

# ANALÝZA ZMENY ODTOKU SPÔSOBENEJ ZMENOU VYUŽÍVANIA ÚZEMIA NA POVODÍ IPEĽA

K. Hlavčová, J. Szolgay, S. Kohnová, Z. Papánková

Katedra vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 813 68 Bratislava

[kamila.hlavcova@stuba.sk](mailto:kamila.hlavcova@stuba.sk); [jan.szolgay@stuba.sk](mailto:jan.szolgay@stuba.sk); [silvia.kohnova@stuba.sk](mailto:silvia.kohnova@stuba.sk);  
[papankova@svf.stuba.sk](mailto:papankova@svf.stuba.sk)

A spatially distributed hydrologic model is presented for simulation of land use change impact on runoff formation in a river basin. The generation of runoff is triggered by the rain intensity and soil moisture status, and is calculated as the net precipitation times a runoff coefficient, which depends upon slope, land use and soil type. The runoff is routed through the basin along flow paths determined by the topography using a diffusive wave transfer model that enables to calculate response functions between any start and end point, depending upon slope, flow velocity and dissipation characteristics along the flow lines. All these calculations can be performed with standard GIS tools.

The Ipeľ basin with an outlet at the Holiša gauge station and an area of 685.27 km<sup>2</sup> was selected as a pilot basin. For assessment of effect of land-use on runoff formation four land-use change scenarios were created, with the emphasis on change in forest, grass and arable land. Changes in surface, subsurface, baseflow and total runoff were compared and changes in spatial distribution of runoff were estimated and discussed.

**Key words:** rainfall runoff model with distributed parameters, land-use change scenarios, changes in surface and subsurface runoff and baseflow

## Úvod

Vzhľadom na to, že jednou z podmienok zabezpečenia trvalo udržateľného hospodárenia s vodnými zdrojmi v povodiach je ich integrovaný manažment, zavádzaniu princípov integrovaného hospodárenia s vodou manažmentu povodí sa u nás začína venovať zvýšená pozornosť vo výskume, plánovaní, organizačnom a legislatívnom zabezpečení. Aktivity v plánovaní pritom prebiehajú oproti minulosti vo vyššej neistote, zapríčinennej jednak problémami určovania priorít rozvoja spoločnosti, zmenami jej spoločenského vedomia a zmenami koncepcií rozvoja hospodárstva, ako aj zvýšením neistoty v našich vedomostiach o možnom vývoji povrchových vodných zdrojov počas budúcich plánovacích horizontov v dôsledku antropogénnej činnosti. Okrem otázok možnej nestacionarity hydrologických procesov spôsobenou zmenou klímy predstavujú závažný problém vodného hospodárstva aj možné vplyvy urbanizácie, odlesňovania, lesných požiarov, ako aj zmeny poľnohospodárskych techník na hydrologický režim. Posúdenie vplyvu zmeny využívania pôdy alebo všeobecne krajiny na kvantitatívnu a kvalitatívnu zmenu vodných zdrojov a odtokových pomerov na povodí by malo preto tvoriť dnes už neoddeliteľnú súčasť integrovaného manažmentu povodí.

Na odhad zmeny spôsobu využívania krajiny sa v súčasnosti často využívajú fyzikálne orientované hydrologické modely s priestorovo-rozčlenenými parametrami, vývoj ktorých je v značnej miere motivovaný práve snahou o lepšie vyjadrenie vplyvu priestorových zmien v krajine na hydrologické procesy (Abbott a kol., 1986; Ewen a Parkin, 1996). Prednosťou fyzikálne orientovaných modelov s priestorovo-rozčlenenými parametrami je v porovnaní s inými druhmi hydrologických modelov schopnosť opísať priestorovú premenlivosť antropogénnych vplyvov a zmeny priestorových parametrov pre rôzne spôsoby využívania územia. Situáciu uľahčuje v súčasnosti dostupnosť priestorových údajov, ako je napríklad digitálny model reliéfu, mapy spôsobu využívania územia, pôdne mapy, ako aj prepojenosť modelov s prostredím GIS (pozri napr. modely SHE, TOPMODEL, CASC2D, HYDROTEL a WetSpa). Aj tu si však treba uvedomiť, že spoľahlivosť výsledkov modelovania závisí v značnej miere od parametrizácie modelov a konceptualizácie hydrologických procesov prebiehajúcich na povodí, od určenia počiatkových a okrajových podmienok, ktoré v budúcnosti nastanú, ako aj od reprezentatívnosti vstupov a parametrov modelu v nových podmienkach (Beven, 2001).

V uvedenom článku sa zaoberáme posúdením vplyvu spôsobu využívania krajiny na odtokové pomery na povodí Ipľa. Na modelovanie odtoku sme použili modifikovaný fyzikálne orientovaný model s priestorovo rozčlenenými parametrami WetSpa. Zmenu odtoku sme analyzovali pri 4 rôznych scenároch zmeny spôsobu využívania územia, pričom sme hodnotili zmenu jednotlivých zložiek odtoku a celkového odtoku v záverečnom profile povodia, ako aj zmenu priestorového rozloženia odtoku na povodí. Nadväzujeme pritom na svoje predchádzajúce práce (pozri napr. Hlavčová a kol., 2005, Papánková a kol., 2005).

### **Opis zrážkovo-odtokového modelu s rozčlenenými parametrami**

Na modelovanie vplyvu spôsobu využívania územia na zmenu odtokových procesov na povodí Ipel' – Holiša bol použitý zrážkovo-odtokový fyzikálne orientovaný model s priestorovo rozčlenenými parametrami, ktorý vychádza zo štruktúry modelu WetSpa (Liu a De Smedt, 2004). Povodie je v modeli rozdelené štvorcovou sieťou na rovnomerné priestorové jednotky, v ktorých sa počíta hydrologická bilancia a z ktorých sa simuluje pohyb vody do záverečného profilu povodia. Jednotlivé zložky hydrologickej bilancie tvoria tekuté a tuhé zrážky, intercepcia, pôdna vlhkosť, infiltrácia, aktuálna evapotranspirácia, povrchový odtok, podpovrchový odtok v koreňovej zóne, priesak do podzemných vôd, podzemný odtok a zásoby podzemnej vody v zóne nasýtenia. Transformácia povrchového odtoku na povodí sa simuluje pomocou rovníc odvodených z difúznej vlny a na základe hydraulických charakteristík prúdenia vody na svahoch a v riečnej sieti. Výpočet podpovrchového odtoku vychádza z Darcyho zákona a metódy kinematickej vlny.

