

Variabilita odezvy vybraných hydrologických modelů na typické průběhy krátkodobých srážek

LUDEK STROUHAL, PETR KAVKA, LENKA WEYSKRABOVÁ

Klíčová slova: průběhy subdenních srážek – návrhové srážky – hydrologické modelování – citlivostní analýza

SOUHRN

Příspěvek prezentuje část výstupů tříletého projektu Vliv variability krátkodobých srážek a následného odtoku v malých povodích České republiky na hospodaření s vodou v krajině. Jeho cílem bylo odvodit a poskytnout uživatelům moderní formou dosud chybějící průběhy subdenních návrhových srážek a analyzovat vliv jejich variability na hydrologické modelování a navrhování staveb v krajině. Tento příspěvek je zaměřen na prezentaci výsledků z hodnocení dopadů variability srážek prostřednictvím hydrologického modelování.

Do citlivostní analýzy byly zahrnuty modely HMS, SMODERP a MikeSHE pro podchycení variability způsobené výběrem modelového prostředí. Průměrné odhady odtokové výšky z modelu HMS se pohybovaly mezi výstupy ze zbylých dvou fyzikálních modelů, ale jeho použití je omezené kvůli metodě SCS-CN, která nezohledňuje tvar zátěžové srážky. Jinak velmi podobné modely SMODERP a MikeSHE v některých scénářích poskytly až o 100 % odlišné výsledky čistě vlivem použitých jiných metod výpočtu infiltrace. Odlišnosti se vytrácejí při více nasycených počátečních podmínkách nebo u podprůměrně vodivých půd. Pro rozptyl modelovaných hodnot zde byly odlišnosti modelu podstatnější než variabilita srážek. Nakonec byla provedena detailní citlivostní analýza v modelu MikeSHE. Ta ukázala závislost rozptylu modelovaných odtokových výšek a kulminací na průměrné úrovni vodivosti půd, a to v různé míře podle posuzované charakteristiky. U podprůměrně vodivých půd nehrál časový průběh srážky téměř žádnou roli pro odtokové výšky, zato klíčovou roli pro kulminací průtoky. U průměrně vodivých půd byl průběh srážky shledán jako důležitý faktor pro obě odtokové charakteristiky.

ÚVOD

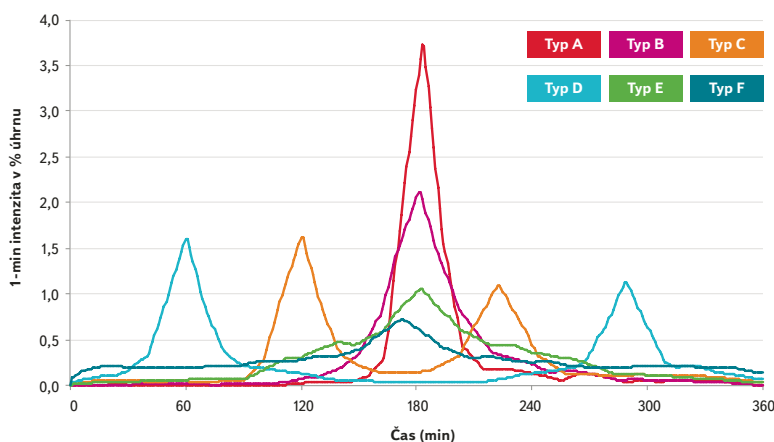
Podrobné časové rozložení intenzit vydatných krátkodobých srážek je jeden z významných faktorů ovlivňujících hydrologickou reakci malých povodí. Průběhy srážek však byly donedávna na území ČR jen málo prozkoumány. Na jedné straně časového měřítka měla odborná veřejnost k dispozici katalogy syntetických velmi krátkých dešťů (v řádu desítek minut) používaných v městském odvodnění [1] a na druhé straně hodinové hyetogramy zpravidla denních úhrnů srážek [2] využitelné pro hydrologické analýzy větších povodí. V letech 2015 až 2017 byl řešen projekt Vliv variability krátkodobých srážek a následného odtoku v malých povodích České republiky na hospodaření s vodou v krajině, jehož jedním cílem bylo popsanou mezeru překlenout a poskytnout odborné i vědecké veřejnosti a státní správě jak příslušná subdenní srážková data, tak metodiku pro jejich zpracování.

Dalším důležitým úkolem zmíněného projektu bylo identifikovat dopady variability časových průběhů odvozených krátkodobých srážek na navrhování drobných vodohospodářských staveb a opatření v krajině. Tyto dopady byly hodnoceny prostřednictvím hydrologického modelování a citlivostních analýz prováděných z důvodu porovnání variability vnesené proměnlivostí vstupních srážek s dalšími zdroji nejistot. Těmi jsou např. nejistoty ve stanovení hydrologických charakteristik půd, neznámé počáteční podmínky nasycenosti povodí v okamžiku příchodu příčinné srážky, parametrizace vlastností povrchu ovlivňujících povrchový odtok nebo samotná volba hydrologického modelu.

Tento příspěvek prezentuje část výsledků zmíněného projektu se zaměřením na jeho druhý jmenovaný cíl – analýzu variability výstupů hydrologického modelování krátkodobých extrémních srážkových událostí na malých povodích. Hlavním cílem příspěvku je identifikace klíčových nejistot s akcentem na význam variability krátkodobých srážek.

NÁSTROJE A METODY

Pro hodnocení nejistot v hydrologickém modelování jsou v současnosti používány stochastické modely nejistot, jako např. metoda GLUE [3] nebo DREAM [3]. Další možností, která byla využita v této studii, je statistické zpracování výsledků velkého množství simulací hydrologického modelu, pokrývajících vymezený parametrický prostor vstupních veličin. Sestaveno bylo více než 16 000 scénářů zohledňujících variabilitu klíčových modelových vstupů. Analýza výstupů byla zaměřena zejména na identifikaci významu variability srážkových vstupů pro odezvu hydrologických modelů malých povodí. Do ní byla zahrnuta kromě variability průběhů intenzit (ve formě šesti nově odvozených zobecněných návrhových hyetogramů popsaných dále v textu) také variabilita srážkových úhrnů (v podobě úhrnů s několika úrovněmi doby opakování), nejistoty stanovení řady charakteristik povodí (zejména infiltračních vlastností půd a počátečního stavu jejich nasycení) a nejistota vnesená volbou konkrétního hydrologického modelu. Uvažovány byly tři modely s odlišnou strukturou a přístupem k určení odtokové odezvy. Aplikovány byly na pěti charakteristických povodích vybraných v rámci klasifikace cca 7 700 povodí IV. řádu podrobně popsané v následujícím článku *Kategorizace povodí IV. řádu z pohledu hydrologického modelování*. Pro každou kombinaci hydrologického modelu a charakteristického povodí bylo namodelováno 30 skupin srážkových scénářů (6 hyetogramů × 5 dob opakování) a v rámci každé skupiny byly použity další dílčí scénáře zachycující variabilitu klíčových modelových parametrů. Analýza souboru výsledků v závěru identifikovala klíčové faktory a hlavní zdroje nejistot pro dvě posuzovaná modelová kritéria – objem odtoku a velikost kulminace.



Obr. 1. Návrhové hyetogramy šestihodinových srážek; hodnoty na ose y představují minutové úhrny vztažené k celkovému úhrnu srážky

Fig. 1. Design hyetographs of 6-hour rainfalls; values on the y-axis present the 1-minute rainfall depths related to the overall rainfall total

Variabilita průběhů krátkodobých srážek

V rámci výše zmíněného projektu byla provedena detailní analýza průběhů krátkodobých srážek na území ČR. Podkladem vyhodnocení byla desetiletá řada podrobných radarových měření adjustovaných pomocí pozemních staničních měření denních srážkových úhrnů na území celé ČR. Jako časová základna návrhových hyetogramů byl určen interval dlouhý 6 hodin. Ten je vhodným kompromisem mezi jedním dnem, který je z hlediska doby koncentrace v malém povodí příliš dlouhým časovým úsekem, a hodinou, která zpravidla nezahrnuje celou příčinnou srážku a ani nezohledňuje dostatečně vnitřní tvarovou variabilitu např. v podobě násobných vrcholů a poklesů intenzit v rámci déle trvajících událostí. Analýzou vnitřního rozdělení úhrnů srážky co do koncentrace

maximálních úhrnů během 3, 2, 1 a 0,5 hodiny a polohy těchto maxim bylo odvozeno šest zobecněných hyetogramů A–F zobrazených na obr. 1. Více podrobností o metodách odvození lze nalézt v [4]. Tyto návrhové hyetogramy byly použity pro zohlednění variability a průběhu srážek a analýzu jejího významu na výsledky hydrologického modelování prezentované v tomto příspěvku.

Zobecněné hyetogramy byly dále v uvedeném projektu analyzovány z hlediska pravděpodobnosti jejich výskytu na území ČR v závislosti na době opakování srážkového úhrnu a příslušné lokalitě. Spolu s přibližnými odhady N-letých šestihodinových úhrnů (na základě 10 let měření) jsou všechna tato data zpřístupněna veřejnosti prostřednictvím webových služeb prezentovaných v článku *Webové služby pro poskytování návrhových srážek* publikovaném v tomto časopise. Prostorové rozložení pravděpodobnosti výskytů jednotlivých návrhových hyetogramů nebylo v předkládané modelové studii nijak zohledněno, uvažovány byly vždy všechny typy průběhů srážek pro doby opakování 2, 5, 20, 50 a 100 let, územně platné pro pět reprezentativních povodí.

