



Stanje izkoriščanja geotermalne energije in nekateri zanimivi dosežki v geotermalnih raziskavah in razvoju v svetu

The state of exploitation of geothermal energy and some interesting achievements in geothermal research and development in the world

Dušan RAJVER, Nina RMAN & Andrej LAPANJE

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija;
e-mail: dusan.rajver@geo-zs.si, nina.rman@geo-zs.si, andrej.lapanje@geo-zs.si

Prejeto / Received 29. 6. 2016; Sprejeto / Accepted 13. 7. 2016; Objavljeno na spletu / Published online 11. 8. 2016

Ključne besede: geotermalna energija, geotermalna elektrika, neposredna raba geotermalne energije, geotermalne toplotne črpalke, svet, Slovenija, znanstveno-tehnološki dosežki

Key words: geothermal energy, geothermal electricity, direct use of geothermal energy, geothermal heat pumps, World, Slovenia, scientific-technological achievements

Izvleček

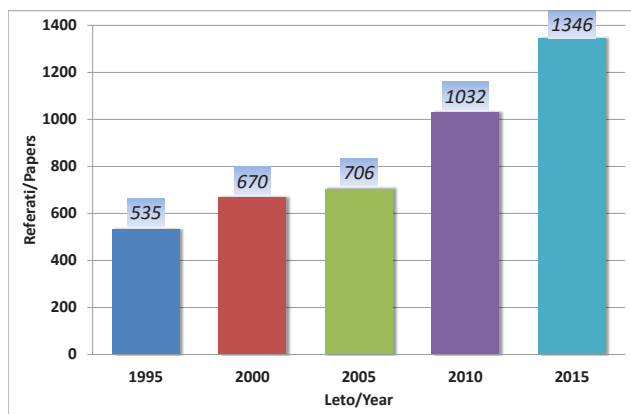
Pričujoči pregledni članek prikazuje najnovejše stanje izkoriščanja geotermalne energije v svetu in primerjavo s prejšnjim obdobjem, tako v proizvodnji električne energije kot v različnih kategorijah neposredne rabe. Proizvodnja elektrike iz geotermalnih elektrarn s skoraj 12,8 GW_e moči se odvija v 26 državah in je ob koncu leta 2014 dosegla 73.700 GWh. To je še vedno le 0,31 % vse proizvedene elektrike na svetu in pri tem bo zanimivo spremljati bodoči delež. V zadnjem petletnem obdobju je bil razvoj hiter predvsem v državah, kjer je bil le-ta v preteklosti počasnejši in, seveda, z ugodnimi geološkimi (tektonskimi) pogoji (Islandija, Kenija, Nova Zelandija, Turčija itd.). Neposredna raba geotermalne energije zajema bistveno več držav, danes kar 82, čeprav je med njimi nekaj takšnih, kjer se to odvija skoraj zgolj z geotermalnimi toplotnimi črpalkami (GTČ) na energijo plitvega podzemlja (Finska). Inštalirana moč v neposredni rabi znaša 70.885 MW_t in izkoriščena geotermalna energija, vključno z GTČ, kar 592.638 TJ/leto (ob koncu 2014). V izkoriščeni energiji prevladuje delež GTČ s kar 55,2 %, sledijo bazenski kompleksi za kopanje in plavanje z balneologijo z 20,2 %, ogrevanje prostorov s 15,0 % (večina za daljinsko ogrevanje), ogrevanje rastlinjakov in tal s 4,9 %, itd. V drugem delu prikazujemo nekaj zanimivih tehnoloških in znanstvenih novosti pri raziskavah in izkoriščanju geotermalne energije.

Abstract

The article presents the latest status of geothermal energy use worldwide and the comparison with the previous period, both in electricity generation as well as in the various categories of direct use. Electricity production takes place in 26 countries and has at the end of 2014 reached 73,700 GWh from geothermal power plants with nearly 12.8 GW of installed power. This is still only 0.31 % of the total electricity produced in the world and it will be interesting to monitor the future share of geothermal energy in doing so. In the last 5-year period the development was particularly rapid in countries where it was slower in the past and, however, with favorable geological (tectonic) conditions (Iceland, Kenya, New Zealand, Turkey, etc.). Direct use of geothermal energy covers a significant number of countries, today there are 82, although some of them are such where it takes place almost solely by geothermal (ground-source) heat pumps (GHP) on shallow subsurface energy (Finland). Installed capacity in the direct use is 70,885 MW_t and geothermal energy used, including the GHP, is 592,638 TJ/year (end of 2014). Within the used energy the share of GHP dominates with 55.2 %, followed by the bathing and swimming pools complexes incl. balneology by 20.2 %, space heating by 15.0 % (the majority of it is district heating), heating of greenhouses and soil with 4.9 %, etc. The second part presents some interesting technological and scientific innovations in exploration and exploitation of geothermal energy.

Uvod

Raznolika dejavnost v raziskavah in razvoju potencialnih geotermalnih polj kakor tudi izkoriščanje in tehnologija rabe geotermalne energije se v svetovnih razmerah še nadalje nezadržno širi, kar je pokazal tudi zadnji svetovni geotermalni kongres v Melbournu v aprilu 2015 (WGC, 2015, v GUTIÉRREZ-NEGRÍN, 2015). To se je videlo tudi po številu sprejetih referatov v primerjavi s prejšnjimi kongresi (sl. 1).



Sl. 1. Rast svetovnega geotermalnega kongresa v smislu sprejetih referatov (HORNE, 2015).

Fig. 1. The growth of the World Geothermal Congress in terms of papers accepted (HORNE, 2015).

Znova se je izkazalo, da so indirektne in površinske metode (geofizika, geokemija in geologija) še naprej zelo pomembne v raziskavah in upravljanju geotermalnih virov. Številni referati o raziskavah kažejo, kako dejavno in zahtevno je iskanje novih virov. Poleg tega še nikoli ni bilo toliko referatov namenjenih raziskavam v zvezi s izboljšanimi geotermalnimi sistemi (angl. Enhanced Geothermal Systems, EGS) kot ravno na tem kongresu. Čeprav so potekali v zadnjem desetletju številni projekti na več celinah, so pogloblitve težave, vezane na vrtnanje in stimulacijo rezervoarja, upočasnile razvoj te tehnologije. Kot rezultat je danes v poskusnem obratovanju le nekaj demonstracijskih pilotnih elektrarn (v ZDA in Avstraliji), med stalno delujočimi pa sta sedaj edini Soultz-sous-Forêts (Renski tektonski jarek) v Franciji, in Habanero v severovzhodnem delu Južne Avstralije, njuna skupna inštalirana moč pa je 2,5 MW_e.

Proizvodnja električne energije iz geotermalne energije v svetovnem merilu ni ravno vsepovsod prisotna, saj se še vedno večinoma odvija le v državah, ki ležijo na robovih aktivnih tektonskih plošč. Bistveno bolj je razširjena neposredna raba geotermalne energije, namreč v kar 82 državah na vseh petih celinah (od skupno 204 držav sveta). Zanimivo je, da je na vsaki celini razmerje med inštalirano močjo geotermalnih elektrarn in proizvedeno elektriko približno enako. Obe Ameriki in Azija (brez Oceanije) proizvedejo skupaj preko 65 % vse geotermalne elektrike. Glede neposredne rabe pa je znatno

padlo razmerje inštalirane kapacitete glede na izkoriščeno energijo za vso Ameriko, saj je tam 27,7 % vse svetovne inštalirane moči in le 16,9 % vse svetovne izkoriščene geotermalne energije v neposredni rabi. To je posledica visokega deleža geotermalnih toplotnih črpalk z nizkim faktorjem izkoristka (razpoložljivosti) za tovrstne enote v ZDA in Kanadi, kar velja sicer tudi v mnogih evropskih državah.

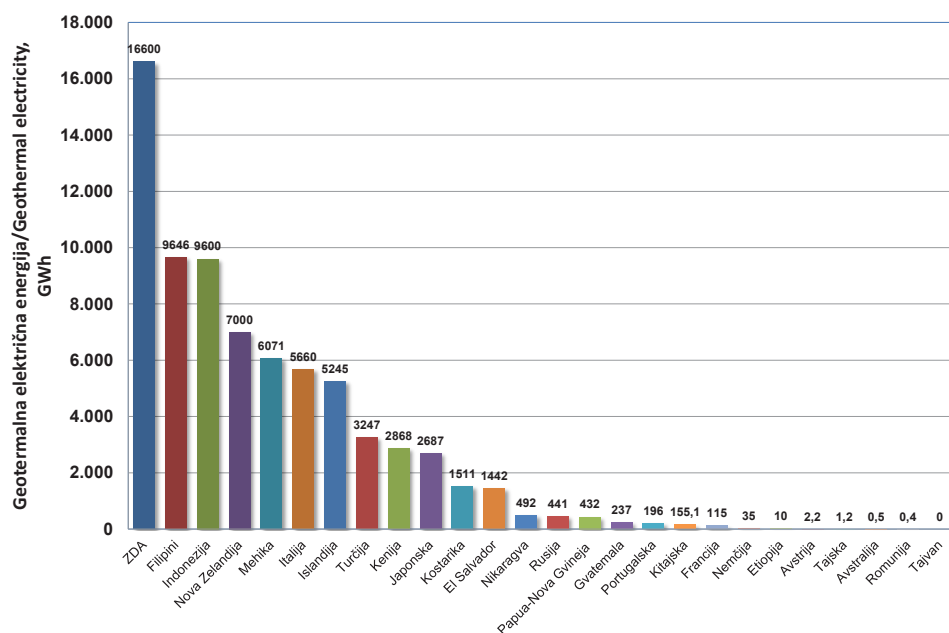
Izkoriščanje geotermalne energije v letu 2014

Številke o izkoriščanju geotermalne energije, tako za proizvodnjo električne energije kot za njeno neposredno rabo, prikazujemo v preglednicah 1 do 5 in slikah 2 do 8 šele za leto 2014, saj so BERTANI (2016) ter LUND & BOYD (2016) z zbiranjem svetovnih podatkov zaključili, z dopolnitvami vred, že v juniju 2015.

Proizvodnja električne energije iz geotermalne energije

Električno energijo iz geotermalnih virov proizvajajo v 26 državah, pri tem sta Grčija in Argentina zaprli svoji elektrarni zaradi neznanih okoljskih in ekonomskih razlogov že pred letom 2010. Vendar sta do leta 2020 obe napovedali postavitev novih geotermalnih elektrarn z močjo 40 oziroma 30 MW_e. Poleg tega postavitev prvih geotermalnih elektrarn napoveduje še precej drugih držav (BERTANI, 2015, 2016; IGA, 2016): Alžirija, Argentina, Armenija, Bolivija, Kanada, Čile, Češka, Djibuti, Dominika, Ekvador, Grčija, Honduras, Hrvaška, Madžarska, Indija, Iran, Latvija, Montserrat, Nizozemska, Nevis, Peru, Poljska, Slovaška, Španija, Švica in Velika Britanija. Predvsem v evropskih državah naj bi šlo skoraj izključno za binarne elektrarne. Parnoprevladujoči vir (suha para) se seveda lahko izkorišča neposredno na turbinah, medtem ko se mora vir vroče vode z znižanjem tlaka bliskovito upariti, da se proizvaja para (za opis tehnologije glej članek RAJVER in sod. (2012)). Nizkotemperaturni viri, ki prevladujejo v evropskih geotermalnih sistemih, s temperaturo večinoma pod 150 °C, zahtevajo uporabo sekundarnega fluida z nizkim vreliščem za ustvarjanje pare v binarni ali t.i. ORC (angl. Organic Rankine Cycle) elektrarni. Potem ko para zapusti turbino, se navadno uporablja mokri ali suhi hladilni stolp za kondenzacijo pare, da se do skrajnosti poveča temperaturni padec med prihajajočo in odhajajočo paro ter tako poviša učinkovitost delovanja.

