

REKONSTRUKCE PRŮBĚHU EXTRÉMNÍ POVODNĚ ZE ZÁŘÍ 2024 NA EXPERIMENTÁLNÍCH POVODÍCH V JESENÍKÁCH

RECONSTRUCTION OF THE COURSE OF THE EXTREME FLOOD OF SEPTEMBER 2024 IN EXPERIMENTAL WATERSHEDS IN THE JESENÍKY MOUNTAINS

MARTIN ADAMEC¹⁾ - TEREZA HOLÁŇOVÁ¹⁾ - KATEŘINA JURAJDOVÁ ŠTASTNÁ^{1,2)} - STANISLAV KALETA¹⁾ -
ALENA KAMÍNKOVÁ¹⁾ - IRENA PAVLÍKOVÁ^{1,2)} - PETRA ŠUTAROVÁ¹⁾ - ALEXANDRA TRLIČÍKOVÁ^{1,3)} -
JAN UNUCKA¹⁾ ✉ - MATĚJ WAGNER^{1,4)}

¹⁾Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava, K Myslivně 2182/3, 708 00 Ostrava, Czech Republic

²⁾Vysoká škola báňská - Technická Univerzita Ostrava, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava, Czech Republic

³⁾Slezská univerzita v Opavě, Matematický ústav, Na Rybníčku 626/1, 746 01 Opava, Czech Republic

⁴⁾Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 17. listopadu 1192/12, 779 00 Olomouc, Czech Republic

✉ e-mail: jan.unucka@chmi.cz

ORCID: K. Jurajdová Št'astná 0009-0003-3728-6858

P. Šutarová 0000-0002-5918-3396

I. Pavlíková 0000-0001-6409-7532

M. Wagner 0009-0000-8035-7883

ABSTRACT

The presented article presents a hydrological analysis of the extreme flood in September 2024 in the experimental catchments of the Slučí, Sokolí and Suchý brook, which are right-hand tributaries of the Černá Opava River. The interruption of monitoring and morphological changes in the riverbeds in these catchments due to the destruction of water-gauging stations forced the reconstruction of the flood using mathematical models, which is generally an obvious fact for the Jeseníky region with the greater or lesser meaning. The rainfall-runoff models HYDROG, HEC-HMS, MIKE SHE, SIMWE and the hydraulic models HEC-RAS and DHI MIKE were used for this analysis. The Mnichov hydrological station on the Černá Opava was chosen as the calibration profile. The causal precipitation belongs among the absolute measured records in the stations in several locations in the Jeseníky Mountains, and the propagation of the flood further down the Opava catchment represented an absolute maximum in the measured water level and evaluated flow for some stations. The situation was not different in the catchments of the Slučí, Sokolí and Suchý brook. The analyses also included a comparison of the results of individual rainfall-runoff models and the methods they implement, e.g. SCS-CN, Horton or Green-Ampt. The simulated hydrographs show good correlation between the measured and evaluated data, with the Nash-Sutcliffe coefficient not falling below 0.7, mostly due to the declining part of the flood hydrograph, when standard rainfall-runoff models are unable to simulate the slowdown of runoff due to water accumulation in inundation areas. For this and other reasons, it is appropriate to use a combination of rainfall-runoff and hydraulic models.

[For more information see Summary at the end of the article.](#)

Klíčová slova: povodeň 2024; experimentální povodí; Jeseníky; hydrologické modelování; GIS

Key words: flood 2024; experimental catchments; Jeseníky Mountains; hydrologic modelling; GIS

ÚVOD

V září 2024 postihly Jesenícko nejkatastrofálnější povodně v historii měření a dle dochovaných povodňových značek i jedny z nejničivějších historicky vzato. Na mnoha srážkoměrných a vodoměrných stanicích byla překročena historická maxima, v případě vodoměrných stanic došlo k jejich poškození či celkové destrukci. Koryta vodních toků byla přemodelována nejen v nižších partiích s kvarténními nezpěvnými sedimenty v podloží, ale také v pramenných částech, kde došlo na mnoha místech k erozi skalního podloží tvořeného odol-

nými metamorfovanými horninami. Detailnější informace k průběhu povodně lze nalézt v oficiální zprávě ČHMÚ a partnerských organizací (ČHMÚ 2024). V oblasti Jeseníků se nabízí srovnání s extrémní povodní z roku 1997, přičemž jakkoliv byly kulminační vodní stavy a průtoky v některých stanicích srovnatelné, z hlediska průběhu srážek a odtokové odezvy povodí byly obě povodně odlišné. Hlavním rozdílem bylo poměrně výrazné zastoupení konvektivních (přívalemých srážek) krom srážek stratiformních (regionálních) v září 2024, přičemž v roce 1997 naprosto dominoval stratiformní typ srážky. Povodňové vlny byly proto v roce 2024 charakteristické rychlým ná-

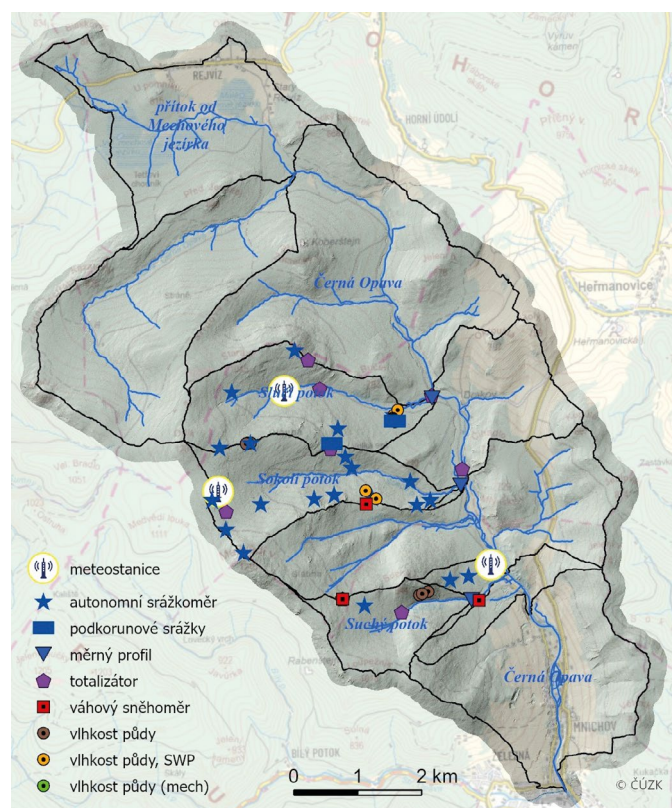
během a v horních částech povodí – také ve srovnání s rokem 1997 – rychlejším poklesem. Dalším negativním průvodním jevem je přerušení měření vodních stavů (většinou z důvodu mechanického posunu čidel nebo jejich pohřbení pod povodňovými sedimenty) či úplné ukončení měření z důvodu destrukce celé vodoměrné stanice. Tento efekt se bohužel nevyhnul ani Černé Opavě a experimentálním povodím Suchého, Sokolího a Slučího potoka (Obr. 1). Jediným validovaným mechanismem, který umožní rekonstruovat průběh povodně, jsou matematické modely, konkrétně srážkoodtokové a hydrodynamické (srovnej např. HAAN et al. 1994; WAGENER et al. 2004; DI BALDASSARRE 2012). Matematické modely byly využity prakticky pro rekonstrukci průběhu povodně ve všech vodoměrných profilech ČHMÚ a Povodí Odry v povodích Opavy, Bělé, Moravice, Osoblaha, Horní Moravy a dalších páteřních toků Jesenicka, přičemž coby vstupní srážková data byly použity tzv. kombinované odhady srážek (radar a srážkoměry, viz Obr. 2). Kalibrované srážkoodtokové a hydrodynamické modely byly využity i pro rekonstrukci průběhu povodně na povodích Suchého, Sokolího a Slučího potoka.

