

Kategorizace povodí IV. řádu pro potřeby srážko-odtokového modelování

PETR KAVKA, LUDĚK STROUHAL, PETR KOŽANT, LENKA WEYSKRABOVÁ

Klíčová slova: malá povodí – hydrologické modelování – charakteristiky povodí – návrhové srážky

SOUHRN

Motivace pro kategorizaci povodí vychází z potřeby navazujícího hydrologického modelování v tříletém projektu Vliv variability krátkodobých srážek a následného odtoku v malých povodích České republiky na hospodaření s vodou v krajině. V tomto projektu byly odvozeny typické průběhy návrhových srážek o délce trvání 6 hodin a prostřednictvím hydrologického modelování byl hodnocen dopad jejich variability na návrhové parametry užívané v projekční praxi i řadě odborných studií. Článek představuje klasifikaci malých povodí v České republice pro potřeby jejich rozdělení z hlediska potenciální hydrologické odezvy na návrhové srážky. Pro celkem 7 739 povodí IV. řádu s plochou nad 0,5 km² byly určeny hlavní charakteristiky ovlivňující hydrologickou reakci daného povodí, jako je velikost povodí, uspořádání a hustota říční sítě, koeficienty protáhlosti, dále pak průměrná nadmořská výška a průměrný sklon. Půdní pokryv, retenční kapacita a hydrologické vlastnosti jsou zahrnuty v průměrném čísle odtokové křivky (CN). Z morfologických parametrů, které mají vliv na rychlý odtok, byla vypočtena hodnota průměrné délky odtokové dráhy do nejbližšího vodního toku a nejdelší odtoková dráha po uzávěrový profil. Závislé parametry byly vyřazeny a zbylo tak pět základních parametrů pro následnou klasifikaci. Rozhodující pro klasifikaci byla pouze blízkost parametrů daných povodí nikoli jejich poloha. Postupně bylo testováno seskupování do 3 až 7 tříd. V případě vyššího počtu tříd již nedocházelo k vytvoření jasných skupin. Z finálních sedmi tříd dvě nebyly dále hodnoceny kvůli jejich relativně malému zastoupení (méně než 10 % plochy) a extrémně specifických parametrů, nejčastěji se jedná o tvarově ovlivněná a často velmi malá zbytková mezipovodí. Výsledkem tak je 5 tříd povodí v rámci ČR, která pokrývají přes 90 % území. Reprezentativní povodí každé třídy bylo v navazujících pracích detailně modelováno v modelech MikeSHE, SMODERP a HEC-HMS.

ÚVOD

Hospodaření s vodou v krajině je podmíněno objemem využitelných vodních zdrojů, neméně významně však i časovou a prostorovou distribucí jednotlivých složek hydrologické bilance, především srážek jakožto prakticky jediné příjmové složky pro malá povodí. Podrobnou časovou distribuci šestihodinových návrhových hyetogramů nedávno zpracoval Müller [1], v hrubším rozlišení hodinového kroku uvedla tři typické hyetogramy Kulasová [2] a již klasickou práci pak představuje analýza náhradních maximálních intenzit krátkodobých dešťů publikovaná Truplem [3]. Prostorová variabilita je v českých podmínkách popisována méně, příklady uvádí Kavka [4] na základě dat Šamaje [5] nebo Kulasová [4].

Na formování odtoku z konkrétního povodí mají kromě srážek vliv charakteristiky vlastního povodí. Mezi ty nejdůležitější patří využití území (půdní pokryv) a infiltrační vlastnosti půd. Kombinace těchto dvou charakteristik zásadně určuje míru potenciálního zachycení srážkové vody.

Dalším faktorem, který ovlivňuje hydrologické procesy, jsou sklonové a morfologické charakteristiky. Morfologii povodí lze charakterizovat celou řadou tvarových koeficientů, jedním z nich je například koeficient protáhlosti. V malých povodích je převažujícím rizikem především rychlý odtok z intenzivních příčinných srážek. Z hlediska formování povrchového odtoku spojeného s možným erozním ohrožením je pak nutné do charakteristiky konkrétního povodí zahrnout i dráhy odtoku mimo vodní toky (délku drah plošného odtoku). Z hlediska formování korytového odtoku je pak důležitá např. hustota říční sítě. Neméně důležitým parametrem je pak poměr délky vodních toků vůči ploše povodí, tzv. hustota říční sítě.