Proizvedena elektrika je na svetu porazdeljena glede na tip elektrarn takole (BERTANI, 2015): 23 % elektrarne na suho paro, 41 % na enojno uparitev, 19 % na dvojno uparitev, 2 % na trojno uparitev, 12 % na binarni in kombinirani cikel, 2 % na hibridne in 1 % na znižani tlak. Ob koncu leta 2014 je celotna svetovna kapaciteta vseh elektrarn znašala 12.731 MW_e, proizvedena električna energija iz njih pa 73.694 GWh. Slika 2 kaže proizvedeno električno energijo iz geotermalne



Sl. 2. Proizvedena električna energija (GWh) iz geotermalne energije v svetu po državah. Skupno proizvedene elektrike je 73.694 GWh ali 0,31 % svetovne neto proizvodnje (23.536.500 GWh). Podatki so večinoma za leto 2014 (BERTANI, 2016).

Fig. 2. Produced electricity (GWh) from geothermal energy worldwide per countries. Total energy is 73,694 GWh or 0.31 % of world net production (23,536,500 GWh). Data are mostly for 2014 (BERTANI, 2016).

energije za vseh 26 držav, kot je bilo poročano v letu 2015. Podatke za vodilne države v proizvodnji elektrike iz geotermalne energije kaže tabela 1. Eden od pomembnih vidikov razvoja geotermalnih elektrarn je delež njihovega prispevka v državni in regionalni kapaciteti ter proizvodnji električne energije določenih držav. Kar osem držav in tri regije vodijo v takšnem prispevku z več kot 10 % proizvedene električne energije iz geotermalnih elektrarn (tab. 2). Omenimo lahko, da za celotno Italijo veljata deleža 0,8 % (v kapaciteti) oziroma 1,9 % (v proizvedeni elektriki), denimo za Mehiko le 1,7 % oziroma 2,3 %, in za ZDA le 0,3 % oziroma 0,5 % (samo za Kalifornijo pa 4,4 % proizvedene elektrike).

Tabela 1. Vodilne države v proizvodnji elektrike (podatki veljajo večinoma za leto 2014) iz geotermalne energije z vsaj 100 MW_e inštalirane moči elektrarn (BERTANI, 2015, 2016).

Table 1. Leading countries in electricity generation (data mostly for 2014) from geothermal energy with at least 100 MW_e of installed capacity (BERTANI, 2015, 2016).

Država/Country	Inštalirana moč/ Installed capacity (MW _e)	Letna proizvedena energija/Annual electricity produced (GWh)
ZDA/USA	3450	16600
Filipini/Philippines	1870	9646
Indonezija/Indonesia	1340	9600
Nova Zelandija/New Zealand	1005	7000
Mehika/Mexico	1058	6071
Italija/Italy	916	5660
Islandija/Iceland	665	5245
Turčija/Turkey	407	3247
Kenija/Kenya	636	2868
Japonska/Japan	520	2687
Kostarika/Costa Rica	207	1511
El Salvador	204	1442
Nikaragva/Nicaragua	159	492

Tabela 2. Delež kapacitete geotermalnih elektrarn v skupni inštalirani moči elektrarn in v proizvodnji električne energije iz geotermalnih elektrarn v izbranih državah in regijah, po poročanju v 2015 (BERTANI, 2016).

Table 2. Proportion of the capacity of geothermal power plants (PPs) in a total installed capacity of PPs and in the electricity production from geothermal PPs in selected countries and regions, as reported in 2015 (BERTANI, 2016).

Država ali regija/ Country or Region	% državne ali regionalne kapacitete/ % of national or regional capacity (MW _e)	% državne ali regionalne električne energije (GWh/leto)/ % of national or regional electricity (GWh/yr)
El Salvador	13,7	24
Filipini/Philippines	11,4	14
Francija/France*, Guadeloupe	9	9
Indonezija/Indonesia	3,4	4,5
Islandija/Iceland	25,8	29
Italija/Italy*, Toskana/Tuscany	25	33
Kenija/Kenya	27,2	50
Kitajska/China*, Tibet	25	25
Kostarika/Costa Rica	7,4	15
Nikaragva/Nicaragua	13,5	10
Nova Zelandija/New Zealand	10,4	16,2
Papua-Nova Gvineja/ Papua-New Guinea	7,1	13
Portugalska/Portugal*, Azori/Azores	22	22

*Številke veljajo le za omenjene regije v označenih državah. Za Tibet odstotka nista točno znana. / Numbers are only valid for the above mentioned regions in the designated countries. Tibet percents are not exactly known.

Slika 3 kaže precej drzno napoved v dvigu inštalirane kapacitete geotermalnih elektrarn na svetu do leta 2020, ki jo BERTANI (2016) temelji na številnih načrtih v državah, ki doslej še niso postavile nobene geotermalne elektrarne ter na številnih zarisanih in po dolgotrajnih raziskavah že ovrednotenih projektih, katere naj bi končno pretvorili v dejanske elektrarne. Ta izziv bo, kot pravi BERTANI (2016), sposoben pokazati celotni geotermalni skupnosti jasen znak o možnosti in pripravljenosti geotermalne industrije biti eden od najpomembnejših dejavnikov med obnovljivimi viri energije na bodočem trgu elektrike. BERTANI (2016) je prav tako ocenil pričakovane geotermalne cilje za leto 2050:

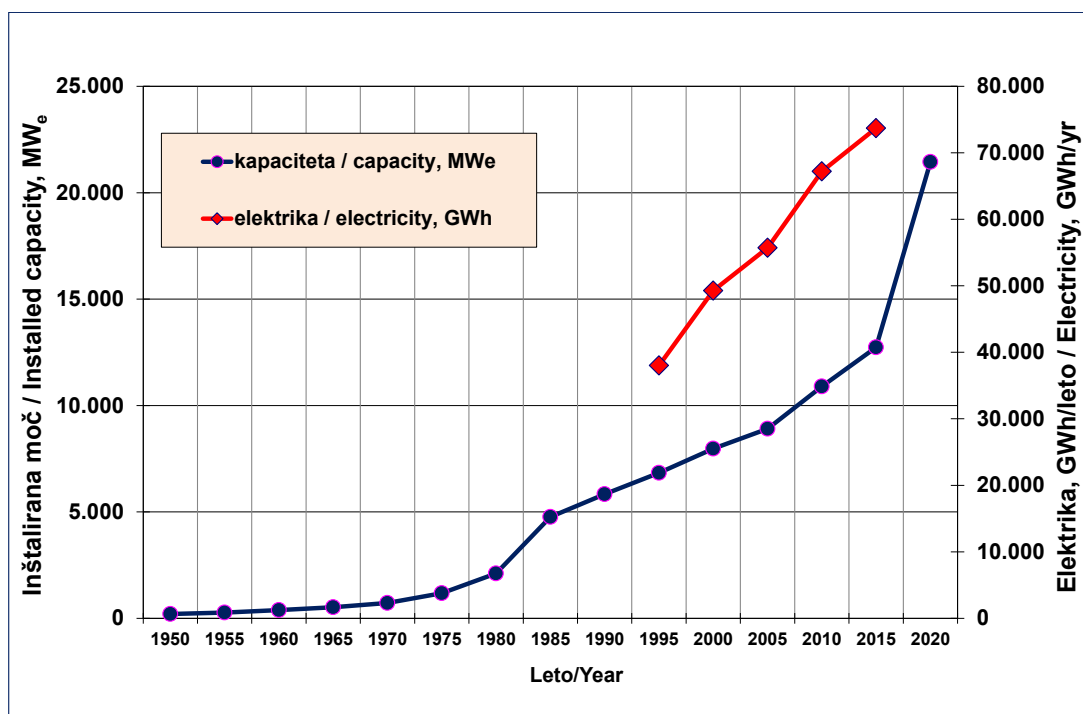
- iz hidrotermalnih virov: 70 GW_e, oziroma
- skupno 140 GW_e (vključno z EGS sistemi in drugimi nekonvencionalnimi viri)

Če bi bil dosežen cilj 140 GW_e, bi bilo možno proizvajati do 8,3 % skupne svetovne elektrike samo iz geotermalne energije, kar bi pokrilo potrebe 17 % svetovnega prebivalstva. Še več, približno 40 držav, večinoma v Afriki, Srednji in Južni Ameriki ter na pacifiškem območju, bi lahko 100 % pokrilo svoje potrebe po elektriki iz geotermalne energije. Ocenjena kapaciteta 21,4 GW_e za leto 2020 (sl. 3) je v skladu z dolgotrajno napovedjo za standardna hidrotermalna polja. Vseeno pa je morda ta napoved preveč optimistična, glede na to, da je BERTANI (2010) še pred šestimi leti za leto 2015 napovedal za vse elektrarne na svetu skupno inštalirano moč 18.500 MW_e, od katerih pa smo še precej oddaljeni.

V letu 2015 so postavili in priključili v omrežje še nekaj sto MW_e iz novih elektrarn, tako da je stanje ob koncu 2015 znašalo okrog 13,2 GW_e (SAWIN et al., 2016). Prav zanimivo bo videti, koliko se bo skupna kapaciteta približala napovedanemu cilju. Omenimo lahko tudi to, da je na Japonskem gradnja novih geotermalnih elektrarn skorajda zastala, japonski proizvajalci turbin in druge opreme za geotermalne elektrarne pa so zelo dejavni drugod po svetu in zasedajo prva tri mesta. Naštejmo pet najpomembnejših proizvajalcev na svetu: Toshiba, Mitsubishi, Fuji (vsi trije Japonska), Ormat (Izrael in ZDA) in Ansaldo-Tosi (Italija).

Neposredna raba geotermalnih virov

Za svetovni pregled sta LUND & BOYD (2016) zbrala podatke iz 65 držav, ki izkoriščajo geotermalno energijo za neposredno rabo toplote. K temu sta dodala še druge vire informacij iz 17 držav, ki niso poročale za zbornik kongresa WGC 2015. Neposredna raba geotermalne energije se odvija v 82 državah, kar je porast glede na 78 držav, poročanih leta 2010. Nove dežele, ki so tokrat poročale o neposredni geotermalni rabi, so Grenlandija, Madagaskar, Pakistan in Saudska Arabija. Ocenjena inštalirana termična moč za neposredno rabo ob koncu leta 2014 je bila 70.885 MW_t, kar je skoraj 46,2 % porast glede na 2010, z rastjo 7,9 % letno in s faktorjem razpoložljivosti 0,265. Izkoriščena toplotna energija v direktni rabi ob koncu leta 2014 je tako znašala 592.638 TJ/leto (164.635 GWh/leto



Sl. 3. Inštalirana moč (levo) in proizvedena elektrika (desno) iz geotermalne energije od leta 1950 do 2020 v svetu; podatki za proizvedeno elektriko pred letom 1995 so pomanjkljivi ali neznan (BERTANI, 2016). Točke kažejo na leta, ko so bile vrednosti poročane na svetovnih kongresih, dejansko pa veljajo za leto prej (n.pr. za leto 2014 in ne za 2015, za 2009 in ne za 2010, itd.).

Fig. 3. Installed capacity (left) and produced electricity (right) from geothermal energy from 1950 up to 2015; data for electricity before 1995 are incomplete or unknown (BERTANI, 2016). Points indicate the year when values were reported at the WGC, in fact they are subject to the previous year (e.g. 2014 and not for 2015, 2009 and not 2010, etc.).

ali 14.155 ktOE/leto), kar je porast za 39,8 % glede na 2010 in z letno rastjo 6,9 % (sl. 4). Delež izkoriščene geotermalne energije v direktni rabi znese le 0,104 % vse proizvedene primarne energije v svetu (13.541 Mtoe v letu 2013; podatki po IEA, 2015). Porazdelitev izkoriščene geotermalne energije po kategorijah rabe kaže tabela 3.

