

MESTSKÝ TEPELNÝ OSTROV – ANALÝZA VZŤAHU MEDZI VYUŽITÍM KRAJINY A TEPLOTOU PODZEMNEJ VODY V BRATISLAVE

Daniela Rusnáková*, Dávid Krčmář*, Miloš Rusnák**

*Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra hydrogeológie, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava, dankarusnakova@gmail.com, david.krmar@uniba.sk

**Geografický ústav SAV, Štefánikova 49, 814 73 Bratislava, geogmilo@savba.sk

Urban heath island - analysis of the relationship between landscape utilization and groundwater temperature in Bratislava

The urban environment is affected by a change in a surface temperature, which is higher than its immediate surroundings. Construction, landscape transformation as well as human activities lead to the creation of a specific phenomenon called the urban heat island. Engineering networks, underground spaces and buildings construction in cities affect not only the surface temperature, but directly or indirectly the temperature of the groundwater. The aim of the paper was to identify individual factors influencing spatial variations of groundwater temperatures based on the comparison of land cover. Buildings and other built-up areas including roads, parking lots and foot-path strongly affect groundwater temperatures in Bratislava. On the contrary, forest vegetation, arable land, area without vegetation and shrubs exhibit negative correlation and lead to negative effect of construction reducing. Observing the groundwater temperature in Bratislava pointed to maximum temperatures of groundwater in the city centre during October, while the minimum in April and May. The temperature in the centre of Bratislava is higher by 5 to 8°C compared to the surrounding landscape.

Key words: groundwater, urban heat island, land cover, Bratislava, Slovakia

ÚVOD

Mestské prostredie je výrazne ovplyvnené zvýšenou teplotou v porovnaní so svojím okolím. Howard (1818) už na začiatku 19. storočia analýzou teploty vzduchu v jednotlivých častiach Londýna definoval problematiku mestského tepelného ostrova (UHI – urban heat island) ako oblasť mesta, ktorá je výrazne teplejšia ako jeho bezprostredné okolie. Tematika mestského ostrova tepla je spracovaná vo svetovej literatúre obsiahlo a predstavuje veľký environmentálny problém (Rizwan et al. 2008 a Holec a Šťastný 2017). Ferguson a Woodbury (2007) naznačujú, že povrchové teploty sú spojené s využitím zeme a poukazujú na to, že efekt tepelného ostrova v mestách má výraznú a komplexnú priestorovú variabilitu. Toto zvýšenie teploty v urbanizovaných územiach je výsledkom absorpcie slnečného žiarenia antropogénnymi objektmi, keď sa neodparuje žiadna voda pri evaporácii (Herb et al. 2008 a Epting a Huggenberger 2013), pričom objekty pohlcujú teplo (Epting a Huggenberger 2013 a Benz et al. 2016). Ak je plôch s vegetáciou nedostatok (ako aj pôdnej vlhkosti), využívanie absorbovaného slnečného žiarenia ako súčasť fotosyntézy je obmedzené (Gago et al. 2013). Ďalej sa v mestách prejavuje vplyv kombinácie tepelného toku pod mestami z ich kanalizačných systémov, teplovodov a vykurovaných suterénnych priestorov (Epting a Huggenberger 2013 a Benz et al. 2016) a na druhej strane vplyv zníženia prúdenia vzduchu (Akbari et al. 2001 a Giridharan et al. 2004). Človek samotný je súčasne zdrojom veľkého množstva

antropogénneho tepla (Taniguchi 2006, Taniguchi et al. 2007 a Taylor a Stefan 2009), pričom vykurovanie mesta oproti okolitému prostrediu zvyšuje jeho prúde-
nie po meste, ktoré následne teplo zachytáva (Giridharan et al. 2004 a Taylor
a Stefan 2009).

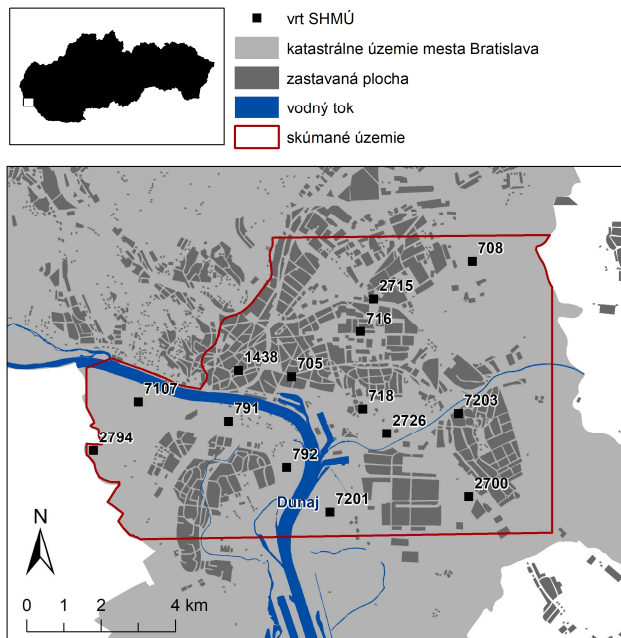
Taylor a Stefan (2009) skúmali vplyv urbanizácie na plytké teploty podzem-
ných vôd a dospeli k záverom, že teplota pozemnej vody v plne urbanizovaných
regiónoch (príklad Minneapolis/St. Paul) je až o 3°C vyššia ako v oblastiach s poľ-
nohospodárskym využitím v rovnakej zemepisnej šírke. Vo väčšine situácií sa
vzťah medzi povrchom a podpovrchovými procesmi dá len ťažko určiť. Zhu et al.
(2015) sa vo svojej štúdií zamerali na vývoj mestského tepelného ostrova v Nemeckom
meste Kolín nad Rýnom, kde odhadli, že teploty podzemnej vody sú o viac
ako 5°C vyššie ako v prírodnom prostredí. Epting a Huggenberger (2013) tvrdia, že
superpozícia niekoľkých tepelných procesov vedie k zvýšeniu teploty podzemnej
vody až o 9°C a režim vody v meste je ovplyvňovaný charakterom zástavby a roč-
ným vykurovacím obdobím, tepelným využívaním podzemnej vody, sezónnymi
trendmi, interakciou rieky s podzemnou vodou, ako aj zmenou klímy a jej dôsled-
kami. Prevláda však vplyv antropogénnych faktorov. Ferguson a Woodbury (2004)
pripisujú zmeny teplôt podzemnej vody v mestách tepelným stratám z budov, pri-
čom ich vykurovací účinok pod úrovňou terénu závisí od hĺbky základov, rozsahu
pivničných priestorov, počtu podzemných podlaží, použitého stavebného materiálu,
izolácie stien, podlahových dosiek, účinnosti izolácie, vykurovania podzemných
podláh a pod. Samozrejme, dôležité sú aj fyzikálne vlastnosti podlažia a hĺbka hla-
diny podzemných vôd. Aj v nevykurovaných pivniciach je ročná priemerná teplota
zvyčajne vyššia ako priemerná ročná teplota povrchu pôdy. Horecká a Tekušová
(2011) poukazujú na anomáliu teploty podzemnej vody v centre Bratislavy vply-
vom zástavby v mezoklimatickom meradle. Krčmář et al. (2016) upozorňujú na
trend zvyšovania teploty podzemnej vody v Bratislave o približne 0,035°C za rok.

