

# Predikce průtoků modelem SWAT na příkladu povodí vodního díla Olešná

PETR KRPEC

**Klíčová slova:** model SWAT— vstupní data — vodní nádrž Olešná — kalibrace a validace

## SOUHRN

Příspěvek je zaměřen na posouzení výsledků simulace průtoků komplexním modelem SWAT, který je obtížný pro užívání z hlediska potřeby vstupních dat o půdách a managementu povodí. Na příkladu povodí VD Olešná, které patří mezi menší povodí, než je běžné pro používání SWATu, byla provedena kalibrace vybraných parametrů při srovnání s měřenými daty a následně validace kalibrovaného modelu na validační pozorované řadě. Model má v tomto případě problém s predikcí denních průtoků spojený s většími srážkovými událostmi, měsíční průtoky pak predikuje velmi dobře. Model je velmi vhodný především pro posouzení dopadu různých scénářů (klimatické změny, využívání krajiny v povodí apod.) v dlouhodobém časovém měřítku. Další rozvoj modelu je plánován pro kalibraci parametrů modelu pro predikci transportu živin z povodí do nádrže.

## ÚVOD

Matematické modely se v hydrologii uplatňují již řadu let ruku v ruce s rostoucím výkonem výpočetní techniky a dostupností vstupních dat. Umožňují realizaci virtuálních experimentů, které lze empiricky provést buď jen velmi obtížně, nebo vůbec. V praxi se využívají ke studiu hydrologických procesů a odhadům dopadu různých scénářů na hydrologické procesy. Základním předpokladem je, aby zvolený model dostatečně realisticky simuloval potřebné procesy pro minimalizaci nejistoty výsledků. Především v současné době, ve které potřebujeme plánovat účinná opatření v krajině k adaptaci na probíhající klimatické změny, může být role těchto modelů pro posouzení efektivity adaptačních opatření nezastupitelná. Především v simulacích procesů v zemědělsky využívaných povodích je široce uplatňován model SWAT (akronym pro Soil and Water Assessment Tool), jehož obliba ve světě neustále roste.

Tento příspěvek má za cíl představit model SWAT, jehož užití na území České republiky je velmi vzácné, přestože má velký potenciál. Postupně je stručně popsán samotný model a následně je na příkladu povodí vodní nádrže Olešná (33 km<sup>2</sup>), která slouží jako zdroj vody pro průmysl a značně trpí přísunem sedimentů a živin, provedena kalibrace a validace simulací průtoků pro denní časový krok a následné srovnání s měsíčním časovým krokem.

