

Interpolace vybraných průtoků v nepozorovaných povodích IV. řádu v povodí Otavy

**LUDEK BUREŠ, MAGDALENA SAMCOVÁ, RADEK ROUB, LUCIE POLÁKOVÁ,
TOMÁŠ HEJDUK, MARTIN ŠTICH**

Klíčová slova: průtok – povodí IV. řádu – interpolace – Top-Kriging

ABSTRAKT

Znalost odtokových poměrů z povodí je klíčová pro širokou škálu inženýrských i vědeckých aplikací. Přímá měření v rozsahu všech povodí na území České republiky (dále ČR) nejsou reálná. Standardními metodami odhadu těchto parametrů jsou lokální regresní modely, srážkoodtokové modely, případně jiné interpolační techniky. Regresní modely poskytují spolehlivé výsledky, avšak odvození lokálních regresních rovnic je náročné na množství vstupních a referenčních dat. Srážkoodtokové modely mají své uplatnění při návrhových činnostech lokálního rozsahu. Jejich aplikace v rozsahu ČR není triviální a předpokládá znalost rozložení srážek. Interpolační techniky poskytují rychlý, často však méně spolehlivý přístup. Většina těchto interpolací není primárně určena pro hydrologické aplikace. Výjimkou je metoda Top-Kriging. Vychází z krigovacích metod používaných v geostatistice, jež rozšiřuje v mnoha směrech za účelem postihnout hydrologických zákonitostí, zejména koncentrace odtoku v říční síti. S úspěchem byla tato metoda použita v Rakousku a Francii při odhadu průtoků v nepozorovaných větvích říční sítě. Je však tato metoda vhodná i pro použití v rámci ČR? Výsledky ukazují, že heterogenita povodí zejména v horských a podhorských oblastech Šumavy výkon Top-Krigingu značně snižuje. Dodatečná transformace výsledků dokáže její výkon v případě některých průtoků zlepšit. V porovnání s přímým rozpočtem však Top-Kriging zaostává.

ÚVOD

Znalost hydrologických parametrů, jako jsou vodnatost povodí nebo průtoky v řekách, je klíčovým faktorem pro zvládnutí povodňového rizika, krajinné plánování a řadu vědeckých či inženýrských aplikací. Dostatek povrchové vody je aktuálně řešeným tématem v souvislosti s měnícím se klimatem a její dostupnost je nezbytná pro přizpůsobení se novým podmínkám prostředí.

Základní hydrologickou jednotkou, pro kterou bývají hydrologická data požadována, je povodí IV. řádu. Na území ČR se nachází přes 8 500 takovýchto povodí. Pro drtivou většinu z nich nejsou data o jejich vodnatosti dostupná. Nedostupnost těchto dat je do značné míry vázána na problematiku sběru dat, zejména na omezený počet limnigrafických stanic. Nejrozsáhlejší hydrologickou monitorovací sítí v ČR provozuje Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ), jenž v současné době disponuje zhruba 550 stanicemi. Navýšení počtu stanic je limitováno především finanční náročností na jejich zřízení a provoz.

Další možností, jak požadovaná hydrologická data získat, jsou různé typy hydrologických odhadů, predikce nebo analogie. Odhad proměnných souvisejících s odtokem z povodí je obvykle založen na regresních metodách mezi proměnnou a vybranými charakteristikami povodí. Při odhadu v rámci velkých nebo značně heterogenních povodí dochází zpravidla k rozdělení do více oblastí. Regresní parametry jsou pak určeny pro jednotlivé oblasti separátně [1]. Jiným přístupem je odhad pomocí srážkoodtokových modelů, jež jsou zpravidla náročné na množství vstupních dat, čas sestavení a výpočetní čas. S úspěchem ale bývají využívány v lokálním měřítku a při návrhových činnostech [2]. Poslední možností je využití prostorových interpolací. Jde o rychlý a relativně jednoduchý přístup. Nevýhodou je však nižší kvalita odhadu, často vyplývající z nerespektování hydrologické topologie ve vztazích povodí – subpovodí. Interpolace je řízena primárně euklidovskou vzdáleností mezi interpolovaným místem a místem, kde je známa daná proměnná [3, 4]. Na mezinárodním poli se hydrologickou predikcí v nepozorovaných povodích zabývá např. iniciativa PUB (Prediction in Ungauged Basins). Cílem aktivit je vytvoření lepšího vědeckého základu v oblasti hydrologického modelování, zmenšení nejistot v predikci a hledání nových přístupů [5]. Nejvýznamnější institucí, která se v ČR hydrologickými predikcemi zabývá, je ČHMÚ. Obvykle pro své predikce rozložení vody v povodí používá metodu regionálních regresních modelů [6].

Metodou spadající na pomezí prostorových interpolací a koncepčního modelu je metoda Top-Kriging (TOP). TOP vychází z geostatistických metod původně vyvinutých pro potřeby těžebního průmyslu [7]. Jejich rozšířením a transformací pak vznikla geostatistická interpolační metoda, jež umožňuje odhad různých hydrologických parametrů v nepozorovaných povodích. TOP v sobě kombinuje dvě hlavní skupiny procesů: 1) tvorbu odtoku v rámci povodí a 2) agregaci a směřování odtoku v rámci říční sítě. Za tímto účelem je tvorba odtoku konceptualizována jako prostorově kontinuální proces, který existuje v jakémkoli bodě krajiny. Agregace odtoku je pak popisována jako kumulativně se zvětšující hodnota, jež roste spolu se vzdáleností od pramene. Základem metody je interpolační metoda kriging (známá také jako Best Linear Unbiased Estimator), která je upravena tak, aby respektovala hierarchii v rámci hydrologické sítě. Pro odhad hydrologických proměnných metoda využívá variogramu. Díky tomu je schopna zpracovávat i nestacionární proměnné. Metoda bere v úvahu místní nejistoty měření, které se mohou v různých lokalitách lišit, a tak využívat i krátké záznamy měření. Umožňuje také odhad nejistoty při určení sledované proměnné [8].

