

Pripombe na članek

Discussion on

Thermal conductivity of selected types of Slovenian natural stone

(Ana Mladenovič, Breda Mirtič, Nada Vižintin, RMZ - Materials and Geoenvironment, Materiali in geokolje. 46/3, p. 539–547, Ljubljana, julij 1999)

Dušan RAJVER¹ & Danilo RAVNIK²

¹ Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, 1001 Ljubljana, Slovenija

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

Avtorice znanstvenega članka obravnavajo pomen in rezultate meritev toplotne prevodnosti na izbranih vzorcih kamnin iz devetih delujočih kamnolomov v Sloveniji. Opisujejo rezultate, izmerjene s stacionarnim in nestacionarnim instrumentom. Na podlagi različnih rezultatov na istih vzorcih kamnin sklepajo na pravilnost obeh merilnih instrumentov oziroma uporabljenih metodologij merjenja. Vrednosti toplotnih prevodnosti posameznih kamnin služijo za oceno njihove odpornosti proti raznim vplivom, predvsem proti atmosferskim.

Avtorice so obravnavale toplotne prevodnosti (λ) petih vzorcev apnencev, dveh klasičnih apnenčastih sedimentov in dveh vzorcev magmatskih kamnin (granodiorit, gabro) iz slovenskih kamnolomov. V *Uvodu* obširno navajajo razne vplive, ki so pomembni za degradacijo naravnih kamnov. Osredotočijo se na merjenje λ na posebej pripravljenih vzorcih. Na toplotne razmere na površini kamna vplivajo tako λ kot njegova specifična toplota c . Menimo pa, da je za hitrost razširjanja toplote s površine v kamnino in za njeno globinsko prodornost pomembna zlasti toplotna difuzivnost ali temperaturna prevodnost κ , ki je definirana z izrazom $\kappa = \lambda / \rho \cdot c$ [m^2/s]. Pri tem je ρ gostota kamnine.

Pri analizi gornjega članka moramo upoštevati naslednja dejstva:

- 1) Fizikalne lastnosti kamnin niso konstantne, temveč se posamezne meritve na istem vzorcu bolj ali manj sipljejo okoli neke srednje vrednosti. To velja posebno za meritve λ kamnin. Vzrokov za to je veliko in nekateri so obširno naštet v gornjem članku. Zato neko fizikalno lastnost kamnine prikažemo s tremi parametri:
 - z aritmetično sredino vseh meritev na istem vzorcu in pri istih merskih pogojih temperature in tlaka ter s standardno deviacijo,
 - s številom posameznih neodvisnih meritev ter
 - z vrednostjo mediane (Me)

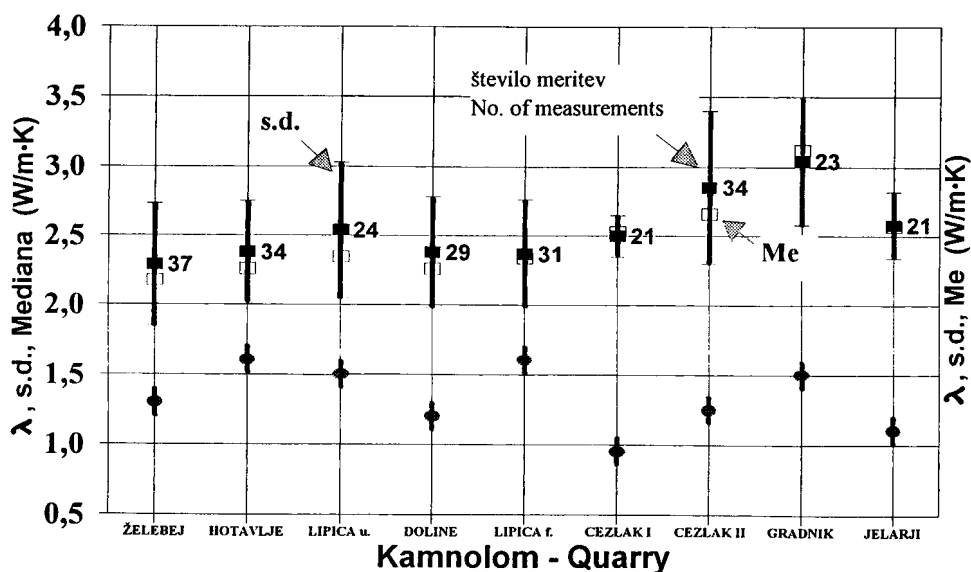
Najbolj običajen je prikaz neke fizikalne lastnosti z njeno aritmetično sredino, kar služi grobi informaciji. Če pa meritve fizikalnih lastnosti uporabljamo za primerjavo med posameznimi rezultati na isti kamnini ali med rezultati, ki so pridobljeni na istem vzorcu z raznimi instrumenti in metodologijami, potem je priporočljivo uporabiti vse tri navedene parametre.

