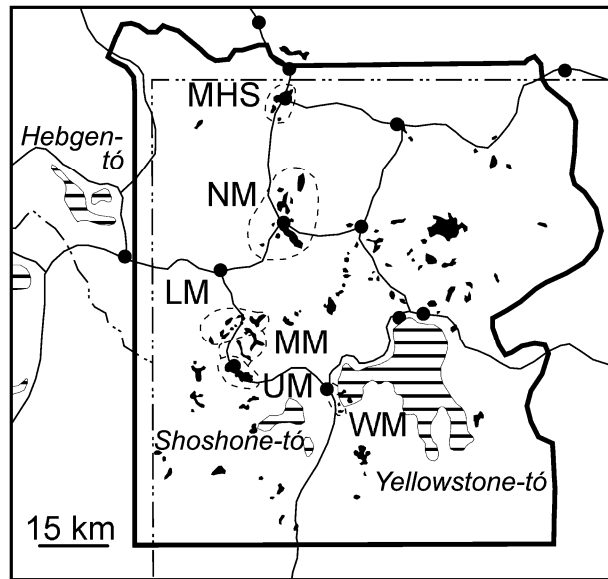
Gejzírek

A park mai arculatát legmarkánsabban a hidrotermás jelenségek határozzák meg. Közülük ritkaságuk és ismeretségük alapján legjelentősebbek a gejzírek. Kialakulásukhoz kéregbeli földhőforrásra, porózus vagy hasadékos tárolóközetre, a hőt a felszínig szállító vízre van szükség. A környező hegyekből összegyülekező víz a gejzírmédencék kéregpedéseiben leszivárogyva fokozatosan 100°C fölé melegszik, de a nagy hidrosztatikai nyomás miatt nem válik gőzzé. A Yellowstone felső kérgének erőteljes felfűtöttsége miatt a víz már relatíve kis mélységben elérheti azt a hőmérsékleti határértéket, amelynél sűrűsége olyan mértékben lecsökken, ami az intenzív termogravitatív konvekció megindulását és tartós fennmaradását eredményezi. A rendszerben cirkuláló víz egy ponton eléri az ott jelen levő nyomáshoz tartozó forráspontját, és részben gőzzé alakul, ami képes megemelni a felette levő vízoszlopot. Az emiatt felszínre

nyomuló víz hatására a rendszerben lecsökken a nyomás, ami felfokozza a gőzképződést és kitérőt eredményez.

A kitérések általában szabályos időközönként ismétlődnek, de a vízutánpótlás egyenlenségei, vagy a külső hűtőhatás változásai, esetleg a geotermális hőáramban bekövetkező ingadozások szabálytalaná tehetik a működést. Ha a vízutánpótlás lecsökken, vagy a rendszer lehűl, akkor a gejzír működése leáll, de ez nem jelenti automatikusan a vízfeltörések teljes és azonnali megszűnését.

Jelentős mennyiségű hévíz tör fel a nemzeti park területén. Forrásaik élénk színét baktériumok és algák okozzák. Előbbiek a hévízmedencék legforróbb részein, a felszínre törési helyeken tenyésznek, míg az algák a hűvösebb peremi vizekben élnek tömegesen.



Jelkulcs - Legend

- hidrotermás jelenség
hydrothermal features
- hidrotermás medence
hydrothermal basin
- tó
lake
- államhatár
state border
- nemzeti park határ
national park's boundary
- jelentősebb út
important road
- település
village

9. ábra Hidrotermás jelenségek területi helyzete a Yellowstone Nemzeti Parkban

MHS: Mammoth Hot Springs; NM: Norris-medence; LM: Lower-medence; MM: Midway-medence; UM: Upper-medence; WM: West Thumb-medence

Figure 9 Distribution of hydrothermal features in the Yellowstone National Park

MHS: Mammoth Hot Springs; NM: Norris-basin; LM: Lower-basin; MM: Midway-basin; UM: Upper-basin; WM: West Thumb-basin

Fumarolák

A fumarolák a park legforróbb hidrotermás jelenség közé tartoznak. Akkor alakulnak ki, ha a rendszerben olyan kevés víz van, hogy az még a felszín elérése előtt gőzzé alakul. Jellegzetes előfordulása a Roaring Mountain („Morajló-hegy”), ezen felül megtalálhatók a Yellowstone-

-tótól északra a Canyon és Fishing Bridge közötti területen és a Lower-medencében.