Výběr modelových nástrojů

Hydrologické výpočty představují v současnosti asi nepoužívanější způsob hodnocení potenciálních srážko-odtokových událostí. Jejich průběh je ovlivněn velkým množstvím faktorů, z nichž mnohé jsme dnes schopni popsat velmi přesně, jiné zjednodušeně několika parametry a některé nedovedeme předvídat vůbec. Právě neznalost přesného stavu a všech procesů v hodnoceném systému vyžaduje zavedení zjednodušení do výpočtů – použití určitého modelu.

Hydrologických modelů existuje nespočet a klasifikovány jsou podle řady hledisek [5], např. podle časového měřítka, velikosti a prostorového členění modelované domény nebo složitosti popisu a počtu procesů zohledněných v modelovaném systému. Při posuzování citlivosti odtokové odezvy na průběh příčinné srážky prostřednictvím hydrologického modelování jsou nutně výstupy systematicky ovlivněny již samotnou volbou modelu. Za účelem identifikace, případně kvantifikace nejistot způsobených volbou modelu bylo do

Tabulka 1. Metody výpočtu a zohledněné procesy vybraných modelů

Table 1. Computational methods and processes considered in selected models

Hydrologický proces	Metody výpočtu podle vybraného modelu		
	HMS	SMODERP	MikeSHE
Intercepce	Počáteční ztráta I_a jako konstantní podíl maximální potenciální retence podle SCS-CN	Srážková ztráta v mm podle půdního pokryvu	Srážková ztráta v mm podle půdního pokryvu
Povrchová retence		Zásobní kapacita v mm podle půdního pokryvu, voda dostupná pro infiltraci	Zásobní kapacita v mm podle půdního pokryvu, voda dostupná pro infiltraci
Infiltrace	Konceptuálně, přímý odtok v metodě SCS-CN	Philipova rovnice	Green&Ampt s redistribucí
Mělký podpovrchový odtok		Neřešeno	Neřešeno
Základní odtok	Neřešeno	Neřešeno	Neřešeno
Počáteční podmínky	Kategorie CN podle IPS 1-3	Různé hodnoty sorptivity ve Philipově rovnici	Explicitně počáteční vlhkost a sací tlak
Transformace povrchového odtoku	Jednotkový hydrogram podle SCS	Difuzní vlna	Difuzní vlna
Korytový odtok	Hydrologický routing (Muskingum-Cunge)	Kinematická vlna	Dynamická vlna

řešení zapojeno více modelů, které se významně liší svým přístupem k modelované hydrologické odezvě povodí a které jsou známé nebo používané v českém prostředí. Podrobněji jsou klasifikace a výběr těchto reprezentativních modelů popsány v článku viz [6].

Tento příspěvek prezentuje výstupy modelování ve třech z vybraných modelů: HMS jako v praxi nejužívanější konceptuální model, SMODERP jako autorský výzkumný open source výpočetní nástroj a MikeSHE jako referenční model s velmi vysokou úrovní komplexnosti. Přehled zohledněných hydrologických procesů a metody jejich výpočtu v těchto vybraných modelech shrnuje *tabulka 1*. Podrobnější popis modelů jde nad rámec tohoto příspěvku, dále budou pouze stručně představeny jejich hlavní charakteristiky kvůli návaznosti na prezentované výsledky.

HEC-HMS (SCS-CN)

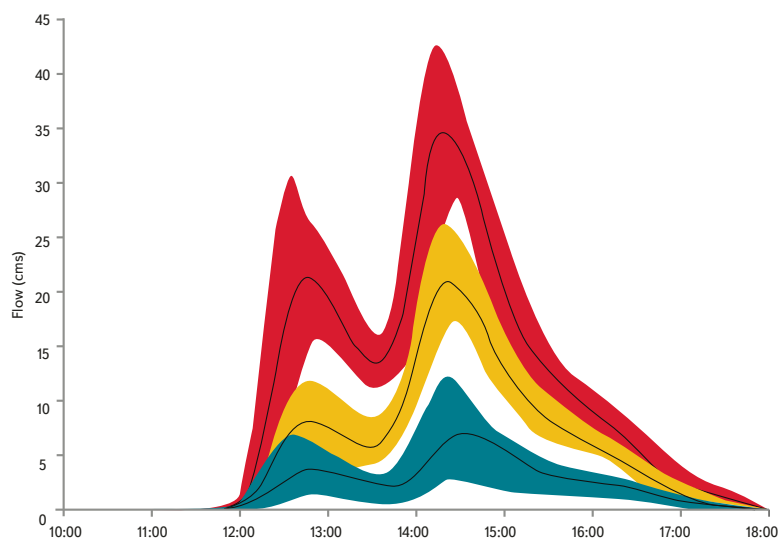
Pro hydrologickou praxi velmi dobře známý HEC-HMS [8] je veřejně dostupný a bezplatně poskytovaný nástroj vyvíjený v americkém Hydrologic Engineering Center. Jedná se o softwarové prostředí umožňující využití řady výpočetních modelů a metod, z nichž asi nejrozšířenější je metoda odtokových křivek SCS-CN [8]. Tato konceptuální metoda je s úspěchem využívána desítky let i v českém prostředí díky své jednoduchosti a snadné aplikovatelnosti. Klíčovým vstupem je číslo odtokové křivky závislé na hydrologické skupině půd a půdním pokryvu. Tabelaovaná hodnota platí pro průměrné nasycení povodí (podle indexu předchozí srážky, IPS 2), v literatuře jsou pak publikovány vztahy pro přepočítání na dva extrémní stavy – suchý (IPS 1) a vlhký (IPS 3). Výstupem metody je odtoková výška nebo také úhrn efektivní srážky. S využitím vstupního hyetogramu lze s touto metodou odvodit i hyetogram efektivní srážky. Velkou nevýhodou této metody je, že hodnota výsledné odtokové výšky není závislá na časovém rozložení příčinné srážky. Odtoková výška ze dvou srážek s totožným úhrnem ale s průběhy např. v podobě rovnoměrného deště nízké intenzity a přívalovou srážkou je rovněž totožná, což neodpovídá fyzikálním principům tvorby přímého odtoku.

Pro určení výsledného odtoku z příčinné srážky je nutné hyetogram efektivní srážky získaný metodou SCS-CN transformovat do odtokové odezvy. HMS k tomuto využívá nejčastěji metodu jednotkového hydrogramu. Jedná se o jedno- či víceparametrickou matematickou funkci rozkládající jednorázový srážkový impuls do odtokové vlny. Parametry určující tvar hydrogramu lze odvodit často z hydromorfologických charakteristik povodí, například maximální délky odtokové dráhy a průměrného sklonu povodí.

Velkou výhodou metody SCS-CN je její výpočetní jednoduchost umožňující automatizaci a rychlý výpočet. Samotné prostředí HMS obsahuje modul pro citlivostní analýzy, v němž si uživatel může snadno definovat rozsah a statistické rozdělení hodnot vybraného parametru a řádově během minut vyčíslit stovky realizací. Výsledkem je pak jednoduché statistické zobrazení rozptýlu a charakteristik modelovaných hydrogramů, případně je možné celý soubor realizací exportovat a zpracovat v integrované prohlížečce DSS Vue (viz *obr. 2*) nebo externím softwaru.

SMODERP

Tento fyzikálně založený srážko-odtokový model je přímo zacílen na navrhování drobných staveb v krajině. Jedná se o epizodní model, jehož výsledky lze využít k získání návrhových hydrologických parametrů. V modelu jsou zahrnuty procesy infiltrace (Philipova rovnice) i povrchové retence. Tento model se v podobě profilové verze (1D) objevuje v předcházejících metodikách, např. [9, 10]. Model v profilové verzi je dostupný na stránkách Katedry hydromelioreací a krajinného inženýrství, Fakulty stavební, ČVUT v Praze (storm.fsv.cvut.cz). Vývoj



Obr. 2. V prostředí softwaru DSS Vue uživatelsky upravená vizualizace mediánů a extrémních obalových křivek odtokových hydrogramů pro sady simulací z HMS, barevně odlišeny scénáře pro CN1 (modrá), CN2 (žlutá) a CN3 (červená)

Fig. 2. In DSS Vue environment adjusted visualization of medians and extreme envelope curves of hydrographs for three sets of simulations in HMS; particular sets of scenarios with CN values for API from 1 to 3 filled with blue, yellow and red, respectively

profilové verze modelu byl již ukončen a byl nahrazen prostorovým řešením (2D), v němž jsou kromě plošného odtoku zahrnuty procesy soustředěného odtoku v rýhách a odtok ve vodních tocích.

Nově vyvíjená verze modelu SMODERP 2D je koncipována tak, aby bylo možné využít běžně dostupná data o půdě, vegetaci a morfologii. Doporučené střední hodnoty jsou součástí manuálu k modelu. Současná verze využívá prostředí ArcGIS, do budoucna je plánováno poskytnutí verze modelu pro volně dostupné GIS prostředí (QGIS, GRASS).

