

Modelovanie zrážkovo-odtokových procesov vplyvom zmeny krajinej pokrývky

Juraj Timko¹

Anotácia

Predmetom tohto príspevku je modelovanie zrážkovo-odtokových procesov vplyvom zmeny využívania krajiny. Na simuláciu zmeny odtoku z krajiny vplyvom jej odlesnenia bol využitý zrážkovo-odtokový model HEC-HMS. Metóda CN kriviek slúžila na výpočet charakteristík povrchového odtoku. Metóda spočíva v zjednotení parametrov hydrologických vlastností pôd, hydrologických charakteristík využitia zeme a indexu predchádzajúcich zrážok.

Kľúčové slová: zrážkovo-odtokové modelovanie, HEC-HMS, odlesnenie krajiny

Annotation

The purpose of this paper is impacts of changes in the land use to modeling of rainfall-runoff processes. To simulate the changes in the runoff in the catchment after deforestation was utilized rainfall-runoff model HEC-HMS. CN method was used to calculate the characteristics of surface runoff. The method involves the unification the parameters of hydrological characteristics of the soil, hydrological characteristics of the land use and index of previous rainfall.

Keywords: rainfall-runoff modeling, HEC-HMS, deforestation

Abstrakt

Štruktúra krajinej pokrývky a využitia zeme má významný vplyv na vodný režim tokov. Zároveň môže byť krajinná pokrývka pozmenená alebo úplne zmenená v relatívne krátkom čase. Jej transformácia môže nastať, či už vplyvom antropogénnej činnosti človeka, alebo prírodnými procesmi, ako sú veterné smršte, lavíny alebo zosuvy. Dôsledky zmien krajinej pokrývky na tvorbu a priebeh odtoku sú zjavné, avšak miera ich vplyvu na zrážkovo-odtokové procesy je veľmi ťažko kvantifikovateľná. Pri dnešnom trende globálnej zmeny klímy narastá na dôležitosť odvodenie a poznanie vzťahov medzi zrážkami a odtokom, ktorý vyvolávajú. V súčasnosti sú pri systémových riešeniach hydrologických úloh dávané do popredia komplexné metódy matematického modelovania. Pri našom výskume sme využili zrážkovo-odtokový model HEC-HMS, ktorý predstavuje softvérový produkt hydrologického centra ženijných inžinierov Americkéj armády (HEC-USACE – Hydrologic Engineering Centre - U.S. Army Corps of Engineers). Hydrologický modelovací systém (HEC-HMS) je navrhnutý tak, aby simuloval hydrologické procesy v povodí. Tento softvér obsahuje množstvo postupov a metodík hydrologickej analýzy. Základným vstupným údajom do modelu HEC-HMS bol digitálny model reliéfu vytvorený z vrstevníc zdigitalizovanej vrstevnicovej mapy územia v mierke 1 : 10 000. Vrstva riečnej siete bola spracovaná vo vektorovej forme a zobrazuje priebeh vodných tokov. Jedným zo vstupov bola aj geologická mapa, kde jednotlivým typom hornín bola priradená ich konduktivita a pórovitosť. Tieto atribúty pomohli pomocou nelineárnej Boussinesq-ovej metódy lepšie

¹ Mgr. Juraj Timko, Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra fyzickej geografie a geoekológie, Mlynská dolina, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava 4, timko10@uniba.sk

transformovať základný odtok. Táto metóda nie je empiricky odvodená, ale má fyzikálny základ. Zjednotením parametrov mapy pôdných druhov a mapy krajinej pokrývky sme získali hodnoty CN kriviek. Táto metóda bola vyvinutá na výpočet charakteristík povrchového odtoku, pri nedostatku priamych pozorovaní. Triedy krajinej pokrývky CORINE Land Cover boli transformované na kategórie využitia pôdy, ktoré využíva metodika CN kriviek. Terénnym výskumom boli doplnené priečne profily jednotlivých riečnych úsekov, a taktiež Manningové koeficienty drsnosti. Modelovým územím bolo povodie toku Blatina, ktorá pramení v Malých Karpatoch a prechádza intravilánom mesta Pezinok. Model bol kalibrovaný na zrážkovo-odtokovú situáciu z júna 2009. Výsledkom modelovania bolo jednak zistenie priebehu hydrogramu mimo stanice SHMÚ, konkrétne v záverečnom profile povodia, teda v mieste ústia Blatiny do Šúrskeho kanála. Druhým výsledkom bolo modelovanie rovnakej zrážkovej udalosti, ale po odlesnení skúmaného územia. Model predpovedal až 3-násobný nárast kulminačného prietoku na stanici SHMÚ. Z porovnania času kulminácie hydrogramu na stanici SHMÚ a v mieste ústia toku bolo možné vypočítať aj rýchlosť prúdenia vody v koryte. Zrážkovo-odtokové modely môžu byť perspektívnym nástrojom, ktorý je dobre využiteľný v integrovanom manažmente v povodiach a pri plánovaní krajiny a jej využitia. Je však potrebné uvedomovať si limity, obmedzenia a problémy, ktoré sa pri interpretácii výsledkov môžu vyskytnúť. Výsledky zrážkovo-odtokového modelovania je možné implementovať do hydraulických modelov, ktoré dokážu predikovať miesta inundácie vodného toku.

