

Kumulativní transformační účinek soustavy malých vodních nádrží při návrhové povodni v povodí Bakovského a Zlonického potoka

PETR SKLENÁŘ, RADOVAN TYL

Klíčová slova: malá vodní nádrž – transformace povodňové vlny – kumulativní účinek – HEC-HMS – HEC-RAS – neustálené proudění – kulminační průtok – Bakovský potok – Zlonický potok

ABSTRAKT

Článek hodnotí kumulativní transformační účinek soustavy pěti potenciálních malých vodních nádrží (MVN 10, 11, 15, 16 a 17) na Bakovském a Zlonickém potoce. Výzkumná otázka je zaměřena na to, zda je společný účinek několika nádrží na kulminační průtok a čas kulminace prostým součtem účinků jednotlivých nádrží, nebo zda se v říční síti projevují nelineární interakce vyvolané postupnou transformací hydrogramů, jejich časovým posunem a hydraulickým ovlivněním v úsecích s četnými příčnými objekty. Vstupní průtoková data byla získána hydrologickým modelem HEC-HMS pro návrhovou jednodenní srážku s dobou opakování $N = 100$ let. Model poskytl hydrogramy v uzlových bodech na Bakovském potoce pod Byseňským potokem a na Zlonickém potoce pod Dřínovským potokem, dále hydrogramy z příslušných mezipovodí až k soutoku obou toků a také v závěrovém profilu na Bakovském potoce nad zaústěním Červeného potoka. Vlastní transformace byla řešena 1D modelem neustáleného proudění HEC-RAS, který umožnil explicitně zahrnout geometrii přibližně 30 mostů, přejezdů, lávek, jezů, stupňů a dalších objektů a jejich vliv na vzduť, akumulaci a postup povodňové vlny. Bylo vyhodnoceno devět variant výpočtů V0–V8: referenční stav bez MVN, pět variant s jednotlivými nádržemi, varianta s dvojicí nádrží na Bakovském potoce, varianta s trojicí nádrží na Zlonickém potoce a varianta se všemi pěti nádržemi. V závěrovém profilu BPout dosáhl referenční stav kulminace $55,43 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v čase 17:15. Dvojice MVN 10 + 11 snížila kulminaci na $42,49 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (o 23,3 %) a posunula ji o 3,5 h. Trojice MVN 15 + 16 + 17 snížila kulminaci na $34,73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (o 37,3 %); její hydrogram byl bimodální a ukázal zásadní význam časové desynchronizace dílčích povodňových vln. Při zapojení všech nádrží klesla kulminace na $34,46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (o 37,8 %) a její výskyt se posunul přibližně o 6,75 h. Porovnání skupinových variant se součtem účinků jednotlivých nádrží prokázalo supra-aditivní chování uvnitř obou dílčích soustav, zatímco celá soustava byla z hlediska samotné velikosti kulminace téměř aditivní. Změna tvaru a času hydrogramu však zůstala výrazně nelineární. Výsledky potvrzují, že účinek soustavy MVN nelze spolehlivě posuzovat pouze součtem individuálních redukcí kulminačních průtoků a že při hustém výskytu příčných objektů je vhodné použít hydraulický routing zachycující zpětné vzduť a akumulaci v korytě a inundaci.

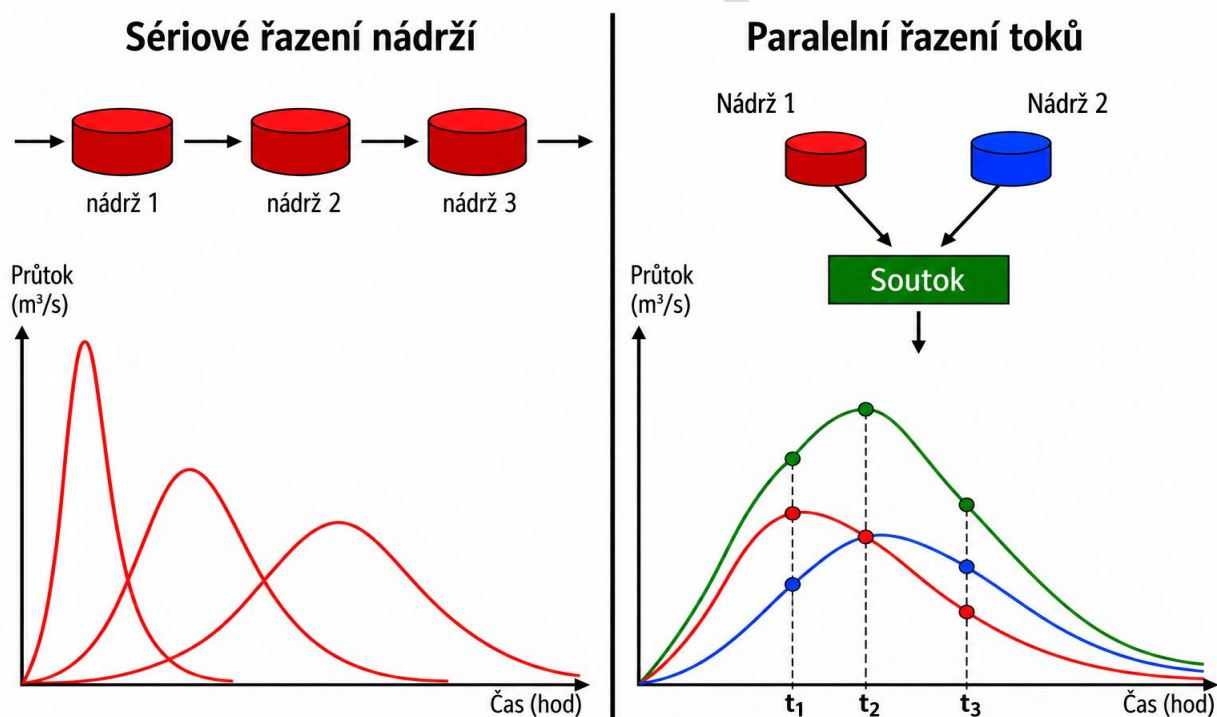
1. ÚVOD

Malé vodní nádrže a rybníky představují v české krajině tradiční prvek vodního hospodářství. Vedle zásobní, rybochovné, krajinotvorné nebo rekreační funkce mohou ovlivňovat i hydrologické extrémy, tedy jak období nedostatku vody, tak průběh povodní. Současná česká odborná diskuze zdůrazňuje nutnost posuzovat jejich funkci ve vztahu k provozním podmínkám, minimálním zůstatkovým průtokům i bezpečnému převádění povodní [1]. Pro účely povodňové ochrany však není rozhodující pouze nominální objem nádrže. Výsledný účinek je dán dynamikou napouštění a vyprazdňování, charakterem výpustných a bezpečnostních objektů, aktuálním naplněním, parametry přítokové vlny a polohou nádrže v říční síti.

Při hodnocení více nádrží v jednom povodí vzniká další úroveň složitosti. Povodňové vlny transformované v jednotlivých nádržích se dále šíří koryty, vstupují do následujících nádrží a na soutocích se skládají s hydrogramy z jiných částí povodí. Proto se společný účinek soustavy nemusí rovnat prostému součtu individuálních účinků. Ayalew et al. [2] prokázali, že prostorová konfigurace retenčních objektů v sérii a paralelně může měnit redukci povodňových kulminací v závěrovém profilu. Cipollini et al. [3] dále ukázali význam posuzování více nádrží v měřítku celého povodí a potřebu zohlednit jejich polohu a individuální příspěvek k výsledné transformaci. Novější práce zaměřené na síť malých nádrží rovněž zdůrazňují, že kumulativní hydrologický dopad není obecně roven součtu dopadů jednotlivých objektů a je ovlivněn počtem, kapacitou a prostorovým rozmístěním nádrží [4]. Souhrnná práce Habets et al. [5] vymezuje kumulativní účinek jako výsledek individuálních účinků a interakcí mezi objekty a rozlišuje aditivní, supra-aditivní a infra-aditivní chování; současně zdůrazňuje význam geometrie a konektivity sítě nádrží. Aditivní chování odpovídá situaci,

kdy je transformační účinek soustavy roven prostému součtu účinků jednotlivých nádrží. Supra-aditivní chování nastává tehdy, když je skupinový účinek nádrží na transformaci povodňové vlny větší než součet jejich individuálních účinků, typicky v důsledku příznivého časového rozložení kulminací nebo synergických interakcí v síti. Naopak infra-aditivní chování znamená, že společný účinek soustavy je menší než součet účinků jednotlivých nádrží, což může být způsobeno nepříznivým časovým posunem dílčích vln, omezenou kapacitou nebo nevhodnou prostorovou konfigurací objektů. Zkoumaná konfigurace na Bakovském a Zlonickém potoce kombinuje oba základní topologické případy, jež jsou schematicky znázorněny na *obr. 1*. Nádrže jsou na jednotlivých tocích řazeny sériově, zatímco obě větve se v soutokovém uzlu skládají paralelně. V případě paralelního řazení nádrží může navíc v souladu s *obr. 1* docházet vlivem vzájemného časového posunu průtokových vln na soutoku obou větví soustavy a vlivem jejich tvaru k tomu, že výsledný hydrogram pod soutokem nabývá buď unimodální, nebo bimodální charakter. Méně častý bimodální průběh soutokového hydrogramu nastává zejména tehdy, když kulminační průtoky dílčích vln přicházejí v odlišném čase a jejich překryv je pouze částečný. V rámci řešení průchodu povodňové vlny v této studii se bimodální průběh skutečně projevil u varianty V7, kde časový posun kulminací obou větví vedl k vytvoření dvou dílčích vrcholů v závěrovém profilu. Cílem je proto posoudit kombinovaný transformační účinek tohoto uspořádání na reálných úsecích vodních toků s četnými příčnými objekty.

