

Analýza řídicích faktorů odtokových událostí na Šumavě způsobených deštěm na sněhovou pokrývku

Vít Šťovíček

Abstract

Rain-on-snow (ROS) are one of the most major causes of snowmelt floods during the cold part of year. Their frequency in Central Europe will likely increase in the near future in connection with the gradual increase in air temperature and the associated change in the ratio of liquid and solid precipitation. The melting of snow during ROS events is controlled by the snowpack energy balance and is influenced by a number of factors, especially meteorological conditions and the initial condition of the snow cover. These factors significantly affect the overall energy balance available for snow melting, such as sensible and latent heat, shortwave and longwave radiation and heat transfer from liquid precipitation. The calculations were made using data from four automatic stations in the Šumava Mountains, namely the Vydra river basin. Based on these data and the pre-defined conditions, 105 ROS events were selected. The resulting components of the energy balance, climatic, snow and outflow characteristics were correlated with each other and their influence was determined in ROS events. The analyses proved that during ROS events, the most important source of energy for melting are turbulent fluxes, i.e. latent and especially sensible heat. According to the monthly averages, they accounted, at almost all observed stations, for at least 40% (and up to 60% in December), of the total energy available for snow melting. Another important flux was shortwave radiation, whose ratio increased with the time of the season, when in March, it accounted for about 30-40% of the total energy available. The heat supplied by rainfall then ranged between 10% and 18%, and the lowest ratio of the average monthly energy to the total energy available was longwave radiation, which in most cases did not exceed 10%. The initial height of snowpack plays a significant role in the time-lag of the outflow of the water from the snow cover and changes rapidly under different weather and snow conditions. In the observed catchment, the character of ROS events from the station on Modrava is the most different from the others. It is the only station, where the average difference of cumulated precipitation to the cumulated outflow did not drop below 0 mm during ROS. Also, the average time after which the cumulative outflow above the cumulated precipitation began to prevail, was 22 hours, or twice as much more than another catchment - Ptačí brook basin.

Keywords: rain-on-snow, energy balance, snowmelt

Anotace

Príspevok vychází ze stejnojmenné diplomové práce, která si klade za cíl analýzu předběžných a příčinných faktorů událostí ROS na Šumavě na základě měření meteorologických a hydrologických stanic katedry fyzické geografie a geoekologie Univerzity Karlovy za období pozorování.

Annotation

This paper is based on the eponymous diploma thesis, which aims to analyze precursory and causal factors of ROS events in the Šumava Mountains based on the measurement of the meteorological and hydrological stations of the Department of Physical Geography and Geoecology of Charles University during the observation period.

1 Úvod

Sněhová pokrývka je významnou složkou životního prostředí a hydrologického cyklu. V zimních měsících pokrývá až 45 % zemské plochy na severní polokouli – více než 45 milionů km² (Estilow, Young, Robinson 2015). Události deště na sněhu (rain-on-snow neboli ROS) mohou sněhovou pokrývku významně ovlivňovat například tím, že kombinace dešťových srážek a tání sněhu může vést ke vzniku lavin, svahovým pohybům nebo povodní (Pall, Tallaksen, Stordal 2019). Ačkoliv většina událostí ROS nevede k tvorbě povodní, i menší množství srážek může vyvolat následný významný odtok. Zda, resp. jak velký bude odtok ze sněhové pokrývky, záleží hned na několika faktorech, ať už se jedná o celkovou energii dostupnou pro tání pokrývky, množství a úhrn srážek či počáteční vlastnosti pokrývky před začátkem události (Würzer et al. 2016; Sezen et al. 2020).

Problematika událostí ROS je natolik složitá a komplexní, že byla zařazena do seznamu 23 nevyřešených problémů v hydrologii Mezinárodní asociací hydrologických věd (IAHS), konkrétně jako otázka „Proč, jak a kdy produkují události deště na sněhu významný odtok?“ (Blöschl et al. 2019). Ačkoliv se jedná o značně důležité téma, především s ohledem na budoucí vývoj klimatu, existuje pouze málo studií zkoumajících události ROS ve větším měřítku (Pall, Tallaksen, Stordal 2019). Předpokládá se, a dle zjištěných trendů lze již pozorovat, že nejenom v oblastech mírného pásu, bude i nadále docházet ke snižování rozlohy sněhové pokrývky a zvyšování zimních dešťových srážek, což bude mít přímý vliv na frekvenci a počet událostí ROS. Jejich výskyt se posouvá z nižších do vyšších nadmořských výšek a do dřívějšího období na jaře (Surfleet, Tullos 2013; Hock 2022).