Abstract

Structure of land cover and land use has a significant impact on the water flow regime. Also the land cover can be modified or completely changed in a relatively short time. Its transformation can occur either due to anthropogenic human activity or with natural processes, such as windstorms, avalanches or landslides. The consequences of changes in the land cover on the development and progression of a runoff are obvious, but the extent of their influence on a rainfall-runoff process is very difficult to quantify. Under current trends of a global climate change on the increasing importance of knowledge and investigation of relations between precipitation and run-off produced by them. Complex methods of mathematical modeling are preferred within systematic solutions of hydrological tasks, nowadays. In our research we used a product of the Hydrologic Engineering Center within the U.S. Army Corps of Engineers. The Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) is designed to simulate the complete hydrologic processes of dendritic watershed systems. The software includes many traditional hydrologic analysis procedures. Primary input to the model HEC-HMS was a digital elevation model, that was created from the digitized contour maps area at 1 : 10000. Layer of river network was processed in vector format and it shows the progress of streams. One of the inputs was the geological map, where each type of rock has been assigned to their conductivity and porosity. These attributes has helped with the linear Boussinesq methods to better transform of the basic runoff. This method is not empirically derived, but it has a physical basis. Unification parameter maps of soil

types and land cover maps we obtain values of curve numbers (CN). This method was developed to calculate the characteristics of the surface runoff, in the absence of direct observation. Classes of the CORINE Land Cover were transformed into the categories of land use, which uses the methodology of curve numbers (CN). In the field research we are added transverse profiles of the river section and also we are detected the Manning's coefficients. The model area was catchment of the river Blatina, which stems from the Little Carpathians and passes through the urban area of the city Pezinok. Our model was calibrated using a rainfall-runoff event from June, 2009. The result of the modeling were create the hydrograph on the point where it is not observation station of the Slovak Hydrometeorologic Institute, in place of the river Blatina mouth to the Šúr channel. The second result was the modeling of same rainfall events, but after deforestation in the investigated territory. On the station of Slovak Hydrometeorologic Institute model predicted to 3-fold increase in peak flow. A comparison of the time of culmination hydrograph at the station and at the point of estuaries was possible to calculate the velocity of the water in the riverbed. The rainfall-runoff models can be a promising tool that is readily available in integrated river basin management and planning of the land use. However, It should be aware of the limits, restrictions and problems that when interpreting the results can occur. Results of the rainfall-runoff modeling can be implemented in the hydraulic models that can predict the place of inundation.

1 Úvod

Predmetom tejto štúdie bolo modelovanie možných zmien odtoku zo zrážok v povodí vplyvom zmeny krajinej pokrývky. Pre nedostatok priamych pozorovaní bola na výpočet charakteristík povrchového odtoku použitá metóda čísiel odtokových kriviek (SCS-CN). V záujmovom území prebehlo fiktívne odlesnenie krajiny. Triedy CORINE Land Cover 4. úrovne - les so zápojom, les bez zápoja a kroviny a lesné mladiny sme nahradili triedami trávnatých porastov a pasienkov s rôznymi charakteristikami pôdneho krytu. Simulovaná bola zmena krajinej pokrývky pri konkrétnej zrážkovo-odtokovej udalosti z júna 2009. Modelovým územím bolo povodie toku Blatina, ktorá pramení v Malých Karpatoch a preteká intravilánom mesta Pezinok.

2 Zrážkovo-odtokový model HEC-HMS

Model HEC-HMS je navrhnutý tak, aby simulovali zrážkovo-odtokové procesy v povodí. Je možné ho použiť v rôznych geografických oblastiach, k simulácii odtoku vo veľkých ale aj v malých, urbanizovaných alebo prírodných povodiach. Samozrejme v značnej miere sa využíva pri štúdiu a výskume povodňových oblastí.

Tento program predstavuje softvérový produkt hydrologického centra inžinierov americkej armády (HEC-USACE – Hydrologic Engineering Centre - U.S. Army Corps of Engineers). Bol vyvíjaný od roku 1992 a disponuje grafickým užívateľským rozhraním s implementáciou pokročilých metód pre hydrologickú a hydraulickú transformáciu zrážkovo-odtokového procesu. Program je zdarma prístupný a voľne stiahnuteľný.

Medzi najväčšie výhody modelu patrí:

1. cena – program je k dispozícii zadarmo (freeware),
2. vhodné metódy hydraulikkej a hydrologickej transformácie,
3. možnosť predspracovať vstupné údaje, GIS preprocessing (HEC-GeoHMS),
4. správa časových údajov (HEC-DSSVue, import z ASCII, MS Excel a pod.),
5. ponúka semidistribúované, ale aj distribuované riešenia,
6. možnosť manuálnej, poloautomatickej a aj automatickej kalibrácie modelu,
7. export do HEC-RAS, MIKE SHE, MIKE21.

3 Terénny výskum

Predbežná rekognoskácia a následný terénny výskum prebiehal na jeseň roku 2015 a niektoré dodatočné merania boli vykonané aj na jar roku 2016. Pri prvotnom vytváraní zrážkovo-odtokového modelu programom HEC-HMS, boli vygenerované body sútokov jednotlivých vodných tokov. Pod týmito bodmi boli odmerané 8-bodové priečne profily pre každý jeden riečny úsek. Takto bolo odmeraných 27 priečných profilov v celom povodí.

Priamo v teréne prebiehalo, okrem meraní, aj zisťovanie určitých vlastností koryta a jeho priľahlých častí. Zisťovanými vlastnosťami boli typ koryta (umelé alebo prirodzené, rovné alebo kľukaté, s priehlbunami a plytčinami...) a druh vegetácie (stromy, vysoká alebo nízka tráva, kry, burina...). Na základe týchto kritérií boli územia, pravému a ľavému brehu koryta pridelené hodnoty Manningových koeficientov. Tento koeficient vyjadruje empirickú závislosť rýchlosti prúdenia vody od drsnosti koryta. Pri určovaní hodnoty Manningových koeficientov sme vychádzali z práce US ARMY CORPS OF ENGINEERS (2000).