Předpokládá se, že výkon metody se zvyšuje s rostoucí hustotou říční sítě, rostoucí velikostí ploch povodí a závisí na množství pozorovaných povodí [9].

Oproti metodě Ordinary Kriging poskytuje lepší výsledky zejména při popisu vnořených povodí na sousedních říčních větvích [8]. Pro obě metody je ale typické, že nadhodnocují výsledky v nižších úsecích vodních toků (blíže k uzávěrovému profilu pozorovaných povodí) a zároveň podhodnocují výsledky v jejich vzdálenějších partiích [10, 11]. Metoda dosahuje dobrých výsledků v případě rozsáhlých homogenních povodí [12]. Otázkou ovšem zůstává, jak bude algoritmus schopen popsat variabilitu odtoků v rámci menších nehomogenních povodí.

TOP byl kromě odhadu velikostí odtoku uplatněn také např. pro výpočet odtokových křivek [13], odhad rychlosti proudění vody [14], stanovení časové řady odtoku z povodí [10], odhad výšky povodňových pravděpodobnostních kvantilů nebo vhodnosti vodního toku jako ekologického stanoviště [15, 16].

Cílem tohoto článku je zhodnotit použitelnost metody TOP pro odhad odtoku z povodí IV. řádu na území ČR.

toku. V tomto úseku protéká převážně zalesněnými údolními, od Sušice směrem k ústí pak především kulturní zemědělskou krajinou. Její charakter se mění na meandrující nížinný vodní tok s projevy sedimentace [17]. Horní části vodních toků v povodí Otavy vykazují nízký stupeň antropogenní transformace (např. v pramenné oblasti Vydry, Hamerského potoka, Otavy, Volyňky a Spůlky). Oproti tomu ve středních a dolních úsecích míra antropogenní transformace hydrografické sítě roste. Tento nárůst souvisí s navýšením socioekonomického využití údolních niv [18]. Dolní část toku je trvale zatopena. Délka zatopeného úseku je závislá na aktuální výšce hladiny vodního díla (VD) Orlík. Za obvyklých podmínek to je cca posledních 19 km (po jez Sulan, 18,6 ř. km). Nejvyšším bodem v povodí Otavy je vrchol Luzný (1 373 m n. m.), nejnižším zaústění řeky do VD Orlík. Nejvýznamnějšími přítoky jsou řeky Blanice, Volyňka, Lomnice, Ostružná, Křemelná a Vydra. Zobrazení polohy povodí Otavy v rámci ČR je znázorněno na obr. 1.