Základní hydrologická charakteristika pilotních povodí

Povodí Černé Opavy (2-02-01-0030) bylo v hlavním údolí prakticky od Rejvízu po Vrbno pod Pradědem historicky poměrně intenzivně hospodářsky využíváno, přičemž provoz hamrů, pil a nejspíše

i olejných mlýnů coby přidružené výroby probíhal od středověku až do útlumu v 19. století díky postupnému vzniku velkých hutních podniků na Ostravsku a v okolí. V současnosti je jedním z nejcennějších povodí jak z přírodovědného hlediska, tak i z pohledu ochrany přírody. I v kontextu lesnictví a lesnické hydrologie představují maloplošná chráněná území v tomto povodí cenné plochy, konkrétně to jsou národní přírodní rezervace Rejvíz s horskými rašeliništi a blatkovými porosty a přírodní rezervace Suchý vrch s kamenným mořem z bloků spodnodevonského křemence a reliktními bory. Průměrná nadmořská výška povodí je 799 m n. m., průměrná sklonitost povodí je 11°. Dle Quittovy klasifikace povodí náleží k oblastem CH4, CH6 a CH7 (WEISSMANNOVÁ et al. 2004). Orientace hlavní údolnice Černé Opavy stejně jako prakticky celého povodí je ve směru SZZ – JJV. Povodí náleží do geomorfologických podcelků Medvěďská hornatina (4c-7b), Rejvízská hornatina (4c-6b) a Hynčická hornatina (4c-6c). Regionálně-geologicky patří území do desenské klenby silezika, na povodí převládají metamorfované horniny (muskovitické a biotitické fylity, metagranitoidy, kvarcity, amfibolit), doprovázené také výskytem vulkanitů. V oblasti Zámeckého vrchu se nalézají blastomylonity zmiňované desenské skupiny. V masívu Jeleního vrchu nalezneme pak i výchozy krystalického vápence vrbenské skupiny. Zde se již geologicky a také geomorfologicky projevuje rozhraní Hrubého a Nízkého Jeseníku a východně od této linie se v okrajových partiích povodí objevují paleozoické droby, břidlice a prachovce, které jsou už typické pro kůl Nízkého Jeseníku. Kvartérní sedimenty jsou výrazněji vyvinuty zejména při úpatí svahů, v okolí vodních toků a v oblasti rašelinišť Rejvízu (Velké a Malé mechové jezírko). Krom vodoměrných stanic v závěrových profilech experimentálních povodí se v povodí Černé Opavy vyskytuje vodoměrná stanice Mnichov (DBČ 258100), která byla zářijovou povodní taktéž výrazně poškozena. V rámci hydrogeologické rajonizace ČR povodí náleží k rajónu 6431 – Krystalinikum severní části Východních Sudet, jihovýchodní část. Transmisivita kolektorů se v území pohybuje mezi 1 až cca 50 m².d⁻¹, náleží tedy do tříd transmisivity III (střední transmisivita) a IV (nízká transmisivita), specifická vydatnost pak mezi 1 až 5 l.s⁻¹ pro formace s puklinovým a prūlinovým typem proudění. Těsně za rozvodnicí Černé Opavy jsou taktéž v provozu prameny v rámci monitorovací sítě podzemních vod ČHMÚ, jedná se o PO4008 (Bublavý pramen u Rejvízu), PO4015 (Horní Údolí) a PO0509 (Heřmanovice – Roviny). Z půd jsou opět nejvíce zastoupeny kambizemě, které ve vyšších polohách přecházejí v podzoly, v nižších partiích údolnic hlavních vodních toků jsou fluvizemě, v místech výskytu rašelinišť pak organozemě typické a glejové, na které navazují kyselé pseudoglejové kambizemě a ojediněle i samotné gleje (WEISSMANNOVÁ et al. 2004). U půd zcela dominuje kyselá reakce a relativně malá sorpční kapacita. Z lesních dřevin pak dominují smrk ztepilý (*Picea excelsior*) a místy i buk lesní (*Fagus sylvatica*). V okolí Rejvízu nalezneme i borovici blatku v okolí Velkého a Malého mechového jezírka (*Pinus uncinata*) a také břízu karpatskou (*Betula carpatica*) na rašeliništích v povodí Bublavého potoka. Okraje vrchovišť již přechází v rašelinou smrčinu (*Sphagno-Piceetum*). Dále je místy k nalezení i jesenícký fenotyp modřínu opadavého (*Larix decidua*). V rámci lesnické typologie jsou nejvíce zastoupeny živné řady S a B, dále pak v okolí vodních toků lužní řada L a kyselá řada K v okolí Rejvízu. Ambulantní měření průtoků a objemových půdních vlhkostí probíhá v pravidelných intervalech nebo při výskytu mimořádných odtokových situací (sucho, výraznější změna vodních stavů apod.).

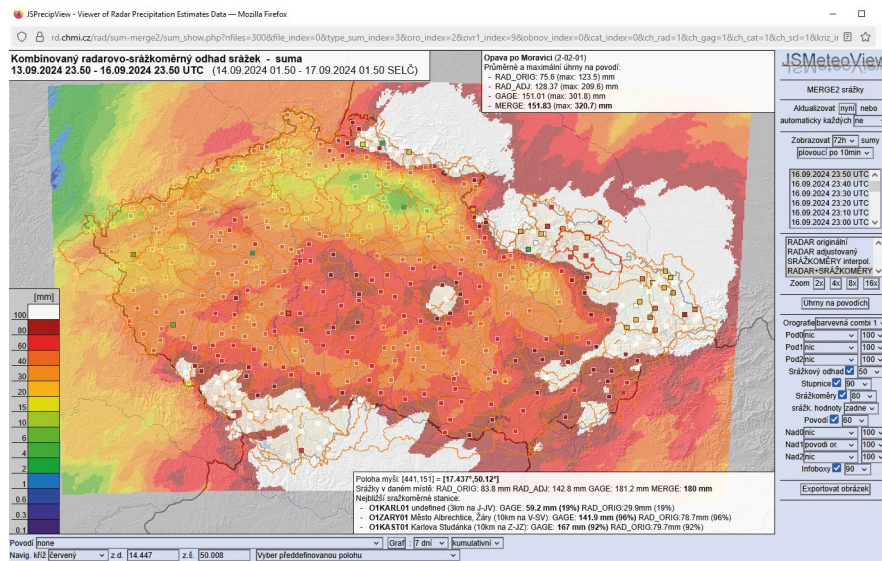
Hydrologické charakteristiky závěrových profilů jednotlivých povodí jsou uvedeny v tabulce 1.



Obr. 1.
Přehledová mapa lokalizace monitorovací sítě na pilotních povodích.
Fig. 1.
Monitoring network on pilot catchments localization map.

Tab. 1.
Základní hydrologické charakteristiky povodí Suchého, Sokolího a Slučího potoka.
Basic hydrologic characteristics of the catchments.

