

HYDROLOGICKÝ MODEL ZALOŽENÝ NA CELULÁRNÍM AUTOMATU

Petr Brotánek

Institut geoinformatiky, Hornicko-geologická fakulta,
Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 17. Listopadu 15/2172,
708 33, Ostrava-Poruba, Česká republika
bro121@vsb.cz

Abstrakt. Předložená práce se zabývá vytvořením programové aplikace, která umožňuje matematicky modelovat hydrologický srážko-odtokový proces. Pro tento účel je využit nástroj známý jako celulární automat. V první části jsou vysvětleny relevantní pojmy a souvislosti z oblasti hydrologie, geoinformatiky, celulárních automatů a užitého programovacího jazyka. Další část popisuje přípravné práce a proces vývoje programové aplikace. Následuje popis vytvořené aplikace, nazvané HC-model. Vysvětleny jsou její možnosti práce se vstupními daty, nastavení simulace a způsoby vizualizace a exportu výsledků. V další části je vytvořená aplikace otestována na dvou praktických úlohách. V závěru práce jsou zhodnoceny dosažené výsledky a možnosti jejich dalšího využití.

Klíčová slova: srážko-odtokový model, celulární automat, digitální výškový model, C#.

Abstract. Cellular Automata Based Hydrological Model. This thesis deals with the process of creation of a software application enabling mathematical modeling of the hydrological rainfall-runoff process. In this respect, a tool called cellular automaton was used. The first part explains the relevant concepts in the field of hydrology, geoinformatics, cellular automata and applied programming language. The next part describes the preparatory work and the process of software application development. The following part includes description of the created application called the HC-model. There are explained the possibilities of work with input data, simulation settings, visualization methods and export of the results. In the next part, the application is tested in two practical cases. Finally, the achieved results and their further possible use are evaluated.

Keywords: rainfall-runoff model, cellular automaton, digital elevation model, C#.

1 Úvod

Hydrologické modelování je obsáhlá problematika. Rozpracována je v právě dokončované knize [2], která se zabývá především modelování srážko-odtokových (s-o) vztahů. Hydrologie zkoumá děje natolik komplexní, že jejich modelování přináší mnohá úskalí. Dobře fungují modely řešící konkrétní problém v konkrétní oblasti. Základním nedostatkem obecnějších modelů bývají vstupní data, jejichž kvalita degraduje výsledky. Postup modelování obvykle zahrnuje proces schematizace,

jistého účelného zjednodušení problému. Takovýmto absolutním schématem ve dvourozměrném prostoru může být síť pravidelných čtvercových buněk, čehož využívá tato práce. Na takto schematizované území pak lze uplatnit celulární automaty (CA), což je nástroj pro numerické modelování. CA umožňují modelovat poměrně komplexní systém užitím jednoduchých lokálních pravidel. CA se věnuje např. [1].