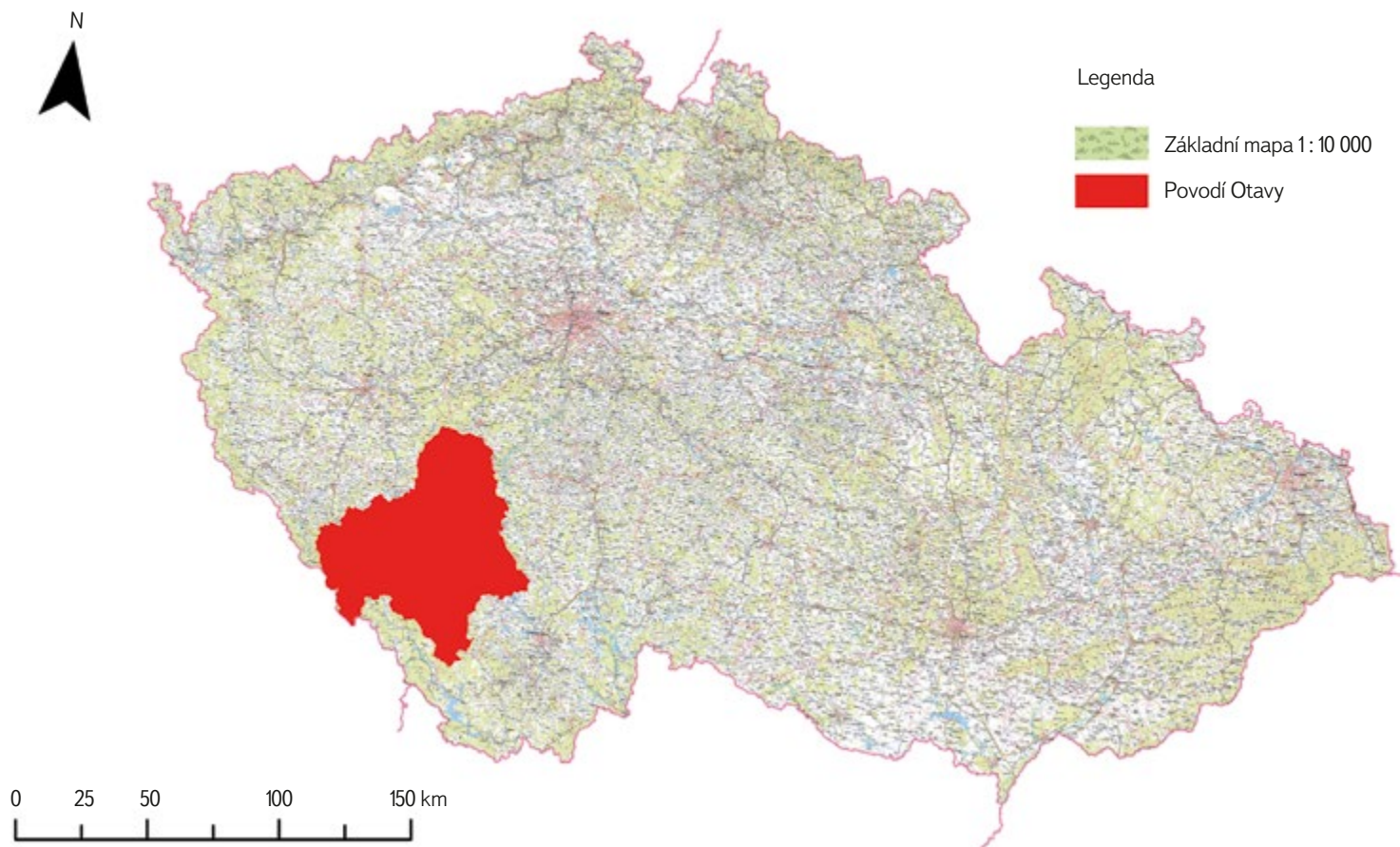
MATERIÁLY A METODY

Pilotní lokalita

Pilotní lokalitou je povodí řeky Otavy. Otava vzniká soutokem Vydry a Křemelny u Čeňkovy Pily na Šumavě. Její povodí má rozlohu 3 788,0 km² a délka toku činí 113 km. V horní části toku (nad městem Sušice, 91,7. ř. km) je charakteristická vysokou sklonitostí dna a vodnatostí. To jí dává charakter podhorského vodního

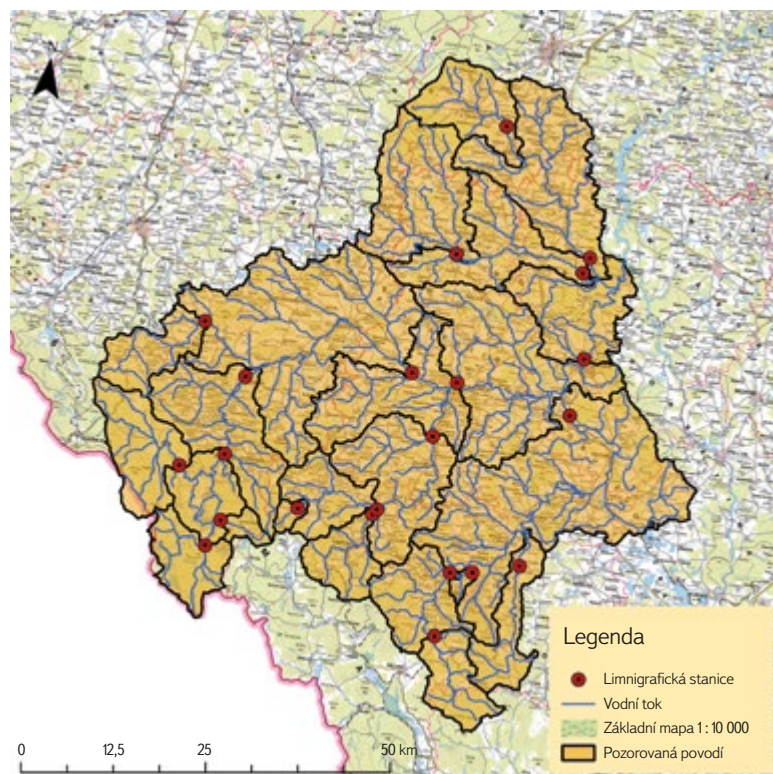
Top-Kriging

TOP na základě měřených dat (průtoky měřené v pozorovaných povodích v m³/s) vypočte bodový variogram. Ten využívá k popisu stupně prostorové závislosti na prostorové náhodné proměnné (specifický odtok) v rámci modelovaného územního celku. Tento bodový variogram však nelze použít přímo pro odhad odtoků pro jednotlivá povodí z důvodu rozdílných velikostí ploch subpovodí. Proto jsou v TOP testovány různé skupiny teoretických variogramů pro jednotlivé velikostní třídy subpovodí, pro které je pak automaticky



Obr. 1. Umístění povodí Otavy v rámci ČR

Fig. 1. Location of the Otava basin within the Czech Republic



Obr. 2. Rozmístění pozorovaných povodí na povodí Otavy
Fig. 2. Location of gauged catchments within the Otava basin

vybrán nevhodnější model variogramu. Poté co jsou určeny variogramy pro jednotlivé třídy, dojde k samotné predikci specifického odtoku pro jednotlivá předpovědní povodí [8].

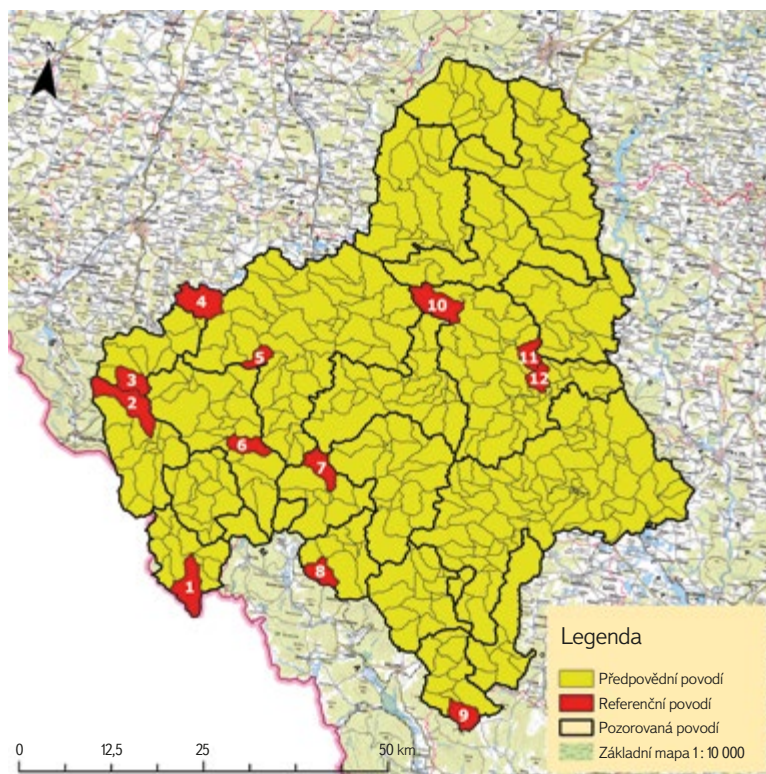
Vstupy pro TOP jsou osy vodních toků ve studované oblasti, vymezená pozorovaná povodí a vymezená předpovědní povodí. Pozorovaná povodí jsou větší územní celky (povodí) v rámci celkově popisované oblasti (povodí Otavy), k nimž jsou známy vybrané hydrologické charakteristiky. Velikost dané charakteristiky je metodou TOP interpolována do předpovědních povodí, jež spadají do pozorovaného povodí (jsou jejich subpovodími).