Výhodou modelu je plně distribuovaný přístup a fyzikální přístup umožňující detailnější analýzu modelovaného území, jehož heterogenitu nejsou celistvé modely schopné zohlednit. V neposlední řadě je to pak otevřenost kódu a do budoucna i nezávislost na komerčních platformách. V současné verzi je prozatím velkou nevýhodou značná časová náročnost výpočtu (řádově hodiny pro malé povodí). S tím je spojena i náročnost případné citlivostní analýzy, čas nutný k jejímu provedení geometricky narůstá s počtem volných parametrů a počtem realizací.

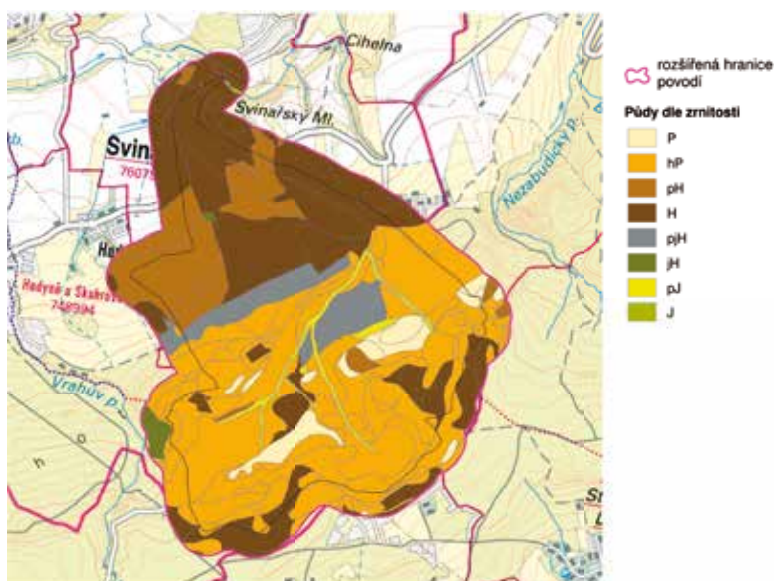
MikeSHE

Jedná se o jeden z modulů rodiny MIKE od dánského giganta DHI s celosvětovou působností v oblasti vodního hospodaření a plánování. Zaměřený je na modelování procesů v povodí pomocí prostorově distribuovaného fyzikálního přístupu. V závislosti na zakoupené licenci si může uživatel vybrat z celé palety výpočetních metod, například v oblasti infiltrace od jednoduchých konceptů přes metodu Green&Ampt až po Richardsovu rovnici včetně preferenčního proudění v makropórech. Nesaturovaná zóna je jako v naprosté většině modelů zaměřených na hydrologii povodí řešena pouze v 1D, ani MikeSHE tedy není schopen modelovat laterální složky podpovrchového odtoku. Hlavní devizou tohoto modelu je právě zmíněná komplexnost řešení, která je však vykoupena nároky na vstupní data. Za hlavní nevýhodu lze považovat pořizovací cenu, která prakticky znemožňuje použití v běžných podmínkách české projekce a plánování. Z hlediska výpočetního výkonu je na tom MikeSHE díky svému dlouhému a podporovanému vývoji o poznání lépe než autorský výzkumný SMODERP, výpočet průměrné srážko-odtokové události na středně komplikovaném modelu malého

povodí je otázkou desítky minut. Díky tomu je realizace citlivostní analýzy na rozsáhlejší setu vstupních scénářů lépe proveditelná, ale jako každý fyzikální model i MikeSHE má své limity z hlediska geometrického nárůstu výpočetní doby s počtem scénářů.

Zdrojová data a tvorba výpočetních scénářů

Ve všech vybraných nástrojích (HMS, MikeSHE, SMODERP) byly sestaveny modely pěti charakteristických povodí: Býkovického potoka (1), Struhařovského potoka (2), Chouzavé (3), Škvoreckého (4) a Halounského potoka (5). Tato povodí byla vybrána jako charakterističtí zástupci tříd povodí vzešlých z klasifikace, která je popsána v následujícím článku, tamtéž je znázorněna poloha povodí v rámci ČR. Základní charakteristiky reprezentativních povodí uvádí *tabulka 2*. Modely těchto povodí byly zatíženy 30 variantami srážkových hyetogramů, jednotlivé varianty sestávaly z kombinací 6 bezrozměrných návrhových hyetogramů aplikovaných na 5 celkových úhrnů s dobami opakování 2, 5, 20, 50 a 100 let. Návrhové úhrny srážek za 6 hodin byly získány metodou redukce [11] denních úhrnů [12]



Obr. 3. Nekonzistentní vstupní vrstva zrnitosti půdy pro model povodí Halounského potoka ilustrující problematické propojení prostorových databází pro lesní a zemědělské půdy
Fig. 3. Inconsistent soil texture dataset as the input for the model of Halounsky stream catchment illustrates the intricate linking of two available source datasets – one for the agricultural land, other for forests

Tabulka 2. Reprezentativní povodí a jejich základní charakteristiky
Table 2. Representative catchments and their main characteristics

Název toku	Plocha (km ²)	Nadm. výška (m n. m.)	Sklon (%)	CN II	Lesnatost	Tvar	Hustota říční sítě	Převažující zrnitost půd
Býkovický p.	7,75	344–515	10,6	76,4	20 %	vějířovité	střední	pH, hP
Struhařovský p.	5,79	347–515	11,0	72,7	30 %	protáhlé	vyšší	H, pH, hP
Chouzavá	4,86	360–504	8,6	55,8	80 %	přechodný	střední	H
Škvorecký p.	9,36	249–420	5,7	77,4	30 %	protáhlé	nízká	hP, pH
Halounský p.	6,09	245–578	12,8	58,5	70 %	přechodný	nízká	hP, pH

a pohybovaly se v rozmezí od 29 do 88 mm. Morfologické charakteristiky byly odvozovány pomocí DMR 4G, polohopisné údaje ze ZABAGED. Detailní charakteristiky a jejich hodnoty byly zvoleny odlišně pro jednotlivé modely. Vzhledem k podobným principům modelů MikeSHE a SMODERP byly pro tyto modely scénáře vytvářeny téměř identicky až na drobné rozdíly v infiltrační rutině a rutině pro výpočet korytového odtoku. Kvůli značně delší výpočetní době ve SMODERP byl pro tento model vybrán jen kontrolní vzorek scénářů sestavených pro MikeSHE.

Pro modelování infiltrace ve fyzikálních modelech jsou klíčovým vstupem hydraulické charakteristiky půd, zejména (a často pouze ona) nasycená hydraulická vodivost. Tato veličina je závislá na řadě půdních charakteristik, nejčastěji je vztahována k jejímu zrnitostnímu složení. Regionalizované informace o zrnitosti půd lze v ČR sice získat pouze syntézou z více datových zdrojů, zejména kvůli rozdělení půdního fondu na lesní a zemědělskou půdu. Pro modelování zde byla propojena data o zrnitosti ornice z komplexního průzkumu půd podle VÚMOP [13] a zrnitosti lesních půd vztahované k lesním typům získané od ÚHUL [14]. Propojení všech těchto podkladů není triviální úlohou a zanáší do modelování řadu nepřesností a nejistot (viz obr. 3), např. kvůli nesouladu v klasifikaci půd na lesní (USDA) a zemědělské půdě (Novákova klasifikace). Podrobný popis řešení použitého ve zmíněném projektu však jde za rámec tohoto příspěvku.

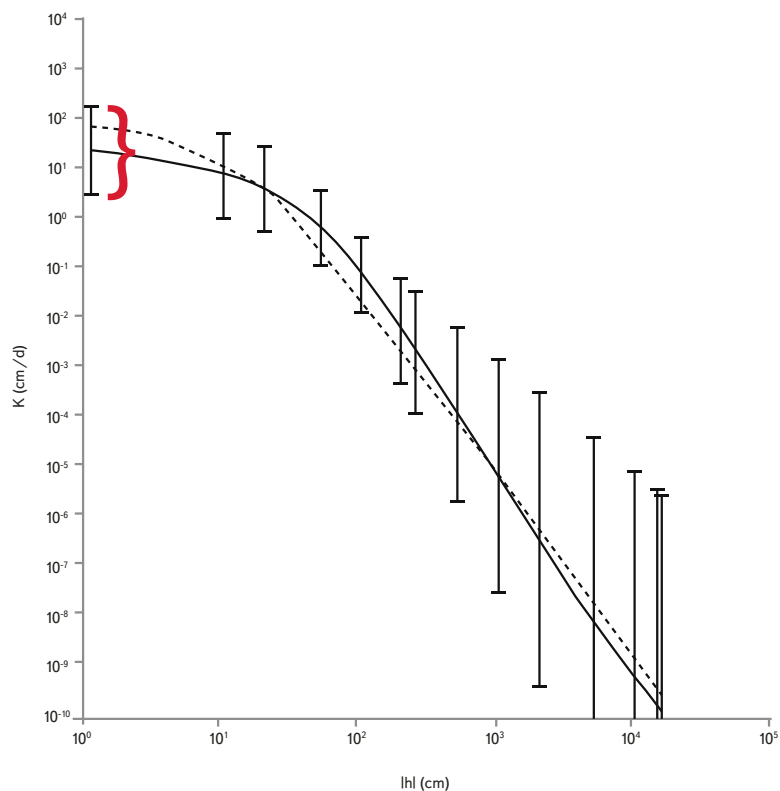
SCÉNÁŘE PRO MIKESHE A SMODERP

Vedle parametrů zátěžové srážky byly při tvorbě scénářů pro citlivostní analýzu v MikeSHE a SMODERP vybrány následující parametry:

- nasycená hydraulická vodivost půd,
- počáteční nasycení půdy,
- drsnost povrchu pro transformaci povrchového odtoku,
- povrchová retenční kapacita,
- intercepce,
- základní parametry pro transformaci v korytech.

