

Proměny událostí rain-on-snow v horských povodích Česka

Ondřej Hotový, Ondřej Neděľčev

Anotace

Výzkum je zaměřený na četnost a trendy událostí deště na sněhovou pokrývku (*rain-on-snow*, ROS) a jejich vliv na odtok v různých nadmořských v souvislosti s měnícím se klimatem. Bylo vybráno 40 horských povodí v Česku, bez významnějšího vlivu lidské činnosti, nacházejících se v přechodové zóně kapalných-pevných srážek. Pro vybraná povodí byly simulovány odtokové charakteristiky v období 1965-2019 pomocí koncepčního hydrologického modelu.

Klíčová slova: události deště na sněhovou pokrývku; variabilita událostí deště na sněhovou pokrývku; trendy událostí deště na sněhovou pokrývku; zóna přechodu déšť-sníh; klimatická změna

Annotation

Research evaluates the frequency and trends in rain-on-snow (ROS) events and their runoff responses at different elevations related to changes in climate variables. We selected 40 near-natural mountain catchments in Czechia located in the rain-snow transition zone, for which a conceptual catchment model was used to simulate runoff components for the period 1965-2019.

Keywords: rain-on-snow events; rain-on-snow variability; rain-on-snow trends; rain-snow transition zone; climate change

Abstract

Seasonal snowpack significantly influences catchment runoff, as well as it contributes to groundwater recharge, and thus represents an important component of the hydrological cycle. A shift from snowfall to rain causing changes in snow storages are expected in the future due to increasing air temperature. As a result, changes in frequency and extremity of rain-on-snow (ROS) events, which are considered to be one of the main causes of floods in winter and spring, may occur.

The objectives of this study were 1) to evaluate the frequency and ongoing trends in ROS events at different elevations and to relate them to changes in climate variables, and 2) to analyze changes in runoff responses related to ROS events. We selected 40 near-natural mountain catchments in Czechia located in rain-snow transition zone with significant snow influence on runoff. A semi-distributed conceptual HBV model was used to simulate the individual components of the water cycle at a catchment scale and for different elevations. We analyzed inter-annual variations and trends of ROS days and related runoff responses in the study catchments during the study period 1965-2019.

The results showed that changes in ROS days and respective runoff responses differ largely among individual study catchments, at individual elevations and during individual months in the cold season. Significant increasing trends in ROS occurrence during cold season were detected primarily at highest elevations due to the decrease in snowfall fraction. In contrast, a decrease in total number of events, particularly at lower elevations during spring, was found out due to the shortening of the period with existing snow cover on the ground. Based on the results, the statistically significant change in runoff volumes cannot be proved, although certain increase was detected for some catchments. The results contribute to our knowledge of the temporal variability, trends and ROS hydrological response in the changing climate and may be beneficial to better predict these events and to create strategies to mitigate their effects on society and the terrestrial ecosystems.

1 Úvod

Voda akumulovaná ve sněhové pokrývce tvoří podstatnou složku hydrologického cyklu a významně ovlivňuje celkový odtok z povodí, převážně v jarních, ale i letních měsících (Jenicek and Ledvinka 2020, Vlach *et al.* 2020). Předpokládá se, že měnící se klima bude mít v budoucnu výrazný vliv na celkové množství akumulovaného sněhu během zimních měsíců, potažmo vliv na procesy uvnitř sněhové pokrývky (Sezen *et al.* 2020). Dle současných poznatků lze očekávat, že vlivem narůstající teploty vzduchu bude docházet ke změně intenzity a rozmístění srážek, a taktéž k častějšímu výskytu srážek ve formě deště na úkor sněžení (Musselman *et al.* 2018, Blahušiaková *et al.* 2020, Li *et al.* 2020). Všechny uvedené změny pak výrazně ovlivní četnost výskytu a intenzitu událostí deště na sněhovou pokrývku, tzv. *rain-on-snow events* (ROS), které jsou považovány za jednu z hlavních příčin zimních a jarních povodní v mnoha regionech světa (Würzer *et al.* 2017, Brunner *et al.* 2019) a právem jsou označovány za jeden z nevyřešených problémů hydrologie (Blöschl *et al.* 2019). Svou roli v tom sehrává fakt, že charakter ROS je ovlivněn mnoha faktory, mimo jiné také tím, do jaké míry je sněhová pokrývka schopna zachytit a udržet dešťovou a tavnou vodu (Juras *et al.* 2021), nebo jak probíhá celková energetická/tepelná výměna uvnitř sněhové pokrývky (Hotový and Jenicek 2020). Interakce mnoha podílejících se faktorů plyne v obtížnost přesně stanovit efekt sněhu na odtok při událostech ROS.

Ačkoli se téma ROS stalo v nedávné době předmětem řady výzkumů, otázka vlivu klimatické změny na výskyt a extremitu ROS zůstává neobjasněna, stejně jako bližší analýza hydrologické reakce na tyto události. Nejednota panuje i v samotné definici událostí ROS na základě stanovených prahových hodnot pro teplotu vzduchu, intenzitu deště, množství sněhu či dalších charakteristik (Pall *et al.* 2019).

Aktuální výzkumy naznačují, že proměny ROS událostí se mohou významně lišit v závislosti na nadmořské výšce výskytu. Hlavní roli totiž hrají dva protichůdné faktory související s postupně vzrůstající teplotou vzduchu. Na jedné straně stojí častější výskyt dešťových srážek v zimních měsících, což má za následek i častější výskyt událostí ROS, na straně druhé stojí kratší doba výskytu souvislé sněhové pokrývky, na kterou může déšť dopadat, což vede ke snížení celkového počtu dnů s výskytem ROS. I proto důležité věnovat se intenzivně tomuto tématu, zvláště pak se zaměřením na takové nadmořské výšky, kde dochází k častému přechodu mezi kapalnými a pevnými srážkami (Freudiger *et al.* 2014, Juras *et al.* 2021, Nedelcev and Jenicek 2021). K takto definované zájmové oblasti se bezpochyby řadí i horská a podhorská povodí na území Česka.