4 Výber modelového územia a tvorba databázy modelu HEC-HMS

Modelové územie povodia Blatiny sa nachádza na rozhraní dvoch odlišných prírodných krajinných celkov. Malá časť na juhu sa nachádza v Podunajskej nížine s mierne zvlneným povrchom. Severná časť územia patrí do geomorfologického celku Malých Karpát. Rozdielnosť týchto prírodných prostredí je podmienená geologickými a geomorfologickými črtami. Osobitný ráz týchto celkov podmienil aj ostatné vlastnosti prírodného prostredia, ako je podnebie, vodstvo, pôdy, vegetácia a živočíšstvo. Týmto podmienkam sa prispôbil aj človek a jeho využívanie krajiny. Pre výber tohto územia bolo podstatné, že sa nachádza neďaleko Bratislavy, čo výrazne zjednodušilo logistiku pri terénnom výskume.

4.1 Digitálny modelu reliéfu, riečna sieť a sklon reliéfu

Základným vstupným údajom bol digitálny model reliéfu (obr. 1) vytvorený z vrstevníc zdigitalizovanej vrstevnicovej mapy územia v mierke 1 : 10 000. Digitálny model bol vytvorený v programe ArcGIS 10.3 nástrojom TopoToRaster. Vrstva riečnej siete bola spracovaná vo vektorovej forme a zobrazuje priebeh vodných tokov. Táto sieť bola prebraná zo základnej bázy údajov pre geografický informačný systém. Pomocou hydrologicky orientovanej extenzie Arc Hydro Tools boli vykonané úpravy riečnej siete a digitálneho modelu, čím sme získali hydrologicky korektný, prietochný model reliéfu. Pre model HEC-HMS bolo nevyhnutné vytvoriť rastrovú vrstvu sklonov (obr. 2).

4.2 Geologická stavba a pôdne druhy

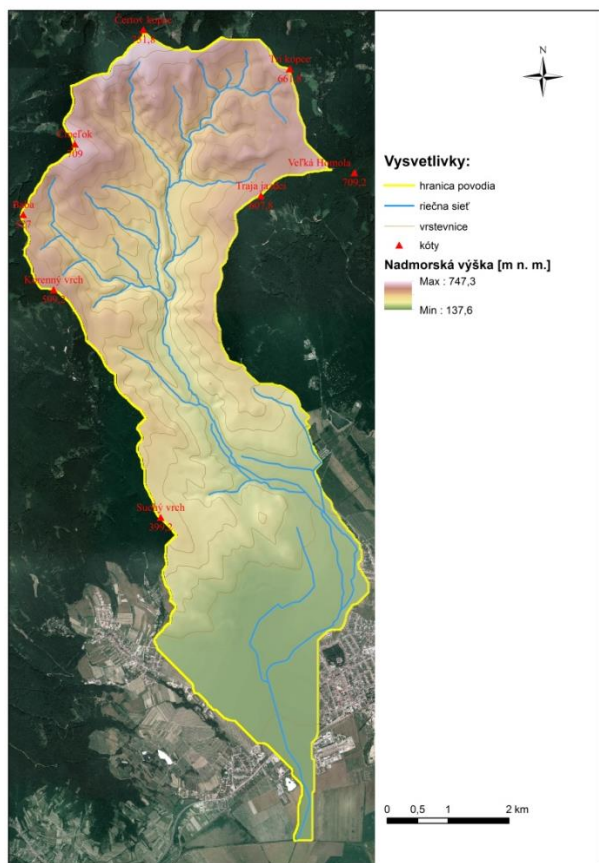
Vytvorenie mapy geologickej stavby (obr. 3) bolo nevyhnutné pre metódu transformácie základného odtoku. V programe HEC-HMS bola využitá nelineárna Boussinesqova metóda (nonlinear Boussinesq). Táto metóda nie je empiricky odvodená, ale má fyzikálny základ. Vstupnými parametrami boli priemerná dĺžka svahu, konduktivita v mm.hod^{-1} a pórovitosť hornín geologického podložia. Konduktivitu a pórovitosť sme určili pre každý typ hornín na základe práce Bear (1972).

Mapa pôdných druhov (obr. 4) bola spracovaná vektorizáciou pôdnej mapy zo stránky informačného servisu VÚPOP a z WMS vrstvy lesných pôd, ktorá je voľne dostupná na internetovej stránke Forest portálu. Pre potreby modelovania metódou CN kriviek bolo potrebné rozdeliť pôdy do 4 skupín (A,B,C,D). Tie skupiny boli vyčlenené podľa Antala (1999) na základe práce Ven Te Chow (1964), ktorí rozlišoval rôznu infiltračnú schopnosť jednotlivých pôd.