Iszapfortyogók

Ha a geotermális rendszerben kevés víz áll rendelkezésre, létrejöhetnek savas hévizek, iszapfortyogók is. Kialakulásukat néhány mikroorganizmus élettevékenysége segíti, mivel a mélyből felszálló kénhidrogént hasznosítják energiaforrásként. Az így kénsavassá váló gázok, gőzök a kőzeteket erőteljesen roncsolják és gáznemű bomlástermékek felszabadulása közben azok agyagos lebontódását idézik elő. Az iszapfortyogók állaga és aktivitása az évszaktól, valamint a csapadék mennyiségétől függ.

A parkban többek között a fumarolák közelében, Canyon és Fishing Bridge között, a Mud Volcano elnevezésű helyen, valamint a Lower-medencében található iszapfortyogókat. Ez utóbbi medence híres jelensége a Fountain Paint Pots nevű iszapfortyogó.

A Lower-medencében kapcsolat figyelhető meg a jelenségek működése és előfordulási helyei között. Az iszapfortyogók a medence peremén, a talajvízkészlet szintje felett alakulnak ki, míg ahol elegendő víz áll rendelkezésre, a medencebelsőben, ott gejzírek találhatók.

Gejzíriték, mésztufagátak

A felfelé emelkedő forró víz a savanyú alapközetből kevés kovasavat, a mészkövekből pedig kalciumot és hidrogénkarbonátot old ki. A felszínre törve lehűlő oldatokból kovaanyagú gejzírit és édesvízi mészkő csapódik ki, miáltal nagyméretű gejzírkúpok, medencék jönnek létre. A lerakódás viszonylag gyors üteme miatt ezek a jelenségek állandóan és gyorsan változnak. Így keletkezett a Mammoth Hot Springs nevű hévízfeltörésnél a lépcsőszerű tetarata rendszer a park ÉNy-i részén.

Az oldott anyagok kiválása tehát többféle lehet mind anyagi összetétel, mind pedig alaki megjelenés szempontjából. Legjellemzőbbek a gyűrűszerű, majd kúpszerű kiválások, a réteges lerakódások, bevonatok, bekérgezések, ritkábbak a szenteltvíztartóra emlékeztető, helyenként lépcsős tetarata gát és medencesorok. Pangó és állóvizekben figyelhető meg a vékony, törékeny felületi bekérgezés, „bőrösödés”.

Ez az intenzív oldott anyag kicsapódás szab határt a gyakorlati hasznosításnak, mivel fúrások termelő csöveiben, illetve a szállító csőhálózatban gyors vízkövesedést, keresztmetszet szűkülést, sőt teljes elzáródást okozhat. Ez teszi szükségessé – viszonylagos rendszerességgel – a termálvíz kútak nem kifejezetten környezetbarát savazását.

A Mammoth Hot Springs forráscsoport területén a becslések szerint 550 l/s vízhozamú, közel 70 °C-os források lépnek a felszínre. Oldottanyag-tartalmuk változó, 100–3000 mg/l közötti, vizük kalciumos-nátriumos-hidrogénkarbonátos-szulfátos (SOREY & COLVARD 1997).

Viszonyítási alapul nézzünk pár hazai adatot az oldott anyagra vonatkozóan. Egerszalókon a Bükk DNy felé lezökkenő triász–eocén mészköveinek termokarsztjából a szerkezet- és szénhidrogénkutató fúrások alig 400 méter mélységből 68–70°C-os hévizet tártak fel. A két fúrás vizének oldott sótartalma 700mg/l körüli, ami naponta több mint 150kg, bizonyos helyeken 8% elemi ként

tartalmazó édesvízi mészkő kicsapódást jelentett 500–600l/perc kifolyás mellett (HORVÁTH et al. 1990).

A Yellowstone természetes úton felszínre jutó forrásai ennél kisebb és nagyobb értékeket adnak. Hévízmezőjének kiterjedése és vízforgalmának mértéke azonban nagyságrenddel nagyobb és a rendszer több tíz-, illetve százezer év óta működik, a kiválások össz mennyisége így megbecsülhetetlen.

