

Scenáre zmeny teploty a vlhkosti vzduchu na Slovensku a možné dôsledky v mestách

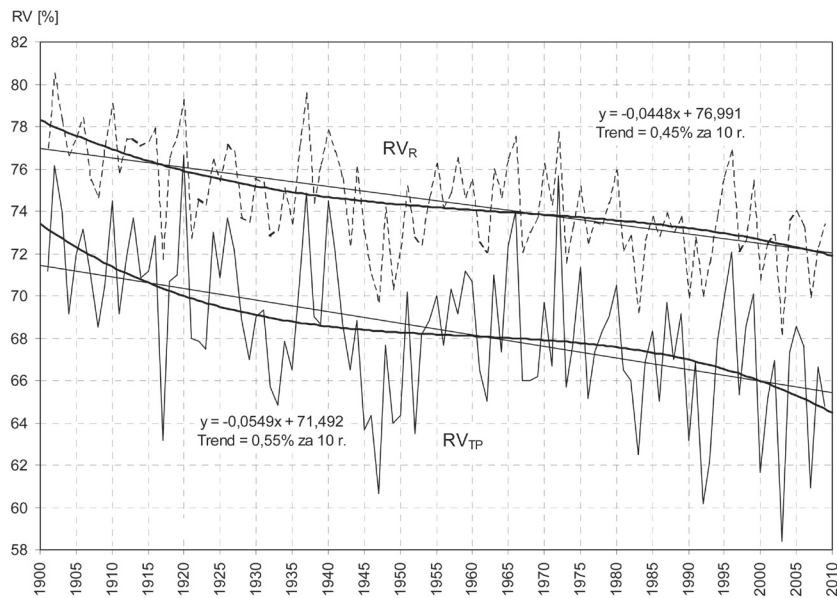
M. Lapin, M. Gera, M. Kremler: Temperature and Air Humidity Scenarios for Slovakia and Possible Impacts in the Cities. Život. Prostr., Vol. 44, No. 5, p. 227 – 231, 2010.

There are several meteorological stations in Slovakia (30 – 45, dependent on climatic element) with complete and good quality observations since 1951 (some of them only since 1961). Three stations have complete data since 1881. Most of these stations well represent such important sub-regions like the Danubian Lowland, other lowlands and hollows in Slovakia, or the area around the Tatra Mts. This paper presents some details on daily air humidity characteristics and daily saturation deficit at Hurbanovo (115 m a. s. l. SW Slovakia) in 1961 – 2009, including some information on air temperature, precipitation and modeled evapotranspiration. In 2007 the newest Canadian CGCM3.1 climatic model with daily data outputs have been analyzed (IPCC emission scenarios SRES-A2 and SRES-B1 were applied). Selected information on scenarios of daily air humidity data in 1961 – 2100 for Hurbanovo and other localities in Slovakia are presented, all based only on the CGCM3.1 outputs and the Slovak Hydrometeorological Institute measured data. Possible impacts of climate change in the Slovak cities are listed in the final part of paper.

Meteorologické merania s dostatočne vysokou kvalitou sa obvykle používajú na prezentovanie zmien, variability a trendov teploty vzduchu a úhrnov zrážok ako najbežnejších a najzrozumiteľnejších klimatologických prvkov. Na Slovensku máme 3 také stanice s meraním od r. 1881 (Hurbanovo, Košice a Liptovský Hrádok) a 203 zrážkomerných staníc s meraním od r. 1901 (z nich menší počet od r. 1881). Tieto údaje nám umožňujú vypočítať lineárny trend rastu teploty vzduchu na Slovensku za 129 rokov (o 1,7 °C) a lineárny trend poklesu úhrnu zrážok za 129 rokov (o 26 mm, teda o 3,4 %). Iba pre zaujímavosť, medzi Hurbanovom a Myjavou je rozdiel dlhodobých priemerov teploty vzduchu tiež asi 1,7 °C. Ani zmeny teploty vzduchu a ani zmeny úhrnov zrážok nie sú celkom rovnomerné, ako je to detailnejšie uvedené v príspevku Lapin et al. (2009), príp. Lapin (2010).