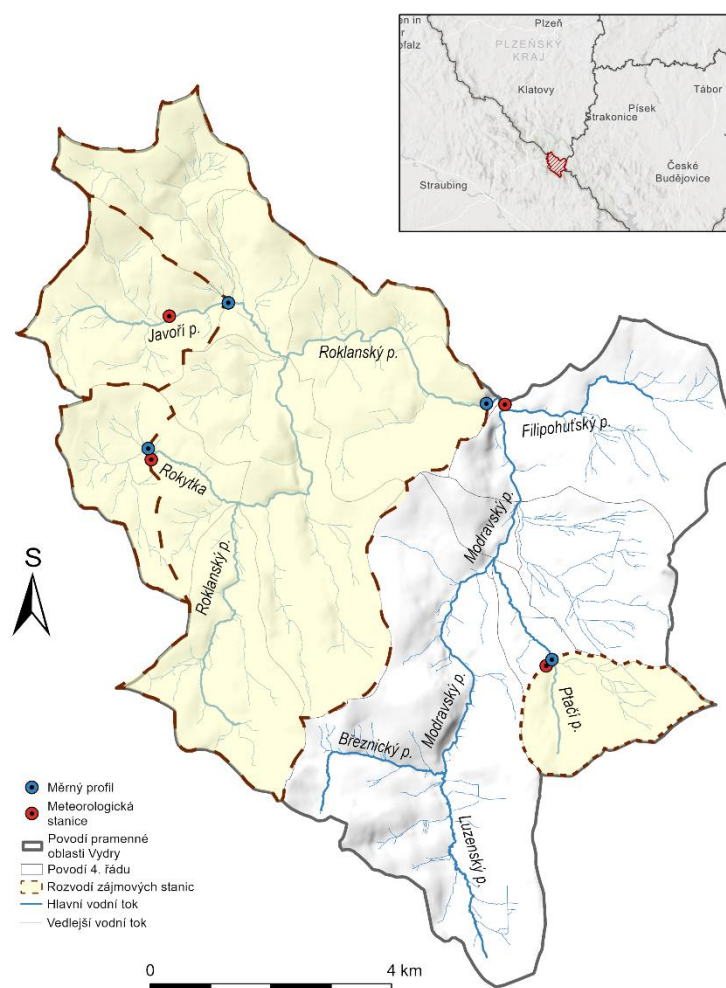
Tání sněhu se řídí energetickou bilancí sněhové pokrývky, jejíž jednotlivé toky hrají při událostech ROS důležitou roli. Za jasného počasí jsou primární pro tání sněhu radiační toky, tedy krátkovlnné a dlouhovlnné záření. Při událostech ROS se zdůrazňuje především důležitost turbulentních toků, tedy zjevného a latentního tepla, které za určitých podmínek mohou tvořit až 60-90 % z celkové dostupné energie pro tání sněhu. Zároveň se zvyšuje i podíl tepla dodaného samotnými srážkami (Würzer et al. 2016; Marks et al. 1998). Přesnou rychlost tání poté ovlivňují aktuální vlastnosti sněhové pokrývky, jako jsou její průměrná teplota, objem kapalné vody nebo hustota (Jennings, Molotch 2020; Würzer et al. 2016).

2 Zájmové území

Pro účely studie byly využity meteorologické stanice a měrné profily Katedry fyzické geografie a geoekologie Univerzity Karlovy na Modravě (Roklanský potok), Ptačím potoce a Rokytce. Na Javořím potoce poté měrný profil KFGG a dále sněhoměr Českého meteorologického ústavu (Obrázek 1).

Zájmová dílčí povodí zmíněných stanic náleží k pramenné oblasti Vydry, která vzniká soutokem Roklanského a Modravského potoka. Její celková délka činí 23,1 km a plocha povodí je 146,2 km². Nachází se na jihozápadě Čech v pohoří Šumava, u hranic s Bavorskem v Německu. Poloze v centrální části Šumavy odpovídají i nadmořské výšky zájmového území. Ty postupně klesají od jihozápadních vrcholů ve výšce okolo 1370 m n.m. směrem k severu až severovýchodu, odkud odtéká Vydra v nadmořské výšce 980 m n.m. Průměrná nadmořská výška zájmového území poté činí 1140 m n.m.

