

Malá zdrojová povodí – jejich prostorové vymezení a klasifikace z hlediska rizika ohrožení rychlým odtokem

PETR KAVKA, LENKA WEYSKRABOVÁ, LUDĚK STROUHAL, JAN-FRANTIŠEK KUBÁT, JIŘÍ CAJTHAML

Klíčová slova: hydrologická odezva – malá zdrojová povodí – povodí prvního řádu – rychlý odtok – monitoring erozních událostí

ABSTRAKT

Tento příspěvek představuje plošné vymezení malých horních zdrojových povodí do velikosti 5 km² na území ČR. Cílem bylo nejen představit vymezení těchto povodí, ale také jejich kategorizaci z hlediska charakteristik ovlivňujících formování rychlého odtoku. Rychlý odtok způsobený přívalovými srážkami je dynamický proces epizodního charakteru a zásadní dopad má právě v malých povodích. Vymezení malých zdrojových povodí, kde probíhají výše zmíněné procesy, tak může doplnit standardní hierarchickou klasifikaci povodí v ČR. Tato povodí tvoří 80 % území ČR.

Vymezená povodí byla dále klasifikována na základě sady jejich charakteristik z hlediska rizika rychlého odtoku. Klasifikace těchto povodí byla vytvořena pomocí clustrové analýzy. Do té vstupují charakteristiky povodí, které ovlivňují hydrologickou odezvu. Zejména jde o srážková data, hydromorfologické charakteristiky příslušného povodí, využití území a hydrologické vlastnosti půd. Jedním z negativních dopadů rychlého odtoku je eroze. Jako indikátor stavu konkrétní oblasti z hlediska výskytu rychlého odtoku může být využit nepřímo monitoring eroze (<https://me.vumop.cz/>). V rámci této iniciativy, která v roce 2022 završila 10 let svého působení, jsou zaznamenávány erozní události. Databáze obsahuje přes 2 000 záznamů. Evidence v rámci ČR je ale nesourodá, což je dáno zapojením poboček Státního pozemkového úřadu (SPÚ). Nicméně jde o poměrně rozsáhlou evidenci projevů eroze.

ÚVOD

Povodí v ČR jsou standardně členěna do čtyř úrovní. Nejmenší z nich, povodí IV. řádu, jsou však z hlediska velikostí značně rozdílná – od povodí o velikosti přesahující 20 km² až po doplňková povodí s plochou menší než 1 km². Povodí IV. řádu byla kategorizována z hlediska jejich potenciální hydrologické odezvy podle metody popsáné v [1]. Kategorizace povodí IV. řádu z hlediska hydrologické odezvy je ovlivněna právě rozdílnou velikostí plochy. Dalším faktorem je kombinace zdrojových (horních) a průtočných povodí.

Horní – neprůtočná povodí tvoří specifickou skupinu povodí, někdy bývají nazývána „first order catchments“ [2], jindy jsou tato povodí označována jako zdrojová. Tato povodí tvoří základ hydrografické sítě a jsou primárními plochami pro zachycení nebo snížení povodňových škod. Zároveň tato horní povodí zajišťují často rozmanité ekosystémové služby územím pod nimi [3]. Bývají velmi citlivá na změny a patří k nejrychleji se rozvíjejícím částem krajiny. Z těchto důvodů je plánování a management v rámci těchto území komplexním úkolem [4].

Podobnostmi povodí, charakteristikami a odezvou se v minulosti zabývala z různého pohledu celá řada autorů. Např. [5] jsou motivováni ke klasifikaci povodí spíše ohledem na dlouhodobé procesy v povodích. Na podobném principu jsou atributy povodí definovány, klasifikovány a sdíleny v rámci CAMELS [6] a další. K povodím jsou vytvářeny datové sady popisující v měřítku povodí šest hlavních skupin atributů – topografie, klima, hydrologické charakteristiky, pokrýv a půdní a geologická data.

Verifikačních dat hydrologické odezvy je na území ČR relativně málo. ČHMÚ provozuje necelých 20 pozorovacích profilů na malých povodích do 10 km². Navíc byl vznik většiny těchto povodí motivován monitoringem vod v povodích vodárenských nádrží, a jde tak převážně o lesní povodí. Geochemickým monitoringem 14 malých lesních povodí se zabývá projekt GEOMON [7]. Je zaměřen primárně na látkové složení srážek, půdy a odtoku, ale zároveň zaznamenává i úhrny srážek a hodnoty průtoků v závěrových profilech. Monitorovaná povodí GEOMON se někde překrývají s povodími provozovanými ČHMÚ. Na zemědělské půdě je počet pozorovaných povodí provozovaných profesně zaměřenou organizací nesrovnatelně menší a časové řady dat jsou také významně kratší.

Prakticky jediným nástrojem, jak navrhovat objekty na malých vodních tocích a úpravy v ploše povodí, jsou hydrologické modely. Nejčastěji jsou založené na empiricky odvozené metodě SCS-CN [8], která je neustále vyvíjena a testována. Z posledních prací např. [9, 10]. Citlivost metody na dostupná data pro území ČR se zabýval Strouhal [11, 12]. Standardně jsou návrhová data poskytována podle ČSN 75 1400.2014. *Hydrologické údaje povrchových vod*. V nejnižší třídě, kam spadají malá povodí, jsou data odvozována rovněž pomocí modelu, jehož základem je metoda SCS-CN. Vedle tohoto předpisu pak TNV 75 2102 – *Úprava potoků z roku 2010* uvádí, že modelování je možné použít pro návrhy úprav malých vodních toků v povodích do 5 km². Hranice 5 km² byla převzata pro odvození horních povodí, jež představuje tento příspěvek. Pro podrobnější popis odtokové odezvy je možné využít i fyzikálně založené modely, jako jsou SMODERP [13] nebo EROSION 3D [14].

Specifikem malých povodí je rychlost jejich hydrologické odezvy. Rychlost odezvy na příčinné srážky a s tím spojená rizika jsou ovlivněna řadou parametrů. Největší ohrožení z hlediska průtoků a návazných rizik na těchto povodích představují přívalové srážky. Pro území ČR se rozložením srážek zabýval v poslední době Kašpar [15]. Nejčastěji využívaným nástrojem pro popis srážek jsou křivky IDF (Intensity-Duration-Frequency curves), které popisují vztah intenzity deště, jeho délky a doby opakování [16]. V celosvětovém měřítku se rozložením zmíněných statistických atributů deště věnuje např. Courty [17]. V lokálním měřítku malých povodí významně ovlivňuje hydrologickou odpověď kromě intenzity srážkové události i její tvar [18, 19].

Mezi další významné parametry, jež ovlivňují odtokovou odezvu jednotlivých povodí, řadíme vlastnosti půd, půdního pokryvu a také morfologické charakteristiky. Svou roli mají i vlastnosti hydrografické sítě popsané množstvím koeficientů. Charakter terénu – morfologie – ovlivňuje především tvar odtokové vlny, a tím i celkovou reakci povodí na zvýšený odtok včetně eroze půdy. Parametrů pro popis morfologie povodí je celá řada, nejčastěji uváděnými hodnotami jsou průměrný sklon, délka svahu či topografický index [20].

Jedním z negativních dopadů povrchové složky rychlého odtoku je eroze. V měřítku zdrojových ploch od velikosti 0,3 km² do 10 km² jsou určeny tzv. kritické body, které jsou definovány jako místa vstupu drah soustředěného odtoku do intravilánu obcí [21]. Kritické body jsou určeny na DMR odvozeném z vrstevnicového modelu ZABAGED a míra rizika je stanovena na základě poměru orné půdy, průměrného sklonu a za použití CORINE Land Cover. Jiný přístup ohrožení nejen intravilánu, ale i dalších prvků kritické infrastruktury byl hodnocen v rámci projektu VG20122015092 – „Erozní smyv – zvýšené riziko ohrožení obyvatel a jakosti vody v souvislosti s očekávanou změnou klimatu“ řešeného v letech 2012 a 2015. Výsledná mapa bodů je dostupná na <https://heis.vuv.cz>. V obou případech jde o určitý pohled na rizikovost bodů, jež vychází z charakteristik přispívajících malých zdrojových povodí, nicméně se stále jedná o modelové situace. Dalším pohledem tak může být evidovaný výskyt erozní události, který je součástí monitoringu eroze [22] a mapového portálu (<https://me.vumop.cz/>). V rámci této iniciativy, jež v roce 2022 završila 10 let svého působení, jsou zaznamenávány erozní události. Databáze obsahuje přes 2 000 záznamů. Evidence v rámci ČR je sice prostorově nesourodá, což je dáno zapojením poboček Státního pozemkového úřadu, nicméně jde o poměrně rozsáhlou evidenci projevů eroze.