V praxi je navíc účinek nádrží často provázán s hydraulikou vlastního toku. Mosty, propustky, jezy, stupně, rozdělovací objekty a další příčné stavby mohou vytvářet vzdutí, lokální akumulaci a změny rychlosti postupu povodňové vlny. Zjednodušené hydrologické routinové metody jsou vhodné pro řadu úloh, avšak jejich schopnost popsat zpětné vzdutí a detailní vliv hydraulických objektů je omezená [6, 7]. HEC-RAS naproti tomu řeší neustálené proudění s využitím rovnic kontinuity a hybnosti a umožňuje explicitně zahrnout mosty, propustky, jezy, příčné objekty a akumulací prostory [8].



Obr. 1. Schematické znázornění chování sériového a paralelního řazení skupiny nádrží v říční síti na hydrogramech pod jednotlivými nádržemi

Fig. 1. Schematic representation of the behaviour of serial and parallel reservoir configurations in a river network, illustrated by downstream hydrographs

Cílem této práce je kvantifikovat kumulativní transformační účinek pěti potenciálních MVN na Bakovském a Zlonickém potoce při návrhové jednodenní srážce s dobou opakování $N = 100$ let. Studie porovnává referenční

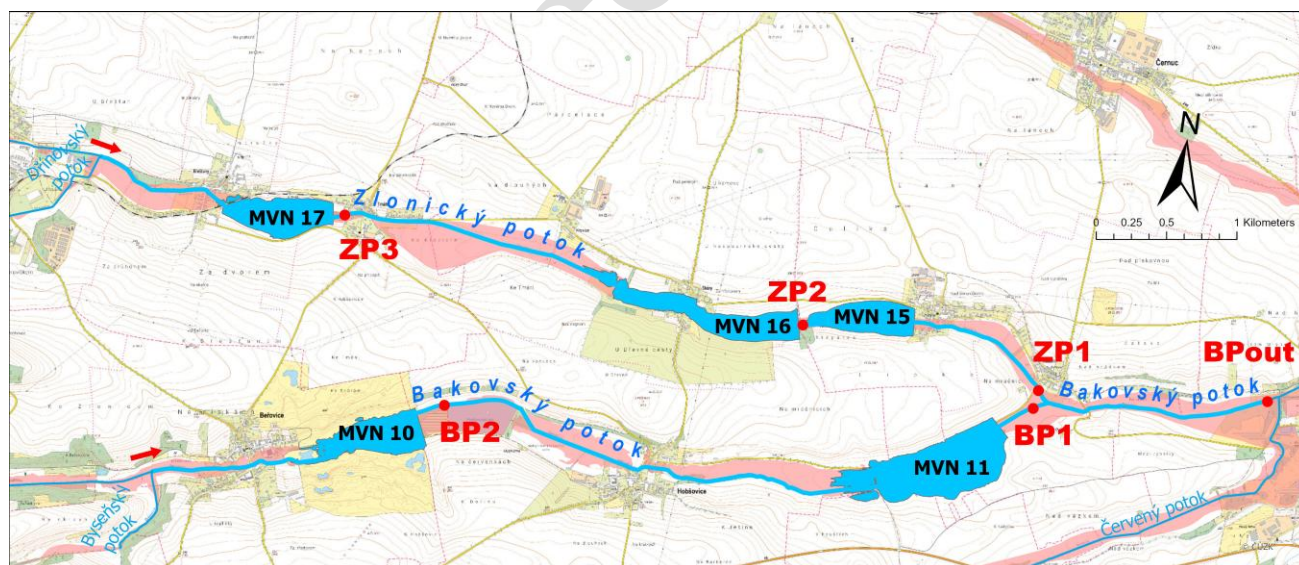
stav bez MVN, individuální účinky jednotlivých nádrží, společné působení nádrží na každém z obou toků a variantu celé soustavy. Zvláštní pozornost je věnována nejen snížení kulminačního průtoku, ale také časovému posunu kulminace a změně tvaru hydrogramu. Práce testuje hypotézu, že uvnitř sériově uspořádaných nádrží může vznikat supra-aditivní transformační účinek, zatímco při skládání transformovaných hydrogramů z obou větví může být výsledný účinek na kulminaci v závěrovém profilu omezen změnou rozhodujícího časového okamžiku kulminace.

2. MATERIÁL A METODIKA

2.1 Zájmové území a hydraulické objekty

Řešené území zahrnuje dva hlavní přítokové úseky Bakovského a Zlonického potoka a společný úsek Bakovského potoka pod jejich soutokem. Podle technickoprovozní evidence správce toku Povodí Vltavy, s. p., byl na Bakovském potoce hodnocen úsek od profilu pod soutokem s Byseňským potokem v ř. km 19,058 po soutok se Zlonickým potokem v ř. km 12,158. V tomto úseku se nachází celkem 13 příčných objektů: dva silniční mosty, čtyři cestní přejezdy, čtyři lávky, jeden jez, jeden stupeň a jeden rozdělovací objekt. Na navazujícím úseku Bakovského potoka od soutoku se Zlonickým potokem po profil nad zaústěním Červeného potoka (ř. km 12,158–10,468) se nachází jeden silniční most.

Na Zlonickém potoce byl řešen úsek od profilu pod soutokem s Dřínovským potokem v ř. km 7,294 po soutok s Bakovským potokem v ř. km 0,000. Technickoprovozní evidence zde uvádí 14 objektů, z toho pět silničních a jeden železniční most, pět cestních přejezdů, jednu lávku a dva jezy. Celkem tak bylo v hydraulicky řešené síti zahrnuto 28 evidovaných příčných objektů se známou geometrií. Jejich četnost byla jedním z hlavních důvodů pro použití hydraulického modelu neustáleného proudění. V širším kontextu protipovodňových opatření byla v dřívější Studii odtokových poměrů v povodí Bakovského potoka – území Slánsko–Velvarsko v úseku ř. km 12,0–14,2 mezi Nabdínem a Velvary, tedy v návaznosti na úsek před soutokem se Zlonickým potokem, uvažována také možnost suché nádrže (poldru) kategorie B o objemu přibližně 1–3 mil. m³ [9]. Toto dřívější navrhované opatření není součástí zde hodnocené pětice potenciálních MVN, dokládá však dlouhodobý zájem o retenční zásahy v této části povodí.



Obr. 2. Umístění potenciálních MVN a vyhodnocovacích profilů na Bakovském a Zlonickém potoce na podkladu mapy záplavových území ZÚ₁₀₀ (světle červená) a místa vstupních hydrogramů (šipky)

Fig. 2. Location of potential MVNs and assessment profiles on the Bakovský and Zlonický streams, based on the ZÚ₁₀₀ floodplain map (light red) and the locations of input hydrographs (arrows)

2.2 Potenciální malé vodní nádrže a jejich dlouhodobá bilanční stabilita

V modelové soustavě bylo uvažováno pět potenciálních MVN. Dvě nádrže (MVN 10 a MVN 11) jsou situovány na Bakovském potoce a tři nádrže (MVN 15, MVN 16 a MVN 17) na Zlonickém potoce. Základní parametry zátop a retenčních prostorů převzaté z podkladového výpočtu jsou uvedeny v tab. 1. Součet zásobních objemů V_{norm} při normální hladině H_{norm} u všech pěti nádrží činí přibližně 1,796 mil. m³; z toho 0,910 mil. m³ připadá na dvojici nádrží na Bakovském potoce a 0,886 mil. m³ na trojici na Zlonickém potoce. Součet maximálních ochranných retenčních objemů při hladině H_{max} u všech pěti nádrží je cca 2,097 mil. m³; z čehož 1,073 mil. m³ připadá na nádrže na Bakovském potoce a 1,024 mil. m³ na nádrže na Zlonickém potoce.