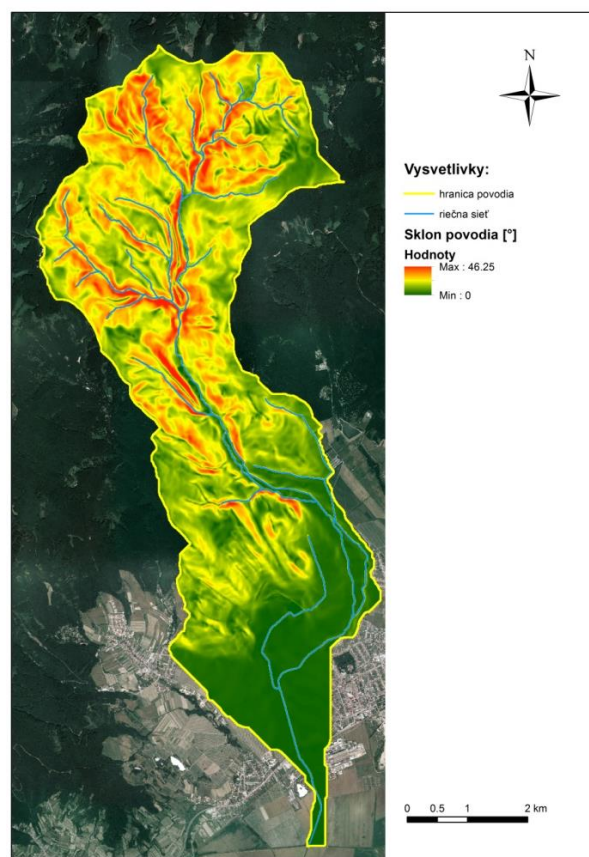
4.3 Využitie krajiny (CORINE Land Cover) a transformácia tried CORINE Land Cover

Podkladovou mapou k vytvoreniu areálov s rôznym využitím krajiny bola ortofotomapa. Mapu (obr. 5) sme vytvorili vektorizáciou WMS vrstvy spomínanej ortofotomapy z národného geoportálu Slovenskej agentúry životného prostredia. Na rozdelenie jednotlivých tried sme využili prácu Druga, Falt'an, Herichová (2015), kde autori navrhli modifikácie metodiky CORINE Land Cover 4. úrovne. Po vypracovaní mapy CLC 4. úrovne, sme transformovali kategórie krajinej pokrývky metodiky CLC na skupiny využitia pôdy podľa metodiky CN kriviek. (Tab. 1).

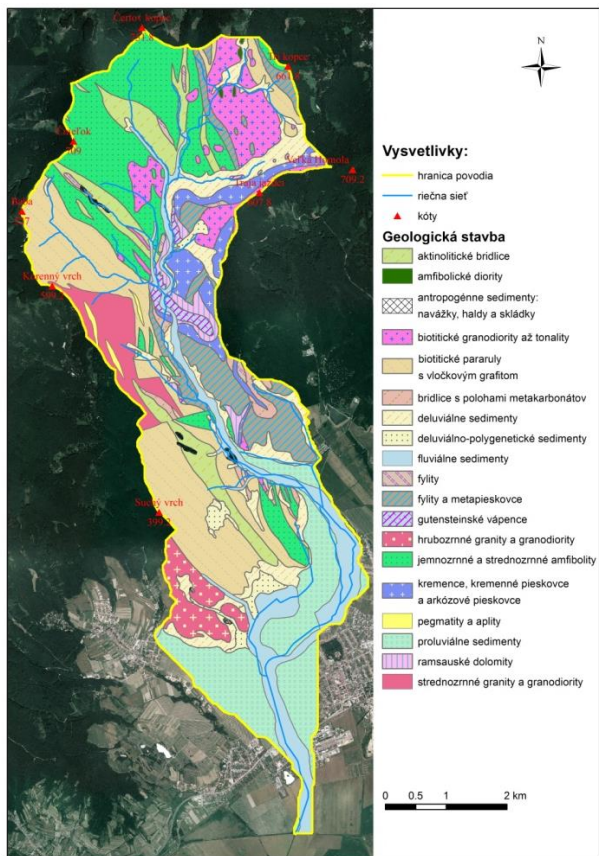
Princíp metódy CN kriviek spočíva v zjednotení parametrov hydrologických vlastností pôd v povodí, hydrologických charakteristík jednotlivých spôsobov obrábania pôdy a indexu predchádzajúcich zrážok (IPZ). Zjednotenie týchto parametrov slúži k jednoduchému výpočtu odtokovej straty pri zrážkovo-odtokovej udalosti v malých povodiach. Výhodou tejto metódy je možnosť rastrovej reprezentácie hodnôt CN pre plne distribuované riešenie modelu. Hodnoty čísiel CN kriviek pre IPZ = 2 boli získané z práce Ven Te Chow (1964) (Tab. 2). Číslo CN krivky môže nadobudnúť hodnoty od 0 do 100. Hodnota 0 znamená, že všetka zrážková voda, ktorá dopadne do povodia, vsiakne. Pri hodnote 100 všetka zrážková voda povrchovo odtečie.