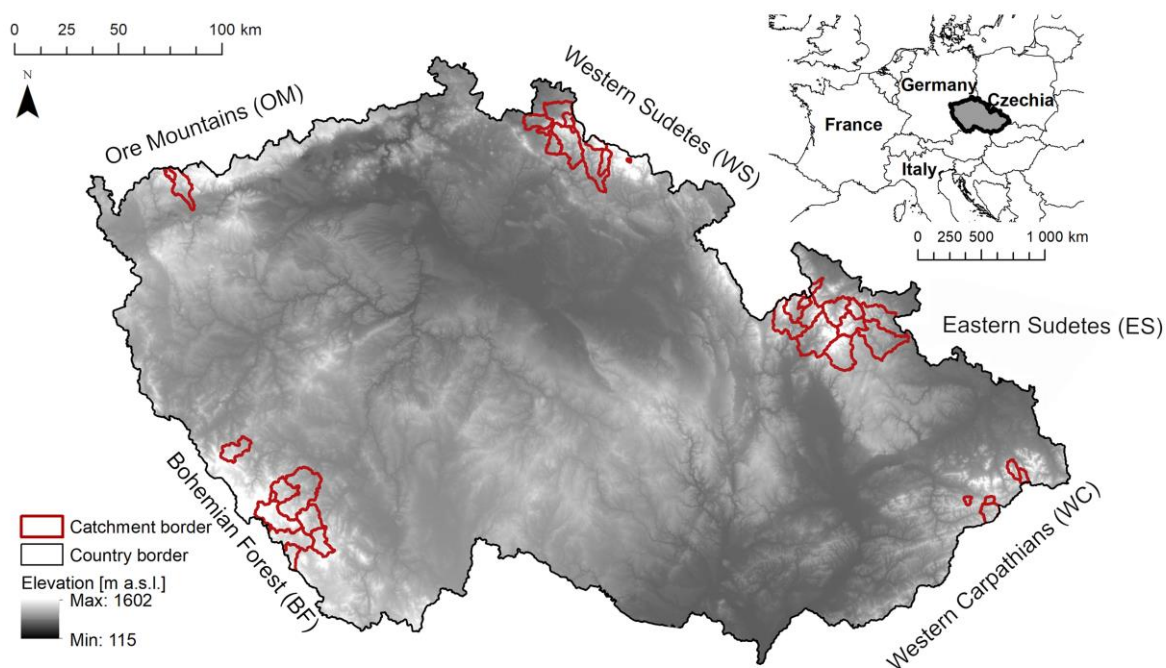
Ačkoli existují studie, které se zaměřují na vyhodnocení změn v četnosti výskytu a extremitě ROS, analýza ROS trendů a zhodnocení dopadu těchto událostí na celkový odtok je spíše vzácností. Většina studií se navíc soustředí na vyhodnocení na úrovni celých povodí, bez rozlišení jednotlivých výškových zón, a jsou situovány převážně do oblasti Alp.

Uváděná studie se zaměřuje na detailnější analýzu ROS událostí v nižších nadmořských výškách s cílem zachytit variabilitu na přechodové zóně mezi kapalnými a sněhovými srážkami. Jejím cílem je 1) zhodnotit četnost výskytu a trendy ROS událostí v různých nadmořských výškách s ohledem na změnu klimatu, 2) analyzovat změny v hydrologické odezvě na události ROS. Analýza byla provedena na 40 horských povodích Česka. Všechna vybraná povodí disponují dlouhými časovými řadami (1965-2019) meteorologických a hydrologických proměnných, což umožnilo nasimulovat potřebné komponenty hydrologického cyklu pro výpočet analýz v jednotlivých výškových zónách pomocí semi-distribuovaného koncepčního hydrologického modelu.

2 Materiál a metody

2.1 Zájmová území a zpracování dat

Studie byla prováděna na 40 povodích s výrazným vlivem sněhu na odtok a minimálním zásahem lidské činnosti, situovaných v pěti různých pohorích Česka (Obr. 1). U zvolených povodí bylo možné využít dostatečně dlouhé časové řady. Denní data srážek, průměrné teploty vzduchu (obě řady 1965-2019), denních průtoků a týdenní data vodní hodnoty sněhu (SWE) (obě řady 1980-2014) dostupná ze stanic Českého hydrometeorologického ústavu byla následně použita pro kalibraci a validaci hydrologického modelu.



Obrázek 1: Zájmová povodí (Nedelcev and Jenicek 2021).

Pro simulaci jednotlivých komponent srážko-odtokového procesu, včetně přímého a základního odtoku, byl použit semi-distribuovaný model *HBV-light*. Každé zájmové povodí bylo rozčleněno do výškových zón po 100 m, pro které byly pomocí modelu nasimulovány potřebné parametry. Bližší popis struktury zvoleného modelu uvádějí Seibert and Vis (2012) nebo Giron Lopez *et al.* (2020). Model byl v rámci každého povodí automaticky nakalibrován oproti pozorovaným hodnotám průtoků a SWE s užitím kalibračního období 1980-1997. Validace modelu byla prováděna na období 1998-2014. Použité finální mediánové simulace byly výsledkem sta různých kalibrací. Úspěšnost simulace modelu byla vyhodnocena na základě výsledků standardně užívaných ukazatelů (*Nash-Sutcliffe efficiency*, objemová chyba aj.). Shodná metodika nastavení a vyhodnocení modelu byla použita ve studiích Jenicek and Ledvinka (2020) nebo Jenicek *et al.* (2021).

2.2 Definice ROS dne / ROS události

Stěžejní částí práce bylo definování a identifikování zájmových jevů, tj. výskyt ROS. Přičemž k vyhodnocení trendů v rámci jednotlivých povodí i v rámci jednotlivých výškových zón bylo potřeba identifikovat jednotlivé ROS dny, zatímco k analýze hydrologické odezvy (potřebné parametry simulovány jen v rámci celých povodí) posloužila definice ROS jako delší časové události.