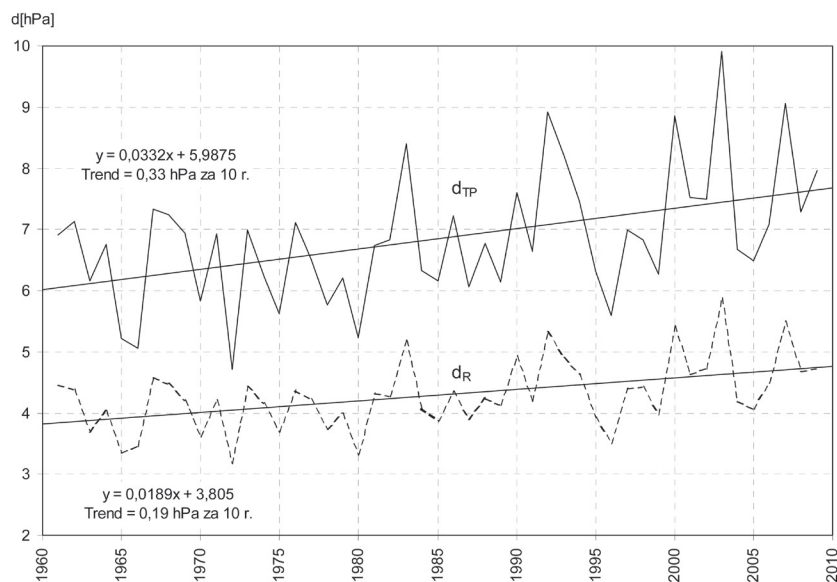
Vlhkosť vzduchu je veľmi významný meteorologický a klimatologický prvok, lebo spolu so zmenami teploty a zrážok priamo ovplyvňuje také významné prvky ako výpar, vlhkosť pôdy a odtok z povodí. Okrem toho sa vlhkosť vzduchu podieľa na subjek-

tívnom vnímaní počasia pri nízkej relatívnej vlhkosti (pocit vysušovania, najmä alergikmi) a pri vysokej absolútnej vlhkosti (pocit dusna pre parciálny tlak vodnej pary $e > 18,7$ hPa, najmä deťmi, staršími a chorými ľuďmi). Relatívna vlhkosť vzduchu (RV) na Slovensku po r. 1951 systematicky klesá a podstatne nižšia je aj v porovnaní s prvou polovicou 20. storočia, príklad trendu RV od r. 1901 v Hurbanove je na obr. 1 (pokles je približne o 5 %, v teplom polroku až o 6 %, pri kubickom trende ešte viac). Na druhej strane, tlak vodnej pary (v hPa), ale aj absolútna vlhkosť (v g.m⁻³), klesá len veľmi pomaly, čo sa v konečnom dôsledku prejavuje pri výrazne rastúcej teplote vzduchu na raste tzv. sýtostného doplnku $d = e^* - e$, teda rozdielu medzi stavom nasýtenia e^* pri danej teplote a meranom tlaku vodnej pary e (obr. 2). Ešte zreteľnejšia je závislosť charakteristík vlhkosti vzduchu od teploty vzduchu (obr. 3). Pri raste teploty vzduchu o 1 °C a nemeniacej sa RV je fyzikálne podmienený rast všetkých charakteristík vlhkosti vzduchu asi o 6 % (pri veľmi nízkej teplote vzduchu T až o 10 %), teda aj tlaku vodnej pary, aj absolútnej vlhkosti vzduchu a aj sýtostného doplnku. S tým súvisí aj rast



Obr. 1. Priemery relatívnej vlhkosti vzduchu za rok (RV_R) a teplý polrok (IV – IX, RV_{TP}) v Hurbánove v období 1901 – 2009 (doplnený je lineárny a kubický trend). Zdroj: spracované podľa údajov SHMÚ, 2010

Obr. 2. Priemery sýtostného doplnku vlhkosti vzduchu ($d = e^* - e$) za rok (d_R) a teplý polrok (IV – IX, d_{TP}) v Hurbánove v období 1961 – 2009 (doplnený je lineárny trend). Zdroj: spracované podľa údajov SHMÚ, 2010



potenciálneho výparu (potenciálnej evapotranspirácie) $E_0 = k \cdot d$, tiež asi o 6 % (k je koeficient závislý od turbulencie a radiačnej bilancie, ktorý má výrazný

ročný chod – v lete a pri silnejšom vetre je väčší) a rast úhrnov zrážok pri cyklonálnom počasí alebo pri konvekcii asi o 10 % (o 6 % vďaka rastu disponibilného množstva vodnej pary v atmosfére plus o 4 % vplyvom zrýchlenia vertikálnych výstupov pri vyššej teplote kondenzačnej hladiny), podľa Lapina et al. (2003, 2009).