Oblast se vyznačuje celoročním převládajícím jihozápadním a západním prouděním, navíc zesíleným orografickým efektem návětrné strany Šumavy, což se projevuje především v zimním období. Při něm totiž spadne až pětikrát více srážek v porovnání s referenčními stanicemi středních Čech. Při zesíleném proudění jsou pro povodí Vydry typická podružná listopadová a prosincová maxima četnosti povodňových průtoků i zvýšená četnost povodňových situací v době jarního tání. I zde se projevuje vliv rostoucí průměrné teploty vzduchu, s níž se zároveň snižuje počet dní se sněhovou pokrývkou, její výška i množství srážek (Kocum, 2012; Blahušiaková, 2020).



Obrázek 1: Zájmové území pramenné oblasti Vydry

3 Metodika

Podle délky a typu měření byla z jednotlivých stanic použita (nebo vztažena) naměřená data o teplotě vzduchu, velikosti průtoku, výšce a vodní hodnoty sněhu, relativní vlhkosti vzduchu, množství srážek, rychlosti větru, dopadajícím a odraženém krátkovlnném a dlouhovlnném záření, teplotě sněhu ve sledovaném profilu, a objemu kapalné vody ve sněhu. Nejdelší časová řada byla dostupná u stanice na Modravě (01/2013-05/2020), následoval Ptačí potok a Javoří potok (obě 11/2015-05/2020) a nejkratší časová řada na Rokytce (11/2016-05/2020). V každém roce se vybírala časová řada z rozmezí měsíců listopad-květen.

Aby událost byla klasifikována jako rain-on-snow, musela zároveň splňovat následující dvě podmínky:

- Kumulativní součet dešťových srážek dosahoval alespoň 5 mm na sněhovou pokrývku o minimální výšce 10 cm
- Byla detekovaná změna (zvýšení) odtoku

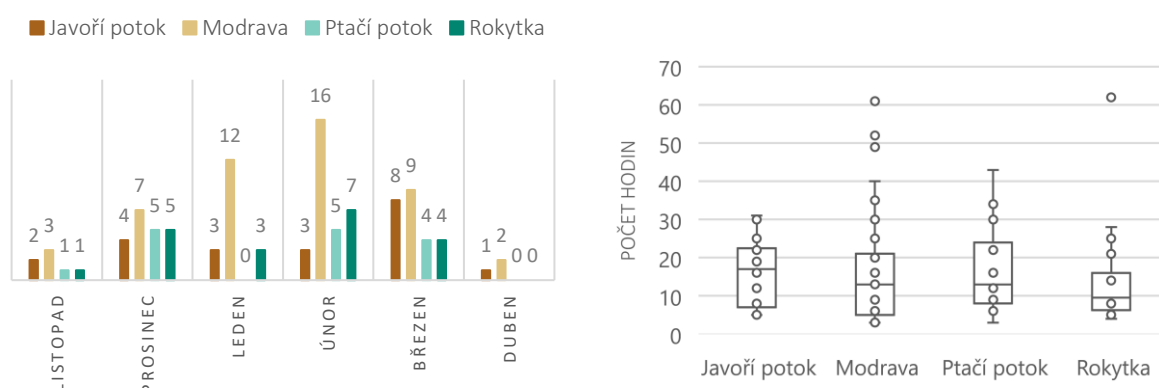
Tabulka 1: Vybrané charakteristiky událostí ROS

Charakteristika	Prvek	Zkr.	Jednotka
Složky energetické bilance sněhu	Celková energie krátkovlnného záření (dopadající – odražené)	SW	$W \cdot m^{-2}$
	Celková energie dlouhovlnného záření (dopadající – odražené)	LW	$W \cdot m^{-2}$
	Energie dodaná kapalnými srážkami	Q _{rl}	$W \cdot m^{-2}$
	Energie zjevného tepla	Zjevne	$W \cdot m^{-2}$
	Energie latentního tepla	Latentni	$W \cdot m^{-2}$
	Celková energetická bilance	Q _{celk}	$W \cdot m^{-2} (\pm)$
Klimatické a sněhové charakteristiky	Celkové množství srážek	P _{celk}	mm
	Intenzita srážek	O _{int}	$mm \cdot h^{-1}$
	Faktor tání (neboli degree-day factor) - úbytek vodní hodnoty sněhu při změně průměrné denní teploty vzduchu o 1 °C nad kritickou teplotu	Mf	$mm \cdot ^\circ C^{-1} \cdot d^{-1}$
	Hustota sněhu	Hustota	$kg \cdot m^{-3}$
	Cold content - množství srážek potřebné k ohřátí sněhové pokrývky na 0 °C	CC	mm
	Objem kapalné vody ve sněhu	LWC	%
	Počáteční výška sněhové pokrývky	Poc_Vys	cm
	Úbytek vodní hodnoty sněhu (SWE) při tání	SWE	m
	Průměrná pozitivní teplota při trvání události ROS	AVG_T+	°C
	Doba trvání ROS	H_ROS	h
Odtokové charakteristiky	Odtokový koeficient – poměr odtokové výšky k celkovým srážkám	C	-
	Zpoždění odtoku - zpoždění kulminace průtoku od příčinných srážek	LT	h
	Odtoková výška – vztažena k ploše povodí	Ho	mm
	Doba trvání příčinného odtoku události ROS	H_Q	h