Jako **ROS den** (den s výskytem ROS) byl označen ten den, ve kterém byly splněny všechny tři následující podmínky: 1) průměrná denní teplota byla vyšší než 0 °C, 2) SWE byla alespoň 10 mm, 3) množství srážek bylo vyšší než 5 mm. Naproti tomu, **ROS událost** byla stanovena jako delší časové období (zahrnující jak dny s výskytem ROS, tak dny bez výskytu ROS) začínající s prvním identifikovaným ROS dnem a končící v den, kdy se vyskytl maximální simulovaný odtok.

2.3 Analýza odtokové odezvy

Všechny detekované ROS události byly následně rozděleny do čtyř kategorií (Tab. 1) dle rozdílu simulovaného odtoku před výskytem události (Q_0) a v době maximálního odtoku ($Q_{\max}$).

Tabulka 1: Kategorie ROS dle rozdílu v simulovaném odtoku před ROS událostí (Q_0) a v její maximální intenzitě ($Q_{\max}$).

ROS kategorie	Odtoková odezva	Definice
1	Zanedbatelný (<i>negligible</i>) průtok	$Q_{\max} \leq 125 \% Q_0$
2	Nízký (<i>low</i>) průtok	$125 \% Q_0 < Q_{\max} \leq 250 \% Q_0$
3	Střední (<i>medium</i>) průtok	$250 \% Q_0 < Q_{\max} \leq 500 \% Q_0$
4	Vysoký (<i>high</i>) průtok	$Q_{\max} > 500 \% Q_0$

Model HBV-light rozlišuje ve své simulaci základní a přímý odtok, takže bylo navíc možné každé ROS události přidělit hodnotu přímého odtoku. To umožnilo sledovat, zda se měnila hydrologická odezva na ROS události v rámci celého sledovaného období a zda v tom lze spatřovat nějaký trend.

3 Výsledky

3.1 Výskyt a charakter ROS dnů

V rámci všech 40 povodí v průběhu let 1965-2019 bylo na základě stanovené metodiky identifikováno celkem 15 894 ROS dnů, které se však často vyskytly souběžně v několika povodích. Nicméně každý ROS den v každém povodí byl zvlášť analyzován.

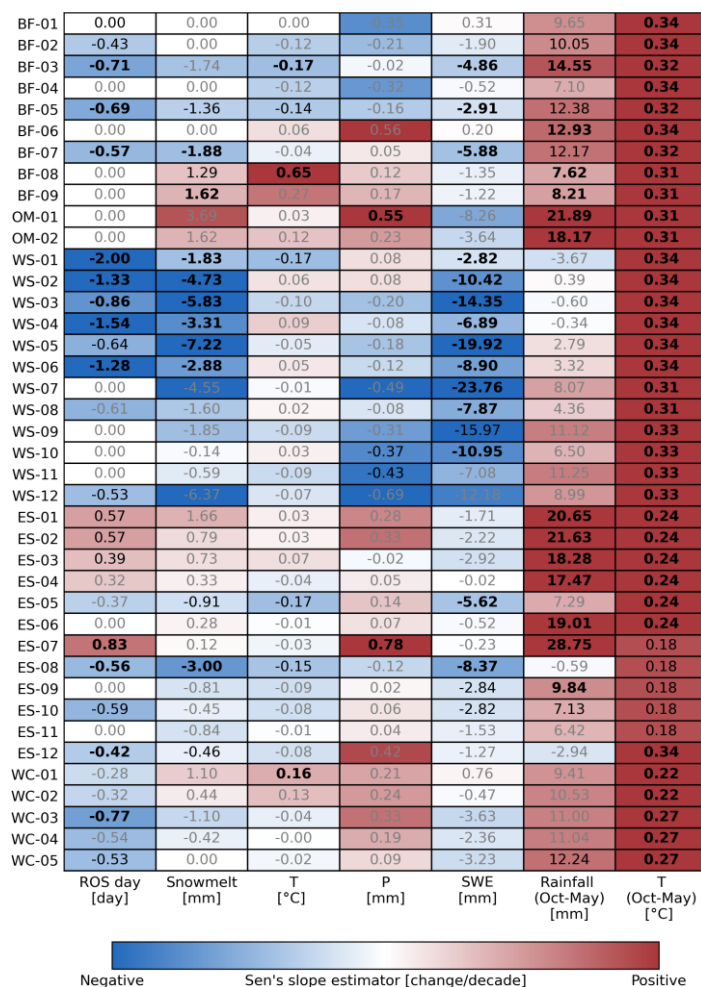
Srážko-odtokové proměnné nasimulované hydrologickým modelem umožnily identifikovat jednotlivé parametry doprovázející tyto specifické dny s výskytem kapalných srážek dopadajících na sněhovou pokrývku, a to i pro jednotlivé výškové zóny. Výsledky ukázaly (graficky nezobrazeny), že typický ROS den je takový, při kterém je průměrný úbytek SWE 9 mm (od 5,8 mm v nejnižších nadmořských výškách po 15,1 mm v nejvyšších nadmořských výškách), doprovází ho průměrná teplota kolem 2 °C (od 1,5 °C v nejnižších do 2,9 °C v nejvyšších výškách), spadne při něm průměrně 12 mm srážek (9-14,9 mm) a průměrná SWE v těchto dnech je 111 mm (27,7-290 mm).

3.2 Dlouhodobé trendy

K posouzení změn a trendů v jednotlivých ukazatelích byl použit Mann-Kendalův test s klasickým vyhodnocením sklonu (velikost změny) a p-hodnoty (hladina významnosti). Vyhodnocovány byly jednak trendy v počtu ROS dnů, a dále změny v klimatických podmínkách doprovázejících ROS dny v průběhu celé zimní sezóny (v místních podmínkách nejčastěji od října do května). Výsledky testu prokázaly (Obr. 2) statisticky významnou změnu v počtu ROS dnů v několika povodích a částečně naznačily možnou regionalizaci v trendech. Největší pokles v počtu ROS dnů, 2 dny za dekádu, byl zaznamenán v povodí Jeřice (WS-01), naopak nejvyšší nárůst byl v povodí Bělé (ES-07), a to 0,8 dne za dekádu.