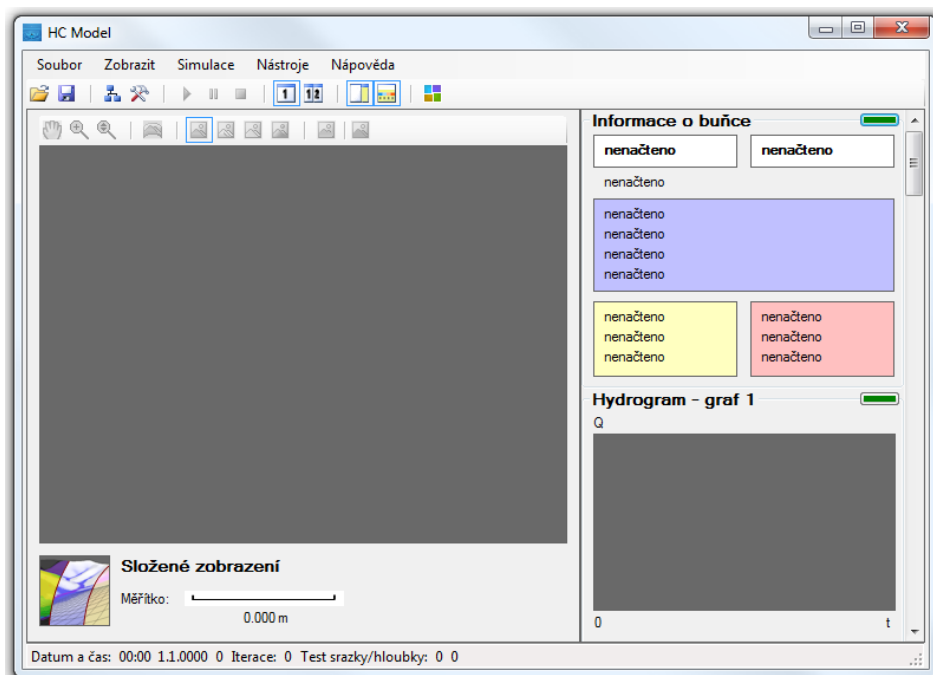
2 Aplikace HC-Model

Hlavní náplní práce byl vývoj aplikace finálně nazvané HC-Model (hydrologický celulární model). Jedná se o s-o distribuovaný hydrologický model, který je založen na principech celulárních automatů. Aplikace byla naprogramována v jazyce C# užitím vývojového nástroje Microsoft Visual Studio 2008.

2.1 Základy práce s aplikací a daty

Aplikace HC-Model pracuje na vstupu a výstupu převážně s daty v prostém textovém formátu. Výjimku tvoří grafické výstupy ukládané ve formátu PNG.

Po spuštění aplikace se zobrazí hlavní formulář (Obr. 1).



Obr. 1. Hlavní formulář aplikace HC-model

V horní části formuláře je podle obvyklých zvyklostí umístěna hlavní nabídka a nástrojová lišta. Oblast vyplňující převážnou část formuláře je hlavním oknem pro zobrazování. V jeho horní části je nástrojová lišta pro nastavení zobrazení, pod ní oblast šedivé barvy pro vykreslování a ve spodní části prostor pro legendu a měřítko. U pravého okraje formuláře se nachází pravý informativní panel. Informace doplňuje stavová lišta u dolního okraje formuláře.

Přes nabídku „Soubor / Otevřít projekt“ je možné otevírat uložené projekty. Otevřením projektu dojde nejprve k načtení parametrů ze souboru nastavení projektu a poté k načtení a zobrazení samotných dat.

Pomocí nabídky „Soubor / Uložit projekt“ je možné ukládat změny v otevřeném projektu, případně ukládat projekty nové.

2.2 Vstupní a výstupní rastry

Rastrová data tvoří velkou část vstupů i výstupů modelu. Jsou uložena v prostém textovém formátu se strukturou ESRI ASCII Grid. V těchto souborech mohou být uložena následující data:

- **DEM [m]** – digitální výškový model. Hodnotou je obvykle nadmořská výška, nebo jiná výška vztažená k horizontální rovině. Data DEM představují nutný základ pro výstavbu modelu. Na jejich základě je definována oblast modelování.
- **Pokryv** – vyjadřuje způsob krajinného pokrytí povrchu, který má vliv na rychlost stékání vody. Do výpočtů při simulaci pak vstupuje jako Manningův drsnostní součinitel v kontinuálním oboru hodnot od 0 do 1.
- **Výška povrchového odtoku [mm]** – povrchový odtok je jev tvořící základ modelu. Jedná se o dynamická data, do kterých se během každé iterace promítají změny vlivem hydrologické a hydraulické transformace. Aktuální výšku povrchového odtoku lze kdykoliv během simulace exportovat do textového souboru.
- **Půdní druhy** – poskytují vstupní parametry pro výpočet infiltrace metodou Green-Ampt. Na základě konverzní tabulky jsou při vstupu nominální hodnoty půdních druhů konvertovány na parametry hydraulické vodivosti a sacího vztlaku.
- **Půdní (relativní) vlhkost** – další vstupní data pro výpočet infiltrace. Hodnoty vyjadřují míru nasycení půdního profilu vodou (procenta v rozsahu 0-100) a při simulaci jsou přepočteny na deficit půdní vlhkosti. S rostoucí mírou nasycení klesá rychlost infiltrace.
- **Sněhová pokrývka [mm]** – hodnota výšky vodního sloupce. Reálná výška a hustota sněhové pokrývky do modelu nevstupuje. Tání sněhové pokrývky závisí na nastavení teplotního modelu.
- **Teplota povrchu [°C]** – použita pouze při experimentálním výpočtu tání sněhu. V jiných výpočtech nefiguruje. Vstupní rastr představuje počáteční hodnoty teploty povrchu terénu, které se v čase dynamicky mění.