- 2) Rezultati meritev fizikalnih lastnosti kamnin s katerikoli instrumentom po kakršnikoli metodologiji na istih vzorcih in pri enakih merskih pogojih se morajo med seboj ustrezno skladati. Neskladanje naj je manjše od 10%. Merski instrumenti morajo biti fizikalno preverjeni, pravilnost in stabilnost njihovega delovanja pa se mora občasno kontrolirati.

V naših Pripombah bomo namesto pojma "naravni kamen", privzetega v gradbeniš-

tvu in kamnarstvu, uporabljali večinoma izraz "kamnina", ki je uveljavljen v geologiji in geofiziki. Vendar naravni kamen ni sinonim za kamnino.

V članku so v pogl. Rezultati in diskusije v tab.1 prikazane λ devetih kamnin, ki so vse opremljene z enakimi nenatančnostmi $\pm 0,1$ W/m·K, kar je dvomljivo. Povedo tudi, da so njihove vrednosti λ "nekoliko manjše" od tistih v literaturi. V naslednjem tudi razložijo svoje razloge o teh odklonih, ki so definirani z JUS standardom U.A2.020. Takoj v začetku diskusije rezultatov z neverjetno



■ GeoZS - Geological Survey, Ljubljana • ZAG - SNB&CEI, Ljubljana

Sl. 1a. Primerjava meritev toplotne prevodnosti kamnin po stacionarni (merjeno na Zavodu za gradbeništvo Slovenije - ZAG, Ljubljana) in po nestacionarni metodi linijskega vira (merjeno na Geološkem Zavodu Slovenije - GeoZS, Ljubljana).

Vrste kamnin iz omenjenih kamnolomov:

Želebej: apnenčeva breča Cezlak I: granodiorit
Jelarji: apnenčev peščenjak Cezlak II: gabbro

Kamnine iz ostalih kamnolomov so apnenci.

Fig.1a. Comparison of thermal conductivity measurements by steady-state method (measured at the SNB & CEI, Ljubljana) and by transient line source method (measured at the Geological Survey of Slovenia, Ljubljana).

Rock types from the cited quarries:

Želebej: calcareous breccia Cezlak I: granodiorite
Jelarji: calcareous sandstone Cezlak II: gabbro

Rocks from the other quarries represent limestones.

odločnostjo meritve λ z nestacionarno metodo v geofizikalnih raziskavah označijo kot "vprašljive". Podajo tudi razlago za te razlike: to naj bi bila uporaba nestacionarnih merilnih instrumentov napram njihovi stacionarni metodi. Za tako oceno so se avtorice očitno odločile na podlagi svojih devetih meritev λ po stacionarni metodi in prepričanju, da so njihovi rezultati edino pravilni. Nadalje trdijo, da se "vzorci naravnih kamnov, na katerih so izmerjene λ , ne morejo smatrati ekvivalentni vzorcem kamnin, ki so predmet geofizikalnih raziskav. Zato se postavlja vprašanje, ali je primerjava med obema načinoma meritev sploh smiselna. Vedeti je tudi treba, da je naravni kamen iz delujočih kamnolomov z ozirom na njegove mehansko-fizikalne značilnosti in odpornostjo proti degradaciji zelo specifična vrsta materiala, ki se nahaja na zelo omejenih lokacijah". Sprašujejo se, "če niso mogoče vrednosti, dobljene po nestacionarni metodi dejansko relativne vrednosti, ki so, čeprav uporabne za primerjalne študije v geofizikalnem polju, neustrezne za toplotno načrtovanje in za oceno odpornosti proti preperevanju" (str.541).