Výsledky dále ukázaly, že teplota vzduchu a množství srážek při ROS dnech zůstávají prakticky neměnné. Avšak to samé nelze tvrdit o sezónních kapalných srážkách a teplotě vzduchu. Statisticky významný růst sezónní teploty (říjen-květen) byl zaznamenán na všech 40 povodích. Tato skutečnost

se promítla i do nárůstu kapalných srážek, který byl detekován na 17 povodích. V několika povodích, situovaných převážně v západní části Česka, byl pozorován signifikantní pokles SWE, potažmo intenzity tání sněhu v ROS dnech.

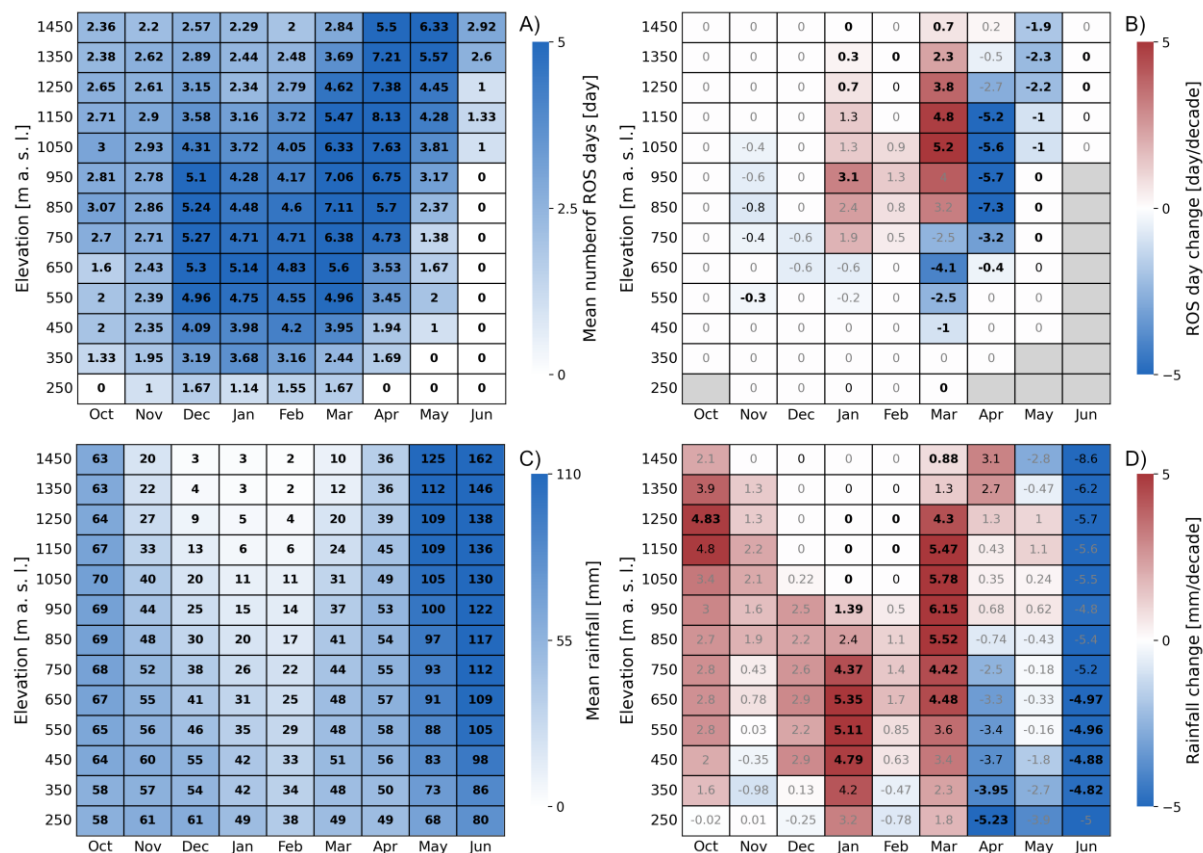


Obrázek 2: Změny v počtu ROS dnů (ROS day) za dekádu, změny v tání sněhu (snowmelt), průměrné teplotě vzduchu (T), množství srážek (P) a vodní hodnotě sněhu (SWE) při ROS dnech za dekádu. Změna sezónní teploty vzduchu (T Oct-May) a kapalných srážek (Rainfall Oct-May) za dekádu pro jednotlivá povodí v období 1965-2019. Hodnota buňky vyjadřuje Theil-Senův sklon lineárního trendu. Statisticky významné trendy jsou znázorněny tučně na hladině $p < 0,05$; tmavě na hladině $p < 0,1$; klesající trendy v odstínech modré, rostoucí trendy v odstínech červené.

3.3 Trendy v rámci měsíců a výškových zón

Analýza změn v rámci jednotlivých měsíců v různých výškových zónách poskytla oproti výše zmíněným výsledkům detailnější vhled do časové a prostorové distribuce ROS. Obrázek 3 znázorňuje trendy ROS dnů a trendy v množství kapalných srážek (Obr. 3B, 3D), včetně absolutních hodnot obou statistik (Obr. 3A, 3C). Výsledky jasně ukazují, že změny v ROS se výrazně liší v průběhu zimní sezóny, navíc v závislosti na nadmořské výšce. Statisticky významný pokles v počtu dnů s ROS byl obecně zaznamenán na konci zimní sezóny, tedy v březnu pro nadmořské výšky do 700 m n. m., v dubnu pro nadmořské výšky 700-1 200 m n. m. a méně výrazný pokles v květnu pro části povodí nad 1 200 m n. m. Nejvýraznější změna v počtu ROS dní byla pozorována v dubnu pro nadmořské výšky 800-900 m n. m. Hlavní příčinou těchto změn je patrně zkracující se doba výskytu sněhové pokrývky v souvislosti s vyšší teplotou vzduchu, jelikož významná změna v množství kapalných srážkách pro daná období a konkrétní nadmořské výšky nebyla prokázána (Obr. 3D).