Hidrotermás jelenségek területi eloszlása

A nemzeti parkban megfigyelhető több mint 350 hévízfeltörés közül évente 200–50 tör ki gejzírként. Többségük a park központi részén elhelyezkedő négy gejzírmedencéhez kapcsolódik, melyek északról délkelet felé haladva a következők: Lower-, Midway-, Upper- és West Thumb-medence.

A Lower-medencében kellő vízmennyiség hiánya miatt csupán néhány gejzír figyelhető meg. A kis méretű Midway-medencében viszont Észak-Amerika legnagyobb hévizes forrása (Grand Prismatic), és egy korábbi nevezetes gejzír (Excelsior) ismeretes. Az Excelsior 1888-ban tört ki utoljára, azóta hévizes forrásként működik. Utolsó kitörésekor a kilövellő túlhevített víz jelentős pusztítást végzett a környezetében. Ha a repedéseket a jövőben a földrengésekkel elmozduló kőzet vagy a kicsapódó mésztufa beszűkítene, a rendszer ismét gejzírként működhetne.

A fentiekől déli irányban, a Yellowstone-kaldera egyik emelkedő térszínének nyugati oldalán található az Upper-medence a híres Old Faithful gejzírral. A világ gejzírjeinek egy ötöde az Old Faithful körzetében összpontosul. A park központi részén a felszín alatt cirkuláló víz csak savanyú kőzetekkel érintkezik, azokból kovasavat old ki, a felszínen lassan növekvő gejzírit kúpokat képezve.

A területen igen aktív a szeizmicitás, a jelenlegi térszínemelkedés egy újabb vulkánkitörés előjele lehet. Az 1983-as 7,1-es erősségű Mount Borah-i földrengés jelentős változásokat okozott és 37 termális jelenséget érintett. A legszembetűnőbb változás az Old Faithful kitörései között eltelt átlagos idő növekedése volt, aminek oka valószínűleg az, hogy a víz nem tud kellő gyorsasággal visszajutni a tárolóközetbe a földrengés okozta változások miatt (FRITZ 1996).

A földhő erőművi hasznosításának lehetőségei

Az Amerikai Egyesült Államokban a geotermális erőművi villamosenergia-termelés a kontinentális részen Kalifornia, Nevada és Utah területére koncentrálódik. E három szövetségi állam területén 2005-ben összesen közel 190 elektromos áram termelésére alkalmas termelő egység létezett 2500MWe beépített, 1900MWe tényleges teljesítménnyel, a világ beépített kapacitásának 28,7%-ával (BERTANI 2005).

A legtöbb termelő egység Kaliforniában épült, s itt található a világ legnagyobb teljesítményű, geotermikus energiára épülő erőműve a The Geysers, amelynek 23 beépített egysége 1421MWe névleges teljesítményével és 2004-ben termelt 7784GWh energiájával közel kétszerese a második legnagyobb teljesítményű (mexikói, illetve fülöp-szigeteki) erőműveknek.

A működő geotermális erőművek többnyire 100MWe alatti teljesítményűek, ezen belül minden teljesítménytartomány képviselve van, a legkisebbek 2–5MWe-osak.

Kaliforniát a termikus hőáram szempontjából szélsőségek jellemzik, ami gyűrt orogén jellegéből, és helyenként aktív tektonikai voltából következik. Területi átlagai a 40–100mW/m² között ingadoznak és adottságai ennél fogva lényegesen kedvezőtlenebbnek tűnnek, mint a Snake River Plain–Yellowstone-vonal aktív zónái (BLACKWELL & RICHARDS 2004).

A The Geysers erőmű környezetében érdekes módon viszonylag korlátozott kiterjedésű területen jelentkeznek kiemelkedő hőáramértékek. Az Észak-Dakota Egyetem adatbázisa (www.heatflow.und.edu) szerint az itt mérhető hőáramérték 418mW/m². Ez kiemelkedő a környezetéhez képest, ahol csekély a 100mW/m²-nél nagyobb mérhető értékek száma. A mezőtől nyugatra 60–90mW/m², között változik, a keleti területeken pedig mindössze 20–60mW/m² körüli értékeket mutat.