N-leté Q 2-02-01-0030-00-0-60/Year Return Period 2-02-01-0030-00-0-60										
Vodní tok/ Stream name	Profil/Profile	Plocha povodí [km ²]/ Catchment area [sq. km]	Q _A	1	2	5	10	20	50	100
Suchý potok	měřicí bod/measurement profile	1,90	0,032	0,643	1,62	3,11	4,35	5,69	7,62	9,19
Sokolí potok	měřicí bod	3,98	0,073	1,04	2,63	5,03	7,05	9,22	12,3	14,9
Slučí potok	měřicí bod	4,09	0,075	1,04	2,63	5,03	7,05	9,22	12,3	14,9
M-denní Q 2-02-01-0030-00-0-60/Days of Occurrence 2-02-01-0030-00-0-60										
			30	60	90	120	150	180	210	
Suchý potok	měřicí bod	1,90	0,060	0,043	0,036	0,030	0,026	0,024	0,022	
Sokolí potok	měřicí bod	3,98	0,136	0,099	0,081	0,069	0,06	0,055	0,050	
Slučí potok	měřicí bod	4,09	0,139	0,101	0,083	0,070	0,062	0,056	0,051	
			240	270	300	330	355	364		
Veškeré průtoky jsou uvedeny v m ³ .s ⁻¹			0,015	0,013	0,0093	0,0069				
			0,034	0,029	0,021	0,016				
			0,034	0,030	0,022	0,016				



Obr. 2.
Kombinované odhady (radar + srážkoměry) srážek na povodí Opavy po soutok s Moravicí.
Fig. 2.
Combined precipitation estimations (radar + gauges) on the Opava basin up to the confluence with the Moravice River.

MATERIÁL A METODIKA

Již v úvodu článku bylo uvedeno, že se jedná o rekonstrukci proběhlé extrémní povodně s využitím matematických (či hydrologických) modelů s maximálním využitím dostupných hydrologických dat (bylo-li možné je nějakým způsobem získat z poškozené staniční sítě). Dalším zásadním faktorem je i fakt, že se jednalo o tak extrémní hodnoty výšek hladin a průtoků, že i samotné odvození konzumpční křivky (neboli měrné křivky průtoků, dále MKP) nebylo možné bez hydrotechnického výpočtu v hydraulickém modelu za využití dat digitálního modelu reliéfu (DMR) a povrchu (DMP) spolu s vlastním geodetickým zaměřením profilů. Měření průtoků během samotných kulminací znemožňovala nedostupnost povodí (stržené mosty, poškození komunikací, vývraty v porostech).

Na úrovni samotného srážkoodtokového modelování byly využity následující programové prostředky:

1. Srážkoodtokové modely HEC-HMS, MIKE SHE, HYDROG a SIMWE (dále jen SO modely).
2. Hydraulické modely HEC-RAS a DHI MIKE 11/21c (dále jen HD modely).

SO modely byly použity v semidistribuovaném (HEC-HMS, HYDROG) a plně distribuovaném režimu (HEC-HMS, MIKE SHE, SIMWE). HD modely pak v 1D (koryta toků) a 2D (inundační území) řešení. Prakticky veškerá příprava dat pro modely (tzv. preprocessing dat) probíhala v prostředí GIS (ESRI ArcMap, SAGA GIS, GRASS GIS). V tomto ohledu už kvalita (hydrologicky korektní DMR) a přesnost DMR přímo ovlivní výsledky simulace distribuovaného SO a 1D/2D HD modelu.

Více typů modelovacích nástrojů bylo zvoleno z hlediska možností výběru metod pro hydrologickou a hydraulickou transformaci ovzdušné srážky na povodí (srv. BEDIANT et al. 2013 nebo UNUCKA 2014). Je zřejmé, že metoda SCS-CN (HEC-HMS) bude jinak simulovat odtokovou ztrátu na povodí ve srovnání s metodou Green-Ampt (HEC-HMS), Richardsovou metodou (MIKE SHE) nebo metodou Hortona (HEC-HMS, HYDROG). Proto byly všechny tyto metody použity pro simulaci odtokové odezvy také na povodí Černé Opavy. Kvalitní softwarové nástroje pro hydrologické modelování také proto nabízejí výběr metod v rámci řešeného projektu, přičemž nejpokročilejší nabídka má v tomto ohledu software HEC-HMS. SO modely HYDROG a HEC-HMS se používají v operativní Hlásné a předpovědní povodňové službě (HPPS ČR) zajišťované ČHMÚ ve spolupráci s podniky Povodí. Představují tedy nejen v tomto ohledu modely verifikované a validované každodenním operativním provozem. Model HEC-HMS je takto využíván bez nadsázky celosvětově a představuje průmyslový standard FEMA / NFIP. Model MIKE SHE je na ČHMÚ využíván pro studie odtokových poměrů, studie dopadů změny klimatu či hydroekologické modelování (tedy i v kontextu lesnické hydrologie). Pro svou komplexnost se pro operativní provoz a hydrologickou prognózu ve srovnání s modely HEC-HMS a HYDROG příliš nehodí. Model SIMWE pro GRASS GIS představuje zajímavou alternativu k MIKE SHE v situacích, kdy dominuje povrchový odtok a hypodermický a základní odtok lze parametrizovat či zanedbat. Proto jsou pro tento model typickou úlohou povodně typu flash floods.

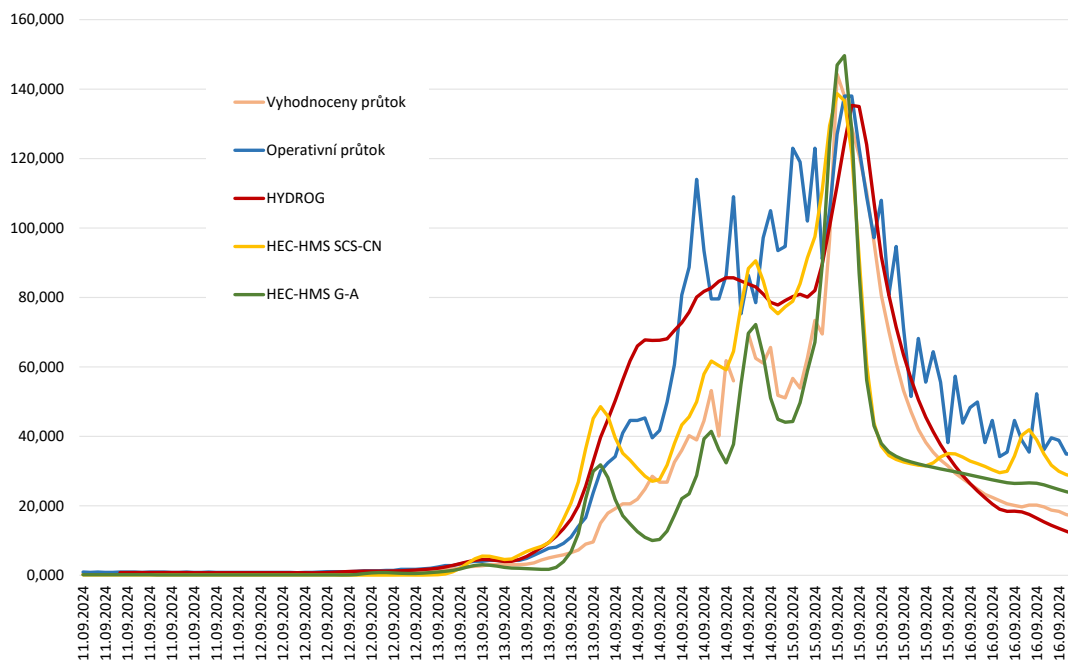
Hydraulické (popř. hydrodynamické) modely HEC-RAS a DHI MIKE se na ČHMÚ používají k hydrotechnickým výpočtům a studiím. Oba nástroje představují opět validovaný software a průmyslové standardy FEMA / NFIP. Jejich potenciál je natolik podobný, že jsou

analýzy prováděny v obou softwarových produktech pro snížení nejistoty v závislosti na použité metodě simulace proudění v 1D a 2D a následně chyb v odvození MKP, průběhu hladin či rozsahu záplavových území. Všechny doposud zmiňované matematické modely byly využity i pro samotné vyhodnocení povodně na zasažených povodích v rámci celé ČR.