Do modelu vstupujú tieto hydrometeorologické údaje: denné (hodinové) úhrny zrážok z bodových meraní v staniách, priemerné denné (hodinové) hodnoty teploty vzduchu z bodových meraní v staniách, priemerné denné (hodinové) prietoky v záverečnom profile povodia. Zrážky sú v každej časovej jednotke rozdelené do jednotlivých buniek povodia metódou Thiessenových polygónov. Potenciálna evapotranspirácia je v každej časovej jednotke a bunke vypočítaná podľa vzťahu Blaney-Criddle na základe teploty vzduchu a indexu oslnenia. Teplota vzduchu je v každej bunke a časovej jednotke vypočítaná na základe nadmorskej výšky bunky a regresného vzťahu medzi aktuálnou teplotou vzduchu v staniách a nadmorskou výškou staníc. Meraný prietok slúži na porovnanie so simulovaným prietokom a následným vyhodnotením presnosti modelu, pričom pre samotnú simuláciu odtoku nie je potrebný.

Digitálne priestorové údaje tvoria: digitálny model reliéfu (DEM), mapa pôdných druhov, mapa využitia územia, geografická lokalizácia zrážkomerných, klimatických a vodomerných staníc. Z digitálneho modelu reliéfu sa v prostredí GIS odvodzujú ďalšie vrstvy, potrebné pre simuláciu pohybu vody v povodí, a to mapa smerov odtoku, mapa akumulácie odtoku, riečna sieť, poradie tokov, mapa sklonov svahov povodia a riečnej siete, mapa hydraulického polomeru pre svahy povodia a riečnu sieť pre vybraný výpočtový prietok, mapa subpovodí a index oslnenia svahov. Z mapy pôdných druhov a príslušnej tabuľky parametrov pôd sa vytvoria mapy parametrov pôdy, ako sú koeficient nasýtenej hydraulickej vodivosti, pórovitosť, poľná vodná kapacita, reziduálna pôdna vlhkosť, index rozdelenia pórov v pôde podľa ich veľkosti, vlhkosť pôdy na bode vädnutia a začiatočná vlhkosť pôdy. Z mapy využitia krajiny a príslušnej tabuľky parametrov sa vytvoria mapy nasledovných parametrov: hĺbka koreňovej zóny, maximálna a minimálna kapacita intercepcie a Manningov súčiniteľ drsnosti pre svahy a riečnu sieť.

Pre riešenie transformácie odtoku rovnicami odvodenými na základe predpokladu difúznej vlny sa v prostredí GIS ďalej vytvoria vrstvy týchto charakteristík prúdenia vody na svahoch a v riečnej sieti: rýchlosť prúdenia vody v jednotlivých bunkách, doba odtoku z každej bunky do záverečného profilu povodia určená na základe celerity a dĺžky odtoku na svahu alebo v riečnej sieti, súčiniteľ disperzie a celerita, smerodajná odchýlka dôb odtoku z buniek na dráhe odtoku do záverečného profilu povodia.

Okrem priestorovo vyjadrených fyzicko-geografických a fyzikálnych parametrov pracuje model s 12 globálnymi parametrami, ktoré sú konštantné pre celé povodie a v modeli sa kalibrujú.

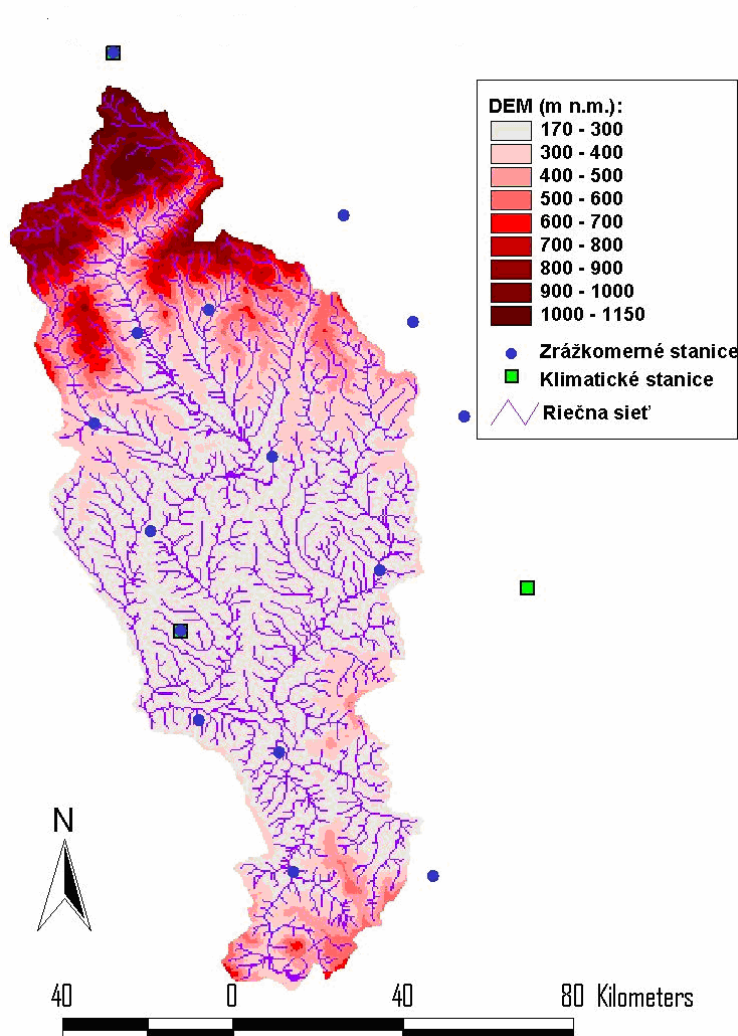
### **Opis povodia a vstupné údaje**

Pilotné povodie pre riešenie štúdie tvorilo povodie Ipľa po vodomerný profil Holiša (Id 7440) s plochou povodia 685,27 km<sup>2</sup>. Klimatické a hydrologické údaje boli pre riešenie štúdie poskytnuté Slovenským hydrometeorologickým ústavom v Bratislave za obdobie 1981-1992. Údaje zo staníc tvorili denné úhrny zrážok (z 13 zrážkomerných a 3 klimatických staníc) a priemerná denná teplota