Vstupy pro scénáře fyzikálních modelů nemohly být stanoveny na základě rozdělení skutečných hodnot v rámci ČR. Prvním důvodem je výpočetní doba vybraných fyzikálních modelů, která neumožňuje v rozumném čase výpočet řádově stovek tisíců scénářů, jako bylo později realizováno v případě HMS. Druhým a zásadnějším omezením je velmi limitovaná dostupnost vstupních dat. Například plošná data o hodnotách hydraulické vodivosti půd v ČR neexistují a plošně konzistentní databáze zrnitostního složení – její nejčastější zástupné veličiny – také ne. Proto byla citlivostní analýza pojata jako analýza kombinací několika kategorických stavů na konkrétních, již zmíněných pěti charakteristických povodích, pro něž bylo reálné v rámci projektu podkladová data shromáždit.

V rámci řešeného projektu byly na základě nejnovějších evropských půdních databází a publikovaných pedotransferových funkcí [15, 16] převzaty průměrné hodnoty nasycené hydraulické vodivosti (K_s) včetně odhadu rozptylu pro hlavní půdní druhy, které ilustruje obr. 4. Na každém z charakteristických povodí byly uvažovány tři skupiny scénářů: s průměrnou hodnotou K_s (mean0) a s dvěma krajními hodnotami danými směrodatnou odchylkou (m -STD, m +STD) pro každý půdní druh v povodí se reálně vyskytující.



Obr. 4. Střední hodnoty a směrodatné odchylky křivky hydraulické vodivosti hrubozrné půdy v závislosti na sacím tlaku podle Wösten [16]; pro hodnotu $h = 0$ odpovídá nasycené hydraulické vodivosti, patrný je rozptyl v rozsahu stovek cm/d

Fig. 4. Means and standard deviations of the $K(h)$ curve for coarse textured soils according to Wösten [16]; for the soil suction head $h = 0$ the values correspond to the saturated hydraulic conductivity; there is an obvious variance in the range of hundred cm/day

POČÁTEČNÍ NASYCENOST PŮDY

Obdobně jako v případě hydraulických vodivostí byly určeny tři varianty počátečních podmínek od nejméně po nejvíce „nasycený“ scénář IC1–3. Způsob implementace ve fyzikálních modelech byl kvůli odlišné infiltrační rutině rozdílný. V případě MikeSHE a jím použité infiltrační metody Green&Ampt byly definovány tři hodnoty počáteční vlhkosti při 10, 50 a 90 % saturace efektivního pórového prostoru a jím odpovídající hodnoty sacího tlaku na čele zvlhčení. V modelu SMODERP použité Philipova rovnice pak počáteční nasycenost zohledňuje pomocí hodnoty sorptivity. Její hodnoty byly zvoleny tak, aby modelovaný průběh infiltrace odpovídal suchému, středně a vysoce nasycenému stavu půdy.

DRSNOST POVRCHU A INTERCEPCE

Podkladem pro prostorové rozložení drsností půdního povrchu a intercepce bylo devět kategorií půdního pokryvu odvozených ze ZABAGED: orná půda, travní porosty, ostatní zeleň, vodní plochy, sady, křovinaté porosty, lesní porosty, antropogenní a zpevněné plochy, zahrady. Prostorové rozložení obou veličin bylo uvažováno neměnné, hodnoty zprůměrovány z několika zdrojů [17–19].

V případě drsnosti povrchu byly použity tři scénáře: nízká (nL), průměrná (n0) a vysoká drsnost (nH). Intercepce byla uvažována pouze ve dvou variantách: základní či vysoká (IH) a nízká, resp. nulová (IL).

PARAMETRY TRANSFORMACE V KORYTECH

Pro výpočet korytového průtoku je model MikeSHE provázán s hydraulickým modelem MikeHydro (dříve Mike1), který řeší 1D proudění na základě podrobného podélného profilu nivelety dna a příčných profilů. Podélný profil byl ve všech charakteristických povodích odvozen na základě vyhlazeného DMR4G [20] agregovaného z rozlišení 5 na 10 m. Příčné profily byly použity syntetické, v podobě složených lichoběžníkových profilů s odstupňovanými šířkami a hloubkami. Drsnost koryta byla uvažována ve dvou variantách: scénáře „FAST“ reprezentují spíše hydraulicky hladší, udržované koryto s Manningovou drsností kynety a berem $n = 0,02$, resp. $0,025$, které vodu z povodí odvádí rychleji a méně odtok transformují. Scénáře „SLOW“ oproti tomu představují přírodě bližší, méně udržované koryto s drsnostmi kynety a berem $n = 0,03$, resp. $0,035$.

V modelu SMODERP byl podélný profil vodních toků odvozen obdobně jako u modelu MikeSHE. Koryto však bylo zjednodušeno na jednoduchou obdélníkovou kynetu, jejíž Manningova drsnost byla volena rovněž ve dvou variantách a shodně s modelem MikeSHE, tedy $n = 0,02$ pro variantu „FAST“ a $0,03$ pro variantu „SLOW“.

VÝSLEDNÉ SCÉNÁŘE PRO FYZIKÁLNÍ MODEL

Při uvážení pěti charakteristických povodí, 30 srážkových scénářů, po třech variantách propustnosti půd, počátečních nasyceností půdy a povrchových drsností a při dvou variantách povrchové retence, intercepce a drsnosti pro odtok v korytech je možné sestavit celkem 32 400 scénářů. Po výpočtu reprezentativního vzorku 1 080 scénářů (všechny scénáře pro jedno povodí, jednu variantu drsnosti v ploše povodí a jednu variantu korytového odtoku) byla po předběžné analýze výsledků vyškrtnuta celá polovina zbylých scénářů s nulovou hodnotou intercepce, neboť tento parametr byl shledán jako prakticky nevýznamný. Výsledný počet scénářů po této redukci klesl na 16 740.

Scénáře pro HEC-HMS

Pro obsáhlost provedené citlivostní analýzy se tento příspěvek věnuje zejména výstupům z fyzikálních modelů. Proto zde pro úplnost bude uveden jen stručný popis tvorby scénářů pro HMS. Kromě parametrů zátěžové srážky byly v modelu HMS zohledněny následující parametry:

- hodnota CN,
- podíl nepropustných ploch v %,
- doba zpoždění,
- počáteční podmínky podle IPS,
- podíl počáteční ztráty vůči maximální pot. retenci λ .

V rámci každé třídy povodí podle provedené klasifikace byly určeny statistické parametry rozdělení hodnot CN, doby zpoždění a procenta nepropustných ploch. Tyto parametry byly použity pro náhodné generování scénářů v HMS. Počáteční podmínky byly zohledněny pomocí indexu předchozích srážek ve třech variantách IPS 1 až IPS 3. Počáteční ztráta λ je v metodě SCS-CN stanovena jako podíl maximální potenciální retence. Tento podíl byl uvažován ve třech variantách ve výši 10, 20 a 25 %. V celkovém úhrnu bylo sestaveno 45 submodelů povodí a v každém z nich vyčísleno 500 realizací. To při 30 variantách zátěžové srážky představuje 675 000 simulací.

VÝSLEDKY A DISKUSE

Výše popsané soubory scénářů daly vzniknout značně rozsáhlé sadě výstupů, jejichž plná analýza je mimo možnosti tohoto příspěvku. Zde budou proto uvedeny jen hlavní poznatky. Prezentovány jsou ve dvou podkapitolách. Nejprve je uvedeno srovnání třech použitých modelů s akcentem na identifikaci klíčových proměnných. Poté následuje podrobná citlivostní analýza výstupů z fyzikálního modelu MikeSHE se zaměřením na vliv časového průběhu srážek.