Motivací pro určení těchto charakteristik je následná kategorizace povodí IV. řádu. U vzájemně podobných povodí lze očekávat i podobnou reakci na stejnou příčinnou srážku. Z takto vytvořených kategorií je pak možné vybrat reprezentativní zástupce pro hodnocení vlivu charakteristik povodí na odtokové charakteristiky, jako je odtoková výška, kulminační průtok nebo doba kulminace. To je zejména výhodné při použití výpočetně náročnějších modelů, které znemožňují modelování rozsáhlého souboru srážko-odtokových scénářů. Naopak při použití jednodušších konceptuálních hydrologických modelů je možné u daných kategorií povodí vyhodnotit statistické rozdělení popisných charakteristik a to použít při stochastickém modelování hydrologické odezvy pro velké množství kombinací charakteristik povodí a zátěžové srážky. Použití obou těchto přístupů a výběr jejich výsledků je prezentován na jiném místě v tomto časopise. Následující části tohoto příspěvku se soustředí pouze na popis provedené klasifikace povodí a výběr reprezentativních zástupců.

METODY A POSTUPY

Určení a výběr charakteristik povodí

Celkem bylo vyčísleno 15 základních charakteristik povodí IV. řádu. Celkově mohlo být hodnoceno 8 842 povodí IV. řádu. Z hodnocení byla vyřazena velmi malá povodí s velikostí pod 0,5 km², která většinou tvoří zbytková mezipovodí, a kvůli jejich malé velikosti nabývají často jejich charakteristiky extrémních hodnot, nebo ztrácí reálný význam. Z hlediska hodnocení celé ČR se jedná o nevýznamné procento plochy. Pro zbylých 7 739 povodí s plochou nad 0,5 km² byly určeny charakteristiky uvedené v *tabulce 1*.

Tabulka 1. Seznam charakteristik povodí uvažovaných pro klasifikaci (kurzívou uvedeny později vyřazené veličiny)
Table 1. List of catchment characteristics considered for classification (in italic later discarded parameters)

Koeficient reliéfu	Velikost povodí	Průměrný sklon
<i>Maximální nadmožská výška</i>	<i>Minimální nadmožská výška</i>	Průměrná nadmožská výška
<i>Expozice svahu</i>	<i>Graviellův koeficient tvaru</i>	<i>Koeficient protáhlosti</i>
Koeficient tvaru α	<i>Celková délka vodních toků</i>	Hustota říční sítě
Nejdelší odtoková dráha	Prům. délka dráhy plošného odtoku	Průměrná hodnota CN II

Následujícím krokem bylo kritické zhodnocení a redukce počtu parametrů kvůli zprůhlednění a jednoznačnosti klasifikační procedury. Hlavním cílem bylo zachovat pouze parametry, které jsou významné z hlediska potenciální hydrologické odezvy povodí, a zároveň parametry, mezi kterými není významná vzájemná korelace, a lze je tedy považovat za vzájemně nezávislé. Například z charakteristik nadmožské výšky je vzhledem k velikosti povodí IV. řádu zcela postačující zachovat pouze střední hodnotu. V případech převažující směrové orientace svahů se nejedná o hydrologicky významný parametr pro reakci povodí na krátkodobé deště, používána je spíše u studií zohledňujících tání sněhové pokrývky. Koeficient reliéfu je závislý na průměrné nadmožské výšce a hustota říční sítě může být zástupnou veličinou pro celkovou délku vodních toků. Po kritickém zhodnocení bylo takto ponecháno pro další analýzy osm charakteristik, vyřazené jsou v *tabulce 1* uvedeny kurzívou.