Výběr konkrétní metody pro simulaci odtokové odezvy na příčinou srážku ovlivní výsledky ve srovnání s nekvalitními vstupními daty sice méně výrazně, přesto je i zde vhodné vybrat metody, které jsou schopny hydrologickou a hydraulickou transformací simulovat uspokojivě a s respektem k fyzikálnímu podstatě simulovaného procesu. V tomto ohledu se liší výběr metod u operativních prognózních modelů (HYDROG, HEC-HMS) a modelů pro komplexní studie odtokových poměrů a hydrologické bilance povodí (HEC-HMS, MIKE SHE). Typickým příkladem je simulace vlivu intercepce a evapotranspirace. Zatímco v lesnické hydrologii se jedná o ty nejzásadnější procesy z hlediska studia dynamiky porostů a povodí, u operativní hydrologické prognózy jsou tyto procesy zahrnuty do odtokové ztráty a hlavní důraz je kladen na odtok v korytech toků a z ploch povodí. Obdobně je možné přistoupit i k simulacím infiltrace a perkolace, které lze modely MIKE SHE a HEC-HMS řešit komplexně hned v několika vertikálních vrstvách (např. Richardsova rovnice či různé modifikace metody Green-Ampt), oproti tomu metoda SCS-CN se maximálně soustředí na odtokovou výšku po odečtu odtokové ztráty bez fyzikálního řešení infiltrace či perkolace (viz BEDIANT et al. 2013 nebo zásadní publikace k metodám řešení odtokové ztráty MISHRA, SINGH 2003). Pro využití těchto robustních metod však hovoří faktor nedostupnosti či nejistoty vstupních dat, kdy využití komplexních metod simulace v kombinaci s nekompletními či absentujícími daty nepřináší žádnou přidanou hodnotu (viz např. SHI et al. 2019 či BEVEN 2012). Pro řešení odtokové ztráty a potažmo infiltrace byly tedy paralelně využity metody SCS-CN a Green-Ampt (HEC-HMS), Hortona (HYDROG) a Richardse (MIKE SHE), pro evapotranspiraci metoda Priestley-Taylor, pro 1D a 2D simulaci odtoku ve všech SO modelech metoda kinematické vlnové aproximace, pro podzemní odtok recesní metoda (HEC-HMS) a metoda lineární nádrže (HEC-HMS, HYDROG) či komplexní simulace metodou konečných prvků v MIKE SHE (hydrogeologický model MODFLOW). Pro simulaci odtoku v HD modelech byla využita Bernoulliho rovnice (HEC-RAS) nebo dynamická vlnová aproximace (DHI MIKE). Jedním z dalších podstatných aspektů pro výběr metod zvláště u semidistribuovaných SO modelů je i fakt, že ve srovnání s recesní metodou (de facto metodou separace hydrogramu) je metoda lineární nádrže schopna simulovat zadržení podzemní vody na povodí, byť ve srovnání s metodou MODFLOW u MIKE SHE ne na fyzikálním základu a parametrech hydrologických struktur, ale v rámci časových konstant virtuálních nádrží.

VÝSLEDKY

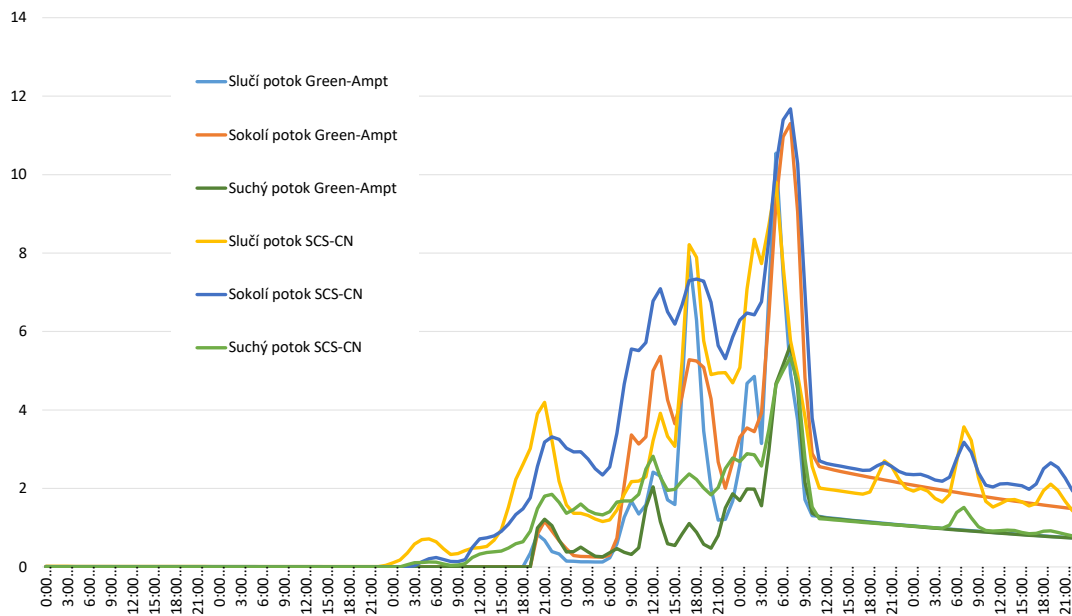
Obrázky 3 a 4 ukazují výsledky simulací SO a HD modelů a z nich odvozené hodnoty kulminačních průtoků na zájmových profilech Suchého, Sokolího a Slučího potoka spolu s profilem Černá Opava / Mnichov. Dále pak simulace změn objemových půdních vlhkostí a statistické zhodnocení výsledků. Tabulka č. 2 a obrázek 5 pak shrnují výsledky srážkoodtokových modelů z hlediska jejich přesnosti ve srovnání s vlnou rekonstruovanou z měřených staničních dat dle standardizovaných hydrologických koeficientů (Nash-Sutcliffe apod.).


Obr. 3.

Výsledky simulací modelů HYDROG a HEC-HMS (varianta SCS-CN a Green-Ampt) pro profil Černá Opava / Mnichov ve srovnání s operativními staničními daty a vyhodnoceným průtokem [m³/s] ve stanici.

Fig. 3.

Simulation results of the rainfall-runoff models HYDROG and HEC-HMS (SCS-CN and Green-Ampt modification) in the gauging profile Černá Opava / Mnichov compared to the operative and validated values of measured discharge [m³/s].


Obr. 4.

Výsledky simulací kulminačního Q [m³/s] pro závěrové profily Slučího, Sokolího a Suchého potoka.

Fig. 4.