Srovnání modelů

Přímé srovnání všech tří použitých modelů je komplikované kvůli nejednoznačnému přiřazení odpovídajících scénářů mezi konceptuálním HMS a fyzikálními modely. Zátěžové stavy (parametry srážky) a charakteristická povodí byla sice použita identická, ale vztah mezi hydrologickými a dalšími parametry povodí u HMS (CN, Ia, IPS) a fyzikálních modelů (vodivosti půd, hodnoty retence a intercepce, počáteční podmínky) je možné určit pouze kvalitativně. Jako sobě odpovídající bylo vybráno 150 simulací (5 povodí × 5 dob opakování × 6 typů



Obr. 5. Odtokové výšky modelované v HMS (H), MikeSHE (M) a SMODERP (S) ve 150 základních srážko-odtokových scénářích (povodí 1 až 5, doby opakování N = 2 až 100 let, typy srážek A až F)
Fig. 5. Runoff depths modelled by HMS (H), MikeSHE (M) and SMODERP (S) in basic set of 150 scenarios (catchments 1–5, rainfall return periods N = 2–100 years and temporal patterns A–F)

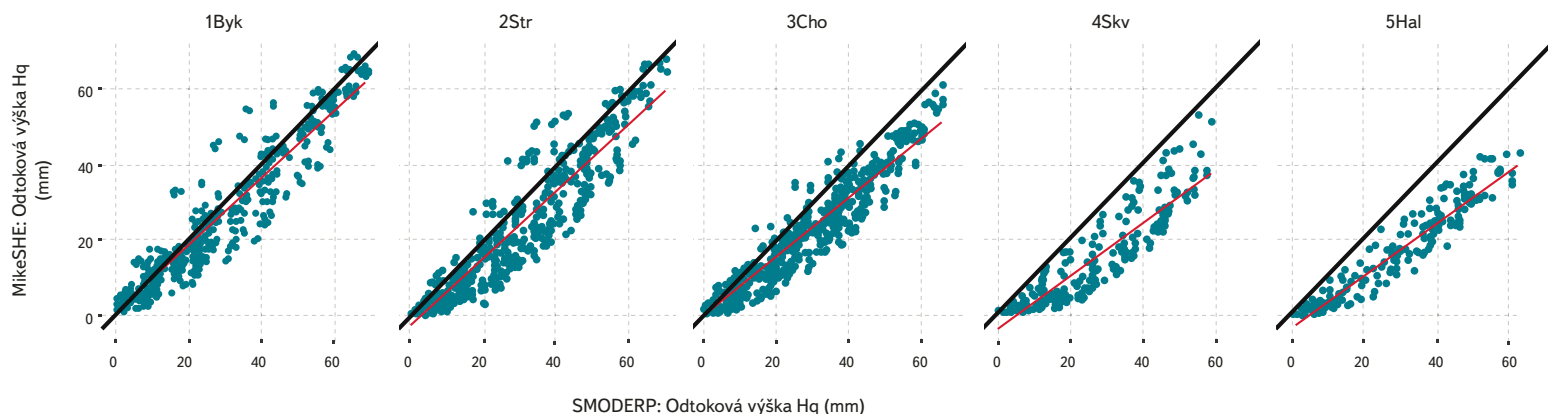
srážek), přičemž ve scénářích v HMS byl použit druhý, průměrný stav nasycení IPS2 pro odvození hodnot CN a nejčastěji používaný poměr λ pro stanovení počáteční ztráty ve výši 20 % maximální potenciální retence povodí (odvozené z CN podle platných vztahů). U fyzikálních modelů pak byl zvolen scénář s průměrnými hodnotami hydraulické vodivosti půd uváděnými v literatuře pro příslušné zrnitostní třídy, počátečními podmínkami IC2 odpovídajícími průměrnému nasycení půd, volným prostorem pro povrchovou retenci i intercepci a „rychlé“ variantě transformace korytového odtoku, která odpovídá zkapacitněným a udržovaným korytům.

Na grafech na obr. 5 jsou vyneseny odtokové výšky z referenčních scénářů na jednotlivých povodích v závislosti na době opakování a tvaru srážky. Na první pohled jsou patrné konstantní odtokové výšky z modelu HMS v rámci každé doby opakování. To potvrzuje známou skutečnost, že metoda SCS-CN není z hlediska objemu odtoku citlivá na průběh zátěžové srážky. Oproti tomu oba fyzikální modely vliv tvaru srážky zohledňují, na jednotlivé typy průběhů reagují různě. Nejvyšší odtoky generují dva nejkoncentrovanější typy A a B, nejnižší rovnoměrná srážka typu F. Typy C–E jsou relativně rovnocenné, poměrně překvapivě je ale z nich často ve vyvolaných odtokových výškách dominující typ E. Ten se z nich sice vyznačuje nejnižší maximální intenzitou, ale představuje zřejmě nepříznivou kombinaci vytrvalejší srážky s jedním intenzivnějším vrcholem.

Druhým zřetelným rysem na obr. 5 jsou konzistentně nižší odtoky v modelu HMS na převážně lesních povodích 3 a 5 oproti spíše zemědělským povodím 1, 2 a 4 (viz tabulka 2). Napříč všemi dobami opakování odtéká z povodí Chouzavé (č. 3) pětina až čtvrtina množství oproti Škvoreckému potoku (č. 4), v povodí Halounského potoka (č. 5) je to pak přibližně třetina. Oproti HMS jsou odtoky z lesnatých povodí Chouzavé a Halounského potoka v modelu MikeSHE jen o něco nižší než u prvních dvou povodí a srovnatelné se čtvrtým – ve všech třech případech jsou tedy spíše zemědělsky využívaná povodí s podílem lesních ploch do 30 %. V případě druhého fyzikálního modelu SMODERP jsou odtoky z lesních povodí ztlačenější než u prvních dvou povodí, logicky však pouze u srážek s nižší dobou opakování a zejména u intenzivních srážek typu A a B. Méně koncentrované typy a vyšší N-letosti produkují odtokové výšky srovnatelné s ostatními povodími. Obecně nízká citlivost obou fyzikálních modelů vůči zalesněným povodím je vhodným podkladem pro podrobnější vyhodnocení, které jde nad rámec tohoto příspěvku, a jeho publikaci autoři připravují. Na tomto místě uvedme zkrácené vysvětlení, že klíčovou roli zde hraje metoda výpočtu infiltrace a její parametrizace ve fyzikálních modelech. Ta v případě konzistentního určení zrnitosti půdy na lesní a zemědělské půdě žádným dalším způsobem tyto dvě domény nerozlišuje. To je rozdíl od metody SCS-CN, která implicitně pro lesní porosty předpokládá nižší CN a tedy vyšší srážkové ztráty.

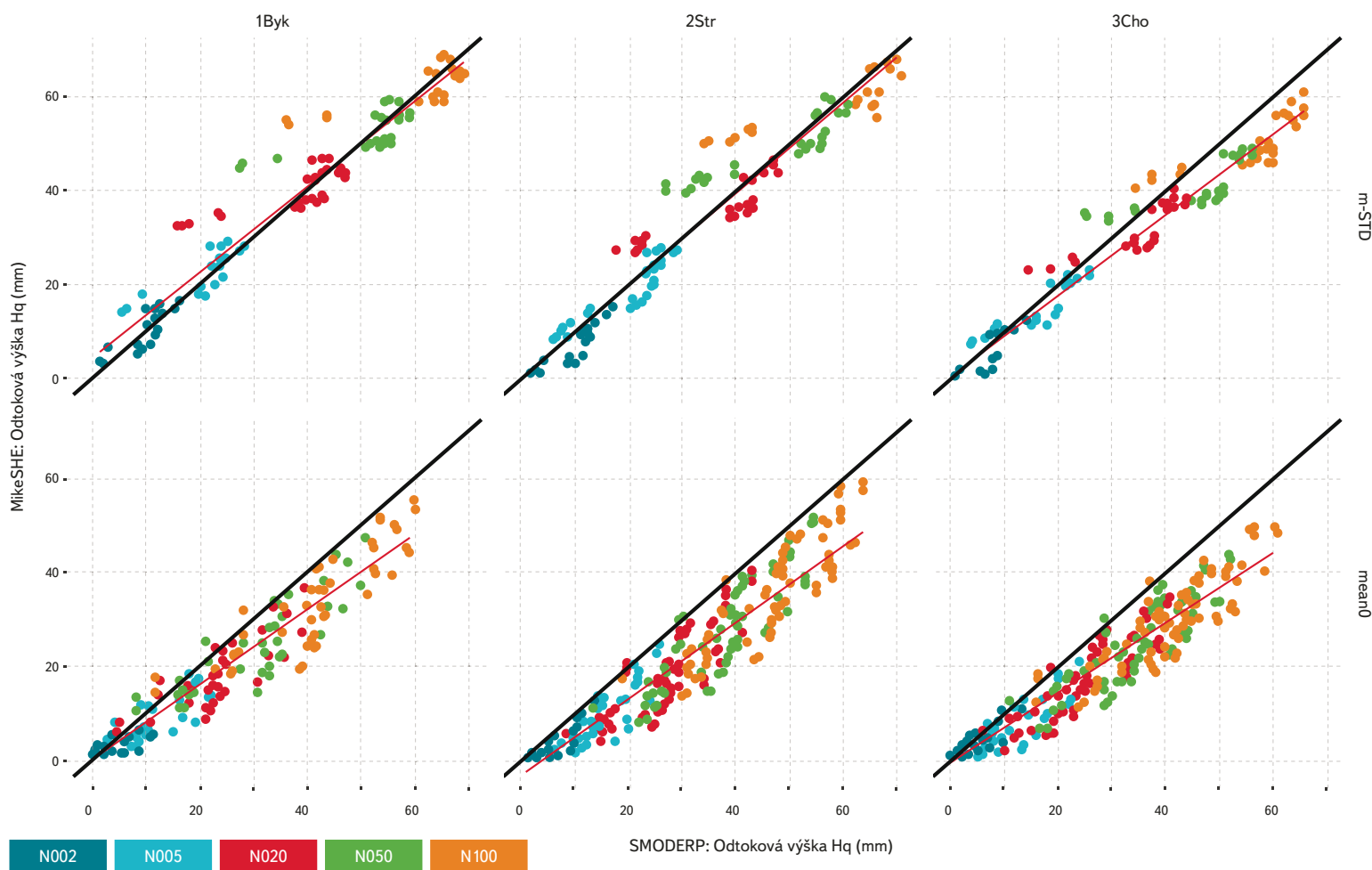
Posledním významným rysem na obr. 5 jsou disproporce mezi modely. Mimo lesní povodí dává HMS až na výjimky koncentrovaných srážek odtokové výšky vyšší než MikeSHE a relativně srovnatelné jako SMODERP. Ten oproti Mike produkuje až na naprosté výjimky vždy vyšší odtokové výšky, přestože u těchto dvou modelů je přiřazen scénář jednoznačně a v parametrizaci se liší jen u několika málo veličin. Dvou i vícenásobně vyšší odtoky ze SMODERP jsou zřejmě zejména u koncentrovaných srážek A a B a při nízkých dobách opakování (úhrnech) srážky. Díky téměř identicky definovaným scénářům je možné analýzu rozdílů v těchto dvou modelech rozšířit, přestože v modelu SMODERP byla vypočtena jen přibližně čtvrtina scénářů oproti MikeSHE. Vzájemně vnesené odtokové výšky u srovnatelných scénářů na všech pěti povodích ukazuje graf na obr. 6. Z něj jsou patrné odlišné rozdíly mezi modely napříč povodími. Téměř vždy dává SMODERP vyšší odtokové výšky na povodí Halounského potoka (224 scénářů, $R^2 = 0,91$), shoda modelů reprezentovaná červenou regresní křivkou se pak blíží k ideální (černé diagonále) vlivem rozdílného počtu identických scénářů směrem doleva k povodí Býkovického potoka (1157 scénářů, $R^2 = 0,92$).