METODIKA ODVOZENÍ HRANIC POVODÍ A JEJICH KLASIFIKACE

Malá zdrojová povodí – SHC (Small Headwater Catchments) [23] jsou tzv. neprůtočná povodí, která nemají žádné přítoky, a odpovídají tak definici „first order catchments“ [2]. Této vlastnosti bylo využito při odvození jejich hranic na celém území ČR na základě dat DMR 4G v rozlišení 5 × 5 m [24], vodních toků a vodních nádrží. K takto vymezeným plochám povodí byly následně určeny parametry, jež ovlivňují hydrologickou odezvu zejména s ohledem na možné riziko vzniku odtoků z krátkodobých extrémních srážek.

Definice hranic povodí

SHC podle [23] jsou nejen povodí pouze o velikosti 5 km², ale i všechna menší povodí. Znamená to například, že dvě povodí o velikosti 3 km² po soutoku sice již přesahují 5 km², ale samostatně jde o dvě povodí, která spadají do SHC. Pro vymezení SHC bylo zvoleno šest velikostních kategorií uvedených v tab. 1. Povodí byla odvozena pro všechny tyto třídy, což dále umožňuje jejich vzájemné porovnání.

Tab. 1. Kategorie SHC (pro každou kategorii byl zvolen rozsah velikosti plochy)

Tab. 1. SHC categories (a range of area sizes was chosen for each category)

Kategorie	Od km ²	Do km ²
005	0,3	0,7
010	0,7	1,3
020	1,7	2,3
030	2,7	3,3
040	3,5	4,5
050	4,5	5,5

Plochy menší než kategorie 005 již lze považovat za elementární odtokové plochy a nejsou hodnoceny jako samostatná povodí. Spodní hranice 0,3 km² zároveň odpovídá spodnímu limitu odvození kritických bodů [21].

Pro vymezení SHC bylo využito tří datových zdrojů – digitálního modelu terénu, os vodních toků a vodních nádrží. Hlavním vstupem pro určení SHC byl DMR 4G v rozlišení 5 × 5 m. Jelikož v některých místech osy vodních toků kvůli lidským zásahům a změnám v krajině neodpovídají odtokovým liniím generovaným na samotném modelu terénu, jsou do řešení zahrnuty aktuální osy vodních toků, jež jsou součástí ZABAGED®. Ty vycházejí z měření podrobných měřitek a odrážejí současný stav vodní sítě. Z hlediska směřování odtoků jsou tyto linie při vytváření SHC brány jako přesnější než směřování odtoku na základě DMR. Při odvozování povodí je třeba tyto osy vodních toků zahrnout do řešení. Osy vodních toků byly promítnuty do DMR. Hodnota pixelů modelu terénu, kterými prochází osa vodního toku, byla snížena tak, aby výsledné směřování odtoku odpovídalo osám současných vodních toků. Na takto upraveném modelu terénu byla v následujícím kroku odstraněna případná bezodtoká místa a vytvořena vrstva směřování odtoku. Ke směřování odtoku byl využit nástroj jednosměrného směřování odtoku (D8). Ze směrů odtoku pak byla odvozena akumulace v každém pixelu.

Pro každou kategorii povodí (viz tab. 1) byla vrstva akumulace překlasičkována tak, aby hodnoty plochy akumulace mimo hranice skupiny měly hodnotu NoData value a hodnoty plochy akumulace odpovídající dané kategorii pak hodnotu 1. V případech, kdy takto klasifikované odtokové linie končí nebo se protínají s vodními nádržemi, byly odtokové linie zkráceny do bodu křížení odtokové linie s vodní nádrží. V těchto případech se tedy uvažují povodí na vstupu do vodních nádrží. Pro upravené linie v jednotlivých kategoriích byly určeny koncové body těchto linií, jež tvoří závěrový profil povodí. K těmto bodům byla na základě výše odvozeného směřování odtoku odvozena hranice povodí se zohledněním os vodních toků.

Charakteristiky malých povodí

Hydrologická odezva z SHC je dána jeho morfologickými charakteristikami, vlastnostmi půdy, využitím území a příčinnými srážkami. Lze předpokládat, že hydrologická odezva podobných povodí bude podobná. Proto pro výše uvedené kategorie SHC byly odvozeny parametry pro jejich klasifikaci z hlediska možné hydrologické odezvy.

Morfologické charakteristiky byly určeny na základě modelu terénu a vodních toků. Zejména jde o charakteristiky nadmořské výšky, sklonů a délek odtokových drah, dále pak o několik tvarových koeficientů.

Střední šířka povodí

$$b = \frac{A}{L} \quad (1)$$

kde A je plocha [m²]
L maximální délka odtokové dráhy [m]

Tvar povodí

$$a = \frac{A}{L^2} \quad (2)$$

kde A je plocha povodí [m²]
L maximální délka odtokové dráhy [m]

Tvarový koeficient podle Gravelia [25]

$$gra = \frac{o}{2\sqrt{A}\pi} \quad (3)$$

kde O je obvod [m]
A plocha [m²]

Všechny tři tvarové koeficienty popisují tvar povodí. V případě Graveliova koeficientu jde o porovnání tvaru povodí ke kruhu. Střední šířka a tvarový koeficient povodí určuje, do jaké míry se vzdaluje tvar povodí od čtverce, resp. jeho mocniny.

Standardním popisem je parametr hustoty vodní sítě. Tento parametr určuje poměr celkové délky vodních toků k ploše povodí.

$$SND = \frac{\sum L_T}{A} \quad (4)$$

kde L_T je délka vodního toku [m]
 A plocha [m²]

Mezi parametry, které jsou ovlivněny morfologií a ovlivňují průběh odtoku, patří doba zdržení (T_{lag}). Hodnota T_{lag} je využívána pro popis jednotkového hydrogramu podle metody SCS-CN [26]. T_{lag} je pak vypočtena pomocí [27].

$$T_{lag} = L^{0,8} \cdot \frac{(S+1)^{0,7}}{1900 \cdot \sqrt{Y}} \quad (5)$$

kde T_{lag} je doba zpoždění [hod]
 L délka nejdelší odtokové dráhy [stopa]
 Y průměrný sklon povodí [%]
 S max. potenciální retence [palec]

Potenciál objemu přímého odtoku daného povodí lze popsat průměrnou hodnotou CN. CN v sobě integruje informaci o vlastnostech povrchu a o infiltračních vlastnostech půd. Ve zde uvedeném příkladu jsou hodnoty CN převzaty z odvození v rámci *Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v ČR* [28].

Poslední skupinou parametrů jsou srážková data. Protože na malých zdrojových povodích jsou dominantním zdrojem odtoku krátkodobé srážky, byly vybrány šestihodinové návrhové úhrny odvozené ze srážkových radarů v prostorovém rozlišení 1 × 1 km [19, 15]. Tato data jsou dostupná na rain.fsv.cvut.cz.

Přehled sledovaných parametrů obsahuje tab. 2. Jde o hodnoty popisující střední hodnotu, rozptyl nebo minimální či maximální hodnotu podle typu parametru.

Tab. 2. Seznam parametrů, které vstupují do clusterové analýzy SHC. Parametry 1–16 jsou odvozeny z DMR, případně v kombinaci s osami vodních toků s tím, že průměrný sklon povodí byl určen na vrstvě původního DMR před zahloubením vodních toků. Parametry 20–24 podle rovnic (1–4)

Tab. 2. List of parameters that enter the SHC cluster analysis. Parameters 1–16 were derived from DMR and vector lines of water courses, catchment slope was derived using unconditioned DMR. Parameters 20–24 derived according to Eq. (1–4)

1	P	Obvod
2	A	Plocha
3	E_M	Elevation mean – průměrná nadmořská výška povodí
4	E_{STD}	Elevation STD – odchylka nadmořské výšky, popisuje rovinatost povodí
5	Fa_M	Průměrná akumulace
6	Fa_{STD}	FI_{acc_STD} – odchylka akumulace odtoku
7	Fl_X	FI_{len_max} – maximální délka odtokové dráhy
8	Fl_M	FI_{len_mean} – průměrná délka odtokové dráhy
9	Fl_{STD}	FI_{len_STD} – směrodatná odchylka délky odtokové dráhy
10	Fs_X	$FI_{len_noStream_max}$ – maximální délka odtokové dráhy plošného odtoku

11	Fs_M	$FI_{len_noStream_mean}$ – průměrná délka odtokové dráhy plošného odtoku
12	Fs_{STD}	$FI_{len_noStream_STD}$ – směrodatná odchylka odtokové dráhy plošného odtoku
13	Sl_M	Slope_mean – průměrný sklon
14	Sl_{STD}	Slope_STD – směrodatná odchylka
15	S_M	Slope_stream_mean – průměrný sklon vodních toků
16	S_{STD}	Slope_stream_STD – odchylka sklonu vodních toků
17	L_T	Total stream length – celková délka vodních toků
18	CN_M	Průměrné CN povodí
19	CN_{STD}	CN_STD – směrodatná odchylka
20	b_M	Střední šířka povodí
21	α	Tvarový koeficient alfa
22	gra	Graveliův koeficient – tvarový koeficient
23	SND	Hustota říční sítě
24	T_{lag}	Doba zpoždění
25–28	P_{xx}	Šestihodinové návrhové srážky s dobou opakování 2, 10, 20 a 100 let

Celkově jde o 28 parametrů, jež byly následně testovány ve všech velikostních kategoriích z hlediska vzájemné závislosti pomocí regresní analýzy. Cílem bylo získat sadu nezávislých parametrů a podle jejich podobnosti roztrždit povodí do skupin pomocí shlukové analýzy.