A Yellowstone rendszerben mind a parkon belül, mind annak környezetében lényegesen kedvezőbb hőáram mérhető ki. A sekély mélységben mért legkedvezőtlenebb értékek is többnyire meghaladják a 100mW/m² értéket, az átlagosak 200–600mW/m² között szóródnak, míg a legnagyobbak meghaladják a 4000mW/m²-t. Utóbbiak az Amerikai Egyesült Államokban kimutatott legnagyobb hőáram-értékek, amennyiben az aktív vulkánok kirtó környéki részeit nem számítjuk.

FOURNIER et al. (1976) szerint a Yellowstone Nemzeti Park területén a konvektív hőáram becslült értéke 5300MW, ami közel 600mW/m²-es fajlagos értéket jelent. A 2,8km² nagyságú Midway medence hőárama a kloridtartalom mérésén alapuló számítások szerint 520MW, azaz közel 200000mW/m². Hasonló teljesítményű a 11 km²-es Upper-medence, melynek hőárama közel 50000mW/m². A nagyobb, 32,7km² nagyságú Lower-medence összteljesítménye alacsonyabb hőárama (31500mW/m²) ellenére is magas, 1000MW feletti (FOURNIER et al. 1971). A tőlük északra található Norris-gejzirmedence hőáramát 200–400MW-nak (FOURNIER et al. 1976), a Mammoth geotermikus rendszer hévizekhez köthető hőáramát pedig 220MW-nak becsülik (SOREY & COLVARD 1997). Megjegyzendő, hogy a hőáramok meghatározása indirekt módszerekkel történt, melyek érzékenyek arra, hogy a felszín alatti víz hol kerül a felszínre. Így a Midway-medence nagy hőértéke annak köszönhető, hogy a hűtőanyag nem csupán a medence geomorfológiai határain belülről érkezik, hanem vélhetően sokkal nagyobb területről, a felszín alatti rezervoár mérete azonban nem képezte a kutatás tárgyát. Bizonyos az is, hogy ezek az extrém nagy hő-utánpótlódási értékek az aktív feláramlási zónáktól távolodva erőteljesen, valószínűleg exponenciálisan csökkennek.

A technikai ésszerűség azt diktálná, hogy a Snake River Plain–Yellowstone-vonal legaktívabb részein telepítsenek áramtermelő geotermális erőműveket. Nyilvánvalóan tekintetbe kell venni a természetvédelem érdekeit, hiszen az 1978 óta a Világörökség részét képező nemzeti park termikus jelenségeit nem szabad veszélyeztetni.

A régióban azonban számos ponton kimutatható, hogy bár a hőforrások 5–6km mélyen találhatóak, a felszín közeli zóna oly mértékben fel van fűtve, hogy az áramfejlesztő generátorok ideális működéséhez szükséges nagy hőfokú

gőzök kiaknázásához elegendő lenne kis mélységű fúrásokat telepíteni. Ezzel jelentősen mérsékelhető a környezeti hűtőhatás horizontális kiterjedése.

További korlátozó tényező, hogy a parkban működő természetes hidrocirkulációs rendszer készleteit sem mennyiségi, sem minőségi értelemben nem szabad bolygatni, megcsapolni vagy dúsítani, mert ennek következményei beláthatatlanok lehetnek. Ennek törvényi szabályozását viszont a mai napig sem sikerült elérni. Az 1994-es Old Faithful Protection Act például többek között kijelölt volna egy 24km-es geotermikusfejlesztés-mentes pufferövezetet a nemzeti park köré Wyoming és Idaho államokban, de a törvényt a kongresszus nem fogadta el.

Ezért előtérbe kerülnek az olyan kutatások, melyek a nemzeti park hidrogeológiai és geotermikus kapcsolatait vizsgálják a környező területekkel. Kimutatták például, hogy a park északi részén levő törések kapcsolatot teremtenek a park határain túli forrásokkal. Ezek mellett több fúrás is mélyült, melyek azonban jelenleg nincsenek összekötésben a Yellowstone hidrotermás jelenségeivel. Ennek ellenére fokozott óvatossággal kell közelíteni a park határai közelében a geotermikus energia direkt használatához (SOREY & COLVARD 1997).

Potenciális lehetőségként kínálja magát a zárt rendszerű fluidumokon keresztül hőcserélővel leválasztható hőenergia, amely azonban az áttételek miatt beszűkíti és az optimumhoz képest erősen leszorítja az energiakivételi rendszerünk lehetséges hőmérsékleti határértékeit.