Očitno avtorice niso razumele bistva teh primerjalnih meritev, ki temelje izključno na prizetih pogojih in metodologiji merjenja ter na obdelavi rezultatov. Sodeč po njihovih izjavah lahko sklepamo, da jim tudi bistvo geofizikalnih raziskav ni jasno. Geološki Zavod Slovenije (GeoZS) je dobil za meritev njihovih devet oblikovanih vzorcev kamnin samo s prošnjo, da izmerimo λ še z našo nestacionarno metodo. Za zahtevane meritve ni prav nič pomembno, odkod so ti materiali, kakšna je njihova sestava in druge lastnosti, kar so razlagale avtorice v gornjem odstavku. Kaj je bistveno za primerjavo metod, smo razložili v začetku naših Pripomb. Zato je nadaljnja diskusija prejšnjega odstavka odveč.

Avtorice menijo, da bi bile potrebne še poglobljene matematično-fizikalne študije o vplivu raznih faktorjev na določitev λ . Poudarjamo, da so take študije v literaturi kar temeljito obdelane (Carslaw & Jaeger, 1959; Čeremenskij, 1972; Buntebarth, 1980; Schärli & Rybach, 1984; Haenel et al., 1988 in drugi).

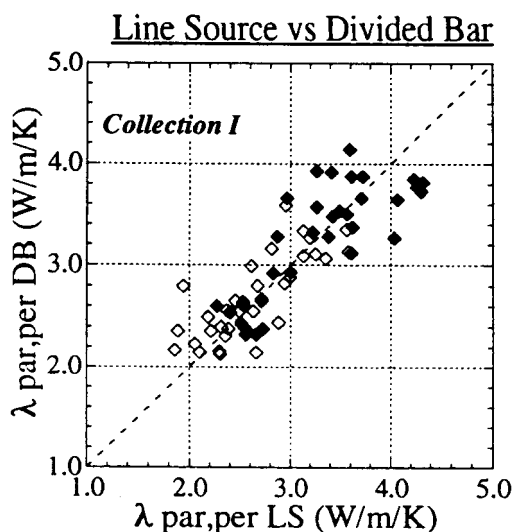
Razglabljanje o raznih vplivih na vrednosti λ kamnin je sicer potrebno, vendar

so vsi ti vplivi latentno skriti v izmerjenih podatkih. Pri vsem naštevanju vplivov, ki so znani že nekaj desetletij, pa so avtorice pozabile na pomemben vpliv na vrednosti λ : to je meritev na vzorcu v osušenem in z vodo nasičenem stanju. Prav tako je важен vpliv anizotropije in foliacije kamnin, saj so to lahko tudi odločujoči parametri pri oceni degradacije kamnin zaradi atmosferskih vplivov. Vpliv raznih mineralnih sestavin na celotno vrednost λ kamnin ni linearen. To so večkomponentni sistemi in na podlagi λ posameznih komponent je treba uporabiti razne modele za izračun celotne λ kamnine (Haenel et al., 1988). Zato Zaključki na str. 544 pri sl. 2. le niso enostavni.

Avtorice so na sl.1 prikazale grafično tudi vrednosti λ vseh devetih vzorcev, izmerjenih po stacionarni metodi, ki je vsklajena s predpisi JUS U.A2.020 Zavoda za Gradbeništvo Slovenije (ZAG), in vrednosti meritev z nestacionarnim instrumentom po prehodni metodi linijskega vira (ang. line source - LS) Geološkega Zavoda Slovenije (GeoZS). Ta graf smo narisali še enkrat, vendar s popolnimi podatki meritev po nestacionarni metodi, dodali smo za vsak vzorec še mediano in število posameznih neodvisnih meritev na vsakem vzorcu (sl.1a). Primerjava med obema načinoma meritev ni povsem pravilna, ker so meritve po stacionarni metodi napravljene samo enkrat. V članku znašajo povprečne vrednosti vseh vzorcev po stacionarni metodi okoli 1,3, po nestacionarni pa približno 2,6 W/m·K. Razlika med njima znaša več kot 1 W/m·K, kar je preveč.