## MATERIÁL A METODIKA

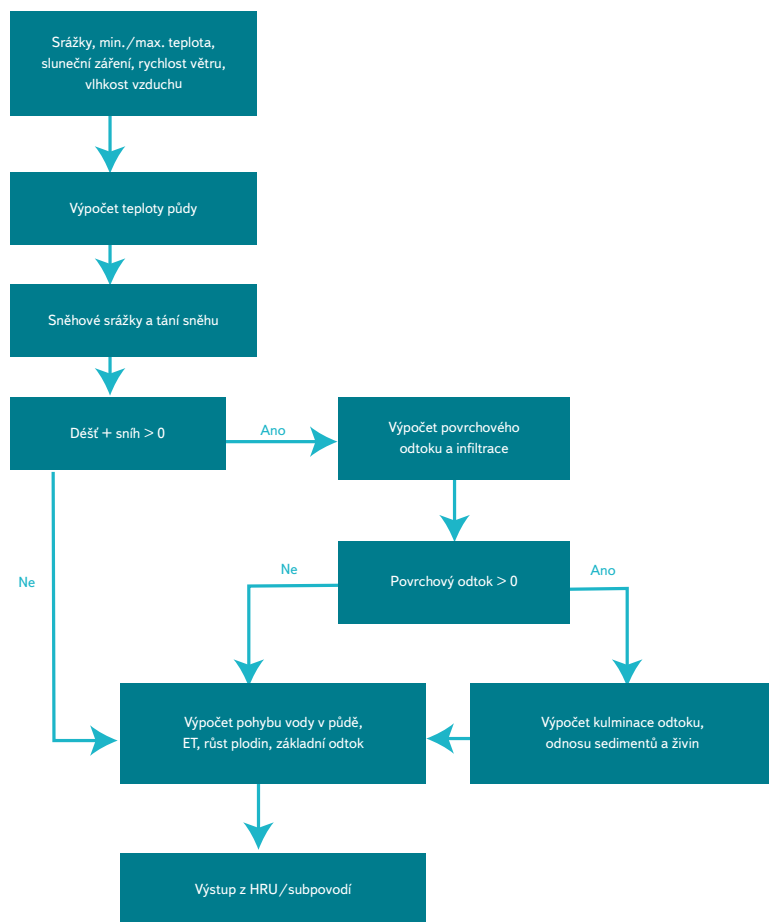
### Model SWAT

Model SWAT je vytvářen především zásluhou Jeffa Arnolda na US Department of Agriculture Agricultural Research Service (USDA-ARS). SWAT je kontinuální model v měřítku povodí, který pracuje s denním časovým krokem a je vytvořen pro predikci vlivu managementu povodí na hydrologii, sedimenty a chemické látky spojené se zemědělskou činností, jako jsou živiny, pesticidy, těžké kovy a další.

SWAT vyžaduje poměrně podrobné údaje o půdě, informace o využívání půdy/hospodaření a výškopisná data. Mezi základní vstupní parametry pro půdu patří hloubka, zrnitostní složení, obsah organické hmoty a hydrologické vlastnosti, a to především hydrologická skupina a nasycená hydraulická vodivost. Parametry lze půdám přidělit zvlášť pro jednotlivé horizonty. Důležité parametry charakterizující typ využití půdy jsou čísla odtokových křivek pro jednotlivé hydrologické skupiny půd. Pro urbanizované plochy je navíc podstatný parametr podílu nepropustného povrchu. Pro zemědělsky využívané plochy je možnost parametrizace podrobného managementu zahrnujícího rotaci plodin, agrotechnické lhůty setí, sklizně, orby, hnojení, pastvy apod. Výškopisná data slouží k odvození sklonitosti území, která je rozdělena do množství tříd podle uživatele. Dále lze přidat další významné činnosti hospodaření např. bodové zdroje, odběry vody, zavlažování a další. Nejdůležitější vstupní klimatologická data jsou denní srážkové úhrny a minimální a maximální teplota vzduchu. Pokud jsou k dispozici podrobnější srážkové úhrny, lze je využít. Další vstupní klimatologická data jsou úhrny globálního záření, relativní vlhkost vzduchu a průměrná rychlost větru. Ty jsou potřeba pro metody výpočtu evapotranspirace, které jsou náročnější na data. Hodnoty všech těchto veličin lze simulovat pomocí stochastického generátoru počasí.

Proces výpočtu lze rozdělit na část probíhající na úrovni krajiny a část představující procesy v rámci hlavních vodních toků. Pro výpočet vodní bilance a následně odnosů jednotlivých látek na úrovni krajiny je plocha povodí rozdělena do dílčích subpovodí a dále do hydrologických odpovědných jednotek, tzv. HRU (Hydrologic Response Unit), tvořící kvazihomogenní plochy s unikátní kombinací typu půdy, krajinného pokryvu a třídy sklonitosti, které zachycují především rozdíly v hodnotách evapotranspirace, stejně jako v hodnotách odtoku pro jednotlivé HRU a rovněž pro jednotlivé plodiny. Základní procesy zahrnuté v hydrologické bilanci povodí jsou obsaženy v rovnici (1). K jednotlivým procesům existuje v některých případech nabídka vícero matematických popisů hlavně v závislosti na náročnosti vstupních dat. Například u výpočtu infiltrace srážek lze použít metodu odtokových křivek, pro kterou postačují denní srážkové úhrny, nebo metodu Green&Ampt, která vyžaduje srážky





Obr. 1. Diagram postupu výpočtu hydrologické bilance v HRU/subpovodích  
Fig. 1. Flowchart of hydrological budget calculation for HRU/subbasins

v podrobnějších časových intervalech. Podobně u výpočtu potenciální evapotranspirace lze využít metody náročnější na meteorologická data, konkrétně Penmann-Monteith nebo Priestley-Taylor, ale zároveň metodu Hargreaves, která vyžaduje pouze údaje o teplotách. Odtok a koncentrace látek jsou potom modelovány odděleně pro každou HRU zvlášť a následně sloučeny do celkové hodnoty odtoku a koncentrace z plochy subpovodí podle diagramu na obr. 1.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{den} - Q_{pov} - E - w - Q_{pod}) \quad (1)$$

Kde  $SW_t$  je finální obsah vody v půdě,  
 $SW_0$  obsah vody v půdě na počátku,  
 $R_{den}$  denní úhrn srážek,  
 $Q_{pov}$  povrchový odtok,  
 $E$  evapotranspirace,  
 $w$  infiltrace do vadózní zóny,  
 $Q_{pod}$  základní odtok.