Energia je v podpovrchovej vrstve uskladnená v podobe zvýšených teplôt pod-
zemnej vody (Benz et al. 2015). Výsledky ukazujú, že sieť diaľkového vykurova-
nia predstavujú bezpochyby najväčší zdroj tepelného toku s hodnotami vyššími ako
60 W/m², pričom priestorové rozloženie celkového toku závisí hlavne od tepelného
gradientu v nasytenej zóne. Teploty podzemnej vody v urbanizovaných územiach
sú častokrát vyššie ako povrchové teploty pôdy v dôsledku dodatočného zdroja
tepla v budovách a ich pivniciach (Benz et al. 2016). Na modelovanie teplôt pod-
zemnej vody pre jednotlivé urbanizované oblasti sa preto využívajú vzťahy, ktoré
spájajú teplotu podzemnej vody a stredné ročné teploty povrchu pôdy, hustotu bu-
dov a teploty suterénnych priestorov. Menberg et al. (2013) poukazujú na existen-
ciu lokálnych anomálií až do + 20°C, ktoré pramenia z lokálnych zdrojov tepla,
nedostatočne izolovaného prenosu energie alebo skládok. Tie odrážajú dlhodobú
akumuláciu tepelnej energie za niekoľko desaťročí, resp. storočí, ako aj súhrn rôz-
nych faktorov, ktoré predstavujú najmä tepelné straty zo suterénov, zvýšených tep-
lôt zemského povrchu a celej podpovrchovej infraštruktúry. Oke (1973) poukazuje
na priamy vzťah medzi zmenami využívania krajiny a nárastom teploty, ktoré sú
výsledkom zmeny využitia zeme a mestskej infraštruktúry, pričom sa teplota
v mestách v porovnaní s vidiekom zvyšuje o 2 až 5°C. Priamym dôsledkom je pre-
ukázateľné zvýšenie teploty povrchu pôdy a podzemnej vody (Taniguchi et al.
2007). Všetky tieto účinky vedú k tepelným anomáliám a súvisia s otepľovaním
povrchu v dôsledku kombinovaného efektu globálneho otepľovania a urbanizácie
(Taniguchi 2006, Taniguchi et al. 2007 a Menberg et al. 2013).

Cieľom príspevku je analyzovanie priestorových vzťahov medzi teplotou podzemnej vody a krajinnou štruktúrou na zemskom povrchu v zastavanom prostredí Bratislavy, identifikovať súčasný stav režimu podzemnej vody v meste a odvodiť potenciálny prirodzený stav skúmaného útvaru. Hoci sa podzemné vody v mestských oblastiach čoraz viac využívajú i na chladiace účely, tepelný potenciál vyplývajúci zo zvýšených teplôt podzemnej vody sa vo všeobecnosti nevyužíva. Prezentovaný prístup poskytuje základ pre nastavenie kombinovaných a tepelne vyvážených vykurovacích a chladiacich systémov v centrách miest.

VYMEDZENIE ZÁUJMOVÉHO ÚZEMIA

Priestorové vzťahy medzi teplotou podzemnej vody a jednotlivými antropogénnymi objektmi boli sledované v zastavanej časti Bratislavy. Sledované územie bolo ohraničené priestorovým rozložením jednotlivých monitorovaných vrtov (obr. 1) z databázy Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ). Skúmané územie zahŕňa centrálnu časť husto zastavaného historického jadra Bratislavy, širšie centrum, ako aj príahlé zóny, ktoré svojím charakterom reprezentujú nezastavané, sčasti prirodzené (lužné) lesy a otvorené areály (poľnohospodársky využívané plochy). Podložie územia je tvorené prevažne aluviálnymi naplaveninami rieky Dunaj s vysokou priepustnosťou (od 10^{-4} do 10^{-2} m. s $^{-1}$), kde sa pod kvartérnymi aluviálnymi štrkmi nachádzajú vo väčšine územia neogénne íly (okrem východnej časti, kde sa nachádzajú neogénne piesky). Podstatnú časť povrchu územia však tvoria antropogénne sedimenty (stavbné navážky, násypy zo skládok priemyselného odpadu a pod.) Hrúbka kvartérnych sedimentov v danom území predstavuje cca 5 až 30 metrov (Maglay et al. 2005).



Obr. 1. Lokalizácia skúmaného územia a sledovaných vrtov SHMÚ, v ktorých bola meraná teplota a hĺbka hladiny podzemnej vody na území Bratislavy (podklad: OpenStreetMap 2017)

METODIKA PRÁCE

Základným zdrojom údajov o priestorovom vzťahu medzi jednotlivými objektmi na povrchu a teplotou podzemnej vody boli údaje zo 14 monitorovacích vrto v Slovenského hydrometeorologického ústavu od roku 2010 až po rok 2018 (obr. 1 a tab. 2). Tieto dáta poskytujú údaje o teplote podzemnej vody v týždennom intervale a pre účely analýzy boli spriemerované za jednotlivé mesiace (tab. 1). Spracované boli základnou štatistikou pre identifikáciu variability na základe priemernej hodnoty, mediánu, smerodajnej odchýlky, kvantilov a koeficientu variácie. Treba tiež podotknúť, že variačné rozpätie predstavuje základný pohľad na menlivosť hodnôt znaku v štatistickom súbore. Jeho veľkosť závisí iba od veľkosti krajných hodnôt štatistického radu, z ktorých jedna alebo obidve môžu byť extrémne veličiny pre daný štatistický súbor. Táto veľká citlivosť variačného rozpätia voči extrémnym hodnotám a na druhej strane úplná necitlivosť voči ostatným hodnotám je najväčšou nevýhodou variačného rozpätia. Dáta o teplote podzemnej vody pre komplexnú analýzu boli doplnené údajmi o priemernej teplote vzduchu pre stanicu Bratislava – letisko, ako aj údajmi o teplote vody a vodných stavoch na Dunaji pre stanicu Bratislava. Priestorová vizualizácia výsledných priemerných hodnôt bola spracovaná pomocou interpolácie IDW s priemernou chybou krížovej validácie 0,15°C.