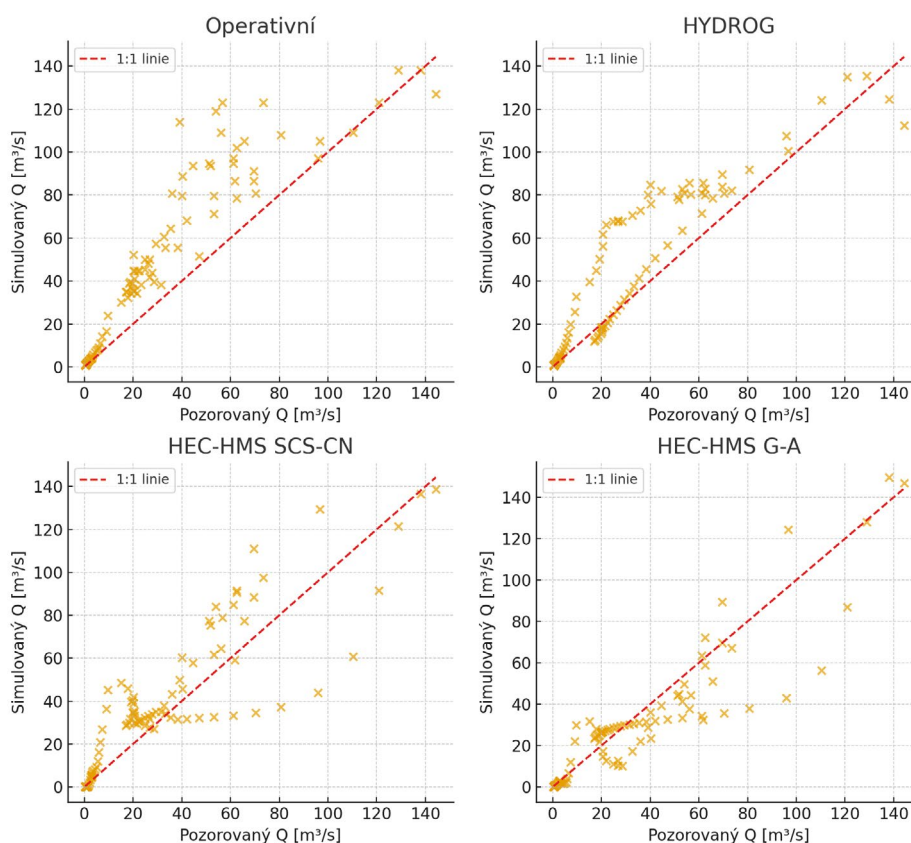
Simulation results of the culminating discharge [m³/s] for the closing profiles of the monitored brooks.

Tab. 2.

Statistické zhodnocení výsledků SO modelů pro závěrový profil Černá Opava / Mnichov. Srovnání měřených dat s daty simulovanými modely HYDROG a HEC-HMS v různých variantách. Zkratky NSE a KGE označují koeficienty Nash-Sutcliffe a Kling-Gupta vyjadřující odchylky měřených a simulovaných dat.

Statistical evaluation of the rainfall-runoff models results for the closing profile Černá Opava / Mnichov. Comparison of the measured data with simulation results of models HYDROG and HEC-HMS in particular modifications. The abbreviations NSE and KGE refer to the Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta coefficients, which express the deviations between measured and simulated data.

	NSE	KGE	Bias [%]	RMSE	R ²
Operativní	0.570238886	0.397130725	52.31209842	20.69180387	0.861625268
HYDROG	0.735236384	0.605586068	34.37247675	16.24104415	0.866618778
HEC-HMS SCS-CN	0.775019378	0.798093056	17.10217555	14.97122548	0.811831427
HEC-HMS G-A	0.858086935	0.840924285	-11.81552445	11.89038685	0.866379176

**Obr. 5.**

Statistické zhodnocení výsledků SO modelů pro závěrový profil Černá Opava / Mnichov. Srovnání měřených dat s daty simulovanými modely HYDROG a HEC-HMS v různých variantách.

Fig. 5.

Statistical evaluation of the rainfall-runoff models results for the closing profile Černá Opava / Mnichov. Comparison of the measured data with simulation results of models HYDROG and HEC-HMS in particular modifications.

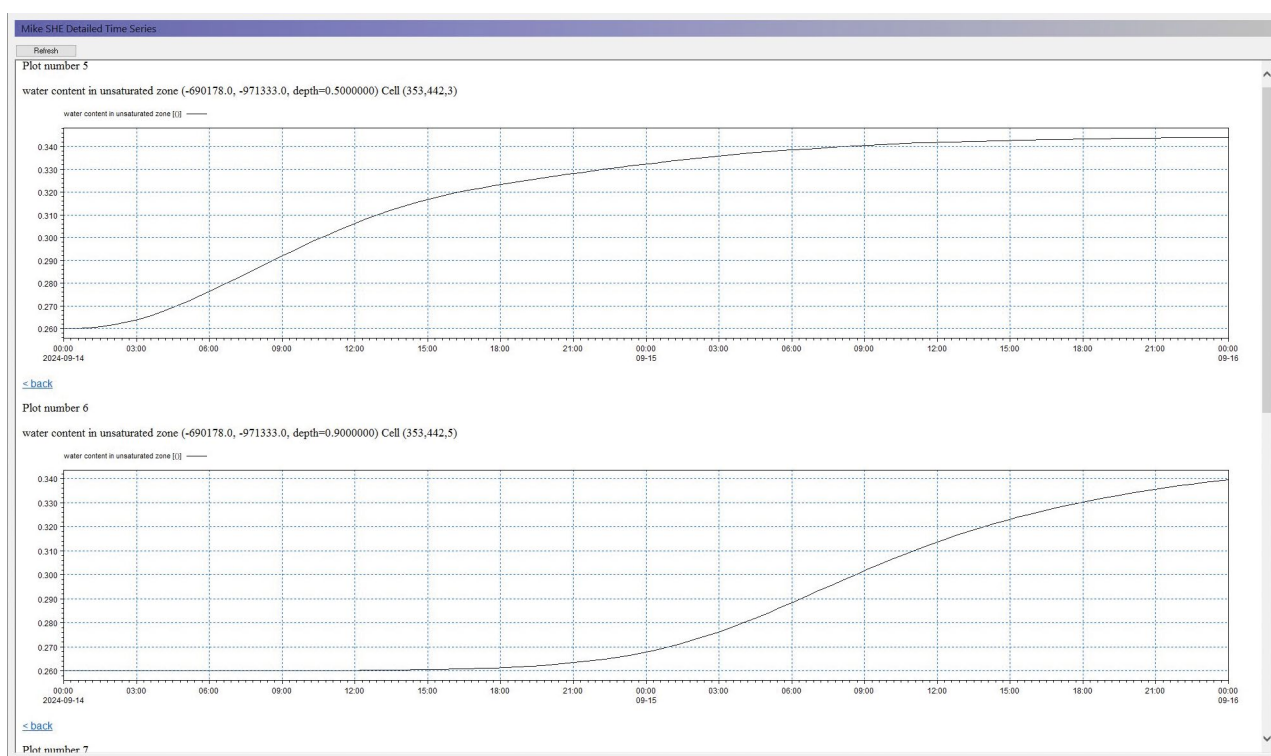
Na obrázku 6 jsou prezentovány grafy vlhkosti půdy v různých hloubkách (10 cm a 50 cm) během měřicího období. Dosahované hodnoty vlhkosti se pohybují přibližně od 14 % do 35 % objemové vlhkosti (v závislosti na grafu), s výraznými výkyvy odpovídajícími srážkovým událostem – minimálně kolem 5–10 % v suchých obdobích a maximálně až 30–35 % po dešti. Tyto hodnoty ukazují typický průběh pro středoevropské podmínky v monitorovaném prostředí. Na obrázku č. 7 je pak znázorněna schematizace a simulace modelu HEC-HMS, přičemž v pravém dolním rohu jsou patrné průběhy simulovaného hydrogramu (modrá křivka a hydrogramu měřených dat (černá křivka)).

Po SO modelech následovaly simulace v HD modelech HEC-RAS a MIKE 11/21, kdy byly simulovány a šetřeny průběhy hladin, profilových rychlostí a rozsahy rozlivů pro jednotlivé povodňové kulminační hydrogramy. Pro Slučí a Sokolí potok v bezprostředním okolí staničních profilů (cca 30m úsek) vychází zvýšení hladiny a vodního stavu mezi hodnotou 140 až 170 cm, což je v realistické relaci k parametrické měrné křivce průtoků a geodetickému zaměření stop povodně a dosahů hladin. Na Suchém potoce díky morfologii koryta a skalnímu podloží nedošlo k zásadnější přeměně koryta, rovněž kulminační průtok je vzhledem k ploše povodí zhruba poloviční. Rovněž lze předpokládat, že verifikace a kalibrace modelových výstu-

pů v celkovém závěrovém profilu Černá Opava / Mnichov je dalším kontrolním mechanismem pro modelové výstupy na dílčích povodích Slučího, Sokolího a Suchého potoka.