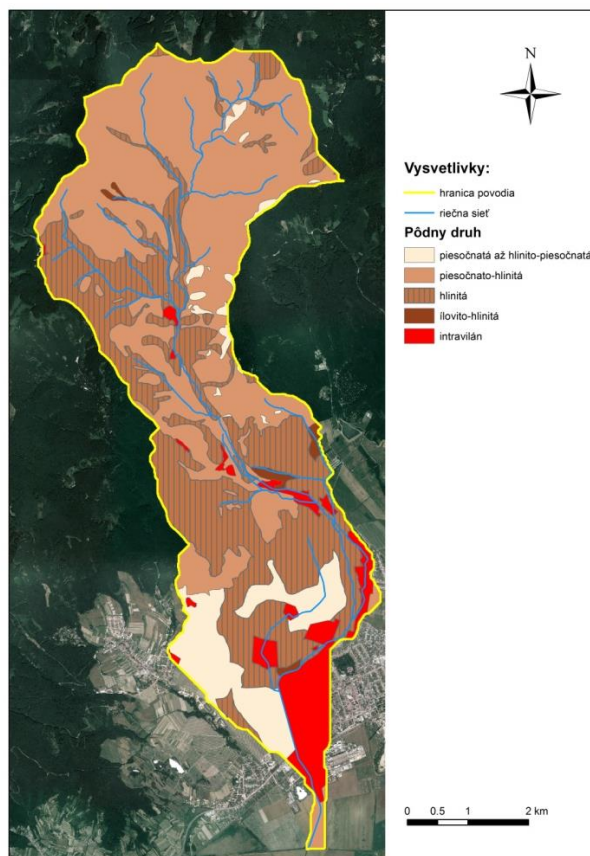
Obr. 1 Digitálny model reliéfu



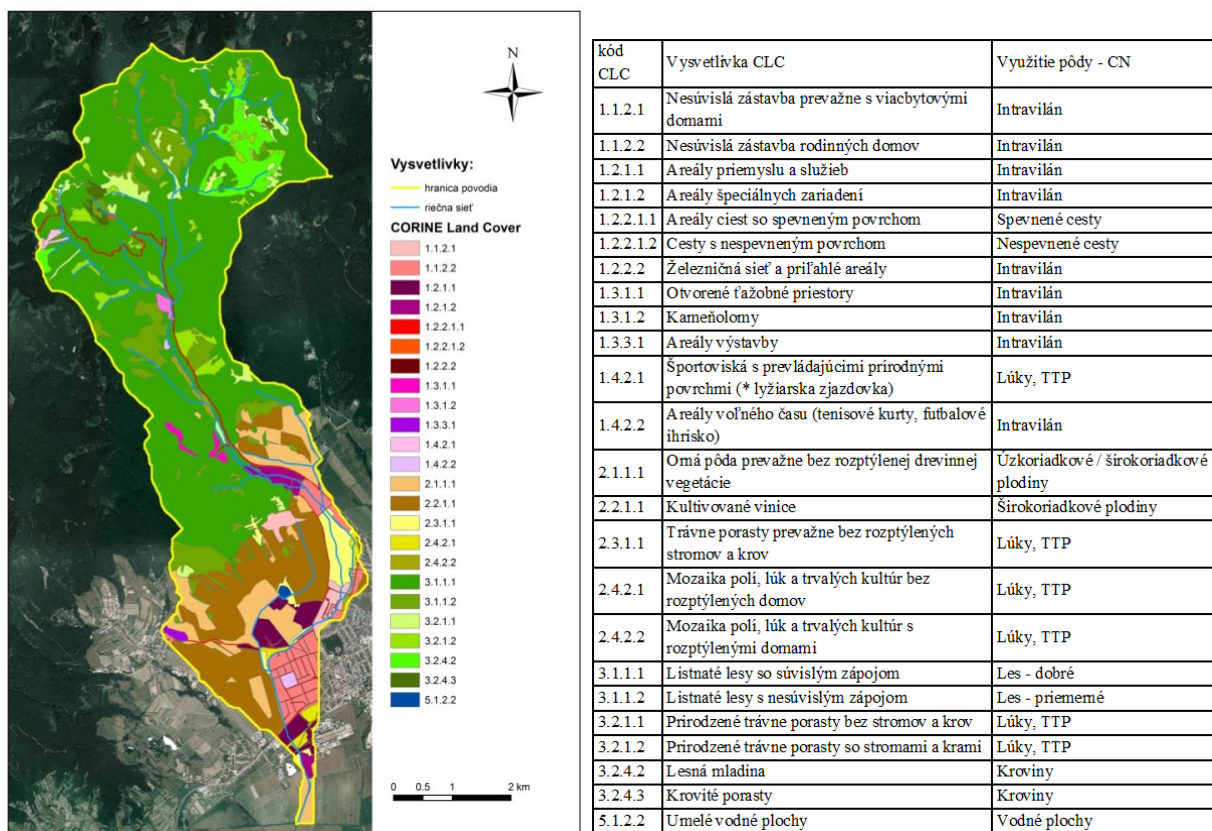
Obr. 2 Sklon reliéfu



Obr. 3 Geologická stavba



Obr. 4 Pôdne druhy



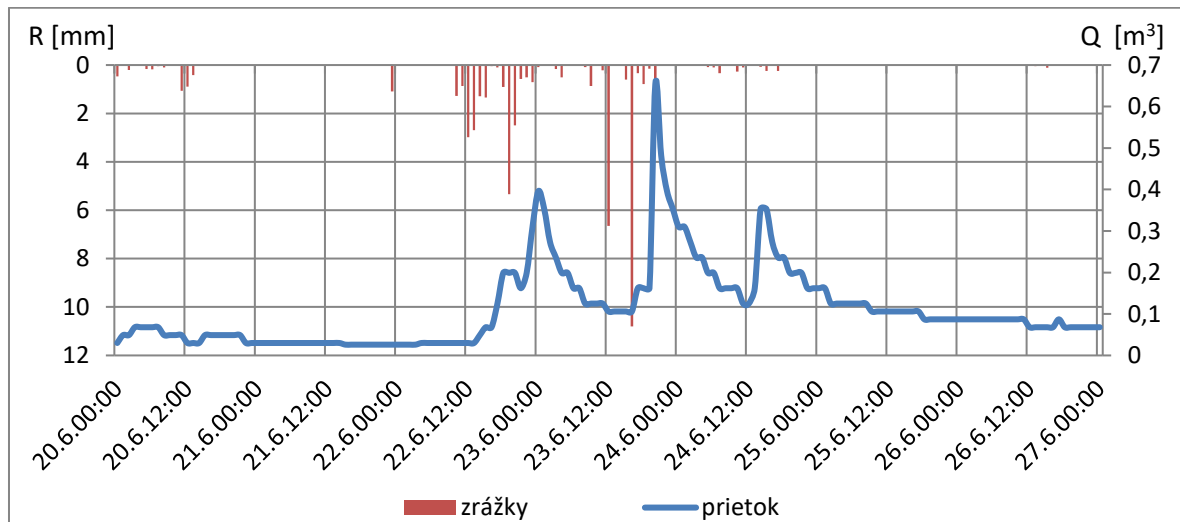
Obr. 5 Využitie krajiny a Tab. 1 Transformácia tried CLC na kategórie využívania pôdy