Glavni vzrok neujemanja vrednosti λ po obeh metodah pripisujejo avtorice predvsem uporabi nestacionarnega instrumenta z linijskim virom. Čeprav je v geofiziki znano, da je uporaba nestacionarnega instrumenta tipa linijskega vira splošno uporabljena (Haenel et al., 1988; Popov et al., 1999), podajamo za naš instrument nekaj pojasnil.

Leta 1982 je bila na Oddelku za fiziko FNT Univerze v Ljubljani razvita najprej fizikalna teorija nestacionarne metode (Prelovšek et al., 1982; Prelovšek & Uran, 1984), prav tako tudi na GeoZS (Uran, 1982). Na podlagi japonskega nestacionarnega merilnika QTM (Sumikawa & Arakawa, 1976) pa je bil na



Sl. 2a. Primerjava rezultatov meritev toplotnih prevodnosti po stacionarni metodi "divided bar" (DB) in po nestacionarni metodi linijskega vira (LS) na kamninah iz KTB vrtine v Nemčiji (Popov et al., 1999).

- prazni kvadrati: toplotna prevodnost vzporedna foliaciji (λ_{par})
 polni kvadrati: toplotna prevodnost pravokotna na foliacijo (λ_{per})

Fig. 2a. Comparisons of results of the thermal conductivity measurements by divided bar (DB) and by line source method (LS) on the rock samples from the KTB borehole in Germany (Popov et al., 1999).

- open diamonds: thermal conductivity parallel to the foliation (λ_{par})
 solid diamonds: thermal conductivity perpendicular to the foliation (λ_{per})

Institutu J. Stefan izdelan prototip našega merilnika. Na GeoZS so bile izvedene obsežne meritve z novim instrumentom (Ravnik & Uran, 1984). Rezultati na istih vzorcih so bili kontrolirani na Geofizikalnem inštitutu Univerze L.Eötvös v Budimpešti, posebno detajlno pa s klasično stacionarno metodo "divided bar" = DB (Kappelmeyer & Haenel, 1974; Haenel et al., 1988) na Geofizikalnem Inštitutu Čehoslovaške Akademije Znanosti v Pragi. Kontrole so bile napravljene še na ETH v Zürichu, nadalje na Mednarodnem Inštitutu za geotermalne raziskave v Pisi (Rajver, 1990) in na Mednarodni geoter-

malni delavnici pod okriljem IASPEI na Češkem leta 1996, kjer so strokovnjaki Državne Geološke Raziskovalne Akademije iz Moskve preverili naše meritve še z optično skenirajočo lasersko metodo določanja λ . Za občasne kontrole instrumenta pa imamo na GeoZS pripravljenih nekaj standardov in mednarodno priznan standard iz taljenega kremenca za 1,4 W/m·K. Vse našete kontrole so dale zadovoljive rezultate z nenatančnostjo manj kot 10%.

Ugotovitev avtoric, da se nestacionarna metoda uporablja le v geotermiji, je neosnovana. Meritve λ kamnin po tej in drugih metodah so potrebne za izračun gostote toplotnega toka Zemlje v fundamentalnih in uporabnih geotermičnih študijah in v petrofizikalnih raziskavah geoloških materialov. Geofiziki jih uporabljajo že 40 let. Res pa je, da so v geotermiji meritve λ z nestacionarno metodo zelo razširjene, ker je hitra, je zelo fleksibilna in omogoča tudi meritev toplotne difuzivnosti. Izvajajo jo posebno na jedrih iz vrtin v naftni industriji, v geoloških raziskovalnih in znanstvenih projektih.