Kar 89 % vse izkoriščene energije za ogrevanje prostorov gre za daljinsko ogrevanje. »Ostale rabe« so kategorija, ki zajema različne rabe, katerih podrobnosti so pomanjkljive, vključuje pa gojenje živali in alge spiruline ter izločanje soli. V kategoriji »Taljenje snega in hlajenje (klimatizacija)« prevladuje taljenje snega. Vsa privarčevana energija v letu 2014 znaša 52,8

Kategorija neposredne rabe/ Category of direct use	Kapaciteta/ Capacity (MW _t)	Energija (TJ/leto)/ Utilization (TJ/year)	Izkorišč. energija v % / Used energy in %	Faktor razpol./ Capacity factor
Geotermalne toplotne črpalke/ Geothermal heat pumps*	50258	326848	55,2	0,206
Kopanje & plavanje, vklj. balneologija/ Bathing & swimming, incl. balneology	9143	119611	20,2	0,415
Ogrevanje prostorov, vklj. daljinsko ogrev./Space heating, incl. district heating	7602	88668	15,0	0,370
Rastlinjaki & pokrito gretje tal/ Greenhouse heating	1972	29038	4,9	0,467
Ribogojništvo/ Aquaculture pond heating	696	11953	2,0	0,545
Industrijska procesna toplota/ Industrial uses	614	10454	1,8	0,540
Taljenje snega & hlajenje/ Snow melting & cooling**	360	2596	0,4	0,229
Sušenje v poljedelstvu/ Agricultural drying	161	2030	0,3	0,400
Ostale rabe/Other uses	79	1440	0,2	0,578
SKUPAJ	70885	592638	100	0,265

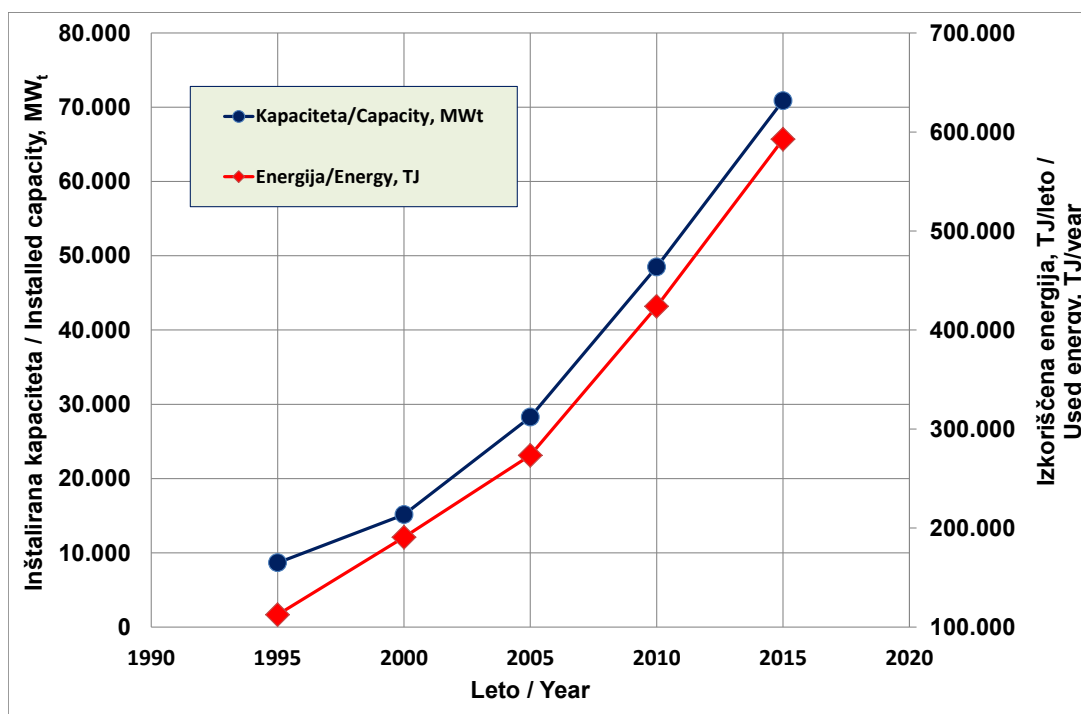
Tabela 3. Povzetek različnih kategorij neposredne rabe v svetu v letu 2014 (poročano v 2015), podatki po LUND & BOYD (2016).

Table 3. Summary of the various categories of direct use worldwide in 2014 (reported in 2015), according to LUND & BOYD (2016).

Opombe / Remarks:

*faktor razpoložljivosti za GTČ velja samo v načinu gretja / Capacity factor for GHPs applies only in heating mode.

**samo za taljenje snega: 307 MW_t in 2.323 TJ/leto/for snow melting only: 307 MW_t and 2.323 TJ/yr.



Sl. 4. Neposredna raba geotermalne energije v obdobju od 1995 do 2015 z inštalirano kapaciteto (levo) in izkoriščeno energijo (desno); po LUND & BOYD (2016). Točke kažejo na leta, ko so bile vrednosti poročane na svetovnih kongresih, v resnici pa veljajo za leto prej (n.pr. za leto 2014 in ne za 2015, za 2009 in ne za 2010, itd.).

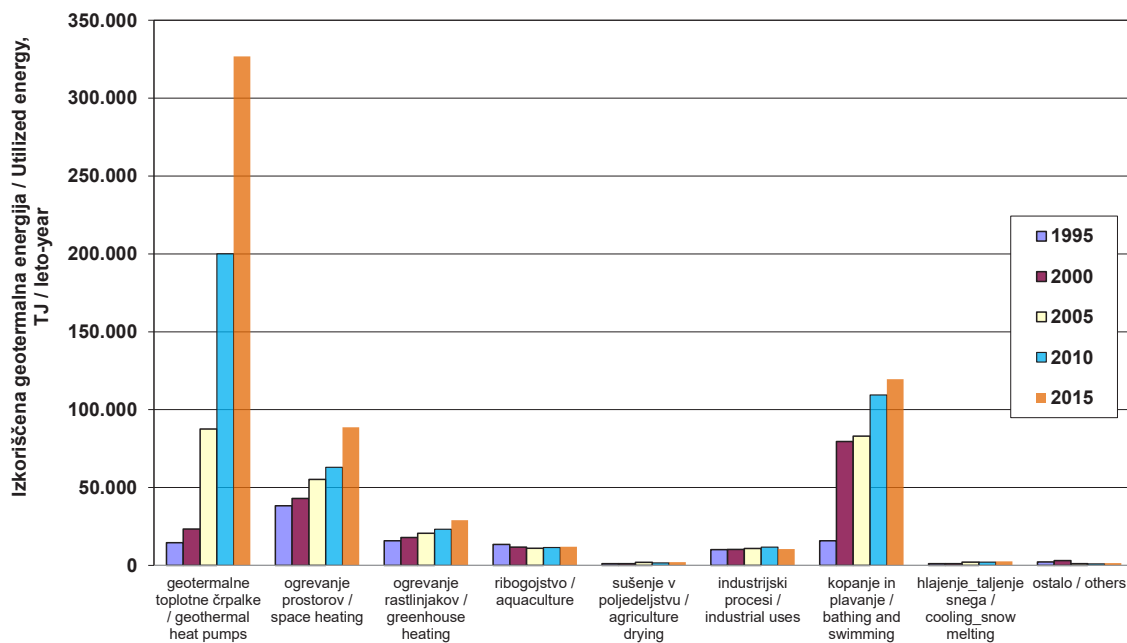
Fig. 4. Direct use of geothermal energy in the period from 1995 to 2015 with an installed capacity (left) and utilized energy (right); after LUND & BOYD (2016). Points indicate the year when values were reported at the WGC, in fact are subject to the previous year (e.g. 2014 and not for 2015, 2009 and not 2010, etc.).

milijonov ton naftnega ekvivalenta (toe) ali 352 mil. sodčkov nafte, kar je preprečilo izpust v ozračje 46,1 milijonom ton ogljika in 149,1 milijonom ton CO₂, to pa zajema tudi privarčevanje za pogon geotermalnih toplotnih črpalk (GTČ) v hladilnem načinu (v primerjavi z rabo pogonskega goriva za proizvodnjo elektrike v ta namen).

Neposredna raba geotermalnih virov se primarno odvija za ogrevanje prostorov in hlajenje. Navadno zajema temperature virov pod 150 °C. Glavna prednost takega izkoriščanja v nizko do srednjetermurnem razponu je, da so ti viri bolj razširjeni in obstajajo v vsaj 82 državah v ekonomsko dosegljivih globinah. Tipična oprema vsebuje: črpalke v vrtini in obtočne črpalke, toplotne izmenjevalce, cevovode za prenos in porazdelitev termalne vode, opremo za odvzem toplote, vršne in pomožne energetske obrate (običajno na fosilna goriva) za znižanje izrabe geotermalnega fluida in znižanje števila potrebnih vrtin, ter sisteme za odstranitev izrabljenega fluida (reinjekcijske vrtine). Omenjeni faktor razpoložljivosti 0,265, kar ustreza 2321 uram polne obremenitve letno, je nižji od poročanih faktorjev v letu 2010 (0,28), v letu 2005 (0,31) in v letu 2000 (0,40). Nižji faktor in nekoliko nižja stopnja rasti za letno neposredno rabo geotermalne energije sta posledica številčnega porasta inštalacij geotermalnih toplotnih črpalk, ki kažejo nizek faktor razpoložljivosti, in ta je sedaj 0,21 v svetovnem poprečju.

Pet držav z največjo inštalirano močjo (MW_t) v neposredni rabi, vključno z GTČ, so: Kitajska, ZDA, Švedska, Turčija in Nemčija, ki predstavljajo 65,8 % svetovnih zmogljivosti. Pet držav z najvišjo letno izkoriščeno energijo (TJ / leto) v neposredni rabi, vključno z GTČ, so: Kitajska, ZDA, Švedska, Turčija in Islandija, ki zajemajo 63,2 % svetovne rabe. Seveda pa pregled podatkov glede površine ali prebivalstva držav pokaže, da prevladujejo manjše (in bogatejše) države, zlasti skandinavske. V "top pet" se potem za inštalirano moč (MW_t / prebivalstvo) uvrščajo: Islandija, Švedska, Finska, Norveška in Švica; in glede letne rabe energije (TJ / leto / prebivalstvo): Islandija, Švedska, Finska, Nova Zelandija, Norveška (LUND & BOYD, 2016).

Druga znatna sprememba od leta 2010 je velik porast enot geotermalnih toplotnih črpalk (GTČ) na vir toplote tal oz. plitvega podzemlja. Rastoče zavedanje in priljubljenost GTČ imata najbolj značilen vpliv na neposredno rabo geotermalne energije. Letna izkoriščena energija z enotami GTČ se je povišala 1,63-krat, inštalirana moč pa 1,52-krat glede na 2010 (sl. 5). Kategorija GTČ tvori največji delež v skupni inštalirani kapaciteti neposredne rabe (70,90 %) in v skupni letni izkoriščeni energiji (55,15 %). Skupno ekvivalentno število 12-kW postavljenih enot toplotnih črpalk (kar je tipična nazivna moč v ZDA in večjem delu Evrope) je okrog 4.190.000 v 48 državah, največ v ZDA, Kanadi, Evropi in na Kitajskem. To je 52 % porast glede na število



Sl. 5. Primerjava izkoriščene geotermalne energije (v TJ/leto) po kategorijah neposredne rabe za leta poročanja od 1995 do 2015; po LUND & BOYD (2016). Skupna letno izkoriščena energija je znašala po letih poročanja: 1995: 112,4 PJ, 2000: 190,7 PJ, 2005: 273,4 PJ, 2010: 423,8 PJ in 2015: 592,6 PJ.