Využívanie pôdy	Hydrologické charakteristiky					
	obrábania pôdy	pôdneho krytu	vlastnosti pôdy			
			A	B	C	D
širokoriadkové plodiny	v priamych riadkoch	zlé	72	81	88	91
	v priamych riadkoch	dobré	67	78	85	89
	po vrstevnici	zlé	70	79	84	88
	po vrstevnici	dobré	65	75	82	86
úzkoriadkové plodiny	v priamych riadkoch	zlé	65	76	84	88
	v priamych riadkoch	dobré	63	75	83	87
	po vrstevnici	zlé	63	74	82	85
	po vrstevnici	dobré	61	73	81	84
lúky a TTP		dobré	30	58	71	78
les		zlé	45	66	77	83
		priemerné	36	60	73	79
		dobré	25	55	70	77
intravilán		nedefinované	59	74	82	86
nespevnené cesty			72	82	87	89
spevnené cesty			74	84	90	92
kroviny s pokryvom	< 50 %		48	67	77	83
	50 % - 70 %		35	56	70	77
	> 70 %		30	48	65	73
vodné plochy			94	94	94	94

Tab. 2 Priemerné hodnoty CN kriviek pre IPZ=2; Zdroj: Ven Te Chow 1964 (upravené)

4.4 Klimaticko-hydrologické údaje

Najdôležitejšími vstupnými údajmi pre kalibráciu a validáciu zrážkovo-odtokového modelu a následnú simuláciu boli údaje o zrážkach a prietoku. Tieto údaje nám boli poskytnuté od SHMÚ. Graf (obr. 6), vychádzajúci z týchto údajov, sme spracovali v prostredí tabuľkového procesoru MS Excel.



Obr. 6 Graf zrážok a hydrogram prietoku z júna 2009

5 Kalibrácia a validácia modelu

Žiadny model nie je schopný univerzálne modelovať ľubovoľnú zrážkovo-odtokovú udalosť. Vyplýva to z faktu, že v našich podmienkach vykazujú reálne povodia značnú sezónnu variabilitu hydrologických a fyzickogeografických podmienok. Príkladmi môžu byť rôzne parametre vegetačného krytu, veľkosť výparu, nasýtenie pôdy, množstvo predchádzajúcich zrážok a iné. Z tohto dôvodu je nutné upraviť parametre alebo transformačné funkcie tak, aby sa pre aktuálne riešenie zrážkovo-odtokovú udalosť výsledky modelovania čo najdôveryhodnejšie podobali realite.

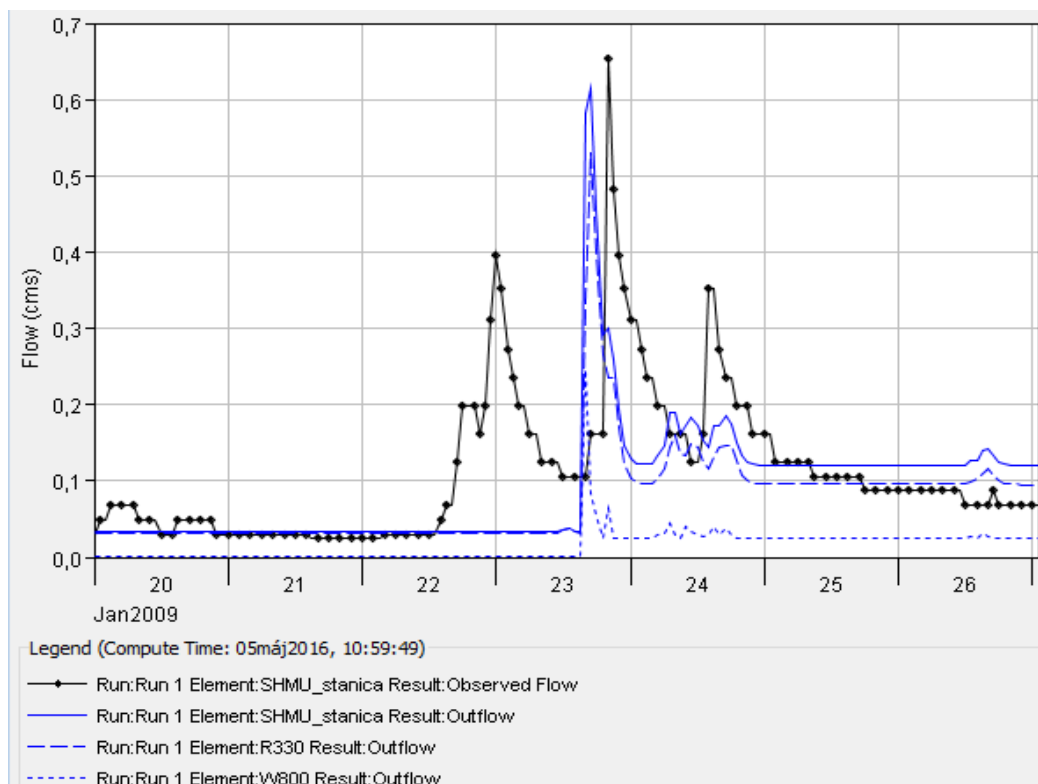
Kalibrácia modelu tak predstavuje určenie závislosti medzi fyzickogeografickými vlastnosťami prostredia, hydrologických procesov a parametrami modelu. Kalibrácia je teda proces modifikácie hodnôt relevantných parametrov, ktorej účelom je dopracovať sa k čo najlepšej zhode medzi simulovanými a pozorovanými premennými (Beven, 2012).