Pro každou událost ROS byly z naměřených dat dopočítány složky energetické bilance a zároveň sněhové, klimatické a odtokové charakteristiky nezbytné pro provedení analýz. Všechny tyto prvky shrnuje Tabulka 1. Analýzy a výsledné grafické výstupy byly vytvořeny v prostředí MS Excel (verze 2016) a R (verze 4.2.1).

4 Výsledky

4.1 Rozložení událostí ROS



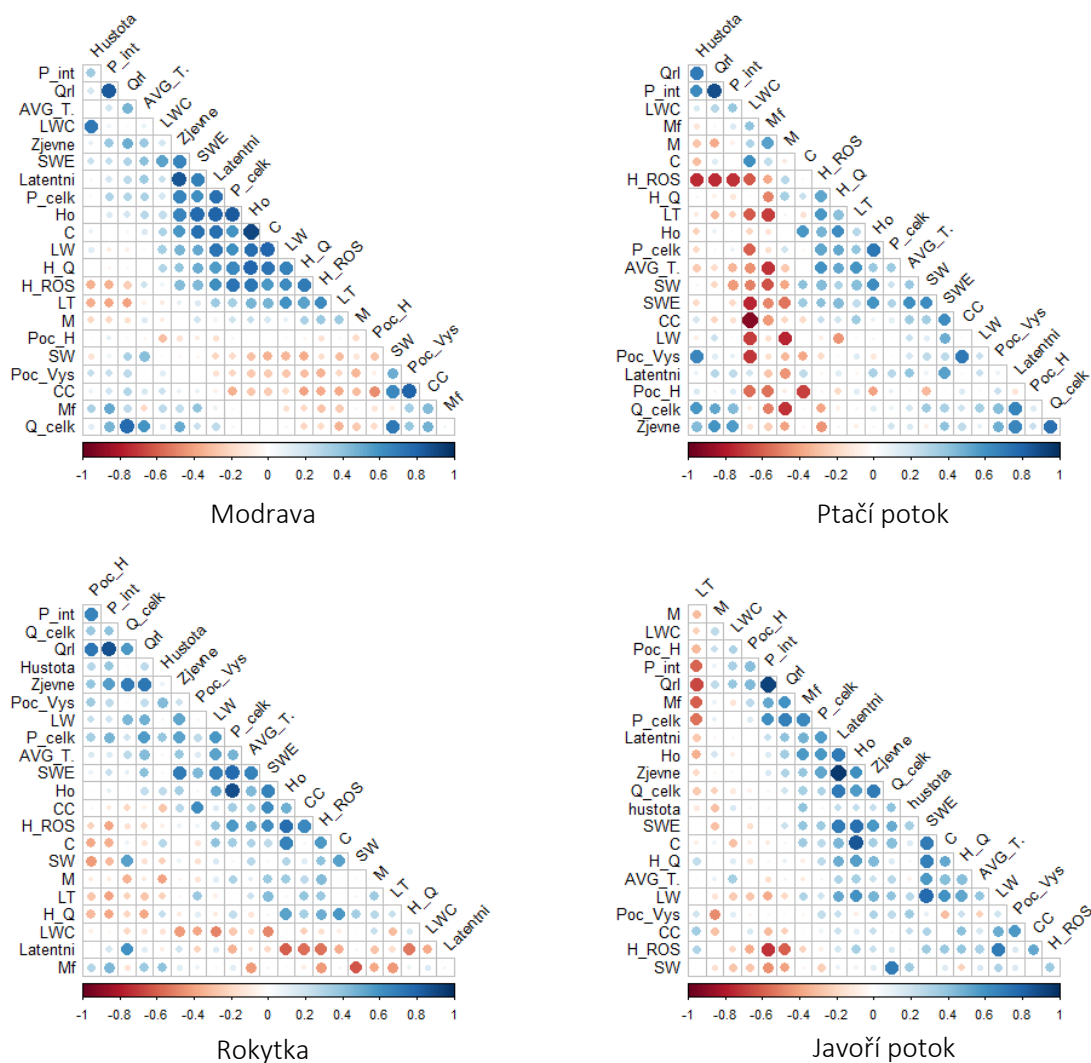
Obrázek 2: Četnost výskytu ROS v jednotlivých měsících a doba trvání ROS u pozorovaných stanic (v každém boxplotu vyznačen medián)