Uvedené skutočnosti znamenajú, že pri vyššej teplote atmosféry sa zvyšuje riziko sucha za podmienok anticyklonálneho počasia, a tiež sa zvyšuje riziko veľmi výdatných zrážok za podmienok cyklonálneho počasia alebo intenzívnej konvekcie. Tieto zmeny sa výraznejšie prejavujú v teplom polroku (IV – IX), preto sa budeme podrobnejšie zaoberať najmä týmto obdobím. V chladnom polroku (X – III) dominuje zmena pomeru skupenstva zrážok (menej tuhých a viac kvapalných), pričom celkovo ich množstvo porastie o asi 25 %. Do nadmorskej výšky 800 m sa zmenia aj podmienky trvania, výskytu a výšky snehovej pokrývky, čo jednoznačne súvisí s oteplením klímy a častejším výskytom teploty vzduchu nad bodom mrazu. Zmeny vlhkosti vzduchu nemajú v chladnom polroku podstatný význam.

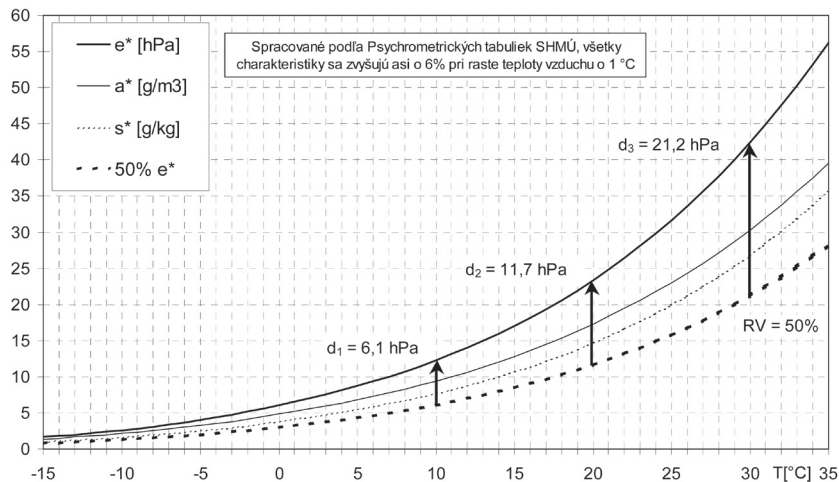
Scenáre relatívnej vlhkosti vzduchu a sýtostného doplnku

Možný rast priemerov a extrémov teploty vzduchu (T) v budúcich desaťročiach kvôli antropogénne podmienenej klimatickej zmene (Lapin, 2000) môže podmieniť aj značné zmeny charakteristik atmosférickej vlhkosti vzduchu, a tým aj výparu (evapotranspirácie), úhrnov zrážok, vlhkosti pôdy a odtoku. Na kvantifikáciu týchto procesov sa používajú výstupy modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry

(GCMs) a dynamické fyzikálne rovnice procesov prebiehajúcich v reálnej atmosfére a v blízkosti aktívneho povrchu Zeme.

