

ČASOPIS
STUDIA OECOLOGICA
Ročník VII
Číslo 2/2013

Redakční rada:

doc. Ing. Pavel Janoš, CSc. – šéfredaktor
Ing. Martin Neruda, Ph.D. – výkonný redaktor
prof. RNDr. Olga Kontrišová, CSc.
doc. RNDr. Juraj Lesný, Ph.D.
doc. MVDr. Pavel Novák, CSc.
Ing. Jan Popelka, Ph.D.
prof. Ing. Miloslav Šoch, CSc.

Technický redaktor:

Mgr. et Ing. Petr Novák

Recenzenti:

Vydává: FŽP UJEP v Ústí nad Labem
Tisk:

Toto číslo bylo dáno do tisku v prosinci 2013
ISSN 1802-212X
MK ČR E 17061

MOŽNOSTI VYUŽITÍ ODLIŠNÝCH HYDROLOGICKÝCH MODELŮ V ŘEŠENÍ SRÁŽKO-ODTOKOVÝCH EXTRÉMŮ NA MALÝCH POVODÍCH

POSSIBILITIES OF USAGE OF DIFFERENT HYDROLOGICAL MODELS IN THE RESEARCH OF RAINFALL-RUNOFF EXTREMES IN SMALL CATCHMENTS

Pavel KOVÁŘ¹, Darina VAŠŠOVÁ¹, Martin NERUDA², Roman NERUDA³,
Jan ŠREJBER⁴, Andrea JELÍNKOVÁ¹

¹Fakulta životního prostředí ČZU v Praze

²Fakulta životního prostředí UJEP v Ústí n.L.

³Ústav informatiky Akademie věd ČR

⁴Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ústí n.L.

Abstrakt

Častým úkolem reálných i scénářových prognóz inženýrské hydrologie je využití simulační techniky matematických modelů pro procesy na malých povodích. Tato povodí mívají často plochu do 35 km², jejich charakter bývá v horských a podhorských oblastech bystřinný (index bystřinnosti $K_B > 0,1$) a obvykle nejsou vybaveny limnigrafickým měřením. Škody, které působí v povodí, bývají enormní a rozsah těchto bystřin je asi 35 % (18 000 km) délky drobných vodních toků České republiky (Bělský, 1999).

Proto bylo vybráno experimentální povodí bystřiny Smědé (UP Bílý potok) v Jizerských horách jako modelové území pro simulace extrémních srážko-odtokových procesů dvou odlišných modelů. Pro vzájemné využití jsme vybrali k simulaci významných srážko-odtokových epizod fyzikálně založený hydrologický 2D model KINFIL a čistě matematický „učící se“ model aplikace neuronových sítí MANS. Neuronová síť je matematickým modelem nelineární funkční závislosti mezi vstupy a výstupy s volnými parametry (váhami), které se nastavují gradientním učícím algoritmem s mnoha iteracemi, během kterých se procházejí kalibrační data.

Abstract

Often task for real and scenario prognosis in engineering hydrology is usage of simulation techniques of mathematical models for processes in small catchments. These catchments have often area till 35 km², their character is subcritical in mountainous and sub mountainous areas (index of torrent $K_B > 0,1$) and often there is not a water stage gauge. Damages in their catchments are enormous and length of torrents is about 35 % (18 000 km) of the total length of small rivers in the Czech Republic (Bělský, 1999).

An experimental mountain catchment Smědá (profile “Bílý potok”) in “Jizerské hory” Mountains was chosen as model area for simulation of extreme rainfall.runoff processes of two different models. For evaluation and simulations of important rainfall runoff episodes we have chosen a physical based hydrological 2D model KINFIL and a mathematical “learning” model of application neural networks MANS. Neural network is a mathematical model of non linear functional dependence between inputs and outputs with free parameters (weights), which are made by gradient learning algorithms with much iteration, where calibrating data are run

Klíčová slova: KINFIL, povodí Smědé, neuronová síť, předpověď povodní

Key words: KINFIL, Smědá catchment, neural network, flood forecasting

Úvod

Rychlé katastrofické stavy způsobené extrémními srážko-odtokovými epizodami lze často pozorovat na malých bystřinných povodích, kde kolísání průtoků a splaveninového režimu může být enormní. Tak tomu je i na bystřinách Jizerských hor, kde povodí Smědé bylo vybráno jako případová studie tohoto příspěvku. Konvektivní srážky s vysokými intenzitami dopadající na relativně malou plochu povodí, jeho velký sklon i sklon nivelety toku, devastace koryta toku a jeho okolí erozí a sedimentací splavenin působí zpravidla velké škody (Kovář, Křovák, 2002).

Zlepšování metod předpovědi průtoků a stanovení objemů povodňových vln má nesporně velký význam pro ekonomiku i životní prostředí (Čamrová et al., 2006). Základním hydrologickým podkladem pro návrh opatření proti záplavám nebo erozi jsou návrhové hodnoty N-letých průtoků. V posledních desetiletích vzrostl význam použití matematických modelů srážko-odtokového procesu, založených na fyzikální podstatě infiltrace, vytváření povrchového odtoku a jeho pohyb po svahu a dále hydrografickou sítí. Předložená studie je příspěvkem k prověření možností určení návrhových průtoků na malých povodích modelem KINFIL (Kovář, 1992). Tento model vznikl kombinací metody odtokových křivek a řešení infiltrace Morel-Seytouxovými rovnicemi (Morel-Seytoux, Verdin, 1981). Simulace povrchového odtoku je řešena modelem kinematické vlny (Singh, 1996) při respektování podrobné topografie povodí. Topografické vlastnosti terénu jsou zpracovány softwarem ArcGIS. Spolehlivost těchto moderních metod matematického modelování a jejich propojení se systémy GIS je úměrná věrnosti matematického popisu fyzikálního procesu a rozsahu i spolehlivosti použitého datového souboru.

Druhým modelem je model neuronové sítě, která je tvořena z neuronů, kam proudí informace ve formě vzruchů. Učení neuronu je možno si zjednodušeně představit jako úpravy sítě tak, aby k excitaci docházelo při určitých kombinacích vstupních signálů (Rumelhart, McClelland, 1986). Počet neuronů a jejich vzájemné propojení v síti určuje topologii neuronové sítě. Podle využití rozlišujeme především vstupní, a výstupní neurony. Vstupní neurony odpovídají receptorům, výstupní neurony efektorům a propojené pracovní neurony mezi nimi tvoří příslušné dráhy, po kterých se šíří vlastní vzruchy (Lippmann, 1987). Tyto dráhy se v matematickém modelu nazývají cestami. Šíření a zpracování informace na cestě v síti je umožněno změnou stavů neuronů nacházejících se na této cestě. Stavů všech neuronů v síti určují tzv. stav neuronové sítě a synaptické váhy všech spojů představují tzv. konfiguraci neuronové sítě. Pro učení neuronové sítě se nejčastěji používá nelineární gradientní algoritmus největšího spádu a jeho vylepšení nazývané v tomto kontextu algoritmem zpětného šíření (Neruda et al., 2005). Předmětem výzkumu bylo vzájemné porovnání obou modelů, KINFIL a MANS, zjištění jejich předností a nedostatků včetně možností vzájemného uplatňování pozitivních zkušeností.