Fig. 5. Comparison of geothermal energy (TJ/year) per category of direct use for the reporting year from 1995 to 2015; after LUND & BOYD (2016). The total annual utilized energy for reporting years was: 1995: 112.4 PJ, 2000: 190.7 PJ, 2005: 273.4 PJ, 2010: 423.8 PJ and 2015: 592.6 PJ.

enot GTČ v letu 2010. Vodilne države v številu postavljenih enot in v inštalirani moči (MW) so: ZDA, Kitajska, Švedska, Nemčija in Francija, glede izkoriščene energije pa: Kitajska, ZDA, Švedska, Finska in Nemčija (tab. 4). Velikost posameznih enot sega od 5 kW za individualne hiše do več kot 150 kW za industrijske in javne stavbe. V ZDA je večina enot dimenzionirana za vršno hlajenje in predimenzionirana za gretje, izjema so severne zvezne države. Zato se zanje ocenjuje povprečno 2000 ekvivalentnih ur delovanja v polni obremenitvi letno. V Evropi je večina enot dimenzionirana za gretje, pogosto pa so enote GTČ dimenzionirane za pokrivanje osnovne obremenitve ter z dodatnimi fosilnimi gorivi za vršne obremenitve. Kot rezultat so GTČ lahko v delovanju do 6000 ekvivalentnih ur v polni obremenitvi za gretje na leto, kot je to primer v nordijskih državah (posebno na Finskem). Drugod je število ur nižje. Če niso bile poročane dejanske številke, sta LUND & BOYD (2016) uporabila vrednost 2200 ur/leto (in višje za nekatere severne države) za izračun izkoriščene energije. Hladilni način (obremenitev) ni bil upoštevan kot geotermalno koriščenje, ker se v takem primeru toplota vrača v podzemlje ali v podzemno vodo. Seveda pa ima hlajenje vlogo v nadomestitvi fosilnih goriv in zmanjšanju emisij toplogrednih plinov.

Tabela 4. Vodilne države v svetu glede inštaliranih geotermalnih toplotnih črpalk (MW) in z njimi izkoriščena plitva geotermalna energija (TJ/leto); po LUND & BOYD (2016).

Table 4. Leading countries worldwide in terms of installed geothermal heat pumps (MW) and their exploited shallow geothermal energy (TJ/year); after LUND & BOYD (2016).

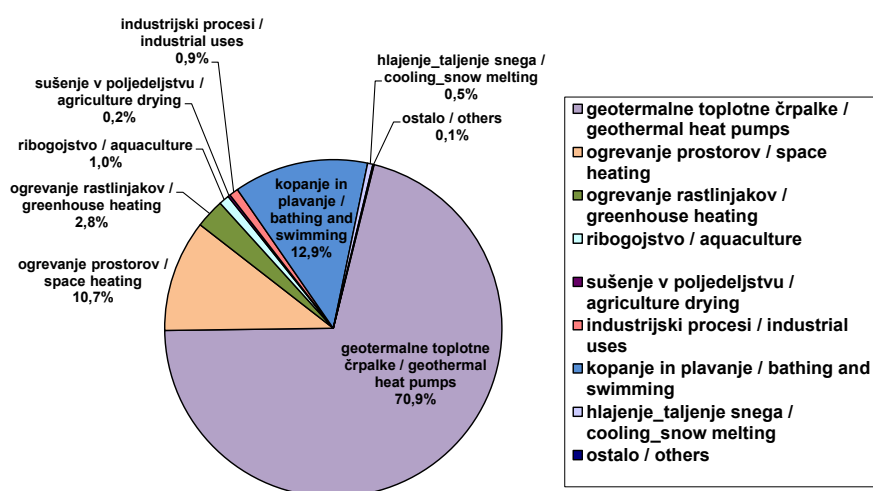
Država/Country	MW _t	Država/Country	TJ / leto-year
ZDA/USA	16800	Kitajska/China	100311
Kitajska/China	11781	ZDA/USA	66670
Švedska/Sweden	5600	Švedska/Sweden	51920
Nemčija/Germany	2590	Finska/Finland	18000
Francija/France	2010	Nemčija/Germany	16200

Sliki 6 in 7 kažeta odstotne deleže različnih kategorij neposredne rabe geotermalne energije v svetu. LUND & BOYD (2016) sta poskusila ločeno prikazati individualno ogrevanje prostorov in daljinsko ogrevanje, toda to je bilo pogosto težko. Zato je njun najboljši približek, da daljinsko ogrevanje predstavlja 88 % inštalirane moči in 89 % letne izkoriščene energije od celotne kategorije »ogrevanje prostorov« (LUND & BOYD, 2016).

Ogrevanje prostorov, kjer z 89 % prevladuje daljinsko ogrevanje, se odvija v 28 državah. Vodilne v daljinskem ogrevanju glede letne energetske rabe geotermalne energije so: Kitajska, Islandija, Turčija, Francija in Nemčija, v individualnem ogrevanju prostorov pa: Turčija, ZDA, Italija, Slovaška in Rusija (skupno 28 držav).

Ogrevanje rastlinjakov in pokrito gretje tal se s koriščenjem geotermalne energije odvija v 31 državah (3 manj kot pred petimi leti), prednjači pa gojenje zelenjave in cvetja. Vodilne države v letni energijski rabi so: Turčija, Rusija, Madžarska, Kitajska in Nizozemska. Večina držav ni poročala o razlikovanju med pokritimi rastlinjaki in nepokritim talnim gretjem. S pomočjo povprečne potrebne energije (iz WGC 2000), ki znaša 20 TJ/leto/ha, skupna izkoriščena geotermalna energija za rastlinjake 29.038 TJ/leto ustreza približno površini 1.452 ha vseh ogrevanih rastlinjakov na svetu (kar je porast za 12,6 % glede na leto 2010). Razvite države v tej panogi čutijo močno konkurenco iz držav v razvoju zaradi tamkajšnje cenejšee delovne sile.

Koriščenje geotermalne energije za **ribogojništvo** omenjajo v 21 državah, vodilne so: ZDA, Kitajska, Islandija, Italija in Izrael. Tilapia (afriška sladkovodna riba), losos in postrv so prevladujoče vrste gojenih rib, ponekod pa gojijo še tropske ribice, jastoge, morske rakce,



Sl. 6. Kategorije neposredne rabe geotermalne energije v 2014 (leto poročanja je 2015), porazdeljene v odstotkih skupne inštalirane kapacitete (LUND & BOYD, 2016).

Fig. 6. Categories of direct use of geothermal energy in 2014 (reporting year is 2015), distributed as a percentage of the total installed capacity (LUND & BOYD, 2016).

(jamske) kozice in aligatorje. Glede na energetsko rabo v ZDA so izračunali, da je potrebno 0,242 TJ/leto/tono ribe (ostrž, brancin in tilapia) z rabo termalne vode v nepokritih ribnikih. Torej poročana geotermalna energetska raba ustreza 49.393 tonam letne proizvodnje rib, kar je za 3,8 % več od poročanih števil v 2010.

O rabi geotermalne energije za **sušenje pridelkov v poljedelstvu** poročajo iz 15 držav (pred petimi leti je bilo 13 držav), in sicer za sušenje različnih zrn, zelenjave in sadja. Značilni primeri so: morske alge (Islandija), čebula (ZDA), pšenica in druge žitarice (Srbija), sadje (El Salvador, Gvatemala, Mehika), nemška detelja (Nova Zelandija), kokosova moka (Filipini) in stavbni les (Mehika, Nova Zelandija, Romunija). Največ geotermalne energije izkoristijo na Kitajskem, v ZDA in na Madžarskem. Za to kategorijo rabe se izkorišča 24,2 % več geotermalne energije glede na 2010.

Za **industrijsko procesno toploto** koristijo geotermalno energijo v 15 državah. Ta dejavnost je energetsko potratna in ponavadi deluje celo leto, zato ima ta kategorija enega najvišjih faktorjev izkoristka (0,54). Primeri vključujejo: sušenje betona (Gvatemala), gaziranje brezalkoholnih pijač in ustekleničenje vode (Bolgarija, Srbija, ZDA), pasterizacija mleka (Romunija, Nova Zelandija), industrija usnja (Srbija), kemijsko obarjanje snovi (Bolgarija, Poljska, Rusija), izločanje CO₂ (Islandija, Turčija), procesiranje papirne kaše in papirja (Nova Zelandija), izločanje joda in soli (Vietnam) ter proizvodnja borata in borove kisline (Italija). V Sloveniji se žal ne izkorišča več v industriji usnja na Vrhniki, katere ni več, tamkajšnji termalni vir pa uporablja drugo podjetje za ogrevanje prostorov.

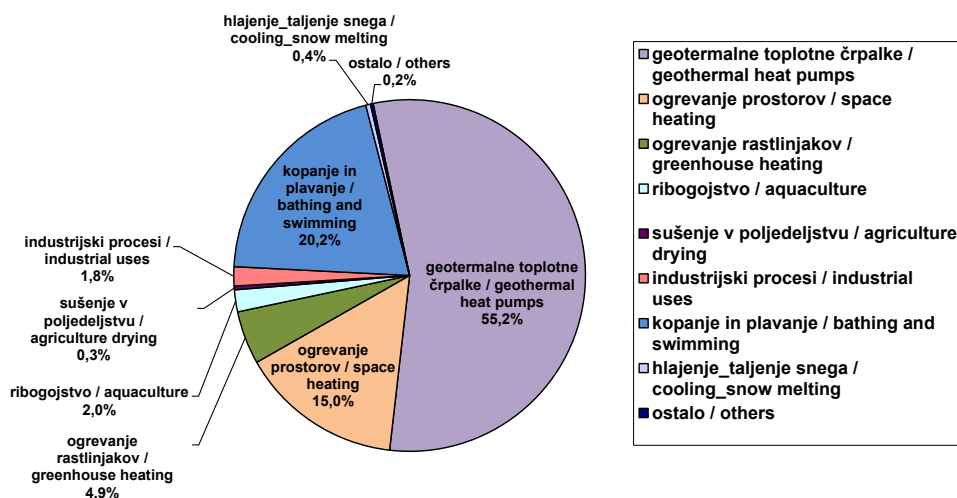
Taljenje snega in hlajenje prostorov s pomočjo geotermalne energije je omejeno na manjše število

držav, večinoma za taljenje snega na pločnikih in ulicah. Postavitve omenjajo na Islandiji, v Argentini, na Japonskem, v ZDA in v manjši meri še na Poljskem in v Sloveniji. Približno 2,5 milijona m² površin se ogreva na svetu, večina na Islandiji (74 %). Toplotna moč, potrebna za taljenje, znaša glede na primere v ZDA in na Islandiji od 130 do 180 W/m². Hlajenje prostorov (klimatizacija) se odvija v petih državah (Japonska, Bolgarija, ZDA, Slovenija, Alžirija). Toplotne črpalke v hladilnem načinu niso upoštevane, ker pri tem le vračajo toploto v podzemlje ter torej ne izkoriščajo geotermalne energije.

Skoraj vsaka država, ki rabi geotermalno energijo, jo koristi tudi za **kopanje in plavanje (vključno z balneologijo)**, teh pa je vsaj 70, avtorja pregleda pa omenjata še razvoj v Maleziji, Mozambiku, Singapurju in Zambiji. Vendar se v velikem številu ta raba vrši na način, da puščajo termalno vodo krožiti neprestano ne glede na rabo (na primer tudi ponoči, ko so bazeni zaprti). Posledično so lahko dejanske številke za porabo in kapaciteto visoke. Največ energetske rabe imajo na Kitajskem, Japonskem (t.i. onsen, kar je termin za tople izvire v japonščini, zajema pa zunanje in notranje kopeli), v Turčiji, Braziliji in Mehiki.

Ostale rabe geotermalne energije omenjajo v 13 državah in vključujejo gojenje živali, gojenje spiruline, izločevanje soli, sterilizacijo steklenic, ponekod pa še gaziranje brezalkoholnih pijač. Najvišja energetska raba je na Novi Zelandiji (namakanje, zaščita pred mrazom, turistični parki).