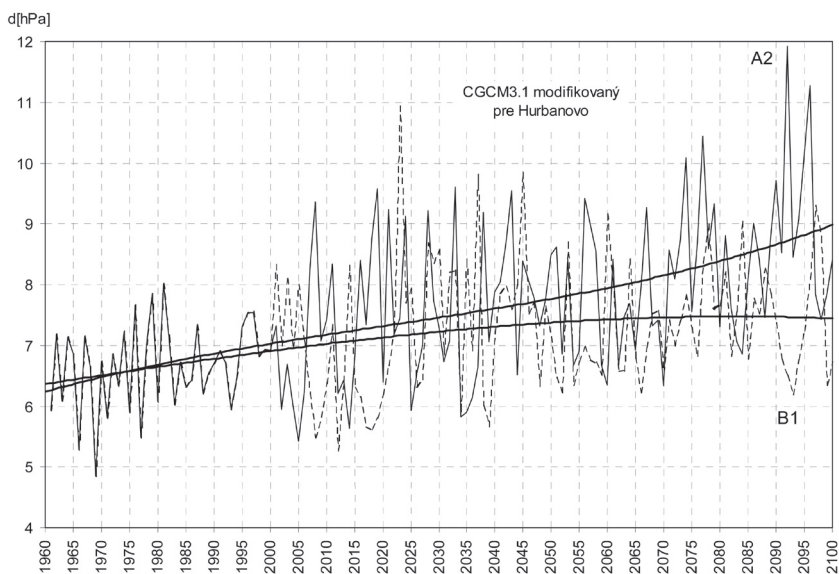
Z výstupov GCMs sme pre tento príspevok vybrali najnovší Kanadský model CGCM3.1 s prepojenou cirkuláciou atmosféry a oceánov, ktorý poskytuje pre oblasť Slovenska celkom spoľahlivé výsledky denných hodnôt pre T , úhrny zrážok R , mernú vlhkosť s a globálne žiarenie G v kontrolnom období 1961 – 1990. Ako testovacie obdobie sme použili merané hodnoty v období 1991 – 2009, ktoré sa zhodovali s modelovými výstupmi. Tak môžeme predpokladať, že aj downscalingom modifikované výstupy modelu CGCM3.1 do jednotlivých staníc v období 2010 – 2100 budú v súlade s očakávanou skutočnosťou. Je tu však jedna závažná neurčitosť, a tou sú scenáre emisie skleníkových plynov, a tým aj priebehu zosilňovania skleníkového efektu atmosféry. V súlade s odporúčaním Medzivládneho panelu pre klimatickú zmenu (IPCC) sme použili dva alternatívne emisné scenáre SRES-A2 a SRES-B1 (IPCC, 2007), prvý je pesimistický, s rastom celosvetovej emisie fosílného uhlíka až na 28,9 Gt do r. 2100 (v r. 2009 asi 9 Gt) a druhý optimistický, s poklesom emisie fosílného uhlíka na 5,2 Gt do r. 2100.

Na obr. 4 sú scenáre zmeny sýtoštného doplnku d v Hurbanove do r. 2100. Je reálny predpoklad, že podobné zmeny môžeme očakávať aj na iných nížinných staniách na juhu Slovenska. Podľa obidvoch emisných scenárov (A2 a B1) môžeme očakávať rast priemerov a variability d do r. 2100 (o 38,5 %, resp. o 13,8 %). Rast sa očakáva aj v prípade scenára B1, pri ktorom by malo dôjsť k radikálnej redukcii globálnej emisie fosílného uhlíka na polovicu stavu z obdobia 2011 – 2020. Je to hlavne v dôsledku dlhého zotrvania CO_2 v atmosfére do jeho definitívneho uloženia do fosílnych zásobníkov (v priemere od 50 do 200 rokov). V teplom polroku (IV – IX) sa očakáva aj rast tlaku vodnej pary e do r. 2100 na asi 17,5 hPa pri



Obr. 3. Závislosť charakteristík vlhkosti vzduchu v stave nasýtenia (e^* – tlak vodnej pary v hPa, a^* – absolútna vlhkosť v g.m^{-3} a s^* – merná vlhkosť v g.kg^{-1}) a tlaku vodnej pary e pri relatívnej vlhkosti vzduchu ($\text{RV} = 50\%$) od teploty vzduchu (T), sýtoštný doplnok ($d = e^* - e$) je pre $\text{RV} = 50\%$. Zdroj: spracované podľa Psychrometrických tabuliek SHMÚ, 1989

Obr. 4. Scenáre zmeny sýtoštného doplnku (d) pre Hurbanovo v teplom polroku (IV – IX) v období 1961 – 2100 podľa modifikovaných výstupov modelu CGCM3.1 a meraných údajov SHMÚ (emisné scenáre SRES A2 a B1). V období 1961 – 2009 sú modelové výsledky v zhode s meraniami (obr. 2). Zdroj: spracované podľa výstupov CGCM3.1 a údajov SHMÚ, 2010



scenári A2 a na 15,5 hPa pri scenári B1, čo je oproti priemeru z obdobia 1961 – 1990 (13,2 hPa) rast asi o 32,6 %, resp. 17,4 %. Pri teplote vzduchu sa očakáva

rast asi o 4,5 °C (A2) a o 2,3 °C (B1), pri relatívnej vlhkosti vzduchu *RV* sa očakáva stabilizácia terajšej nižšej *RV* až do konca 21. storočia pre obidva scenáre B1 a A2 na úrovni okolo 67 % (priemer v období 1961 – 1990 bol 68 %).