Osy vodních toků v povodí Otavy

Stávající osy vodních toků pro celé povodí Otavy byly převzaty ze systému DIBAVOD (Digitální Báze VOdohospodářských Dat) v digitálním vektorovém formátu ESRI (*.shp). Konkrétně šlo o vrstvu A03 – vodní tok (hrubé úseky) [19].

Předpovědní povodí

Jde o povodí, pro která má být metodou TOP provedena predikce vybraných hydrologických parametrů (odtoků). Pro potřeby této práce byla jako předpovědní povodí zvolena povodí IV. řádu, jež byla rovněž převzata ze systému DIBAVOD. V tomto případě se jednalo o vrstvu A08 – hydrologické členění – povodí IV. řádu [19].



Obr. 3. Rozmístění referenčních povodí v rámci povodí Otavy
Fig. 3. Location of reference catchments within the Otava basin

Pozorovaná povodí

Jako pozorovaná povodí pro potřeby TOP byla zvolena povodí k existujícím limnigrafickým stanicím na povodí Otavy. Tato povodí byla vytvořena seskupením povodí IV. řádu dle příslušnosti k dané limnigrafické stanici. Povodí IV. řádu, v němž se tato stanice nacházela, se stalo uzávěrovým povodím pro nově seskupené povodí. V případě, že se na jednom vodním toku nacházelo více limnigrafických stanic (např. Otava), byla k níže umístěným stanicím přiřazena pouze povodí nacházející se mezi jednotlivými limnigrafickými stanicemi. Důvodem pro stanovení pozorovaných povodí na základě rozmístění limnigrafických stanic byla právě dostupnost hydrologických údajů k těmto stanicím. Rozložení pozorovaných povodí v rámci povodí Otavy je znázorněno na obr. 2.

Hydrologické údaje pro pozorovaná povodí

Hydrologická data k limnigrafickým stanicím jsou volně dostupná díky Evidenčním listům hlásných profilů, které lze dohledat např. prostřednictvím Hlásné a předpovědní povodňové služby (HPPS). HPPS je provozována ČHMÚ [20]. V rámci této studie byla využita data z Evidenčních listů hlásných profilů Antýgl, Strakonice a Nový Dvůr. Celkově se jednalo o 22 limnigrafických stanic, z nichž byly převzaty průtoky Q_1 , Q_{10} a Q_{100} . Pro tytéž stanice pak byly doplněny průtoky Q_{355d} a Q_3 , které jsou dostupné prostřednictvím portálu ISVS – Evidence množství povrchových vod [21].

Mapa průměrných srážkových úhrnů

Její vydavatelem je ČHMÚ. Mapa patří do skupiny map popisujících charakteristiku klimatu na území ČR. Konkrétně zobrazuje průměrný roční úhrn srážek (mm) za období 1991–2020. Mapa je vydávána formou rastru [22].

Mapa dlouhodobého průměrného základního odtoku

Vydavatelem je Česká geologická služba. Mapa je dostupná prostřednictvím webových mapových služeb (WMS). Vyjadřuje střední hodnoty dlouhodobého průměrného základního odtoku ($l/s/km^2$) za období 1991–2020 [23].

Tab. 1. Specifikace referenčních povodí IV. řádu

Tab. 1. Specification of reference fourth-order catchments

Označení	HLGP_ID	UTOKH_ID	Plocha povodí [km^2]	Vodní tok	Q_{355d} [m^3/s]	Q_a [m^3/s]	Q_1 [m^3/s]	Q_{10} [m^3/s]	Q_{100} [m^3/s]
1	108010010	1196500	19,37	Vydra	0,251	0,861	13,00	30,00	53,70
2	108010190	1198300	23,78	Křemelná	0,098	0,521	8,80	24,00	48,40
3	108010650	1202900	11,82	Ostružná	0,040	0,204	2,90	10,00	22,80
4	108010740	1203800	21,71	Kalný potok	0,044	0,140	3,20	11,00	30,70
5	108010790	1204300	7,02	Ostružná	0,387	1,580	17,00	46,00	109,00
6	108010470	1201100	11,00	Opolenecký potok	0,022	0,106	4,40	15,00	32,60
7	108020170	1212200	12,98	Mladíkovský potok	0,006	0,117	2,90	9,70	23,20
8	108020010	1210600	10,42	Volyňka	0,044	0,146	3,00	11,00	24,80
9	108030010	1218900	11,53	Blanice	0,020	0,137	4,30	16,00	37,30
10	108020680	1217300	21,37	Rojický potok	0,019	0,107	2,00	8,00	19,30
11	108020790	1218400	9,29	Dobevský potok	0,001	0,028	1,40	5,70	14,00
12	108020800	1218500	8,23	Brložský potok	0,070	0,472	8,00	28,00	72,60

Všechna data použitá v této práci byla v souřadném systému S-JTSK / Krovak East North (EPSG 5514) a výškovém systému balt po vyrovnání (EPSG 5705).