Vymezení malých povodí, přiřazení a výpočet charakteristik z DMR, CSC-CN povodí bylo zpracováno v prostředích ESRI (ArcGIS a ArcGIS Pro), následně statistické analýzy byly řešeny v prostředí R. Pro řešení byly využity nástroje popisné statistiky a regresní analýzy. Clustrová analýza byla provedena pomocí metody K-mean. Jednotlivé clustery byly následně agregovány z hlediska relativní rizikovitosti klíčových parametrů ke vzniku rychlé složky odtoku do pěti tříd rizika. Verifikace byla provedena pomocí evidovaných erozních událostí. Cílem bylo sledovat, zda se klasifikace povodí z hlediska rizika shoduje s lokalizací erozních událostí.

VÝSLEDKY

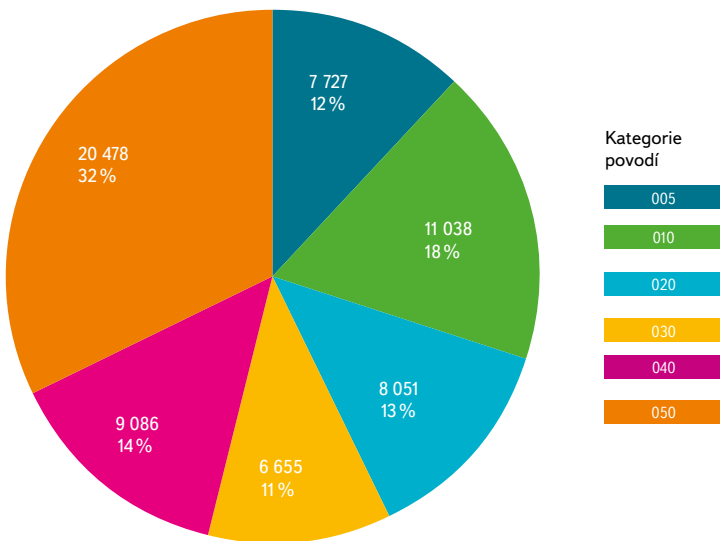
Vymezení SHC

Základní údaje o SHC odvozené podle výše popsané metodiky jsou uvedeny v tab. 3. Jelikož kategorie SHC jsou odvozovány vždy samostatně, výsledná povodí se mezi kategoriemi překrývají – menší výsledné povodí může být součástí většího v nadřazených kategoriích. Vedle popsaných kategorií proto byla vytvořena skupina povodí, v níž jsou zachována pouze největší povodí. Vzájemně vnořená povodí byla eliminována. Jsou tak zachována povodí menší než 5 km² na sledovaném území ČR. Takto vzniklá skupina povodí je označena dále jako „Set of Largest Catchments“ – „SoLC“ a je také uvedena v tab. 3. Pro přehlednost je doplněno, jak velké zastoupení mají jednotlivé velikostní kategorie ve výsledné skupině SoLC, tabulka obsahuje údaje o počtu prvků dané kategorie, které jsou její součástí. Zastoupení ploch jednotlivých kategorií povodí ve skupině SoLC je znázorněno na obr. 1.

Tab. 3. Počet povodí a celkové plochy povodí v jednotlivých kategoriích. Pro jednotlivé kategorie (1. sloupec) je uveden počet prvků (2. sloupec) a celková plocha dané třídy (3. sloupec). Ve 4. a 5. sloupci je uvedeno zastoupení prvků dané třídy ve třídě SoLC a procentní vyjádření

Tab. 3. Number and the total area of catchments in each category. For individual categories (1st column) the number of elements (2nd column) and the total area of the given class (3rd column) are given. The 4th and 5th columns show the representation of the elements of the given class in the SoLC class and the per-centage expression

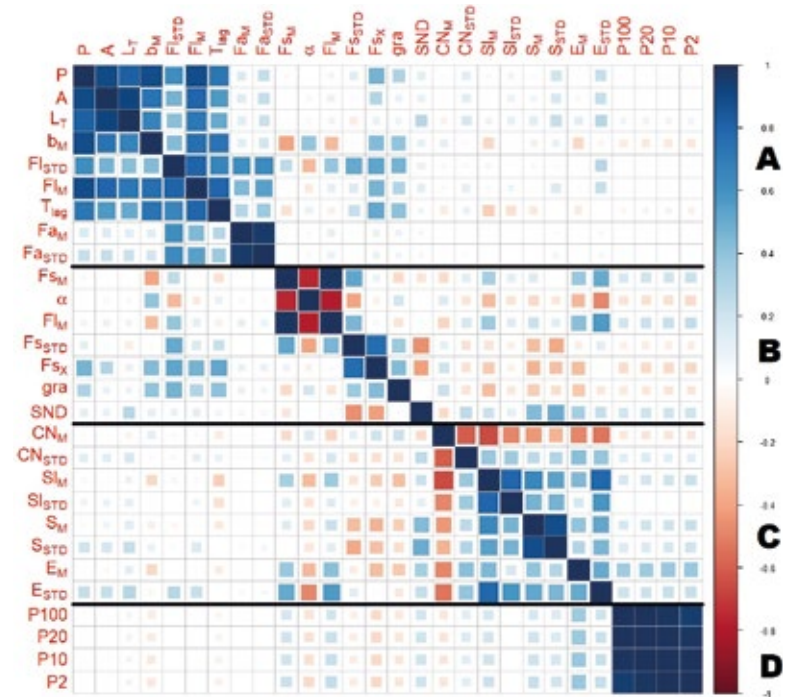
Kategorie	Počet prvků	Celková plocha [km ²]	Zastoupení prvků v SoLC	
			Počet	[%] prvků ve třídě SoLC
005	72 621	37 632	16 894	23
010	31 287	33 046	10 907	35
020	11 560	24 179	3 938	34
030	6 530	20 289	2 187	33
040	5 431	22 610	2 271	42
050	3 957	20 479	3 957	100
SoLC	40 154	63 031		



Obr. 1. Zastoupení ploch jednotlivých kategorií povodí v SoLC
Fig. 1. Summary of the area of the catchments in SoLC categories

Výběr parametrů

Pro jednotlivá povodí ve všech velikostních kategoriích byly odvozeny parametry podle tab. 2. Pro potřeby clusterové analýzy jsou v prvním kroku hledány reprezentativní a nezávislé parametry. Závislé parametry je nutné vyřadit. Hledání míry shody mezi sledovanými parametry bylo provedeno jak pro jednotlivé kategorie (včetně SoLC), tak pro všechna povodí dohromady. Z hlediska skupin závislých parametrů se jednotlivé kategorie vzájemně neliší. Platí tedy, že vazby mezi sledovanými parametry jsou pro všechny velikostní kategorie podobné. Vizualně upravená shoda parametrů vypočtená pomocí Pearsonova korelačního koeficientu je na obr. 2.