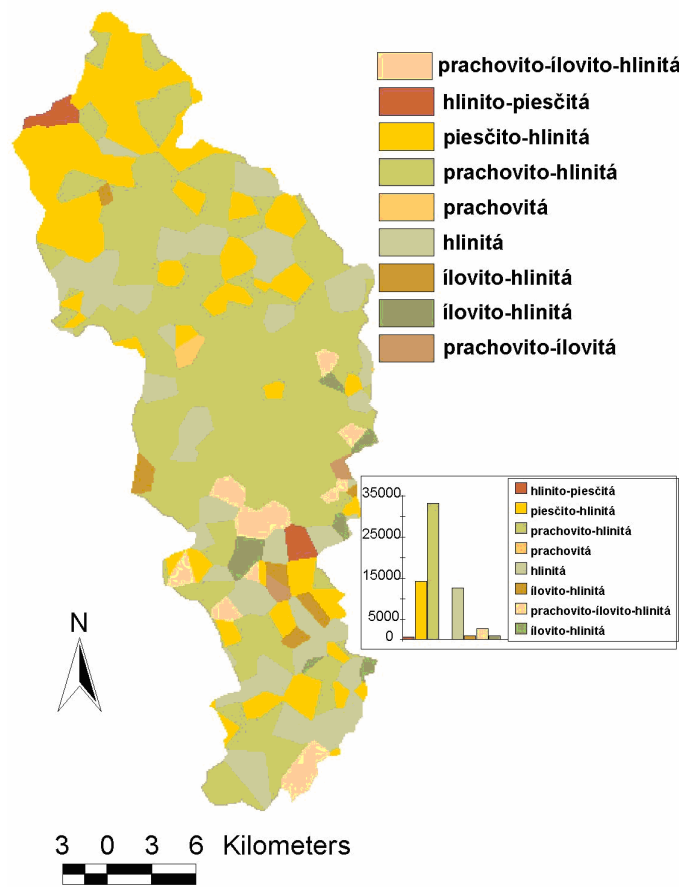
vzduchu z 3 klimatických staníc, prietokové údaje tvorili priemerné denné prietoky v profile Ipeľ – Holiša.

Základné vstupné mapové vrstvy v rastrovom formáte s veľkosťou štvorca 100 x 100 m tvorili digitálny model reliéfu, mapa pôdných druhov a mapa využitia územia. Z týchto vrstiev boli vytvorené ďalšie potrebné priestorovo distribuované mapy vstupných údajov, a to mapa koeficienta nasýtenej hydraulickej vodivosti, pórovitosti, poľnej vodnej kapacity, reziduálnej pôdnej vlhkosti, indexu rozdelenia pórov v pôde podľa ich veľkosti, vlhkosti pôdy na bode vädnutia, začiatkovej vlhkosti pôdy, hĺbky koreňovej zóny, maximálnej a minimálnej kapacity intercepce, Manningovho súčiniteľa drsnosti pre svahy a riečnu sieť, rýchlosti prúdenia vody v jednotlivých bunkách, doby odtoku z každej bunky do záverečného profilu povodia určenej na základe celerity a dĺžky odtoku na svahu alebo v riečnej sieti, súčiniteľa disperzie a celerity a smerodajnej odchýlky dôb odtoku z buniek na dráhe odtoku do záverečného profilu povodia.

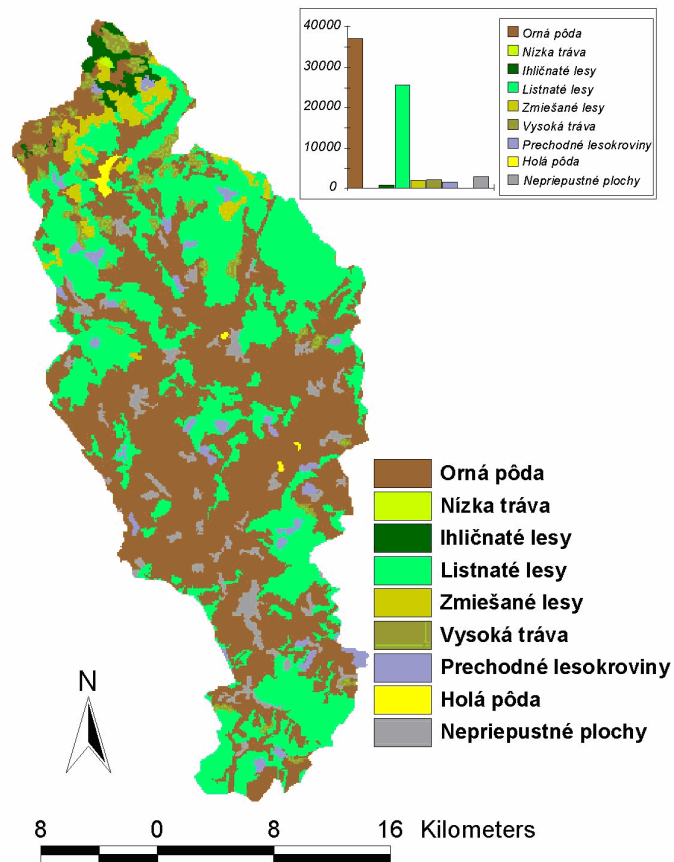
Na obr. 1 je zobrazený digitálny model reliéfu povodia Ipeľ – Holiša s generovanou riečnou sieťou a lokalizáciou zrážkomerných a klimatických staníc, na obr. 2 je zobrazená mapa pôdných druhov a na obr. 3 je znázornená mapa spôsobu využitia územia na povodí.