Tab. 1. Základní parametry potenciálních malých vodních nádrží

Tab. 1. Basic parameters of the potential small water reservoirs

Nádrž	Vodní tok	ř. km	H_{norm} [m n.m.]	A_{norm} [tis. m ²]	V_{norm} [tis. m ³]	H_{max} [m n.m.]	$V_{max, ret}$ [tis. m ³]	$H_{bezp.p.}$ [m n.m.]	B_{prel} [m]
MVN 10	Bakovský p.	17,030	210,08	179,0	313,4	211,58	336,4	210,58	20,0
MVN 11	Bakovský p.	12,545	194,34	385,0	596,8	195,84	736,2	194,84	20,0
MVN 15	Zlonický p.	1,185	195,77	140,8	234,2	197,27	239,5	196,27	16,0
MVN 16	Zlonický p.	2,009	199,95	220,8	396,1	201,45	459,7	200,45	16,0
MVN 17	Zlonický p.	5,489	209,05	170,1	255,3	210,55	325,4	209,55	16,0

Součástí předchozího vodohospodářského posouzení v rámci aktivit projektu „Centrum Voda“ bylo také vyhodnocení dlouhodobé bilanční stability skupiny potenciálních nádrží MVN v různých lokalitách napříč Českou republikou v podmínkách probíhající změny klimatu. V podkladovém dokumentu [10] je vyhodnoceno maximální dostupné historické období let 1961–2024 v denním kroku. U všech nádrží vyšla 100% zabezpečení odtoku ZQ_{out} na úrovni minimálního zůstatkového odtoku Q_{mzp} . Požadovaný odtok na úrovni Q_{mzp} je u všech nádrží dosažen se 100% zabezpečeností díky dostatečnému zásobnímu objemu, který umožňuje nalepšování ze zásobního prostoru i ve velmi suchých obdobích. Odtok je tak zajištěn se 100% zabezpečením, přičemž dosažené objemy V na úrovni 25–100 % V_{norm} a jejich zabezpečení ZV jsou dokumentovány v tab. 2. Index hydrologické stability Is , který hodnotí, zda je požadovaný odtok z nádrže pokryt výhradně vlastním přítokem a srážkou sníženou o výpar připadající na hladinu – tedy bez nutnosti čerpání z akumulované zásoby v nádrži, se dle tab. 2 pohyboval mezi 95,37 a 99,66 %. Nejvyšší hodnoty dosáhla MVN 11, která současně vykazovala nejvyšší minimální poměr V/V_{norm} 89,67 %. Nejnižší hodnotu Is měla MVN 15 (95,37 %) a její minimální poměr V/V_{norm} dosáhl 25,06 %. Ani u této nejproblematictější nádrže tak simulovaný objem v celém období 1961–2024 dle tab. 2 neklesl pod čtvrtinu zásobního objemu V_{norm} .

Z hlediska připravenosti potenciálních MVN na Bakovském a Zlonickém potoce převádět povodňové průtoky bylo navrženo umístění korunových bezpečnostních přelivů na úrovni $H_{bezp.p.}$ (tab. 1) 0,5 m nad normální hladinou a 1 m pod maximální hladinou, při návrhové šířce přelivů B_{prel} rovné 20 m u MVN na Bakovském potoce a 16 m na Zlonickém potoce. Tato bezpečnostní zařízení na MVN jsou tak schopna převádět s dostatečnou rezervou stoletý průtok [11].

Tab. 2. Zabezpečení odtoku ZQ_{out} , zabezpečení objemu ZV_p [%] pro x -tý percentil z objemu V_{norm} , index hydrologické stability Is a minimální dosažený poměr naplnění V/V_{norm} dle individuálního bilančního posouzení potenciálních MVN v povodí Bakovského a Zlonického potoka

Tab. 2. ZQ_{out} discharge reliability, ZV_p [%] volume reliability for the x -th percentile of the volume V_{norm} , the hydrological stability index Is , and the minimum achieved fill ratio V/V_{norm} according to an individual water balance assessment of potential MVNs in the Bakovský and Zlonický streams catchment

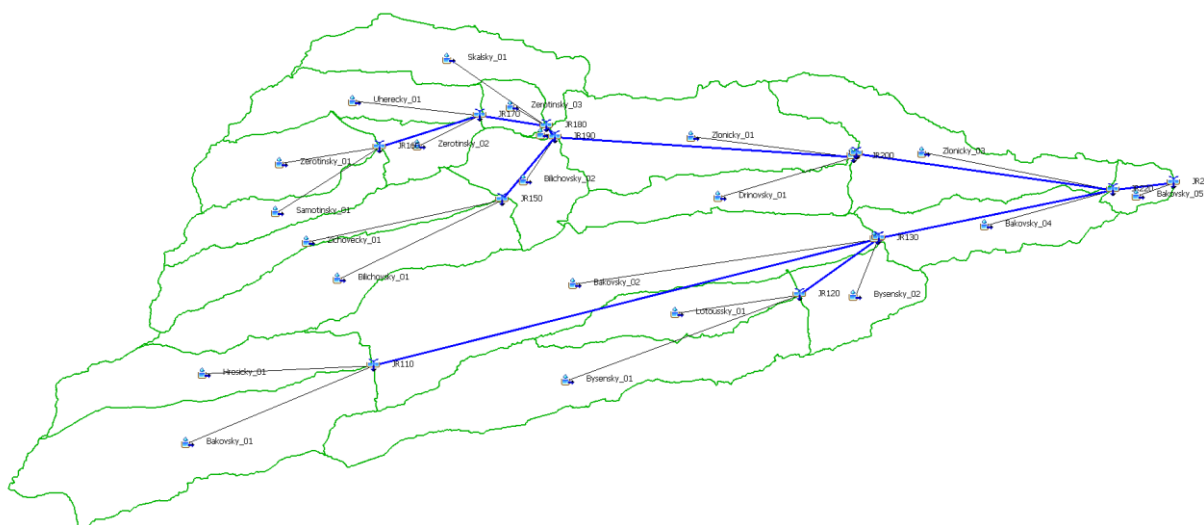
MVN	ZQ_{out} [%]	ZV_{100} [%]	ZV_{75} [%]	ZV_{50} [%]	ZV_{25} [%]	Is [%]	min. V/V_{norm} [%]
MVN 10	100,00	96,88	99,58	100,00	100,00	97,01	52,38
MVN 11	100,00	99,65	100,00	100,00	100,00	99,66	89,67

MVN	ZQout [%]	ZV ₁₀₀ [%]	ZV ₇₅ [%]	ZV ₅₀ [%]	ZV ₂₅ [%]	Is [%]	min. V/V _{norm} [%]
MVN 15	100,00	95,13	98,85	99,68	100,00	95,37	25,06
MVN 16	100,00	97,14	99,71	100,00	100,00	97,30	61,80
MVN 17	100,00	96,51	99,52	100,00	100,00	96,67	60,43

2.3 Hydrologické vstupy z modelu HEC-HMS

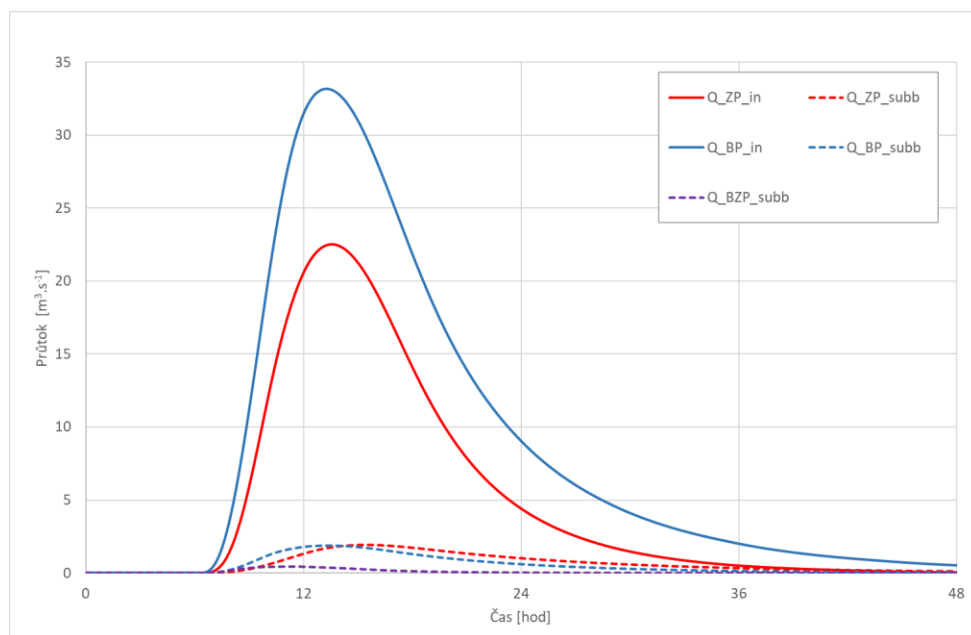
Vstupní hydrologické podmínky pro hydraulický model byly odvozeny deterministickým srážkoodtokovým modelem HEC-HMS. Postup vycházel z konstrukce teoretické povodňové vlny (TPV) z N-leté návrhové srážky a z následné transformace efektivní srážky na odtok; obdobný přístup se využívá zejména pro návrhové profily bez dostatečně dlouhých průtokových řad [12]. Pro stanovení TPV100 byl použit jednodenní stoletý srážkový úhrn P_{100} . Zatěžovací hyetogram měl ve všech dílčích povodích shodný relativní tvar a byl rozdělen do hodinových intervalů v celkové délce 14 h, přičemž velikost denního úhrnu se mezi jednotlivými podpovodími lišila.

Srážkoodtokový model (obr. 3) byl sestaven k závěrovému profilu v oblasti soutoku Bakovského a Červeného potoka a zahrnoval povodí o ploše 206,83 km², 23 povodňových elementů a 12 říčních úseků. Fyzikogeografické charakteristiky byly odvozeny z rozvodnic základních ploch povodí 4. řádu a z digitálního modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G) s prostorovým rozlišením 2×2 m. Pro přípravu parametrů byla v převážné míře využita aplikace HydroHMS v prostředí ArcGIS [13]. Hodnoty odtokových čísel CN vycházely z hydrologických vlastností půd a využití území; použity byly podklady VÚMOP a CORINE Land Cover 2018 [14, 15]. Nad rámec základního členění byly v modelu vytvořeny profily umožňující přímo exportovat hydrogramy na Zlonickém potoce pod soutokem s Dřínovským potokem a na Bakovském potoce pod soutokem s Byseňským potokem. Schéma modelu je uvedeno na obr. 3.



uvažování retenčního účinku potenciálních MVN; jejich vliv byl následně zaveden až v hydraulickém modelu HEC-RAS.