Metody a materiál

Popis povodí a mapové podklady povodí Smědé

Povodí Smědé leží v severní části Jizerských hor a od roku 1957 je vybaveno limnigrafem v uzavěrovém profilu Bílý Potok a postupně několika srážkoměrnými stanicemi v Hejnicích, Novém Městě pod Smrkem, Višňové a v Bílém Potoce. Toto povodí je svými významnými srážko-odtokovými epizodami častým zdrojem povodňových katastrof, které tento projekt zahrnuje do svých analýz. Tabulka 1 uvádí fyzikálně geometrické charakteristiky povodí k uzavěrovému profilu Bílý Potok.

Tab. 1: Fyzikálně geometrické charakteristiky povodí Smědé, UP Bílý Potok

Charakteristika	Jednotka	Hodnota
Plocha povodí	(km ²)	26,58
Délka údolnice	(km)	13,3
Sklon údolnice	(%)	6,9
Nadmořská výška	(m n. m.)	403–990
Střední šířka povodí	(km)	1,96
Sklon povodí (Herbst)	(%)	22,2

Tabulka 2 poskytuje základní hydrologické poměry povodí Smědé v podobě průměrných ročních úhrnů srážek a odtoků a N-letých průtoků.

Tab. 2: Hydrologické poměry povodí Smědé, uzávěrový profil Bílý Potok (ČHMÚ)

Povodí Smědé	Roční úhrny (mm)		N-leté průtoky (m ³ · s ⁻¹)						
	srážky	odtok	Q ₁	Q ₂	Q ₅	Q ₁₀	Q ₂₀	Q ₅₀	Q ₁₀₀
Bílý potok	1426	1116	21	33	54	74	97	132	162

Ve stručném přehledu uvádíme základní geologické, půdní, vegetační a hospodářské údaje této části Jizerských hor ve vztahu k důsledkům významných srážko-odtokových událostí. Z hlediska poškozování území zvýšeným povrchovým odtokem a následnými erozními procesy, pokládáme za důležité zdůraznit zejména následující údaje:

- Geologický podklad jizerského masivu tvoří biotická, hrubě zrnitá, nebo porfyrická žula, snadno podléhající zvětrávání a úlomkovitě se drobně na jemné frakce.
- Nejčastějším půdním druhem jsou mělké, lehké, hrubě zrnité hlinito-písčité půdy typu rašelinných horských podzolů, rašelinných půd, na příkrých svazích pak kamenné sutě.
- Nepříznivá struktura i textura půd a měkkost půdního profilu spolu s nedostatkem humusu umožňují snadnou erodovatelnost půd.
- Četnost a amplituda srážkových extrémů řadí Jizerské hory mezi nejexponovanější oblasti ve střeoevropském měřítku (nejvyšší krátkodobý úhrn 69 mm za 15 min, nejvyšší denní úhrn v r. 1877: 345 mm ve stanici Nová Louka – rekordní údaje v ČR).
- Značné sklony území (až 30–50 %) a délky svahů (400–1000 m) umožňují plošné eroze na výmolvou až stržovou formu.
- V Jizerských horách se vyskytují i tzv. mury, nazývané také hlinito-kamenné přivalové proudy nebo bloko-bahenní proudy. Je to rychlý pohyb horninových hmot ve viskózním stavu, kde jsou vedle jemnozrnného materiálu i úlomky a bloky skalního podloží. Způsobují změnu reliéfu a vznikají hlavně po intenzivních přivalových srážkách na svazích o sklonu minimálně 30°. Intenzivní srážky v srpnu 2010 na severních svazích Smědavské hory způsobily utržení několika zemních sesuvů.
- Účinky imisí, abiotických i biotických kalmit vyvolaly v 70. až 80. letech zvýšenou těžbu a negativní důsledky s ní související (rýhy po přibližování a odvozu dřevní hmoty). To vyvolává dříve neznámé formy „antropogenní eroze“ se zintenzivněním prioritních cest soustředěného povrchového odtoku, vytvářejících erozní rýhy nepravidelného profilu o šířce 3–4 m a hloubce i přes 1 m.
- Imisemi oslabené porosty byly pak méně odolné vůči biotickým škůdcům i abiotickým vlivům. Kalamitní přemnožení obaleče modřínového (1979) a kůrovce smrkového (1984) způsobilo následné škody na lesních porostech. Z abiotických činitelů je možno jmenovat pravidelné větrné smrště, působící polomy, v zimních obdobích sněhové polomy. Tyto škody se nejvýrazněji projeví na mělce kořenících smrkových monokulturách.

Porosty na povodí Smědé tvoří převážně smrky (80–90 %), dále buky a javory (až 15 %), na rašelině se vyskytuje kosodřevina a kleč, v mlazinách jsou roztroušeně bříza a jeřáb. Nová výsadba však intenzivně pokračuje, takže holiny, na kterých po odlesnění vyrůstaly bylinné porosty třtiny chloupkaté, jsou postupně osazovány. Druhovú skladbu dřevin je však jiná, odolnější vůči kalamitám, s lepší funkcí lesů protierozních a infiltračních.

V případě dešťových souborů srážko-odtokových epizod je pro použití simulace modelem KINFIL důležité správně určit hodnoty odtokových křivek „CurveNumbers“ CN (US SCS, 1992) pro nasycené předchozí vláhové podmínky (PVP II) jako výchozí hodnoty dalších parametrů (CN_A , CN_{VOL}) a následně hydraulickou vodivost K_s a sorptivitu S (při polní vodní kapacitě PVK). Hodnoty CN a tím i hodnoty potenciální retence vrchní aktivní půdní zóny jsou ovlivňovány hospodářským využitím pozemků, které jsou převážně zalesněné. Lesní hydrologické podmínky ovlivňují zejména intercepci, infiltraci a akumulaci vody v pokryvné vrstvě lesní půdy (humozní hrabanka). Podle hloubky hrabanky (HH od 0 do 15 cm) a třídy jeho ulehlosti (TU) se stanoví třída lesních hydrologických podmínek (TLHP). Pro tyto hodnoty TLHP byla podle hydrologických skupin půd odvozena průměrná čísla odtokových křivek CN.

Průměrná hodnota zastoupení zrn I. kategorie je 25–30 %, kde v třídě I (oglejené a rašelinné půdy – 3P-d) dosahuje hydraulická vodivost K_s hodnot do 10 mm hod^{-1} . Vzhledem ke třídě ulehlosti humusu TU = 1 (hl. do 5 cm) je možno zařadit zalesněný povrch povodí do třídy hydraulických podmínek TLHP = 2 a následné CN pro skupinu půd C, $CN_{II} = 79$, pro B – $CN_{II} = 69$.