Na základě definice ROS, bylo v zájmovém území pramenné oblasti Vydry vybráno celkem 105 událostí ROS. Jejich rozložení a dobu trvání shrnuje Obr. 2. Nejvíce událostí ROS, celkem 49, bylo zjištěno na stanici Modrava, z důvodů nejdelší dostupné řady mezi lety 2013-2020. U ostatních stanic byl počet událostí ROS velice podobný. Na Javořím potoce bylo vybráno 21 událostí, na Rokytce celkem 20 a nejméně, 15 událostí ROS, na stanici Ptačí potok. Z měsíčního hlediska proběhlo nejvíce událostí v únoru (celkem 35), následovaný čtenými měsíci březen (25), prosinec (21) a leden (18). V listopadu a květnu byly události ROS zjištěny jen výjimečně. Jejich počet v těchto měsících činil pouze 7, resp. 3 události. Doba trvání vybraných událostí ROS se pohybovala od 3 do 62 hodin. V průměru všech stanic trvala okolo 16 hodin, přičemž 80 % všech událostí ROS netrvalo déle než jeden den, více jak 90 % poté déle než 30 hodin.

4.2 Korelační matice charakteristik ROS

Pro všechny odvozené a vypočítané charakteristiky uvedené v Tabulce 1, byly vytvořena korelační matice pomocí Spearmanova koeficientu pořadové korelace, který je více robustní vůči odlehlým hodnotám. Ten nabývá hodnot od -1 do 1, přičemž čím vyšší hodnota, tím vyšší závislost mezi pozorovanými proměnnými. Napříč všemi stanicemi byly zjištěny nejvyšší korelace u stanic na Modravě a Ptačím potoce (Obr. 3). Především poté jednotlivé energetické toky na celkovou dostupnou energii pro tání sněhu, kdy na stanici na stanici na Modravě dosahuje energie srážek korelačního koeficientu 0,78, na stanici Ptačí potok poté energie zjevného a latentního tepla koeficientu 0,76, resp.

0,67. Na stanici na Javořím potoce i Rokytce korelují nejvíce s celkovou dostupnou energií taktéž toky turbulentní, kdy dosahují korelačního koeficientu okolo 0,7. Kromě jednotlivých energetických toků se korelace mezi dvěma stejnými proměnnými napříč stanicemi výrazně liší. Výjimku tvoří očekávané závislosti, jako např. vliv celkového množství srážek na odtokovou výšku či počáteční výška sněhové pokrývky na cold content. Ačkoliv můžeme z vypočítaných matic odvodit řadu silných a zajímavých korelací, při událostech ROS hraje roli hned několik faktorů najednou a pro pochopení jejich vlivu na následný odtok je nezbytné jednotlivé události analyzovat komplexněji (do závěru).