Najznačilnejše kategorije rabe v državah z največjo proizvodnjo so podane v tabeli 5. Porazdelitev izkoriščene geotermalne energije v neposredni rabi po državah z vsaj 2500 TJ vključno z GTČ kaže slika 8.



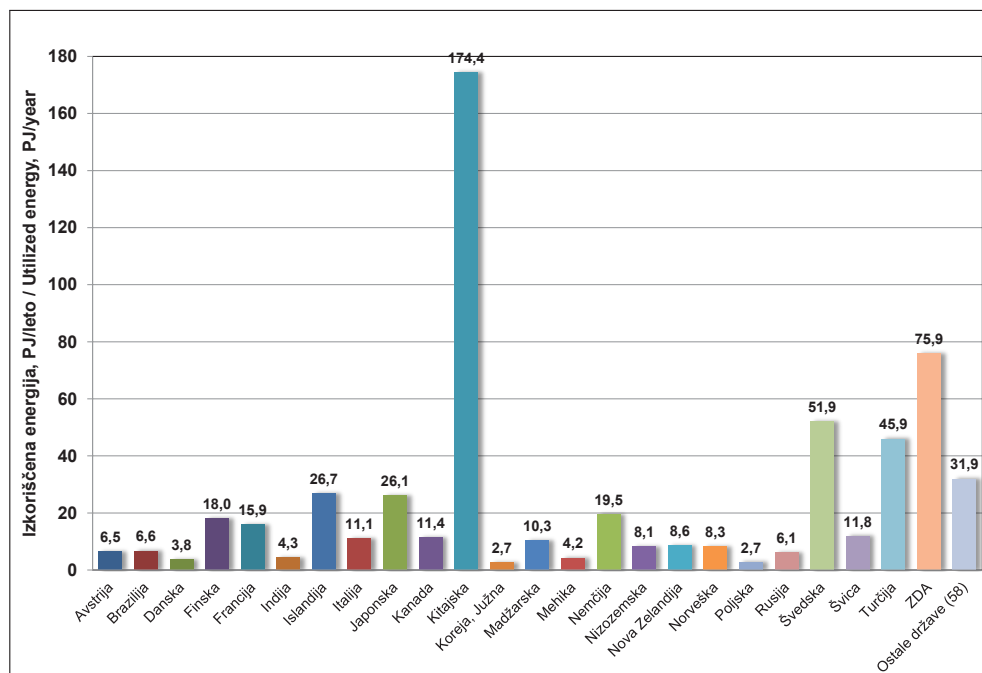
Sl. 7. Kategorije neposredne rabe geotermalne energije v 2014 (leto poročanja je 2015), porazdeljene v odstotkih skupne izkoriščene energije (TJ / leto), po LUND & BOYD (2016).

Fig. 7. Categories of direct use of geothermal energy in 2014 (reporting year is 2015), distributed as a percentage of the total utilized energy (TJ / year), after LUND & BOYD (2016).

Država/Country	MW _t	GWh/leto-year	TJ/leto-year	Najvažnejše kategorije rabe/ The most important use categories
Kitajska/China	17870	48435	174352	GTČ, daljinsko ogrevanje, balneologija/ GHP, district heating, balneology
ZDA/USA	17416	21075	75862	GTČ/GHP
Švedska/Sweden	5600	14423	51920	GTČ/GHP
Turčija/Turkey	2937	12748	45892	bazeni, rastlinjaki, daljinsko ogrevanje/ swimming pools, greenhouses, district heating
Islandija/Iceland	2040	7422	26717	daljinsko ogrevanje/district heating
Japonska/Japan	2186	7259	26130	kopanje & plav. (onsen topli izviri)/ bathing & swimming (onsen hot springs)
Nemčija/Germany	2849	5426	19531	GTČ, daljinsko ogrevanje/ GHP, district heating
Finska/Finland	1560	5000	18000	GTČ/GHP
Francija/France	2347	4408	15867	GTČ, daljinsko ogrevanje/ GHP, district heating
Švica/Switzerland	1733	3288	11839	GTČ/GHP
Kanada/Canada	1458	3164	11388	GTČ/GHP
Italija/Italy	1355	3074	11065	zdravilišča-bazeni, ribogojstvo/ spas-swimming pools, aquaculture
Madžarska/Hungary	906	2852	10268	zdravilišča-bazeni, rastlinjaki/spas- swimming pools, greenhouses
Nova Zelandija/New Zealand	487	2395	8621	industrijska procesna raba, bazeni/ industrial uses, swimming pools
Norveška/Norway	1300	2295	8260	GTČ/GHP

Tabela 5. Vodilne države v neposredni rabi geotermalne energije z vsaj 2.000 GWh/leto, stanje v letu 2014, podatki po LUND & BOYD (2016).

Table 5. Leading countries in the direct use of geothermal energy by at least 2,000 GWh/year, the situation in 2014, data after LUND & BOYD (2016).



Sl. 8. Porazdelitev izkoriščene geotermalne energije (PJ/leto) v neposredni rabi po državah z vsaj 2.500 TJ (stanje v 2014, poročano v letu 2015), podatki po LUND & BOYD (2016).

Fig. 8. Distribution of utilized geothermal energy (PJ/year) in the direct use by countries with at least 2,500 TJ (situation in 2014, reported in 2015), data after LUND & BOYD (2016).

Glede izkoriščanja **geotermalne energije v Sloveniji** znaša inštalirana kapaciteta za neposredno rabo okrog 202,2 MW_t, letna izkoriščena geotermalna energija pa 1218,1 TJ ali 338,4 GWh (stanje na 31. dec. 2015) vključno z geotermalnimi toplotnimi črpalkami (RAJVER in sod., 2016). Raba termalne vode za različne namene se odvija pri 34 uporabnikih iz 56 proizvodnih vrtin (njihova skupna globina je 48,84 km) in treh naravnih termalnih izvirov. Skupna kapaciteta vrtin in

izvirov je 65,62 MW_t, s katerimi so v letu 2015 izkoristili 486 TJ geotermalne energije. Samo prispevek geotermalnih toplotnih črpalk na toploto plitvega podzemlja znaša 136,64 MW_t, oziroma 732,1 TJ/leto. Imamo okrog 9350 delujočih enot GTČ različnih nazivnih grelnih moči. Od teh je okrog 312 večjih sistemov z nazivno močjo nad 20 kW, ki prispevajo 24,0 MW_t in 132,7 TJ izkoriščene toplote. Različne vrste uporabe zajemajo: individualno ogrevanje prostorov (pri 19

uporabnikih), daljinsko ogrevanje (3 uporabniki), klimatizacijo/hlajenje (4 uporabniki), ogrevanje rastlinjakov (4 uporabniki), kopanje in plavanje z balneologijo (27 uporabnikov), taljenje snega (2 uporabnika) ter geotermalne toplotne črpalke (v povezavi s plitvo geotermijo).

Najzanimivejši znanstveno-tehnološki dosežki pri iskanju in razvoju geotermalnih virov

Vrtanje v magmo na Islandiji s ciljem ustvariti magmatski EGS sistem

Med mnogimi zanimivimi in pomembnimi projekti izstopajo raziskave za superkritičnimi fluidi. Nadaljuje se namreč islandski globoki vrtalni (raziskovalni in razvojni) projekt IDDP, ki raziskuje možnost, kako znatno povečati termično (in električno) moč geotermalnih vrtin z izkoriščanjem visokoentalpijskih superkritičnih geotermalnih fluidov iz globin 4 do 5 km pri temperaturah 400 do 600 °C (FRIDLEIFSSON in sod., 2015). Cilj je povišati proizvodno moč na vrtino za 10-krat. Prvi resni poskus leta 2009, ko so želeli priti 4 do 5 km globoko v superkritični rezervoar z vrtino IDDP-1 (sl. 9) na geotermalnem polju Krafla (severna Islandija), so morali zaključiti pri »samo« 2096 m globine, potem ko so zavrtali vročo magmo riolitne sestave z nad 900 °C. Z namenom proizvodnje pare iz vroče kontaktne cone z magmatsko intruzijo pri temperaturi nad 500 °C so vrtino opremili s cementirano 9 5/8 colsko (244,5 mm) »žrtvano« (zavestno izgubljena) zaščitno cevovjivo do globine 1950 m znotraj 13 5/8 colske (346,1 mm) proizvodne cevitve enake globine. V odseku od 1950 do 2072 m so postavili 9 5/8 colsko režasto (slotirano) cevitev, od tam pa do globine 2096 m pustili odprto 12 1/4 colsko (311,1 mm) vrtino (côla ali palec, angleško *inch*, znaša 2,54 cm).



Sl. 9. Izlivalni poskus iz vrtine IDDP-1 v nov. 2011 pri temperaturi, ki se je dvignila do 450 °C. V prvih urah je bila para sive barve zaradi produktov korozije (FRIDLEIFSSON in sod., 2014; slika iz MARKUSSON & HAUSSON, 2015).

Fig. 9. Flowing test from the well IDDP-1 in November 2011 at a temperature, which increased to 450 °C. In the first hours the steam was gray due to corrosion products (FRIDLEIFSSON et al., 2014; figure from MARKUSSON & HAUSSON, 2015).

Med dveletnim izlivalnim poskusom je vrtina IDDP-1 postala najbolj vroča proizvodna geotermalna vrtina na svetu s temperaturo kar 450 °C iztekajoče superpregrete pare na ustju pri visokih tlakih (40 do 140 bar). Koncentraciji HCl s 100 mg/kg pare in kremenice z 62 mg/kg pare nakazujeta na temperature do 550 °C. Superpregreta para vsebuje tudi žveplene sestavine, ki so se izločale po kondenzaciji pare. To vpliva negativno (korozija) na uporabnost pare (HAUKSSON & MARKUSSON, 2013). Proizvodni poskusi so pokazali, da je vrtina zmožna proizvajati do 36 MW_e, odvisno od koncepta sistema turbine. Med in po izlivalnih poskusih so izvedli niz pilotnih poskusov za proizvodnjo elektrike, ki so dali izjemne rezultate v ravnanju z magmo v geotermalnem sistemu: (a) uspeli so zavrtati v staljeno kamnino pri temperaturi nad 900 °C in vrtalno opremo izvleči iz nje; (b) projekt je uspel ustvariti visoko prepustnost s hidravlično stimulacijo z vtiskanjem hladnega vrtalnega fluida v kontaktno avreolno kamnino (hydrofracking); (c) uspeli so vstaviti zaščitno cevitev in s cementom obložiti del odprte vrtine; (č) proizvedli so superpregreto paro iz kontaktne avreole pri temperaturnem svetovnem rekordu za geotermalno vrtino; (d) projekt je pokazal, da se nevaren kemizem fluida lahko varno obvlada z ravnanjem s paro, kar omogoča, da se para neposredno vòdi v konvencionalne parne turbine, in (e) ustvarjen je bil prvi svetovni magmatski EGS (izboljšani geotermalni sistem), kar je bilo potrjeno z vtiskovalnim (reinjekcijskim) poskusom sledenja po zaključenih poskusih izlivanja. Vrtino IDDP-1 so morali leta 2012 dokaj nenadno ohladiti zaradi poškodb ventilov, zato so poskusi izlivanja in pilotne študije končane (FRIDLEIFSSON et al., 2015). Obilo premaganih tehničnih ovir med vrtanjem in naknadnim izlivalnim poskusom je zelo koristnih za nadaljevanje IDDP programa. V teku so priprave za vrtanje in testiranje vrtine IDDP-2 pri Reykjanesu (JZ Islandija), kateri bo najbrž še pred letom 2020 sledila vrtina IDDP-3 pri Hengillu (južna Islandija).