Tab. 3: Zastoupení pozemků na povodí Smědé, UP Bílý Potok

Zastoupení	% plochy	HSP (hydrol. skupina půd)	Vážený průměr CN hodnot
Lesy	88	70 % C	$0,70 \cdot 79 = 55,3$
		18 % B	$0,18 \cdot 69 = 12,4$
Pastviny (holiny)	7	7 % C	$0,07 \cdot 79 = 5,5$
Orná půda	3	3 % B	$0,03 \cdot 79 = 2,4$
Zastavěno	2	2 % –	$0,02 \cdot 98 = 1,9$
CELKEM	100	100 %	$CN_{II} = 77,0$ (zaokrouhleno) $CN_{III} = 89,0$

Tab. 3 je přehlednou evidencí čísel hodnot odtokových křivek. Pro kalibraci parametrů modelu je třeba především vybrat charakteristické páry srážko-odtokových epizod tak, aby deště byly krátké a vydatné, povodí předem nasycené předchozím deštěm, aby co nejdříve došlo ke kulminaci průtoku. Znamená to, že epizoda by měla být nejlépe na III. kategorii platnosti CN křivek (tj. nízké hodnoty hydraulické vodivosti a sorptivity). Ke kalibraci byly vybrány epizody, jejichž charakteristiky jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 4: Vybrané srážko-odtokové epizody (KINFIL) na povodí Smědé (kalibrace)

Číslo epizody	Datum (začátek epizody)	i_{max} mm · h ⁻¹	H_s mm	H_{s5} mm	Q_{max} m ³ · s ⁻¹
02	10/08/1964	11,8	150,3	26,2	46,60
03	01/07/1971	10,1	77,3	50,5	33,75
04	20/06/1977	12,4	37,7	37,0	37,89

Proměnná i_{max} v Tab. 4 je nejvyšší intenzita deště, H_s výška deště, H_{s5} součet předchozích dešťů za 5 dnů před začátkem epizody a Q_{max} kulminační průtok. U vybraných kalibračních epizod jsme si byli vědomi, že delší doba (35–45 let) uplynulá mezi kalibračním a validačním obdobím u modelu KINFIL do jisté míry změnila stav využití pozemků (land use) na povodí Smědé. Hodnocení simulace pro kalibraci parametrů modelu KINFIL ukazuje Tab. 5.

Tab. 5: Hodnocení simulace vybraných epizod pro kalibraci parametrů na povodí Smědě

Číslo epizody	Datum (začátek epizody)	Měřené Q_{max} ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Vypočtené QC_{max} ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Rozdíl kulminace (%)	Nash-Sutcliffův koeficient (-)
02	10/08/1964	46,60	38,17	-18,01	0,52
03	01/07/1971	33,75	40,22	19,17	0,62
04	20/06/1977	37,89	35,45	3,14	0,99

Kritéria kalibrace jsou přijatelná, rozdíly v kulminacích měřených a vypočtených hydrogramů i Nash-Sutcliffův koeficient shody na solidní úrovni podle kritérií WMO (1984) pouze v případě epizody 04.

Pro výběr **validačních epizod** jsme se zaměřili na epizody nedávné, od roku 2008, které poskytuje Tab.6, udávající objemy efektivních dešťů (tj. objemy odtoku) jednotlivých srážkoměrných stanic.

Tab. 6: Vybrané srážko-odtokové epizody na povodí Smědě (validace)

Číslo epizody	Začátek epizody	Konec epizody	Doba trvání (hod) epizody	Objem efektivních dešťů (mm) (=přímého odtoku)			
				Bílý Potok	Hejnice	Nové Město p. Smrkem	Višňová
1	29.10.2008 1:00	31.10.2008 11:00	59	27,7	55,2	55,4	47,5
2	24.6.2009 17:00	25.6.2009 20:00	29	15,5	15,3	29	14,1
3	2.6.2010 8:00	4.6.2010 18:00	59	38,1	61,8	56,5	30,8
4	23.7.2010 22:00	25.7.2010 12:00	39	28,7	55,8	58,4	44,6
5	6.8.2010 14:00	8.8.2010 23:00	58	134,8	268,6	165,3	108,4
6	14.8.2010 0:00	14.8.2010 20:00	21	14,5	24,3	22,0	27,2

Další tabulka (tab. 7) uvádí úhrny předchozích srážek, index předchozího nasycení API_{30} a třídu nasycení (II–III) pro jednotlivé epizody. Epizodní objemové hodnoty CN a objem retenční zóny poskytuje Tab. 8.

Tab.7: Stav nasycení povodí 30 dní před začátkem epizody

Číslo epizody	Začátek epizody	Úhrn srážek 30 dní před začátkem epizody (mm)			API_{30} (mm)	Třída nasycení
		Hejnice	Nové Město	Váž. průměr		
	váha	0,830	0,170	1		
1	29. 10. 2008	84,2	94,5	86,0	79,9	II
2	24. 6. 2009	195,4	226,1	200,6	186,6	III
3	2. 6. 2010	144,8	150,8	145,8	135,6	III
4	23. 7. 2010	88,9	97,3	90,3	84,0	II
5	6. 8. 2010	164,0	175,2	165,9	154,3	III
6	14.8.2010	480,0	383,0	463,5	431,0	III

Tab. 8: Srážko-odtokové výšky epizod a objemové CN_{vol}

Číslo epizody	Začátek epizody	Srážky P (mm)	Odtok Q (mm)	Objem retenční zóny A (mm)	Objemová hodnota CN_{vol} (-)
1	29. 10. 2008	54,6	26,3	37,3	87,2
2	24. 6. 2009	21,1	15,7	5,4	97,9
3	2. 6. 2010	44,8	38,6	5,7	97,8
4	23. 7. 2010	79,1	29,1	76,3	76,9
5	6. 8. 2010	199,7	136,8	63,5	80,0
6	14. 8. 2010	22,2	14,7	8,1	96,9

Objemové hodnoty CN_{vol} křivek a hodnoty objemů retenční zóny jsou vypočteny z objemů srážek a odtoků dle známé metodiky (US SCS, 1996):

$$CN_{vol} = \frac{25400}{A + 254}$$

(1)

$$A = 5P + 10SQ - 5SQ \sqrt{\frac{5P}{SQ} + 4}$$

(2)

kde

CN_{vol} objemová hodnota CN (-)

A retence povodí (mm, viz US SCS, 1992)

P příčinná srážka (mm)

Q přímý odtok (mm)

Tab. 9: Hydrologická bilance povodí 30 dní před začátkem epizody ($P=AE+O+\Delta W$)