Protože datové sady u jednotlivých povodí nejsou stejně početné, ani dílčí sady podle dalších parametrů, byly výsledky zobrazeny podle variant propustnosti půd. Dvě ze tří variant uvádí obr. 7, poslední varianta s vysoce propustnými půdami (m+STD) byla pro značně omezenou datovou sadu vyřazena. Z grafů je patrné, že velmi dobrou shodu oba modely vykazují v případě scénářů s podprůměrnými propustnostmi půd. To lze vysvětlit upozaděním rozdílů způsobených odlišnou infiltrační rutinou (Philipova metoda u SMODERP vs. G&A s redistribucí u MikeSHE). Oproti tomu u scénářů s průměrnou vodivostí půd způsobují rozdíly v modelech až dvojnásobné odtokové výšky z modelu SMODERP tak, jak bylo patrné na prvním srovnání na obr. 5. Další analýzy rozdílů naznačily podstatnou úlohu definice počátečních podmínek. Zatímco pro nasycený stav (IC3) dávaly oba modely téměř shodné odtokové výšky ($R^2 = 0,97$), průměrný stav IC2 a suchý stav IC1 byly zdrojem hlavních rozdílů ($R^2 = 0,94$, resp. 0,89). Právě počáteční podmínky je obtížné definovat v obou modelech stejně, protože i při stejných hodnotách K_s se jejich infiltrační rutiny liší dalšími parametry, mezi nimiž nelze definovat přímý vztah (sorptivita u Philipovy rovnice, sací tlak a počáteční vlhkost u G&A). Tyto rozdíly se ukazují jako dominantní například oproti časovému průběhu srážek, na něž oba modely reagují podobně, resp. jimi dané rozdíly jsou méně patrné než rozdíly způsobené odlišnostmi v metodě a parametrizaci výpočtu infiltrace.



Obr. 6. Odtokové výšky Hq z modelu MikeSHE oproti modelu SMODERP z reprezentativních povodí pro všechny N-letosti a typy srážek; černě vynesena diagonála, červeně regresní přímka

Fig. 6. Runoff depths Hq from the model MikeSHE against SMODERP from representative catchments, all rainfall return periods and temporal patterns; in black is the diagonal line (1 : 1), in red a regression line



Obr. 7. Odtokové výšky Hq z modelu MikeSHE oproti modelu SMODERP ze tří reprezentativních povodí pro všechny N-letosti a typy srážek a dvě úrovně propustnosti půd: průměrné (mean0) a snížené (m-STD); černě vynesena diagonála, červeně regresní přímka

Fig. 7. Runoff depths Hq from the model MikeSHE against SMODERP from three representative catchments, for all rainfall return periods and temporal patterns and for two levels of soil infiltrability: average (mean0) and reduced (m-STD); in black is the diagonal line (1 : 1), in red a regression line

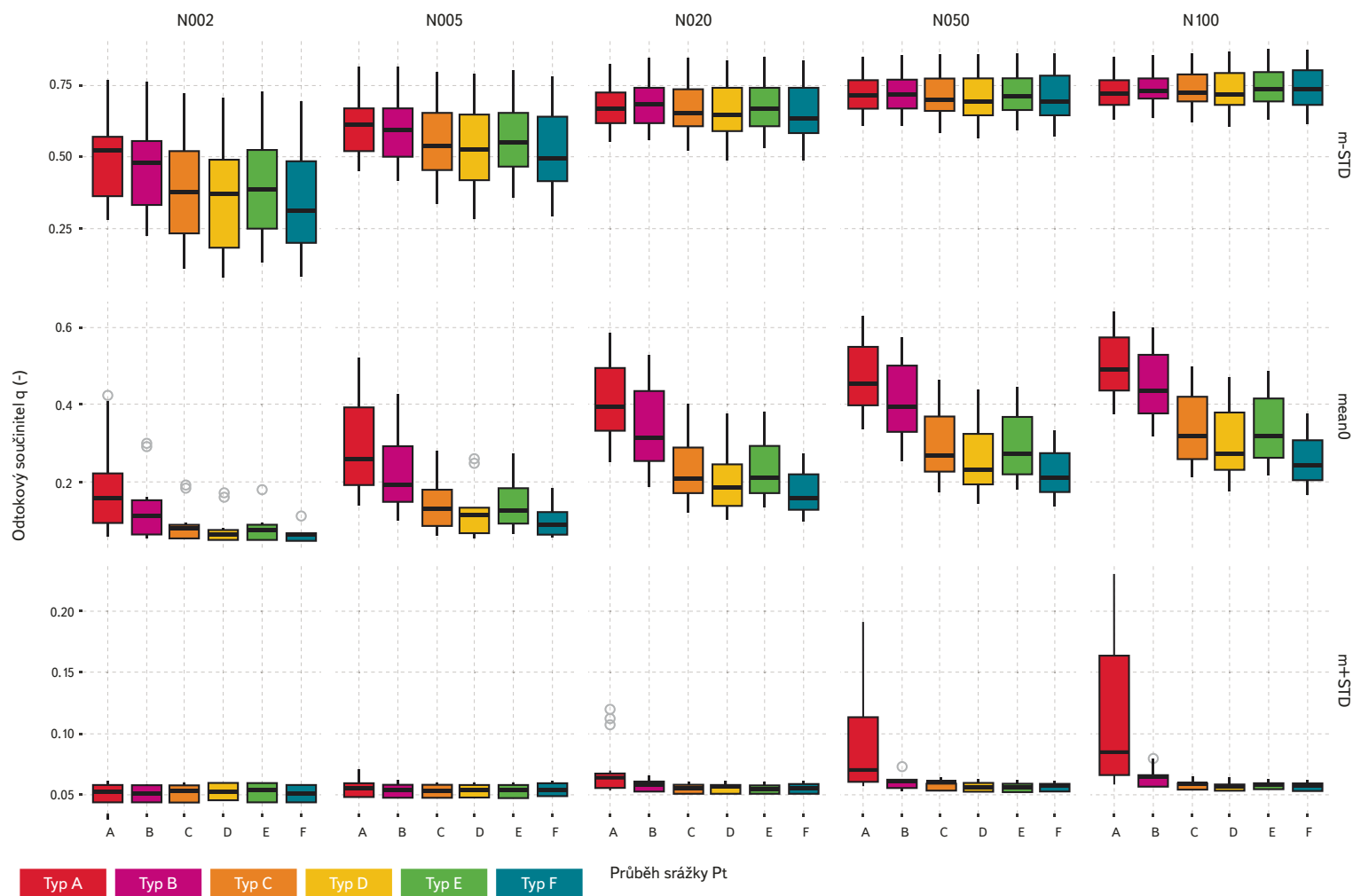
Citlivostní analýza modelu MikeSHE a typy srážek

Vzhledem k rozsáhlosti datového souboru je zde pro přehlednost uveden podrobnější rozbor výsledků jen na prvním z reprezentativních povodí – Býkovického potoka. Na obr. 8 jsou znázorněny kvartilové charakteristiky koeficientů odtoku (poměr odtokové a srážkové výšky) v závislosti na době opakování a typu srážky, v řádcích rozdělených podle stupně propustnosti půd. Z grafů je patrné, že u scénářů s nadprůměrnou vodivostí půd došlo ke generování odtoku až od doby opakování srážky 20 let a výše, a to navíc pouze v případě nejintenzivnějšího typu srážky A. Naopak scénáře s podprůměrnou vodivostí už se od doby opakování 20 let (srážka s úhrnem 62,5 mm) příliš navzájem mezi N-letostmi ani napříč typy průběhů srážek neliší, všechny generují velmi podobné poměry odtoku s mediánem kolem 70 %. To znamená, že vodivosti půd zde byly natolik malé, že spolu s povrchovou retencí dokázaly absorbovat výraznější část zátěžové srážky pouze v případě úhrnů do doby opakování mezi 5 a 20 lety. V těchto případech pak nejprůzračnější podmínky pro infiltraci představovala nejrovnoměrnější srážka typu F. Největší variabilitu lze pozorovat u typu D, což je dvouvrcholový průběh srážky s delší pauzou mezi hlavními epizodami, který poskytuje dostatek prostoru pro částečné zotavení infiltračních schopností půdy za dalších příznivých podmínek.