Referenční odtoková data

Referenční data pro potřeby této studie byla zakoupena od ČHMÚ ve formě základních hydrologických údajů (dle ČSN 75 1400) pro vybraná povodí IV. řádu. Dle zatřídění základních hydrologických údajů povrchových vod spadala všechna referenční data do III. třídy. M -denní průtoky byly odvozeny pro referenční období 1981–2010 a N -leté průtoky pro maximální dostupné období pozorování. Celkově byla zakoupena data pro 12 povodí IV. řádu. Bližší specifikace referenčních povodí je uvedena v tab. 1 a jejich rozmístění v rámci povodí Otavy na obr. 3.

Predikce byla provedena pro řadu průtoků (Q_{355d} , Q_a , Q_1 , Q_{10} a Q_{100}). Všechny výpočty i následné hodnocení výsledků byly zpracovány v prostředí softwaru R [24].

METODIKA

Pro predikci odtoku bylo zvoleno několik metod. Základní metodou byla metoda Top-Kriging (TOP). Dalšími metodami byly transformace výsledků TOP na základě údajů o průměrném ročním srážkovém úhrnu (TOP_Hs) a dlouhodobých průměrných základních odtocích (TOP_ZO). Zbývající dvě metody využívaly přímého rozpočtu odtoku, který byl založen na hodnotách průměrného ročního srážkového úhrnu (R_Hs) a dlouhodobého průměrného základního odtoku (R_ZO).

Top-Kriging

Pro všechna povodí IV. řádu v povodí Otavy byla provedena predikce specifických odtoků ($l/s/km^2$), které byly následně převedeny (skrze plochu daného povodí) na odtoky z povodí (m^3/s). Pro stanovení predikce v prostředí R byla použita extenze rtop [25], prostřednictvím které je metoda TOP dostupná. Vyžadovanými vstupy byla pozorovaná povodí, osy vodních toků a povodí, pro která měla být predikce stanovena (v našem případě povodí IV. řádu).

Transformace výsledků Top-Kriging

Pro hodnoty TOP byla nadále provedena jejich transformace na základě hodnoty průměrného ročního srážkového úhrnu (Hs) a dlouhodobého průměrného základního odtoku v daném povodí (ZO). Smyslem transformace byla redistribuce originálních hodnot v rámci pozorovaného povodí na základě zvolených vah (Hs, ZO). Pro každé pozorované povodí a jeho předpovědní povodí (povodí IV. řádu, jež spolu tvoří dané pozorované povodí) byly určeny průměrné hodnoty Hs a ZO. Pokud byla hodnota Hs (ZO) předpovědního povodí vyšší než hodnota konkrétního předpovědního povodí, byla jeho hodnota TOP navýšena. V opačném případě byla ponížena. Míra navýšení (ponížení) hodnot v redistribuci byla řízena poměrem velikosti Hs (ZO) mezi pozorovaným a předpovědním povodím.

Přímý rozpočet odtoků

Realizován byl také přímý rozpočet průtoku v rámci pozorovaných povodí. Tento rozpočet byl založen na váženém průměru přes plochy předpovědních povodí, kdy jako váhy byly voleny hodnoty Hs (R_Hs) nebo ZO (R_ZO).

Hodnocení kvality predikce

Hodnocení shody bylo provedeno pro všechny sledované průtoky a všechna referenční povodí (12 povodí). Jako hodnotící metriky byly použity Mean Absolute Error (MAE) a Root Mean Square Error (RMSE).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_{PREd} - Q_{Ref}| \quad 1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{PREd} - Q_{Ref})^2} \quad 2)$$

kde:

Q_{PREd} je hodnota průtoku pro povodí IV. řádu (odpovídající danému referenčnímu povodí) určená výpočetními metodami (TOP, TOP_Hs, TOP_ZO, R_Hs, R_ZO)

Q_{Ref} referenční hodnota průtoku pro dané povodí

N počet referenčních povodí

VÝSLEDKY

Z výsledků vyplývá, že nejmenších průměrných chyb (MAE) bylo dosaženo metodou R_ZO, a to u všech hodnocených průtoků. Nejnížší chyba byla u průtoku Q_{355d} (0,063 m³/s), nejvyšší chyba pak u průtoku Q_{100} (17,778 m³/s). Druhých nejlepších výsledků dosahovala metoda R_Hs. Metody TOP, TOP_Hs a TOP_ZO produkovaly vzájemně srovnatelné, oproti metodám R_ZO a R_Hs však horší výsledky. To platilo zejména pro výsledky u nízkých průtoků (Q_{355d} a Q_a), kde dosahovaly násobně vyšších hodnot chyb. Při průtoku Q_{100} se hodnota jejich chyb pohybovala okolo 25,5 m³/s. Nejméně výrazný rozdíl byl u průtoku Q_{10} . Celkový přehled stanovených hodnot MAE je uveden v tab. 2.

Tab. 2. Přehled dosažených hodnot MAE (m³/s)
Tab. 2. Summary of achieved MAE values (m³/s)

	TOP	TOP_Hs	TOP_ZO	R_Hs	R_ZO
Q_{355d}	0,128	0,130	0,134	0,072	0,063
Q_a	0,492	0,493	0,500	0,197	0,155
Q_1	3,804	3,828	3,794	2,850	2,649
Q_{10}	10,600	10,578	9,904	8,495	8,303
Q_{100}	25,717	25,799	25,169	18,061	17,778

Nejlepších výsledků RMSE dosáhla opět metoda R_ZO při průtoku Q_{355d} (0,123 m³/s). Metody TOP, TOP_Hs TOP_ZO produkují při všech průtocích nejvyšší hodnoty RMSE, přičemž mezi sebou se liší jen minimálně. Jejich hodnoty jsou ve většině případů téměř dvojnásobné oproti R_ZO. Jednotlivé hodnoty kopírují trendy rozložení chyb v závislosti na predikovaném odtoku podobně, jako tomu bylo u hodnot MAE. Hodnoty RMSE pro průtoky Q_{355d} a Q_a jsou oproti odpovídajícím hodnotám MAE téměř dvojnásobné, což poukazuje na výskyt výrazných chybových hodnot u některých povodí v rámci datových souborů všech metod. Oproti tomu metody R_ZO a R_Hs vykazují u průtoku Q_{100} jen malé rozdíly mezi RMSE a MAE. To naopak naznačuje, že velikosti chyb u jednotlivých povodí v rámci datového souboru nedosahovaly výraznějších hodnot. Celkový přehled stanovených hodnot RMSE je uveden v tab. 3.