Výstupem hydrologického modelu byly uzlové hydrogramy – dle obr. 4 označeno ($_{in}$) – na Bakovském potoce pod soutokem s Byseňským potokem a na Zlonickém potoce pod soutokem s Dřínovským potokem (viz obr. 2). Současně byly stanoveny průtokové příspěvky odpovídajících mezipovodí na obou tocích od vstupních uzlů až po jejich soutok a dále na společném úseku Bakovského potoka až po profil nad zaústěním Červeného potoka; na obr. 4 označeno ($_{subb}$). Vstupní hydrogram Bakovského potoka dosahoval v exportované časové řadě maximálního průtoku přibližně $33,19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v čase 13,25 h a vstupní hydrogram Zlonického potoka přibližně $22,51 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v čase 13,50 h. Další tři časové řady představovaly přítoky z mezipovodí. Hydrogramy byly pro následný hydraulický výpočet zpracovány v časovém rozlišení 0,25 h. HEC-HMS tak v této studii sloužil k tvorbě hydrologických okrajových a bočních podmínek, nikoli k detailnímu routingu přes soustavu příčných objektů.



Obr. 4. Vstupní návrhové hydrogramy v uzlech ($_{in}$) a přítokové hydrogramy z mezipovodí ($_{subb}$) použité jako okrajové a boční podmínky hydraulického modelu HEC-RAS

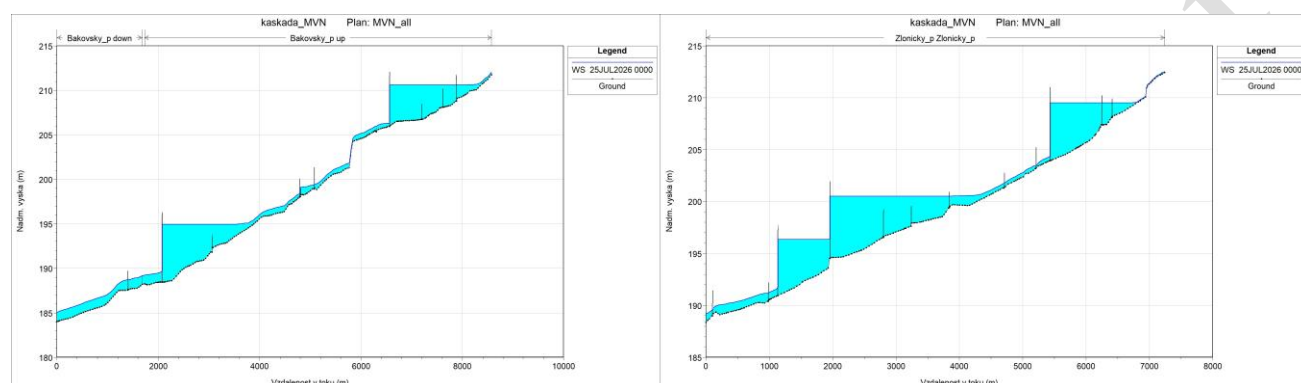
Fig. 4. Input design hydrographs at boundary nodes ($_{in}$) and lateral inflow hydrographs from intervening sub-basins ($_{subb}$) used as boundary and lateral conditions in the HEC-RAS hydraulic model

2.4 Hydraulický model HEC-RAS a sledovací profily

Pro výpočet postupu a transformace povodňové vlny byl sestaven 1D model neustáleného proudění v HEC-RAS. V hydrologickém modelu HEC-HMS byl postup vlny v říčních úsecích řešen metodou Muskingum, pro vlastní posouzení transformačního účinku v řešené síti však byl zvolen detailnější hydraulický routing. HEC-HMS nabízí i další hydrologické metody routingu, včetně Muskingum-Cunge [6], ty však nejsou určeny k plnému popisu zpětného vzduť a detailní hydrauliky staveb [7]. Vzhledem k téměř 30 příčným objektům bylo žádoucí explicitně zachytit jejich geometrii, vznik vzduť, lokální akumulaci a vzájemné ovlivnění průtoků na soutoku. HEC-RAS tyto prvky zahrnuje přímo do řešení neustáleného proudění [8].

Na základě uvedených hydrologických a hydraulických vstupů byl model HEC-RAS kalibrován podle podmínek uvedených ve studiích záplavových území Bakovského potoka a Zlonického potoka [16–18]. Vzhledem k tomu, že kulminační průtok odvozené povodňové vlny pro jednodenní srážkový úhrn P_{100} s dobou opakování 100 let se významně neodlišuje od hodnoty ustáleného průtoku Q_{100} , pro nějž byla záplavová území stanovena, a rozsah záplavových území ve variantě V0 (bez potenciálních MVN) uspokojivě odpovídá rozsahu záplavových území stanovených v rámci těchto studií, lze považovat numerický model HEC-RAS za dostatečně

připravený k tomu, aby s požadovanou přesností reprodukoval vznikající průtokové situace v soustavě MVN na Bakovském a Zlonickém potoce. Průběh odtokových hydrogramů byl sledován v profilech ZP3 (ř. km 5,415), ZP2 (ř. km 2,006) a ZP1 (ř. km 0,052) na Zlonickém potoce, dále v profilech BP2 (ř. km 16,814) a BP1 (ř. km 12,200) na Bakovském potoce. Celkový transformační účinek byl hodnocen v profilu BPout v ř. km 10,639 na Bakovském potoce pod soutokem se Zlonickým potokem a nad zaústěním Červeného potoka. Rozmístění nádrží a profilů je patrné z obr. 2. Podélné uspořádání obou modelovaných toků a poloha jednotlivých potenciálních MVN v geometrii HEC-RAS jsou znázorněny na obr. 5.



Obr. 5. Podélný profil Bakovského (vlevo) a Zlonického potoka (vpravo) s MVN v prostředí hydraulického modelu HEC-RAS

Fig. 5. Longitudinal profiles of the Bakovský (left) and Zlonický streams (right) with MVN in the HEC-RAS hydraulic model environment

Tab. 3. Sledovací profily použité pro vyhodnocení hydrogramů

Tab. 3. Control profiles used for hydrograph evaluation

Profil	Vodní tok	Ř. km	Funkce profilu
ZP3	Zlonický potok	5,415	pod MVN 17
ZP2	Zlonický potok	2,006	v prostoru pod MVN 16
ZP1	Zlonický potok	0,052	pod MVN 15, před soutokem
BP2	Bakovský potok	16,814	pod MVN 10
BP1	Bakovský potok	12,200	pod MVN 11, před soutokem
BPout	Bakovský potok	10,639	závěrový profil pod soutokem

2.5 Varianty výpočtu

Kumulativní účinek byl zkoumán pomocí devíti variant V0–V8. Varianta V0 představuje referenční stav bez potenciálních MVN. Varianty V1–V5 izolují účinek jednotlivých nádrží. V6 reprezentuje společné působení obou nádrží na Bakovském potoce, V7 společné působení tří nádrží na Zlonickém potoce a V8 celou pětínádržovou soustavu. Toto členění umožňuje odlišit individuální, dílčí kumulativní a celkový systémový účinek.

Tab. 4. Varianty hydraulického výpočtu (A – nádrž zahrnuta, N – nádrž není zahrnuta)

Tab. 4. Hydraulic simulation scenarios (A – reservoir included, N – reservoir excluded)

Var.	MVN 10	MVN 11	MVN 15	MVN 16	MVN 17	Charakteristika
V0	N	N	N	N	N	Referenční stav
V1	N	A	N	N	N	MVN 11
V2	A	N	N	N	N	MVN 10
V3	N	N	A	N	N	MVN 15
V4	N	N	N	A	N	MVN 16
V5	N	N	N	N	A	MVN 17
V6	A	A	N	N	N	Bakovský potok
V7	N	N	A	A	A	Zlonický potok
V8	A	A	A	A	A	Celá soustava

2.6 Hodnoticí ukazatele kumulativního transformačního účinku

Pro každý sledovací profil p a variantu j byla z výsledného hydrogramu určena maximální hodnota průtoku $Q_{\max,j,p}$ a čas jejího výskytu $T_{j,p}$. Relativní transformační účinek $K_{j,p}$ vzhledem k referenční variantě V0 s kulminací $Q_{\max,0,p}$ a časem jejího výskytu $T_{0,p}$ v profilu p byl stanoven vztahem

$$K_{j,p} = (Q_{\max,0,p} - Q_{\max,j,p}) / Q_{\max,0,p} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

Časový posun kulminace pro variantu j v profilu p byl analogicky vyjádřen

$$\Delta T_{j,p} = T_{j,p} - T_{0,p} \quad (2)$$

Pro posouzení nelinearity skupinového účinku v závěrovém profilu BPout byl zaveden bezrozměrný index skupinové interakce IG. Pro případ celé soustavy 5 nádrží je index definován

$$IG = \Delta Q_G / \sum_1^5 \Delta Q_i \quad (3)$$

Kde: ΔQ_G je snížení kulminace dosažené skupinovou variantou

$\sum \Delta Q_i$ součet snížení kulminace z variant s jednotlivými nádržemi (individuální účinek), které danou skupinu tvoří

Hodnota $IG > 1$ označuje supra-aditivní účinek na kulminační průtok, $IG < 1$ infra-aditivní účinek a $IG \approx 1$ přibližně aditivní výsledek. Tento index je nutné interpretovat jako diagnostiku kulminačního průtoku v konkrétním profilu a při konkrétní události; nejde o bilanční součet objemů a nezachycuje samostatně změny tvaru hydrogramu a času kulminace.