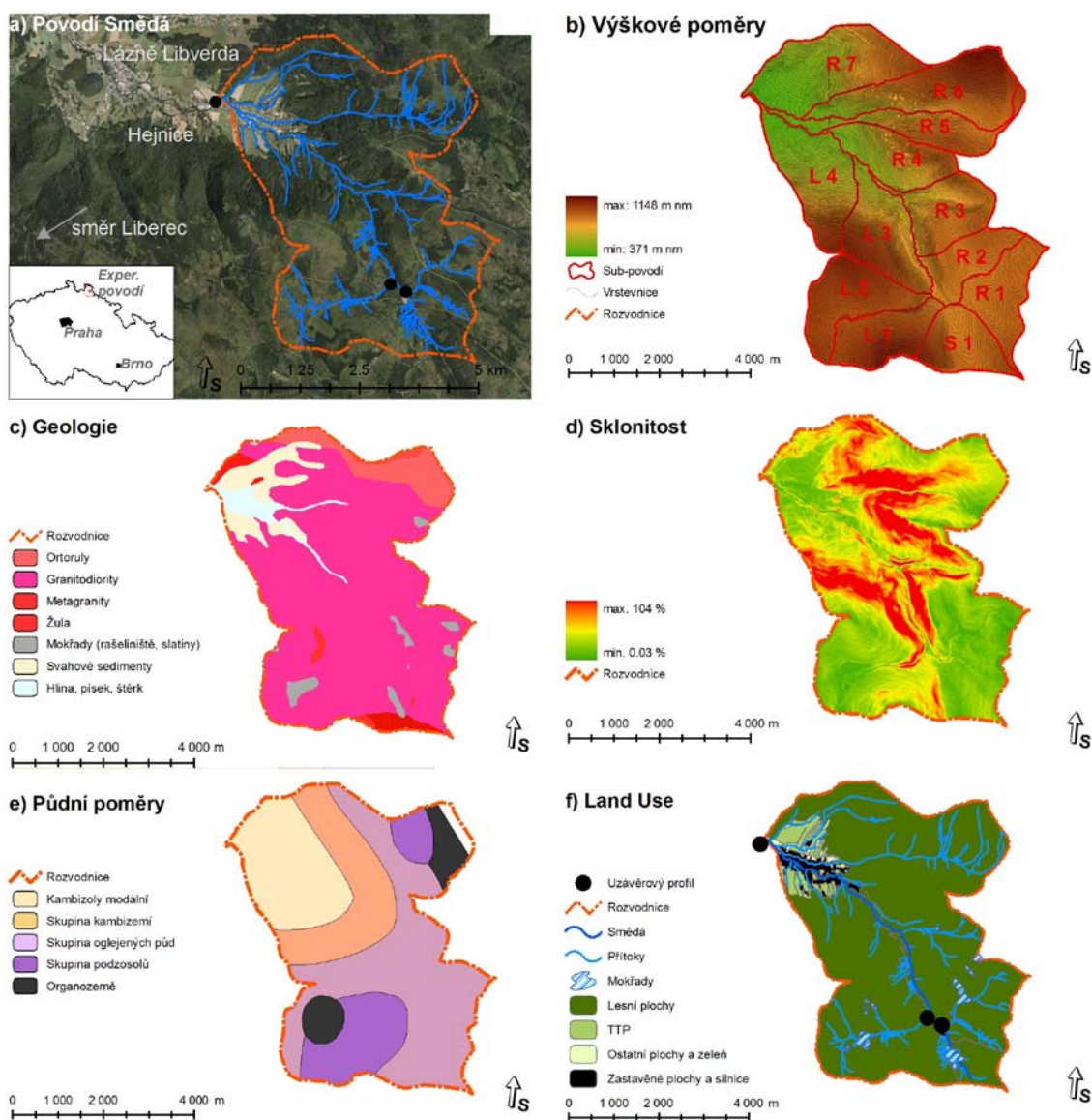
Číslo epizody	Začátek epizody	P	AE	SQ	ΔW	Vol. CN	API_{30}	Třída nasycení
		Srážky	Aktuální výpar	Odtok	Diference	(P-O)		
	(datum)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(-)	(mm)	(-)
1	29.10.2008	86,0	38,2	22,5	+25,3	87	79,9	II
2	24.6.2009	96,1	19,8	39,9	+36,4	98	186,6	III
3	2.6.2010	145,7	57,4	40,4	+47,9	98	135,6	III
4	23.7.2010	90,3	28,3	18,6	+43,4	77	84,0	II
5	6.8.2010	123,8	73,6	49,1	+1,1	80	154,3	III
6	14.8.2010	121,3	45,1	52,7;	+23,5	97	431,0	III

Před epizodami použitými pro validaci byly v délce 30 dnů (před začátkem každé epizody) vypočítány hodnoty členů bilanční rovnice (viz tab. 11) modelem WBCM-5 Water balance conceptual model (Kovář et al. 2004) a z nich určeny třídy nasycení vodou. Současně byly také vypočteny hodnoty indexů předchozích srážek (30 dnů) API_{30} .

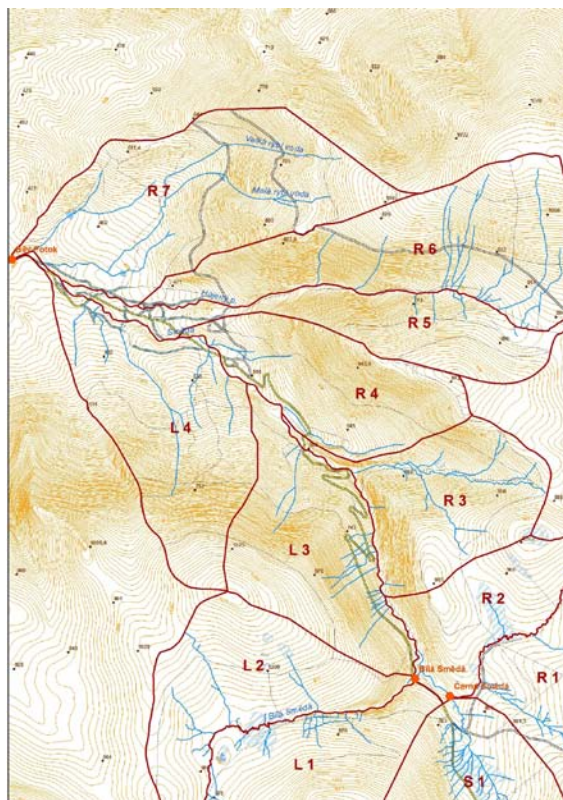
2.2 Mapové materiály GIS povodí Smědé (profil Bílý Potok)

V předložené studii byly využity nástroje GIS pro vytvoření digitálního modelu terénu, hydrologických skupin půd, hospodářského využití pozemků a rozdělení řešeného povodí Smědé na subpovodí. Použitými softwarovými prostředky byly produkty ArcGIS 9.3 s rozšířením SpatialAnalyst. Výchozími materiály byly rastr základní mapy 1 : 10 000 (ZABAGED II), digitální mapa BPEJ a systém HEIS. Výslednými produkty jsou mapy na obr. 1: Hlavní charakteristiky povodí Smědé obsahující: a) ortofotomapu, b) výškové poměry, c) geologické poměry, d) sklonitost, e) půdní poměry a f) využití pozemků.

