

Popov, Y.A., Pribnow, D.F.C., Sassi, J.H., Williams, C.F. & Burkhardt, H. 1999: Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. - *Geothermics*, 28, 253-276, Oxford.

Prelovski, P., Babič, M. & Uran, B. 1982: Meritve toplotne prevodnosti kamenin z izboljšano metodo grelne žice. - *Geologija*, 25/2, 335-339, Ljubljana.

Prelovski, P. & Uran, B. 1984: Generalized hot wire method for thermal conductivity measurements. - *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 17, 674-677.

Pribnow, D. & Sassi, J.H. 1995: Determination of thermal conductivity from deep boreholes. - *J. Geophys. Res.* 100, 9981-9994, Richmond, Virginia.

Rajver, D. 1990: New heat flow data in Slovenia, Yugoslavia. Final report of the 20th International Course in Geothermics, - NRC IIRG, 73 p., Pisa.

Ravnik, D. & Uran, B. 1984: Geotermične meritve II. Metodologija in interpretacija meritve toplotne prevodnosti in gostote Zemljinega toplotnega toka, - *Arhiv GeoZS*, 119 p., Ljubljana.

Sassi, J.H., Stone, C. & Munroe, R.J. 1984: Thermal conductivity determinations on solid rock - a comparison between a steady-state divided-bar apparatus and a commercial transient line-source device. - *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 20, 145-153, Amsterdam.

Schärl, U. & Rybach, L. 1984: On the thermal conductivity of low-porosity crystalline rocks. - *Tectonophysics* 103, 307-313, Amsterdam.

Sumikawa, S. & Arakawa, Y. 1976: Quick thermal conductivity meter. - *Instr. Autom.* Vol.4, No.4, 60-66, Tokyo.

Uran, B. 1982: Merilnik toplotne prevodnosti na grelno žico. - *Diplomsko delo, VTO Fizika*, Univerza v Ljubljani, 72 p.

Odgovori na pripombe

Answers on discussion

avtorjev D. Rajverja in D. Ravnika na članek *Thermal conductivity of selected types of Slovenian natural stone* avtoric A. Mladenovič, B. Mirtič in N. Vižintin v *RMZ*, 46, 3, (1999), 539-547

Ana MLADENOVIČ¹, Breda MIRTIC², Nada VIŽINTIN¹ & Friderik KNEZ¹

¹Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

²Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana

Avtorjema pripomb na članek *Thermal conductivity of selected types of Slovenian natural stone*, g. Rajverju in g. Ravniku, se avtorice članka zahvaljujemo za pripombe, kar dokazuje, da je obravnavana tematika aktualna. V nadaljevanju poskušamo odgovoriti na zastavljena vprašanja, oz. skupaj s F. Knezom, ki je izvedel meritve toplotne prevodnosti preiskovanih vzorcev naravnega kamna s stacionarno metodo, katerih rezultati so bili uporabljeni tudi v obravnavanem članku, komentirati pripombe D. Rajverja in D. Ravnika.

Potreba po čimbolj celovitih podatkih o lastnostih naravnega kamna, ki ga pridobivamo na slovenskem ozemlju, se je pokazala v letih, ko se je ponovno pričelo povečevati zanimanje za uporabo naravnega kamna kot gradbenega elementa. Postopki za določanje lastnosti naravnega kamna in kakovostni kriteriji za določen namen uporabe so standardizirani. Med lastnosti, ki so bile do sedaj slabo definirane, čeprav močno

vplivajo na uporabno vrednost naravnega kamna, sodijo toplotne karakteristike, med njimi toplotna prevodnost. V svetu obstaja več metod merjenja toplotne prevodnosti, ki jih v splošnem delimo na stacionarne in nestacionarne. Meritve po stacionarni metodi, namenjeni merjenju toplotne prevodnosti gradbenih materialov z nizko toplotno prevodnostjo, so bile izvedene z metodo ščitene plosčnega aparata po standardu JUS U.A2.020 oziroma ISO 8302 na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Meritve z nestacionarno metodo, imenovano izboljšana metoda vroče žice, so bile izvedene na Geološkem zavodu Slovenije.