3. VÝSLEDKY

3.1 Referenční stav

Ve variantě V0 bez potenciálních nádrží dosáhla kulminace v profilu BPout hodnoty $55,43 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v čase 17,25 h (17:15). Na Zlonickém potoce byly v referenčním stavu maximální průtoky $22,56 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v ZP3, $22,67 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v ZP2 a $23,10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v ZP1. Na Bakovském potoce dosahovala kulminace $33,63 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v BP2 a $34,37 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v BP1. Již referenční stav tak vykazuje transformaci a časový posun způsobený koryty, přítoky z mezípodvodí a příčnými objekty ještě před zapojením potenciálních MVN.

3.2 Účinek jednotlivých nádrží

Z jednotlivě posuzovaných nádrží měla v závěrovém profilu BPout největší účinek MVN 11 (V1). Kulminace se snížila z 55,43 na 48,04 m³ · s⁻¹, tedy o 13,3 %, a posunula se z 17:15 na 19:30. V bezprostředněji ovlivněném profilu BP1 byla redukce ještě výraznější: z 34,37 na 25,80 m³ · s⁻¹ (24,9 %) a kulminace se zpozdila o 3,25 h. Samostatná MVN 10 (V2) snížila kulminaci v BPout pouze na 54,70 m³ · s⁻¹ (1,3 %), ale lokálně v BP2 redukovala kulminaci z 33,63 na 31,14 m³ · s⁻¹ (7,4 %) a posunula ji o 1,5 h. Tato odlišnost mezi lokálním a závěrovým účinkem ukazuje, že redukce na dílčím toku se nemusí v závěrovém profilu projevit ve stejné míře.

Na Zlonickém potoce snížila samostatná MVN 15 (V3) kulminaci v ZP1 z 23,10 na 21,85 m³ · s⁻¹ (5,4 %) a v BPout na 53,24 m³ · s⁻¹ (3,9 %). Výsledky současně ukazují hydraulické ovlivnění úseku u polohy MVN 16 zpětným vzduťm od MVN 15, což potvrzuje význam explicitního hydraulického popisu. MVN 16 (V4) snížila kulminaci v ZP2 i ZP1 přibližně o 14 % a v BPout o 11,3 %. MVN 17 (V5) redukovala kulminaci v ZP3 o 11,5 %, v ZP1 přibližně o 10,4 % a v BPout o 8,8 %. Účinek jednotlivých nádrží tedy závisel nejen na jejich objemu, ale také na poloze vůči soutoku a na časovém posunu k hydrogramu druhé větve.

3.3 Kumulativní účinek nádrží na jednotlivých tocích

Varianta V6 s oběma nádržemi na Bakovském potoce dosáhla v BP1 kulminace 22,49 m³ · s⁻¹, což odpovídá snížení o 34,6 % oproti V0 a časovému posunu o 5,25 h. V závěrovém profilu BPout se kulminace snížila na 42,49 m³ · s⁻¹, tedy o 23,3 %, a nastala v čase 20:45, o 3,5 h později než v referenční variantě. Součet individuálních redukcí variant V1 a V2 v BPout činí 8,12 m³ · s⁻¹, zatímco společná varianta V6 dosahuje redukce 12,94 m³ · s⁻¹. Index interakce IG_{BP} = 1,59 tak pro tuto událost indikuje výrazně supra-aditivní účinek dvojice sériově uspořádaných nádrží.

Ještě výraznější transformační účinek byl zjištěn pro soustavu tří nádrží na Zlonickém potoce ve variantě V7. Kulminace v ZP1 poklesla z 23,10 na 14,48 m³ · s⁻¹, tedy o 37,3 %, a její výskyt se posunul z 18:00 na 23:45. V závěrovém profilu BPout dosáhla kulminace 34,73 m³ · s⁻¹, což znamená snížení o 37,3 %. Hydrogram však získal bimodální charakter: první maximum kolem 17:15 bylo ovládáno neztransformovanou vlnou z Bakovského potoka, zatímco druhé, nižší maximum kolem 23:00 souviselo s výrazně opožděnou vlnou ze Zlonického potoka. Součet individuálních redukcí V3, V4 a V5 v BPout činí 13,37 m³ · s⁻¹, avšak společná varianta V7 dosáhla redukce 20,70 m³ · s⁻¹. Hodnota IG_{ZP} = 1,55 opět potvrzuje supra-aditivní chování uvnitř dílčí soustavy.

3.4 Celkový účinek soustavy pěti nádrží

Při aktivaci všech pěti nádrží (V8) se lokální účinek obou dílčích soustav dále projevil v profilech před soutokem. V ZP1 zůstala kulminace prakticky shodná s V7, přibližně 14,47 m³ · s⁻¹, zatímco v BP1 klesla na 21,61 m³ · s⁻¹. V profilu BPout byla maximální hodnota 34,46 m³ · s⁻¹, tj. o 20,97 m³ · s⁻¹ neboli 37,8 % méně než ve V0. Maximum se v exportovaném hydrogramu vyskytlo v čase 24:00, tedy o 6,75 h později než v referenční variantě.

Z hlediska samotné velikosti kulminace přineslo přidání dvojice nádrží na Bakovském potoce k variantě V7 jen malé další snížení z 34,73 na 34,46 m³ · s⁻¹. Z hlediska časové struktury hydrogramu je však změna zásadní. Ve V7 zůstává rozhodující časné maximum vyvolané především Bakovským potokem. Ve V8 je tato časná část hydrogramu silně potlačena a globální kulminace se přesouvá na pozdější část vlny. Obr. 6 ukazuje, že kumulativní efekt se proto neprojevuje pouze snížením vrcholu, ale i změnou toho, která část složeného hydrogramu představuje rozhodující kulminaci.

Tab. 5. Kulminační průtoky Q [m³ · s⁻¹] a čas jejich výskytu T [hh:mm] odvozené přímo z hydrogramů jednotlivých variant

Tab. 5. Peak discharges Q [m³ · s⁻¹] and their occurrence times T [hh:mm] derived directly from the hydrographs of individual scenarios

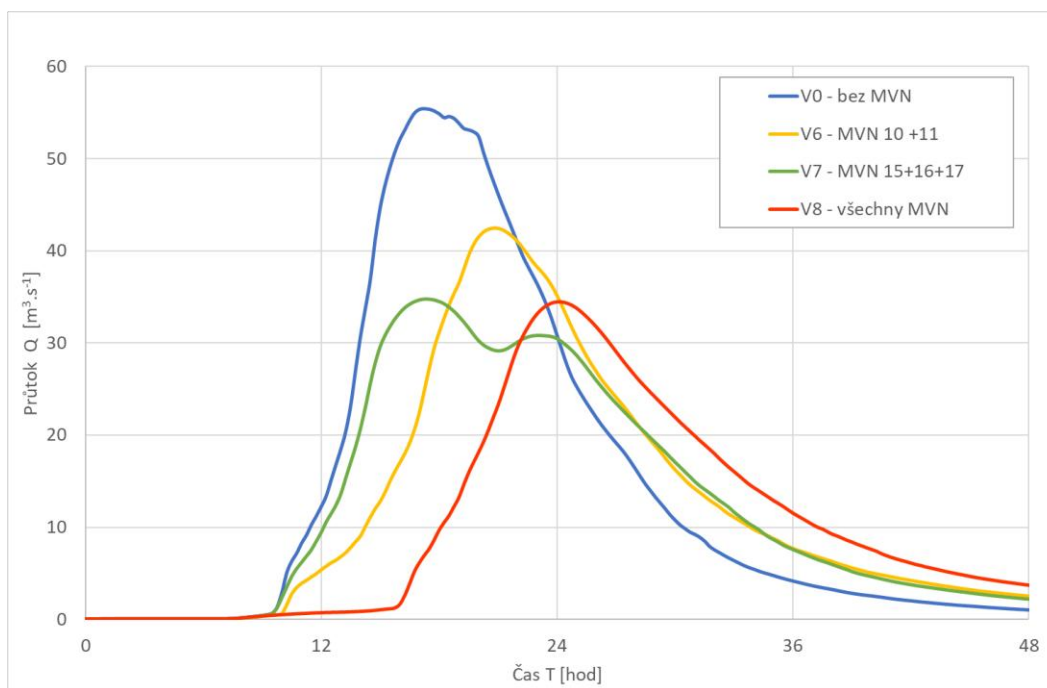
Var.	ZP1 Q/T	ZP2 Q/T	ZP3 Q/T	BP1 Q/T	BP2 Q/T	BPout Q/T
V0	23,1 / 18:00	22,7 / 17:00	22,6 / 14:00	34,4 / 16:15	33,6 / 14:00	55,4 / 17:15