Procesy probíhající na úrovni hlavních vodních toků představují transformaci vstupujícího odtoku vody, sedimentů, živin a dalších látek. Hlavní toky jsou zde schematizovány do homogenních kanálů s lichoběžníkovým profilem. Rychlost proudění vody je počítána přes manningovu rovnici a změna pomocí metod Variable storage nebo Muskingum. Například změna živin je počítána podle modelu QUAL2E.

Výstupy z modelu jsou na úrovni jednotlivých HRU, subpovodí a hlavních vodních toků v denním, měsíčním nebo ročním časovém kroku. Pro HRU jsou ve výsledcích hlavně hodnoty vodní bilance (povrchový, podpovrchový a základní odtok, obsah vody v půdě, potenciální a aktuální evapotranspirace atd.), dále např. množství biomasy, odnos sedimentů, bilance živin apod. Pro subpovodí se jedná o velmi podobné výsledky jako na úrovni HRU, kde dochází k jejich součtu. Na úrovni vodních toků jsou výsledkem vstupy ze subpovodí, co se týče vody, sedimentů a dalších látek a jejich transformace vodním tokem.

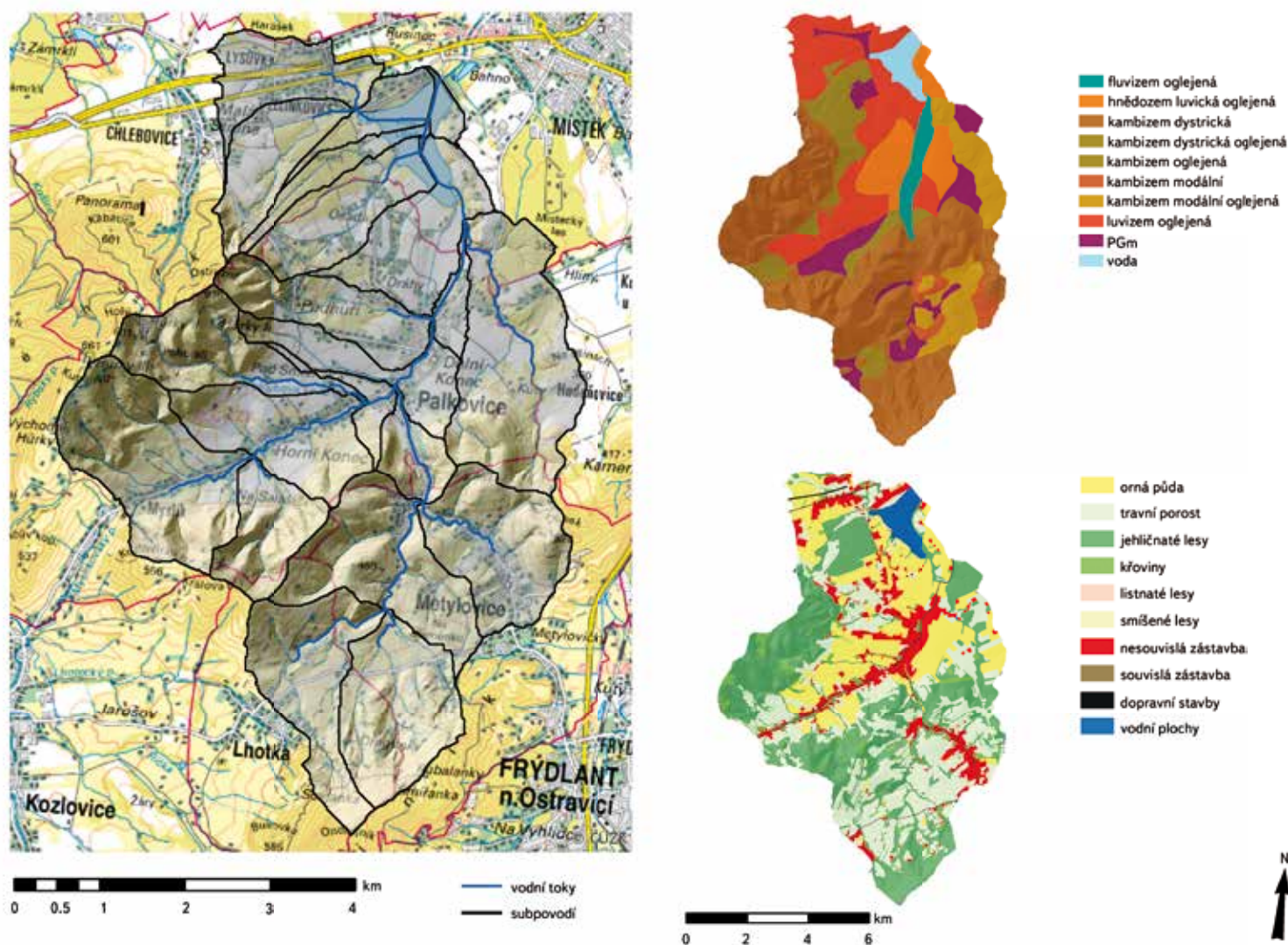
Vyčerpávající přehled o všech simulovaných procesech a jejich matematickém popisu, doporučeném použití apod. podává podrobná dokumentace k modelu [1].