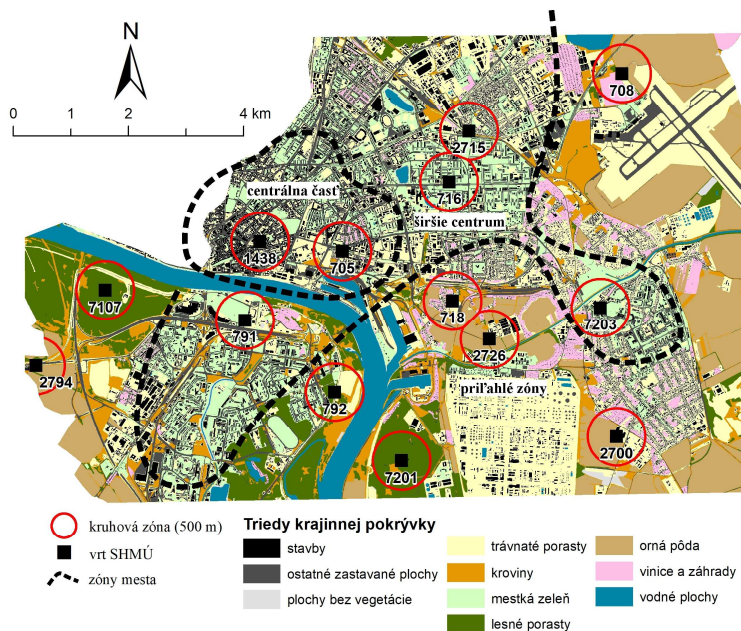
Tab. 1. Priemerné hodnoty teploty podzemnej vody, vody Dunaja a vzduchu za jednotlivé mesiace v období rokov 2010 – 2018

Obdobie	nov	dec	jan	feb	mar	apr	máj	jún	júl	aug	sept	okt
T [°C]-Podzemná voda - priemer – AVG	13,3	13,0	12,6	12,2	11,7	11,5	11,5	11,7	12,1	12,6	13,1	13,4
Medián – MED	12,7	12,5	12,3	12,2	11,9	11,6	11,5	11,6	11,8	12,0	12,5	12,8
Smerodajná odchýlka - SD	0,18	0,23	0,21	0,2	0,21	0,18	0,17	0,17	0,16	0,14	0,12	0,1
Minimum - MIN	10,9	10,6	10,2	10	9,6	9,5	9,6	9,4	9,5	10,2	10,6	11,0
Maximum - MAX	19,0	19,0	19,0	18,4	18	17,4	17,0	16,6	16,6	17,2	18,2	18,8
Rozptyl/koefficient variácie (R=Qmax/Qmin)	8,1	8,4	8,8	8,4	8,4	7,9	7,4	7,2	7,1	7,0	7,6	7,8
T [°C]-Dunaj - AVG	8,5	4,2	4,1	4,4	8,5	12,2	14,2	18,0	20,0	17,9	15,8	13,6
T [°C]-Vzduch - AVG	5,7	2,6	1,7	1,3	7,5	12,2	17,1	20,8	22,5	20,9	17,1	11,2

Poznámka: V tabuľke sú uvedené priemerné hodnoty v °C, medián, smerodajná odchýlka a koeficient variácie z monitorovacích vrto v oblasti Bratislavy za jednotlivé mesiace od roku 2010 až po rok 2018, priemerná teplota vody Dunaja a priemerná teplota vzduchu za jednotlivé mesiace od roku 2010 až po rok 2018, minimálne a maximálne hodnoty sú označené podčiarknutím.

Štatistické dáta boli spracované v programoch EXCEL a PAST. Informácie o krajinnej pokrývke boli získané z voľne dostupného vektorového podkladu (OpenStreetMap). Jednotlivé vrstvy boli následne spracované v prostredí GIS a doplnené manuálnou editáciou a kontrolou WMS služby ZBGIS. Výsledná vek-

torová krajinná pokrývka obsahuje desať základných kategórií objektov vyjadrujúcich prejavy ľudskej činnosti v urbánnom prostredí (obr. 2): 1) stavby (*st*) – budovy a stavby v mestskom prostredí, na ktoré sa viažu jednotlivé podzemné objekty, akými sú kanalizácia a teplovody (zahŕňa aj podzemné priestory); 2) ostatné zastavané plochy (*zp*) – výrazne pretvorená plocha v okolí budov, často zhutnená navážka spolu s chodníkmi a betónovými/asfaltovými plochami (ďalej vnútorne nečlenená); 3) plochy bez vegetácie (*pbv*) – plochy v mestách mimo zastavovaných plôch v okolí budov, ktoré nemajú vegetačný kryt; 4) trávnatý porast (*tp*) – nízka trávnatá vegetácia; 5) kroviny (*kr*) – stredne vysoká vegetácia (do 3 m); 6) mestská zeleň (*mz*) – upravené zelené plochy v meste (parky); 7) lesné porasty (*lp*) – stromová vegetácia, okrem parkov; 8) orná pôda (*op*); 9) vinice a záhrady (*vz*) – ako špeciálny typ trvalých kultúr; 10) vodné plochy (*vp*).



Obr. 2. Krajinná pokrývka študovaného územia so znázornením kruhových zón s veľkosťou 500 m okolo vrtov

Priestorový vzťah medzi triedami krajinej pokrývky a teplotou podzemnej vody bol určený na základe vzdialenosti v kruhovej zóne od jednotlivých vrtov. Jednotlivé vzdialenosti boli určené s rozstupom 25 m. Ako maximálna vzdialenosť bola určená hranica 500 m, pre ktorú sa predpokladá limitná väzba medzi teplotou podzemnej vody a štruktúrou objektov na povrchu. Následne bol použitý korelačný koeficient podľa Spearmana (Herber 1990), ktorý vyjadruje mieru intenzity nelineárnej korelácie medzi dvoma náhodnými veličinami. Korelácie boli vypočítané pre všetky kruhové zóny s rozstupom 25 m. V tab. 2 je uvedený zoznam monitorovaných vrtov, s údajom o nadmorskej výške a súradnicami. Hĺbka, v ktorej sa monitoruje teplota v jednotlivých vrtoch, je približne osem metrov pod povrchom terénu.

Tab. 2. Zoznam monitorovaných vrtov (SHMÚ 2020)

	Označenie vrtu	Lokalita	Nadmorská výška (m)	Začiatok merania	X	Y
1.	705	Mlynské Nivy	136,23	2003	-571 688	-1 280 922
2.	708	Ba – Letisko	131,83	1991	-566 833	-1 277 817
3.	716	Ba – Ružinovská ulica	134,17	1991	-569 836	-1 279 705
4.	718	Vlčie hrdlo	135,8	2010	-56 776	-1 281 781
5.	791	Petržalka – Most	135,05	2010	-573 382	-1 282 117
6.	792	Petržalka – Ovsíšte	135,49	2010	-571 822	-1 283 373
7.	1438	Kamenné námestie	138,52	1991	-573 119	-1 280 753
8.	2700	Podunajské Biskupice	131,39	2010	-566 928	-1 284 154
9.	2715	Trnávka	135,37	2010	-569 489	-1 278 821
10.	2726	Pálenisko – Ružinov	134,89	2010	-569 134	-1 282 448
11.	2794	Petržalka – colnica	137,66	2010	-577 012	-1 282 911
12.	7107	Petržalka	136,33	2005	-575 808	-1 281 591
13.	7201	Vlčie hrdlo (Slovnaft)	134,4	2010	-570 660	-1 284 574
14.	7203	Podunajské Biskupice – Medzijarky	134,04	2010	-567 207	-1 281 898

Vysvetlivky: súradnice X a Y sú v súradnicovom systéme S-JTSK.