Var.	ZP1 Q/T	ZP2 Q/T	ZP3 Q/T	BP1 Q/T	BP2 Q/T	BPout Q/T
V1	23,1 / 17:45	22,8 / 16:45	22,8 / 14:30	25,8 / 19:30	33,6 / 14:00	48,0 / 19:30
V2	23,1 / 17:45	22,8 / 16:45	22,8 / 14:30	31,9 / 17:45	31,1 / 15:30	54,7 / 18:30
V3	21,9 / 19:15	22,2 / 17:00	22,8 / 14:30	34,2 / 16:15	33,6 / 14:00	53,2 / 18:15
V4	19,9 / 20:00	19,5 / 19:15	22,8 / 14:30	34,1 / 16:15	33,6 / 14:00	49,1 / 18:45
V5	20,7 / 19:45	20,3 / 18:45	20,0 / 16:45	34,1 / 16:00	33,6 / 14:00	50,5 / 18:45
V6	23,0 / 18:00	22,7 / 17:15	22,4 / 14:00	22,5 / 21:30	31,1 / 15:30	42,5 / 20:45
V7	14,5 / 23:45	16,0 / 21:15	19,9 / 16:45	34,4 / 16:15	33,6 / 14:00	34,7 / 17:15
V8	14,5 / 23:45	16,0 / 21:15	19,9 / 16:45	21,6 / 21:30	31,1 / 15:30	34,5 / 24:00

Tab. 6. Transformační účinek variant v závěrovém profilu BPout vzhledem k referenční variantě V0

Tab. 6. Flood-wave transformation effect of the scenarios at BPout relative to reference scenario V0

Var.	Zahrnutí MVN	Qmax BPout [m ³ ·s ⁻¹]	Snížení [m ³ ·s ⁻¹]	Snížení [%]	Čas kulminace	Posun [h]
V0	bez MVN	55,43	0,00	0,0	17:15	0,00
V1	MVN 11	48,04	7,39	13,3	19:30	2,25
V2	MVN 10	54,70	0,73	1,3	18:30	1,25
V3	MVN 15	53,24	2,19	4,0	18:15	1,00
V4	MVN 16	49,14	6,29	11,3	18:45	1,50
V5	MVN 17	50,54	4,89	8,8	18:45	1,50
V6	MVN 10 + MVN 11	42,49	12,94	23,3	20:45	3,50
V7	MVN 15 + MVN 16 + MVN 17	34,73	20,70	37,3	17:15	0,00
V8	všechny MVN	34,46	20,97	37,8	24:00	6,75



Obr. 6. Hydrogramy v závěrovém profilu BPout pro referenční variantu a skupinové varianty V6–V8

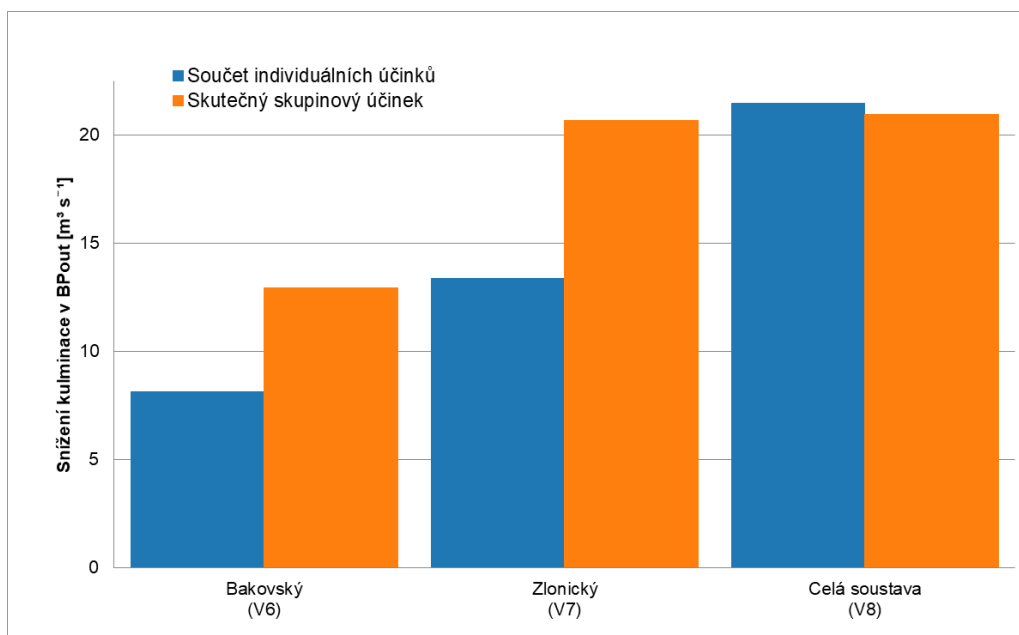
Fig. 6. Hydrographs at the downstream BPout profile for the reference scenario and combined scenarios V6–V8

Tab. 7. Porovnání součtu individuálních redukcí se skutečným skupinovým účinkem v BPout

Tab. 7. Comparison of summed individual peak reductions with the actual combined effect at BPout

Skupina	Individuální varianty	Skupinová varianta	$\Sigma\Delta Q_i$ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	ΔQ_G [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	IG [–]
Bakovský potok	V1 + V2	V6	8,12	12,94	1,59
Zlonický potok	V3 + V4 + V5	V7	13,37	20,70	1,55
Celá soustava	V1–V5	V8	21,49	20,97	0,98

Grafické porovnání součtu individuálních redukcí se skutečným skupinovým účinkem jednotlivých dílčích soustav a celé soustavy je uvedeno na obr. 7.



Obr. 7. Součet individuálních efektů a skutečný skupinový účinek na snížení kulminačního průtoku v BPout
 Fig. 7. Sum of individual effects and actual combined effect on peak-discharge reduction at BPout

DISKUZE

Výsledky potvrzují, že kumulativní transformační účinek soustavy MVN je nutné chápat jako dynamickou vlastnost celé říční sítě, nikoli jako součet izolovaných retenčních účinků. To odpovídá poznatkům studií zaměřených na prostorovou konfiguraci retenčních nádrží [2] a na hodnocení více nádrží v měřítku povodí [3]. V řešené soustavě se tento princip projevil dvěma odlišnými mechanismy [5]: supra-aditivním působením sériově uspořádaných nádrží na jednotlivých tocích a následnou změnou časového skládání obou dílčích hydrogramů na soutoku.

Pro Bakovský potok je rozdíl mezi účinkem V6 a součtem V1 + V2 výrazný. Samostatná MVN 10 má v BPout relativně malý účinek, protože její lokální transformace se při průchodu k soutoku časově skládá s dalšími přítoky. Po zapojení MVN 11 však hydrogram již vstupuje do níže položeného úseku v pozměněné podobě a společná transformace je výraznější než součet dvou individuálních variant. Analogický mechanismus je patrný u trojice nádrží na Zlonickém potoce. Hodnoty $IB = 1,59$ a $IZ = 1,55$ je proto vhodné interpretovat jako důkaz významné interakce mezi nádržemi pro konkrétní návrhovou událost, nikoli jako univerzální konstantu dané soustavy.

Zvlášť významný je výsledek variant V7 a V8. V7 přítok ze Zlonického potoka natolik redukuje a současně jej posouvá v čase, že v závěrovém profilu vzniká bimodální hydrogram. První vrchol je spojen s dřívější vlnou z Bakovského potoka, druhý s opožděnou transformovanou vlnou ze Zlonického potoka. Při aktivaci dvojice nádrží na Bakovském potoce ve V8 je časný vrchol potlačen a rozhodující kulminací se stává pozdější část hydrogramu. Právě tento přechod vysvětluje, proč V8 ve srovnání s V7 snižuje maximální průtok již jen nepatrně, ačkoli významně mění průběh vlny a posouvá její maximum. Hodnocení pouze podle procentního snížení Q_{max} by proto podcenilo transformační přínos V8 z hlediska času dostupného pro reakci a z hlediska rozložení zatížení v čase.

Celkový index interakce $IG_{all} = 0,98$ naznačuje téměř aditivní chování celé soustavy, pokud je kritériem pouze maximální průtok v BPout. Tento výsledek však neznamená, že celý systém je skutečně lineární. Naopak tvar hydrogramu ukazuje výraznou nelinearitu v časové oblasti. Součet individuálních maximálních redukcí navíc sčítá hodnoty, které nastávají v různých variantách a v různých časech. Index IG je proto vhodný jako jednoduchá srovnávací metrika, ale měl by být vždy doplněn grafickým porovnáním hydrogramů a analýzou časů kulminace.

Použití 1D HEC-RAS je v řešeném území metodicky odůvodněno četností hydraulických objektů. Přímo v simulaci V3 se projevil zpětný vliv MVN 15 směrem k poloze MVN 16. Takový jev je důležitý jak pro interpretaci retenčního účinku, tak pro posouzení vzduť a interakce s navazujícími objekty. Oficiální dokumentace HEC-HMS upozorňuje, že zjednodušené routingové metody nemohou plně reprezentovat zpětné vzduť a vliv hydraulických staveb [7], zatímco HEC-RAS je pro sítě s mosty, propustky, jezy a akumulacími oblastmi přímo koncipován [8]. Pro tento typ úlohy je proto spojení HEC-HMS pro tvorbu hydrologických vstupů a HEC-RAS pro detailní hydraulický routing vhodnější než použití jednoho zjednodušeného routingového schématu v celém povodí. Důležitá je přitom metodická separace obou kroků: vstupní TPV byly v HEC-HMS odvozeny bez retenčního účinku potenciálních MVN, takže jejich transformační působení bylo do výpočtu vneseno až v hydraulickém modelu a nedocházelo k jeho dvojímu započtení.