Izmerjeno toplotno prevodnost izbranih vrst naravnega kamna iz Slovenije smo v članku želeli primerjati z nekaterimi petrološkimi in mineraloški lastnostmi preiskovanih kamnin in določiti njihovo korelacijo. Nikakor ni bil primarni namen v primerjavi obeh uporabljenih metod, ker nobene od obeh metod ne izvaja nobena od av-

toric članka. Kljub temu je bila želja avtoric, da bi strokovnjaki, ki izvajajo uporabljeni metodi, ugotovili, kakšna je povezava med njima, oz. katera od obeh metod je primernejša za ugotavljanje toplotne prevodnosti naravnega kamna. Avtorja meritev toplotne prevodnosti z izboljšano metodo grelna žice, g. Rajverja smo nekajkrat povabile k sodelovanju, ko smo ugotovili, da rezultati metod ne sovpadajo. Tudi nas je zanimalo, kakšna je zveza med obema uporabljenima metodama in zakaj prihaja do razlik. Vendar do tega sodelovanja na žalost ni prišlo. Še vedno pa smo pripravljene posredovati aktualne vzorce in njihove geološke podatke, da bi osvetlili vzroke za pojavljanje razlik med uporabljenima metodama oz. da bi ugotovili, katera od dossegljivih metod merjenja toplotne prevodnosti kamnin je najustreznejša za določanje uporabne vrednosti naravnega kamna.

Uvodne besede so bile potrebne, da bi bralci lahko razumeli, zakaj v članku ni bilo poudarka prav na podatkih, zaradi katerih sta g. Rajver in g. Ravnik imela pripombe na naš članek. V nadaljevanju odgovarjamo na njune pripombe.

Komentar k točkama 1 in 2.

Tekst v nadaljevanju predstavlja komentar F. Kneza, ki na Zavodu za gradbeništvo izvaja meritve po stacionarni metodi v ščitnem ploščnem aparatu:

“Merjenje toplotne prevodnosti je v splošnem dokaj zapleten merilni postopek. V Pripombah je pravilna ugotovitev, da ima vsaka metoda merjenja svoje specifične slabosti, povezane s kontroliranjem toplotnih izgub in z visokimi kontaktnimi upornostmi. Bistvene razlike med obema metodama so pravzaprav tri. Prva razlika je že omenjena stacionarnost. Druga razlika je dejstvo, da je metoda ščitnega ploščnega aparata (guarded hot plate method) absolutna metoda, torej za izvajanje meritev ne potrebujemo referenčnega etalona. Prav iz teh razlogov je uporabna kot primarna metoda za določanje toplotne prevodnosti. Metoda vroče žice potrebuje tudi referenčni etalon. Tretja razlika je velikost merjenega dela vzorca. Pri metodi ščitnega ploščnega aparata je velikost vzorca vsaj enaka veli-

kosti grelna plošče, v konkretnem primeru 500×500 mm. Meritev z vročo žico je bolj lokalizirana.

Standardi za izvedbo meritev po metodi ščitnega ploščnega aparata zelo natančno obravnavajo problematiko toplotnih izgub in sicer tako po teoretični kot tudi po izvedbeni plati. Predviden je poseben obroč za minimiziranje bočnih toplotnih izgub, naveden je tudi računski postopek za oceno velikosti teh izgub. Zato nekontrolirane toplotne izgube po tej metodi ne predstavljajo večjega problema.