Vybrané charakteristiky byly vyčísleny s využitím následujících zdrojů a postupů:

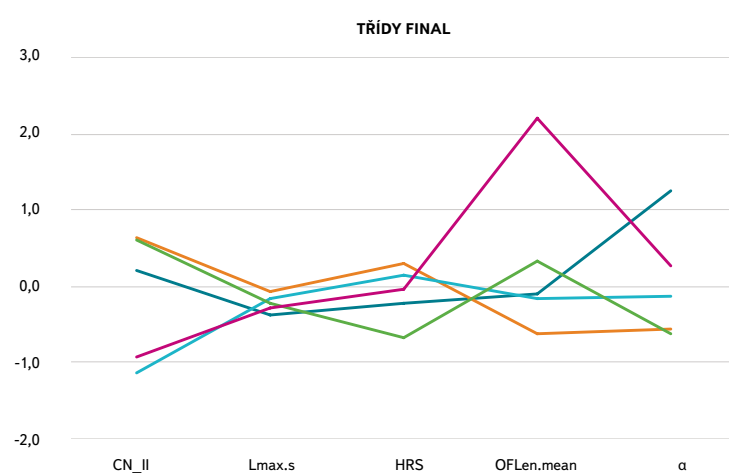
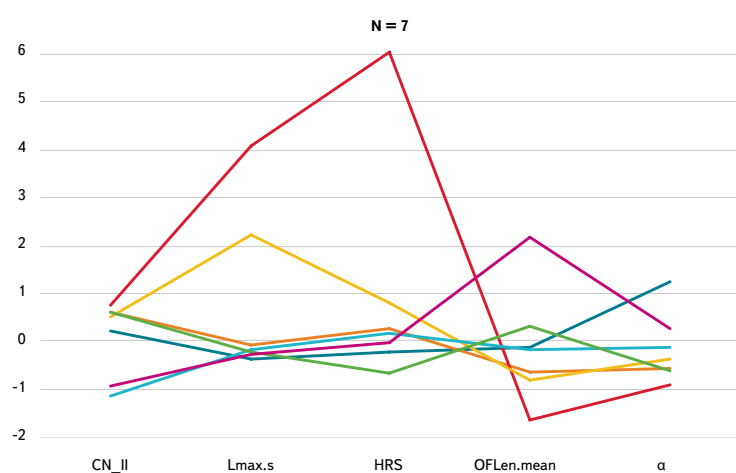
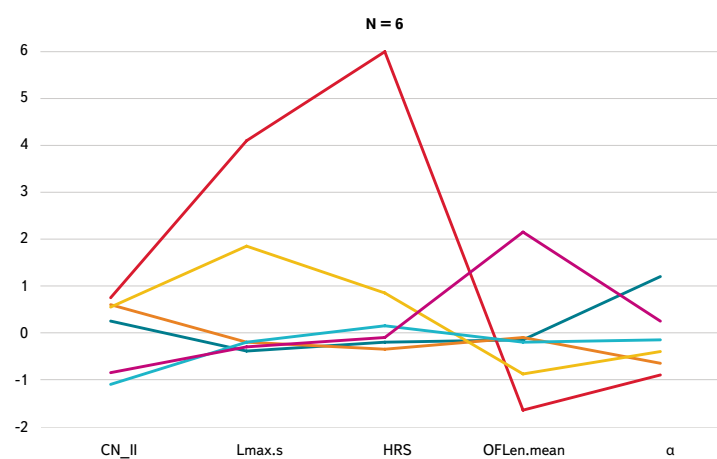
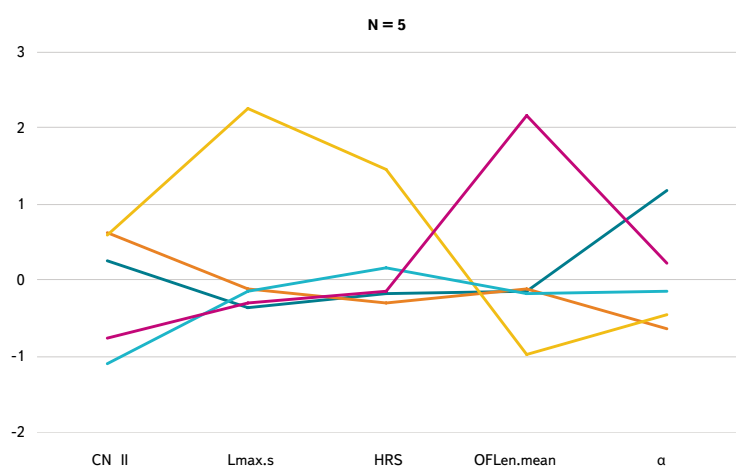
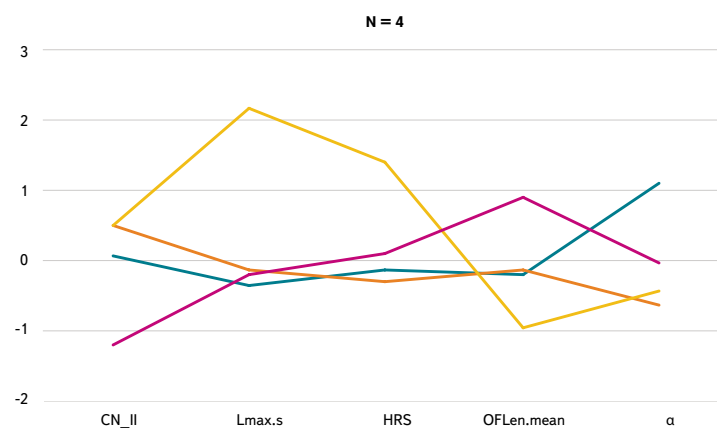
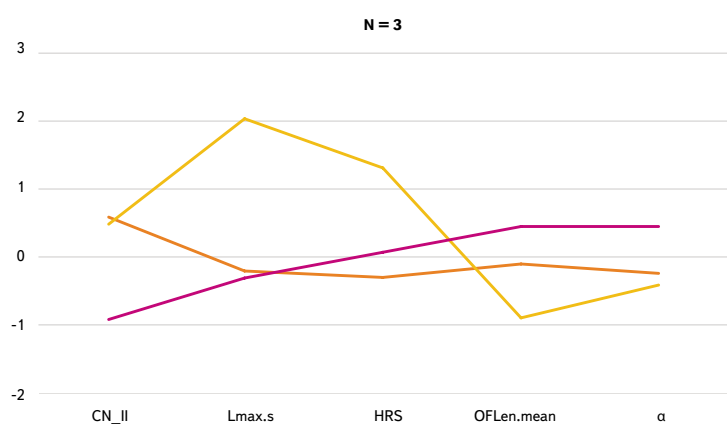
- Z databáze DIBAVOD byla převzata plocha povodí (A) a délka vodních toků v příslušném povodí.
- Hustota říční sítě (HRS) byla spočtena jako součet délek vodních toků vyskytujících se na území jednotlivých povodí.
- Průměrná nadmožská výška (NADMV) a sklon (SKL) byly odvozeny z rastru terénu odvozeného z DMR 4G (digitální model reliéfu 4. generace).
- Specifická maximální délka odtokové dráhy (Lmax.s) byla odvozena jako maximální délka odtokové dráhy z DMR 4G nástrojem ArchHydro a vážená plochou povodí.