Problém užití modelu SWAT v podmínkách České republiky spočívá hlavně v nedostupnosti vstupních dat o půdách, což se týká především textury půdy, obsahu organické hmoty a jejich hydrologických vlastností a dále zemědělského managementu území, hlavně osevní postupy a užívaná agrotechnika. Databáze dostupné ke SWATu jsou tvořeny především pro území USA.

Tabulka 1. Zastoupení sklonitostních tříd, půd a využití území ve vstupních datech  
Table 1. Composition of slope classes, soils and land use in input data

Sklonitost	Typ	Plocha (ha)	Relativní zastoupení (%)
	0–7°	1045,84	31,44
	7–17°	933,09	28,05
	>17°	1347,70	40,51
<b>Půda</b>			
	fluvizem oglejená	84,63	2,54
	hnědozem luvická	238,94	7,18
	pseudoglej modální	274,3	8,24
	luvizem oglejená	576,5	17,33
	kambizem oglejená	240,39	7,23
	kambizem dystrická	1591,97	47,85
	kambizem modální	247,62	7,45
	vodní plochy	72,33	2,17
<b>Využití území</b>			
	orná půda	72,33	19,98
	travní porosty	945,92	28,43
	křoviny	128,33	3,86
	lesy	1136,46	34,16
	souvislá zástavba	0,92	0,03
	nesouvislá zástavba	358,92	10,79
	dopravní stavby	18,59	0,56
	vodní plochy	72,68	2,18





Obr. 2. Půdní typy, využití území a členění na subpovodí

Fig. 2. Soil types, land use and subbasins delineation

## Tvorba modelu

Jako vstupní výškopisná data byl použit digitální model reliéfu 4. generace (DMR 4G) poskytovaný ČÚZK. Podle sklonitosti bylo povodí rozděleno na třídy 0–7°, 7–17° a nad 17°. Data o půdách byla odvozena především z komplexního průzkumu zemědělských půd provedeného v 60. letech minulého století. Rozložení půdních subtypů bylo převzato z půdních map a vlastnosti týkající se hloubek horizontů, zrnitosti, obsahu organické hmoty byly převzaty z výběrových sond vztahujících se k danému hospodářskému obvodu [2] a hodnoty pro lesní půdy byly převzaty z typologických půdních sond od ÚHUL. Hydopedologické vlastnosti, jako je nasycená hydraulická vodivost, byly odhadnuty podle pedotransferových funkcí [3]. Typ krajinného pokryvu byl odvozen interpretací ortofota pro dosažení lepšího rozlišení, než které poskytuje jinak hojně užívaná databáze Corine Land Cover, a management zemědělských ploch byl zjištěn na základě konzultace s agronomek podniku Beskyd Agro a. s., který hospodář na značné ploše v povodí. Vstupní denní meteorologická data pochází z nejbližších měřicích stanic v rámci sítě ČHMÚ. Hodnoty min. a max. teplot, úhrnů záření, relativní vzdušné vlhkosti a rychlosti větru pochází ze stanic v Mošnově. Hodnoty úhrnů srážek pochází ze čtyř srážkoměrných stanic.