Tab. 3. Přehled dosažených hodnot RMSE (m³/s)
Tab. 3. Summary of achieved RMSE values (m³/s)

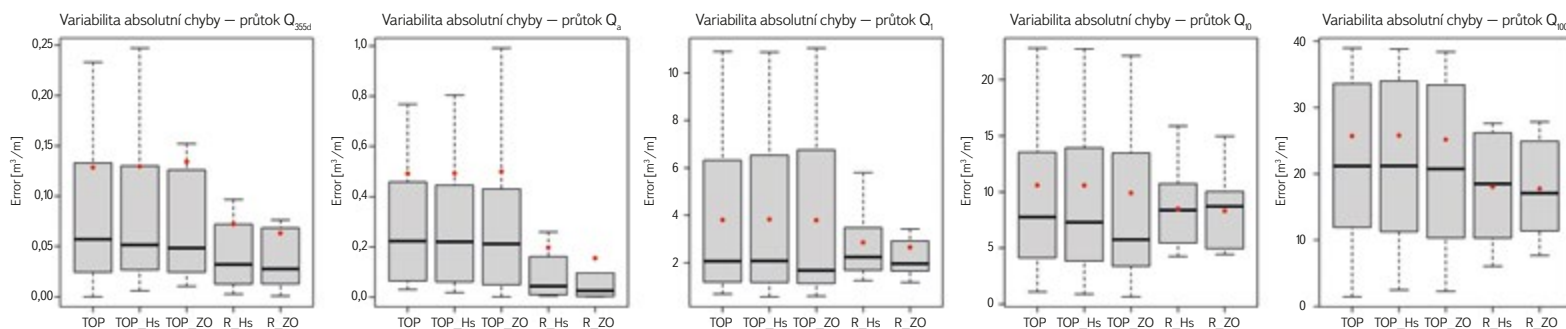
	TOP	TOP_Hs	TOP_ZO	R_Hs	R_ZO
Q_{355d}	0,238	0,238	0,242	0,140	0,123
Q_a	0,957	0,959	0,963	0,449	0,384
Q_1	5,197	5,230	5,254	3,307	3,132
Q_{10}	14,200	14,215	13,437	9,151	8,913
Q_{100}	33,857	33,969	33,109	19,746	19,060

Obr. 4 ukazuje variabilitu chyb pro jednotlivé metody predikce a studované průtoky. Je zřetelné, že rozptýlení absolutní chyby při průtoku Q_{355d} je u metod R_ZO a R_Hs výrazně nižší než u TOP, TOP_Hs a TOP_ZO. Tento trend lze pozorovat u všech predikovaných průtoků. Vzdálenost polohy mediánů od průměru (zejména u průtoků Q_{355d} a Q_a) poukazuje opět na přítomnost výrazných hodnot v chybových souborech metod TOP, TOP_Hs a TOP_ZO. V případě průtoků Q_{10} a Q_{100} byly tyto výrazné chyby spojeny s kvalitou predikce na povodích č. 7, 11 a 12.

DISKUZE

TOP bývá také často porovnáván s regionálními regresními modely. Ukazuje se, že při modelování nízkých průtoků, které jsou primárně řízeny podpovrchovými procesy, jsou jeho výsledky s regresními modely srovnatelné – přičemž oproti regresním modelům vyžaduje minimální množství vstupních dat [3].

Cílem transformace originálních výsledků TOP pomocí Hs a ZO byla snaha o zlepšení výkonu metody TOP. Samotná metoda s dodatečnými vstupy nepracuje. Využívá pouze prostorové závislosti dané proměnné definované variogramem. Nejvhodnějším přístupem by byla přímá implementace Hs nebo ZO do algoritmu TOP. To však převyšuje cíle této práce.



Obr. 4. Grafické znázornění variability chyb dosažených porovnávanými metodami pro jednotlivé hodnocené průtoky

Fig. 4. Graphic representation of the variability of the errors achieved by the compared methods for individual evaluated discharge rates

Transformace originálních hodnot TOP probíhala vždy v rámci pozorovaných povodí. Tento krok zaručoval, aby výsledná hodnota průtoky po redistribuci nebyla změněna. Zkoumána byla i možnost redistribuce v rámci celého povodí Otavy. Tato varianta vedla k nedodržení průtoků u jednotlivých pozorovaných povodí. Důvodem pro separátní provedení redistribuce byla snaha o zjištění, která z proměnných (Hs, ZO) bude mít větší vliv na výsledky. Otázkou zůstává, zda by volba vhodnějšího transformačního mechanismu nepřinesla výraznější zvýšení výkonu, než jaké je popsáno v tomto článku.

Přímý rozpočet průtoků na základě Hs nebo ZO sloužil k porovnání (jako základní metoda) k metodě TOP a jejím derivátům. Ukázalo se ale, že poskytuje lepší výkon než TOP a jeho deriváty. Nízký výkon TOP může souviset s vysokou heterogenitou a malou velikostí předpovědních povodí, kterou TOP není schopen zachytit a popsat [12].

Pozorovaná povodí byla vykreslena na základě seskupení povodí IV. řádu. Faktem je, že některé limnigrafické stanice nejsou v rámci povodí IV. řádu umístěny přímo do jejich uzávěrových profilů. Mají tudíž mírně větší plochu, než přísluší dané limnigrafické stanici (nebo ploše mezipovodí mezi dvěma limnigrafickými stanicemi na stejném vodním toku). Předpokládáme, že tento aspekt má vliv pouze na přesnou hodnotu daného průtoky, který je rozpočítáván, nikoli však na metodický postup tohoto rozpočtu.