- Průměrná délka dráhy povrchového odtoku (OFLen.mean) byla spočtena jako průměrná hodnota nad rastrem délek odtoku (Flow Length), přičemž pro výpočet délek byly uvažovány dráhy odtoku končící na hraně vodních toků (podle DIBAVOD).
- Koeficient tvaru α , který vyjadřuje protáhlost/vějířovitost povodí pak jako poměr plochy povodí a druhé mocniny nejkratší vzdálenosti mezi ústím a nejbližším bodem daného povodí.
- Průměrné hodnoty CN [6] pro střední stupeň nasycení (IPS II) byly vyhodnoceny nad rastrem CN odvozeným řešitelem (SWECO Hydroprojekt) v rámci jeho předchozího projektu Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice. Aby byl zdůrazněn střední stav nasycení, je dále označován CN II.

Tabulka 2 uvádí korelační koeficienty mezi zbylými osmi charakteristikami povodí. Významnou korelaci lze nalézt mezi parametrem sklonu a hodnotou CN (-0,76), nadmožskou výškou a CN (-0,57) a průměrným sklonem a nadmožskou výškou (0,49). To odpovídá skutečnosti, že ve vyšších nadmožských výškách, stejně jako na prudších svazích, se častěji vyskytují lesní porosty s nízkou hodnotou CN. Naopak téměř nezávislé jsou všechny parametry s plochou povodí, kromě Lmax.s, která je plochou definována. Podobně žádná korelace nebyla nalezena mezi sklonem povodí, hustotou říční sítě a koeficientem tvaru povodí α (korelační koeficient kolem +/- 0,05).

Tabulka 2. Korelační matice pro osm vybraných charakteristik povodí
Table 2. Correlation matrix for 8 selected catchment characteristics

	A	NADMV	SKL	α	HRS	CN II	OFLen. mean	Lmax.s
A	1,00							
NADMV	0,04	1,00						
SKL	-0,03	0,49	1,00					
α	0,02	0,12	0,15	1,00				
HRS	-0,17	0,18	0,05	-0,05	1,00			
CN II	-0,03	-0,57	-0,76	-0,12	-0,08	1,00		
OFLen.mean	0,14	0,42	0,19	0,06	-0,26	-0,20	1,00	
Lmax.s	-0,59	-0,17	-0,09	-0,23	0,40	0,13	-0,25	1,00



Obr. 1. Vývoj tříd povodí při klasifikaci do 3–7 shluků metodou K-means; hodnoty představují průměry charakteristik pro danou třídu standardizované vzhledem k průměru a směrodatné odchylce charakteristiky celého souboru

Fig. 1. Evolution of watershed classes from three to seven clusters using K-means method; values on the y-axis present the class means of particular characteristic standardized with respect to mean and standard deviation of the whole set

Klasifikace povodí

Pro klasifikaci 7 739 povodí IV. řádu byl ve finále použit výběr pěti charakteristik z výše uvedeného seznamu osmi posuzovaných. Tři byly dodatečně vyřazeny z různých důvodů. I když se parametr plochy povodí ukazuje jako nezávislý, neexistuje ve skutečnosti žádný přímý mechanismus, kterým by mohl ovlivnit modelovanou odezvu povodí. Podobně parametr průměrné nadmořské výšky byl vynechán, neboť se jedná o charakteristiku ovlivňující spíše parametry zátěžové srážky. Variabilita srážek však byla v navazujícím modelování zohledněna výběrem srážkových scénářů. Nakonec byl z uvažovaných charakteristik vyřazen průměrný sklon povodí pro značnou korelaci s hodnotami CN. Pro klasifikaci charakteristických skupin povodí tedy bylo zvoleno těchto pět charakteristik:

- koeficient tvaru povodí α (-),
- hustota říční sítě HRS (km/km²),
- průměrné číslo odtokové křivky pro střední stav předchozího nasycení CN II (-),
- specifická maximální délka odtokové dráhy Lmax.s (m/km²),
- průměrná délka dráhy povrchového odtoku OFLen.mean (m).