DISKUSE

Jednou z hlavních otázek, kterou se zabýval projekt NAZV DEFOREST, byl vliv kalamitní těžby po gradaci lýkožrouta smrkového na změnu hydrologické bilance a odtoku z lesních povodí Jeseníků. Již v publikacích KANTOR et al. (2003) nebo HEWLETT (1982) je zdůrazňována lesní půda coby zásadní transformační faktor ovzdušné srážky na odtok. Extrémní povodně jsou v tomto ohledu specifickým, protože v momentě, kdy dochází k překročení retenční či infiltrační kapacity půdy, propaguje se dominantně povrchový odtok. Jinak řečeno, při lokálním konvektivním zesílení srážek nehraje ukazatel předchozích srážek (popř. předchozích vláhových podmínek u metody SCS-CN) výraznější roli z hlediska místa retence odtoku. Kombinace dlouhodobé regionální (stratiforní) srážky s lokálním konvektivním zesílením pak vyvolává velké objemy odtoku z povodí a hydrogramy s více vrcholy. Procesy v lesních porostech, jako jsou intercepce a transpirace, pak již zásadnějším způsobem kulminační průtok a objem odtoku neovlivní (z monografií viz HEWLETT 1982; KANTOR et al. 2003;

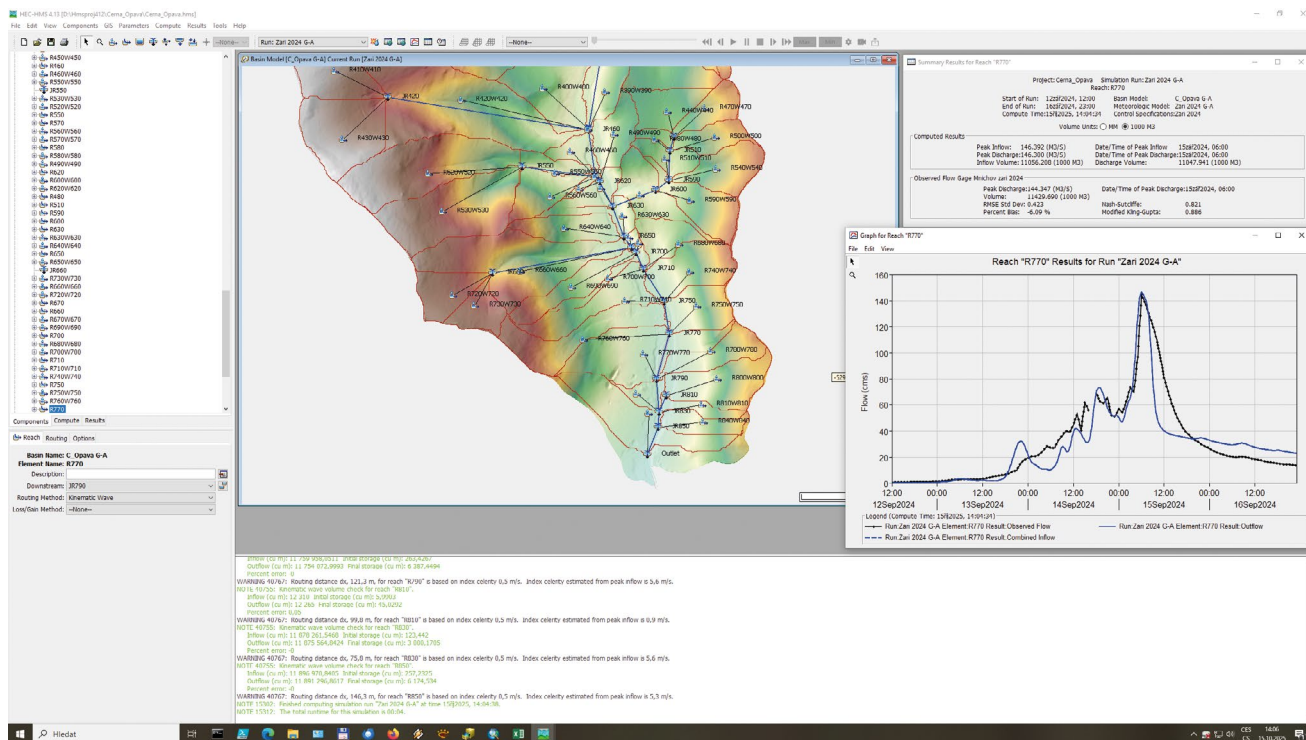


Obr. 6.

Výsledky simulace objemové půdní vlhkosti modelem MIKE SHE na Slučím potoce v hloubce 0,1 a 0,5 m pod úroveň terénu.

Fig. 6.

Results of the volumetric soil water content simulated by MIKE SHE model on the Slučí brook in 0.1 and 0.5 depth below the terrain.



Obr. 7.
 Výsledky simulace pro profil Černá Opava / Mnichov v prostředí modelu HEC-HMS.
Fig. 7.
 Simulation results in Černá Opava / Mnichov gauging profile displayed in HEC-HMS interface.



Obr. 8.
 Koryto Sokolího potoka nad staničním profilem po průchodu povodně (foto Jan Unucka, 13. listopadu 2024).
Fig. 8.
 Streambed of on the Sokolí brook above the gauging profile after the flood waters passage (photo Jan Unucka, November 13, 2024).