Samotná diskretizace povodí na subpovodí a HRU proběhla v prostředí programu Quantum GIS s využitím zásuvného modulu QSWAT [4]. Celkově bylo povodí rozděleno na 21 subpovodí a 1 102 HRU.

Jak je patrné z *tabulky 1*, využití území povodí je spojeno především se zemědělskými plochami a lesy. Orná půda je situována především na luvizemích, hnědozemích a pseudoglejích. Mezi nejvíce pěstované plodiny zde patří řepka, kukuřice, ozimá pšenice a ozimý ječmen. Na kambizemích pak převládá využití jako travní porosty, nejčastěji louky a v menší míře pastviny a ve vyšších polohách lesy. Plošné rozložení zobrazují mapy na *obr. 2*.

## Kalibrace modelu

Pro kalibraci vybraných parametrů byly výsledky simulací průtoků porovnány s měřenými řadami z vodoměrné stanice v obci Palkovice (poskytuje ČHMÚ) a z bilančních přítoků do VD Olešná (poskytuje státní podnik Povodí Odry) v denních a měsíčních průměrných hodnotách. Užití těchto dvou typů dat vnáší do kalibrace parametrů odlišnou nejistotu vzhledem k rozdílnému původu (průtoky ČHMÚ podle vodních stavů přepočteny přes měrné křivky, Povodí Odry

pak podle bilance mezi odtokem a kolísáním vody v nádrži). Pro kalibraci modelu bylo zvoleno období mezi roky 2007 a 2011 a pro validaci modelu, tedy ověření výkonnosti modelu na časové řadě meteorologických dat, období 2012 až 2015. Zvolené vstupní parametry byly adjustovány automaticky algoritmem SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) implementovaným v programu SWAT-CUP [5]. Změna parametrů byla umožněna buď úplnou změnou hodnoty, což se týká hlavně konstant, nebo relativní změnou. Hodnoty změn jsou v rámci algoritmu vzorkovány metodou latinských čtverců. Jako objektivní funkce byl zvolen nejrozšířenější vzorec v hydrologii Nash-Sutcliffe Efficiency NSE (rovnice (2)) pro porovnání výsledků simulací a pozorovaných dat.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{sim}^t - Q_{obs}^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2)$$

Kde  $Q_{sim}$  je simulovaný průtok,  
 $Q_{obs}$  pozorovaný průtok.

## VÝSLEDKY A DISKUSE

Cílem studie bylo na základě měřených průtokových řad provést kalibraci a validaci modelu, a tím prověřit funkčnost modelu SWAT na příkladu povodí VN Olešná.

Byla provedena automatická kalibrace vybraných důležitých parametrů, na něž jsou výstupy modelů citlivé. Jejich hodnoty ukazuje *tabulka 2*. Velký vliv zde mají parametry spojené se základním odtokem s hodnotami odpovídajícími povodím s rychlou odezvou, což odpovídá předpokladu na základě převládajícího karpatského flyše v geologickém podloží [6]. Potřeba snížit hodnoty odtokových křivek může být částečně způsobena přítomností plošných odvodňovacích staveb, které snižují pravděpodobnost vzniku povrchového odtoku. Přítomnost takovýchto staveb lze do modelu zahrnout, nicméně nejsou k dispozici příliš podrobné informace o jejich umístění a parametrech.

*Tabulka 2. Kalibrované hodnoty parametrů modelu*

*Table 2. Calibrated model parameters values*

Parametr	Kalibrovaná hodnota
recesní konstanta základního odtoku	0,93
hydraulická vodivost koryta hl. vodního toku [mm·h <sup>-1</sup> ]	63
délka pro podpovrchový odtok [m]	43,24
zpoždění základního odtoku [dny]	1,19
čísla odtokových křivek	-17 %
mezí hloubka podzemní vody pro základní odtok [mm]	881
kompensační faktor pro evapotranspiraci	0,93
maningova drsnost hl. vodního toku	0,05