Syntetickým geografickým produktem je mapa obsahující hydrologické informace, vyžadované modelem KINFIL. Tyto informace jsou obsahem tab. 10, která popisuje geometrickou schematizaci subpovodí včetně využití pozemků. Tabulka poskytuje systém číslování subpovodí směrem od rozvodnice k uzávěrovému profilu s rozlišením horního segmentu (S) a desek levé (L) a pravé (R) strany toku Smědé.



Obr. 1: Hlavní charakteristiky povodí Smědé



Obr. 2: Povodí Smědé (BP) – rozdělení na subpovodí

Tab. 10: Schematizace povodí Smědé

Kaskáda/ subpovodí	Plocha (km ²)	Délka povodí (km)	Deska	Plocha (km ²)	Prům. šířka (km)	Délka (km)	Sklon (-)	TTP (%)	Les (%)	Ostatní plocha (%)	Zast. plocha (%)
S1	1,64	1,86	S 11	1,12	0,88	1,26	0,178	0,00	99,30	0,00	0,70
			S 12	0,53		0,60	0,114	0,00	94,60	0,00	5,40
R1	1,84	1,35	R 1	1,84	1,36	1,35	0,070	0,00	99,60	0,00	0,40
R2	1,44	0,75	R 21	0,96	1,93	0,50	0,097	0,00	99,60	0,00	0,40
			R 22	0,48		0,25	0,204	0,00	99,90	0,00	0,10
R3	1,99	1,80	R 31	1,08	1,10	0,98	0,213	0,00	100,00	0,00	0,00
			R 32	0,91		0,83	0,394	0,00	99,90	0,00	0,10
R4	1,91	1,75	R 41	0,97	1,09	0,89	0,243	0,80	91,50	0,00	7,80
			R 42	0,95		0,87	0,424	0,00	100,00	0,00	0,00
R5	1,79	0,78	R 51	0,10	2,29	0,05	0,119	0,00	100,00	0,00	0,00
			R 52	0,41		0,18	0,216	0,00	100,00	0,00	0,00
			R 53	1,27		0,56	0,269	1,10	81,10	1,70	16,10
R6	3,3	1,49	R 61	0,50	2,22	0,23	0,156	0,00	100,00	0,00	0,00
			R 62	1,33		0,60	0,218	0,00	100,00	0,00	0,00
			R 63	1,47		0,66	0,380	0,65	93,75	3,06	2,54
R7	3,46	3,50	R 71	0,40	0,99	0,41	0,180	0,00	100,00	0,00	0,00
			R 72	1,68		1,70	0,317	2,90	95,40	1,70	0,00
			R 73	1,38		1,40	0,147	34,70	42,50	15,00	7,80
L1	1,79	1,18	L 11	0,62	1,51	0,41	0,193	0,00	100,00	0,00	0,00
			L 12	1,17		0,77	0,147	0,00	99,70	0,00	0,30
L2	2,25	1,23	L 21	1,34	1,83	0,73	0,086	0,00	100,00	0,00	0,00
			L 22	0,91		0,50	0,154	0,00	99,93	0,00	0,07
L3	2,33	1,48	L 31	0,36	1,58	0,23	0,157	0,00	100,00	0,00	0,00

Kaskáda/ subpovodí	Plocha (km ²)	Délka povodí (km)	Deska	Plocha (km ²)	Prům. šířka (km)	Délka (km)	Sklon (-)	TTP (%)	Les (%)	Ostatní plocha (%)	Zast. plocha (%)
			L 32	1,61		1,02	0,415	0,00	98,40	0,00	1,60
			L 33	0,36		0,23	0,273	0,00	94,60	0,00	5,40
L4	2,75	2,67	L 41	0,23	1,03	0,23	0,171	0,00	100,00	0,00	0,00
			L 42	1,03		1,00	0,403	0,00	100,00	0,00	0,00
			L 43	1,49		1,45	0,164	24,70	52,00	2,00	21,30

2.3 Model KINFIL

Model KINFIL je založen na kombinaci teorie infiltrace Greena a Ampta se zavedením koncepce doby výtopy Morel-Seytoux (Morel-Seytoux a Verdin, 1981) a transformace přímého odtoku kinematickou vlnou (Kibler, Woolhiser, 1970; Beven, 1979; Singh, 1996).

Úkolem infiltrační části modelu je určení parametrů nasycené hydraulické vodivosti K_s a retenčního součinitele sacího tlaku S_f (při stavu polní vodní kapacity – PVK). Řešením bylo využití dříve odvozených vztahů mezi těmito parametry a hodnotami čísel odtokových křivek CN (US SCS, 1986). Indexové hodnoty CN korespondují s konceptuálními hodnotami půdních parametrů K_s a S_f (PVK): $CN = f(K_s, S_f)$. Druhým komponentem modelu KINFIL je transformace přímého odtoku. Rovnice popisuje neustálý pohyb, aproximovaný kinematickou vlnou. Kinematická rovnice byla převedena do tvaru konečných diferencí a řešena explicitním numerickým schématem Laxe-Wendroffa (Lax, Wendroff, 1960). Pro praktické řešení je povodí geometrizováno rozdělením do dvou komponent: kaskády desek a konvergentních segmentů tak, aby simulace procesu odtoku odpovídala topografickým plochám povodí.

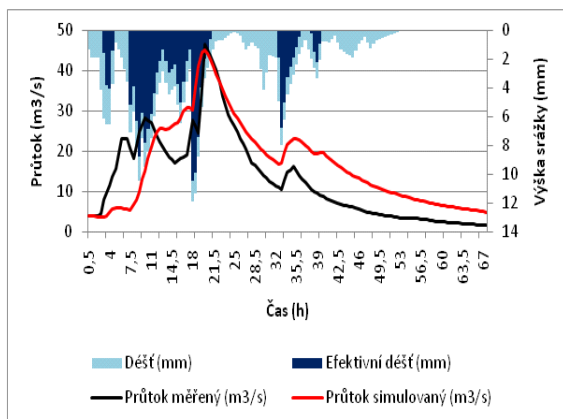
2.4 Model MANS

Vstupem neuronové sítě v dané aplikaci je krátká historie hodinových srážek a průtoků, na základě které se predikuje průtok v následující hodině – výstup sítě. Z experimentů vyplynulo, že dvou a tříhodinová historie je zcela postačující pro dobrou predikci. Jelikož naším cílem je minimalizovat počet volných parametrů, tedy velikost sítě, používáme v dalším sítě s dvouhodinovou historií průtoků a srážek. Posledním parametrem byl počet skrytých vrstev a jednotek v nich, kterou jsme se opět snažili nastavit co nejmenší s ohledem na minimalizaci počtu volných parametrů. Potvrdila se empirická znalost, že i když jedna skrytá vrstva je teoreticky dostačující k aproximaci jakékoliv spojitě funkce, v praxi se často dosáhne menšího celkového množství jednotek použitím více (dvou) vrstev s menším počtem jednotek (Neruda et al., 2005). V našich experimentech tedy pracujeme s architekturou sítě se 4 vstupními jednotkami, jednou výstupní jednotkou a dvěma skrytými vrstvami s 8 a 5 neurony.