2.3 Časové řady rastrů

Časové řady rastrů obsahují vstupní data, která jsou proměnlivá jak v čase, tak v prostoru. Model samotný nepočítá změny veličin, které do s-o procesu zasahují z vnějšku. Proto je potřeba explicitně dodat tato data. Struktura souboru vychází ze struktury rastrového souboru. Na začátku může být nepovinný popis. Následuje hlavička společná pro všechny rastrové záznamy v souboru. Dále jsou zde již matice buněk jednotlivých rastrů, uvedené vždy časovým údajem. Časové řady rastrů se týkají následujících dvou procesů:

- **Srážky** [$\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$] – aktuální intenzita srážek v daném okamžiku. Podle nastavení simulace se může jednat o srážky dešťové, smíšené, nebo sněhové.
- **Teplota vzduchu** [$^{\circ}\text{C}$] – aktuální teplota vzduchu rozšiřuje možnosti modelu o řešení přeměny skupenství vody. Evapotranspirace není uvažována.

2.4 Hydrogramy

Hydrogram je důležitým výstupem srážko-odtokového modelu. Podává informaci o vývoji průtoku daným profilem. Data o průtocích z profilů jsou základními vstupními daty do hydrodynamických modelů, nebo slouží přímo pro rozhodování při krizovém řízení. Aplikace HC-Model umožňuje v modelované oblasti vytvořit 9 profilů, ve kterých je počítán průtok. Každému profilu je potřeba nejprve přiřadit buňky. Průtokem profilu je pak povrchový odtok vody ven z takovéto skupiny buněk za čas [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]. Průtok profilem je možno vykreslovat do grafu (hydrogramu) ve zvoleném časovém intervalu, nebo zaznamenávat do souboru.

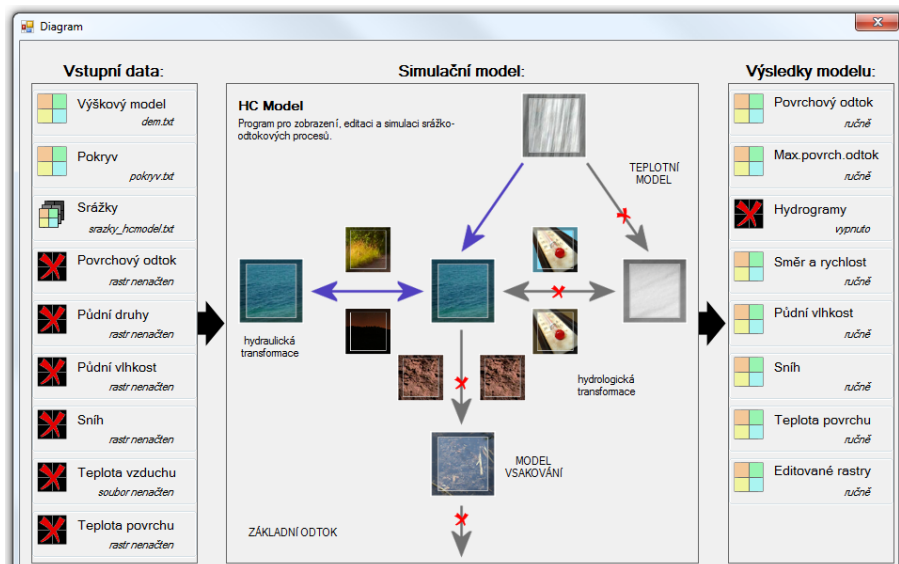
2.5 Propojení sousedících oblastí

V aplikaci HC-Model je zakomponována myšlenka propojení více prostorově na sebe navazujících dílčích oblastí. Ve skutečnosti se zde nejedná o zcela triviální problém a aplikované řešení má svá omezení. V současné verzi aplikace se nepředpokládá obousměrné propojení dvojice oblastí. Doporučeno je, aby simulace v jednotlivých oblastech probíhaly s dostatečným časovým rozestupem. Cílová oblast tak obdrží data od zdrojové včas.