V hodnocení modelu při kalibraci model simuluje průtoky v denním kroku s větší úspěšností po stanici v Palkovicích, přičemž v měsíčním kroku se tento rozdíl smazává (*tabulka 3*). Hodnota NSE je poměrně citlivá na shodu při velkých průtocích, které se v denním kroku při vstupu denních úhrnů srážek obtížně predikují, především právě na menších povodích. Nejvíce je tento problém patrný pro květen roku 2010 s výskytem přibližně pětiletého průtoku, kde

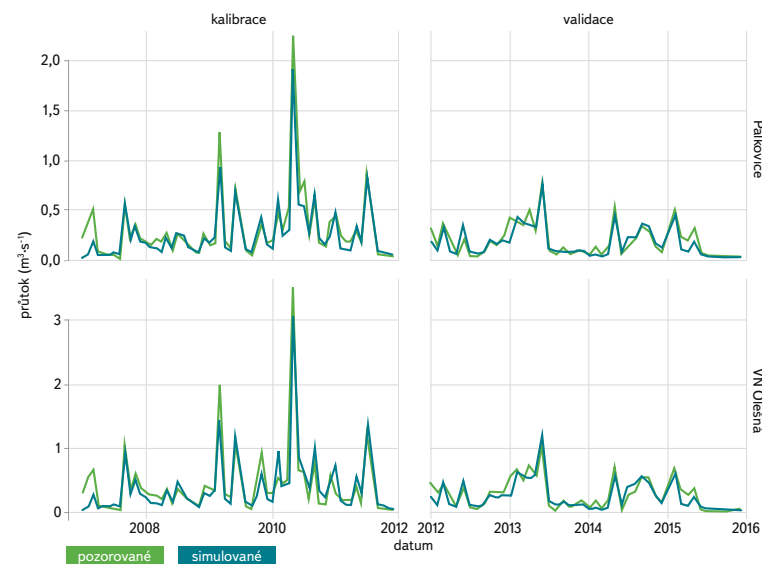
dochází k největšímu podhodnocování, a to dokonce o více než 50 %. V denním kroku je ve SWATu použita metoda odtokových křivek, která nemůže bez zohlednění intenzity srážek mnohdy adekvátně vypočítat výšku infiltrace [7]. Toto negativum se přestává projevat s rostoucí plochou povodí.

*Tabulka 3. Hodnoty NSE pro období kalibrace a validace*

*Table 3. NSE values for calibration and validation*

	Kalibrace		Validace	
Stanice	denní	měsíční	denní	měsíční
Palkovice	0,71	0,89	0,63	0,8
VN Olešná	0,49	0,89	0,42	0,8

I po shlazení do měsíčního kroku zůstává část neshody, která souvisí především se zimními a jarními měsíci (*obr. 3*). Model zde tedy hůře předpovídá procesy spojené s tvorbou sněhové pokrývky a následným odtáváním. Přesto se citlivost změny parametrů spojených s procesy ohledně sněhu na změny hodnot NSE neukázala jako významná. Větší vliv na NSE má srovnání vysokých průtoků v letních měsících, které dosahují vyšších kulminačních hodnot. V rámci doporučených kritérií pro hodnocení na základě NSE lze konstatovat, že model produkuje velmi dobré výsledky [8]. Pravděpodobně bude potřeba pro objektivní funkci zvolit jiný vztah než tradiční NSE, který je citlivější i k nižším hodnotám průtoků, např. Kling-Gupta Efficiency (KGE) [9], což je hodnota vycházející z rozkladu NSE, nebo hledat optimum napříč více mírami výkonnosti. Nejlepší řešením je pak užití tzv. ekvifinálních modelů, tedy nepoužívat model s jednou konkrétní sadou parametrů, ale se všemi, které produkují rozumné výsledky.



*Obr. 3. Porovnání simulovaných a pozorovaných měsíčních průtoků*

*Fig. 3. Comparison of simulated and observed monthly flows*

## ZÁVĚR

Model SWAT, který je vyvíjen v USA, již získal popularitu napříč světem, přesto je v České republice jeho užití ojedinělé. Jeho užití je limitováno často špatnou dostupností vstupních dat o vlastnostech půd a managementu území. Na příkladu povodí k VD Olešná byl proveden sběr potřebných dat na základě

dostupných zdrojů a bylo provedeno ověření výkonnosti modelu v předpokládaných průtocích po kalibraci modelu. Výstupy v denním kroku se ukázaly jako problematické především při intenzivnějších srážkových událostech, u kterých nelze adekvátně vypočítat proces infiltrace, který v případě menších povodí nabývá na významnosti. V rámci validace oproti kalibraci pak výkonnost ještě klesá. Výsledky simulací v měsíčním kroku vycházejí velmi dobře konzistentně i v rámci validace.