Mindezek figyelembevételével a Yellowstone park határain kívül lehetségesnek tartjuk több, kisebb geotermális áramtermelő központ kialakítását a Snake River Plain irányába haladva, ahol az említett termikusan legaktívabb zóna területén a felső kéreg aszeizmikus karakterű. A hőáramértékeket a kutatási sávon belül megfelelő sűrűséggel kellene kimérni egy talajhőmérési háló mentén. Ezekből az adatokból megszerkeszthető hőáramtérkép pozitív anomáliái megmutatják azokat a helyeket, ahol megfelelő mélyfúrásokban in situ termokarotázs mérések mellett a kőzetmagok hőtani tulajdonságait is szükségszerű lenne vizsgálni laboratóriumi körülmények között. Az így adódó optimális helyeken 2–3 különböző mélységig lehatoló fúrásban izoláltan vizsgálhatók lennének az egyes mélységi zónák, s a hőcserélővel környezetbarát módon kinyerhető hőkészlet.

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük Dr. Kozák Miklósnak, a Debreceni Egyetem Ásvány- és Földtani Tanszék vezetőjének a tanulmány elkészítéséhez nyújtott segítségét.

Irodalom

- ATWATER, T. 1970: Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. *Geological Society of America Bulletin* 81, 3513–3535
- BERTANI, R. 2005: World geothermal power generation in the period 2001–2005. *Geothermics* 34, 651–690
- BLACKWELL, D.D., RICHARDS, M. 2004: Geothermal Map of North America. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, 1:6,500,000