Dlouhodobé bilanční hodnocení potenciálních nádrží doplňuje povodňovou analýzu o informaci o jejich provozní udržitelnosti. V posuzovaném období vykazaly všechny nádrže 100% zabezpečení minimálního zůstatkového odtoku a vysoké hodnoty indexu Is. Současně je patrné, že jednotlivé nádrže se významně liší minimální relativní náplní; MVN 15 se v bilančním minimu přibližuje 25 % V_{max} , zatímco MVN 11 zůstává téměř na 90 % V_{max} . To je důležité pro budoucí návrh provozních pravidel, protože povodňový transformační potenciál závisí na disponibilním volném prostoru před příchodem povodně. Dlouhodobá vodohospodářská stabilita a povodňový transformační účinek by proto měly být při návrhu víceúčelových MVN posuzovány společně, nikoli odděleně.

Předložené výsledky jsou omezeny charakterem scénářové studie. Hodnocena byla jedna jednodenní návrhová srážka P_{100} a jedna konkrétní konfigurace hydrologických a hydraulických podmínek. Zatěžovací hyetogram měl ve všech dílčích povodích shodný relativní tvar, zatímco velikost denního srážkového úhrnu odpovídala plošnému rozložení na dílčí povodí. Nelze proto předpokládat, že stejné procentní redukce a hodnoty interakčních indexů budou platit pro jiné doby opakování, jinou délku či časoprostorové rozložení srážky, jiné nasycení povodí nebo jiné počáteční náplně nádrží. Pro robustní posouzení by bylo vhodné doplnit soubor událostí s odlišnými dobami opakování a trváním srážek, varianty časoprostorového rozložení srážky a počátečních hladin a případně citlivost na kapacitu výpustných a bezpečnostních objektů. Přínosné by bylo také kvantifikovat nejistotu hydrologických vstupů a ověřit hydraulický model na dostupných historických průtocích nebo vodních stavech. Potřebu testovat více typů srážkového zatížení podporují také výsledky Tlapáka et al. [19], kteří u soustavy tří MVN posuzovali 100letou srážku s dobami trvání 15, 20, 30 a 60 min. V jejich modelové studii transformační účinek obecně klesal s rostoucí dobou trvání srážkové události, jelikož rostl poměr objemu srážkového odtoku k disponibilnímu retenčnímu prostoru. To podporuje závěr, že výsledky jediné návrhové události nelze bez dalšího zobecnit na jiné srážkové scénáře.

ZÁVĚR

Tato práce hodnotila transformační účinek soustavy pěti potenciálních MVN v povodí Bakovského a Zlonického potoka při průchodu návrhové povodňové vlny. Na základě propojení hydrologického modelu HEC-HMS a hydraulického modelu HEC-RAS byly analyzovány individuální i skupinové účinky nádrží na kulminační průtok, čas kulminace a tvar výsledného hydrogramu v závěrovém profilu povodí. Současně byly v kontextu dosažených výsledků zohledněny i výstupy předchozích simulací dlouhodobé vodohospodářské bilance navržených MVN.

Výsledky simulací pro návrhovou jednodenní srážku s dobou opakování $N = 100$ let prokázaly významný kumulativní transformační účinek celé soustavy pěti potenciálních MVN. V závěrovém profilu BPout vedlo současné zapojení všech nádrží ke snížení kulminačního průtoku z 55,43 na 34,46 $m^3 \cdot s^{-1}$, což odpovídá redukci o 37,8 %. Současně došlo k posunu výskytu kulminace přibližně o 6,75 hodiny, což potvrzuje nejen retenční, ale také výrazný transformační vliv nádrží na časový průběh povodňové vlny.

Analýza dílčích skupin nádrží ukázala, že jejich společný účinek může převyšovat prostý součet individuálních efektů. Dvojice nádrží MVN 10 a MVN 11 na Bakovském potoce dosáhla v profilu BPout redukce kulminačního průtoku o 23,3 %, přičemž hodnota indexu interakce $IG_{BP} = 1,59$ indikuje synergické působení obou objektů. Obdobně trojice nádrží MVN 15, MVN 16 a MVN 17 na Zlonickém potoce snížila kulminační průtok o 37,3 % při hodnotě indexu $IG_{ZP} = 1,55$. V obou případech byl skupinový účinek vyšší než součet účinků jednotlivých nádrží posuzovaných samostatně.

Při hodnocení celé soustavy dosáhl index interakce pro kulminační průtok hodnoty $IG_{all} = 0,98$, což představuje téměř aditivní výsledek. Tento závěr by však mohl být při posuzování pouze na základě kulminačního průtoku zavádějící, protože časový účinek soustavy vykázal výrazně nelineární charakter. Aktivace nádrží významně změnila vzájemné překrývání dílčích povodňových vln, a tím i tvar výsledného hydrogramu v závěrovém profilu. Nejvýrazněji se tento mechanismus projevil u varianty V7, která vedla ke vzniku bimodálního hydrogramu. Výsledek potvrzuje, že desynchronizace povodňových vln z dílčích povodí může být pro výslednou kulminaci stejně významná jako samotná redukce průtoků v jednotlivých nádržích.

Získané poznatky současně ukazují, že účinnost soustav MVN nelze spolehlivě hodnotit pouze prostřednictvím součtu procentních redukcí kulminačních průtoků. Pro správné posouzení jejich funkce je nezbytné analyzovat celý průběh hydrogramů, změny časů kulminací i vzájemné hydraulické interakce v říční síti. V podmínkách hodnoceného území s přibližně 30 příčnými objekty se jako vhodný přístup ukázalo propojení hydrologického modelu HEC-HMS pro generování vstupních hydrogramů s jednorozměrným neustáleným hydraulickým modelem HEC-RAS, který umožňuje zohlednit vzdutí, akumulaci vody a detailní hydraulické působení jednotlivých objektů.

Dlouhodobé bilanční hodnocení dále prokázalo vysokou hydrologickou stabilitu všech pěti potenciálních nádrží. Zjištěné rozdíly v minimální náplni jednotlivých objektů však naznačují, že návrh jejich protipovodňové funkce by měl být v navazujících studiích posuzován společně s provozními pravidly a velikostí disponibilního retenčního prostoru. Výsledky práce tak potvrzují význam systémového hodnocení soustav vodních děl a poukazují na potřebu zohledňovat nejen velikost transformace kulminačního průtoku, ale i časové a hydraulické vazby, které mohou rozhodujícím způsobem ovlivnit výsledný průběh povodně v závěrových profilech povodí.

Je však třeba zdůraznit, že cílem této práce nebylo komplexní posouzení kumulativního transformačního účinku soustavy MVN pro všechny typy povodňových situací, nýbrž ověření metodického postupu na konkrétní návrhové povodni vyvolané jednodenním srážkovým úhrnem s dobou opakování $N = 100$ let. Návrhová povodeň ve variantě V0, představující stav bez existence hodnocené soustavy nádrží, byla konfrontována se stávajícím rozsahem záplavových území a s hodnotami kulminačních průtoků stejné doby opakování ve vodočetné stanici Velvary a v profilech Bakovského a Zlonického potoka bezprostředně před jejich soutokem. Předložené výsledky tak představují především metodický příspěvek k hodnocení kumulativních účinků soustav MVN a vytvářejí základ pro navazující studie zaměřené na širší spektrum hydrologických situací.

Použité veličiny a symboly

Níže jsou uvedeny symboly a zkratky používané v textu a v rovnicích (1)–(3).

Symbol	Význam
A_{norm}	plocha zátopy MVN při normální hladině,
B_{prel}	šířka bezpečnostního přelivu,
$H_{bezp.p}$	úroveň koruny bezpečnostního přelivu,
H_{max}	úroveň maximální hladiny MVN,
H_{norm}	úroveň normální hladiny MVN,
I_s	index hydrologické stability nádrže (v %),
IG	index skupinové interakce, viz rovnice (3),
$K_{j,p}$	relativní transformační účinek v profilu p pro variantu j , viz rovnice (1),
P_{100}	návrhový jednodenní srážkový úhrn s dobou opakování $N = 100$ let,
$Q_{max,j,p}$	maximální průtok v profilu p pro variantu j ,
$Q_{max0,p}$	referenční maximální průtok v profilu p (varianta V0),
Q_{mzp}	minimální zůstatkový průtok (požadovaný odtok z MVN),
Q_{100}	hodnota ustáleného povodňového průtoku s dobou opakování $N = 100$ let,
ΔQ_G	snížení kulminace dosažené skupinovou variantou,
$\sum \Delta Q_i$	součet individuálních snížení kulminace nádrží tvořících skupinu,
$T_{j,p}$	čas výskytu kulminace v profilu p pro variantu j ,

Symbol	Význam
$T_{0,p}$	čas výskytu kulminace v profilu p pro referenční variantu V_0 ,
$\Delta T_{j,p}$	časový posun kulminace pro variantu j v profilu p , viz rovnice (2),
$V_{\max,ret}$	celková retenční část objemu nádrže dosažená při maximální hladině,
V_{norm}	zásobní objem nádrže při normální hladině,
V	aktuální zásobní objem nádrže (uvedeno také v procentech z V_{norm}),
$\min.V/V_{\text{norm}}$	minimální dosažený poměrný objem V/V_{norm} dosažený při simulaci,
ZQ_{out}	zabezpečení odtoku na úrovni požadovaného odtoku (v %),
ZV	zabezpečení dosaženého objemu (v %), viz tab. 2.