Obr. 1 Digitálny model reliéfu povodia Ipeľ – Holiša s generovanou riečnou sieťou a lokalizácia zrážkomerných a klimatických staníc



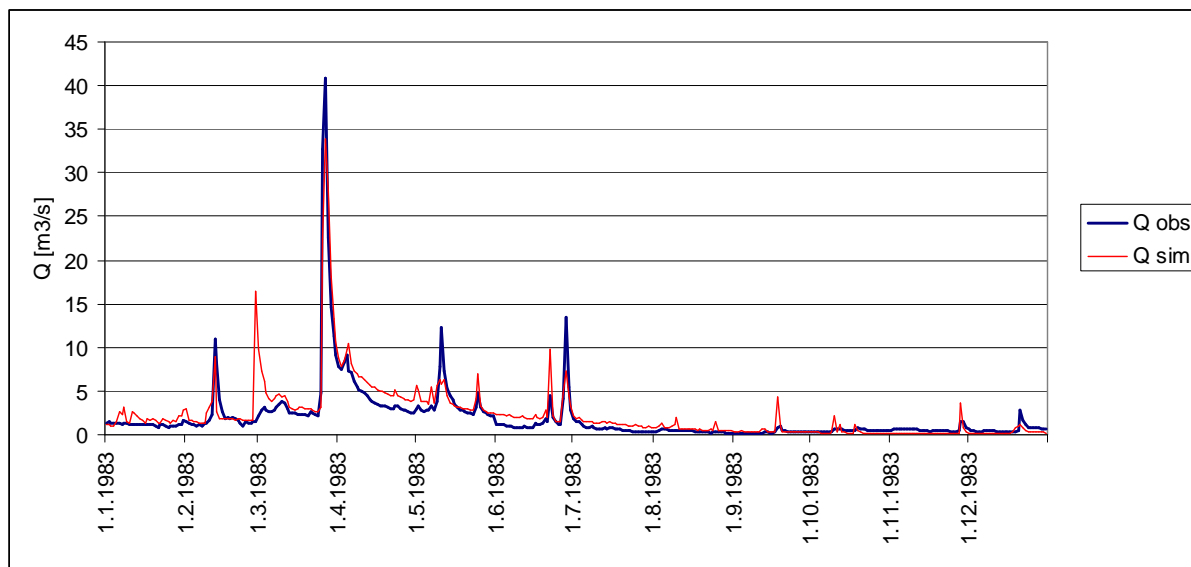
Obr. 2 Mapa pôdných druhov na povodí Ipeľ - Holiša



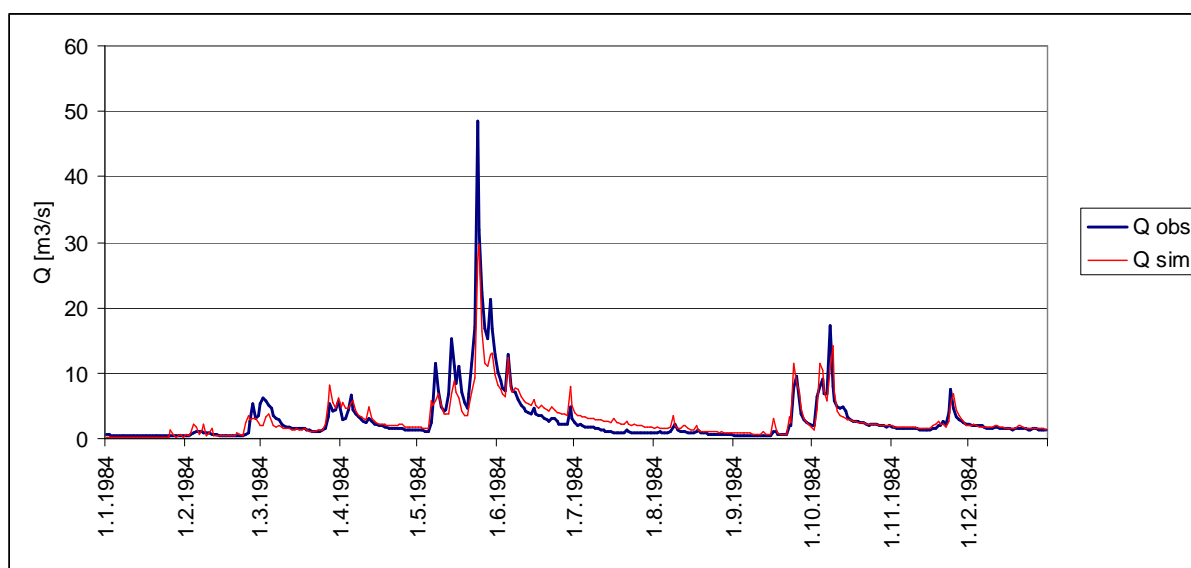
Obr. 3 Mapa využitia územia pre povodie Ipel' - Holiša

### Kalibrácia parametrov modelu

Pre vybrané pilotné povodie Ipel' – Holiša boli kalibráciou a validáciou určené globálne parametre hydrologického modelu pre modelovanie odtoku. Model bol pre disponibilné obdobie pozorovania kalibrovaný a validovaný pre vybrané časové úseky. Pre celé obdobie bola dosiahnutá hodnota koeficienta Nash - Sutcliffe 0,708. Na obr. 4. a 5 je znázornené porovnanie simulovaných a pozorovaných priemerných denných prietokov pre rok 1983 a 1984.