Obr. 2. Vizualizace korelačních koeficientů mezi jednotlivými parametry pro všechna povodí nezávisle na velikostní kategorii. Červená barva značí negativní vazbu, modrá barva pozitivní. Čím je vazba mezi dvěma parametry silnější, tím je symbol tmavší a větší. Podobné parametry jsou seskupeny tak, aby bylo možné vizualizovat skupiny podobných parametrů A až D [29]

Fig. 2. Visualization of the correlation between individual parameters for all catchments regardless of size category. A negative correlation is shown in red, and a positive correlation is shown in blue. The stronger the bond between two parameters, the darker and larger the symbol. Similar parameters are grouped together to visualize groups of similar parameters A to D [29]

Ze skupin prvků seskupených podle jejich vzájemné závislosti bylo zvoleno pět parametrů, které lze považovat za nezávislé a dostatečně reprezentující. Vhodné reprezentující parametry byly zvoleny pomocí analýzy hlavních komponent (PCA), a to:

- Šestihodinové návrhové srážky s dobou opakování 20 let (P_{20}) – parametr zastupující skupinu D. Mezi jednotlivými hodnotami šestihodinových srážek je vzhledem k odvození těchto dat značná korelace.
- Průměrné CN povodí (CN_M) – parametr reprezentuje skupinu C o několika dalších parametrech. Hodnota CN vykazuje shodu jak se sklonitostí, tak s nadmořskou výškou.
- Doba zpoždění (T_{lag}) – tento parametr charakterizuje skupinu A. Ovlivňuje tvar odtokového hydrogramu, a tím i velikost kulminačního průtoku.
- Hustota říční sítě (SND) – je parametrem, který reprezentuje podíl délky všech vodních toků v povodí a plochy povodí. Společně s tvarovým koeficientem alfa (α) v sobě zahrnují jak charakteristiku délky odtokových drah, tak tvar povodí. Tyto dva parametry společně reprezentují skupinu B.

Parametry hustota říční sítě (SND) a tvarový koeficient alfa (α) společně korelují s parametrem směrodatné odchylky odtokové dráhy plošného odtoku (FS_{STD}). SND je také ve vazbě na charakteristiky sklonu a parametr α ve vazbě na nadmořskou výšku. SND zároveň přímo popisuje charakteristiku sítě vodních toků. Z tohoto důvodu byly využity tyto dva parametry.

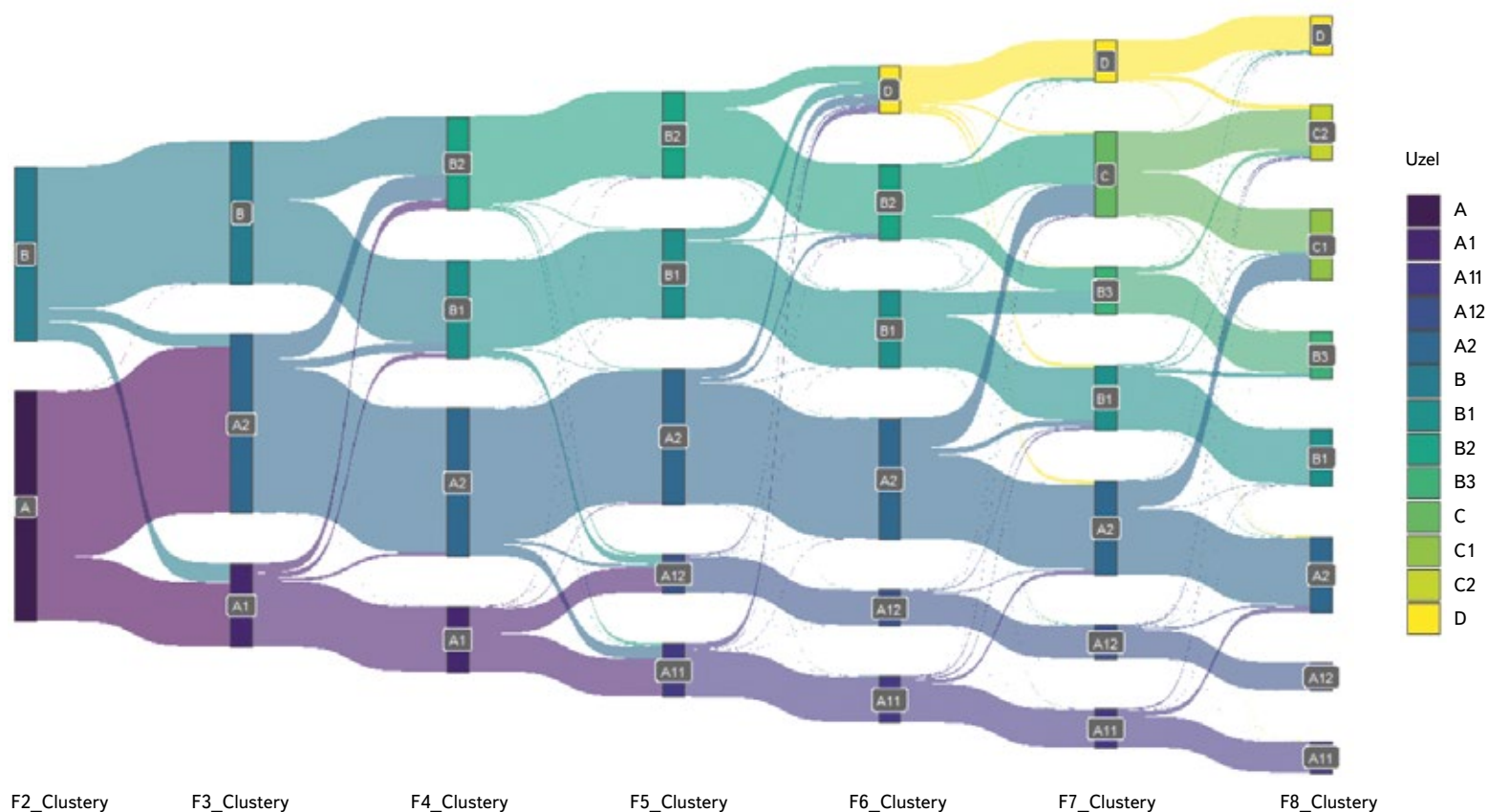
Rozdělení parametrů

Pro klasifikaci povodí do skupin z hlediska potenciální odezvy je důležité porovnat rozdělení parametrů klasifikace mezi jednotlivými kategoriemi povodí. V případě, že by zvolené klasifikační parametry měly pro jednotlivé skupiny povodí rozdílné rozdělení, znamenalo by to, že různé velikostní kategorie mají rozdílný charakter hydrologické reakce na srážky. Cílem bylo porovnání rozdílů mezi jednotlivými velikostními kategoriemi. Touto problematikou se podrobněji zabývá článek [29].

Vzhledem k tomu, že rozdíly rozdělení parametrů mezi kategoriemi nejsou významné a neliší se od SoLC, byla shluková analýza provedena pouze na skupině SoLC, v níž jsou zastoupeny všechny velikostní kategorie alespoň 20 %. Shluková analýza pomocí metody K mean byla provedena v prostředí R, a to v rozsahu clusterů od dvou do osmi s nastavením 25 úvodních tréninkových bodů. Každé povodí v SoLC bylo zařazeno při každém vytváření clusterů do skupiny podle vybraných pěti parametrů. Vznik jednotlivých skupin povodí je popsán na obr. 3. Skupiny jsou označeny písmeny. Pokud nějaká skupina vznikne pouze oddělením z dříve vzniklé skupiny, je přidáváno číselné označení.

Skupiny vznikající při postupném vytváření clusterů je možné charakterizovat následujícím popisem. Geografické vytváření shluků je pak zobrazeno na obr. 4.

- 2 Clusters – Při vytváření prvních dvou clusterů vzniká skupina A, která je charakterizována spíše vyšším CN_M s nižším objemem srážek P_{20} . Skupina B je charakterizována vyššími srážkami P_{20} a větší hodnotou CN_M (obr. 4a).
- 3 Clusters – Skupina A se dělí především z hlediska tvarových charakteristik povodí, z hlediska hustoty říční sítě (SND) a z hlediska doby zpoždění (T_{lag}) (obr. 4b).
- 4 Clusters – Ze skupiny B se odděluje skupina B1, která je charakteristická nižšími srážkami P_{20} při zachování nižší hodnoty CN_M , a skupina B2 s vyššími srážkovými úhrny P_{20} a zároveň vyšší hodnotou CN_M (obr. 4c).
- 5 Clusterů – Skupina A1 se dělí dominantně na základě doby zpoždění. Vzniklá skupina A12 je charakterizována významnou dobou zpoždění (T_{lag}), zatímco u skupiny A11 jsou zachovány spíše původní charakteristiky skupiny A1. Takto definované skupiny A11 a A12 jsou pak zachovány i po rozdělení povodí na více clusterů (obr. 4d).
- 6 Clusterů – Vzniká zcela nová skupina D, která je charakterizována relativně vysokou SND a zároveň relativně nízkými srážkovými úhrny P_{20} při zachování relativně vysoké hodnoty CN_M . Takto vytvořená skupina D zůstává i po rozdělení povodí na více clusterů (obr. 4e).