Největší variabilitu odtokových koeficientů v závislosti na tvaru lze pozorovat u průměrně vodivých půd (mean0). To lze vysvětlit menším významem

parametrů ovlivňující infiltraci a větším prostorem pro uplatnění dalších parametrů, jako je drsnost povrchu nebo povrchová retence. Zde jsou největší odtokové výšky a s nejvyšší variabilitou generovány intenzivními typy A a B, nejnižší odtoky s nejnižší variabilitou rovnoměrnou srážkou typu F. Průběhy typu C–E produkují relativně podobné odpovědi, opět je zde zajímavý efekt dvouvrcholové srážky typu D, která jak do rozsahu, tak mediánu poskytuje příznivější (nižší) odpovědi než rovnoměrnější srážka typu E.

Při pohledu na kulminační průtoky na obr. 9 je v případě nadprůměrně vodivých půd zřejmá podobná situace jako v případě poměrů odtoku. Protože je odtok generován jen v případě silně koncentrovaných srážek A a B, a to až od dob opakování 20 let, jsou i v případě kulminací ostatní krabicové grafy redukovány na nulovou úroveň. Zatímco u podprůměrně vodivých půd se rozpětí poměrů odtoku v rámci dané doby opakování značně překrývala napříč typy srážek, v případě kulminačních průtoků jsou jednoznačně vydělené zejména nejkoncentrovanější typy srážek A a B. Mezi tvary C–E pak není významnější rozdíl zejména ve středních hodnotách kulminací. To může mít přímý dopad do inženýrské praxe, kdy při navrhování opatření, u nichž je klíčovou charakteristikou pouze návrhový průtok, nebude nutné zahrnovat do výpočtu všechny tyto tři typy návrhových srážek. U průměrně vodivých půd jsou pak patrné podobné znaky jako u podprůměrně vodivých, až na to, že rozsahy odezev na jednotlivé tvary v rámci dané doby opakování jsou si bližší a více se překrývají.



Obr. 8. Kvartilové charakteristiky odtokového součinitele (poměrů odtoku) z povodí Býkovického potoka podle doby opakování a tvaru srážky pro tři varianty vodivosti půd
 Fig. 8. Quartile characteristics of runoff coefficients in the Býkovický stream catchment distinguished by the rainfall return period and temporal pattern for three levels of soils infiltrability

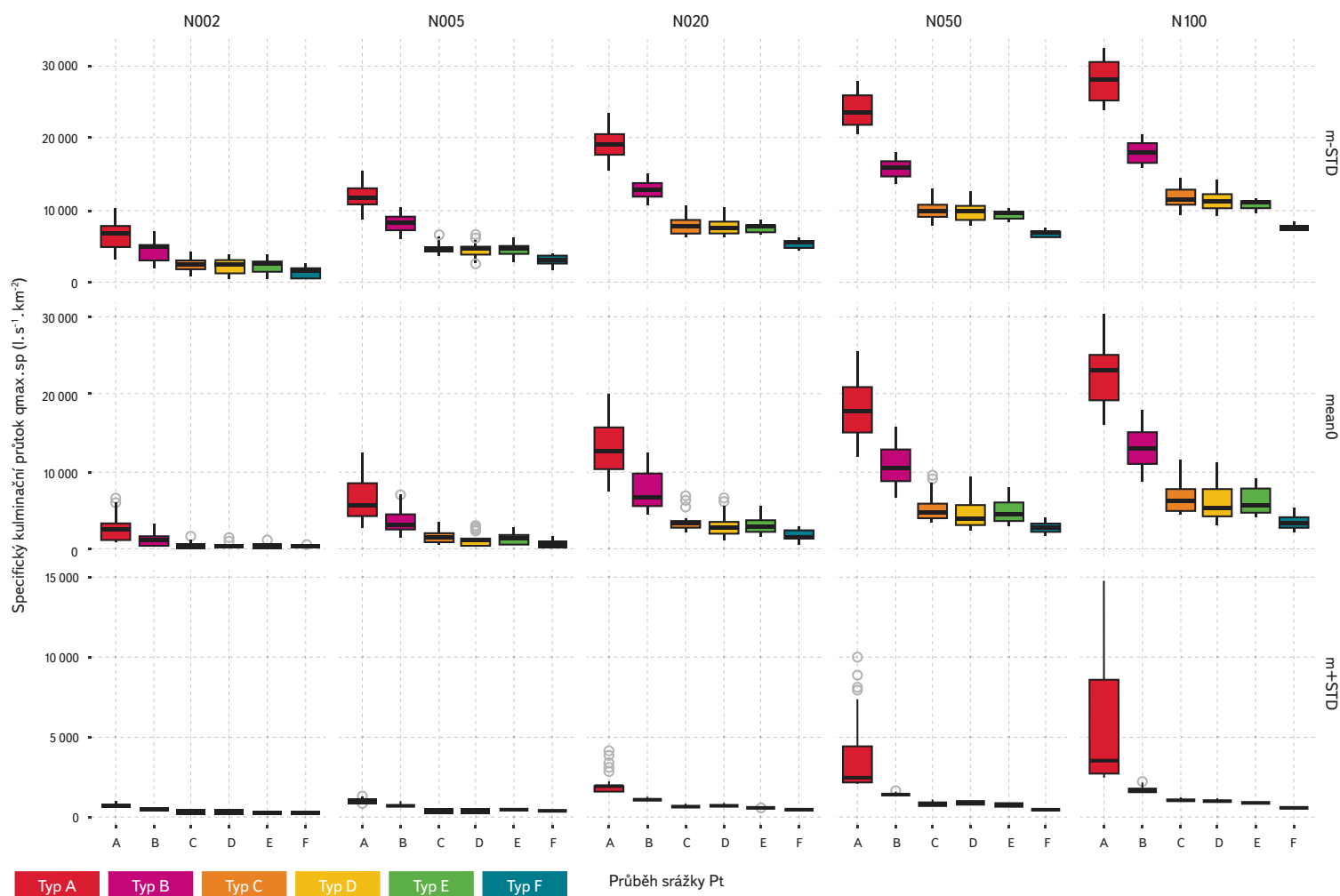
ZÁVĚR

V rámci projektu Vliv variability krátkodobých srážek a následného odtoku v malých povodích České republiky na hospodaření s vodou v krajině bylo na základě časových řad radarového měření srážek odvozeno šest zobecněných průběhů šestihodinových návrhových srážek a byly stanoveny pravděpodobnosti jejich výskytu na území ČR. Spolu s odhady šestihodinových úhrnů srážek s dobami opakování 2 až 100 let byla tato data zpřístupněna prostřednictvím webových služeb pro odbornou veřejnost. Tento článek prezentuje analýzu nejistot provedenou s cílem identifikovat citlivost vybraných hydrologických modelů na odvozené průběhy srážek v kontextu s nejistotami způsobenými dalšími faktory. V tomto příspěvku jsou prezentovány výstupy z modelů MikeSHE, SMODERP a HMS na pěti reprezentativních povodích.

Ze srovnání výstupů modelů plyne značná variabilita v odtokových výškách i kulminačních průtocích připsaná čistě výběru hydrologického modelu i pro velmi blízké definované srážko-odtokové scénáře. Model HMS se od zbylých dvou fyzikálních modelů odlišuje zejména na zalesněných povodích díky odlišným podkladům a metodám pro výpočet infiltračních ztrát. I v základních rysech podobné modely SMODERP a MikeSHE dávají až o 100 % odlišné výsledky čistě vlivem odlišné metody výpočtu infiltrace i při použití stejných

hodnot nasycené hydraulické vodivosti půd. Odlišnosti se vytrácejí ve scénářích, kde je role infiltrace méně významná, například při nasyceném stavu nebo u podprůměrně vodivých půd. Pro rozptýlení modelovaných hodnot byly odlišnosti modelu podstatnější než variabilita průběhů modelovaných srážek. Důsledkem pro praktické využívání fyzikálních modelů by tedy mělo být směřování k využití modelů aplikujících co nejpřesnější metody popisu infiltračního procesu. Komplikací a velkou výzvou pro budoucí výzkum a terénní práce jsou však sporadické a často nekonzistentní, nebo dokonce neexistující prostorové databáze podrobných hydraulických vlastností půd.