Obr. 4 Porovnanie meraných a simulovaných priemerných denných prietokov pre rok 1983 na povodí Ipeľ – Holiša



Obr. 5 Porovnanie meraných a simulovaných priemerných denných prietokov pre rok 1984 na povodí Ipeľ – Holiša

### Scenáre zmeny odtoku pri zmenenom spôsobe využitia územia

V tejto kapitole opisujeme teoretické scenáre novej zmeny využívania územia, ktoré sme vytvorili pre posúdenie novej zmeny odtoku a jeho zložiek v uvedených povodiach. Sústredili sme sa pritom najmä na zmenu lesných porastov, trávnatých porastov a zmenu ornej pôdy. Vytvorené scenáre sú nasledovné:

1. prirodzené využitie krajiny - scenár, ktorý vyjadruje spôsob využitia územia najbližší prirodzenej krajine, takmer celé povodie je zalesnené (scenár 1),
2. zmena druhovej skladby lesa – spôsob využitia územia, ktorý je možné zrealizovať na povodí pri rešpektovaní súčasného využívania územia (urbanizované územie, orná pôda a pod.) (scenár 2),
3. zatrávnenie ornej pôdy – scenár, pri ktorom sa predpokladá, že sa zatravnia plochy, v súčasnosti využívané ako orná pôda (scenár 3),
4. zatrávnenie lesa – scenár, pri ktorom sa predpokladá, že sa zalesnené plochy menia na trávne porasty (scenár 4).

Pri jednotlivých scenároch sa zmena spôsobu využívania územia uplatnila zmenou parametrov rôznych druhov povrchov, ktoré vstupujú do rovníc, simulujúcich procesy hydrologickej bilancie a formovania odtoku na povodí. V tab. 1 sú vyjadrené parametre kategórií spôsobu využívania územia, ktoré vstupujú do modelovania procesov hydrologickej bilancie a transformácie odtoku na povodí.

Tab. 1 Parametre rôznych kategórií využitia územia v hydrologickom modeli

Využitie územia	Hĺbka koreňovej zóny (m)	Manningov koeficient drsnosti	Max. kapacita intercepcie (mm)	Min. kapacita intercepcie (mm)	Index listovej plochy - max (mm)	Index listovej plochy - min. (mm)
Orná pôda	1,0	0,15	1,0	0,5	6,0	0,5
Nízka tráva	1,0	0,20	1,0	0,5	2,0	0,5
Ihličnaté lesy	1,5	0,40	1,0	0,8	6,0	5,0
Opadavé ihličnaté lesy	1,5	0,40	0,8	0,5	6,0	1,0
Listnaté lesy	1,5	0,80	2,0	0,5	6,0	1,0
Zmiešané lesy	1,5	0,60	2,0	1,5	6,0	5,0
Vysoká tráva	1,0	0,40	1,5	1,0	6,0	0,5
Vždy zelené kríky	1,0	0,40	1,5	1,0	6,0	0,5
Opadavé kríky	1,0	0,40	1,5	0,5	6,0	1,0
Holá pôda	0,5	0,10	0	0	2,0	0,5
Nepriepustné plochy	1,0	0,02	0	0	0	0
Vodné plochy a toky	1,0	0,04	0	0	0	0

### Zhodnotenie zmeny jednotlivých zložiek odtoku

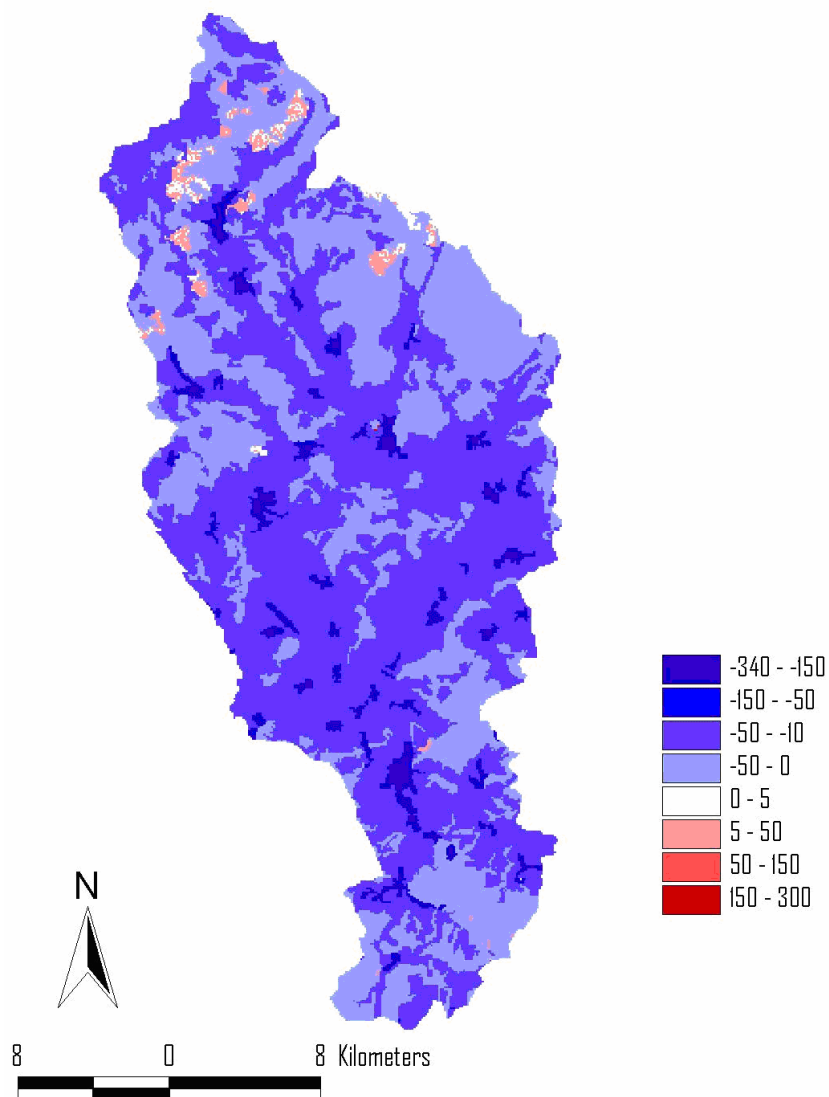
Porovnanie zmeny jednotlivých zložiek odtoku a celkového odtoku pre súčasný stav a jednotlivé scenáre je uvedené v tab. 2. V tabuľke je povrchový odtok označený ako  $Q_s$ , podpovrchový  $Q_i$ , podzemný  $Q_g$  a celkový odtok  $Q_{tot}$ . Súčasný stav je označený symbolom  $Q_{ref}$  a jednotlivé scenáre sú očíslované od 1 po 4.