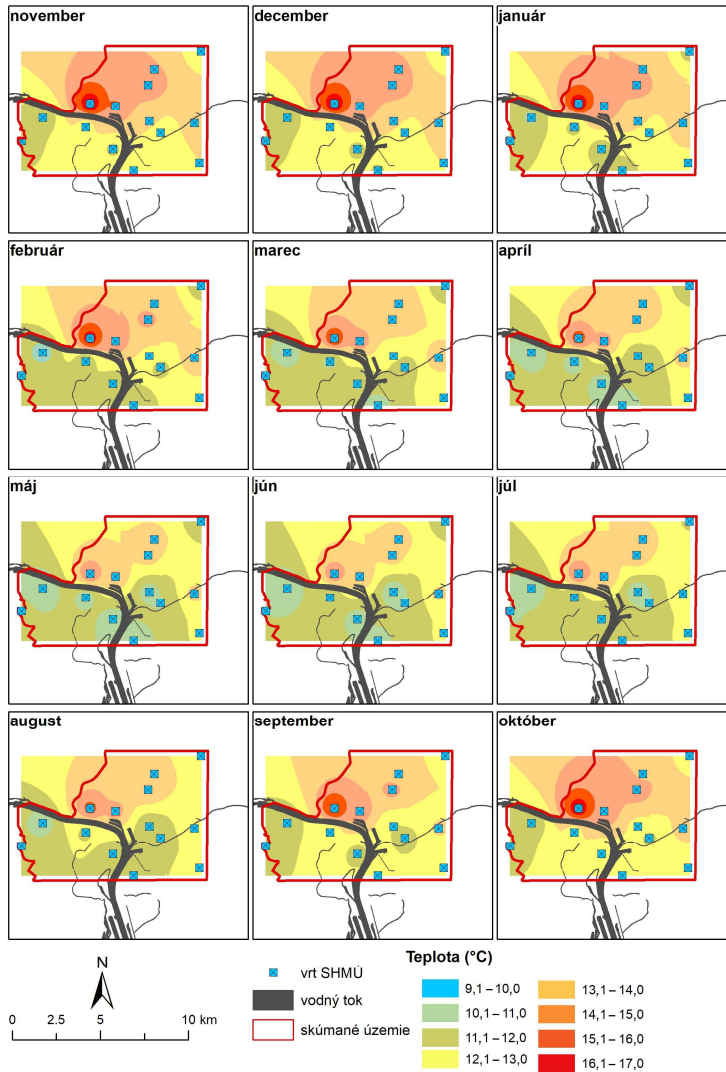
VÝSLEDKY

Priestorová a časová variabilita teplôt podzemnej vody

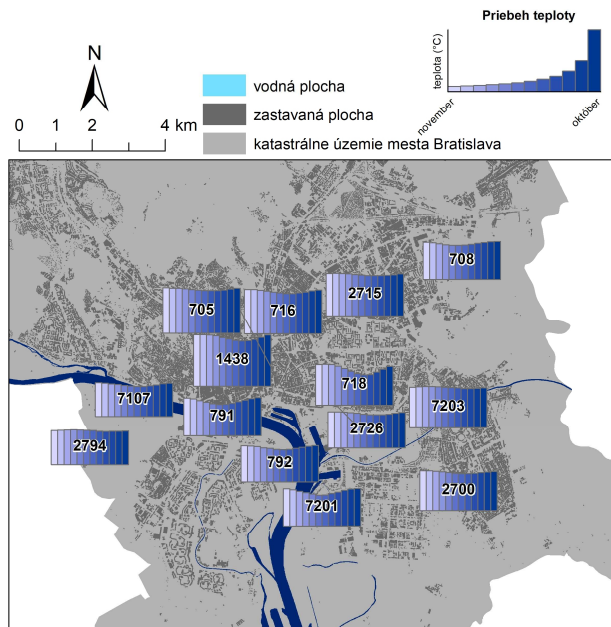
V skúmanom území je viditeľná vysoká priestorová variabilita a časová premenlivosť teplôt podzemnej vody za sledované obdobie rokov 2010 až 2018 (obr. 3). Teplota podzemnej vody vo vrtoch v centre mesta dosahuje svoje minimálne priemerné hodnoty v mesiacoch apríl až máj (11,5°C) a maximálne priemerné teploty v mesiaci október (13,4°C). V porovnaní s priemernou teplotou vzduchu dochádza tak k časovému oneskoreniu nástupu maximálnych a minimálnych teplôt podzemnej vody voči teplotám vzduchu. Priebeh teploty podzemnej vody je v priemere asi o tri až päť mesiacov oneskorený v porovnaní s teplotou vzduchu (najnižšie teploty podzemnej vody sú v mesiaci apríl a naopak najvyššie teploty v mesiaci október).

Rieka Dunaj dosahuje maximálne priemerné teploty v mesiaci júl (20°C) a minimálne v januári (4,1°C), čo odráža hodnoty teploty vzduchu v daných mesiacoch. Priebeh priemernej teploty podzemnej vody za roky 2010 – 2018 je znázornený na obr. 4. Najvyššie hodnoty teplôt vykazuje mesiac október, pričom teploty vody vo vrtoch v centre majú nižšiu ročnú variabilitu hodnôt ako vo vrtoch mimo centra mesta. Najvyššie hodnoty mediánu dosahuje teplota podzemnej vody v mesiaci október (12,85°C) a najmenšiu hodnotu v mesiaci máj (11,53°C). Pri porovnaní jednotlivých vrtov medzi sebou, najnižší koeficient variácie hodnôt dosahuje teplota podzemnej vody v mesiaci august a najvyšší v mesiaci január. Najvyššie teploty podzemnej vody v letných mesiacoch dosahujú vrty umiestnené v centre mesta. V našom prípade je to predovšetkým vrt č. 1438 na Kamennom námestí

s najvyššími teplotami od októbra do mája, ako aj vrt č. 718 (Vlčie hrdlo). Najnižšie teploty, teda extrémne minimá dosahovali vrty č. 7203 (Podunajské Biskupice – Medzijarky) a 2700 (Podunajské Biskupice), ktoré sú lokalizované v okrajovej časti mesta. Najvyššie teploty podzemnej vody boli namerané vo vrte č. 1438, november – január (19°C) a minimálne teploty v mesiacoch júl – august, a to 16,2°C. Dané hodnoty poukazuje na oneskorenie zmien teplôt o tri až päť mesiacov v porovnaní s teplotou vzduchu. Najvyššia variabilita teploty podzemnej vody bola zistená vo vrte č. 7203 – Bratislava Podunajské Biskupice – Medzijarky s maximami v mesiaci september (15,4°C), minimá v mesiacoch február – marec (7,6°C).