Slabost izvedbe metode tako po starejšem JUS U.A2.020 (1983) kot tudi po mlajšem ISO 8302 (1991) je dejansko v dejstvu, da ta dva standarda ne posvečata dovolj širše pozornosti problematiki kontaktnih toplotnih upornosti. V standardizaciji prav zaradi tega zadnje čase prihaja do premikov in tako je v tehničnem poročilu iz decembra 1997, torej dokumentu, v katerem prihaja do prvih diskusij glede posameznih metod, moč najti priporočila, kako obravnavati ta problem. To poročilo vsebuje posebne zahteve za debelino temperaturnih tipal in tudi korekcijsko formulo, ki korigira izmerjene vrednosti. Pri tem je potrebno poudariti dvoje in sicer, da so bila uporabljena tipala v skladu s priporočili ISO 8302 (uporabljen žica ima premer 0.2 mm) pa tudi to, da so nova priporočila zahtevnejša (debelina spoja obeh žic naj ne bi bila večja od 0.1 mm oziroma za vzorce z nizko toplotno upornostjo 0.04 mm, čemur pa uporabljena tipala ne ustrezajo). V primeru uporabe ustreznih tipal naj bi korekcija zaradi debeline ne bila potrebna, sicer pa je potrebno korekcijo upoštevati. V konkretnem primeru je red velikosti korekcije približno 60 %, torej je izmerjene vrednosti potrebno za ta odstotek povečati. Nedvomno pa se podobna vprašanja odpirajo tudi pri metodi linijskega toplotnega vira oz. pri izboljšani metodi vroče žice.

Izražanje rezultatov s povprečno vrednostjo, mediano in standardno variacijo pri metodi ščitnega ploščnega aparata ni v praksi, saj gre za eno meritev toplotne prevodnosti v stacionarnih pogojih kot povprečje lokalnih toplotnih prevodnosti. Standardna negotovost metode je tudi bistveno nižja od ± 0.1 W/mK, saj znaša po ISO 8302 največ $\pm 5\%$, seveda v primeru, da je vpliv

kontaktnih toplotnih upornosti zanemarljiv. Negotovost ± 0.1 W/mK je deklarirana na osnovi standardne deviacije merjenja temperaturne razlike in na osnovi ocene drugih vplivov, kot so določitev debeline vzorca, določitev dejanske ploskve, skozi katere teče toplotni tok in podobno. Dejanske negotovosti seveda niso v vseh primerih natančno 0.1 W/mK, vendar zaradi velikosti negotovosti ne deklariramo drugega decimalnega mesta.

Primerjava vrednosti, izmerjenih po obeh metodah je tematika za metrološko analizo obeh metod. Predlagano neskladje 10 % je glede na negotovosti obeh metod in tudi na negotovost referenčnega etalona najbrž prezahteven kriterij.

Pripombe same pa, ne glede na vsebino, kažejo, da je toplotna prevodnost kamnin zanimiva tema, ki si zasluži temeljitejšo primerjavo in detajlno metrološko analizo. Z avtorji Pripomb smo pripravljeni načrtovati primerjalne meritve in po najboljših močeh določiti realne negotovosti tako metode ščitnega plošnega aparata kot tudi metode linijskega toplotnega vira ter realne vrednosti toplotne prevodnosti vzorcev."

Komentar k načinu priprave vzorca.

Sicer se z avtorjema Pripomb strinjamo in se možnosti vpliva pravilnega odvzema vzorca kamnine na rezultat meritve zavedamo. Odvzem vzorca kamnine, ki je namenjena uporabi kot naravni kamen, pa se v prvi vrsti mora podrežati zahtevam ekonomičnosti eksploatacije. Z drugače odvzetimi vzorci bi lahko dobili drugačne rezultate, ki bi bili za uporabnika naravnega kamna brez vrednosti, saj ne bi odražali dejanskega stanja kamnine po vgradnji. Zato predlogi obeh avtorjev Pripomb niso sprejemljivi.