Na obr. 6-9 sú znázornené priestorové zmeny celkového odtoku pri jednotlivých scenároch zmeny spôsobu využívania územia.

Tab. 2 Porovnanie celkového odtoku a jeho zložiek pre súčasný (referenčný) spôsob využívania územia a jednotlivé scenáre zmeny spôsobu využívania územia pre povodie Ipeľ - Holiša

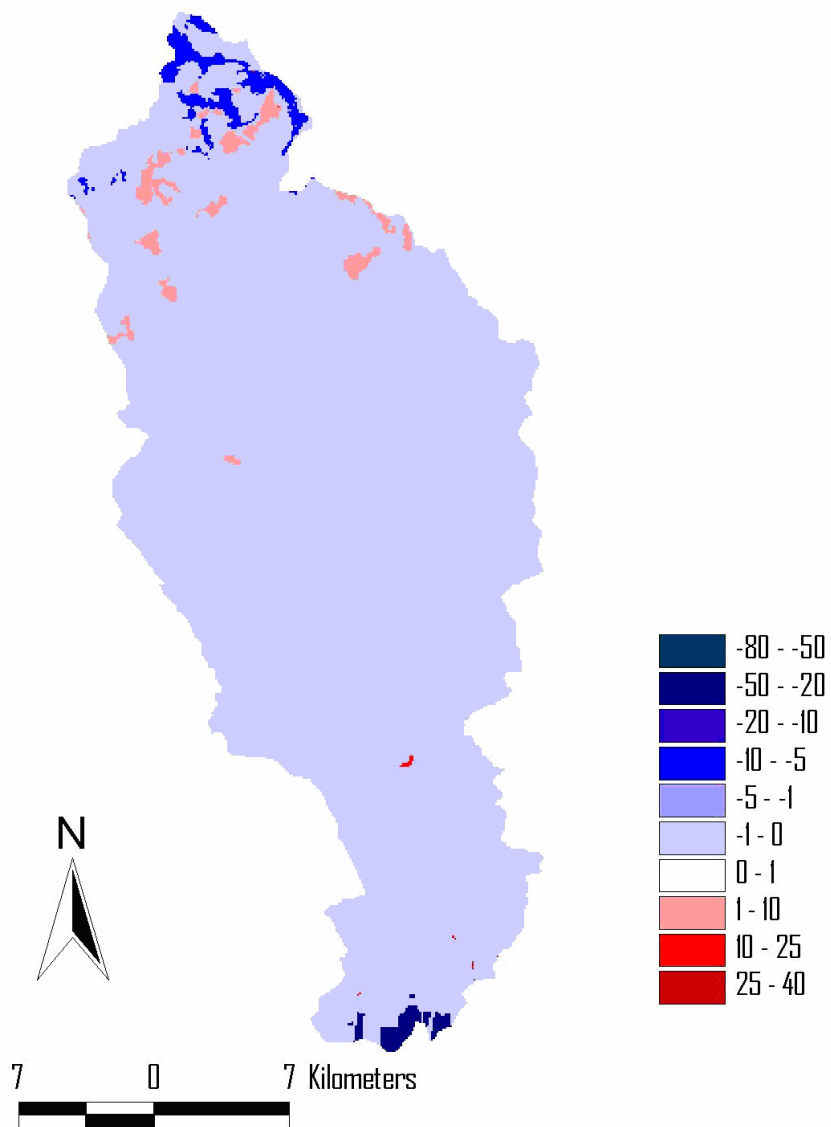
Zložky odtoku	$[m^3 s^{-1}]$	$[mm rok^{-1}]$	$Q_{scenár} - Q_{ref} [mm rok^{-1}]$	$((Q_{scenár} - Q_{ref}) / Q_{ref}) * 100 [\%]$
$Q_{s\_ref}$	0,31	14,1		
$Q_{s\_1}$	0,12	5,4	-8,7	-62,0
$Q_{s\_2}$	0,31	14,1	-0,0	-0,3
$Q_{s\_3}$	0,28	12,9	-1,2	-8,7
$Q_{s\_4}$	0,33	15,19	1,0	7,2
$Q_{i\_ref}$	0,47	21,7		
$Q_{i\_1}$	0,43	19,8	-1,9	-9,0
$Q_{i\_2}$	0,47	21,7	-0,0	-0,0
$Q_{i\_3}$	0,47	21,9	0,1	0,6
$Q_{i\_4}$	0,53	24,3	2,5	11,7
$Q_{g\_ref}$	1,65	76,2		
$Q_{g\_1}$	1,32	60,7	-15,5	-20,3
$Q_{g\_2}$	1,65	76,1	-0,1	-0,1
$Q_{g\_3}$	1,67	76,8	0,6	0,8
$Q_{g\_4}$	1,83	84,1	7,9	10,4

Qtot_ref	2,43	112,06		
Qtot_1	1,87	85,902	-26,16	-23,34
Qtot_2	2,43	111,91	-0,152	-0,136
Qtot_3	2,42	111,59	-0,466	-0,416
Qtot_4	2,68	123,51	11,447	10,215