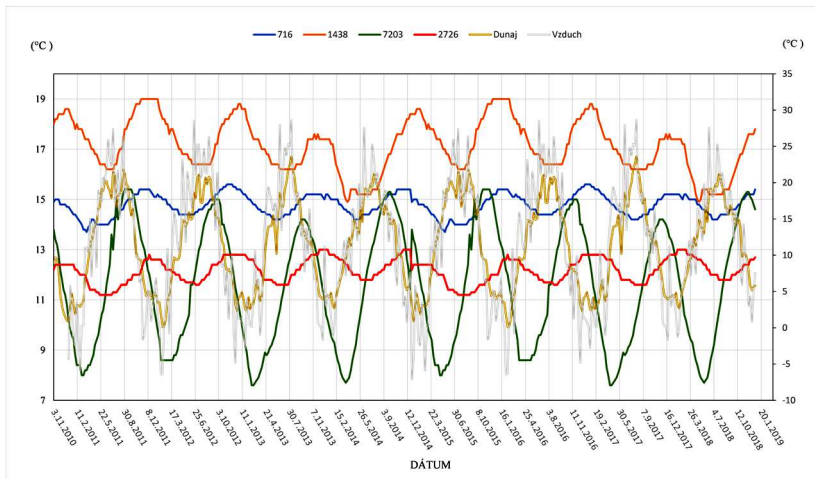
Obr. 3. Teplota podzemnej vody v Bratislave (priemer hodnôt v jednotlivých mesiacoch za roky 2010 – 2018)



Obr. 4. Priebeh priemerných mesačných teplôt (°C) podzemnej vody pre jednotlivé sledované vrty v skúmanom území

Priebehy teplôt podzemnej vody majú cyklický charakter (obr. 5) s časovým posunom a nižšou amplitúdou ako je teplota vzduchu alebo Dunaja (Krčmář et al. 2016).

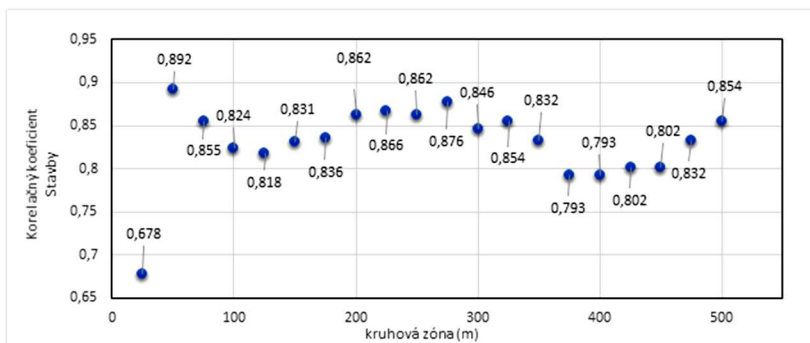
Jednotlivé vrty na základe polohy možno rozdeliť do troch tried, a to vrty nachádzajúce sa v centre mesta charakterizované vrtom č. 1438, vrty v mestských častiach, ktoré sú vzdialenejšie od centra mesta (reprezentuje ich vrt č. 716) a okrajové časti mesta s výraznejším podielom poľnohospodárskych areálov, lesov a málo intenzívnej zástavby (reprezentujú vrty č. 7203 a 2726). Centrum mesta je charakteristické hustou zástavbou bez mestskej zelene a zelených plôch. Teploty podzemnej vody v tejto oblasti (vrt č. 1438 – Kamenné námestie) dosahujú v priemere 16 až 19°C. Teplota podzemnej vody v širšom okolí centra odráža zmenenú štruktúru mesta (napr. vrt č. 716 na Ružinovskej ulici) s hustou zástavbou výškových budov (panelových domov), ale s nárastom plôch sídelnej zelene a trávnatých porastov. Plochy medzi jednotlivými budovami sú vyplnené zastavanou plochou predstavujúcou parkoviská a chodníky, ktoré majú úplne inú vertikálnu štruktúru ako bloky budov v centre mesta. Teplota podzemnej vody v tejto oblasti sa pohybuje v priemere okolo 14 – 15°C. V okrajových častiach mesta maximálne teploty podzemnej vody (vrty č. 7203 a 2726) nedosahujú ani minimálne teploty podzemnej vody v centre mesta. Priemerná teplota podzemnej vody sa pohybuje na úrovni 8°C až 14°C. Tento efekt je zrejмый pri zobrazení týchto výsledkov na obr. 3, kde je vidieť koncentráciu vysokých teplôt v centre mesta. Teploty v širšom okolí mesta sú v priemere o 2 až 4°C nižšie a teploty vo vrtoch v okrajových častiach o 5 až 8°C nižšie.



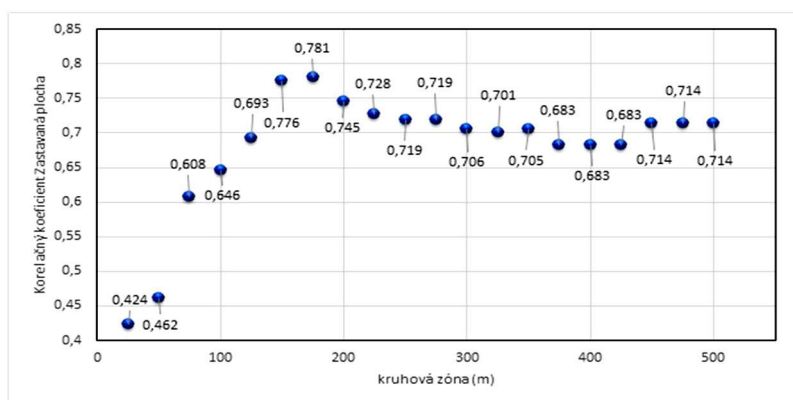
Obr. 5. Priebeh priemerných teplôt podzemnej vody (°C) vo vrtoch SHMÚ č. 716, 1438, 7203, 2726, teploty Dunaja a teploty vzduchu v období od 3.11. 2010 do 26. 12. 2018