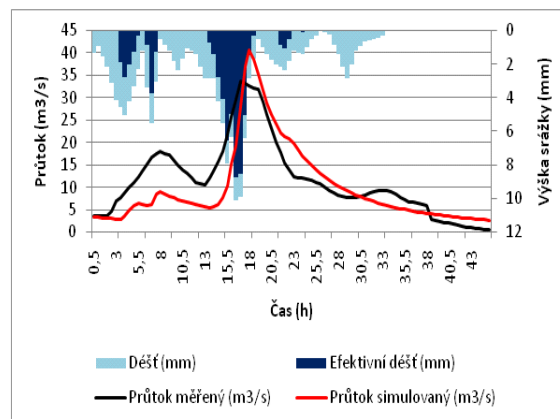
Výsledky

3.1 Výsledky kalibrací modelem KINFIL

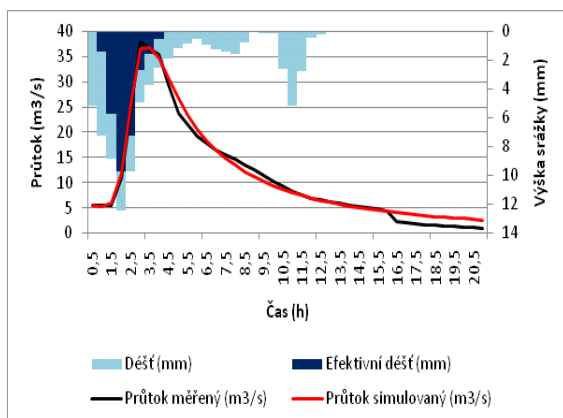
Data pro kalibraci parametrů modelu KINFIL obsahuje Tab. 5, výsledky 3 použitých simulací hydrogramů tímto modelem pak Obr.3 až Obr.5.



Obr. 3: Kalibrace KINFIL Smědá 02
(10. 8.–12. 8. 1964)



Obr. 4: Kalibrace KINFIL Smědá 03
(1. 7.–2. 7. 1971)

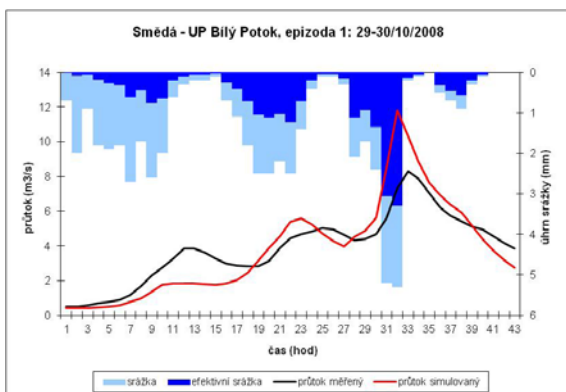


Obr. 5: Kalibrace KINFIL Smědá 04
(20. 6.–21. 6. 1977)

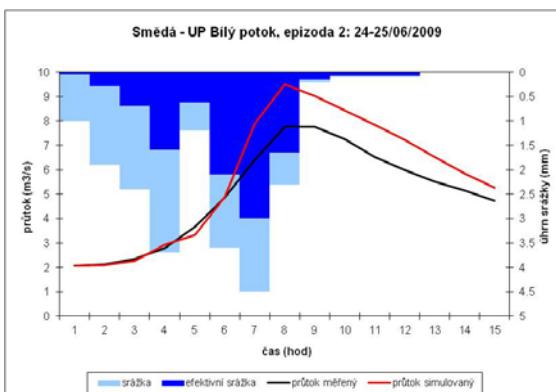
Výsledky kalibrací parametrů modelu KINFIL ukazuje již Tab. 6, kulminace průtoků testovaných hydrogramů jsou v souladu s použitým kritériálním posouzením (WMO, 1984) pouze v případě epizody 04.

3.2 Validační srážko-odtoková data (profil BP)

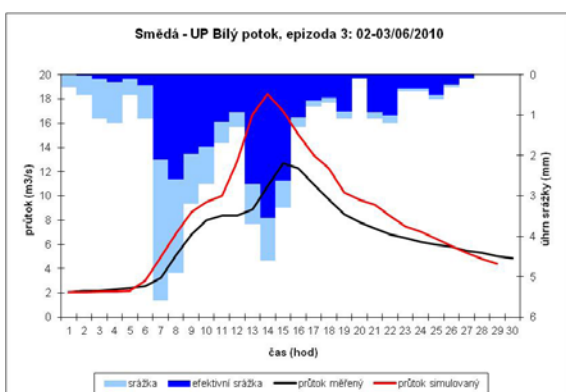
Validované epizody na povodí Smědě byly zpracovány na základě parametrů odvozených kalibrací modelem KINFIL a jsou prezentovány na Obr. 6. až Obr. 10.



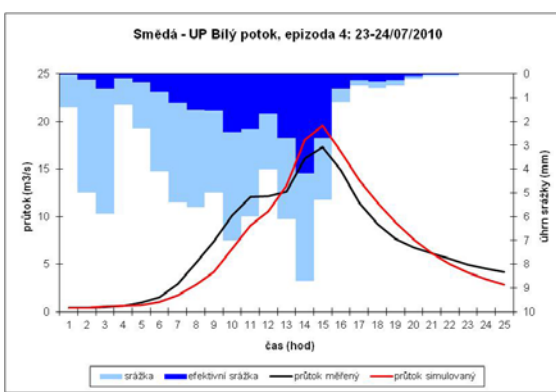
Obr. 6: Validace KINFIL Smědá
(29. 10–31. 10. 2008)



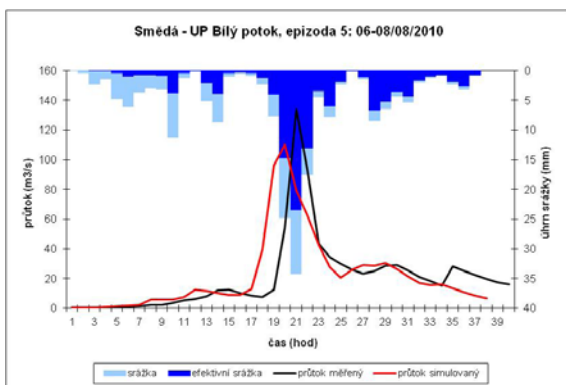
Obr. 7: Validace KINFIL Smědá
(24. 6–25. 6. 2009)