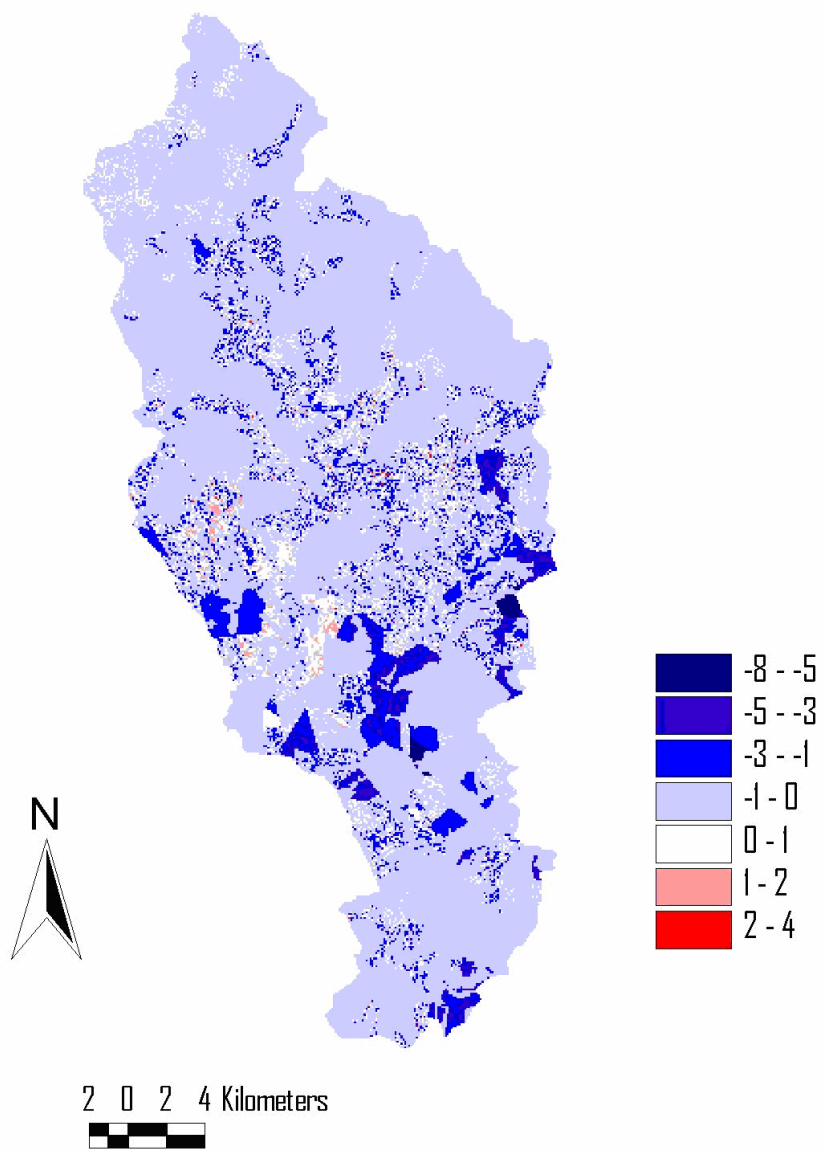


Obr. 6. Zmena priemerného ročného odtoku v mm pre scenár prirodzená krajina (1) oproti súčasnému stavu využívania územia

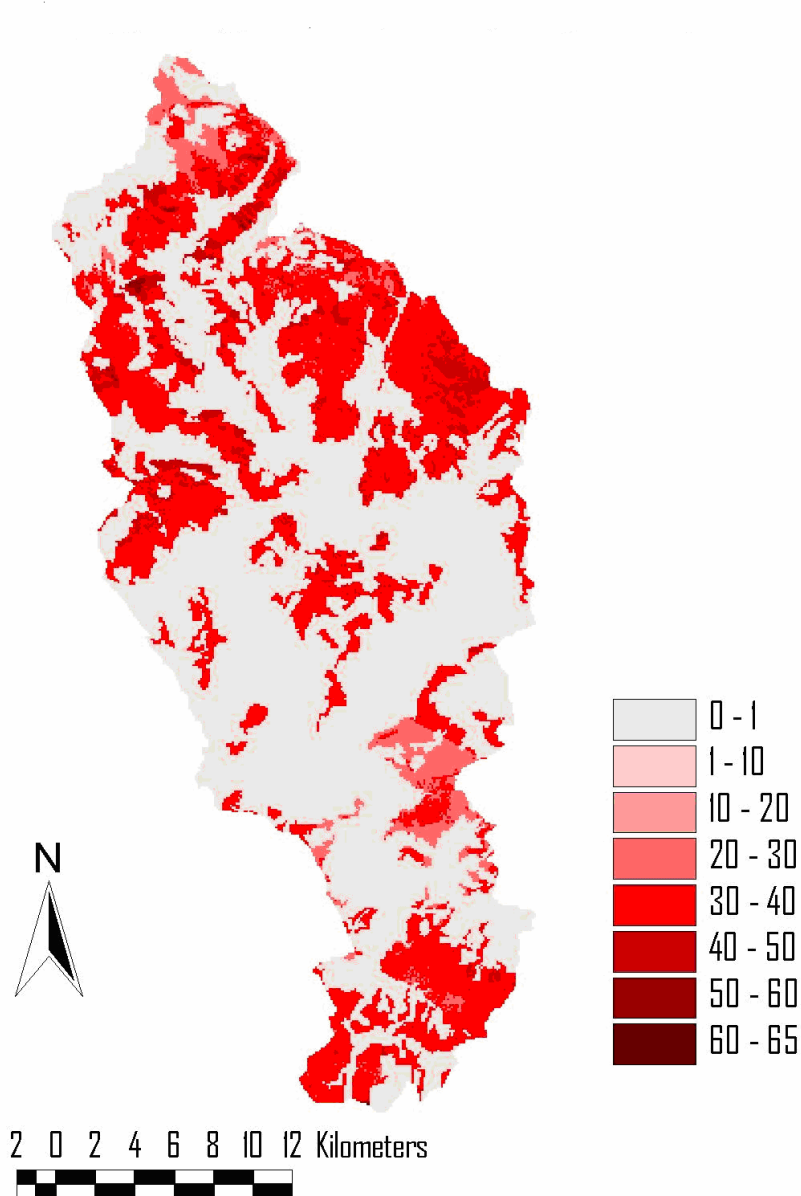




Obr. 7 Zmena priemerného ročného odtoku v mm pre scenár zmena skladby lesa (2) oproti súčasnému stavu využívania územia