Model bude dále kalibrován hlavně pro zpřesnění procesů spojených se sněhovou pokrývkou adjustací relevantních parametrů tak, aby i v denním kroku adekvátně predikoval hydrologickou bilanci. Následně bude provedena kalibrace a validace procesů spojených se živinami podle měřených dat koncentrací dusíkanového dusíku a celkového fosforu, pouze v měsíčním kroku (malá frekvence měření), což představuje další výzvu, hlavně pro další zpřesňování managementu povodí. Takovýto model dále poslouží k prognóze dopadu potenciálních klimatických změn a efektivity adaptačních opatření.

## Poděkování

*Príspevek vznikl za podpory interního projektu Ostravské univerzity SGS05/PfF/2017-2018 Poznání vývoje a současného stavu krajiny Západních Karpat a východo-sudet-ských pohoří s ohledem na činnost člověka a současných přírodních hazardů.*

## Literatura

- [1] NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., and WILLIAMS, J.R. *Soil and water assessment tool theoretical documentation*, 2009, p. 618.
- [2] VÚMOP. Komplexní průzkum půd – webová aplikace [online], [vid. duben 2018]. Dostupné z: <http://geoportal.vumop.cz/index.php?page=kpp>
- [3] SAXTON, A. and ROWLS, W. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, vol. 70, p. 1569–1578.
- [4] DILE, Y.T., DAGGUPATI, P., GEORGE, CH., SRINIVASAN, R., and ARNOLD, J. Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model. *Environmental Modelling and Software*, 2016, vol. 85, p. 129–138.
- [5] JAJARMIZADEH, M., HARUN, S., ABDULLAH, R., and MOHSEN, S., Using Soil and Water Assessment Tool For Flow Simulation and Assessment Of Sensitive Parameters Applying SUFI-2 Algorithm. *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, vol. 2, p. 37–44.
- [6] GAÁL, L., SZOLGAY, J., KOHNOVÁ, S., PARAJKA, J., MERZ, R., VIGLIONE, A., and BLÖSCHL, G. Flood timescales: Understanding the interplay of climate and catchment processes through comparative hydrology. *Water Resources Research*, 2012, vol. 48, p. 1–21.
- [7] YANG, X., LIU, Q., HE, Y., LUO, X., and ZHANG, X. Comparison of daily and sub-daily SWAT models for daily streamflow simulation in the Upper Huai River Basin of China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2016, vol. 30, No. 3, p. 959–972.
- [8] MORIASI, D.N., ARNOLD, J.G., VAN LIEW, M.W., BINGER, R.L., HARMEL, R.D., and VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, vol. 50, No. 3, p. 885–900.
- [9] GUPTA, H.V., KLING, H., YILMAZ, K.K., and MARTINEZ, G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 2009, vol. 377, p. 80–91.

## Autor

**Mgr. et Mgr. Petr Krpec**

✉ [petr.krpec@osu.cz](mailto:petr.krpec@osu.cz)

Ostravská univerzita, Katedra fyzické geografie a geoekologie

Príspevek prošel lektorským řízením.

## DISCHARGE PREDICTION BY SWAT MODEL IN CASE OF OLEŠNÁ WATER RESERVOIR

**KRPEC, P.**

University of Ostrava, Department of Physical Geography and Geoecology

**Keywords:** SWAT model – input data – Olešná reservoir – calibration and validation

Mathematical models have been used in hydrology for decision making support for many years. They allow the realization of virtual experiments that can be done empirically either very difficult or not at all. The SWAT model, developed in the US, has gained world wide popularity but its application in the Czech Republic is quite rare yet. Its application is limited often by lack of available input data about soil properties and land management. On the example of the Olešná reservoir watershed, the necessary data was collected on the basis of the available sources and the model performance was verified in the flow forecast after the model calibration. Outputs in the daily step proved to be problematic especially in the case of more intense rainfall events, where the infiltration process, which in the case of smaller basins, can not be adequately calculated using just daily precipitations. The outputs of the simulations in the monthly step are assessed as very good and consistent in validation.