Nova vrtalna tehnika, ki temelji na izstrelitvi hipersoničnih izstrelkov

Ameriško vrtalno podjetje HyperSciences (ZDA) je pridobilo patent za novo tehniko izdelave vrtin s ponavljajočim streljanjem izstrelkov s hitrostjo 2 km/s, kar povzroči eksplozijo z ustvarjeno luknjo. Ta tehnika je po trditvah proizvajalca desetkrat hitrejša od tradicionalnega vrtanja. Tehnologija, znana kot »pospeševalnik zabijalca«, je načeloma zmožna pospeševanja izstrelkov do hitrosti nad 8 km/s. Na zadnjem koncu naprave se nahaja velik bat v veliki plinski komori, na sprednji strani pa je majhna cev s projektilom. Vsak projektil naj bi se izstrelil z visoko hitrostjo in pri tem uparil vse kar zadene na poti. Pri tem vstopa v vrsto cevi, ki

vsebujejo mešanice zraka in gorljivih plinov. Ko izstrelak potuje skozi pline, jih oblika izstrelka stisne, plini za izstrelkom se vžgejo ter ga s tem pospešijo naprej do hitrosti več kilometrov na sekundo. S to hitrostjo izstrelak uniči in upari katerokoli zadeto kamnino ali usedlino, ostanke kamnine pa posesajo ven iz vrtine Princip sistema vrtnja je prikazan na sliki v oglasu v IGA NEWS (2015, 101, str. 27) in na tam omenjenem spletu (INTERNET 1).

Tehnologija pospeševanja predmetov do zelo visokih hitrosti je dobro uveljavljena. NASA že desetletja izvaja hiperhitrostne raziskave v prizadevanjih eksperimentalno raziskati udarce asteroidov, ki se običajno dogodijo pri hitrosti nekaj deset kilometrov na sekundo. Ponavadi plinske puške uporabljajo vodik namesto zraka, ker je omejevalni dejavnik za končno hitrost izstrelka to, kako hitro se lahko udarni val širi skozi plin (z drugimi besedami hitrost zvoka), to pomeni skoraj štirikrat hitreje v vodiku kot je to v zraku. Sedaj delajo na možnosti dodajanja plastičnih eksplozivov, tako da se poveča globino strele. Prav tako upajo, da bi "puško" lahko z zaporednimi streli uporabili v doseganju geotermalnih virov v globlinah do 3,2 km.

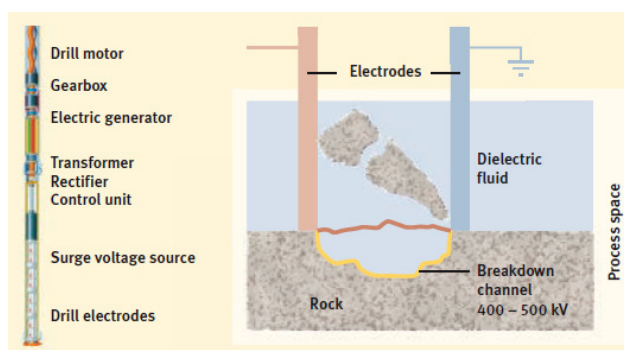
Nov proces, ki uporablja visoko napetost za globoko geotermalno vrtnje

Vrtalne dejavnosti lahko znesejo do 90% investicijskih stroškov v geotermalnih projektih. Z obstoječimi komercialnimi metodami vrtnje skozi trde magmatske in metamorfne kamnine napreduje počasi, vrtalna dleta pa se hitro obrabijo. Znanstveniki na tehnološki univerzi v Dresdnu (Nemčija) razvijajo alternativni postopek za vrtnje s pomočjo visokonapetostnih sunkov (impulsov), ki zdobijo kamnino (sl. 10). Ta metoda povzroči majhno obrabo vrtalnih svedrov in lahko omogoči do 30 % nižje vrtalne stroške. Vsaka tehnična izboljšava in zmanjšanje stroškov v postopku vrtnja »pripelje« nove geotermalne rezervoarje v bolj gospodarni doseg (IGA NEWS, 2016, 102, str. 29).

Pri vrtnju s procesom električnega sunka (electric impulse technology, EIT), se postavita dve elektrodi pod površjem na plast ustrezne kamnine. Skozi njih se sprožijo 400 kV sunki. V kanalu, kjer sunek razpada, se tlak in temperatura v kamnini povečata in kamnina razpade. Dobljene izvrtanine se odstranijo z neprevodno vrtalno tekočino. EIT sveder je bil uspešno preizkušen na poskusni napravi pod pogoji, podobnim v vrtini. Cilj stalno napredujočega projekta je razviti celovit sistem za vrtnje in ga preskusiti v dejanski vrtini.

Kroglice DNK kot geotermalni sledilci

Pot podzemnih tokov vode ali slanice, ki jo injektiramo skozi geotermalne vrtine v rezervoar, je možno testirati z nizom sledilcev (markerjev), od kemikalij in radioaktivnih elementov do



Sl. 10. Shematična struktura EIT vrtalnega svedra (levo) in princip procesa (desno) (INTERNET 2, MILLES, 2015, Avtorska pravica: © Technische Universität Dresden).

Fig. 10. Schematic structure of the EIT drill bit (left) and the process principle (right) (INTERNET 2, MILLES, 2015, Credit: © Technische Universität Dresden).

fluorescenčnih barvil. Toda rezultati več metod si lahko nasprotujejo. Sledilci se lahko ujamejo v pasteh ali uničijo; lahko so ostanki iz preteklih poskusov. Kot pravi Roland Horne (Univ. Stanford, CA, ZDA) bi se radi zapletom izognili z uporabo DNK. S specifičnimi DNK »oznakami« - čeprav se lahko tudi izgubijo - bo mogoče poznati natančno, kje je bilo sledilo injicirano in kdaj (IGA NEWS 2015, 101, str. 28).

Na podlagi dosežkov znanstvenikov, ki poskušajo ohraniti dolge DNK kode, je Horneova geotermična ekipa uporabila kratke, sintetične DNK fragmente za sledenje toka vode. DNK ima edinstven vzorec okoli sto osnovnih parov, in se zvije okoli drobcene kremenaste (silicijeve) kroglice. Ekipa je postavila kremenasto (silicijevo) lupino okoli DNK, da jo zaščiti. V geotermalnem rezervoarju je okolje zelo neprijazno, z visokimi pritiski in temperaturami, ki lahko sežejo preko 300 °C. Doslej so DNK kremenaste kroglice preživele šest ur pri 300 °C v laboratoriju, vendar niso bile terensko preiskovane. Hornova ekipa ima še nekaj dela v zaščiti DNK pri dolgih terenskih poskusih. Njihov naslednji korak je zagotoviti več vzdržljivosti v pogojih visoke toplote, da se iznajdejo žilavi, zanesljivi in točni sledilci. Če bodo »oznake« uspešne v terenskih poskusih, bo to ob poznavanju lokacij največjih razpok in najboljših vrtin omogočilo pametne investicije v razvoj geotermalnih virov. Tedaj se (globoke) geotermalne raziskave lahko izvedejo skoraj kjerkoli.

Močno geotermično segrevanje pod ledenim pokrovom na zahodni Antarktiki

Raziskovalci na univerzi Santa Cruz (CA, ZDA) so ugotovili presenetljivo visoko količino toplote, ki priteka proti dnu ledene plošče na zahodni Antarktiki iz globokih geotermalnih virov (IGA NEWS, 2015, 101, str. 29). Rezultati, objavljeni julija 2015 v spletni reviji *Science Advances* (IGA NEWS, 2015, 101, str. 29), zagotavljajo pomembne podatke raziskovalcem, ki poskušajo napovedati usodo ledene plošče. Ta se sooča s hitrim taljenjem v zadnjem desetletju.

Študija se opira na zbrane podatke v velikem antarktičnem vrtnem projektu WISSARD (Whillans Ice Stream Subglacial Access Research Drilling). Raziskovalna ekipa je uporabila posebno termično sondo za meritve temperature v sedimentih pod sub-ledeniškim jezerom Whillans, ki leži pod okoli 800 m ledu (sl. 11 in 12). Po vrtnanju skozi ledeni pokrov v januarju 2013 s posebnim vrtnikom na vročo vodo so raziskovalci spuščali sondo skozi vrtno, dokler se ni zaustavila v sedimentih pod sub-ledeniškim jezerom. Pri tem so merili temperaturo v različnih globinah, ki je pokazala na skoraj 5-krat višji geotermični gradient od tistega, ki ga običajno najdemo na drugih celinah. Rezultati kažejo na relativno hiter tok toplote proti dnu ledene plošče.

Visok toplotni tok pod zahodno antarktično ledeno ploščo lahko pomaga pojasniti prisotnost jezer pod njo in zakaj se kosi ledene plošče gibljejo hitreje kot običajni tokovi ledu. Vzrok zanj je možna prisotnost kopice vročih točk (jeder vulkanov) v skorji pod dnom Antarktike. Menijo, da voda na dnu ledenih tokov deluje kot mazilo, ki pospeši gibanje delov plošč, in pri tem nosi velike količine ledu ven na plavajoče ledene police na robovih ledene plošče. Ker je bila geotermična meritev le na eni lokaciji, sklepajo, da se toplotni tok lahko krajevno spreminja.

Geotermično segrevanje prispeva k taljenju bazalnega ledu, ki s tem dobavlja vodo v mrežo sub-ledeniških jezer in mokrišč, za katere so znanstveniki odkrili, da se nahajajo pod velikim predelom ledene plošče. V ločeni študiji, objavljeni leta 2015 v reviji *Nature* (IGA NEWS, 2015, 101, str. 29), je mikrobiološka ekipa projekta WISSARD poročala o bogatem in raznolikem mikrobnem ekosistemu v jezeru.

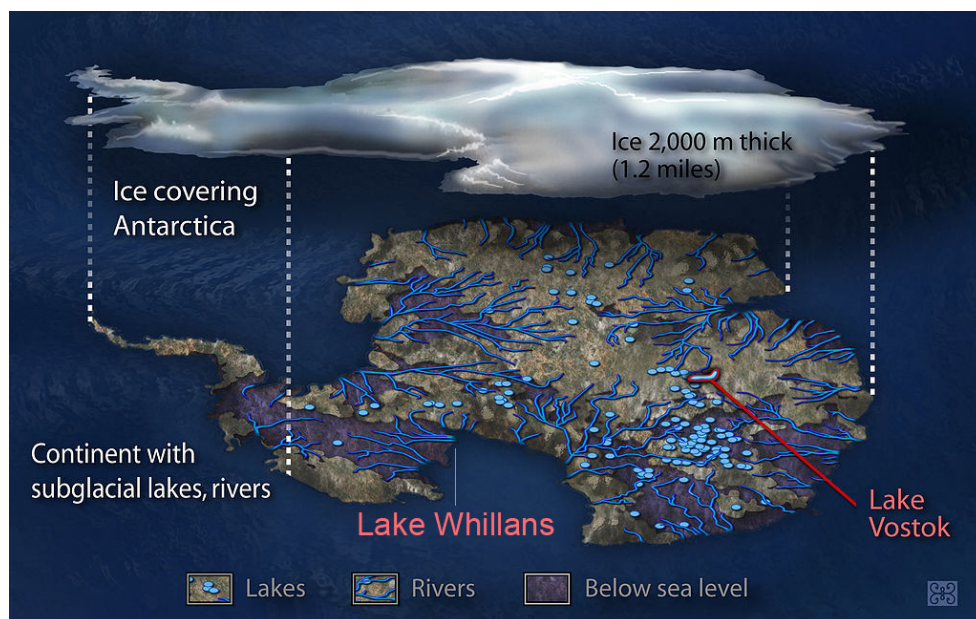
Izmerjen geotermični toplotni tok v novi študiji je bil približno $285 \pm 80 \text{ mW/m}^2$. Raziskovalci so merili tudi navzgor usmerjen toplotni tok

skozi zahodno antarktično ledeno ploščo, ki je približno $105 \pm 13 \text{ mW/m}^2$ (FISHER et al, 2015). Leto kasneje so izvedli meritve na osnovi sipanja laserske svetlobe v kablju za optičnimi vlakni. Kombinacija meritev pod ledom in v njem je omogočila izračun stopnje, s katero nastaja staljena voda na dnu ledene plošče na mestu vrtnine, in ta znaša približno 1,27 cm (pol inča) letno. Izmerjen toplotni tok je 4-krat višji od svetovnega poprečja in bi lahko stalil iz ledu na dnu te plošče do 35 km^3 vode na leto (FISHER et al, 2015).