Stacionarna meritev toplotne prevodnosti kamnine je določena s standardizirano metodo, ki določa tudi način priprave vzorca. Zaradi ponovljivosti meritve je bila ta izvedena skladno s predpisanimi pogoji, ne oziraje se na to, da bi npr. prav vlaga v kamnini povzročila razliko v meritvi. Ponavljamo, da bi ta vpliv lahko ovrednotila edino oba avtorja meritev s stacionarno in nestacionarno metodo.

Izmerjene toplotne prevodnosti apnenecv osmih različnih avtorjev (B i l b i j a, 1984, R z h e v s k y & N o v i k, 1971, S a x o v et al, 1985, G a l s o n et al, 1987, K r i s t i a n s e n et al, 1981, 1982, P o u l s e n et al, 1982), katerih metode meritev so različne, se gibljejo med 1 do 3,5 W/mK. Enako število meritev je takih, pri katerih je toplotna prevodnost med 1 - 2 W/mK in med 2 - 3 W/mK. Podobno je z literaturnimi podatki toplotne prevodnosti za magmatske kamnine. Zato avtorice s primerjavo rezultatov meritev slovenskih kamnin z meritvami tujih avtorjev nismo mogle dobiti odgovora, katera od uporabljenih metod je primernejša.

Poudarjamo pa, da je treba meritve toplotne prevodnosti kamnin, ki se uporabljajo kot naravni kamen zaradi specifičnosti odvzema vzorca in kasnejše uporabe kamnine podrediti prav uporabi in pogojem, ki jim je ta izpostavljena po vgradnji, zato ponavljamo sklep članka, da je stacionarna metoda primernejša. Poleg tega je v gradbeništvu standardizirana in obvezujoča.

Upamo, da bosta avtorja Pripomb, D. Rajver in D. Ravnik, v bodoče želela sodelovati pri razreševanju problemov, ki jih je naš članek in njun komentar odkril in da bomo uporabniki rezultatov meritev toplotne prevodnosti, pa naj bo ta merjena z izboljšano metodo grelne žice ali s stacionarno metodo, kmalu izvedeli, v kakšnih primerih je bolje uporabiti eno ali drugo metodo oz. kakšna je korelacija med njima.

Summary

Here are some answers to the discussion of D. Rajver and D. Ravnik in order to explain the problems with the measurement and interpretation of the thermal conductivity of natural stones using two different methods.

The thermal conductivity measurements were correlated with the mineralogical and petrological characteristics of the investigated stones. Interpretation of the thermal conductivity measurements using both methods (the guarded hot plate method and improved hot wire method) was not treated in the article. The authors of the article are not experts regarding any of the used me-

thods. Correlation between the results given by both of the methods used is therefore not the matter of their investigation.

The steady state method was chosen as the applicable method and furthermore, the steady state method is the standardised method for the investigation of building materials with low thermal conductivities.

Literatura

Bilbija, N. 1984: Tehnička petrografija. Naučna knjiga, 239 pp., Beograd.

Rzhavsky, V. & Novik, G., 1971: The Physics of Rocks. Mir Publishers, 320 pp., Moskva.

Saxov, S., Balling, N. & Kristiansen, J. I., 1985: Thermal conductivity of rocks from

Danish and adjacent areas. Geologiska Foreningens i Stockholm Forhandlingar, 107, (4), 329-335.

Galsen, D. A., Wilson, N. P., Scharli, U. & Rybach, L., 1987: A comparison of the divided-bar and QTM methods of measuring thermal conductivity. Geothermics, 16, (3), 215-226.

Kristiansen, J. I., Saxov, S. & Balling, N., 1982: The thermal conductivity of some crystalline and sedimentary rocks from Scandinavia. Geothermal Resources Council. Transactions, 6, 129-132.

Kristiansen, J. I., Saxov, S., Balling, N. & Poulsen, K., 1982: In situ thermal conductivity measurements of Precambrian, Paleozoic and Mesozoic rocks on Bornholm, Denmark. Geologiska Foreningens i Stockholm Forhandlingar 104, 49-56.