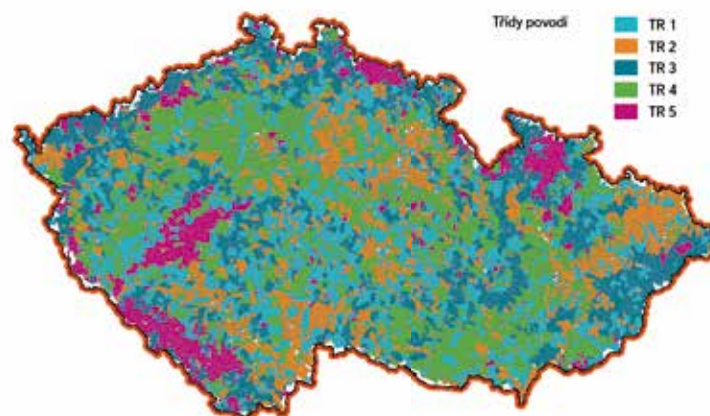
Samotná klasifikace povodí na základě vybraných charakteristik byla provedena v prostředí ArcGIS nástrojem Grouping Analysis s využitím metody K-means. Nebyla zadána žádná omezení uvažující polohu povodí (No Spatial Constraints), tedy povodí ze stejné třídy spolu nemusí nutně sousedit a rozhodující pro přiřazení do třídy je pouze blízkost jejich parametrů. Postupně bylo testováno seskupování do 3 až 7 tříd. Pro každou třídu byly spočteny popisné statistiky použitých charakteristik povodí. Průměrné hodnoty pro každou třídu pak byly standardizovány vzhledem k průměru a odchylce celého souboru a vyneseny v podobě paralelního grafu. Vývoj paralelního grafu při postupném zvyšování počtu tříd ukazuje *obr. 1*. Barvy ve všech grafech a značení v následujícím textu odpovídají paralelnímu grafu pro maximální počet sedmi tříd.

Při klasifikaci povodí do tří tříd se vyděluje výrazná třída TR4, které dominují povodí s velmi vysokou specifickou délkou nejdelší odtokové dráhy Lmax.s. Tato třída je však poměrně málo početná a zbylé dvě TR2 a TR7 se liší zejména hodnotou CN. Při zvýšení počtu tříd na 4 se rozpadá třída TR7 a vzniká nová třída TR1, rozhodujícím kritériem se zde zdá být tvar povodí vyjádřený koeficientem α . Při dalším zvýšení počtu tříd na 5 se dále rozpadá TR7 a vzniká nová třída TR5, výrazným rozlišovacím znakem je délka středních drah plošného odtoku OFLen.mean. Zvýšením počtu tříd na 6 se už tak relativně málo početná skupina TR4 rozpadá a vyděluje se z ní velmi malá třída TR3 s extrémními hodnotami hustoty říční sítě HRS a specifickou délkou nejdelší odtokové dráhy Lmax.s. Čitelnost výstupů klasifikačního nástroje se zastavila při navýšení počtu tříd na 7, kdy poslední nová třída TR6 vzniká pravděpodobně vydělením z TR2. Tyto dvě třídy mají téměř shodné parametry až na inverzní vztah hustoty říční sítě HRS a průměrné střední dráhy plošného odtoku OFLen.mean.

VÝSLEDNÉ TŘÍDY POVODÍ

Pro sedm vzniklých tříd byly vyčísleny četnosti jejich zastoupení. Kvůli malé četnosti (57, resp. 613 povodí ze 7 739) nebo velkému podílu nestandardních povodí (zpravidla mezipovodí nebo povodí odvodňovacích kanálů) bylo rozhodnuto vypustit z klasifikace třídy TR3 a TR4 a povodí spadající do těchto tříd zařadit do nehodnocených povodí k povodím do 0,5 km². Výsledný počet tříd se tedy ustálil na 5, které zastupují přes 90 % plochy ČR, a skupina nehodnocených povodí (malá povodí a skupiny TR3 a TR4).

Výsledné třídy byly pro další řešení přečíslovány na souvislou řadu 1–5 se zachováním vzestupného pořadí z původní klasifikace (tedy TR1-2-5-6-7 → TR1-2-3-4-5) a -1 pro nehodnocená povodí. Důvodem přečíslování bylo automatické číslování skupin nástrojem Grouping Analysis, bez možnosti ovlivnit pořadí. Zastoupení výsledných tříd povodí IV. řádu na území ČR je patrné na *obr. 2*.



