

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)

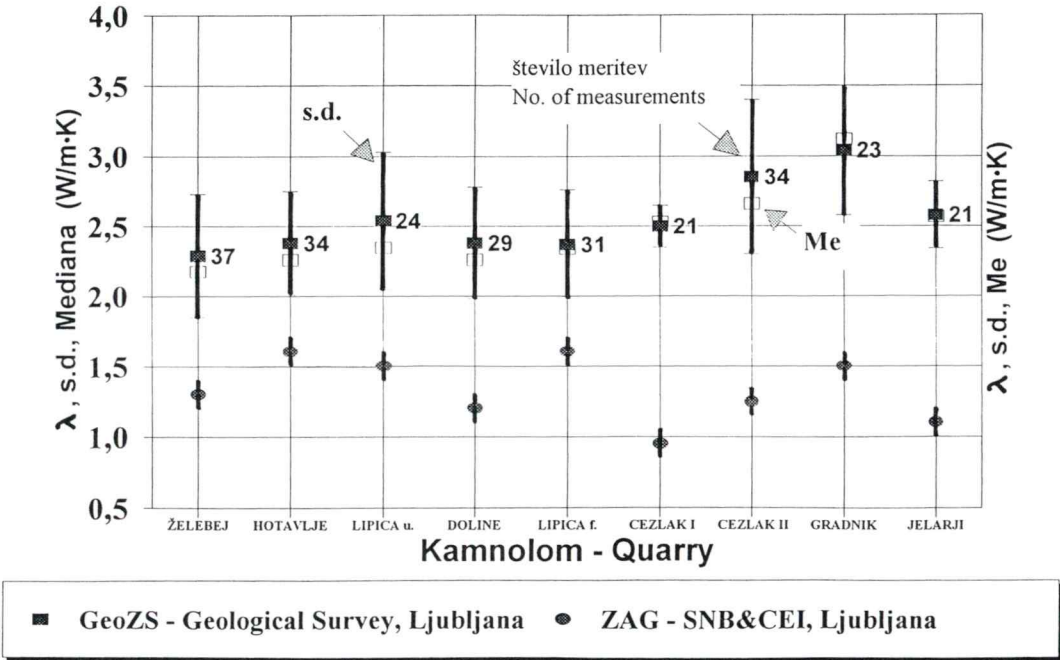
Najbolj običajen je prikaz neke fizikalne lastnosti z njeno aritmetično sredino, kar služi grobi informaciji. Če pa meritve fizikalnih lastnosti uporabljamo za primerjavo med posameznimi rezultati na isti kamnini ali med rezultati, ki so pridobljeni na istem vzorcu z različnimi instrumenti in metodologijami, 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 $\pm 0,1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, 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



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: gabro

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 privzetih 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).

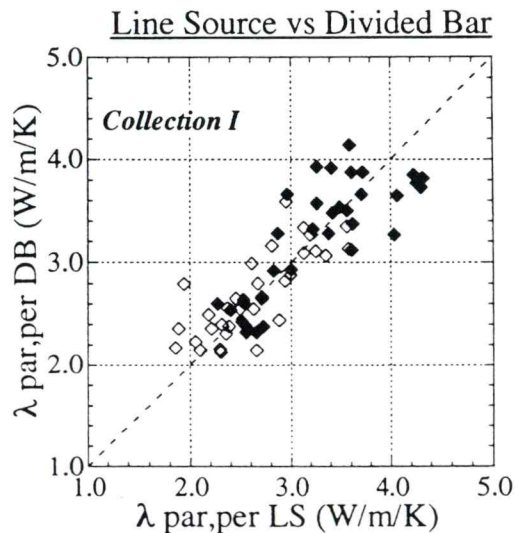
Razglabljanje o raznih vplivih na vrednosti λ kamnin je sicer potrebno, vendar

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 važen 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 & U r a n, 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 (Kappelmeier & 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 različnimi instrumenti za merjenje λ (Carslaw & Jaeger, 1959; Kappelmeier & 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, vzeti 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.
- Carlslaw, H.S. & Jaeger, J.C. 1959: Conduction of Heat in Solids. - Oxford University Press, 510 p., Oxford.
- Ceremenskij, G.A. 1972: Geotermija. - Nedra, Moskva.
- Galsion, 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.

Prelovski, P., Babič, M. & Uran, B. 1982: Meritve toplotne prevodnosti kamenin z izboljšano metodo grelna 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 grelni 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-