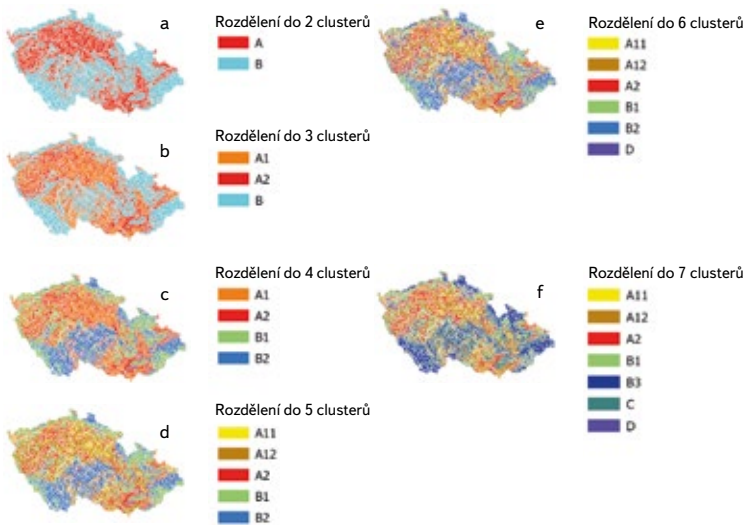


Obr. 3. Sankeyův diagram vývoje skupin pro různé počty clusterů pro SoLC. Počet prvků v dané skupině odpovídá šíři pásu. Diagram zároveň zobrazuje, jak se jednotlivá povodí přeskupují dle počtu clusterů. Základní dělení je patrné již při tvorbě dvou clusterů (A, B). Od počtu clusterů šest dochází k vývoji skupin, které vznikají kombinací základního dělení na A, B a podskupiny. Při šesti vzniká skupina D, jež je kombinací všech dříve vzniklých skupin. Při počtu clusterů 7 a 8 pak vznikají skupiny C, které jsou kombinací části skupiny A2 a B2 [29]

Fig. 3. The Sankey diagram shows the evolution and regrouping of SoLC classes with increasing number of clusters. The number of elements in a given group corresponds to a belt. At the same time, the diagram shows how individual watersheds are oversubscribed according to the number of clusters. The basic division is already visible in the formation of two clusters (A, B). From the number of clusters six to the development of groups that are created by combining the basic division into A, B and subgroups. At six, group D is formed, which is a combination of all previously formed groups. With the number of clusters 7 and 8, groups C are created, which are a combination of parts of groups A2 and B2 [29]

- 7 Clusterů – Skupina B2, která je charakterizována relativně vysokými srážkami P_{20} , je značně rozdělena. Společně s částí povodí ze skupiny A2 vytváří novou skupinu C, jež je charakteristická relativně vyššími srážkovými úhrny a zároveň vyššími hodnotami CN_M . Část povodí z původní skupiny B2 a část povodí ze skupiny B1 vytváří skupinu B3, která si zachovává podobné parametry jako původní skupina B2. Počet povodí z původní skupiny B2 je natolik malý, že je skupina pojmenována nově jako B3 (obr. 4f).
- 8 Clusterů – Dochází k přerozdělení v rámci nově vzniklé skupiny C na skupiny C1 a C2. Nově vzniklá skupina C1 je tvořena navíc částí povodí skupiny A2 a je charakterizována stejně jako původní skupina C vyššími hodnotami P_{20} i CN_M . Od skupiny C2 se pak odlišuje rozdílem v parametrech SND a (α), toto rozdělení již nepřináší do klasifikace povodí novou informaci.

Postupně vznikající skupiny povodí jsou charakterizovány středními hodnotami pěti výše uvedených parametrů. Podrobněji se parametry a shlukovou analýzou zabývá článek [29].



Obr. 4. Geografické zobrazení vývoje skupin při vytváření clusterů od dvou (a) po sedm (f)
Fig. 4. Geographical representation of group evolution when forming clusters from two (a) to seven (f)

Vytvořené clusterly povodí jsou dále zaříděny podle možného rizika vzniku rychlého odtoku. Z hlediska vlivu na riziko spojené se vznikem rychlého odtoku pro jednotlivé parametry platí:

- SND – Čím vyšší hodnota, tím je stálá vodní síť hustší, přičemž případný odtok se bude spíše koncentrovat do těchto drah, kde se odtok očekává. Větší hodnota tedy znamená nižší míru rizika.
- T_{lag} – Čím větší doba zdržení, tím lze předpokládat nižší kulminační průtoky.
- α – Čím je povodí tvarově složitější, tím víc dochází k prodloužení odtokových drah, a tím i ke snížení kulminace.
- CN_M – Čím je průměrná hodnota CN menší, tím dochází v povodí k větší míře retence a možné riziko ohrožení je menší.
- P_{20} – Čím jsou větší srážky, tím je vyšší riziko možné odtokové odezvy.

Pro jednotlivé parametry byla vypočtena průměrná hodnota v kategorii SoLC, která je brána jako střední riziko. Míra rizika byla pro jednotlivé parametry určena relativně k této průměrné hodnotě daného parametru. Pro každou hodnotu parametru odpovídající těžišti jednotlivých clusterů pak byl stanoven podíl s touto průměrnou hodnotou, čímž byla určena rizikovitost každého parametru

v daném clusteru. Za rizikové jsou uvažovány ty kombinace pěti parametrů, kde převažuje negativní hodnocení a naopak. Míra celkového rizika je rozdělena do pěti kategorií nízkého až vysokého rizika podle následujícího popisu:

- Nízké riziko – kombinace parametrů možné odtokové odezvy předpokládá malé riziko z hlediska ovlivnění povodí rychlým odtokem. Tyto oblasti se z hlediska rychlé odezvy zdají být bezproblémové a nutnost opatření v těchto oblastech se nepředpokládá.
- Menší riziko – kombinace parametrů možné odtokové odezvy předpokládá spíše malé riziko z hlediska ovlivnění povodí rychlým odtokem. Tyto oblasti jsou z hlediska rychlé odezvy bezproblémové a nutnost opatření v těchto oblastech se nepředpokládá.
- Střední riziko – kombinace parametrů možné odtokové odezvy je průměrné a předpokládá se střední míra rizika z hlediska ovlivnění povodí rychlým odtokem.
- Zvýšené riziko – kombinace parametrů možné odtokové odezvy předpokládá spíše větší míru rizika z hlediska ovlivnění povodí rychlým odtokem.
- Vysoké riziko – kombinace parametrů možné odtokové odezvy předpokládá velké riziko z hlediska ovlivnění povodí rychlým odtokem. V těchto oblastech by měl být proveden podrobnější průzkum a sledování možných negativních dopadů rizika způsobených rychlým odtokem.

Hodnoty parametrů pro určení míry rizika jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4. Hodnoty parametrů pro vyjádření míry rizika vzhledem k průměrné hodnotě příslušných parametrů

Tab. 4. Individual parameters used to express the degree of risk in relation to the mean values of the parameters

Riziko	Nízké	Menší	Střední	Zvýšené	Vysoké
Koeficient rizika	< 0,85	< 0,95	< 1,05	< 1,15	> 1,15
SND	1,19	1,09	1,03	0,98	0,88
T_{lag}	3,75	3,43	3,26	3,10	2,77
α	4,29	3,92	3,73	3,55	3,17
CN_M	58,5	65,4	68,9	72,3	79,2
P_{20}	42,8	47,8	50,3	52,8	57,8

Zařazení skupin povodí clustrové analýzy podle míry rizika je uvedeno v tab. 5, kam jsou zahrnuty skupiny od počtu clusterů 2–8.

Geografické vyjádření míry rizika je pak znázorněno na obr. 5. Skupiny A2 a C společně tvoří skupinu s vysokým rizikem, skupin A11, B1, B3 se týká střední riziko a A12 a D patří do skupiny s menším rizikem.

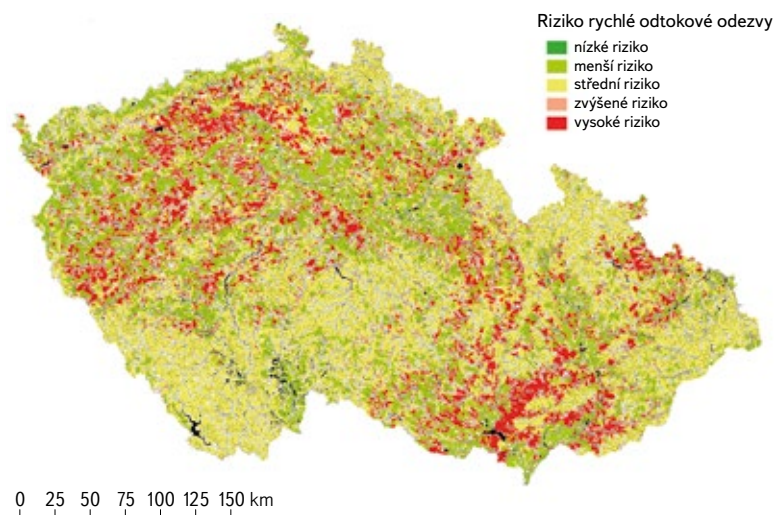
Zatřídění malých povodí z hlediska rizika rychlého odtoku je vyjádřeno relativně mezi jednotlivými parametry. Určitým validačním kritériem výsledků může být porovnání zařídění dle míry rizika se zaznamenanými erozními událostmi v *Monitoringu eroze zemědělské půdy*. Kontinuálně probíhá monitoring od roku 2012 a ke konci roku 2021 bylo evidováno již přes 2 200 erozních událostí [30].