Naopak statisticky významný nárůst počtu ROS dnů byl detekován v lednu v zóně 900-1 000 m n. m. a dále v březnu v nadmořských výškách nad 1 000 m n. m. Tento nárůst může být přisuzován rostoucímu množství kapalných srážek, které bylo pro dané a zóny a měsíce prokázáno (Obr. 3D).



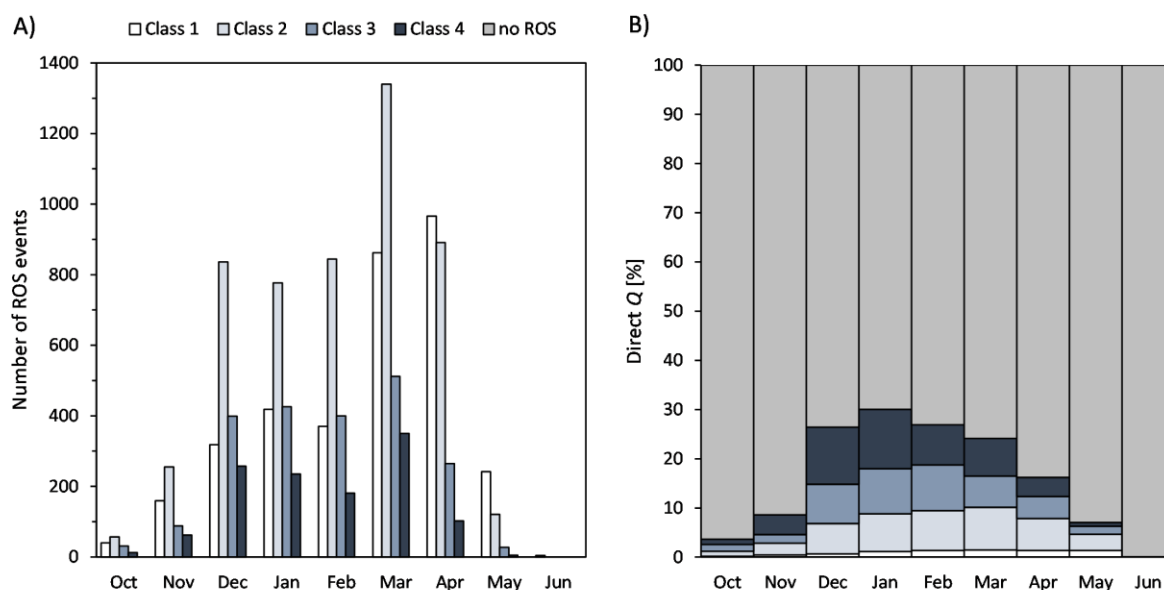
Obrázek 3: Průměrný počet ROS dnů (A), změna v počtu ROS dnů za dekádu (B), průměrný úhrn kapalných srážek (C) a změna v úhrnu kapalných srážek za dekádu (D) v období říjen-květen v průběhu let 1965-2019. Hodnota buňky vyjadřuje Theil-Senův sklon lineárního trendu. Statisticky významné trendy jsou znázorněny tučně na hladině $p < 0,05$; tmavě na hladině $p < 0,1$; klesající trendy v odstínech modré, rostoucí trendy v odstínech červené, šedá barva značí období a zónu bez výskytu ROS dne.

3.4 Odtoková odezva ROS

Na základě výše stanovené definice bylo ve sledovaném období identifikováno celkem 11 852 ROS událostí, které byly kategorizovány do výše uvedených skupin a následně byla vyhodnocena jejich odtoková odezva v jednotlivých povodích.

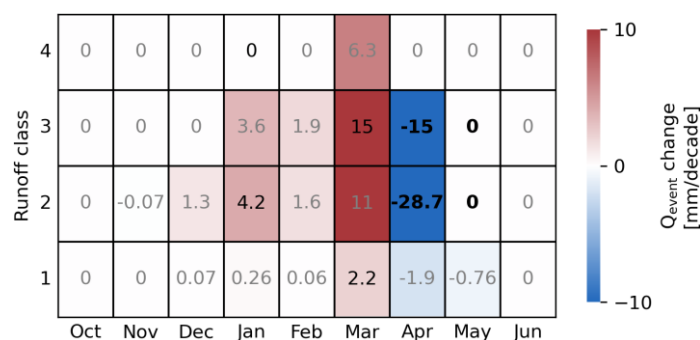
Výsledky ukázaly (Obr. 4A), že 29 %, tj. 3 379 ROS událostí způsobilo pouze zanedbatelný odtok (kategorie 1), 43 %, tj. 5 121 ROS událostí vedlo k nízkým odtokům (kategorie 2), 18 %, tj. 2 148 ROS událostí zapříčinilo střední odtok (kategorie 3) a pouze 10 %, tj. 1 204 ROS událostí mělo za následek vysoké odtoky (kategorie 4), tedy ty, které již mohou být významnou událostí spojenou s povodňovým ohrožením. Obecně, nejčastější výskyt ROS událostí byl pozorován v březnu a dubnu.

Přímý odtok způsobený ROS událostmi představoval v průběhu zimní sezóny 1-30 % celkového přímého měsíčního odtoku (Obr. 4B), s nejvyšším podílem v průběhu ledna. Potenciálně nejvíce nebezpečné události typu 3 a 4 tvořily nejvyšší podíl v období listopad-únor (4-12 %), v pozdní fázi zimy (od března dál) byly největším přispěvatelem přímého odtoku události kategorie 2 (3-9 %).



Obrázek 4: Celkové počty ROS událostí v zimním období (říjen-květen) v průběhu let 1965-2019, kategorizované dle jejich hydrologické odezvy (A). Relativní podíl přímého odtoku z ROS událostí na celkovém měsíčním přímém odtoku (B).