Trditev, da so rezultati po nestacionarni metodi vprašljive vrednosti in zato v gradbeništvu neuporabni, kaže na slabo poznavanje geotermičnih meritev. Pri meritvah po obeh metodah dejansko nastopajo težave (nekontrolirane izgube toplote, velike in spremenljive kontaktne toplotne upornosti). Kvaliteta meritev je veliko odvisna od operatorja, ki pripravlja vzorce in izvaja meritve. Za veliko sipanje rezultatov na istem vzorcu je lahko kriva ravno priprava vzorcev in merjenje, ne pa različnost merilnih instrumentov. Nestacionarne metode imajo pri tem rahlo prednost pred stacionarnimi metodami. V svetovni literaturi je bilo veliko napisanega ravno o primerjalnih meritvah z raznimi instrumenti za merjenje λ (Carslaw & Jaeger, 1959; Kappelmeyer & Haenel, 1974; Buntebarth, 1980; Sass et al., 1984; Pribnow & Sass, 1995; Galson et al., 1987; Popov et al., 1999).

Od najnovejših primerjalnih raziskav med danes najbolj uveljavljenimi metodami meritev λ v geofiziki (stacionarna metoda divided bar DB ter nestacionarni metodi linijskega vira LS in optičnega skeniranja), predstavljamo v sl. 2a rezultate primerjave med metodama DB in LS (Popov et al.,

1999). Merjenja so bila izvedena na vzorcih metamorfnih kamnin, predvsem amfibolitov in gnajsov, iz nemške raziskovalne vrtnice KTB, vzetih iz globin 400 do 4000 m. Kamnine so termično nehomogene in močno anizotropne. Na vsakem vzorcu so bile izvedene meritve λ paralelno (λ_{par}) in pravokotno (λ_{per}) na foliacijo. Povprečna vrednost preiskanih kamnin je okoli 3,3 W/m·K. Povprečne relativne difference med podatki za λ_{par} so zanemarljive (<1%), za λ_{per} pa so sprejemljive (<3,2%). Znatne nehomogenosti teh vzorcev so verjetno razlog za manjše razlike v primerjalnih rezultatih.

Na podlagi številnih primerjalnih meritev v literaturi lahko zaključimo, da so stacionarni in nestacionarni merilniki med seboj izmenljivi, z njimi izmerjene toplotne prevodnosti pa so v mejah dopustnosti.

Glede na pojasnila v naših Pripombah smatramo, da so rezultati meritev toplotnih prevodnosti devetih izmerjenih vzorcev po stacionarni metodi z instrumentom Zavoda za Gradbeništvo Slovenije veliko prenizki.

Summary

Thermal conductivity measurements on nine selected rock specimens from active quarries in Slovenia are critically reviewed. The measurements were performed with both steady-state and transient-state methods using appropriate instruments at the Slovenian National and Civil Engineering Institute (SNB-CEI) and Geological Survey of Slovenia (GeoZS), both from Ljubljana, respectively.

As it is evident from Fig. 1a thermal conductivities of all specimens, measured by both methods and on the same samples differ considerably. In their publication the authors believe there are two main reasons for this discrepancy. The first one is the inconvenience for the measurements with the non-steady state instrument in general; the second one is the *“very specific kind of material, which occurs at very limited locations and cannot be considered to be the exact equivalent of the rock specimens which are usually the subject of geophysical research”* (p. 541).

Some possible reasons for eventual errors and malfunctions when measuring the

thermal conductivity are explained in different manuals and publications (Haenel et al., 1988).

Regarding the first argument, it is well known that non-steady state line source instruments are of a current use in geophysics. We make every effort to control our instrument in our laboratory with different standards together with the internationally recognized standard of fused quartz ($\lambda = 1,4$ W/m·K), and also abroad in various geophysical laboratories in Budapest, Prague, Zürich and Pisa.

Concerning the second reason, it is obvious to point out only the correct determinations of thermal conductivities on the above cited rock specimens. Therefore, it is out of question to consider their geological-petrological and mechanical characteristics in the process of comparison. But the statement of the authors of the paper about the non-equivalency of rocks in geophysical research and those used for different industrial purposes is untenable.

Finally, we are convinced that the data obtained with the steady-state instrument of the SNB-CEI are definitely much too low.

Zahvala

Zahvaljujeva se Bojanu Uranu za kritičen pregled in koristne predloge za izboljšavo teksta teh Pripomb.