Referenční data v této práci byla dostupná pouze pro malou část povodí IV. řádu. Důvodem je pořizovací cena těchto dat. Autoři si uvědomují, že takto malý referenční soubor může mít vliv na nejistotu výsledků této práce. Dalším zdrojem nejistoty mohou být samotné hodnoty referenčních dat. Ty patří do III. třídy základních hydrologických údajů povrchových vod. Relativní hodnota střední kvadratické chyby pro data z této třídy může nabývat hodnot od 20 (Q_3) do 40 (Q_{100}) % [26].

Zvolená škála zkoumaných průtoků měla za cíl ukázat, jakých výsledků bude metoda TOP dosahovat v různých průtokových scénářích. Dle očekávání bylo větších absolutních chyb dosaženo u vysokých průtoků.

Tento příspěvek je součástí projektu TA ČR TK04030223 a jako takový sleduje jeho cíle. Jedním z nich je odhadnout odtok Q_3 z povodí IV. řádu pro území ČR. K tomuto účelu je nutné využít dostupné datové sady pokrývající území celé ČR, vhodně je zpracovat a vyhodnotit. Tuto práci lze tedy vnímat jako pilotní část celého projektu.

ZÁVĚR

V tomto článku bylo provedeno hodnocení výkonu metody Top-Kriging a jejích derivátů při stanovení odtoků z nepozorovaných povodí IV. řádu v povodí Otavy. Výsledky ukazují, že nejlepšího výkonu při stanovení odtoku z nepozorovaných povodí v rámci této práce dosáhla metoda R_ZO bez ohledu na velikost predikovaného průtoky. Následována byla metodou R_Hs. Metoda TOP vykazuje v některých případech produkci výrazných rozdílů mezi predikovanými a referenčními daty. Tyto rozdíly byly detekovány zejména u referenčních povodí č. 7, 11 a 12. Zůstává otázkou, čím jsou tato povodí výjimečná. Tento jev se objevuje bez ohledu na predikovanou

velikost odtoku a propisuje se dále do výkonu modelů TOP_Hs a TOP_ZO. Práce se pokusila také zlepšit výkon samotné metody Top-Kriging v rámci postprocessingu. Ukázalo se, že chování originálního algoritmu je silnější než dodatečná úprava výsledků, vyplývající ze zohlednění rozložení průměrného ročního srážkového úhrnu nebo dlouhodobého průměrného základního odtoku. To mělo za důsledek pouze mírné zlepšení výkonu u metod TOP_Hs a TOP_ZO.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory Technologické agentury ČR v rámci projektu č. TK04030223 „Stanovení hydroenergetického potenciálu Pico-Hydropower v současných i predikovaných klimatických podmínkách ČR“.

Literatura

- [1] NATHAN, R. J., MCMAHON, T. A. Identification of Homogeneous Regions for the Purposes of Regionalisation. *Journal of Hydrology*. 1990, 121(1–4), s. 217–238.
- [2] BEVEN, K. J. *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. B. m.: John Wiley & Sons, 2011.
- [3] LAAHA, G., SKØIEN, J. O., BLÖSCHL, G. Spatial Prediction on River Networks: Comparison of Top-Kriging with Regional Regression. *Hydrological Processes*. 2014, 28(2), s. 315–324.
- [4] ZHANG, Y. et al. Predicting Hydrological Signatures in Ungauged Catchments Using Spatial Interpolation, Index Model, and Rainfall-Runoff Modelling. *Journal of Hydrology*. 2014, 517, s. 936–948.
- [5] HRACHOWITZ, M. et al. A Decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) – A Review. *Hydrological Sciences Journal*. 2013, 58(6), s. 1198–1255.
- [6] ČHMÚ. *Metodika odvozování N-letých průtoků na nepozorovaných povodích* [on-line]. [vid. 10. duben 2024]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/hydro/opv/Metodika_QN_CHMU.pdf
- [7] JOURNEL, A. G., HUIJBREGTS, C. J. *Mining Geostatistics*. London, UK: Academic Press, 1978.
- [8] SKØIEN, J. O., MERZ, R., BLÖSCHL, G. Top-Kriging-Geostatistics on Stream Networks. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2006, 10(2), s. 277–287.
- [9] PARAJKA, J., MERZ, R., SKØIEN, J. O., VIGLIONE, A. The Role of Station Density for Predicting Daily Runoff by Top-Kriging Interpolation in Austria. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2015, 63(3), s. 228–234.
- [10] SKØIEN, J. O., BLÖSCHL, G. Spatiotemporal Topological Kriging of Runoff Time Series. *Water Resources Research*. 2007, 43(9).
- [11] FARMER, W. H. Ordinary Kriging as a Tool to Estimate Historical Daily Streamflow Records. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2016, 20(7), s. 2721–2735.
- [12] CASTIGLIONI, S., CASTELLARIN, A., MONTANARI, A., SKØIEN, J. O., LAAHA, G., BLÖSCHL, G. Smooth Regional Estimation of Low-Flow Indices: Physiographical Space Based Interpolation and Top-Kriging. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011, 15(3), s. 715–727.
- [13] PERSIANO, S., PUGLIESE, A., ALOE, A., SKØIEN, J. O., CASTELLARIN, A., PISTOCCHI, A. Streamflow Data Availability in Europe: A Detailed Dataset of Interpolated Flow-Duration Curves. *Earth System Data Discussions*. 2022, 14(9), s. 1–16.
- [14] DE LAVENNE, A., SKØIEN, J. O., CUDENNEC, C., CURIE, F., MOATAR, F. Transferring Measured Discharge Time Series: Large-Scale Comparison of Top-Kriging to Geomorphology-Based inverse modeling. *Water Resources Research*. 2016, 52(7), s. 5555–5576.
- [15] ARCHFIELD, S. A. et al. Topological and Canonical Kriging for Design Flood Prediction in Ungauged Catchments: An Improvement over a Traditional Regional Regression Approach? *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013, 17(4), s. 1575–1588.