Poulsen, K., Saxov, S., Balling, N. & Kristiansen, J. I., 1982: Thermal conductivity measurements on Silurian limestones from the Island of Gotland, Sweden. Geologiska Foreningens i Stockholm Forhandlingar 104, 349-356.

Odgovor D. Rajverja in D. Ravnika na *Odgovor* avtorjev na *Pripombe*

V najinih *Pripombah* sva želela pojasniti nekatere trditve avtoric glede neskladnosti meritev toplotne prevodnosti (λ) po stacionarni in nestacionarni metodi. Avtorji so vendar odločno pripisali omenjene razlike uporabi instrumenta po nestacionarni metodi (last Geološkega zavoda Slovenije - GeoZS), ki po njihovem daje »vprašljive« rezultate. Ker so bili tem rezultatom podobni tudi podatki λ na ekvivalentnih kamninah v tuji literaturi, smatrajo tudi te za vprašljive. Po njihovem naj bi bile tudi geofizikalne, točneje geotermalne meritve, nezanesljive. To je neverjetna trditev, ki temelji samo na uporabi nestacionarne metode določanja λ .

Avtorji pa sploh niso reagirali na druga najina vprašanja in argumente, temveč so razglabljali o drugih zadevah, ki sploh niso bile predmet *Pripomb*. Zelo čudno je njihovo mnenje o tem, da se vzorci naravnih kamnov ne morejo smatrati za »točno ekvivalentni« kamninam, ki so predmet »geofizikalnih raziskav«.

Nestacionarna metoda grelna žice kakor tudi stacionarna metoda s ščitenim ploščnim aparatom sta absolutni metodi. Instrument po nestacionarni metodi, ki je uporabljan na GeoZS, je bil večkrat pozitivno testiran v priznanih geofizikalnih ustanovah v Evropi.

Glede toplotnih izgub kot jih omenjajo avtorji v svojem *Odgovoru*, podajamo obravnavo tega problema pri izboljšani nestacionarni metodi. Sprva se je razvila enostavna metoda vroče žice, kjer se je grelna žica postavila med dve polovici merjenega materiala, vendar se je moral izdolbsti ustrezen žlebiček za žico, kar je povzročalo težave pri pripravi vzorca in še vedno probleme pri kontaktni upornosti. Zato je bila pozneje razvita izboljšana metoda grelna žice, pri kateri je zgornja površina standardni material, ki se bolje prilega merjencu. S tem pa se precej izniči izgube toplote na kontaktu. Vsak instrument za merjenje fizikalnih lastnosti ima za kontrolo pravičnega delovanja in pridobivanje kvalitetnih rezultatov uradno priznan standard. Take standarde imamo za nestacionarno metodo merjenja λ na GeoZS. Zato standard ni operativni del osnovnega instrumenta, kot napačno trdijo avtorji svojega *Odgovora*.

Za vse ostale njihove predloge smatramo za najbolj primerno, da poiščejo ustrezne informacije v strokovni literaturi, ki sva jo citirala v svojih *Pripombah*. Za morebitno sodelovanje na področju teh meritev smo pa še vedno na voljo.

V gradbeništvu je metoda s ščitenim ploščnim aparatom standardizirana, če pa

daje napačne rezultate, pa očitno niso izpolnjeni vsi pogoji za njeno pravilno delovanje.

Response by D. Rajver and D. Ravnik to the authors reply

The authors did not give in their *Reply* at least one satisfactory and professionally founded reply to the criticism in our *Discussion* in spite of one example from the literature (see Fig. 2a). In their *Reply* they state incorrectly that the non-steady state

methods need a reference standard for λ . This is not a working part of the instrument but it is used for establishing a unit of measurement of a physical quantity.

For all other propositions of the authors, regarding the construction and measuring processes of determination of λ or selection of an appropriate type of instrument, they can find all necessary information in professional literature, cited in the References of our *Discussion*.

D. Rajver, D. Ravnik