Obr. 8 Zmena priemerného ročného odtoku v mm pre scenár zatrávnenie ornej pôdy (3) oproti súčasnému stavu využívania územia



Obr. 9 Zmena priemerného ročného odtoku v mm pre scenár zatrávnenie lesa (4) oproti súčasnému stavu využívania územia

Z výsledkov porovnania jednotlivých scenárov so súčasným stavom spôsobu využitia územia na povodí Ipeľ – Holiša vidieť, že pri scenári 1 „prirodená krajina“ sa celkový ročný odtok zníži o -26 mm, čo predstavuje zmenu oproti súčasnému stavu o -23 %. Najvýraznejšie sa táto zmena prejaví na povrchovom odtoku, ktorý sa zníži o 9 mm/rok, čo predstavuje pokles o -62 % oproti súčasnému stavu a na podzemnom odtoku, ktorý sa zníži asi o -16 mm/rok, čo predstavuje zníženie o -20 % oproti súčasnosti. Podpovrchový odtok sa zníži nevýraznejšie, a to o -2 mm (-9 %) oproti súčasnému stavu.

Scenár 2 „zmena skladby lesa“ ukázal, že pri zmene lesných porastov na zmiešané a listnaté lesy sa neprejavili zmeny v celkovom odtoku, ani v jeho zložkách. Vyplýva to najmä zo skutočnosti, že na povodí Ipeľ tvoria ihličnaté lesy iba menšiu časť zalesneného územia a aj súčasný lesný porast je tvorený najmä zmiešanými a listnatými lesmi.

Porovnanie scenára 3 „zatrávnenie ornej pôdy sa podobne ako pri predchádzajúcom scenári prejavilo minimálne na zmene odtoku. Tento fakt vyplýva zo skutočnosti, že orná pôda bola zatrávnená „krátkou trávou“, parametre ktorej sú veľmi podobné ako parametre ornej pôdy.

Scenár 4 „zatrávnenie lesa“ sa prejavilo miernym zvýšením odtoku, ako aj jeho zložiek. Celkový odtok z povodia sa zvýšil o 11 mm/rok, čo predstavuje zmenu o +10 % oproti súčasnému stavu. Jednotlivé zložky odtoku sa pritom menili relatívne rovnomerne, zvýšenie povrchového odtoku predstavovalo +7 %, zvýšenie podpovrchového odtoku +12 % a zvýšenie podzemného odtoku +10%.

## **Záver**

Prezentované výsledky ukazujú na možnosti využitia hydrologického modelovania s priestorovo rozčlenenými parametrami pri analýze odtoku a jeho zmien pri rôznom manažmente povodia, vyjadrenom spôsobom využívania územia. Takýto prístup je možné využiť v integrovanom manažmente povodia, a to najmä pri organizovaní spôsobu využívania povodia a posudzovaní jeho vplyvu na odtokové procesy. Zmena odtoku sa dá vyjadriť porovnávaním priemerných denných, mesačných, ako aj ročných prietokov, ich štatistických charakteristík, ako aj priestorovým rozložením odtoku. Okrem toho je možné zhodnotiť aj zmeny jednotlivých zložiek odtoku – povrchového, podpovrchového a podzemného a zmeny zložiek prvkov hydrologickej bilancie, ako je evapotranspirácia a infiltrácia.

Na druhej strane, pri využívaní výsledkov distribuovaného hydrologického modelovania je potrebné uvedomiť si aj mnohé neistoty uvedeného prístupu, ktoré treba v integrovanom manažmente povodia zohľadňovať. Spoľahlivosť výsledkov modelu veľmi úzko súvisí s disponibilnými vstupnými údajmi, s mierou schematizácie hydrologických procesov v modeli, s parametrizáciou vlastností prostredia v simulovaných fyzikálnych procesoch a s určením dostatočne spoľahlivých fyzikálnych, ako aj kalibrovaných parametrov modelu.

## **Pod'akovanie**

Autori ďakujú agentúre VEGA za podporu grantu 2/5056/25 a Agentúre na podporu vedy a techniky za podporu projektu APVT-51-017804.

## **Literatúra**

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., Rasmussen, J. (1986): An introduction to the European Hydrological System – Systéme Hydrologique Européen, SHE. 1. History and philosophy of physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology* 87, 45-59.
- Beven, K.J. (2001): *Rainfall – runoff modelling*. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester.
- Dunn, S.M., Mackay, R. (1995): Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology. *Journal of Hydrology* 171, 49-73.
- Ewen, J., Parkin, G. (1996): Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impact. 1. Method. *Journal of Hydrology* 175: 583-594.
- Hlavčová, K., Szolgay, J., Kohnová, S., Papánková, Z., Horvát, O. (2005): On the Possibility of Assessment of land use change impact on runoff with a hydrological model with distributed parameters. *Meteorological Journal*, 8, 74-81.
- Liu, Y.B., De Smedt, F. (2004): *WetSpa Extension, A GIS-based Hydrologic Model for Flood prediction and Watershed Management*. Vrije Universiteit Brussel, Brussel 2004.
- Papánková, Z., Horvát, O., Hlavčová, K., Szolgay, J., Kohnová, S. (2005): Scenarios of changes in flood regime due to land use change in the Hron river basin. In: Marsalek, J., ed.: *Transboundary Floods: Reducing Risk and Enhancing Security through Improved Flood Management Planning*. NATO Advanced Research Workshop. TREIRA, S.R.L., Oradea, Romania, 193-205.