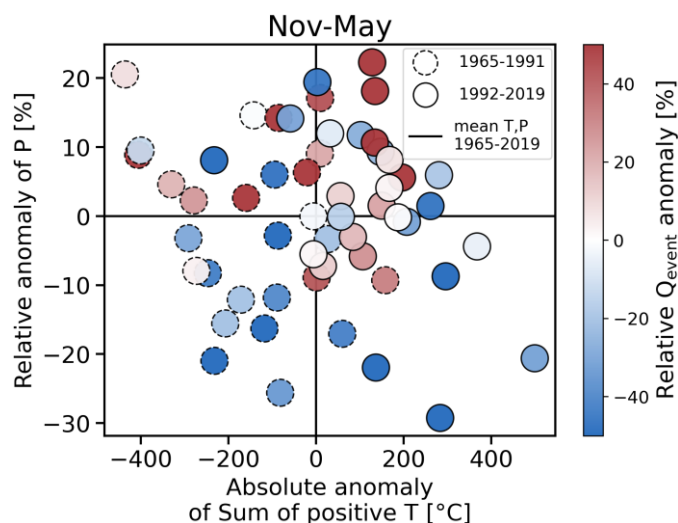
Výpočet objemu přímého odtoku způsobených výhradně událostmi ROS dále umožnil sledování vývoje četnosti této proměnné v čase. Výsledky znázorněné na Obrázku 5 naznačují, že statisticky významné změny v přímém odtoku v závislosti na jednotlivých kategoriích ROS událostí jsou soustředěny pouze na kategorii 2 a 3 (nízké a střední průtoky), s nejvýraznějším poklesem přímého odtoku v dubnu. Ostatní trendy jsou méně patrné a většinou statisticky nevýznamné, ačkoli jistý nárůst v objemech, který může být spojen s rostoucím rizikem povodní, je patrný v delším časovém období leden-březen. V rámci jednotlivých povodí byl statisticky významný nárůst zaznamenán pouze v 6 povodích v březnu, signifikantní pokles byl prokázán v 8 povodích v dubnu (výsledky nezobrazeny).



Obrázek 5: Trendy v objemu přímého odtoku způsobeného ROS událostmi v období 1965-2019. Hodnota buňky vyjadřuje Theil-Senův sklon lineárního trendu. Statisticky významné trendy jsou znázorněny tučně na hladině $p < 0,05$; tmavě na hladině $p < 0,1$; klesající trendy v odstínech modré, rostoucí trendy v odstínech červené.

Kromě výše uvedených změn a trendů byla pozornost studie zaměřena taktéž na otázku vlivu hlavních faktorů, předznamenávající výskyt ROS, tj. teplota vzduchu a množství srážek. Závislost změn těchto faktorů na objemových anomáliích v souvislosti s výskytem ROS je znázorněna na Obrázku 6. Z něj je patrné, že nejvýznamnější ROS události (co do objemu přímého odtoku) se vyskytly ve srážkově i teplotně nadprůměrných letech (pravý horní kvadrant Obr. 6). Výsledky naznačují, že množství srážek je pro výskyt ROS významnějším faktorem v porovnání s významem teploty vzduchu. To potvrzuje

také fakt, že rostoucí počet let s kladnou teplotní odchylkou v druhém sledovaném období (1992-2019), nevedl k nárůstu počtu významnějších ROS událostí v druhém období v porovnání s obdobím prvním (1965-1991).



Obrázek 7: Závislost mezi relativní srážkovou anomálií v období listopad-květen (osa y), absolutní teplotní anomálií vyjádřené sumou kladných hodnot v období listopad-květen (osa x) a relativní objemovou anomálií při ROS událostech (barevná škála) ve dvou různých časových periodách, 1965-1991 a 1992-2019.

4 Diskuze

Jedním z hlavních předmětů diskuze je užití semi-distribovaného hydrologického modelu HBV-*light* za účelem simulace potřebných komponent srážko-odtokového procesu, které byly zcela zásadní pro všechny zde uvedené analýzy ROS. Tím vyvstává otázka, do jaké míry zvolená parametrizace a struktura modelu odráží skutečnou povahu specifických událostí, jakými jsou právě například ROS. Podobný přístup k tematice ROS byl použit v několika studiích, např. ve Freudiger *et al.* (2014), nastavení modelu bylo testováno v Jenicek and Ledvinka (2020) nebo v Jenicek *et al.* (2021). V rámci studie byla úspěšnost zvoleného modelu testována hned několika způsoby (výsledky nezobrazeny). Úspěšnost kalibrace a validace modelu byla vyhodnocena na základě kombinace tří objektivních kritérií s různými vahami, přičemž výsledný test určil hodnotu vyšší než 0,7 jak pro kalibraci, tak pro validaci, čímž lze simulace modelu označit za uspokojivé (Moriassi *et al.* 2015). V simulacích se tak patrně příliš neprojevovalo zjednodušení, které mohlo vyplynout z užití metody *degree-day*, která je ve zvoleném modelu zakomponována, namísto na data výrazně náročnější metody energetické bilance. Schopnost modelu byla dále ověřována na základě jeho schopnosti simulovat SWE, a zachytit tak v simulaci správně ROS dny. Byly porovnávány detekované ROS dny na základě simulace oproti ROS dnům definovaným dle skutečně pozorovaných dat ze stanic. Dále bylo vyhodnocováno, do jaké míry je model schopen určit správnou kategorii ROS dle simulované odtokové odezvy. Všechny uvedené testy a analýzy potvrdily poměrně vysokou úspěšnost simulací.

Stěžejním krokem bylo nadefinování ROS dnů a ROS událostí na základě několika prahových hodnot různých veličin, což může ve výsledku velmi zásadně ovlivnit celkový počet zachycených a analyzovaných ROS dnů, respektive událostí. Tři definice stanovené veličiny byly nastaveny v souladu s prahovými hodnotami uváděných v jiných pracích, např. Trubilowicz and Moore (2017), Bieniek *et al.* (2018), Pall *et al.* (2019), Crawford *et al.* (2020), nebo Huang *et al.* (2022).

Výsledky týkající se výskytu a počtu dnů s ROS se významně neliší od jiných, podobně tematicky zaměřených studií z oblasti střední Evropy (Freudiger *et al.* 2014, Garvelmann *et al.* 2015, Würzer *et al.* 2016). Stejně je tomu u výzkumem naznačených trendů, které jsou v dobré shodě s výsledky, jenž

uvádějí studie opírající se často o predikce klimatických modelů. Výsledné podíly jednotlivých kategorií ROS dle hydrologické odezvy jsou v souladu s výsledky uváděnými ve studii Juras *et al.* (2021), v níž byla použita i obdobná kategorizace a nastavení sledovaných parametrů odtoku.