Obr. 8: Validace KINFIL Smědá
(2. 6.–4. 6. 2010)



Obr. 9: Validace KINFIL Smědá
(23. 7.–25. 7. 2010)



Obr. 10: Validace KINFIL Smědá
(6. 8.–8. 8. 2010)

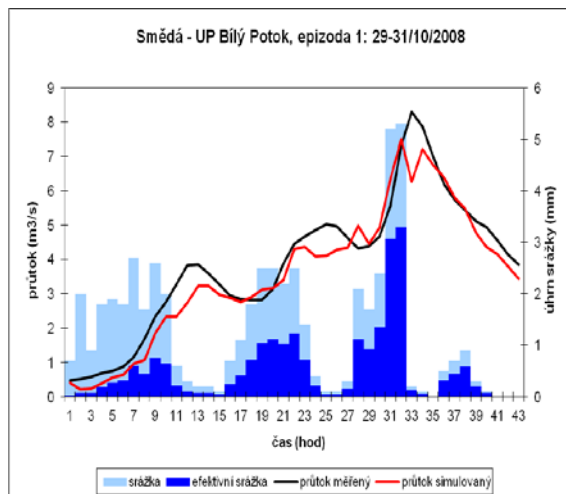
Tab. 11: Výsledky validace (KINFIL)

Epizoda	Nash-Sutcliffe koeficient
1 29.–30. 10. 2008	0,61 NE
2 24.–25. 06. 2009	0,77 ANO
3 02.–04. 06. 2010	0,34 NE
4 23.–25. 06. 2010	0,89 ANO
5 06.–08. 08. 2010	0,81 ANO

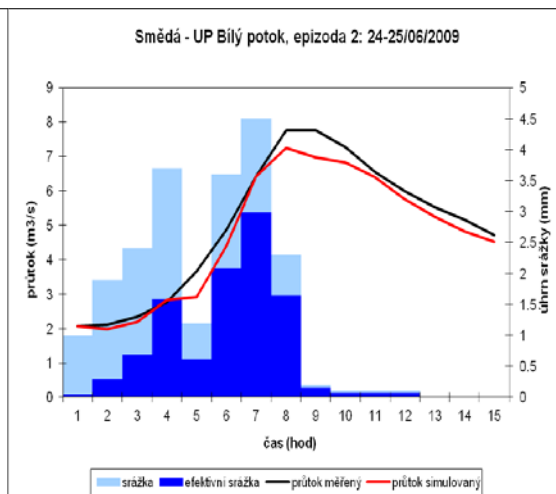
Dle kritérií WMO (World Meteorological Organisation, 1984), která používá tento koeficient pro hodnocení modelů, jsou použitelné simulace s výslednými koeficienty v intervalu 0,75–1.

3.3 Model MANS: Kalibrace a validace

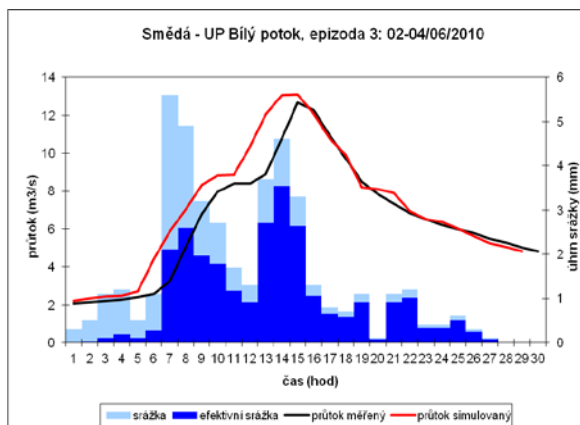
Při experimentech je model vždy kalibrován na 4 epizodách z 5 použitých a validován na páté, která nebyla součástí kalibračních dat. Jelikož hlavním problémem při učení neuronových modelů u tohoto typu dat je tzv. přeučení sítě, byla chyba na validačních datech používána v průběhu učení pro testování generalizace sítě. Dramatický nárůst chyby na validačních datech sloužil jako kritérium pro zastavení učení. Síť byly učeny metodou zpětného šíření chyby s momentovým členem. Výsledky pěti modelů jsou popsány pomocí Nash-Sutcliffova koeficientu v Tab. 12.



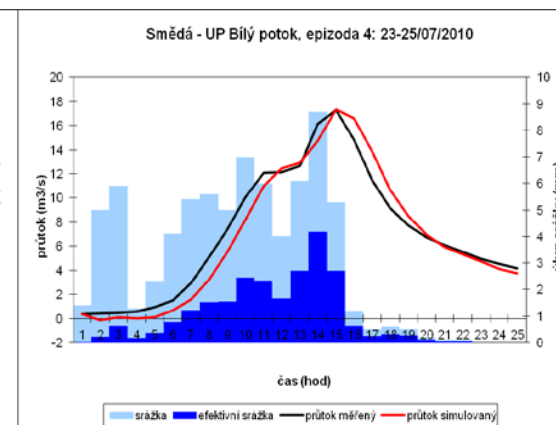
Obr. 11 MANS Smědá (29.–31.10.2008)



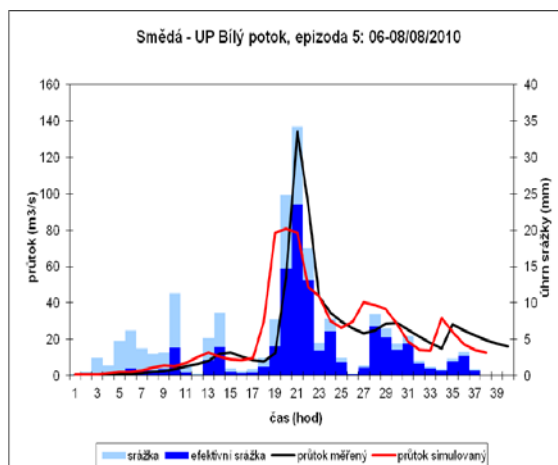
Obr. 12 MANS Smědá (24.–25.6.2009)



Obr. 13 MANS Smědá (2.–4.6.2010)



Obr. 14 MANS Smědá (23.–25.7.2010)



Obr. 15 MANS Smědá (6.–8.8.2010)

Tab. 12 Výsledky validace pro MLP

Epizoda		Nash-Sutcliffe	
1	29.–31. 10. 2008	0,92	ANO
2	24.–25. 6. 2009	0,96	ANO
3	2.–4. 6. 2010	0,94	ANO
4	23.–25. 7. 2010	0,95	ANO
5	6.–8. 8. 2010	0,75	ANO

Diskuze

Povodí Smědé v Jizerských horách má velmi nelineární průběh srážko-odtokového procesu. Mělké, ale rašelinné půdy jsou málo propustné a srážkové extrémy často způsobují erozi půdy, dokonce půdní sesuvy. Model KINFIL ve verzi odvození parametrů nasycené hydraulické vodivosti K_s a sorptivity S_f (při PVK) jako jednoduchý tříparametrový model (spolu s Manningovou drsností n) se projevil jako ne úplně spolehlivý nástroj simulace extrémních odtoků. Ze tří kalibračních případů jsou odvozené parametry použitelné (viz Tab. 5), ale z pěti validačních epizod jsou jen tři přijatelné (viz Tab. 11).