Model, ki simulira super-kritične geotermalne rezervoarje

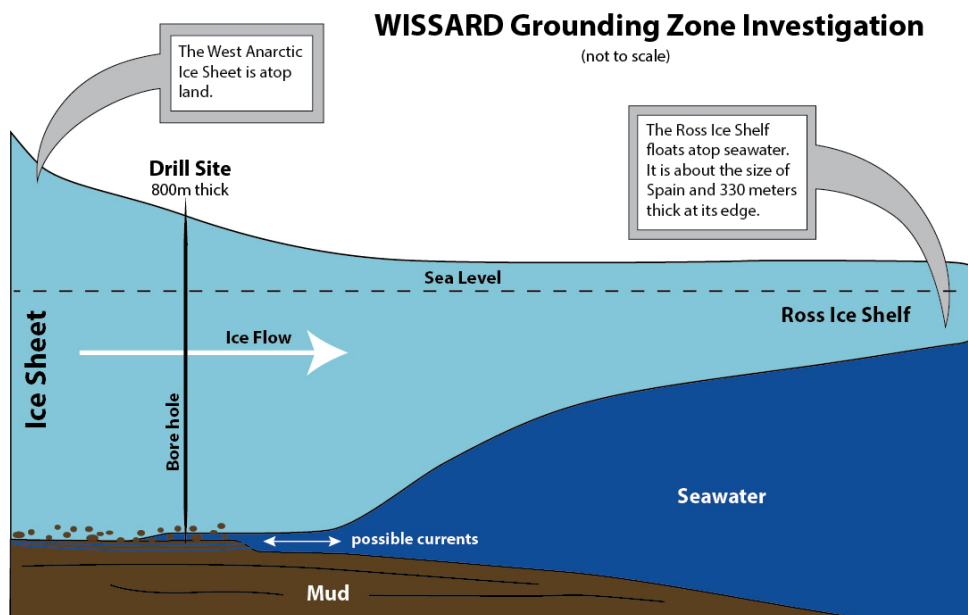
V letu 2008 so islandski raziskovalci, ki delajo na islandskem globokem vrtnem projektu (IDDP), medtem ko so iskali še bolj vroče geotermalne rezervoarje, odkrili rezervoar izjemno vroče vode, ki ima potencial bistveno razširiti proizvodnjo geotermalne električne energije (IGA NEWS, 2015, 101, str. 30). Sedaj so na inštitutu ETH v Zürichu prvič izdelali simulacijo, kako nastajajo takšni rezervoarji. Napovedujejo, da so ti naravni pojavi razširjeni v vulkanskih območjih, kot so na Japonskem in Novi Zelandiji.

Neposredno nad magmatskim telesom so raziskovalci odkrili doslej edinstven geotermalni rezervoar z vodo - tak, v katerem so temperature dosegle $450 \text{ }^\circ\text{C}$. Tako stanje znanstveniki imenujejo superkritično stanje. Voda postaja superkritična pri segrevanju nad $374 \text{ }^\circ\text{C}$, in od te točke se začne obnašati kot zmes plina in tekočih faz. Dve fazi postaneta neločljivi in nerazpoznavni, kar privede do fluida, ki je lahko tako gost kot tekočina, istočasno pa teče z lahkoto tako hitro kot plin. Voda, ki jo ogreva magmatska intruzija do superkritične temperature, vsebuje dovolj toplotne energije, da z eno vrtno lahko



Sl. 11. Umetnikov koncept sub-ledeniškega okolja na Antarktiki (INTERNET 3; Avtorska pravica: Zina Deretsky, NSF).

Fig. 11. An artist's conception of the Antarctic subglacial environment (INTERNET 3; Credit: Zina Deretsky, NSF).



Sl. 12. Presek čez območje vrtine SLW (Subglacial Lake Whillans) na ledeni plošči na zahodni Antarktiki (INTERNET 4).

Fig. 12. Cross section through the area of the borehole SLW (Subglacial Lake Whillans) on an ice sheet in the western Antarctica (INTERNET 4).

zagotovimo 35 MW_e moči. Znanstveniki na ETH so se odločili simulirati ta nenavaden geotermalni sistem z novim računalniškim modelom, tako da sedaj razumejo kako se pojavlja, pod kakšnimi pogoji nastaja in kje raziskovati za drugimi takšnimi sistemi. Simulacije nudijo realistično predstavitev obnašanja tega rezervoarja, čeprav so zadržali model kar se da enostaven z le nekaj parametri. Njihov model ponazarja, katera vzajemna delovanja so potrebna med različnimi geološkimi faktorji, kot so: prepustnost matične kamnine in temperatura pri kateri ta kamnina postaja plastična ter globina intruzije za idealne pogoje, da nastane rezervoar. To znanje pomaga osredotočiti iskanje za takšnimi rezervoarji. Sedaj želijo raziskovalci razširiti to metodo. Kot del projekta Sinergia, s financiranjem iz SNSF (Swiss National Science Foundation), želijo tesneje sodelovati z geofiziki, da ugotovijo, če se lahko ti rezervoarji odkrijejo s seizmičnimi tehnikami.

Viri zlata in srebra v geotermalnih sistemih

Skupina raziskovalcev iz ZDA in Nove Zelandije je pokazala, da obstajajo velika nahajališča zlata (Au) in srebra (Ag) v vsaj šestih geotermalnih rezervoarjih pod več vulkani na severnem otoku Nove Zelandije (IGA NEWS, 2015, 101, str. 30). V svojem prispevku (SIMMONS et al., 2016) ekipa opisuje preiskavo v geotermalnih sistemih v Taupo vulkanski coni (v obliki črke V) in koliko plemenite kovine naj bi se skrivalo tam spodaj. V tej coni so območja prenašanja in usedanja plemenitih kovin. Zlato in srebro se namreč obarjata (usedata) v vročih vrelih, v podzemnih hidrotermalno spremenjenih kamninah in v cevovodih z dvofaznimi fluidi v povezavi s proizvodnimi vrtinami.

Slednje je posledica izgub plinov zaradi hitre uparitve in adsorpcije v žvepljenih fazah bogatih z arzenom (As) in antimonom (Sb). Količine sedimentiranega zlata v podzemnih kamninah lahko presežejo nekaj 100.000 unč (unča: = 31,1 g). Toda zdi se, da so koncentracije zelo nizke stopnje (< 1 ppm Au). Usedline visoke stopnje nastajajo v vročih vrelih, vsebujejo namreč > 500 ppm Au in > 700 ppm Ag, toda manjše zaloge kovin (< 10.000 unč Au) in zelo visoka vrednost ohranitve izloča te lokacije kot potencialne vire.

Vzorčenje proizvodnih vrtin je pokazalo, da imajo globoke rezervoarske vode koncentracije Au od < 0,1 do > 20 ppb in koncentracije Ag od < 2 do > 2000 ppb. Omejeni podatki kažejo, da bi pri skromnih koncentracijah proizvodne vrtine lahko proizvedle letno 0,3 do 3,0 kg Au, vrtine na območju Rotokawe pa celo 19–70 kg Au/leto. Pri skromnih koncentracijah Ag bi proizvodne vrtine lahko letno proizvedle 3–100 kg Ag, vrtine v krajih Mokai in Rotokawa pa kar 680–7500 kg Ag/leto. Skupne količine vodnega zlata in srebra v geotermalnih rezervoarjih bi lahko bile reda velikosti 10.000 unč Au in več 100 tisoč unč Ag ali celo več.

Potrebne so nove tehnologije za pridobivanje plemenitih kovin iz fluidnega pretoka v proizvodnih vrtinah brez poseganja v proizvodnjo geotermalne energije, da bi bila neprestana ekstrakcija kovin izvedljiva. Druga možnost je, da pustimo, da se plemenite kovine kopičijo v dvofaznih cevovodih, in jih nato poberejo v intervalih, ki ustrezajo delovanju parnega geotermalnega polja (Broadlands-Ohaaki) in ki so optimalni z vidika dobičkonosnosti.

Vrtanje najbolj vroče geotermalne vrtine na svetu v Italiji

Raziskovalci in tehnologi iz vse Evrope so združili moči v sledenju skupnega cilja, da postane potencialno najbolj energetska bogata vrtina na svetu realnost. Globoka vrtina se bo vrtala v Larderelli v Toskani (Italija), za projekt pa je namenjenih 15,6 milijona € raziskovalnih sredstev (IGA NEWS, 2016, 102, str. 23).

Projekt DESCRAMBLE (Drilling in dEep, Super-Critical AMBIents of continental Europe) vodi globalni proizvajalec zelene energije Enel Green Power. Cilj je izveči največ možne energije iz vrtine. Izjemna vročina globoko pod Toskano pomeni, da bodo tako pritiski kot temperature tik na tisti meji, čemur so tudi inovativne tehnologije trenutno kos. Do sedaj so v tako ekstremnih pogojih temperature in tlaka uspeli delno nadzorovati vrtino le na Islandiji v vrtini IDDP- 1. Nekaj posebnega se zgodi, ko temperatura doseže 374 °C, tlak pa je 218-kratni zračni tlak na površini. Naletimo na tisto, čemur pravimo superkritična voda. Ni ne tekočina in niti ne para. Pojavlja se v fizikalni obliki, ki vključuje obe fazi, kar pomeni, da privzame povsem nove lastnosti.

Superkritični fluid se obnaša kot močna kislina, saj bo uničil karkoli, vključno elektroniko in vrtalno opremo. Ima pa tudi svoje prednosti. Ob uspešno izvedeni vrtini je lahko proizvodnja energije iz nje celo desetkrat višja kot pa voda in para dosežeta iz standardne geotermalne vrtine. Prav tako se lažje pretaka skozi razpoke in pore kamnin. Lahko prenaša v raztopini dragocene minerale na površje.

Operacija vrtanja zahteva visoko napredne tehnične priprave. Zaradi tega bo glavni tehnološki preboj najprej modeliran v posebej izdelanem simulatorju. To je SINTEF Petroleum Research že razvil za vrtanja za nafto in plin v napravi, podobni letalskemu simulatorju. Simulator bo podal vse razpoložljive podatke o načrtovani vrtini in njeni lokaciji.

Superkritični fluid mora biti pod nadzorom. Za čim bolj natančno napoved, kako se bo ta tekočina obnašala tako v globini v vrtini kot na njeni poti proti površju, se mora celoten proces modelirati v simulatorju toka. Simulator toka "LedaFlow" omogoča analizo bolj podrobnih in kompleksnih scenarijev toka, ki vključujejo t.i. večfazni prenos, kjer se nafta, plin in voda vsi pretakajo po istem cevovodu.

Medtem ko se nadaljuje delo na modeliranju in simulaciji naprednih operacij vrtanja, se še ena

raziskovalna skupina spoprijema z drugačnimi težavami. Razvili bodo specialno sondo in jo spustili v vrtino, da izmerijo, kako dobro se vrtina obnaša in če zdrži temperature do 450 °C in zelo visoke tlake. V ta namen razvijajo po meri zasnovano visoko temperaturno elektroniko, zaprto v neke vrste termos flaško, imenovano tudi Dewar flaška. Posoda mora biti dobro izolirana za zaščito merilnega instrumenta v njeni notranjosti v razmerah meritev v vrtini v trajanju nekaj ur pri temperaturah 250 do 450 °C. Takrat jeklo postaja krhko, plastika in elektronika pa odpovesta ali pa se pričneta taliti. Običajno elektronika deluje le kratek čas pri temperaturah nad 200 °C. Sedaj delajo s proizvajalci na izdelavi baterij, varnih za uporabo pri teh temperaturah. Projekt se je začel v Pisi sredi maja 2016, vrtanje se bo predvidoma pričelo v jeseni 2016.