Na základe zhodnotenia scenárov *T*, *e*, *RV* a *d* pre iné mestské a vidiecke lokality na Slovensku vyplýva, že smerom na sever a do väčšej nadmorskej výšky sa do r. 2100 zmierni rast *d* (asi o 2 až 5 %) a mierne zvýši *RV* (asi o 2 %) v porovnaní so scenármi pre Hurbanovo, kým rast teploty vzduchu zostane v podstate nezmenený. Napriek uvedenej skutočnosti to bude znamenať značnú zmenu klimatických pomerov na Slovensku smerom k rastu rizika sucha v čase anticyklonálneho počasia a intenzívnych dažďov v prípade silných búrok alebo hlbokých letných cyklón.

Možné dôsledky v mestách

V porovnaní s vidieckou krajinou sú mestá na území Slovenska teplejšie o 0,1 až 1,0 °C v ročnom priemere v závislosti od ich veľkosti (najviac v lete po západe slnka, až o 10 °C) a majú nižšiu relatívnu vlhkosť vzduchu o niekoľko % (najviac v noci a ráno). Očakávaná regionálna zmena klímy sa prejaví v mestách komplexne, pretože sa vplyvom urbanizácie prekryje vplyv zmeny klímy regionálneho charakteru so zmenenými podmienkami.

Všetko nasvedčuje tomu, že najzložitejšie negatívne prejavy budú mať krátkodobé intenzívne zrážky v meste a intenzívne viacdenné zrážky v povodí riek nad mestom. Všetky obce, mestá zvlášť, boli v minulosti urbanisticky a infraštruktúrou riešené tak, aby bez väčšej ujmy znášali prípadné ojedinelé škodlivé následky mimoriadneho počasia. Týka sa to aj protipovodňových opatrení, ktoré boli nastavené na riziko tzv. 50- alebo 100-ročnej vody, teda počítalo sa s tým, že v priemere raz za 50 alebo 100 rokov sa môže vyskytnúť udalosť s ničivými účinkami. Oteplenie o 2 až 4 °C bude znamenať, že také povodňové udalosti, ktoré sa vyskytovali zriedkavejšie ako raz za 100 rokov, sa môžu o 90 rokov vyskytovať v priemere raz za 20 rokov, čo už pre obce a mestá predstavuje neprimerane vysoké riziko. Príčinou bude zvýšenie extrémov úhrnov zrážok o 20 až 50 % (Lapin et al., 2003). Zrejme sa v mestách nevyhneme ani lejakom s úhrnmi nad 100 mm.h⁻¹ v priemere približne raz za 50 rokov. Bude preto potrebné prebudovať protipovodňovú ochranu, ktorá je veľmi nákladná. Doplňujúcou tematikou sa zaoberajú aj príspevky autorov Hlavčová, et al. (2008 a 2010).

Ďalším závažným problémom bude zvýšenie absolútnej vlhkosti vzduchu alebo aj tlaku vodnej pary v teplom období roka zhruba o 15 až 35 %. Hranica dusna (neprijemného pocitu z tepla a vlh-

ka) je pre *e* > 18,7 hPa. Takýchto dní bývalo v minulosti v mestách v priemere od 2 (Poprad) do 26 (Hurbanovo) ročne, takmer vždy v júni až auguste. Iba málokedy sa stávalo, že dusno trvalo viac ako 3 dni za sebou, a preto nebola potrebná klimatizácia obytných interiérov. Po zvýšení tlaku vodnej pary až o 35 % a zvýšení teploty vzduchu až o 4,5 °C bude dusných dní 2-krát (nížiny) až 10-krát (vyššie polohy) viac ako v minulosti. Pravdepodobne sa v nižších polohách budú často vyskytovať epizódy horúceho a dusného počasia aj viac ako 10 dní nepretržite. To bude znamenať značnú záťaž tak pre deti, starých a chorých ľudí, ako aj pre pracujúcich a študujúcich občanov. Bude nevyhnutné dobudovať nákladnú klimatizáciu nielen obytných, ale aj pracovných interiérov, dopravných prostriedkov, škôl a nemocníc, pretože sa očakáva, že sa epizódy dusna budú vyskytovať nielen v mesiacoch jún až august, ale už od začiatku apríla do konca októbra.