- ČERMÁK, V., RYBACH, L. ed. 1979: Terrestrial Heat Flow in Europe. Springer-Verlag, Berlin, 328 p.
- CHRISTIANSEN, R.L. 2001: The Quaternary and Pliocene Yellowstone Plateau volcanic field of Wyoming, Idaho, and Montana. U. S. Geological Survey Professional Papers 729-G 145 p.
- CHRISTIANSEN, R.L., FOULGER, G.R., EVANS, J.R. 2002: Upper-mantle origin of the Yellowstone hotspot. *Geological Society of America Bulletin* 114, 1245–1256
- CHRISTIANSEN, R.L., YEATS, R.S. 1992: Post-Laramide geology of the U.S. Cordilleran region. In: BURCHFIEL, B.C. LIPMAN, P.W., ZOBACK, M.L. (ed.): The Cordilleran orogen: Conterminous U.S. Geological Society of America Boulder, Colorado, The Geology of North America. v. G-3, 261–406
- DAMBERGER, H.H. 1991: Coalification in North American coal fields. In: GLUSKOTER, H.J., RICE, D.D., TAYLOR, R.B. (ed.): Economic Geology, U.S. Geological Society of America, Boulder, Colorado 503–522
- DZURISIN, D., WICKS, C., THATCHER, W. 1999: Renewed uplift at the Yellowstone Caldera measured by leveling surveys and satellite radar interferometry. *Bulletin of Volcanology* 61, 349–355
- FOURNIER, R.O., WHITE, D.E., TRUESDELL, A.H. 1971: Heat flow in Thermal Waters in Yellowstone National Park. In: Upper Mantle Project United States Program Final Report, National Academy of Sciences National Research Council, Washington, p. 111
- FOURNIER, R.O., WHITE, D.E., TRUESDELL, A.H. 1976: Convective heat flow in Yellowstone National Park. San Francisco, California, Proceedings of the United Nations Symposium on the Development and Uses of Geothermal Resources, v. 1, 731–739
- FRITZ, W.J. 1996: Roadside Geology of the Yellowstone Country. Mountain Press Publishing Company, Missoula, Montana 149 p.
- GLUSKOTER, H.J., RICE, D.D., TAYLOR, R.B. (ed.) (1991): Economic Geology. U.S. Geological Society of America, Boulder, 622 p.
- HARRIS, D.V. 1980: The Geologic Story of the National Parks and Monuments. John Wiley and Sons, New York., 325 p.
- HORVÁTH J., FÁNCZI A., SCHEUER GY. 1990: Az egerszalóki De. 42. és a De. 42/a. jelű hévízkút vízföldtani és vízkémiai vizsgálata. *Hidrologiai Tájékoztató* 30, 26–28
- HUMPHREYS, E.D., DUEKER, K.G., SCHUTT, D.L., SMITH, R.B. 2000: Beneath Yellowstone: evaluating plume and nonplume models using teleseismic images of the upper mantle. *GSA Today* 10, 1–7
- HUSEN, S., SMITH, R.B., WAITE, G.P. 2004: Evidence for gas and magmatic sources beneath the Yellowstone volcanic field from seismic tomographic imaging. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 131, 397–410
- JESSOP, A.M., HOBART, M.A., SCLATER, J.G. 1976: The world heat flow data collection–1975. Geothermal Series 5, Geothermal Services of Canada, Ottawa, p. 9.
- JOHN, D.A. 2001: Miocene and Early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the northern Great Basin, Western United States: characteristics, distribution, and relationship to magmatism. *Economic Geology* 96, 1827–1854
- JOHNSTON, S.T., THORKELOSON, D.J. 2000: Continental flood basalts: episodic magmatism above long-live hotspots. *Earth and Planetary Science Letters* 175, 247–256
- KISVARSÁNYI G. 2007: A Viburnum Trend felfedezése. Acta GGM Debrecina Geology, Geomorphology, Physical Geography Series Vol.: 2, 219–226
- KOZÁK M. 2000: Kubai vulkáni szigetív és atipikus orogén tektonosztratigráfiai-tektonomagmagenetikai rekonstrukciója és Kárpát-medencei tanulságai. habilitációs dolgozat, Debrecen, Debreceni Egyetem Ásvány- és Földtani Tanszék adattára, 207 p.
- MORGAN, W.J. 1972: Deep mantle convection plumes and plate motions. *Bulletin of American Association of Petroleum Geologist* 56, 202–213
- NASH, B.P., PERKINS, M.E., CHRISTENSEN, J.N., LEE, D-C., HALLIDAY, A.N. (2006): The Yellowstone hotspot in space and time: Nd and Hf isotopes in silicic magmas. *Earth and Planetary Science Letters* 247, 143–156
- PIERCE, K.L. 1979: History and Dynamics of Glaciation in The Northern Yellowstone National Park Area. U.S. Geological Survey, Professional Paper 729F. 91 p.
- PIERCE, K. L., MORGAN, L.A. 1992: The track of the Yellowstone hot spot: volcanism, faulting, and uplift. In: LINK, P.K. (ed.), Regional Geology of Eastern and Western Wyoming, Geological Society of America Memoire 179, Boulder, Colorado, 1–53
- PIRAJNO, F. 2004: Hotspots and mantle plumes: global intraplate tectonics, magmatism and ore deposits. *Mineralogy and Petrology* 82, 183–216
- SMITH, R. B. – BRAILE, L. W. (1994): The Yellowstone hotspot. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 61, 121–187
- SMITH, R.B., SHUEY, R.T., PELTON, J.R., BAILEY, J.P. 1977: Yellowstone hot spot: Contemporary tectonics and crustal properties from earthquake and aeromagnetic data. *Journal of Geophysical Research* 82, 3665–3676
- SMITH, R.L., SHAW, H.R. 1975: Igneous-related geothermal systems. In: WHITE, D.E., WILLIAMS, D.L., ed. Assessment of geothermal resources of the United States—1975. U. S. Geological Survey Circular 726, 58–83
- SOREY, M.L., COLVARD, E.M. 1997: Hydrologic investigations in the Mammoth Corridor, Yellowstone National Park and vicinity, U.S.A. *Geothermics* 26, 221–249
- STANLEY, W.D., BOEHL, J.E., BOSTICK, F.X., SMITH, H.W. 1977: Geothermal significance of magnetotelluric sounding in the eastern Snake River Plain-Yellowstone region. *Journal of Geophysical Research* 82, 2501–2514
- STONE, G.T. 1967: Petrology of upper Cenozoic basalts of the western Snake River Plain, Idaho. Ph.D. dolgozat, Boulder, University of Colorado, 392 p.
- TESTER, J.W. ed. 2006: The Future of Geothermal Energy. Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) in the United States in the 21st Century. Massachusetts Institute of Technology, 372 p.
- <http://www.heatflow.und.edu/data.html>