Manuálna metóda (pokus - omyl) je síce časovo náročná a má na ňu vplyv subjektívna chyba, ale dosiahli sme pri nej lepšiu zhodu ako pri automatickej metóde kalibrácie. V rámci kalibrácie sme sa snažili čo najviac zosúladiť kulminačný prietok povodňovej vlny a tvar klesajúcej čiary prietokovej vlny. Pri manuálnej metóde je možné meniť hodnoty CN kriviek, Mannigových koeficientov drsnosti, index predchádzajúceho zavlaženia, alebo stanoviť rôzne metodiky pohybu vody v koryte, straty vody v povodí, metódy hydraulické a hydrologickej transformácie prietokovej vlny a základného odtoku.

Ak chceme model využívať na prediktívne účely, tak by mal prejsť aj procesmi verifikácie a validácie. Verifikácia je chápaná ako kontrola, či je výsledný model vytvorený správnym spôsobom,

teda či boli teoretické princípy a algoritmy implementované v súlade s logickými princípmi. Validácia je vyšší stupeň kontroly. Pri tejto kontrole sa zisťuje zhoda modelu pri modelovaní inej zrážkovo-odtokovej situácie.

Pri výslednej kalibrácii (obr. 7) bol nameraný kulminálny prietok $0,654 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Simulovaný kulminálny prietok dosiahol úroveň $0,615 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Od nameraného prietoku sa teda líšil o -5,9 %. Priemerná absolútna chyba prietoku bola $0,059 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a štandardná odchýlka (RMS error) bola $0,103 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Toto boli najnižšie hodnoty, aké sa nám podarilo získať manuálnou kalibráciou zrážkovo-odtokového modelu. Celkový objem simulovaného odtoku v povodí bol $55\,300 \text{ m}^3$, zatiaľ čo reálny odtok predstavoval $68\,300 \text{ m}^3$. Tento nepomer je spôsobený tým, že sa nám nepodarilo zachytiť prvú vlnu. Pri iných nastaveniach parametrov kalibrácie sme prvú odtokovú vlnu síce zachytili, ale kulminálny prietok druhej vlny bol extrémne nadhodnotený. Pri výslednej kalibrácii model z prvej zrážkovej udalosti iba nasycoval povodie a modeloval až druhú vlnu.



Obr.7 Výsledná kalibrácia modelu

Validácia modelu prebehla na zrážkovo-odtokovej udalosti z marca roku 2006.

6 Zmena krajiny pokrývky - odlesnenie územia

Hlavným cieľom práce bolo modelovať zrážkovo-odtokové procesy po zmene krajiny štruktúry. Typickou zmenou krajiny štruktúry, najmä pre horské povodia, je jej odlesnenie. Lesné spoločenstvá môžu byť v pomerne krátkej dobe nahradené inými triedami krajiny pokrývky. Táto

zmena môže byť spôsobená ľudskou činnosťou, alebo aj prírodnými procesmi ako sú veterné smršte alebo lavíny.

Nami vymyslenú, fiktívnu zmenu krajinej pokrývky, a teda jej vplyv na odtok v krajine, sme modelovali pomocou zmeny čísiel CN kriviek. Keďže CN krivky sú závislé aj od vlastností pôdy, zmena čísla CN bola vždy len v rámci kategórií daného pôdneho druhu.

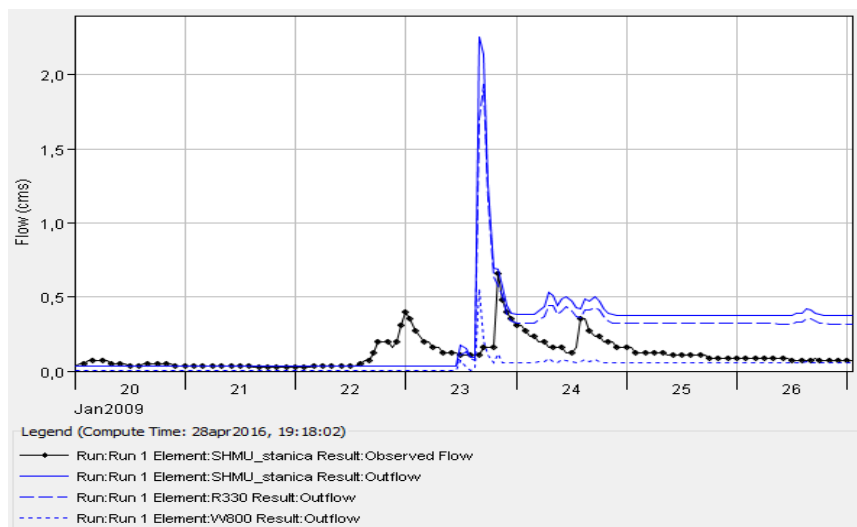
Les so zápojom, čiže s dobrými charakteristikami pôdneho krytu sme transformovali na pasienky s dobrými charakteristikami pôdneho krytu. Les bez zápoja, čiže s priemernými charakteristikami pôdneho krytu, krovinu a lesnú mladinu sme zmenili na pasienky s priemernými charakteristikami pôdneho krytu.