Tabela 6. Porazdelitev neposredne rabe geotermalne energije po celinah; po LUND & BOYD (2016).

Table 6. The distribution of the direct use of geothermal energy by continent; after LUND & BOYD (2016).

Celine/Continents	Število držav/ # Countries	%MW _t	%TJ/ leto-year
Afrika/Africa	8	0,2	0,4
Ameriki/Americas	16	27,7	16,9
Azija/Asia	18	35,8	43,9
Evropa*/Europe*	37	35,6	37,3
Oceanija/Oceania	3	0,7	1,5

*Vključuje CIS države (Armenija, Belorusija, Gruzija, Rusija in Ukrajina)/Includes CIS countries (Armenia, Belarus, Georgia, Russia and Ukraine).

Zaključni komentarji

Geotermalna energija lahko kot povsod prisotna trajnostna in obnovljiva energija nadomešča druge oblike energijske rabe, posebej fosilna goriva, ki so ekološko gledano najbolj problematična, a prispevajo v svetovni preskrbi s primarno energijo več kot 80 %. Nekaj držav izstopa kot glavne koristnice geotermalnih fluidov za neposredno rabo (Kitajska, ZDA, Japonska, Islandija in Nemčija), seveda pa je bil razvoj v večini držav počasen. To ni presenetljivo, saj so geotermalni energiji glavni tekmelec razmeroma poceni fosilna goriva, začetni stroški geotermalnih projektov pa so visoki. V mnogih državah so vseeno izvajali potrebne temeljne raziskave, izvedli inventure in ovrednotili svoje vire kot pripravo na razvoj, ko bo gospodarska situacija boljša in bodo vlade in privatni investitorji videli koristi v razvoju domačega obnovljivega energetskega vira. Porazdelitev neposredne rabe geotermalne

Tabela 7. Znatni doprinosi neposredne rabe geotermalne energije k državnemu gospodarstvu; po LUND & BOYD (2016).

Table 7. Significant contributions of direct-use geothermal energy to a country's economy; after LUND & BOYD (2016).

Islandija/Iceland	90 % stavbnega prostora je ogrevano / 90 % of building space heating
Japonska/Japan	2000 onsenov, 5000 javnih kopališč, 1500 hotelov s 15 mil. turistov letno / 2000 onsens, 5000 public baths, 1500 hotels serving 15 million guests / year
Švedska/Sweden	20 % stavb je ogrevano s sistemi GTČ / 20 % of building heated using GHPs
Švica/Switzerland	90.000 inštaliranih enot GTČ (ca 3 enote/km ²) / 90,000 geothermal heat pumps installed (≈3 units/km ²)
Tunizija/Tunisia	244 ha ogrevanih rastlinjakov / 244 ha of greenhouses heated
Turčija/Turkey	90.000 stanovanj je ogrevano v 16 mestih – blizu 30 % vseh stanov. enot / 90,000 apartment residences heated in 16 cities-approaching 30 % of the total units
ZDA/USA	1,4 milijona enot GTČ (7 % letna rast) / 1.4 million geothermal heat pumps (7.0 % annual growth)

energije po celinah sveta je v tabeli 6. Vodilni celini sta Azija in Evropa z 18 oziroma 37 državami, ki izkoriščajo geotermalno energijo v direktnih aplikacijah.

Poleg visokotemperaturnih se uporabljajo tudi nizko do srednjetermaturni geotermalni viri v kombiniranih toplotnih-električnih obratih (angl. combined heat and power plant, CHP) za sproizvodnjo toplote in elektrike, kjer vroče vode, pogosto s temperaturami pod 100 °C, sprva peljejo skozi binarno ORC (Organic Rankine Cycle) elektrarno, nato za kaskadno ogrevanje prostorov, bazene, rastlinjake in/ali ribogojstvo, preden se jih vrača nazaj v vodonosnik. CHP projekti zagotovo povečajo izkoriščenost vira in izboljšajo ekonomiko projekta, kot se je pokazalo na Islandiji, v Avstriji in Nemčiji, kakor tudi na oregonskem tehnološkem inštitutu (Klamath Falls, ZDA).

V 42 državah sveta je bilo v zadnjih petih letih (2010 – 2014) izdelanih skupno 2218 novih vrtin, tako za namen neposredne rabe (38,7 %) kot proizvodnjo elektrike (48,8 %), in to v skupni globini 9.534,5 km, kot navajata LUND & BOYD (2015, 2016). To nam poda povprečno globino 4,3 km/vrtino, ki je 4-krat večja globina, kot je bila v obdobju 2005 – 2009. Tu niso zajete številne plitve vrtine za toplotne črpalke. Države, v katerih so izdelali za več kot 100 km vrtin, so: Madžarska, Kitajska, Kenija, Turčija, ZDA, Mehika, Filipini in Nova Zelandija. Največ vrtin po globinskih kilometrih je bilo izdelanih v Aziji (48,4 % in 1074 vrtin). Nadalje je bilo v 52 državah razporejeno 34.000 človek-letno dela v geotermiji in v geotermalne projekte v 49 državah je bilo vloženi 20 milijard US dolarjev, največ v Aziji (44 %). Glede prispevka geotermalne neposredne rabe k nacionalnemu energetskemu proračunu izstopa nekaj držav, vsaka s svojimi posebnostmi (tabela 7). Večina porasta te rabe se zelo jasno pripisuje geotermalnim toplotnim črpalkam. Razvoj bo v bodoče vseboval večji poudarek na obratih (elektrarnah) za kombinirano toploto in elektriko, posebno na tistih, ki bodo uporabljale nižjetemperaturne fluide do 100 °C. Največji

porast bo zajemala inštalacija in uporaba GTČ, ker se le-te lahko uporabljajo kjerkoli v svetu, kot se je pokazalo v Švici, Skandinaviji, Avstriji, Nemčiji, na Madžarskem, v Kanadi, ZDA in še kje.

Sedanja nizka cena fosilnih goriv, predvsem nafte, zavira razvoj rabe geotermalne energije v nekaterih državah, vendar je pričakovati, da to ne bo dolgo trajalo, in bo geotermalna energija v naslednjih desetletjih postajala konkurenčna fosilnim gorivom. Prav tako so zelo pomembne okoljske koristi z njeno rabo, zato je pričakovati boljše razumevanje in sprejemljivost te vrste obnovljivega vira energije kakor tudi ostalih tovrstnih virov. Zato je pomembno širiti poznavanje o koristnosti rabe geotermalne energije, njene različne možne uporabe in okoljske koristi, ki iz nje izhajajo. V Sloveniji skoraj vse kategorije rabe geotermalne energije iz termalne vode kažejo v zadnjih petih letih stagnacijo v izkoriščanju te energije, izjema je ogrevanje rastlinjakov. Stalno rast beleži seveda tudi izkoriščanje plitve geotermalne energije s sistemi GTČ.

Literatura

- BERTANI, R. 2010: Geothermal power generation in the World, 2005-2010 Update Report. Proceedings, World Geothermal Congress 2010, Nusa Dua, Bali, Indonesia, IGA: 41 p.
- BERTANI, R. 2015: Geothermal power generation in the World, 2010-2015 Update Report. Proceedings, World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, IGA: 19 p.
- BERTANI, R. 2016: Geothermal power generation in the world 2010-2015 update report. Geothermics, 60: 31-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.003>
- FISHER, A.T., MANKOFF, K.D., TULACZYK, S.M., TYLER, S.W., FOLEY, N., & THE WISSARD SCIENCE TEAM 2015: High geothermal heat flux measured below the West Antarctic Ice Sheet. Sci. Adv., 1: 1-9, doi:10.1126/sciadv.1500093.
- FRIDLEIFSSON, G.O., ELDERS, W.A. & ALBERTSSON, A. 2014: The concept of the Iceland deep drilling project. Geothermics, 49: 2-8, doi:10.1016/j.geothermics.2013.03.004.

- FRIDLEIFSSON, G.O., PÁLSSON, B., ALBERTSSON, A.L., Stefánsson, B., Gunnlaugsson, E., Ketilsson, J. & Gíslason, G. 2015: IDDP-1 drilled into magma – world's first magma-EGS system created. Proceedings, World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, IGA: 12 p.
- GUTIÉRREZ-NEGRÍN, L.C.A. 2015: The World Geothermal Congress 2015. IGA's Melbourne Declaration. IGA News, 100: 2–5.
- HAUKSSON, T. & MARKUSSON, S.H. 2013: Silica in superheated steam of the IDDP-1 exploratory geothermal well in Krafla. Experimental study. IDDP-1 Flow test 2010–2012. Landsvirkjun LV-2013-050: 299–332.
- HORNE, R.N. 2015: Introduction to the World Geothermal Congress 2015 Technical Program. Proceedings, World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, IGA: 15 p.
- IEA, 2015: Key World Energy Statistics. OECD/International Energy Agency, 80 p.
- IGA NEWS 2015: Newsletter of the International Geothermal Association, 101: 32 p.
- IGA NEWS 2016: Newsletter of the International Geothermal Association, 102: 34 p.
- LUND, J. W. & BOYD, T. L. 2015: Direct utilization of geothermal energy 2015 Worldwide review. Proceedings, World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, IGA: 31 p.
- LUND, J. W. & BOYD, T. L. 2016: Direct utilization of geothermal energy 2015 Worldwide review. Geothermics, 60: 66–93, doi:10.1016/j.geothermics.2015.11.004.
- MARKUSSON, S.H. & Hauksson, T. 2015: Utilization of the hottest well in the world, IDDP-1 in Krafla. Proceedings, World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, IGA: 6 p.
- MILLES, U., 2015: Electric impulses fragment hard rock. New process uses high-voltage impulses for deep geothermal drilling. BINE Information Service, BINE Projektinfo 13/2015, FIZ Karlsruhe, 5 p.
- RAJVER, D., LAPANJE, A. & RMAN, N. 2012: Možnosti proizvodnje elektrike iz geotermalne energije v Sloveniji v naslednjem desetletju = Possibilities for electricity production from geothermal energy in Slovenia in the next decade. Geologija, 55/1: 117–140, doi:10.5474/geologija.2012.009.
- RAJVER, D., RMAN, N., LAPANJE, A. & PRESTOR, J. 2016: Geothermal energy use, Country update for Slovenia. Proceedings, European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France, EGEC: 18 p.
- SAWIN, J.L. (lead author & content editor) et al., 2016: Renewables 2016 Global Status report. Key Findings 2016, REN21 secretariat, Paris: 32 p.
- SIMMONS, S.F., BROWN, K.L., BROWNE, P.R.L. & ROWLAND, J.V. 2016: Gold and silver resources in Taupo Volcanic Zone geothermal systems. Geothermics, 59: 205–214. doi:10.1016/j.geothermics.2015.07.009
- Internetni viri (dostopni 12.7.2016):
- INTERNET 1:
<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3173966/Forget-drills-Shell-wants-use-GUNS-Firm-backs-plans-fire-giant-bullets-ground-reach-geothermal-energy.html#ixzz3hD8ZAXiw>
- INTERNET 2:
http://www.bine.info/fileadmin/content/Presse/Projektinfos_2015/PM_13_2015/ProjektInfo_1315_engl_internet.pdf
- INTERNET 3:
http://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=138450&org=NSF&from=news
- INTERNET 4:
<http://newsroom.niu.edu/2014/10/29/exploring-the-unseen-west-antarctic-coastline/>