Nie celkom zanedbateľný bude aj problém s nízkou relatívnou vlhkosťou vzduchu pri vyššej teplote v období od marca do októbra. Nízka relatívna vlhkosť vzduchu znamená v mestách aj zvýšenú prašnosť, väčší rozptyl alergénov a problémy s dýchaním chorých ľudí. Aj keď neočakávame zníženie priemerov relatívnej vlhkosti vzduchu, predĺži sa obdobie s teplotou nad 10 °C, kedy môže prebiehať vegetácia rôznych rastlín. Navyše sa k nám presunú cudzokrajné rastliny a organizmy. Na ich peľ a alergény nie sme zvyknutí. Nízka relatívna vlhkosť vzduchu, a s tým súvisiace dlhé suché periódy, môžu navyše spôsobiť rýchly výpar v povodiach nad mestami, čo zhorší zásobovanie pitnou vodou, predraží závlahy a zásobovanie miest zeleninou a ovocím z miestnych zdrojov.

* * *

Na mieste je otázka adaptačných opatrení na zníženie možných škôd v dôsledku klimatickej zmeny. Je zrejme, že ak sa rozhodneme udržať prijateľný komfort ľudí v mestách, musíme začať s realizáciou nákladných opatrení čo najskôr. Takéto prevažne investične a stavebne náročné opatrenia sa musia rozložiť na dlhé obdobie (viac ako 20 rokov) s postupnou realizáciou. Bude tiež potrebné prijať rad opatrení organizačného a strategického charakteru, najmä pokiaľ ide o urbanizačné zámery, vodohospodárske úpravy, introdukcii cudzokrajných rastlín a organizmov, hygienu a zníženie šírenia patogénov, chorôb a škodcov.

V príspevku boli využité podklady z riešenia projektov VEGA č. 1/4033/07 a 1/0063/10 a údaje SHMÚ.

Literatúra

- Hlavčová, K., Szolgay, J., Kohnová, S., Hlásny, T.: Simulation of Hydrological Response to the Future Climate in the Hron River Basin. *Journal of Hydrology and Hydro-mechanics*, 56, 2008, 3, p. 163 – 175.
- Hlavčová, K., Výleta, R., Szolgay, J., Kohnová, S., Macurová, Z., Šúrek, P.: Modelling Changes in the Runoff Regime in Slovakia Using High Resolution Climate Scenarios. In: Bruthans, J. (ed.): *HydroPredict 2010. 2nd International Interdisciplinary Conference on Predictions for Hydrology, Ecology and Water Resources Management*. Prague : Charles University, 2010, 13 p (CD).
- IPCC: IV. Report, WG 1, The Physical Science Basis. 2007 www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm
- Lapin, M.: Klimatické zmeny. 2010 www.dmc.fmph.uniba.sk/public_html/climate/aktualne2.htm
- Lapin, M., Melo, M.: Zmeny a variabilita klímy, scenáre zmeny klímy. *Život. Prostr.*, 34, 2000, 2, s. 69 – 74.
- Lapin, M., Hlavčová, K., Petrovič, P.: Vplyv klimatickej zmeny na hydrologické procesy – extrémne povodňové situácie. *Acta Hydrologica Slovaca*, 4, 2003, 2, s. 211 – 220.
- Lapin, M., Gera, M., Hrvoľ, J., Melo, M., Tomlain, J.: Possible Impacts of Climate Change on Hydrologic Cycle in Slovakia and Results of Observations in 1951 – 2007. *Biologia*, 64, 2009, 3, p. 454 – 459.

Prof. RNDr. Milan Lapin, CSc., lapin@fmph.uniba.sk
RNDr. Martin Gera, PhD., mgera@fmph.uniba.sk
RNDr. Martin Kremler, PhD., kremler@fmph.uniba.sk
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave, Mlynská dolina – pavilón F1, 842 48 Bratislava

Povodeň na rieke Morava v bratislavskej mestskej časti Devín. Foto: J. Kollár, 2007