Vplyv krajinej pokrývky na teplotu podzemnej vody

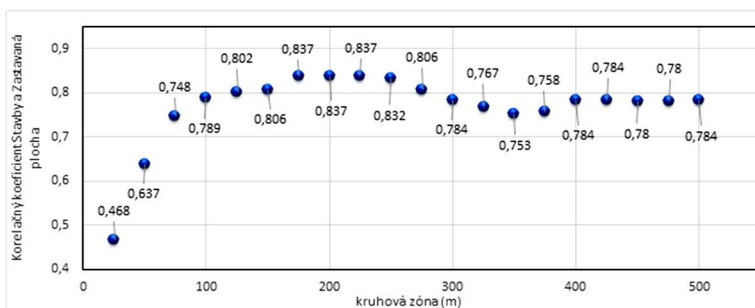
Jednotlivé triedy krajinej pokrývky vplyvajú na zmeny a variácie teplôt podzemnej vody. Priestorové rozmiestnenie jednotlivých vrtov v rozličných častiach mesta (centrum, širšie centrum a okrajové časti) poukazujú na výrazný vplyv antropogénnych štruktúr v urbánnom prostredí. Vysokú zápornú koreláciu s teplotami podzemnej vody dosahuje kategória lesný porast pri kruhovej zóne s polomerom 325, 425, 450, 475 a 500 metrov, a to až na úrovni $r = -0,761$, ako aj trieda orná pôda (kruhová zóna 500 m a korelácia $r = -0,7$), trieda kroviny $r = -0,496$ (kruhová zóna 375 m) a trieda plocha bez vegetácie $r = -0,452$ (kruhová zóna 350 a 375 m). Tieto štyri kategórie vykazujú pozitívny vplyv na znižovanie teplôt podzemnej vody. Najvýraznejší negatívny vplyv na teplotu podzemnej vody má hustota budov a hustota zástavby v centrách miest. Teplota podzemnej vody najvýraznejšie koreluje s plochou tried stavby – *st* (obr. 6) pre veľkosť kruhovej zóny 50 m ($r = 0,892$). Korelačný vzťah má rastúcu tendenciu do vzdialenosti 50 m a postupne klesá až do vzdialenosti 125 m, kde začína opäť narastať. Nízka hodnota koeficientu vo vzdialenosti 25 m je odrazom efektu umiestnenia jednotlivých vrtov v určitej vzdialenosti od budov. Hranica 125 m naopak predstavuje limitnú vzdialenosť, kde prestáva pôsobiť vplyv samotných individuálnych stavieb na teplotu podzemnej vody a narastá kumulovaný vplyv z celého okolia (resp. kumulovaný vplyv zástavby v širšom okolí vrtu). Ďalšie zmeny vo vzdialenosti viac ako 400 m sú následne nadhodnotené a relevantné výsledky sú ovplyvnené vzájomnou štruktúrou priestorového rozmiestnenia budov v meste, resp. okolí jednotlivých vrtov. Vplyv zastavanej plochy *zp* a teploty podzemnej vody (obr. 7) výrazne kopíruje priebeh korelácie medzi teplotou vrtov a hustoty stavieb. Takmer identický priebeh je s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobený vzájomnou autokoreláciou (priestorová väzba budov na ďalšiu infraštruktúru vo svojom okolí). Veľmi nízku koreláciu vykazuje trieda mestská zeleň (tab. 3), a to na úrovni $r = 0,302$ pre kruhovú zónu 200 a 250 m. Kumulovaný efekt antropogénnych plôch (zastavaná plocha a stavby spolu, obr. 8) má najvýraznejší vplyv vo vzdialenosti približne 175 až 250 m na úrovni $r = 0,837$.



Obr. 6. Korelačný koeficient medzi plochou triedy *stavby (st)* a teplotou podzemnej vody podľa veľkosti kruhovej zóny



Obr. 7. Korelačný koeficient medzi plochou triedy *ostatné zastavané plochy (zp)* a teplotou podzemnej vody podľa veľkosti kruhovej zóny



Obr. 8. Korelačný koeficient medzi sumárnou plochou tried *stavby a ostatné zastavané plochy* a teplotou podzemnej vody podľa veľkosti kruhovej zóny

Tab. 3. Výsledné priemery korelácií pre všetky kruhové zóny v jednotlivých triedach využitia krajiny

Pozitívna korelácia		Max korelácia	Min korelácia
Stavby	0,83	0,892 (kruhová zóna 50)	0,678 (kruhová zóna 25)
Ostatné zastavané plochy + stavby	0,768	0,837 (kruhová zóna 175 až 250)	0,468 (kruhová zóna 25)
Zastavané plochy	0,68	0,781 (kruhová zóna 175)	0,424 (kruhová zóna 25)
Vinice a záhrady	0,359	0,559 (kruhová zóna 225,250)	-0,136 (kruhová zóna 25,50)
Trávnaté porasty	0,34	0,459 (kruhová zóna 500)	0,024 (kruhová zóna 50)
Mestská zeleň	0,215	0,302 (kruhová zóna 200 až 250)	0,063 (kruhová zóna 450 až 500)
Vodné plochy	0,153	0,530 (kruhová zóna 450)	0 (kruhová zóna 25 až 175)
Negatívna korelácia			
Plocha bez vegetácie	-0,209	0 (kruhová zóna 25 až 100)	-0,452 (kruhová zóna 350, 375)
Kroviny	-0,299	0,089 (kruhová zóna 75)	-0,494 (kruhová zóna 425)
Orná pôda	-0,33	0,2 (kruhová zóna 125 - 200)	-0,7 (kruhová zóna 500)
Lesné porasty	-0,703	-0,608 (kruhová zóna 25,50)	-0,761 (kruhová zóna 325, 425 až 500)

DISKUSIA A ZÁVER

Postupne s narastajúcou suburbanizáciou (Šveda a Šuška 2014 a Šveda a Pazúr 2018) a globálnymi klimatickými zmenami sa problematika mestského tepelného ostrova stáva vážnym problémom. Priestorovým zmenám štruktúry mesta a ich vplyvu na teplotu podzemnej vody je vo svetovej literatúre venovaná malá pozornosť. Marschalko et al. (2018) opisujú tepelnú kontamináciu centra Bratislavy, ktorú vysvetľujú vyššou hustotou budov, pričom historické centrum vplyva na zvyšovanie teploty podzemnej vody celoročne. Zároveň autori uvádzajú až rozdiel 5°C medzi husto zastavaným historickým centrom Bratislavy a okolitým mestským prostredím. Získané výsledky poukazujú na otepľovanie podpovrchových zvodnených vrstiev v centre mesta, ktoré je spôsobené vysokou koncentráciou budov a inžinierskych sietí. Analýza autorov Taylor a Stefan (2009) v dvoj mestí Minneapolis – St. Paul ukázala, že teplota podzemnej vody v plne urbanizovaných regiónoch je až o 3°C vyššia ako v poľnohospodárskych oblastiach. Epting a Huggenberger (2013) uvádzajú, že územie vplyvom antropogénnej činnosti má vyššiu teplotu ako jeho bezprostredné okolie a faktory, ktoré spôsobujú mestský ostrov tepla sú: vykurovanie podzemných priestorov, podzemné parkoviská a podzemné elektrické vedenia. Tieto faktory pritom môžu viesť až k zvýšeniu teploty podzemnej vody o 9°C. Daná hodnota je porovnateľná s nami zisteným maximálnym rozdielom teplôt 8°C medzi centrom mesta a jeho okolím. Zhu et al. (2010 a 2015) vo svojich štúdiách popisujú efekt mestského ostrova tepla na nárast teplôt vo väčšine mestských oblastí, ale počas posledných sto rokov sa zvýšila teplota podpovrchovej vrstvy iba o niekoľko stupňov. Teplota podzemnej vody je výraznejšie ovplyvnená vnútornou štruktúrou mesta, spôsobom založenia stavieb a antropogénnou činnosťou na povrchu. Globálne zmeny klímy pritom majú vplyv na výrazne zvýšenie teplôt v mestskom prostredí a prehrievanie miest. Podrobné merania podzemných vôd v Kolíne nad Rýnom a vo Winnipegu odhalili trend otepľovania, ktoré sú výsled-