2.6 Simulace

Za počítačovou simulaci lze označit automatizovaný proces modelování. Část simulace sahající v čase do budoucnosti se nazývá predikce (předpověď). HC-model je založen na CA. Při simulaci jsou v časových krocích vypočítávány lokální vlivy a změny působících faktorů.

Pro první seznámení s modelem simulace v aplikaci HC-model, ale i pro běžnou kontrolu nastavení, slouží formulář s diagramem (Obr. 2).



Obr. 2. Diagram simulačního modelu

Pro podrobné nastavení simulace je pak v aplikaci HC-model vyhrazen formulář (nazván Nastavení simulace), který je organizovaný do tematicky uspořádaných karet. Po pravé straně každé karty je nápověda popisující nastavované parametry.

Běh simulace se v aplikaci HC-model ovládá třemi ovládacími prvky na hlavním formuláři:

- Start – spustí novou simulaci, případně simulaci přerušenu
- Pauza – přeruší spuštěnou simulaci a zachová všechny její parametry
- Stop – ukončí simulaci a čas nastaví na hodnotu před jejím spuštěním

2.7 Vizualizace

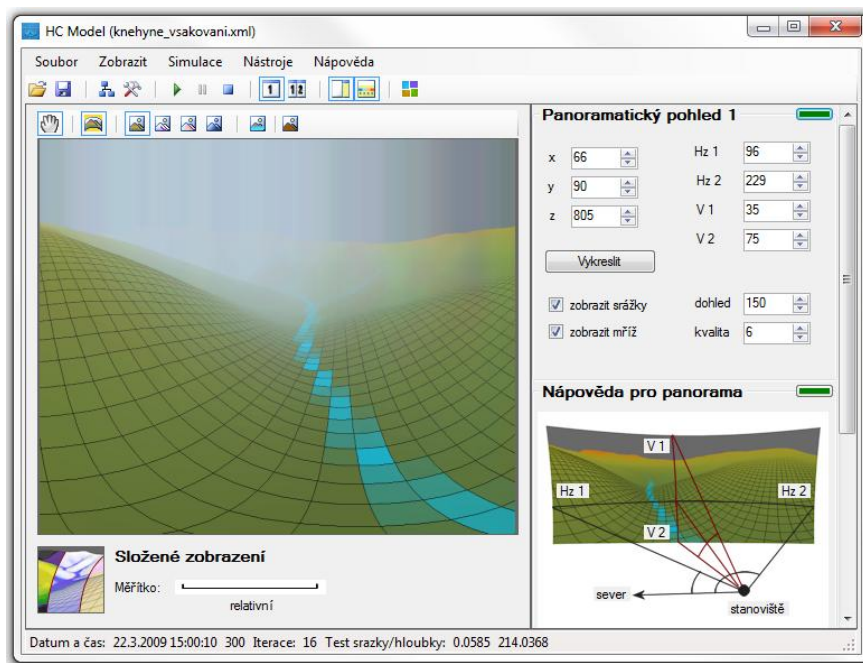
Vizualizace dat je důležitá pro jejich interpretaci. Aplikace HC-Model umožňuje použít dva níže popsané způsoby vykreslení dat. Uživatelské prostředí nabízí zároveň možnost nastavit, jak často bude zobrazení obnovováno.

Pro správnou interpretaci je nezbytnou součástí vizualizace legenda. Legenda v aplikaci HC-model popisuje především použité barevné stupnice.

Výsledky dosažené při vizualizaci v prostředí aplikace HC-model nelze označovat za mapu, která by respektovala všechny kartografické zásady. Grafické výstupy, které lze z aplikace exportovat, proto nejsou výstupy mapovými.

- Základní vizualizace – přirozený a jednoduchý způsob zobrazení dat uložených v pravidelné 2D čtvercové síti buněk. Území je vykresleno z půdorysného pohledu. Každý obrazový pixel představuje jednu buňku.