Detailní citlivostní analýza v modelu MikeSHE ukázala na závislost rozptýlení modelovaných charakteristik na průměrné úrovni vodivosti půd, a to v různé míře podle posuzované charakteristiky. U podprůměrně vodivých půd nehrál časový průběh srážky téměř žádnou roli pro odtokové výšky (respektive koeficienty odtoku), zato klíčovou roli pro kulminační průtoky. U průměrně vodivých půd byl průběh srážky shledán jako důležitý faktor pro obě odtokové charakteristiky, přičemž dominantní roli mají dva nejkonzentrovější z šesti navržených generalizovaných průběhů srážek. Mezi třemi méně koncentrovanými, přechodovými průběhy (včetně dvou průběhů se dvojitými vrcholy intenzity) nebyl zjištěn výrazný rozdíl ani u jedné z odtokových charakteristik. Poslední, nejrovnoměrnější srážka vykazovala nejmenší rozptýlení i střední hodnotu obou



Obr. 9. Kvartilové charakteristiky specifických kulminačních odtoků z povodí Býkovického potoka podle doby opakování a tvaru srážky pro tři varianty vodivosti půd
 Fig. 9. Quartile characteristics of specific peak discharges in the Býkovický stream catchment distinguished by the rainfall return period and temporal pattern for three levels of soils infiltrability

charakteristik. Tyto výsledky ukazují, že podrobný průběh krátkodobých srážek je důležitým faktorem tvorby odtoku na povodích s průměrně propustnými půdami (ve smyslu průměrných hodnot K_s pro danou zrnitostní třídu). To staví do nepříznivého světla dosud v praxi velmi oblíbené jednoduché konceptuální modely, jako je např. metoda SCS-CN, která zejména při výpočtu objemu odtoku nedokáže časovou variabilitu intenzit krátkodobých srážek zohlednit. Vzhledem ke komplikovanosti využití fyzikálních modelů to poskytuje prostor pro modifikaci těchto oblíbených a jednoduchých postupů tak, aby lépe odpovídaly fyzikálním principům tvorby přímého odtoku.

Poděkování

Příspěvek vznikl díky podpoře projektu NAZV QJ1520265 Vliv variability krátkodobých srážek a následného odtoku v malých povodích České republiky na hospodaření s vodou v krajině. Autoři děkují také recenzentům za užitečné připomínky.

Literatura

- [1] PRAX, P. *Katalogizace charakteristických dešťů pro potřeby stokování*. 1999. Brno: VUTIUM, Vysoké učení technické v Brně, 119. ISBN 80-214-1489-8.
- [2] KULASOVÁ, B., ŠERCL, P. a BOHÁČ, M. *Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní*. Technická zpráva. 2004. Praha: ČHMÚ.
- [3] MIRZAEI, M., HUANG, Y.F., EL-SHAFIE, A., and SHATIRAH, A. Application of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) approach for assessing uncertainty in hydrological models: a review. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* [online], 2015, vol. 29, No. 5, p. 1265–1273. ISSN 1436-3259. DOI: 10.1007/s00477-014-1000-6.
- [4] MÜLLER, M., KAŠPAR, M., and BLIŽŇÁK, V. Analysis of rainfall time structures on a scale of hours. 2017. Manuscript submitted for publication in Atmos. Res., under review.
- [5] PLATE, E.J. Opinions „classification of hydrological models for flood management“ [online]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, vol. 13, No. 10, p. 1939–1951. ISSN 10275606.
- [6] KAVKA, P., STROUHAL, L., WEYSKRABOVÁ, L. a kol. Variabilita krátkodobých srážek jako zdroj nejistot v hydrologickém modelování v malých povodích České republiky. In: TESAR, M. a BRYCH, K., eds. *Hydrologie malého povodí 2017*. Praha: Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, 2017. ISBN 978-80-87117-15-6.
- [7] SCHARFFENBERG, W. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual* [online]. 2015. Davis: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Dostupné z: http://www.hec.usace.army.mil/software/heh-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.1.pdf
- [8] SCS. *Tech. Rep. 55: Urban hydrology for small watersheds*, 1986.
- [9] JANEČEK, M. *Ochrana zemědělské půdy před erozí – Metodika*. 2012. Praha: Česká zemědělská univerzita Praha.

[10] KADLEC, V., DOSTÁL, T., VRÁNA, K. a kol. *Navrhování technických protierozních opatření: metodika*. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2014. ISBN 978-80-87361-29-0.

[11] HRÁDEK, F. a KOVÁŘ, P. Výpočet náhradních intenzit příválových dešťů. *Vodní hospodářství*, 1994, roč. 11, s. 49. ISSN 1211-0760.

[12] ŠAMAJ, F., VALOVIČ, Š. a BRÁZDIL, R. Denné úhrny zrážek s mimoriadnou výdatností v ČSSR v období 1901–1980. In: F ŠAMAJ, ed. *Zborník prác Slovenského hydrometeorologického ústavu*. Bratislava: ALFA, 1985, s. 9.

[13] VÚMOP. *Komplexní průzkum půd – webová aplikace* [online], [vid. 30. listopad 2017]. Dostupné z: <http://geoportal.vumop.cz/index.php?page=kpp>

[14] PLIVA, K. *Typologický klasifikační systém ÚHÚL* [online]. 1987. Brandýs n. L.: ÚHÚL. Dostupné z: http://www.uhul.cz/images/typologie/Typologicky_klasifikacni_system_UHUL_Pliva_1987.pdf

[15] TÓTH, B., WEYNANTS, M., NEMES, A., MAKÓ, A., BILAS, G., and TÓTH, G. New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *European Journal of Soil Science* [online]. B.m.: Blackwell Publishing Ltd., 2015, vol. 66, No. 1, p. 226–238. ISSN 13652389. DOI: 10.1111/ejss.12192.

[16] WÖSTEN, J.H.M., LILLY, A., NEMES, A., and LE BAS, C. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. [online]. *Geoderma*, 1999, vol. 90, No. 3–4, p. 169–185 [vid. 14. srpen 2016]. ISSN 00167061. DOI: 10.1016/S0016-7061(98)00132-3.

[17] DOWNER, CH.W. and OGDEN, F.L. *Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis (GSSHA) User's Manual*. 2002. Vicksburg: U.S. Army Corps of Engineers.

[18] ROUTSCHEK, A. *EROSION2D/3D – Kurzbedienungsanleitung EROSION2D für das Modul Hydropedologie*. 2014. Freiberg: Technische Universität Bergakademie Freiberg.

[19] SMITH, A.J. and WALKER, T.R. *Improving Accuracy in Continuous Hydrologic Modeling: Guidance for Selecting Pervious Overland Flow Manning's n Values in the San Diego Region* [online]. 2016. Vista, CA, USA: Tory R. Walker Engineering.

[20] BĚLKA, L., DUŠÁNEK, P., FIALA, R., GAMRÁT, J., KAFKA, O., PEICHL, J. a ŠÍMA, J. *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 4. generace (DMR 4G)*. 2010.

Autoři

Ing. Luděk Strouhal, Ph.D.

✉ ludek.strouhal@fsv.cvut.cz

Ing. Petr Kavka, Ph.D.

✉ petr.kavka@fsv.cvut.cz

Ing. Lenka Weyskrabová, Ph.D.

✉ lenka.weyskrabova@fsv.cvut.cz

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební

Príspevek prošel lektorským řízením.

RESPONSE VARIABILITY OF SELECTED HYDROLOGICAL MODELS TO TYPICAL TEMPORAL DISTRIBUTIONS OF SHORT-TERM PRECIPITATION

STROUHAL, L.; KAVKA, P.; WEYSKRABOVA, L.

CTU in Prague, Faculty of Civil Engineering

Keywords: temporal distribution of subdaily precipitation – design rainfall – hydrological modelling – sensitivity analysis

The article presents a selection of outcomes of a three-years' project named "Variability of Short-term Precipitation and Runoff in Small Catchments and its Influence on Water Resources Management". Its aim was to provide to the public the newly derived typical temporal distributions of subdaily precipitation, also known as design rainfalls. Next goal of the project was to analyse the impact of short-term precipitation variability on hydrological modelling and design of landscape water structures. This article is focused on selected outcomes of this analysis.

Hydrological models HMS, SMODERP and MikeSHE were included in the sensitivity analysis in order to describe the variability of runoff characteristics induced by the model structure. In general runoff depths from HMS model were found within the range of values produced by the other two physically based models, but its further assessment is hampered by the limitations of the SCS-CN method, which does not reflect the temporal distribution of input rainfall in terms of resulting runoff depths. In most aspects similar models SMODERP and MikeSHE differed in particular scenarios by as much as 100 % only due to the different infiltration routine. The deviations of these two models dissipate when initial soil conditions approach the saturated state or when the soils infiltrability is subnormal. The differences in model structure or methods proved to be more significant than the variability of rainfall temporal distribution.

Last part of presented results is focused on the detailed sensitivity analysis carried out in MikeSHE model only. The variability of modelled runoff proved to depend on the average soil infiltrability. At the same time the strength of the relationship differed for the two considered runoff characteristic. While in the conditions of subnormal soil infiltrability the rainfall temporal distribution did not play a significant role in terms of modelled runoff depths, it was a dominant factor affecting the runoff peak discharges. In contrast, in the conditions of average soil infiltrability the rainfall temporal distribution was equally important factor delimiting both runoff characteristics.