V průběhu procesu učení neuronových sítí jsme shledali největším problémem přeučování sítě. Zjevná nelinearita dat vyžaduje více jednotek a složitější architekturu sítě, což je ale v konfliktu s požadavkem na větší množství dat pro jednotlivé epizody. Obecně se dá říci, že síť se dvěma vrstvami a desítkami jednotek mají tendence se učit data z epizod příliš do detailů na úkor vystižení obecných zákonitostí srážko-odtokových vztahů. Proto bylo nutné parametry sítě (velikost, počet vrstev, počet epizod učení) volit podle výsledků na validační množině. Cílové modely tedy dosahují lepších validačních výsledků než při kalibraci.

Závěry

Srážko-odtokové procesy v povodí Smědé jsou nesporně obtížně kalibrovatelné, zejména v modelu s malým počtem parametrů. Obecně je použitý model KINFIL 2D model fyzikálně založený, čtyřparametrový (2 parametry infiltrační a 2 transformační kinematickou vlnou). Byla zde však vyzkoušena verze odtokových křivek CN, kdy z této hodnoty byly odvozeny hodnoty dvou parametrů, tj. K_s a S_f . Takže čtyřparametrová verze byla redukována na tříparametrovou. Simulaci by zřejmě také pomohlo vybrat novější kalibrační epizody (nikoliv z 60. a 70. let minulého století). Předpokládáme také, že zlepšení by přineslo přímé měření hydraulických parametrů půdy geostatistickými metodami, namísto aplikace CN metody k odvození obou infiltračních parametrů. Tato metoda je však velice pracná.

Ukázalo se, že modely neuronových sítí lze do jisté míry použít na lokální modelování extrémních srážko-odtokových vztahů s výsledky srovnatelnými s hydrologickými modely. Použití neuronových sítí sebou nese několik problémů, které je nutné brát v úvahu. Předně, statistická významnost extrémních jevů si vynucuje kalibraci specificky na datech, kde se tyto epizody skutečně vyskytují. Z našich předchozích zkušeností vyplývá, že tato strategie vede k lepším modelům. Dat z extrémních událostí je ale relativně málo vzhledem k vysoce nelineární podstatě problému. Musíme tedy řešit rozpor mezi úměrnou velikostí architektury schopné daný vztah zachytit, která následně ovlivňuje potřebné množství volných parametrů, a mezi relativně malým množstvím kalibračních dat. Při zjednodušené aplikaci neuronových modelů tak typicky dostaneme přeučenou síť, která sice věrně popisuje kalibrační data, ale dosahuje špatné generalizace. Tento problém lze zmenšit zahrnutím časté validace v průběhu učení a včasného zastavení konvergence učícího algoritmu tak, aby nedošlo k přeučení. V budoucnu by bylo vhodné tento problém dále studovat a experimentovat s dalšími možnostmi prevence přeučení, například použitím „ansambles“ neuronových modelů.

Poděkování

Autoři oceňují finanční pomoc výzkumného projektu TAČR TA02020402 „Optimalizace vodního režimu krajiny ke snižování dopadů hydrologických extrémů“ při zpracování článku.

Literatura

- BĚLSKÝ, J., 1999: Lesnicko-technické meliorace a hrazení bystřin. In: Zpráva o stavu lesního hospodářství (1994–1999).
- BEVEN, K. J., 1979: On the Generalized Kinematic Routing Method. *Water Res. Research*. Vol. 15, No. 5, 1238–1242.
- BEVEN, K. J., 2006: *Rainfall-Runoff Modelling. The Primer*. John Wiley&Sons, Chichester, U.K.
- ČAMROVÁ, L., JÍLKOVÁ, J., 2006: Povodňové škody a nástroje k jejich snížení. IEEP, VŠE v Praze, ISBN 80-86684-35-0.
- KIBLER, D. F., WOOLHISER, D. A., 1970: The kinematic cascade as a hydrologic model. *Hydrology Paper No. 39*, Colorado State University, USA.
- KOVÁŘ, P., 1992: Possibilities of design floods assessment using model KINFIL. *Journal of Hydrology and Hydromechanics (Vodohospodářský časopis)* Vol. 40, No. 2, 197–220.
- KOVÁŘ, P., CUDLÍN, P., ŠAFÁŘ, J., 2004: Simulation of hydrological balance on experimental catchment Všeminka and Dřevnice in the extreme periods 1992 and 1997. *Plant, Soil and Environment* 50 (11), 478–483.
- KOVÁŘ, P., KŘOVÁK, F., 2002: *Hrazení bystřin, skriptum FLE ČZU Praha*, ISBN 80-2013-0888-5.
- KULHAVÝ, Z., KOVÁŘ, P., 2000: Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. *Publ. VÚMOP Praha*, ISBN 1211-3972, 123 str.
- LAX, P. D., WENDROFF, B., 1960: Systems of conservation laws. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 13: 217–237.
- LIPPMANN, R., P., 1987: An introduction to computing with neural nets. *IEEE ASSP Magazine*, 4:4–22.
- MOREL-SEYTOUX, H. J., VERDIN, J. P., 1981: *Extension of the Soil Conservation Service Rainfall-Runoff Methodology for Ungauged Watersheds*, Colorado State University.
- NASH, J.E., SUTTCALIFE, J.V., 1970: River flow forecasting through conceptual models. Part I, A discussion on principles, *Journal of Hydrology* 10 (1970) 282–290.
- NERUDA, M., NERUDA, R., KUDOVA, P., 2005: *Forecasting Runoff with Artificial Neural Networks. Progress in Surface and Subsurface Water Studies at Plot and Small Basin Scale. Paris: UNESCO, 2005 - (Maraga, F.), 65–69.*
- PONCE, V. M., HAWKINS, R. H., 1996: Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 1, No. 1, ASCE, 11–19.
- RUMELHART, D., E., MCCLELLAND, J., L., 1986: *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition I&II*. MIT Press. Cambridge MA.
- SINGH, V. P., 1996: *Kinematic Wave Modelling in Water Resources: Surface Water Hydrology*. John Wiley&Sons, New York.
- US SCS, 1992: *Soil Conservation. Program Methodology. Chapter 6.12: Runoff Curve Numbers*, USA (13 pp.).
- US SCS, 1986: *Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55 (updated)*, USA.
- WMO, 1984: *Commission for Hydrology, Abridged Final Report of the Seventh Session (Geneva, 27 August – 7 September 1984)*.