Protnutí dotčených pozemků uvedených v monitoringu s hranicemi definovaných malých povodí je znázorněno na obr. 6. Pro přiřazení události k příslušnému povodí bylo bráno těžiště polygonu vymezejícího zaznamenanou událost.

Z celkového počtu 2 220 evidovaných událostí do roku 2021 jich byla polovina v povodích s vysokým rizikem. Většina zaznamenaných erozních událostí je evidována na Vysočině a na jižní Moravě. V ostatních regionech, kde nejsou erozní události evidovány, jde spíše o úplnost databáze erozních událostí než o části ČR bez výskytu událostí.

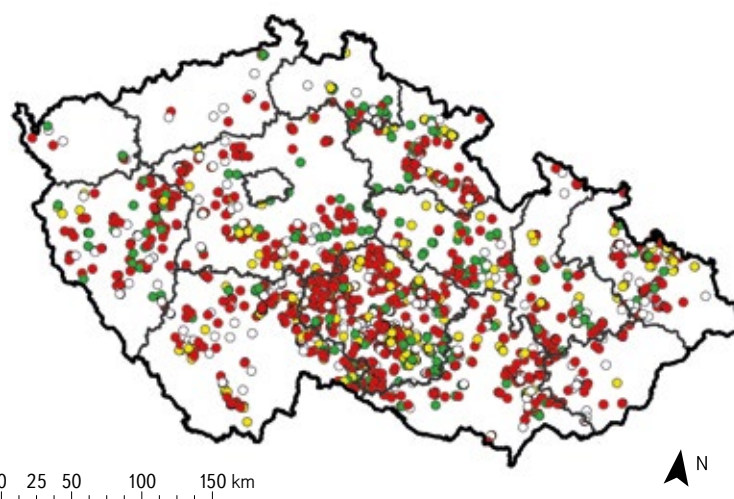
Tab. 5. Zařazení skupin povodí při clustrové analýze podle míry rizika
 Tab. 5. Development of the risk classification of catchment groups produced by cluster analysis

Počet clusterů		Relativní riziko jednotlivých parametrů					Průměr	Riziko
		SND	T_{lag}	α	CN_M	P_{20}		
2	A	1,68	1,07	0,92	1,09	0,95	1,14	zvýšené
	B	0,65	0,92	1,14	0,88	1,07	0,93	menší
3	A1	0,90	0,67	0,68	1,05	0,95	0,85	nízké
	A2	1,93	1,30	1,09	1,09	0,96	1,27	vysoké
4	B	0,65	0,99	1,20	0,86	1,08	0,96	střední
	A1	1,02	0,65	0,65	1,06	0,94	0,86	menší
	A2	2,31	1,29	1,09	1,10	0,93	1,35	vysoké
	B1	0,79	0,94	1,19	0,78	0,99	0,94	menší
5	B2	0,61	1,11	1,07	1,03	1,16	0,99	střední
	A11	1,14	1,06	0,60	1,09	0,94	0,97	střední
	A12	0,97	0,46	0,91	1,00	0,94	0,86	menší
	A2	2,31	1,30	1,15	1,10	0,94	1,36	vysoké
6	B1	0,79	1,02	1,20	0,78	0,99	0,96	střední
	B2	0,60	1,12	1,08	1,02	1,16	1,00	střední
	A11	1,56	1,05	0,59	1,08	0,95	1,05	střední
	A12	1,03	0,45	0,91	1,00	0,94	0,87	menší
7	A2	2,92	1,30	1,14	1,10	0,93	1,48	vysoké
	B1	0,89	1,00	1,22	0,76	1,01	0,98	střední
	B2	0,79	1,11	1,10	1,02	1,19	1,04	střední
	D	0,41	1,15	0,99	1,02	0,95	0,91	menší
8	A11	1,48	1,02	0,57	1,09	0,95	1,02	střední
	A12	1,00	0,45	0,90	1,01	0,96	0,86	menší
	A2	2,59	1,23	1,10	1,11	0,89	1,38	vysoké
	B1	1,10	1,04	1,10	0,79	0,93	0,99	střední
8	B3	0,63	0,95	1,37	0,81	1,19	0,99	střední
	C	1,24	1,27	1,10	1,09	1,11	1,16	vysoké
	D	0,39	1,15	0,95	1,03	0,98	0,90	menší
	A11	1,43	1,01	0,55	1,09	0,96	1,01	střední
	A12	1,03	0,43	0,90	1,00	0,95	0,86	menší
	A2	2,11	1,13	0,98	1,11	0,86	1,24	vysoké
8	B1	1,18	1,03	1,07	0,78	0,92	1,00	střední
	B3	0,67	0,96	1,44	0,79	1,17	1,01	střední
	C1	2,83	1,43	1,32	1,10	1,04	1,54	vysoké
	C2	0,74	1,06	0,93	1,08	1,16	0,99	střední
8	D	0,39	1,16	1,01	1,00	0,95	0,90	menší



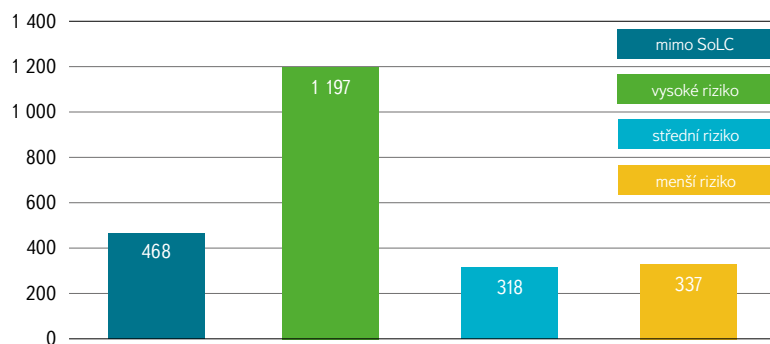
Obr. 5. Rozčlenění plochy ČR podle identifikované míry rizika v případě rozdělení povodí do sedmi clusterů

Fig. 5. Distribution of the area of the Czech Republic according to the identified level of risk in the case of dividing the basin into seven clusters



Obr. 6. Zaznamenané erozní události s vyznačenou mírou rizika příslušného SoLC (vysoké riziko červeně, střední riziko – žlutě, menší riziko – zeleně, události mimo SoLC – bíle)

Fig. 6. Recorded erosion events with the risk level of the respective SoLC indicated (high risk in red, medium risk in yellow, reduced risk in green, events outside the SoLC in white)



Obr. 7. Počet zaznamenaných erozních událostí v monitoringu zatříděných podle rizika SoLC

Fig. 7. Number of recorded erosion events in monitoring classified by SoLC risk

DISKUZE

Klasifikace povodí se častěji používá v rámci experimentální hydrologie. V rozšiřující se databázi CAMELS jsou povodí rovněž klasifikována. V těchto případech je seznam parametrů větší. Na rozdíl od zde prezentovaného výběru parametrů je rozšířen o hydrologické údaje dlouhodobých bilancí a parametrů, jež ovlivňují spíše dlouhodobé odtoky a další složky bilance [6]. Ve většině případů jde také o větší povodí. Dlouhodobé řady pozorování na malých povodích jsou významně méně časté než na větších povodích. Zde představená malá povodí přinášejí do klasického členění informací o horních neprůtočných povodích. Zároveň jsou tato horní povodí klasifikována podle klíčových charakteristik ovlivňujících rychlou složku odtoku.

Pro vytváření hranic povodí a jejich vlastností byla použita vstupní data s různým prostorovým rozlišením. Vymezení hranic povodí bylo vytvořeno na základě modelu terénu v rozlišení 5×5 m, který je dostatečně podrobný i pro vymezení malých povodí v uvažované velikostní kategorii 005. Na základě modelu terénu pak byly odvozeny další morfologické charakteristiky ve stejném rozlišení. Při použití metody D8 v nižším rozlišení by mohlo dojít k ovlivnění vytváření hranic povodí, především u nejmenší kategorie.