Obr. 2. Prostorové rozložení pěti tříd povodí klasifikovaných podle podobnosti charakteristik

Fig. 2. Regionalization of five watershed classes based on their characteristics similarity

Jednotlivé třídy reprezentují skupinu povodí s blízkými charakteristikami, podle nichž lze třídy popsat následovně:

- TR1: povodí vějířovitá s nejkratší dobou koncentrace, střední hustotou říční sítě a délkou drah povrchového odtoku. Využití území je smíšené, zastoupeny jsou lesy i k odtoku náchylnější pokryvy (např. zemědělská půda).
- TR2: protáhlá povodí s největší dobou koncentrace, vysokou hustotou říční sítě a nejkratšími dráhami povrchového odtoku. Ve využití území převažuje spíše zemědělská půda a zpevněné plochy.
- TR3: přechodný tvar povodí se střední dobou koncentrace, vyšší hustotou říční sítě a střední délkou drah povrchového odtoku. Převažuje lesní pokryv a další plochy generující méně odtoku.
- TR4: povodí obdobná jako v TR2 (protáhlá povodí s převahou zemědělské půdy či zpevněných ploch), avšak s nízkou hustotou říční sítě a díky tomu delšími dráhami povrchového odtoku.
- TR5: povodí obdobná jako v TR3 (přechodný až vějířovitý tvar povodí se střední dobou koncentrace a převahou lesního pokryvu), ale velmi dlouhé dráhy povrchového odtoku.

Tabulka 3. Absolutní průměrné hodnoty charakteristik výsledných tříd povodí
Table 3. Absolute mean values of characteristics of final catchments classes

Třída	CN_II	α	HRS	Lmax.s	OFLen.mean
TR1	70,7	0,486	1,32	747	120
TR2	74,7	0,271	1,69	935	100
TR3	57,7	0,322	1,59	867	118
TR4	74,4	0,264	0,98	839	136
TR5	59,7	0,370	1,45	801	208

Pro každou třídu povodí byla určena poloha těžiště v parametrickém prostoru (daná souřadnicemi v *tabulce 3*) a variabilita parametrů uvnitř třídy. U každého ze 7 739 povodí byla poté spočtena jeho standardizovaná odlehlost od těžiště jemu příslušející třídy. Seřazením povodí podle této odlehlosti bylo možné vyhledat vhodné kandidáty nejlépe reprezentující jednotlivé třídy. Po podrobnějším studiu mapových podkladů a vyloučení pro modelování nevhodných kandidátů byla jako reprezentativní povodí zastupující jednotlivé třídy vybrána povodí uvedená v *tabulce 4*. Jejich polohu v rámci ČR ukazuje *obr. 3*.

Tabulka 4. Reprezentativní povodí pro výsledné třídy vzešlé z klasifikace
Table 4. Representative catchments for five final classes

Třída	Název toku	Číslo hydr. pořadí	Plocha (km ²)
TR1	Býkovický p.	1-09-03-0890	7,75
TR2	Struhařovský p.	1-09-03-1250	5,79
TR3	Chouzavá	1-08-05-1060	4,86
TR4	Škvorecký p.	1-04-07-0530	9,36
TR5	Halounský p.	1-11-05-0340	6,09



Obr. 3. Poloha vybraných charakteristických povodí s číslem třídy
Fig. 3. Location of representative catchments with their class number

ZÁVĚR

Pomocí shlukové analýzy charakteristik povodí IV. řádu bylo určeno pět převažujících skupin povodí. Jejich zařazení pak umožňuje výběr vhodných zástupců tříd pro navazující hodnocení variability hydrologické odezvy povodí na příčinné srážky. V původních patnácti parametrech byly nalezeny parametry s výraznou vzájemnou korelací, což vedlo k redukci jejich počtu. Jedním z překvapivých závěrů byla velmi silná závislost mezi hodnotou CN a průměrným sklonem povodí. Z prostorového rozložení výsledných tříd povodí vyplývá, že není možné podle zvolených kritérií rozčlenit území ČR do homogenních celků, ale že se různé typy povodí vyskytují prakticky na celém území. Je možné sledovat převažující skupiny povodí v horských oblastech, což je dáno vyšší mírou zalesnění, a tím pádem nižší hodnotou CN. Provedená klasifikace povodí do tříd podle podobných charakteristik umožní provést návaznou citlivostní analýzu fyzikálních hydrologických modelů pouze na vybraných reprezentativních povodích dané třídy. Místo modelování velkého množství povodí mohou být použiti pouze reprezentativní zástupci jednotlivých tříd povodí. V případě konceptuálních modelů pak klasifikace umožní stochastické modelování díky odlišným statistickým rozdělením vstupních parametrů u jednotlivých tříd povodí.