Poděkování

Autoři děkují správci Povodí Vltavy, s. p., za poskytnutí nezbytných informací o vodních tocích a objektech dle porřizené technickoprovozní evidence. Příspěvek vznikl za podpory Technologické agentury ČR v rámci financování výzkumného projektu č. SS02030027 „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu (Centrum Voda)“, řešeného v letech 2020–2026.

Literatura

- [1] TÁBOŘÍKOVÁ, V., BALVÍN, P. Vliv hydrologických extrémů na rybníky a malé vodní nádrže. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2025, 67(5), 28–33. DOI: 10.46555/VTEI.2025.07.004.
- [2] AYALEW, T. B., KRAJEWSKI, W. F., MANTILLA, R. Insights into Expected Changes in Regulated Flood Frequencies due to the Spatial Configuration of Flood Retention Ponds. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2015, 20(10). DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001173.
- [3] CIPOLLINI, S., VOLPI, E., FIORI, A. Toward a Catchment-Scale Assessment of Flood Peak Attenuation by Multiple Reservoirs. *Water Resources Research*. 2023, 59(2), e2022WR032821. DOI: 10.1029/2022WR032821.
- [4] LECHEVALLIER, H., DAGÈS, C., BURGER-LEENHARDT, D., MAGAND, C., MOLÉNAT, J. The influence of small farm reservoir network characteristics on their cumulative hydrological impacts. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2026, 30, 3853–3874. DOI: 10.5194/hess-30-3853-2026.
- [5] HABETS, F., MOLÉNAT, J., CARLUER, N., DOUEZ, O., LEENHARDT, D. The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology: A review. *Science of the Total Environment*. 2018, 643, 850–867. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.188. Dostupné z: https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-01905701/file/ARTICLE-IMPACT-CUMUL-VF_FH.pdf
- [6] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. HEC-HMS *Technical Reference Manual* [on-line]. 2023 [cit. 2026-08-24]. Dostupné z: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/>
- [7] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. Applicability and Limitations of Channel Routing Models [on-line]. *HEC-HMS Technical Reference Manual* [cit. 2026-08-24]. Dostupné z: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/channel-flow/applicability-and-limitations-of-channel-routing-models>
- [8] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. HEC-RAS *Hydraulic Reference Manual* [on-line]. [cit. 2026-08-24]. Dostupné z: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx>
- [9] EZ HYDROINFORMATICS s.r.o. *Studie odtokových poměrů v povodí Bakovského potoka – území Slánsko–Velvarsko. Dokumentace projektového záměru, finální verze*. Praha: EZ Hydroinformatics s.r.o., 2019. Zpracováno pro Povodí Vltavy, státní podnik.
- [10] Projekt SS02030027 Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu (Centrum Voda). Dílčí cíl 3.5 – Výstavba či obnova malých vodních nádrží. Souhrnná výzkumná zpráva. 2026.

Výzkumný ústav vodohospodářský, v. v. i. Dostupné z: <https://www.centrum-voda.cz/vysledky/wp-3-voda-pro-lidi>

[11] ČSN 75 2410 (2011). Malé vodní nádrže. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

[12] KULASOVÁ, B., ŠERCL, P., BOHÁČ, M. Projekt QD1368 „Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní“. Závěrečná zpráva. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2004.

[13] ŠERCL, P. *Aplikace HydroHMS pro ArcGISPro*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2018.

[14] CORINE Land Cover 2018 (vector), Europe, 6-yearly – version 2020_20u1 [on-line]. 2020 [cit. 2026-08-25]. Dostupné z: <https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/copernicus/api/records/71c95a07-e296-44fc-b22b-415f42acfd0?language=all>

[15] VÝZKUMNÝ ÚSTAV MELIORACÍ A OCHRANY PŮDY. *Nové mapy hydrologických funkcí půd* [on-line]. 2018 [cit. 2026-08-25]. Dostupné z: <https://www.vumop.cz/nove-mapy-hydrologickych-funkci-pud>

[16] Povodí Vltavy, státní podnik. *Záplavová území Bakovského potoka, ř. km 0-12,2: technická zpráva*. České Budějovice: Povodí Vltavy, útvary inženýrských činností, únor 2005. Zpracoval: Ing. Jiří Kolář.

[17] GEFOS a.s.; Vodohospodářský rozvoj a výstavba, a. s. *Záplavové území Bakovského potoka, ř. km 12,2–44,6: technická zpráva*. Praha: Povodí Vltavy, státní podnik, září 2013.

[18] Povodí Vltavy, státní podnik. *Zlonický potok: výpočet velkých vod – podklad pro vyhlášení záplavových území*. České Budějovice: Povodí Vltavy, útvary inženýrských činností, březen 2005. Zpracoval: Ing. Pavel Filip.

[19] TLAPÁK, V., ŠÁLEK, J., PELIKÁN, P., PILAŘOVÁ, P. *Využití malých vodních nádrží pro transformaci povodňových průtoků. Prezentace na konferenci Vodní nádrže 2015, 6. 10. 2015* [on-line]. [cit. 2026-08-26]. Dostupné z: <https://pmo.cz/vodninadrze/wp-content/uploads/sites/5/download/tlapak-vyuziti-malych-vn.pdf>

Autoři

Ing. Petr Sklenář, Ph.D.¹

petr.sklenar@vuv.cz

ORCID: 0000-0003-4591-3148

Ing. Radovan Tyl, Ph.D.²

radovan.tyl@chmi.cz

ORCID: 0000-0002-5270-3248

¹Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha (Česká republika)

²Český hydrometeorologický ústav, Praha (Česká republika)

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.09.001

ISSN 0322-8916/© 2026 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

CUMULATIVE FLOOD ATTENUATION EFFECT OF A SYSTEM OF SMALL RESERVOIRS DURING A DESIGN FLOOD IN THE BAKOVSKÝ AND ZLONICKÝ STREAM CATCHMENTS

SKLENÁŘ, P.¹; TYL, R.²

¹T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague (Czech Republic)

²Czech Hydrometeorological Institute, Prague (Czech Republic)

Keywords: small water reservoir – flood-wave attenuation – cumulative effect – HEC-HMS – HEC-RAS – unsteady flow – flood peak – Bakovský stream – Zlonický stream

The paper evaluates the cumulative flood-wave transformation effect of a system of five potential small water reservoirs (SWR 10, 11, 15, 16 and 17) located on the Bakovský and Zlonický streams. The main research question is whether the joint effect of several reservoirs on flood-peak magnitude and timing can be represented as the sum of their individual effects, or whether nonlinear interactions arise from sequential hydrograph routing, phase shifts and hydraulic interactions in channel reaches containing numerous cross structures. Input discharge data were generated by a HEC-HMS rainfall-runoff model for a 24-hour design rainfall event with a return period of 100 years. The model supplied boundary hydrographs for the Bakovský stream downstream of the Byseňský stream confluence and for the Zlonický stream downstream of the Dřínovský stream confluence, together with lateral inflows from the corresponding intervening catchments to the confluence of both streams and further downstream on the Bakovský stream to a profile upstream of the Červený stream confluence. Flood-wave routing was subsequently performed using a one-dimensional HEC-RAS unsteady-flow model. This approach explicitly represented the geometry and hydraulic effects of approximately 30 bridges, crossings, footbridges, weirs, grade-control structures and other cross structures, including their cumulative influence on backwater, channel storage and flood-wave attenuation. Nine scenarios V0–V8 were evaluated: a reference scenario without reservoirs, five scenarios with individual reservoirs, a two-reservoir system on the Bakovský stream, a three-reservoir system on the Zlonický stream, and a scenario with all five reservoirs. At the downstream control profile BPout, the reference peak was $55.43 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ at 17:15. The pair SWR 10+11 reduced the peak to $42.49 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (23.3 %) and delayed it by 3.5 h. The three-reservoir Zlonický system reduced the peak to $34.73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (37.3 %); its downstream hydrograph became bimodal, demonstrating the key role of desynchronisation between tributary flood waves. With all reservoirs active, the peak decreased to $34.46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (37.8 %) and occurred approximately 6.75 h later than in the reference scenario. Comparison of the combined scenarios with the sum of the respective individual peak reductions indicates supra-additive behaviour within both tributary reservoir systems, whereas the full five-reservoir system is nearly additive when judged solely by peak magnitude. Nevertheless, hydrograph shape and timing remain strongly nonlinear. The results show that cumulative reservoir performance cannot be assessed reliably by simply adding individual peak reductions and that hydraulic routing capable of representing backwater and storage effects is particularly relevant in channel networks with numerous hydraulic structures.