Literatura

- BuntebARTH, G. 1980: Geothermie. - Springer Verlag, 156 p., Berlin.
- CarSLAW, H.S. & Jaeger, J.C. 1959: Conduction of Heat in Solids. - Oxford University Press, 510 p., Oxford.
- Ceremenskij, G.A. 1972: Geotermija. - Nedra, Moskva.
- GALSON, D.A., Wilson, N.P., SchaeRLI, U. & Rybach, L. 1987: A comparison of the divided-bar and QTM methods of measuring thermal conductivity. - Geothermics, 16, 215-226, Oxford.
- HaenEL, R., Rybach, L. & Stegena, L. 1988: Handbook of terrestrial heat-flow density determination. - Kluwer Academic Publishers, 486 p., Dordrecht.
- Kappelmeyer, O. & HaenEL, R. 1974: Geothermics with special reference to application. - Gebrüder Borntraeger, 238 p., Berlin, Stuttgart.

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.

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

Prellovšek, 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 MLADENOVICH¹, 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 mineraloškiimi lastnostmi preiskovanih kamnin in določiti njihovo korelacijo. Nikakor ni bil primarni namen v primerjavi obeh uporabljenih metodi, ker nobene od obeh metod ne izvaja nobena od av-

toric članka. Kljub temu je bila želja avtoric, da bi strokovnjaki, ki izvajajo uporabljene metode, 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 dovoljnjne 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 dveje in sicer, da so bila uporabljena tipala v skladu s priporočili ISO 8302 (uporabljena 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 temperature razlike in na osnovi ocene drugih vplivov, kot so doloĉitev debeline vzorca, doloĉitev dejanske ploskve, skozi katere teĉe toplotni tok in podobno. Dejanske negotovosti seveda niso v vseh primerih natanĉno 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 referenĉnega etalona najbrŹ prezahteven kriterij.

Pripombe same pa, ne glede na vsebino, kaŹejo, da je toplotna prevodnost kamnin zanimiva tema, ki si zasluŹi temeljitejšo primerjavo in detajlno metrološko analizo. Z avtorji Pripomb smo pripravljene naĉrtovati primerjalne meritve in po najboljših moĉeh doloĉiti realne negotovosti tako metode Źĉitenega ploŹnega aparata kot tudi metode linijskega toplotnega vira ter realne vrednosti toplotne prevodnosti vzorcev."

Komentar k naĉinu priprave vzorca.

Sicer se z avtorjema Pripomb strinjamo in se moŹnosti 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 podreŹati zahtevam ekonomiĉnosti eksploatacije. Z drugaĉe odvzeti mi vzorci bi lahko dobili drugaĉne rezultate, ki bi bili za uporabnika naravnega kamna brez vrednosti, saj ne bi odraŹali dejanskega stanja kamnine po vgradnji. Zato predlogi obeh avtorjev Pripomb niso sprejemljivi.

Stacionarna meritev toplotne prevodnosti kamnine je doloĉena s standardizirano metodo, ki doloĉa tudi naĉin 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 povzroĉila razliko v meritvi. Ponavljamo, da bi ta vpliv lahko ovrednotila edino oba avtorja meritev s stacionarno in nestacionarno metodo.

Izmerjene toplotne prevodnosti apnenec osmih razliĉnih 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 razliĉne, se gibljejo med 1 do 3,5 W/mK. Enako Źtevilo 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 specifiĉnosti odvzema vzorca in kasnejše uporabe kamnine podrediti prav uporabi in pogojem, ki jim je ta izpostavljena po vgradnji, zato ponavljamo sklep ĉlanka, da je stacionarna metoda primernejša. Poleg tega je v gradbeniŹtvu standardizirana in obvezujoĉa.

Upamo, da bosta avtorja Pripomb, D. Rajver in D. Ravnik, v bodoĉe Źelela sodelovati pri razreŹevanju problemov, ki jih je naŹ ĉlanek in njun komentar odkril in da bomo uporabniki rezultatov meritev toplotne prevodnosti, pa naj bo ta merjena z izboljŹano metodo grelnice ali s stacionarno metodo, kmalu izvedeli, v kakŹnih primerih je bolje uporabiti eno ali drugo metodo oz. kakŹna 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 obrazložitev 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 prilaga merjencu. S tem pa se precej izniči izgube toplote na kontaktu. Vsak instrument za merjenje fizikalnih lastnosti ima za kontrolo pravilnega 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