CHANG 2006). Zajímavý pohled z hlediska limitních srážek na lesních povodích přináší článek LI et al. (2024), kdy z výsledků měření a simulací v SO modelu nelze jednoznačně stanovit hodnotu, nad níž se propaguje povrchový odtok. Z monografií, které se věnují této problematice, lze zmínit především práci KIRKBY (1978). V kontextu simulace srážkoodtokového procesu nejen na lesních povodích, a to i z hlediska volby nástrojů a metod, lze zmínit monografie BEVEN (2012), HAAN et al. (1994) nebo MISHRA, SINGH (2003). V poslední jmenované práci je věnována pozornost modifikacím hodnot CN křivky pro lesní plochy a dle sklonů svahů na povodí, což je pro úspěšnou simulaci odtoku jeden ze zásadních faktorů při použití metody SCS-CN. Zajímavé srovnání SO modelů včetně HEC-HMS a MIKE SHE použitých i v této studii přináší článek KELLER et al. (2023). Další SO modely SWAT a HSPF, které byly aplikovány také na povodích Slučího, Sokolího a Suchého potoka, jsou diskutovány v práci autorů XIE, LIAN (2023). Shrnutí dlouholetého – nejen hydrologického – výzkumu zahrnujícího odtokovou odezvu povodí na příčinnou srážku na experimentálním povodí Coweeta lze nalézt mimo jiné v práci autorů SWANK, WEBSTER (2014). Zajímavé srovnání ze skotských povodí přináší TETZLAFF et al. (2011) nebo z Britské Kolumbie WHITAKER et al. (2003). Jak již bylo zmíněno v abstraktu, podstatným prvkem z hlediska kvality výstupů je kombinace srážkoodtokových a hydraulických modelů. Pakliže je staniční profil (Černá Opava, zčásti také Sokolí a Slučí potok) ovlivněn vyběžením a rozlivy povodňových vod do inundačních území, tuto retardaci odtoku nejsou schopny semidistribuívané srážkoodtokové modely simulovat, proto se využívá kombinace SO a HD modelu, např. HEC-HMS a HEC-RAS. Toto ovlivnilo zejména poklesovou větev hydrogramu na profilu Mnichov. Také proto byla naprostá většina zájmových profilů v povodí Opavy až po soutok s Odrou vyhodnocena kombinací SO a 1D/2D HD modelu. Pro verifikaci a kalibraci HD modelů byla využita i DPZ data (Sentinel, GeoEye, letecké snímkování AČR) a vlastní zaměření povodňových stop. Na malých lesních povodích je toto na úrovni HD modelování prakticky nemožné, ale naproti tomu jsou zde využívány vlhkostní indexy Sentinel 2 pro půdu a vegetaci (viz dále v textu), které jsou cenným zdrojem pro kalibraci zejména plně distribuovaného SO modelu MIKE SHE, konkrétně pro úpravy parametrů LAI (Leaf Area Index) a objemové půdní vlhkosti. Proces využití DPZ v hydrologickém modelování zahrnuje několik kroků: předzpracování a analýzu satelitních dat (např. odvození záplavových map ze SAR snímků), následnou kalibraci modelových parametrů (např. drsnosti koryta a nivy) a verifikaci výsledků pomocí metrik jako RMSE nebo F-score. Kombinace více typů DPZ dat – zejména radarových a altimetrických – poskytuje robustní základ pro prostorově i časově konzistentní validaci modelů (viz např. GUIZANI et al. 2023 nebo ALONSO-JIMENEZ et al. 2019). Tím DPZ výrazně přispívá ke zvyšování spolehlivosti simulací v SO a HD modelech a efektivnějšímu monitoringu a mitigaci hydrologických rizik. Data z družice Sentinel-2, využívající spektrální indexy vlhkosti jako NDWI (Normalized Difference Water Index) a NDMI (Normalized Difference Moisture Index), jsou již druhým rokem aplikovány na povodí Černé Opavy. Tyto indexy umožňují detailní prostorové vyjádření vlhkosti půdy a vegetačního pokryvu, které významně ovlivňují infiltrační procesy, evapotranspiraci a tvorbu odtoku. Díky vysokému prostorovému rozlišení (10–20 m) lze získat realistické vstupní a validační informace i v oblastech s omezenou hustotou terénních měření. Integrace časových řad NDWI a NDMI do HD modelů (např. MIKE SHE, SWAT či HEC-HMS v semi a plně distribuovaném řešení) umožňuje optimalizovat parametrizaci půdní vlhkosti, drsnosti povrchu a vegetačních parametrů, což zvyšuje spolehlivost simulace a predikce hydrologické odezvy povodí na příčinnou srážku.

ZÁVĚR

Experimentální lesní povodí, popř. jakákoliv povodí s dlouhodobým monitoringem, mají v hydrologii svůj nezastupitelný význam. Probíhající a očekávané klimatické změny tento význam jen zdůrazňují, už také proto, že změny teplot a srážek generují mimo jiné strukturální a druhové změny vegetace v krajině, které ovlivňují stav půdy a hydrologickou bilanci povodí. Platí zde jednoduché pravidlo, kdy s délkou pozorování narůstá i význam těchto dat pro hodnocení režimových charakteristik a možnost alespoň částečného zobecnění výsledků v kontextu regionu nebo krajinného typu. Dalším nezanedbatelným faktorem je to, že malá lesní povodí jsou z hlediska odtokových charakteristik neovlivněná manipulacemi na vodních dílech a vodohospodářských soustavách. Pak lze v kombinaci s hydrologickými modely a GIS analýzami provádět kvalifikovaně návrhy základních hydrologických údajů povrchových vod (N-leté, m-denní průtoky) i na okolních povodích bez stacionárního monitoringu, ale s obdobnými parametry. Extrémní povodně většinou tento monitoring ovlivní z hlediska kvality (absence částí v časových řadách) či reprezentativnosti (přechodné ovlivnění či destrukce čidel a datalogerů nebo změny průtočných profilů, viz obrázky 8) hydrologických dat, na druhou stranu však při úspěšném vyhodnocení umožní zahrnout tyto extrémy do odtokových charakteristik. Z toho vyplývá mimo jiné to, že nejracionálnějším přístupem je kombinace monitoringu a matematického modelování a postupné zvyšování kvality obou přístupů, zahrnující mimo jiné rozšíření monitorovaných prvků a lokalit a zpřesňování modelů na základě kalibračních epizod apod. Kombinace dat provozovatelů (ČHMÚ, VÚLHM, v. v. i., Povodí Odry, s. p.) pak poukazuje na výhody spolupráce těchto institucí nejen v oblasti lesnické hydrologie.

Poděkování:

Autoři by rádi poděkovali projektům NAZV QK22010189 DEFOREST „Vliv odlesnění na vodní režim malých povodí“ a NAZV QL24010054 „Dopady klimatické změny na malá lesní povodí a možnosti jejich zmírnění prostřednictvím lesnického managementu a vodohospodářských opatření“, bez jejichž podpory by článek vznikl mnohem déle a komplikovaněji. Stejně tak patří poděkování DKRVO (Dlouhodobá koncepce rozvoje výzkumné organizace na období 2023–2027) ČHMÚ, zejména oblastem 6 a 12 zaměřeným na zlepšení metod a nástrojů hydrologického modelování a využití dat dálkového průzkumu Země v hydrologii a environmentálních aplikacích.