5 Závěr

Výzkum se zaměřil na vyhodnocení četnosti a trendů událostí ROS a na jejich vliv na odtokovou odezvu v různých nadmořských výškách. Hlavním záměrem práce bylo postihnout změny v takových nadmořských výškách, kde dochází k přechodu srážkového skupenství. Na základě výsledků lze stanovit následující závěry:

- Ve sledovaném období 1965-2019 bylo v rámci 40 povodí identifikováno celkem 15 894 dnů s výskytem ROS, způsobující průměrné snížení SWE o 9 mm, doprovázené průměrnou teplotou 2 °C, průměrnou intenzitou srážek 12 mm, dopadající typicky na sněhovou pokrývku o vodní hodnotě 111 mm.
- Výsledky ukázaly statisticky významnou změnu v počtu ROS dnů v několika povodích, avšak tyto změny byly spíše nevýrazné. Oproti tomu výraznější změny byly zaznamenány při specifikaci měsíce a nadmořské výšky výskytu. Nejvýraznější pokles počtu ROS dnů byl detekován v dubnu pro nadmořské výšky 700-1 200 m n. m., způsobený patrně kratším výskytem sněhové pokrývky, naopak nejvýraznější nárůst byl typický v březnu pro nadmořské výšky nad 1 000 m n. m.
- Dále bylo identifikováno celkem 11 852 ROS událostí, z nichž asi 10 % mělo díky výrazné odtokové odezvě potenciál způsobit významnější povodeň. Většina těchto hydrologicky významných událostí připadá na měsíc březen.
- Přímý odtok při událostech ROS tvořil v lednu až 30 % celkového přímého odtoku. Pozorované změny v objemu odtoku způsobeným ROS událostí byly spíše nevýrazné a často statisticky nevýznamné. Pokud byly takové změny identifikovány, bylo to přisouzeno kombinaci obou hlavních faktorů, tj. kladné anomálii teploty vzduchu a nadprůměrným srážkám v daném roce.
- Výsledky prokázaly, že změny v ROS a jejich odtokové odezvě se výrazně liší v jednotlivých povodích, v jednotlivých výškových zónách a v různých měsících v průběhu zimní sezóny. Uvedené poznatky přispívají k bližšímu pochopení faktorů souvisejících s událostmi ROS, včetně následné hydrologické odezvy s ohledem na variabilitu klimatu a možné budoucí klimatické změny.

6 Literatura

- Bessagnet B., A.Hodzic, R.Vautard, M.Beekmann, S.Cheinet, C.Honoré, C.Liousse and L.Rouil, 2004: *Aerosol modeling with CHIMERE - preliminary evaluation at the continental scale*. Atmospheric Environment, 38, 2803-2817
- Schaap, M., F. Sauter, R.M.A. Timmermans, M. Roemer, G. Velders, J. Beck and P.J.H. Builtjes, 2005. Int. J. Environmental Pollution.
- Bieniek, P.A., Bhatt, U.S., Walsh, J.E., Lader, R., Griffith, B., Roach, J.K., and Thoman, R.L., 2018. Assessment of Alaska rain-on-snow events using dynamical downscaling. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57 (8), 1847–1863.
- Blahušíaková, A., Matoušková, M., Jenicek, M., Ledvinka, O., Kliment, Z., Podolinská, J., and Snopková, Z., 2020. Snow and climate trends and their impact on seasonal runoff and hydrological drought types in selected mountain catchments in Central Europe. *Hydrological*

Sciences Journal, 65, 2083–2096.