- Panoramatická vizualizace – vychází z určení místa pozorování a několika dalších parametrů. Samotné zobrazení se pak podobá reálnému pohledu. Koncept panoramatického zobrazení vychází ze zkušenosti s prací s geodetickými přístroji, které jsou často založeny na zaznamenávání horizontálních a vertikálních úhlů.



Obr. 3. Panoramatická vizualizace

2.8 Editace rastrových dat

Editace rastrových dat je při hydrologickém distribuovaném modelování častým úkonem. Potřeba editovat jednotlivé buňky může nastat již u rastru DEM. Chyba v rastru snadno způsobí nekorektní chování při povrchovém odtoku. Tomu je potřeba zabránit. Úprava reliéfu může být použita i pro testování vlivu změn v krajině na chování povodí. Stejně tak úprava srážkových dat, rastru krajinného pokryvu, nebo výšky povrchového odtoku může být nezbytná pro modelování. Výhodné je mít možnost takto upravovat data operativně v aplikaci pro modelování, protože to přináší značné časové úspory.

Aplikace HC-Model zahrnuje nástroj nazvaný editor rastrů. S jeho pomocí je možné vytvářet a editovat rastry, jejichž hodnoty představují jevy, se kterými model pracuje. Spuštěním editoru rastru se v pravém panelu zobrazí nabídka operací pro práci s rastrem. S editorem rastrů je možné pracovat při přípravě simulace, ale také za jejího běhu. Jako příklad lze uvést editaci výšky povrchového odtoku, kdy je možné testovat chování odtoku na vytvořeném rastru DEM bez dalších vstupních dat.

3 Testování aplikace

Aplikace HC-Model byla ozkoušena na dvou úlohách. V první úloze jsou stručně porovnány výsledky vytvořené aplikace HC-model s modelem SIMWE (součást Grass GIS). Druhá úloha podrobněji demonstuje užití aplikace HC-model na datech reálné s-o epizody v povodí Olše.

3.1 Porovnání výsledků simulací v aplikaci HC-Model a v modelu SIMWE

Aplikace HC-model a model SIMWE mají několik společných rysů. Především jsou to plně distribuované modely a v podstatě je lze testovat na shodné sadě dat (pouze formální rozdíly).

- **Testovací oblast Kněhyně** – jedná se o údolí Bystrého potoka na severním svahu Čertova mlýna v Moravskoslezských Beskydech. Rastr DEM tohoto území o rozloze 7.8 km² byl vytvořen s rozlišením 20 m. Rozměry rastru jsou 166x206 buněk. Rastr krajinného pokryvu byl vytvořen editorem rastrů a nemá vazbu na realitu. Stejně tak srážková data byla připravena uměle, pouze pro účely testování.
- **Nastavení simulace** – oba modely (HC-model a SIMWE) byly nastaveny tak, aby simulovaly pouze povrchový odtok. Na vstupu modely obdržely shodná srážková data, data DEM a krajinného pokryvu (Manningův koeficient). Simulováno bylo 2 hodiny dlouhé období.
- **Simulace v aplikaci HC-model** byla provedena třikrát (každá s jiným časovým krokem). Tímto byla prověřena stabilita výpočtu přesunu povrchového odtoku.
- **Simulace v modelu SIMWE** byla uskutečněna dvakrát (každá s jiným parametrem *hbeta*, který je v [2] popsán jako „*váhový koeficient pro vektor rychlosti toku vody v 2D*“).
- **Výsledky:**
 - Výsledky simulací v aplikaci HC-model, uskutečněné s časovým krokem 1 s a 10 s, jsou si velice podobné. Při simulaci s časovým krokem 60 s dochází k pomalejšímu přesunu povrchového odtoku. Tato skutečnost vyjadřuje jistou nestabilitu chování modelu při nastaveném delším časovém kroku, což pravděpodobně souvisí s prostorovým rozlišením buňky rastru. Proto je možno označit použitý poměr délky časového kroku k prostorovému rozlišení buňky (60 s : 20 m) za nevhodný.
 - Výsledky simulací v modelu SIMWE lze dobře řídit nastavením parametru *hbeta* (váhový koeficient pro vektor rychlosti). Jeho vyšší hodnota urychluje přesun povrchového odtoku k závěrnému profilu. Implicitně model SIMWE nabízí pro tento parametr hodnotu 0,50. Při

nastavení hodnoty na 0,85 se výsledky simulace v modelu SIMWE blíží výsledkům dosaženým v aplikaci HC-model.