LITERATURA

- ALONSO-JIMENEZ C., LÓPEZ P., BENITO R.M., TARQUIS ALFONSO A.M. 2019. Correlation between vegetation index and soil moisture index using Sentinel 2. In: Pérez, J.L.G. et al. (eds.): Estudios en la zona no saturada. Vol XIV. Trabajos presentados en las XIV jornadas de investigación en la zona no saturada del suelo. Madrid 29 y 30 de octubre de 2019. Madrid, ETSI AB: [5 s.]. ISBN 978-84-948550-8-5
- BEDIENT P.B., HUBER W.C., VIEUX B.E. 2013. Hydrology and floodplain analysis. Upper Saddle River, Prentice Hall: 801 s. ISBN 978-0-13-256796-1
- BEVEN K.J. 2012. Rainfall-runoff modelling: The primer. Chichester, Wiley-Blackwell: 457 s. ISBN 9780470714591
- ČHMÚ 2024. Vyhodnocení povodně v září 2024. Závěrečná zpráva. Brno, Global Change Research Institute CAS, 657 s. Dostupné na/ Available on: <https://info.chmi.cz/povodne/zprava2024.pdf>
- DI BALDASSARRE G. 2012. Floods in a changing climate: inundation modelling. Cambridge: Cambridge University Press: 105 s. Floods in a changing climate, 3. ISBN 978-1-107-01875-4
- GUIZANI D., BUDAY-BÓDI E., TAMÁS J. NAGY A. 2023. Land cover modelling with Sentinel 2 in water balance calculations of urban cites. Journal of Central European Green Innovation, 11: 70–83. DOI: 10.33038/jcegi.4520
- HAAN C.T., BARFIELD B.J., HAYES J.C. 1994. Design hydrology and sedimentology for small catchments. London, Academic Press: 588 s. ISBN: 978-0123123404
- HEWLETT J.D. 1982. Principles of forest hydrology. Athens, University of Georgia Press: 183 s. ISBN 978-0820323800
- CHANG M. 2006. Forest hydrology: an introduction to water and forests. 2nd edition. Boca Raton, Taylor & Francis: 474 s. ISBN 978-0849353321
- KANTOR J., KREČMER V. et al. 2003. Lesy a povodně. Praha, MŽP: 48 s. ISBN 80-7212-255-X
- KELLER A.A. GARNER K., RAO N., KNIPPING E., THOMAS J. 2023. Hydrological models for climate-based assessments at the watershed scale: A critical review of existing hydrologic and water quality models, Science of The Total Environment, 867: 161209. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161209
- KIRKBY M.J. (ed.) 1978. Hillslope hydrology. Chichester, Wiley: 375 s. ISBN 0-471-99510-4
- LI K., WANG G., GAO J., GUO L., LI J., GUAN M. 2024. The rainfall threshold of forest cover for regulating extreme floods in mountainous catchments. CATENA, 236: 107707. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107707.
- MISHRA S.K., SINGH V.P. 2003. Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers: 513 s. Water science and technology library, 42. ISBN 1-4020-1132-6
- SHI W., WU B., STEIN A. 2019. Uncertainty modelling and quality control for spatial data. Boca Raton, CRC Press: 320 s. ISBN 978-0367377144.
- SWANK W.T., WEBSTER J.R. (eds.) 2014. Long-term response of a forest watershed ecosystem. Clearcutting in the southern Appalachians. Oxford, Oxford University Press: 253 s. ISBN 978-0-19-537015-7
- TETZLAFF D., MCNAMARA J., CAREY S.K. 2011. Measurements and modelling of storage dynamics across scales. Hydrological Processes, 25: 3831–3835. DOI: 10.1002/hyp.8396
- WAGENER T., WHEATER H.S., GUPTA H.V. 2004. Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments. London, Imperial College Press: 306 s. ISBN 1-86094-466-3
- WEISSMANNOVÁ H. et al. 2004. Ostravsko. Chráněná území ČR. Praha, Agentura ochrany přírody a krajiny ČR: 454 s. ISBN 80-86064-67-0
- WHITAKER A., ALILA Y., BECKERS J., TOEWS D. 2003. Application of the distributed hydrology soil vegetation model to Redfish Creek, British Columbia: Model evaluation using internal catchment data. Hydrological Processes, 17: 199–224. DOI: 10.1002/hyp.1119
- XIE H., LIAN Y. 2013. Uncertainty-based evaluation and comparison of SWAT and HSPF applications to the Illinois River Basin. Journal of Hydrology, 481: 119–131. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.027.

RECONSTRUCTION OF THE COURSE OF THE EXTREME FLOOD OF SEPTEMBER 2024 IN EXPERIMENTAL WATERSHEDS IN THE JESENÍKY MOUNTAINS

SUMMARY

The study focuses on the reconstruction of the course of the extreme flood that hit the Jeseníky Mountains in September 2024, and it presents a detailed hydrological analysis of the experimental catchments of the Slučí, Sokolí and Suchý brook, right-hand tributaries of the Černá Opava River. The event was one of the most destructive in the history of the region – previous precipitation and water meter records were exceeded at a number of stations. The destruction of measuring equipment and morphological changes in the riverbeds forced the use of mathematical models to reconstruct the course of the flood, while it was necessary to compensate for the missing field measurements using a combination of hydrological and hydraulic simulations. As a result of convective and stratiform precipitation, which significantly affected the Jeseníky area, the largest flow peaks since the beginning of measurements occurred. While the flood in 1997 was typically widespread, the flood of 2024 was characterized by a rapid increase in flow and a sharp outflow response of the upper parts of the catchment.

The aim of the work was:

- to reconstruct the course of the flood using hydrological models verified on other profiles;
- to evaluate and compare the results of different modelling approaches (SCS-CN, Horton, Green–Ampt, Richards);
- to evaluate hydrological processes in forest catchments and the impact of extreme precipitation on surface, subsurface and groundwater runoff;
- to verify the suitability of a combination of rainfall-runoff (SO) and hydraulic (HD) models for the reconstruction and prediction of extreme floods.

The areas of interest are three small forest catchments in the upper part of the Černá Opava River (2-02-01-0030), with areas of 1.9–4.1 km² and an average altitude of 799 m above sea level. The bedrock consists mainly of metamorphic rocks (phyllites, amphibolites, quartzites), the soils are acidic cambisols transitioning into podzols, and the vegetation consists mainly of Norway spruce and European beech. The basin belongs to the geomorphological units of the Medvěžská and Rejvízská hornatina.

The basic hydrological characteristics of the individual basins (area, N-year and M-day flows) are given in Table 1, where the Q100 values reach 7–15 m³·s⁻¹ depending on the size of the basin.

Due to the destruction of the water gauge profiles, it was necessary to use the rainfall-runoff models: HEC-HMS, MIKE SHE, HYDROG, SIMWE and hydraulic models: HEC-RAS, DHI MIKE 11/21.

The precipitation-runoff models worked in semi-distributed and fully distributed modes, hydraulic models in 1D and 2D variants. All input data preparation was carried out in a GIS environment (ArcMap, GRASS GIS, SAGA), while the quality of the digital terrain model (DTM) fundamentally influenced the accuracy of the simulations. The models used applied different approaches to simulate runoff loss – SCS-CN and Green–Ampt method (HEC-HMS), Horton method (HYDROG), Richards equation (MIKE SHE). Evapotranspiration was modelled by Priestley–Taylor method, subsurface runoff by linear reservoir method or recession method. Hydraulic simulations were based on Bernoulli equation (HEC-RAS) and dynamic wave approximation (DHI MIKE).

Fig. 1 shows the location of the monitoring network in the pilot catchments, and Fig. 2 presents combined radar and station estimates of precipitation.

Results and conclusions

The simulations confirmed a very good agreement of the model outputs with the measured and reconstructed data. Fig. 3 and 4 show the course and culmination of hydrographs in selected profiles. In the Černá Opava / Mnichov profile, the Nash–Sutcliffe coefficient (NSE) reached a value of 0.86 using the Green–Ampt method, while the SCS-CN variant reached 0.78 and the HYDROG model 0.73 (see Table 2 and Fig. 5).

At Slučí and Sokolí brook, a rise in the level of 140–170 cm was detected, which corresponds to geodetic measurements of flood traces. At Suchý brook, the changes were less pronounced due to the bedrock and the smaller area of the catchment. Fig. 6 shows the results of the simulation of volumetric soil moisture by the MIKE SHE model (at depths of 0.1 and 0.5 m), which show extreme soil saturation before the culmination of the runoff.

The combination of precipitation-runoff models and hydraulic models allowed for a realistic capture of runoff retardation in inundated areas, which conventional rainfall-runoff models are unable to describe on their own. The validation of the models was also carried out using satellite imagery and aerial photography. Fig. 8 documents extensive morphological changes in the Sokolí streambed after the flood, including bank erosion and bedrock exposure.

The study demonstrates that the combination of long-term monitoring and mathematical modeling is a key tool for the reconstruction and prediction of extreme hydrological events. The HEC-HMS, HYDROG, MIKE SHE and HEC-RAS models allowed for a detailed analysis of the flood course in cases where direct measurements failed.

Briefly, the conclusions can be summarized as follows:

- Experimental catchments are of fundamental importance for the calibration and verification of hydrological models.
- The combination of rainfall-runoff and hydraulic models provides a more physically accurate picture of the flood process than separate approaches.
- Remote sensing data represent a valuable source of information for refining model parameters and monitoring changes in vegetation and moisture.

The knowledge gained contributes to the understanding of extreme hydrological events in forest catchments and enables more effective risk mitigation in the context of climate change.

Zasláno do redakce 24. 10. 2025

Přijato do tisku/Accepted: 15. 01. 2026