Parametry, které vstupují do clustrové analýzy, se z hlediska rozdělení hodnot mezi kategoriemi významně neliší. Menší povodí jsou zároveň součástí větších povodí a společně vytvářejí SoLC, kde je zastoupeno alespoň 20 % počtu povodí z každé kategorie. Celková plocha horních povodí obsažených v SoLC je 63 000 km², což tvoří cca 80 % plochy ČR (78 000 km²).

Z uvažovaných 28 parametrů je vzájemně korelováno několik. První skupinou (A, viz obr. 2) vzájemně korelujících parametrů jsou geometrické parametry povodí (velikost, plocha, délka odtokové dráhy, akumulace odtoku) s T_{lag} . Tvarové koeficienty (skupina B) jsou provázané ve vzájemné korelaci se SND a délkou odtokových drah mimo vodní tok. Z této skupiny jsou nejméně vzájemně provázané parametry SND a α . Další významnou skupinou (C) jsou vzájemně korelující parametry popisující sklonové poměry povodí, sklon vodních toků, nadmořskou výšku ve vazbě na využití území a půdní charakteristiky CN_{M} . Tato vazba odpovídá využití území v horských, většinou sklonitějších oblastech, jež jsou převážně zalesněná. Samostatnou skupinou parametrů jsou pak srážky (D), které mají vzájemně silnou vazbu. S ostatními parametry významnou vazbu nevykazují.

V malých zdrojových povodích jsou klíčovými z hlediska odezvy a případně z hlediska rizika zvýšených průtoků především krátkodobé deště. Vznik povodně a možného ohrožení je kombinací aktuálních podmínek povodí a průběhu příčných srážek. Zejména krátkodobé přívalové deště jsou obtížně předpověditelné. Nicméně platí, že dvě rozdílně zatříděná povodí, která budou mít stejný počáteční stav a budou zatížena shodnými srážkami, budou mít rozdílnou reakci na příčné srážky. Zatřídění povodí podle parametrů má praktický dopad na možnou prioritizaci z hlediska realizace opatření.

Následná shluková analýza povodí z hlediska jejich hydrologické odezvy ukazuje, že podle vybraných parametrů existuje základní rozdělení povodí do dvou skupin, v nichž se postupně oddělují kategorie A2 a B2, které spadají svými parametry do skupiny s rizikem ohrožení zvýšeným odtokem z přívalových dešťů. Především z těchto dvou skupin se pak odděluje riziková skupina C. Samostatně vytvořená skupina D vzniká z dříve vytvořených skupin A a B a vydělují se v ní povodí s nejnižším rizikem z hlediska ohrožení. Vytvoření dvou clusterů C1 a C2 ze skupiny C a částečně ze skupiny A2 při celkovém počtu clusterů osm již nepřináší nové informace z hlediska možné ohrožení. Pro klasifikaci SHC z hlediska jejich potenciálního ohrožení je proto vhodné zatřídění do sedmi clusterů.

Shlukům malých povodí byla přiřazena hodnota míry rizika v pětistupňové škále. Při rozdělení do sedmi clusterů je nejnižší riziko ve skupině A12. Spolu s D spadá do kategorie „menšího rizika“, nicméně je na hranici hodnot pro zařazení do kategorie „nízké“. Střední riziko mají skupiny A11, B1 a B3. Vysoké riziko A2 a C, kde u A2 je riziko nejvyšší ze všech skupin a C je na hranici pro zařazení do skupiny „zvýšené riziko“.

Určitou validaci výsledného rizika lze provést porovnáním umístění skutečných pozorovaných erozních událostí a hranic výsledných SHC. Výsledek ukazuje, že více než polovina zaznamenaných událostí je ve třídě s vysokou mírou rizika. Necelých 15 % je ve třídách středního a menšího rizika a 20 % zaznamenaných událostí je na pozemcích mimo SoLC, tedy v mezipovodích.

ZÁVĚR

Představené odvození a následná klasifikace SHC (Small Headwater Catchments – malých zdrojových povodí) z pohledu míry ohrožení přináší pohled na jejich pravděpodobnou hydrologickou odpověď. Lze říci, že do počtu pěti clusterů je zachováno primární rozdělení do dvou skupin A a B, které vznikají již při vytváření prvních dvou clusterů. V obou se postupně tvoří dvě skupiny, jež jsou spíše rizikové. Za dostatečně vysvětlující klasifikaci SHC můžeme považovat sedm clusterů, kdy vznikne jak skupina velmi málo ohrožená (D), a to z prvků skupin A i B, tak skupina C – velmi ohrožená vymezením ze skupin A2 a B2. Při sedmi clusterech z plochy ČR je tímto přístupem hodnoceno 28,5 % plochy jako rizikové, 29,4 % plochy se středním rizikem, 22 % je s podprůměrným rizikem, 20 % plochy území ČR pak není hodnoceno – nespadá do kategorie SHC.

V ČR pokrývají zdrojová povodí významnou část území. Při zvolené hranici do 5 km² tvoří SoLC (Set of Largest Catchments – skupina největších povodí) cca 80 % území ČR. SHC jsou prostorem pro primární akumulaci srážkových vod. Zároveň jsou tato povodí nejvíce zasažena rychlým odtokem, což následně snižuje dostupnost vody v jejich ploše. Klasifikace malých zdrojových povodí z hlediska potenciálu ohrožení přívalovými dešti je jedním z možných pohledů. Dalším využitím prostorového vymezení těchto povodí může být následná klasifikace např. z pohledu dostupnosti vody pro závlahy či z pohledu aplikace dalších adaptačních opatření na očekávanou změnu klimatu.

V rámci ČR je možné považovat za výrazněji ohrožené oblasti zemědělsky využívané části jižní Moravy, západní část Českomoravské vrchoviny a severozápad Čech. V těchto oblastech je také typické střídání povodí s vysokým rizikem a menším rizikem. Oblast jižní Moravy a západních Čech je typická zemědělsky využívaná krajina. Oblasti se středním ohrožením jsou převážně horské (Šumava, Krkonoše, Jizerské hory, Jeseníky), které jsou charakteristické zvýšenými srážkovými úhrny, jejichž dopad je snižován zvýšeným zalesněním. V této skupině jsou rovněž Beskydy a severní Morava. Krušné hory spadají do oblasti s menším rizikem, což je dáno menšími srážkovými úhrny. Mezi oblastmi s menším rizikem patří podhorské oblasti s výjimkou Podorlicka a jihozápadního Plzeňska, jež spadají do oblastí se zvýšeným rizikem. Největší oblastí povodí s menším rizikem je Polabská nížina, částečně Třeboňsko a dále pahorkatiny Brd a západních Čech.

Odvozené hranice malých povodí jsou dostupné formou webové služby na portálu rain.fsv.cvut.cz.

Poděkování

Tento článek vznikl za podpory projektu Ministerstva zemědělství „Předchozí nasycenost a návrhové srážkové intenzity jako faktory odtokové odezvy na malých povodích“ (OQ1910029) a Technologické agentury ČR „Využití dat dálkového průzkumu Země pro posouzení negativních dopadů přívalových srážek“ (SS1020366).

Literatura

- [1] STROUHAL, L., KAVKA, P., WEYSKRABOVÁ, L., PAVEL, M. Classification of Small Watersheds in Czech Republic for Hydrological Modelling. *The International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM (Survey, Geology, Ecology and Management)*. 2017, 17(31), s. 121–128. Dostupné z: [doi: 10.5593/SGEM2017/31/S12.016](https://doi.org/10.5593/SGEM2017/31/S12.016)
- [2] STRAHLER, A. N. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Eos Transactions American Geophysical Union*. 1957, 38(6), s. 913–920. Dostupné z: [doi: 10.1029/TR038I006P0913](https://doi.org/10.1029/TR038I006P0913)