kom vzájomného pôsobenia globálnej klimatickej zmeny a štruktúry miest (Zhu et al. 2015). Podobne ako v tejto štúdií, Benz et al. (2015) poukazujú na tepelný ostrov v podpovrchovej vrstve, ktorý je výsledkom priameho tepelného toku diaľkového vykurovania, únikov z odpadových systémov, vykurovania suterénov, koncentrácie kanalizačných systémov a tunelov (metra). Jednotlivé podpovrchové zdroje tak môžeme nepriamo vyjadriť pomocou antropogénnych prejavov na povrchu, pričom štruktúra vyjadrená pomocou krajinej pokrývky a definovaním povrchových objektov poskytuje dostatočné množstvo informácií pre vyjadrenie vplyvu vertikálnej, ako aj horizontálnej štruktúry mesta na podpovrchovej vrstvy. Zároveň je daný prístup použiteľný v oblastiach alebo miestach s nedostatočnou informáciou o jednotlivých podpovrchových vedeniach, ktoré najvýraznejšie ovplyvňujú teplotu podzemnej vody. Benz et al. (2015) uvádzajú, že najvyšším zdrojom tepelného toku sú práve diaľkové vykurovania s hodnotami vyššími ako 60 W/m^2 . Ďalším problémom, ktorý vzniká pri detailnej analýze vzťahu medzi teplotou podzemnej vody a antropogénnych prejavov na povrchu, je nedostatočná hustota monitorovacích vrtov. Priestorové interpolácie ponúkajú iba obmedzenú možnosť na identifikáciu priestorového rozmiestnenia a neodzrkadľujú reálne hodnoty teploty podzemnej vody. Tie sú ovplyvnené viacerými faktormi (prúdenie vody, hrúbka zvodnených sedimentov, zdroje prúdenia, lokálne zdroje tepla a pod.). V práci použitá metóda IDW neslúži na presnú priestorovú identifikáciu teplôt podzemnej vody, ale určuje iba všeobecné priestorové rozmiestnenie a časovo-priestorovú vizualizáciu zmien teplôt v Bratislave v sledovanom období. Štruktúra mestskej zelene má výraznejší vplyv na povrchové teploty, pričom na jej zhodnotenie je nevyhnutné zobrať do úvahy aj jej priestorové rozmiestnenie, rozsah, ako aj umiestnenie jednotlivých monitorovacích vrtov. Pre efektívnu analýzu vplyvu zelene na teplotu podzemnej vody je dôležité mať referenčný vrt v danej klasifikačnej triede, čo v tejto štúdií nebolo možné. Ako uvádzajú Stanková a Matula (2017), len v období rokov 2003 – 2013 poklesla rozloha mestskej zelene v Bratislave o 11 ha, pričom tieto plochy boli nahradené výstavbou rodinných a bytových domov a zahusťovaním zástavby predovšetkým v okrajových častiach centra mesta. Tieto zmeny vzhľadom na nami zistené skutočnosti budú viesť k stále vyšším teplotám podpovrchových častí centra mesta, pričom v sledovanom území za dané obdobie všetky sledované charakteristiky – teplota vzduchu, teplota vody v Dunaji, ako aj teplota podzemnej vody vykazujú postupný trend zvyšovania.

Priebeh teploty podzemnej vody je v priemere asi o tri až päť mesiacov oneskorený v porovnaní s teplotou vzduchu (najnižšie teploty podzemnej vody sú v mesiaci apríl, a naopak najvyššie teploty v mesiaci október). Súhlasí to aj s výsledkami prezentovanými v štúdií Krčmář et al. (2017), kde autori poukázali na 4- až 5-mesačný časový posun medzi teplotou v sledovaných vrtoch a teplotou vzduchu. Na druhej strane, teplotný rozdiel, ktorý vzniká vplyvom zvyšovania teploty podzemnej vody, umožňuje efektívnejšie využívanie tepelného potenciálu pre aplikáciu tepelného vykurovania založeného na princípe tepelného čerpadla typu voda – voda. Teplota podzemnej vody pritom klesá so vzdialenosťou od centra mesta a je ovplyvnená priestorovým rozložením krajinej pokrývky. Teplotný gradient medzi centrálnou a okrajovou časťou Bratislavy je pritom až $5 - 8^\circ\text{C}$, pričom najvýraznejší vplyv na teplotu podzemnej vody má trieda stavby s korelačným koeficientom $r = 0,830$.

Tento príspevok poukazuje na fakt, že podzemná voda v mestách je výrazne teplejšia ako v ich bezprostrednom okolí v priemere o niekoľko stupňov Celzia.

Tento fenomén sa stal v poslednom období diskutovanou témou a aktuálnym problémom, pretože zmiernovanie efektu mestských tepelných ostrovov môže pozitívne vplývať na zmiernenie škôd spôsobených i klimatickými zmenami.

Tento príspevok vznikol vďaka podpore projektu Agentúry na podporu výskumu a vývoja č. APVV-14-0174 financovanej Ministerstvom školstva, vedy, techniky a športu Slovenskej republiky a Grantu UK/132/2018.