3.2 Simulace s reálnými daty povodí Olše

Pro druhou úlohu testování byla vybrána oblast rozsáhlejší než v úloze předchozí. Také délka simulovaného období je v tomto případě delší. Hlavním rozdílem však je využití reálných hydrometeorologických dat.

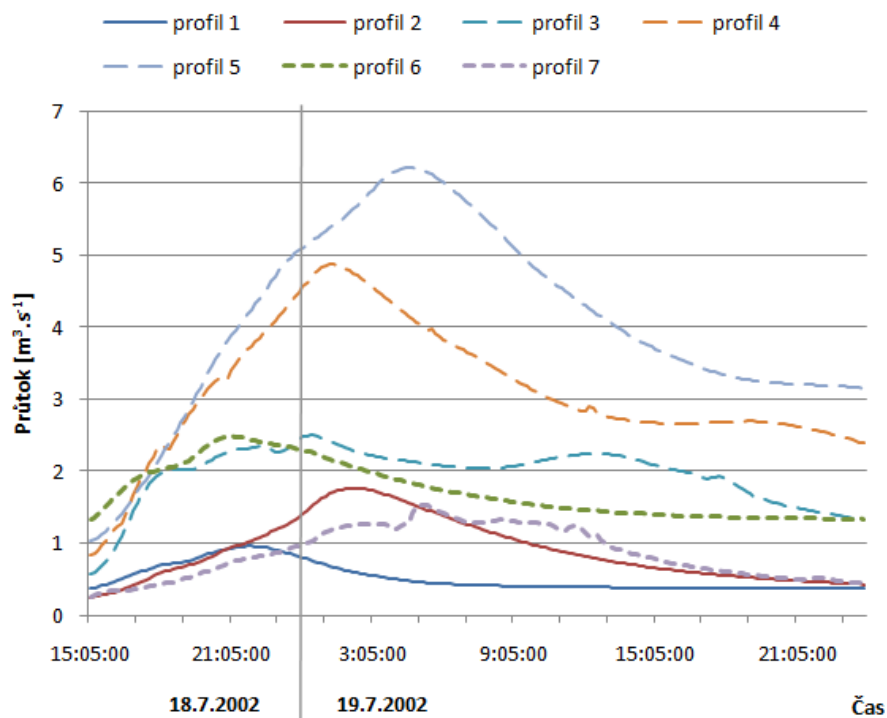
- **Vymezení oblasti Stonávka** – nachází se v Moravskoslezském kraji v povodí Olše (číslo povodí 2-03-03). Z většiny je modelovaná oblast částí povodí řeky Stonávky, která je významným levostranným přítokem řeky Olše. Řeka Stonávka oblastí protéká z jihu na sever. Pramení na severních svazích Moravskoslezských Beskyd a modelovanou oblast opouští u obce Albrechtice. V oblasti se na řece Stonávce nachází vodní nádrž Těrlicko.
- **Schematizace** – celá oblast byla pro potřeby modelování rozdělena na tři dílčí oblasti (Obr. 5). Tímto bylo dosaženo urychlení simulace a zároveň mohlo být prověřeno propojování oblastí, které aplikace HC-model nabízí. Pro model bylo zvoleno základní rozlišení 30 m. Každá dílčí oblast má 400x200 buněk. Nejprve byl pro každou dílčí oblast vytvořen rastr DEM. Následně rastry krajinného pokryvu a půdních druhů.
- **S-o epizoda 18.-19.7.2002** - v oblasti Stonávky došlo odpoledne dne 18.7.2002 k významné s-o události. Tato událost se stala předmětem modelování.
- **Zpracování vstupních hydrometeorologických dat** – hlavním vstupem do s-o modelu jsou srážky. Pro účely práce byly poskytnuty radarové odhady srážkových úhrnů (tzv. radarové sumace). Data jsou bodového charakteru pro vybrané hydrometeorologické stanice. Jedná se o záznamy s hodinovým intervalem. Pro interpolaci dat byla použita metoda inverzních vzdáleností (IDW) v aplikaci ESRI ArcGIS Desktop.
- **Příprava modelu vsakování** – na oblasti Stonávka byl vyzkoušen výpočet infiltrace metodou Green-Ampt, zahrnutý v aplikaci HC-model v modelu vsakování. Je zde nutné upozornit, že vstupní data pro tento výpočet jsou omezujícím faktorem kvality výsledků celé simulace. Hydraulická vodivost a sací vztlak půdy byly určeny na základě půdních druhů. Problémem bylo určení počáteční relativní půdní vlhkosti bez dalších vstupních dat. Přitom právě půdní vlhkost má výrazný vliv na výsledky simulace.
- **Nastavení a průběh simulace:**
 - časové období nastaveno na 18.7. 14:55 – 19.7. 23:55
 - časový krok simulace 60 [s]
 - model vsakování zapnut, ztráty v půdě nulové
 - teplotní model vypnut
 - simulace provedena postupně na všech dílčích oblastech
- **Časová náročnost provedených simulací** – simulováno bylo období dlouhé 33 hodin s časovým krokem 60 sekund. Dílčí oblasti se liší počtem využitých buněk rastru. Simulace proběhla na stolní počítačové sestavě s procesorem