Poděkování

Analýza charakteristik povodí a jejich klasifikace byly motivovány výběrem reprezentativních povodí pro potřeby projektu NAZV QJ1520265 Vliv variability krátkodobých srážek a následného odtoku v malých povodích České republiky na hospodaření s vodou v krajině, s jehož podporou vznikla.

Literatura

- [1] MÜLLER, M., KAŠPAR, M., and BLIŽŇÁK, V. Analysis of rainfall time structures on a scale of hours. 2017. Manuscript submitted for publication in Atmos. Res., under review.
- [2] KULASOVÁ, B., ŠERCL, P. a BOHÁČ, M. Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní, 2004.
- [3] TRUPL, J. Intensity krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy. Praha: VÚV Praha, 1958.
- [4] KAVKA, P., STROUHAL, L., LANDA, M. a DAVID, V. Nástroj pro odvození návrhových srážkových úhrnů na území ČR. Vodní hospodářství, 2016, roč. 66, č. 8, s. 9–15. ISSN 1211-0760.
- [5] ŠAMAJ, F., VALOVIČ, Š. a BRÁZDIL, R. Denné úhrny zrážok s mimoriadnou výdatnosťou v ČSSR v období 1901–1980. In: ŠAMAJ, F., ed. Zborník prác Slovenského hydrometeorologického ústavu. Bratislava: ALFA, 1985, s. 9.
- [6] SCS. Tech. Rep. 55: Urban hydrology for small watersheds, 1986.

Autoři

Ing. Petr Kavka, Ph.D.¹

✉ petr.kavka@fsv.cvut.cz

Ing. Luděk Strouhal, Ph.D.¹

✉ ludek.strouhal@fsv.cvut.cz

Ing. Petr Kožant²

✉ petr.kozant@sweco.cz

Ing. Lenka Weyskrabová, Ph.D.¹

✉ lenka.weyskrabova@fsv.cvut.cz

¹České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební

²Sweco Hydroprojekt, a. s.

Príspevek prošel lektorským řízením.

CLASSIFICATION OF SMALL WATERSHEDS FOR THE RAINFALL-RUNOFF MODELLING IN THE CZECH REPUBLIC

KAVKA, P.¹; STROUHAL, L.¹; KOZANT, P.²; WEYSKRABOVA, L.¹

¹CTU in Prague, Faculty of Civil Engineering

²Sweco Hydroprojekt, a. s.

Keywords: small watersheds — hydrological modelling —
catchment characteristics — design rainfalls

This article introduces a classification of small watersheds in the Czech Republic in terms of potential hydrological response to a set of design precipitation time series. Watershed classes as well as precipitation time series were derived as a partial result of a three-year project aimed at the design of typical soil conservation measures and small water management structures. Design precipitation scenarios were derived in an analysis of radar-based rainfall measurements taking into consideration the precipitation totals, their frequency, internal intensity distribution and spatial distribution over the Czech Republic. A motivation for watersheds classification lies in the need of assessing the impacts of derived precipitation scenarios on the watersheds' response using various hydrologic models. The watersheds classification was carried out in a scale of small stream basins. The main parameters affecting a hypothetical hydrological response were calculated for each basin. The principal characteristics involved in the evaluation are basin area, drainage density, average elevation and slope. Land cover, geological and hydrologic soil properties are reflected in the average runoff curve number (SCS-CN). In terms of parameters which affect the timing and shape of runoff response the watershed shape coefficient alpha, specific maximum flow path length and the mean surface flow path length were calculated. Dependent parameters were discarded resulting in final five parameters for the subsequent grouping analysis.

For the classification a Grouping Analysis Tool using the K-means method was applied. The grouping was tested successively using from 3 to 7 classes. In the end for the final 5 classes representative watersheds were selected. These representatives will be further used in hydrologic modelling and uncertainty analyses.