LITERATÚRA

- AKBARI, H., POMERANTZ, M., TAHA, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Energy* 24, 70, 391-407.
- BENZ, S. A., BAYER, P., MENBERG, K., JUNG, S., BLUM, P. (2015). Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers. *Science of the Total Environment*, 15, 427-439.
- BENZ, S. A., BAYER, P., GOETTSCHKE, F. M., OLESEN, F. S., BLUM, P. (2016). Linking surface urban heat islands with groundwater temperatures. *Environmental Science and Technology*, 50, 70-78.
- EPTING, J., HUGGENBERGER, P. (2013). Unravelling the heat island effect observed in urban groundwater bodies – definition of a potential natural state. *Journal of Hydrology*, 501, 193-204.
- FERGUSON, G., WOODBURY, A. D. (2004). Subsurface heat flow in an urban environment. *Journal of Geophysical Research*, 109, 193-204. DOI: 10.1029/2003JB002715.
- FERGUSON, G., WOODBURY, A. D. (2007). Urban heat island in the subsurface. *Geophysical Research Letters*, 34, 1-4. DOI: 10.1029/2007GL032324.
- GAGO, E. J., ROLDAN, J., PACHECO-TORRES, R., ORDÓÑEZ, J. (2013). The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 25, 749-758.
- GIRIDHARAN, R., GANESAN, S., LAU SSY. (2004). Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential development in Hong Kong. *Energy and Building*, 36, 525-534.
- HERB, W. R., JANKE, B., MOHSENI, O., STEFAN, H. G. (2008). Ground surface temperature simulation for different land covers. *Journal of Hydrology*, 356, 327-343.
- HERBER, V. (1990). *Štatistické metódy v hydrogeológii I*. Brno (Masarykova Univerzita).
- HOLEC, J., ŠTASTNÝ, P. (2017). Modelovanie mestského tepla v Bratislave pomocou modelu MUKLIMO. *Meteorologický časopis*, 20, 65-73.
- HORECKÁ, V., TEKUŠOVÁ, M. (2011). Zmena teploty vzduchu v Bratislave a jej okolí. In Středová, H., Rožnovský, J., Litschmann, T., eds. *Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí, Sborník příspěvků z konference, Skalní mlýn, ČR, 2. – 4. 2. 2011*. Brno (Česká bioklimatologická společnost), pp. 1-11.
- HOWARD, L. (1818). *The climate of London, deduced from meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis*. London (W. Phillips).
- KRČMÁŘ, D., FLAKOVÁ, R., ŽENIŠOVÁ, Z., BRESTENSKÝ, J. (2016). Stanovenie základných tepelných parametrov horninového prostredia pomocou parametrov transformácie harmonickej okrajovej podmienky. *Podzemná voda*, 22, 63-72.
- KRČMÁŘ, D., RUSNAKOVÁ, D., TÓTHOVÁ, E., FLAKOVÁ, R., ŽENIŠOVÁ, Z. (2017). Analýza teploty podzemnej vody v Bratislave. *Podzemná voda*, 23, 113-123.
- MAGLAY, J., PRISTAŠ, J., FORDINÁL, K., NAGY, A., PLAŠIENKA, D., BUČEK, S., BEZÁK, V., KOHÚT, M., BROSKA, I., HÓK, J. (2005). *Vysvetlivky ku geologickej mape 1:200 000, list 44 – Bratislava*. Manuscript. Bratislava, archív ŠGÚDŠ, s. 48.
- MARSCHALKO, M., KRČMÁŘ, D., YILMAZ, I., FLAKOVÁ, R., ŽENIŠOVÁ, Z. (2018). Heat contamination in groundwater sourced from heat pump for heating in Bratislava (Slovakia)'s historic centre. *Environmental Earth Sciences*, 77, 77-95.

- MENBERG, K., BLUM, P., SCHAFFITEL, A., BAYER, P. (2013). Long – term evolution of anthropogenic heat fluxes into a subsurface urban heat island. *Environmental Science and Technology*, 47, 747-755.
- OKE, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 8, 769-779.
- RIZWAN, A. M., DENNIS, Y. C. L., LIU, CH. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. *Journal of Environmental Science*, 20, 120-128.
- SHMŮ (2020). [Online]. <http://www.shmu.sk/sk/?page=1598&id=&type=mapaselect>
- STANKOVÁ, H., MATULA, D. (2017). Analýza štruktúry mestskej zelene a jej zmien v centre Bratislavy. *Geografický časopis*, 69, 145-165.
- ŠVEDA, M., PAZÚR, R. (2018). Priestorové formy rezidenčnej suburbanizácie v zázemí Bratislavy. *Geografický časopis*, 70, 231-258.
- ŠVEDA, M., ŠUŠKA, P. (2014). K príčinám a dôsledkom živej suburbanizácie v zázemí Bratislavy: príklad obce Chorvátsky Grob. *Geografický časopis*, 66, 225-246.
- TANIGUCHI, M. (2006). Anthropogenic effects on subsurface temperature in Bangkok. *Climatic Past*, 2, 831-846.
- TANIGUCHI, M., UEMURA, T., JAGO-ON, K. (2007). Combined effects of urbanization and global warming on subsurface temperature in four Asian cities. *Vadose Zone Journal*, 6, 591-596.
- TAYLOR, C. A., STEFAN, H. G. (2009). Shallow groundwater temperature response to climate change and urbanization. *Journal of Hydrology*, 375, 601-612.
- ZHU, K., BLUM, P., FERGUSON, G., BALKE, K., BAYER, P. (2010). The geothermal potential of urban heat islands. *Environmental Research Letters*, 5, 1- 6.
- ZHU, K., BAYER, P., GRATWOHL, P., BLUM, P. (2015). Groundwater temperature evolution in the subsurface urban heat island of Cologne, Germany. *Hydrological Processes*, 29, 965-978.

Daniela Rusnáková, Dávid Krčmář, Miloš Rusnák

URBAN HEATH ISLAND - ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN LANDSCAPE UTILIZATION AND GROUNDWATER TEMPERATURE IN BRATISLAVA

Urban thermal anomaly and urban heat island (UHI) represent areas where the temperature is higher than its immediate surroundings. Due to anthropogenic activity in the city area, temperature rises faster than in its surroundings. The impact of construction, building and underground heat lines has led to an increase in the air temperature, land surface temperature and groundwater temperature. Engineering networks, building and construction activities in cities are main factors affecting the temperature of the groundwater. Presented paper points to the impact of land cover and inner structure of the city to groundwater temperature variation. The effect of buildings, and built-up areas (roads, parking etc.) are the main contributors to increase of groundwater temperature with a correlation 0.837. On the other hand, forests, areas without vegetation, arable land and shrubs led to reducing subsurface warming. In Bratislava the groundwater temperature in the city centre is the highest in October, while the lowest is in April or May. Temperatures in the city centre is higher by 5 to 8 °C compared to the outer areas of the city. A high negative correlation with groundwater temperatures is recorded in the category of forests (correlation up to the $r = - 0.761$), as well as the arable land class ($r = - 0.7$), areas without vegetation ($r = - 0.452$) and shrubs ($r = - 0.494$) with reducing effect on groundwater temperatures. The groundwater temperature correlates most significantly with the area of the buildings ($r = 0.892$). The correlation relationship has an increasing tendency to a distance of 50 m from a well and gradually decreases to a distance of 125 m, where it begins to increase again. The limit of 125 m is the threshold distance of the individual structure effect. Above this distance prevailing cu-

mulative effect of the surroundings objects. The maximum groundwater temperature offset compared with air temperature is 3 – 5 months. This paper points to the fact that groundwater in the city centre is significantly warmer than areas in their vicinity and this phenomenon has recently become a topic of discussion due to global warming.



Article first received: February 2020

Article accepted: June 2020