AMD Athlon 64 X2 Dual Core 4400+ 2,3 GHz, operační paměť 2 GB na 32 bitovém operačním systému Windows 7 Professional.

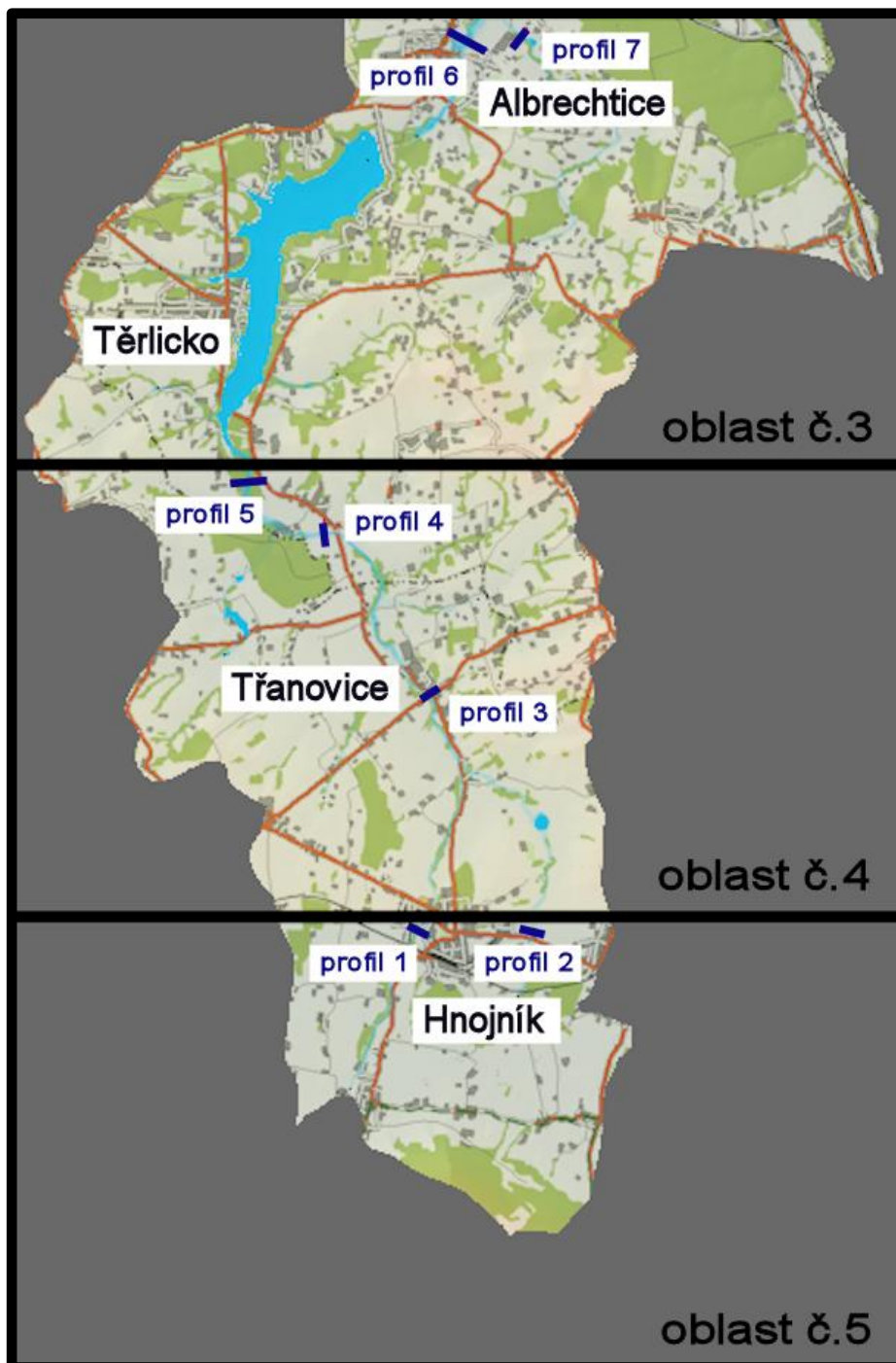
Tabulka 1. Délka simulace dílčích oblastí Stonávky