- Blöschl, G., Bierkens, M.F.P., Chambel, A., Cudennec, C., Destouni, G., Fiori, A., Kirchner, J.W., McDonnell, J.J., Savenije, H.H.G., Sivapalan, M., Stumpp, C., Toth, E., Volpi, E., Carr, G., Lupton, C., Salinas, J., Széles, B., Viglione, A., Aksoy, H., Allen, S.T., Amin, A., Andréassian, V., Arheimer, B., Aryal, S.K., Baker, V., Bardsley, E., Barendrecht, M.H., Bartosova, A., Batelaan, O., Berghuijs, W.R., Beven, K., Blume, T., Bogaard, T., Borges de Amorim, P., Böttcher, M.E., Boulet, G., Breinl, K., Brilly, M., Brocca, L., Buytaert, W., Castellarin, A., Castelletti, A., Chen, X., Chen, Y., Chen, Y., Chiffard, P., Claps, P., Clark, M.P., Collins, A.L., Croke, B., Dathe, A., David, P.C., de Barros, F.P.J., de Rooij, G., Di Baldassarre, G., Driscoll, J.M., Duethmann, D., Dwivedi, R., Eris, E., Farmer, W.H., Feicabrino, J., Ferguson, G., Ferrari, E., Ferraris, S., Fersch, B., Finger, D., Foglia, L., Fowler, K., Gartsman, B., Gascoin, S., Gaume, E., Gelfan, A., Geris, J., Gharari, S., Gleeson, T., Glendell, M., Gonzalez Bevacqua, A., González-Dugo, M.P., Grimaldi, S., Gupta, A.B., Guse, B., Han, D., Hannah, D., Harpold, A., Haun, S., Heal, K., Helfricht, K., Herrnegger, M., Hipsey, M., Hlaváčiková, H., Hohmann, C., Holko, L., Hopkinson, C., Hrachowitz, M., Illangasekare, T.H., Inam, A., Innocente, C., Istanbuloglu, E., Jarihani, B., Kalantari, Z., Kalvans, A., Khanal, S., Khatami, S., Kiesel, J., Kirkby, M., Knoben, W., Kochanek, K., Kohnová, S., Kolechkina, A., Krause, S., Kremer, D., Kreibich, H., Kunstmann, H., Lange, H., Liberato, M.L.R., Lindquist, E., Link, T., Liu, J., Loucks, D.P., Luce, C., Mahé, G., Makarieva, O., Malard, J., Mashtayeva, S., Maskey, S., Mas-Pla, J., Mavrova-Guirguinova, M., Mazzoleni, M., Mernild, S., Misstear, B.D., Montanari, A., Müller-Thomy, H., Nabizadeh, A., Nardi, F., Neale, C., Nesterova, N., Nurtaev, B., Odongo, V.O., Panda, S., Pande, S., Pang, Z., Papacharalampous, G., Perrin, C., Pfister, L., Pimentel, R., Polo, M.J., Post, D., Prieto Sierra, C., Ramos, M.H., Renner, M., Reynolds, J.E., Ridolfi, E., Rigon, R., Riva, M., Robertson, D.E., Rosso, R., Roy, T., Sá, J.H.M., Salvadori, G., Sandells, M., Schaefli, B., Schumann, A., Scolobig, A., Seibert, J., Servat, E., Shafiei, M., Sharma, A., Sidibe, M., Sidle, R.C., Skaugen, T., Smith, H., Spiessl, S.M., Stein, L., Steinsland, I., Strasser, U., Su, B., Szolgay, J., Tarboton, D., Tauro, F., Thirel, G., Tian, F., Tong, R., Tussupova, K., Tyralis, H., Uijlenhoet, R., van Beek, R., van der Ent, R.J., van der Ploeg, M., Van Loon, A.F., van Meerveld, I., van Nooijen, R., van Oel, P.R., Vidal, J.P., von Freyberg, J., Vorogushyn, S., Wachniew, P., Wade, A.J., Ward, P., Westerberg, I.K., White, C., Wood, E.F., Woods, R., Xu, Z., Yilmaz, K.K., and Zhang, Y., 2019. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)—a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 64 (10), 1141–1158.
- Brunner, M.I., Farinotti, D., Zekollari, H., Huss, M., and Zappa, M., 2019. Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23 (11), 4471–4489.
- Crawford, A.D., Alley, K.E., Cooke, A.M., and Serreze, M.C., 2020. Synoptic climatology of rain-on-snow events in Alaska. *Monthly Weather Review*, 148 (3), 1275–1295.
- Freudiger, D., Kohn, I., Stahl, K., and Weiler, M., 2014. Large-scale analysis of changing frequencies of rain-on-snow events with flood-generation potential. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18 (7), 2695–2709.
- Garvelmann, J., Pohl, S., and Weiler, M., 2015. Spatio-temporal controls of snowmelt and runoff generation during rain-on-snow events in a mid-latitude mountain catchment. *Hydrological Processes*, 29 (17), 3649–3664.
- Girons Lopez, M., Vis, M.J.P., Jenicek, M., Griessinger, N., and Seibert, J., 2020. Assessing the degree of detail of temperature-based snow routines for runoff modelling in mountainous areas in central Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24 (9), 4441–4461.
- Hotový, O. and Jenicek, M., 2020. The impact of changing subcanopy radiation on snowmelt in a disturbed coniferous forest. *Hydrological Processes*, 34 (26), 5298–5314.

- Huang, H., Fischella, M.R., Liu, Y., Ban, Z., Fayne, J. V., Li, D., Cavanaugh, K.C., and Lettenmaier, D.P., 2022. Changes in Mechanisms and Characteristics of Western U.S. Floods Over the Last Sixty Years. *Geophysical Research Letters*.
- Jenicek, M., Hnilica, J., Nedelcev, O., and Sipek, V., 2021. Future changes in snowpack will impact seasonal runoff and low flows in Czechia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100899.
- Jenicek, M. and Ledvinka, O., 2020. Importance of snowmelt contribution to seasonal runoff and summer low flows in Czechia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24 (7), 3475–3491.
- Juras, R., Blöcher, J.R., Jenicek, M., Hotovy, O., and Markonis, Y., 2021. What affects the hydrological response of rain-on-snow events in low-altitude mountain ranges in Central Europe? *Journal of Hydrology*, 603, 127002.
- Li, Z., Chen, Y., Li, Y., and Wang, Y., 2020. Declining snowfall fraction in the alpine regions, Central Asia. *Scientific Reports*, 10 (1), 1–12.
- Moriasi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N., and Daggupati, P., 2015. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58 (6), 1763–1785.
- Musselman, K.N., Lehner, F., Ikeda, K., Clark, M.P., Prein, A.F., Liu, C., Barlage, M., and Rasmussen, R., 2018. Projected increases and shifts in rain-on-snow flood risk over western North America. *Nature Climate Change*.
- Nedelcev, O. and Jenicek, M., 2021. Trends in seasonal snowpack and their relation to climate variables in mountain catchments in Czechia. *Hydrological Sciences Journal*.
- Pall, P., Tallaksen, L.M., and Stordal, F., 2019. A climatology of rain-on-snow events for Norway. *Journal of Climate*, 32 (20), 6995–7016.
- Seibert, J. and Vis, M.J.P., 2012. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3315–3325.
- Sezen, C., Sraj, M., Medved, A., and Bezak, N., 2020. Investigation of rain-on-snow floods under climate change. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10 (4).
- Trubilowicz, J.W. and Moore, R.D., 2017. Quantifying the role of the snowpack in generating water available for run-off during rain-on-snow events from snow pillow records. *Hydrological Processes*, 31 (23), 4136–4150.
- Vlach, V., Ledvinka, O., and Matouskova, M., 2020. Changing Low Flow and Streamflow Drought Seasonality in Central European Headwaters. *Water*, 12 (12), 3575.
- Würzer, S., Jonas, T., Wever, N., and Lehning, M., 2016. Influence of Initial Snowpack Properties on Runoff Formation during Rain-on-Snow Events. *Journal of Hydrometeorology*, 17 (6), 1801–1815.
- Würzer, S., Wever, N., Juras, R., Lehning, M., and Jonas, T., 2017. Modelling liquid water transport in snow under rain-on-snow conditions - Considering preferential flow. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21 (3), 1741–1756.