Po zvýšení hodnôt CN kriviek, sme dané čísla v programe ArcGIS 10.3 prepočítali vzhľadom ku sklonu povodia, vypočítali sme dobu oneskorenia a exportovali sme tieto údaje do HEC-HMS, kde sme namodelovali prietok po zmene krajinej štruktúry.

7 Zhodnotenie výsledkov a závery

Softvér HEC-HMS ponúka, okrem možnosti modelovania zrážkovo-odtokových vzťahov vplyvom zmeny krajinej pokrývky, aj simuláciu veľkosti a časového priebehu prietoku v akomkoľvek bode na toku. V mieste ústia Blatiny do Šúrskeho kanálu mal simulovaný kulminačný prietok veľkosť $5,685 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, čo je viac ako 9-násobok prietoku na hydrologickej stanici. Celkový objem odtoku bol $312\,500 \text{ m}^3$. Pri použití minútového kroku simulácie nastala kulminácia na hydrologickej stanici 23. júna o 16:45 a pri ústí toku prietok kulminoval o 17:04. Vzdialenosť meraná po vodnom toku medzi stanicou a koncovým bodom povodia je $9\,311 \text{ m}$. Z toho sa dá veľmi jednoducho odvodiť rýchlosť prúdenia vody v koryte, ktorá bola $29,4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, resp. $8,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Simuláciou odtoku vody z fiktívne odlesneného povodia, sme namodelovali prietokovú vlnu na stanici SHMÚ (obr. 8). Jej objem sa zväčšil z $55\,300 \text{ m}^3$ na $147\,000 \text{ m}^3$, čo je nárast o 165,8 %. Kulminačný prietok dosiahol $2,252 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a bol tak o 266,2 % väčší ako v pôvodnej krajine.



Obr. 8 Hydrogram prietokovej vlny na stanici SHMÚ po odlesnení povodia

Zmena krajinej pokrývky sa pochopiteľne odrazila aj v záverečnom profile povodia. Vodná hladina pôvodne kulminovala na hodnote $5,685 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, no simulovaný prietok pre odlesnenú krajinu bol $7,960 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Tento rozdiel predstavuje nárast o 40 % oproti pôvodnému stavu. Percentuálny nárast prietoku na vodomernej stanici bol až 266 %. Tento nepomer je spôsobený tým, že takmer 100 % územia nad stanicou SHMÚ bolo odlesnených, ale len štvrtina povodia pod stanicou prešla zmenou krajinej pokrývky. Celkový objem vlny z tejto zrážkovo-odtokovej udalosti sa zmenil z $312\,500 \text{ m}^3$ na $465\,400 \text{ m}^3$. Táto zmena predstavuje nárast o 48,93 %. Všetky charakteristiky sú zobrazené v prehľadnej tabuľke (tab. 3).

Tab. 3 Porovnanie prietoku a objemu vody pred a po odlesnení územia

	bez zmeny krajinej pokrývky		po zmenou krajinej pokrývky	
	prietok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	objem [m^3]	prietok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	objem [m^3]
Stanica SHMÚ	0,615	55 300	2,252	147 000
Ústie Blatiny	5,685	312 500	7,960	465 400

Zrážkovo-odtokové modely môžu byť perspektívnym nástrojom, ktorý je dobre využiteľný v integrovanom manažmente povodí a pri plánovaní krajiny a jej využitia. Je však potrebné uvedomovať si limity, obmedzenia a problémy, ktoré sa pri interpretácii výsledkov môžu vyskytnúť. Model je stále len schematické znázornenie reálneho systému, ktorého parametre sa nastavujú podľa zhody s reálnymi prietokmi pri aktuálnom stave v určitom území. Závislosť zrážkovo-odtokových vzťahov od krajinej pokrývky môže byť poznačená značnou mierou neurčitosti. Na presnosť a dôveryhodnosť simulovaných prietokov vplyva kvalita vstupných údajov a parametrov povodia a jeho prírodného prostredia. Výsledky zrážkovo-odtokového modelovania je možné implementovať do hydraulických modelov, ktoré dokážu predikovať miesta inundácie vodného toku.

8 Literatúra

ANTAL, J. 1999. *Agrohydrologia*. Nitra: SPU, 1999, s. 82-96

BEAR, J. 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Publications. ISBN 0-486-65675-6.

BEVEN, K. J. 2012. *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. – 2. vyd. Chichester: Wiley-Blackwell. 488 s. ISBN 978-0-470-71459-1.

CHOW, V.T. 1964. *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1964.

DRUGA, M., Falťan, V., HERICHOVÁ, M., 2015. *Návrh modifikácie metodiky CORINE Land Cover pre účely mapovania historických zmien krajinej pokrývky na území Slovenska v mierke 1:10 000 – príkladová štúdia historického k.ú. Batizovce*. Geographia Cassoviensis, IX., Bratislava 17-34.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS., 2000: *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*: March 2010, CA : US Army Corps of Engineers, 2010. 155 p.