Dílčí simulovaná oblast	Počet buněk rastru (využito / celkem)	Délka simulace	Počet iterací za sekundu
oblast č.3	53339 / 80000	00:10:05	3,27
oblast č.4	37968 / 80000	00:06:45	4,89
oblast č.5	16362 / 80000	00:05:13	6,33

- **Výsledky simulace** – grafické znázornění průtoků sledovanými profily pomocí hydrogramu (Obr. 4). Tento poskytnutý výsledek není porovnatelný s reálným vývojem při sledované s-o epizodě. K takovému porovnání by bylo potřeba znát data o reálných průtocích, která nejsou ve sledované oblasti k dispozici. Výsledek nechť je brán pouze jako demonstrativní ukázka výstupu simulace.



Obr. 4. Hydrogram sledovaných profilů v oblasti Stonávka



Obr. 5. Přehled oblasti Stonávka, dílčích oblastí a sledovaných profilů

4 Závěr

Vytvořená programová aplikace a její testování, poskytují náhled na problematiku s-o hydrologického modelování. Práce přináší také částečně nový přístup s využitím celulárních automatů.

Zdrojový kód vytvořené aplikace a získané zkušenosti jsou využitelné při dalším vývoji. Vhodným prostředím pro další uplatnění je univerzitní půda. V současné době se předpokládá využití práce v rámci projektu Floreon [3], jehož náplní je vývoj nástrojů pro řešení krizových situací. Aplikace také může v budoucnu fungovat jako pomocný výukový prostředek. Nezbytné je však další ověření uplatněných postupů a testování.

Přímé využití vytvořené aplikace v hydrologické praxi je nepravděpodobné. Existuje řada modelovacích nástrojů, jejichž vývoj trvá již dlouhá léta a jež mají své pevné pozice.

Tato práce přináší transparentnost použitých metod. Mohla by poukázat na to, že mnohé dnes rozšířené modelovací nástroje ve své dokumentaci sice uvádějí výchozí použité vztahy, přesný způsob jejich implementace však není znám.

Reference

1. **BENENSON, Itzhak, TORRENS, Paul M.** *Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena*. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2004. str. 287. ISBN 0-470-84349-7.
2. **UNUCKA, Jan, et al.** *Modelování srážkoodtokových vztahů a praktické aspekty jeho využití*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010. str. 311. v tisku.
3. *Floreon : Nástroj pro řešení krizových situací*. [Online] VŠB-TU Ostrava, FEI, 2006. [Citace: 29. 4 2010.] <<http://www.floreonplus.eu/web/>>.