[16] CEOLA, S., PUGLIESE, A. Regional Prediction of Basin-Scale Brown Trout Habitat Suitability. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. 2014, 364, s. 26–31.

[17] VODOHOSPODÁŘSKÝ ROZVOJ A VÝSTAVBA. *Studie proveditelnosti zprůchodnění migračních překážek na vodních tocích v povodí Vltavy, 3. Hodnocení – Otava* [on-line]. [vid. 20. duben 2024]. Dostupné z: https://www.pvl.cz/migrace-vltava/projekt/3_TEXTOVA_CAST/3_textova_cast_Otava.pdf

[18] MATOUŠKOVÁ, M., ŠOBR, M. Upravenost hydrografické sítě a protipovodňová opatření v povodí Otavy. In: LANGHAMMER, J., ENGEL, Z. *Hodnocení vlivu změn přírodního prostředí na vznik a vývoj povodní* (eds. Langhammer, J., Engel, Z.). 2004, s. 170–184.

[19] FOJTIK, T., JAŠIKOVÁ, L., KURFÍRTOVÁ, J., MAKOVCOVÁ, M., MAŤAŠOVSKÁ, V., MAYER, P., NOVÁKOVÁ, H., ZAVŘELOVÁ, J., ZBORIL, A. GIS a kartografie ve VÚV TGM. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2022, 64(1), s. 47–52.

[20] ČHMÚ. *Hlásná a předpovědní povodňová služba* [on-line]. [vid. 20. duben 2024]. Dostupné z: <https://hydro.chmi.cz/hpps/>

[21] ČHMÚ. *ISVS – Evidence množství povrchových vod. Data ke stažení. Hydrologické údaje za období 1991–2020* [on-line]. [vid. 10. duben 2024]. Dostupné z: <https://isvs.chmi.cz/ords/f?p=11002:HOME:103039121436379>

[22] ČHMÚ. *Průměrný roční úhm srážek za období 1991–2020* [on-line]. [vid. 20. duben 2024]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/charakteristiky_klimatu/img/SRA_normal9120.gif [citováno 2024-04-10].

[23] ČGS. *Dlouhodobý průměrný základní odtok za období 1991–2020* [on-line]. [vid. 10. duben 2024]. Dostupné z: <https://micka.geology.cz/record/basic/65001376-1148-4457-93b5-3d4d0a010852#>

[24] R CORE TEAM. *R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2013. Dostupné z: <https://www.R-project.org/>

[25] SKØIEN, J. O., BÖLSCHL, G., LAAHA, G., PEBESMA, E., PARAJKA, J., VIGLIONE, A. Rtop: An R Package for Interpolation of Data with a Variable Spatial Support, with an Example from River Networks. *Computers & Geosciences*. 2014, 67, s. 180–190.

[26] ČSN 75 1400. *Hydrologické údaje povrchových vod*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

Autoři

Ing. Luděk Bureš, Ph.D.¹

✉ buresl@fzp.czu.cz

ORCID: 0000-0002-8358-8932

Ing. Magdalena Samcová¹

✉ samcovam@fzp.czu.cz

ORCID: 0009-0007-1967-029X

Ing. Radek Roub, Ph.D.¹

✉ roub@fzp.czu.cz

ORCID: 0000-0002-6838-2047

Ing. Lucie Poláková^{1,2}

✉ polakoval@fzp.czu.cz

Ing. Tomáš Hejduk, Ph.D.²

✉ hejduk.tomas@vumop.cz

ORCID: 0009-0007-8702-5911

Ing. Martin Štich³

✉ stich@vrv.cz

¹Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí

²Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Praha

³Vodohospodářský rozvoj a výstavba, a. s., Praha

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2024.05.002

ISSN 0322-8916 © 2024 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněně šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

INTERPOLATION OF SELECTED DISCHARGE RATES IN UNGAUGED FOURTH-ORDER CATCHMENTS IN THE OTAVA BASIN

BUREŠ, L.¹; SAMCOVÁ, M.¹; ROUB, R.¹; POLÁKOVÁ, L.^{1,2}; HEJDUK, T.²; ŠTICH, M.³

¹Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Environmental Sciences

²Research Institute for Soil and Water Conservation, Prague

³Water Management Development and Construction joint stock Company, Prague

Keywords: discharge – fourth-order catchments – interpolation – Top-Kriging

Knowledge of catchment runoff values is the key to a wide range of engineering and scientific applications. However, direct measurements in the scope of all catchments of the IV. order on the territory of the Czech Republic are not realistic. Standard methods for estimating these parameters are local regression models, rainfall-runoff models, or other interpolation techniques. Regression models provide reliable results, but the derivation of local regression equations is demanding on the amount of input and reference data. Rainfall-runoff models have their application in design activities of a local scale. Their application in the scope of the Czech Republic is not trivial and requires knowledge of the distribution of precipitation. Interpolation techniques provide a fast but often less reliable approach. Most of these interpolations are not primarily intended for hydrological applications. The exception is the Top-Kriging method. It is based on kriging methods used in geostatistics, which it extends in many directions in order to affect hydrological regularities, especially the concentration of runoff in the river network. This method was successfully used in Austria or France to estimate flows in unobserved branches of the river network. However, is this method also suitable for use within the Czech Republic? The results show that the heterogeneity of the basins, especially in the mountainous and foothill areas of Šumava, significantly reduces the performance of Top-Kriging. Additional transformation of the results can improve its performance in the case of some flows. However, compared to direct calculations, Top-Kriging lags behind.