- [3] GUMBO, A. D., KAPANGAZIWI, E., CHIKOORE, H., PIENAAR, H. Assessing Water Resources Availability in Headwater Sub-Catchments of Pungwe River Basin in a Changing Climate. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2021, 35, 100827. Dostupné z: doi: 10.1016/j.ejrh.2021.100827
- [4] KŘEČEK, J., HAIGH, M. J. Reviewing the Contexts of Headwater Control. *Environmental Reconstruction in Headwater Areas*. 2000, s. 9–24. Dostupné z: doi: 10.1007/978-94-011-4134-5_2
- [5] WAGENER, T., SIVAPALAN, M., TROCH, P., WOODS, R. Catchment Classification and Hydrologic Similarity. *Geography Compass*. 2007, 1(4), s. 901–931. Dostupné z: doi: 10.1111/J.1749-8198.2007.00039.X
- [6] ADDOR, N., NEWMAN, A. J., MIZUKAMI, N., CLARK, M. P. The CAMELS Data Set: Catchment Attributes and Meteorology for Large-Sample Studies. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017, 21(10), s. 5293–5313. Dostupné z: doi: 10.5194/HES-21-5293-2017
- [7] OULEHLE, F. a kol. The GEOMON Network of Czech Catchments Provides Long-Term Insights into Altered Forest Biogeochemistry: From Acid Atmospheric Deposition to Climate Change. *Hydrological Processes*. 2021, 35(5), e14204. Dostupné z: doi: 10.1002/HYP.14204
- [8] MISHRA, S. K., SINGH, V. P. *Soil Conservation Service Curve Number (SCS CN) Methodology*, vol. 42. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003. Dostupné z: doi: 10.1007/978-94-017-0147-1
- [9] CALETKA, M., MICHALKOVÁ, M. Š., KARÁSEK, P., FUČÍK, P. Improvement of SCS-CN Initial Abstraction Coefficient in the Czech Republic: A Study of Five Catchments. *Water*. 2020, 12(7), s. 1964. Dostupné z: doi: 10.3390/W12071964
- [10] SOULIS, K. X. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Method: Current Applications, Remaining Challenges, and Future Perspectives. *Water*. 2021, 13(2), s. 192. Dostupné z: doi: 10.3390/W13020192
- [11] STROUHAL, L., KAVKA, P. Hydrologické skupiny púd – metodiky a datové podklady (1. část). *Vodní hospodářství*. 2022, 72(6), s. 4–10 [on-line]. Dostupné z: <https://vodnihospodarstvi.cz/>
- [12] STROUHAL, L., KAVKA, P. Hydrologické skupiny púd – rozveřené nůžky hydrologických výpočtů (2. část). *Vodní hospodářství*. 2022, 72(9), s. 7–12 [on-line]. Dostupné z: <https://vodnihospodarstvi.cz/>
- [13] KAVKA, P., JEŘÁBEK, J., LANDA, M. SMODERP2D-Sheet and Rill Runoff Routine Validation at Three Scale Levels. *Water*. 2022, 14(3), s. 327. Dostupné z: doi: 10.3390/W14030327
- [14] von WERNER, M. *Erosion-3D User manual. Ver. 3.1.1*. Berlin, 2006.
- [15] KAŠPAR, M., BLIŽŇÁK, V., HULEC, F., MÜLLER, M. High-Resolution Spatial Analysis of the Variability in the Subdaily Rainfall Time Structure. *Atmospheric Research*. 2021, 248, 105202. Dostupné z: doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105202
- [16] CHEN, C. L. Rainfall Intensity-Duration-Frequency Formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1983, 109(12), s. 1603–1621. Dostupné z: doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:12(1603)
- [17] COURTY, L. G., WILBY, R. L., HILLIER, J. K., SLATER, L. J. Intensity-Duration-Frequency Curves at the Global Scale. *Environmental Research Letters*. 2019, 14(8), 084045. Dostupné z: doi: 10.1088/1748-9326/ab370a
- [18] MÜLLER, M., BLIŽŇÁK, V., KAŠPAR, M. Analysis of Rainfall Time Structures on a Scale of Hours. *Atmospheric Research*. 2018, 211, s. 38–51. Dostupné z: doi: 10.1016/j.atmosres.2018.04.015
- [19] BLIŽŇÁK, V., KAŠPAR, M., MÜLLER, M. Radar-Based Summer Precipitation Climatology of the Czech Republic. *International Journal Climatology*. 2018, 38(2), s. 677–691. Dostupné z: doi: 10.1002/joc.5202
- [20] BEVEN, K., HEATHWAITE, L., HAYGARTH, P., WALLING, D., BRAZIER, R., WITHERS, P. On the Concept of Delivery of Sediment and Nutrients to Stream Channels. *Hydrological Processes*. 2005, 19(2), s. 551–556. Dostupné z: doi: 10.1002/hyp.5796
- [21] DRBAL, K., DUMBROVSKÝ, M. *Metodický návod pro identifikaci KB. Ministerstvo životního prostředí ČR* (vid. 20. říjen 2022). Praha: MZE, 2009. Dostupné z: http://www.povis.cz/mzp/KB_metodicky_navod_identifikace.pdf
- [22] ŽÍŽALA, D., KAPIČKA, J., NOVOTNÝ, I. Monitoring Soil Erosion of Agricultural Land in Czech Republic and Data Assessment of Erosion Events from Spatial Database. In: *Proceedings from International Conference Soil – The Non-Renewable Environmental Resource*, 2016, s. 354–370.
- [23] SEDLÁK, K. *TNV – úpravy potoků*. 2010 [on-line]. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/104408/TNV_75_2102.pdf
- [24] GRAVELIUS, H. *Compendium of Hydrology*. 1914.
- [25] MISHRA, S. K., SINGH, V. P. SCS-CN Method. In: *Soil Conservation Service Curve Number (SCN-CN) Methodology*. Springer-Science+Business Media, B. V., 2003, s. 84–146. Dostupné z: doi: 10.1007/978-94-017-0147-1_2
- [26] TE CHOW, V. a kol. *Applied Hydrology*, 1988.
- [27] DRBAL, K. Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2016, 58(6), s. 4. Dostupné z: doi: 10.46555/VTEI.2016.05.001
- [28] KAVKA, P. Spatial Delimitation of Small Headwater Catchments and their Classification in Terms of Runoff Risks. *Water*. 2021, 13(23), 3458. Dostupné z: doi: 10.3390/W13233458
- [29] KAPIČKA, J., DANIEL, Ž., LANG, J., NOVOTNÝ, I. *Monitoring eroze zemědělské půdy – Závěrečná zpráva*, Praha, 2021.
- [30] *Categorisation of Small Source Catchments* [vid. 2. listopad 2022]. Dostupné z: https://rain1.fsv.cvut.cz/?PROJECT=rain/small_catchment/webapp

Autoři

Ing. Petr Kavka, Ph.D.¹

✉ petr.kavka@fsv.cvut.cz

ORCID: 0000-0002-6511-9518

Ing. Lenka Weyskrabová, Ph.D.¹

✉ lenka.weyskrabova@fsv.cvut.cz

ORCID: 0000-0002-7735-3192

Ing. Luděk Strouhal, Ph.D.^{1,2}

✉ ludek.strouhal@fsv.cvut.cz

✉ ludek.strouhal@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-3979-4894

Ing. Jan-František Kubát¹

✉ jan-frantisek.kubat@fsv.cvut.cz

ORCID: 0000-0001-9160-3277

Prof. Ing. Jiří Cajthaml, Ph.D.³

✉ jiri.cajthaml@fsv.cvut.cz

ORCID: 0000-0002-0325-8408

¹ ČVUT, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací

a krajinného inženýrství, Praha

² Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

³ ČVUT, Fakulta stavební, Katedra geomatiky, Praha

Príspevek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2022.11.001

SMALL HEADWATER CATCHMENTS – SPATIAL DELIMITATION AND THEIR CLASSIFICATION IN TERMS OF RUNOFF RISKS

KAVKA, P.¹; WEYSKRABOVÁ, L.¹; STROUHAL, L.^{1,2}; KUBÁT, J.-F.¹; CAJTHAML, J.³

¹CTU – Faculty of Civil Engineering, Department of Landscape Water Conservation, Prague

²T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague

³CTU – Faculty of Civil Engineering, Department of Geomatics, Prague

Keywords: hydrologic response – small headwater catchment – first order catchment – direct runoff – erosion event monitoring

The article presents an aerial delineation of small headwater catchments up to 5 km² on the territory of the Czech Republic. These catchments were categorised in terms of the characteristics affecting the formation of direct runoff. Runoff generated by intense, short precipitation events that are often convective in nature may be very dynamic and plays a key role in the field of flood protection. The overall area of the catchments sizing up to 5 km² covers 80 %

of the territory of the Czech Republic. A new database of these small headwater catchments can serve as a complement to the standard hierarchical classification of catchments currently in use by the hydrological community.

The delimited catchments were classified according to a number of characteristics related to the risk of rapid surface runoff. A cluster analysis was performed in order to classify these catchments into the risk classes. The catchment characteristics that influence the hydrological response were included in the analysis, such as six-hour rainfall totals (rain.fsv.cvut.cz), the hydro-morphological characteristics (derived from DMR4G), the land cover and the soils' hydrological characteristics.

No observed runoff data were available to verify the classification credibility. However, since the soil erosion is one of the common impacts of rapid runoff. The soil erosion monitoring database (<https://me.vumop.cz>) contains more than two thousand records for the Czech Republic territory. These data were used to compare the occurrence of erosion events in relation to watershed categorization. More than half of the identified events occur in the risk group. Quarter of the identified events are out of SoLC.