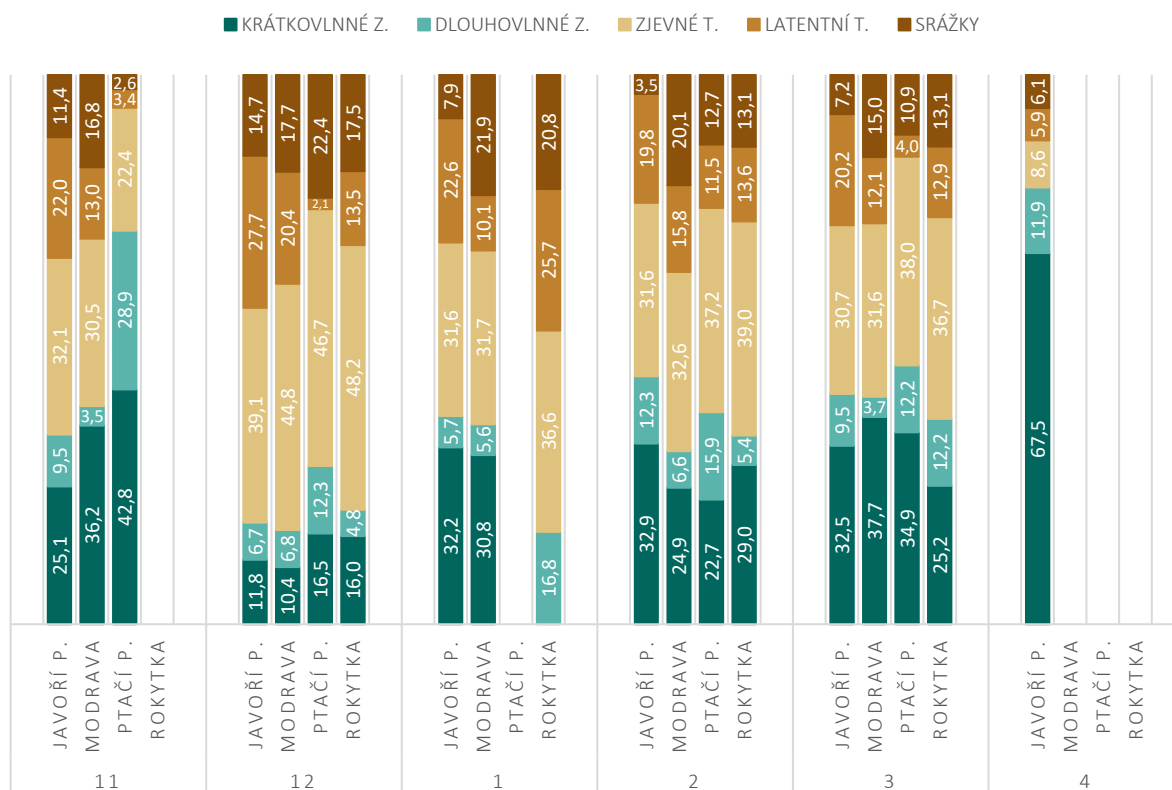


Obrázek 3: Korelační matice vybraných charakteristik událostí ROS pro jednotlivé stanice

4.3 Energetická bilance

U všech stanic k celkové energetické bilanci přispívalo nejvíce krátkovlnné záření a zjevné teplo, jejichž průměrná energie kolísala v závislosti na jednotlivých měsících okolo 10 až 15 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, výjimečně dosahovala až lehce přes 20 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$. Latentní teplo a energie dodaná srážkami pak nepřesahovala 10 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, přičemž energie latentního tepla dosahovala v několika málo případech i záporných hodnot. Energie dlouhovlnného záření pak přispívala k celkové bilanci nejméně, kdy

zpravidla nepřesahovala $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Celková měsíční průměrná energie je u všech stanice velice podobná, kdy se v průměru pohybuje přibližně okolo $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.



Obrázek 4: Procentuální zastoupení jednotlivých energetických toků z měsíčních průměrů pro sledované stanice

U všech stanic lze pozorovat stejný trend průběhu měsíční průměrné energie krátkovlnného záření, jejíž hodnota nejprve mírně klesne v období z listopadu na prosinec, ovšem v dalších měsících má již pouze vzestupnou tendenci. Významnou roli v celkové bilanci hrají turbulentní toky, především pak zjevné teplo. Jeho průběh v jednotlivých měsících byl podobný krátkovlnnému záření s výjimkou prosince, kdy tvořil až téměř 50 % z celkové dostupné energie u všech stanic kromě stanice na Javořím potoce (Obr. 4). I v dalších měsících tvořil více než 30 % z celkové bilance, kdy jedinou výjimkou byl listopad na stanici na Ptačím potoce a jediná událost z dubna na stanici na Javořím potoce. S latentním teplem pak ve stejném období tvořil v průměru minimálně 40 % z celkové energie, v prosinci (až na stanici na Ptačí potok) dokonce přesahoval 60 %, což jen dokládá významnost turbulentních toků při událostech ROS.

U energie dodané kapalnými srážkami nelze sledovat jednoznačný trend v průběhu jednotlivých měsíců. Ovšem to neznamená, že by hrála zanedbatelnou roli v celkové energetické bilanci. U všech stanic tvořila minimálně 10 % z celkové energie, největších hodnot pak dosahovala v prosinci, a to v průměru až 18 %. Výjimkou byla především stanice na Javořím potoce, kde kromě listopadu a ledna nepřesahovala 10 %.

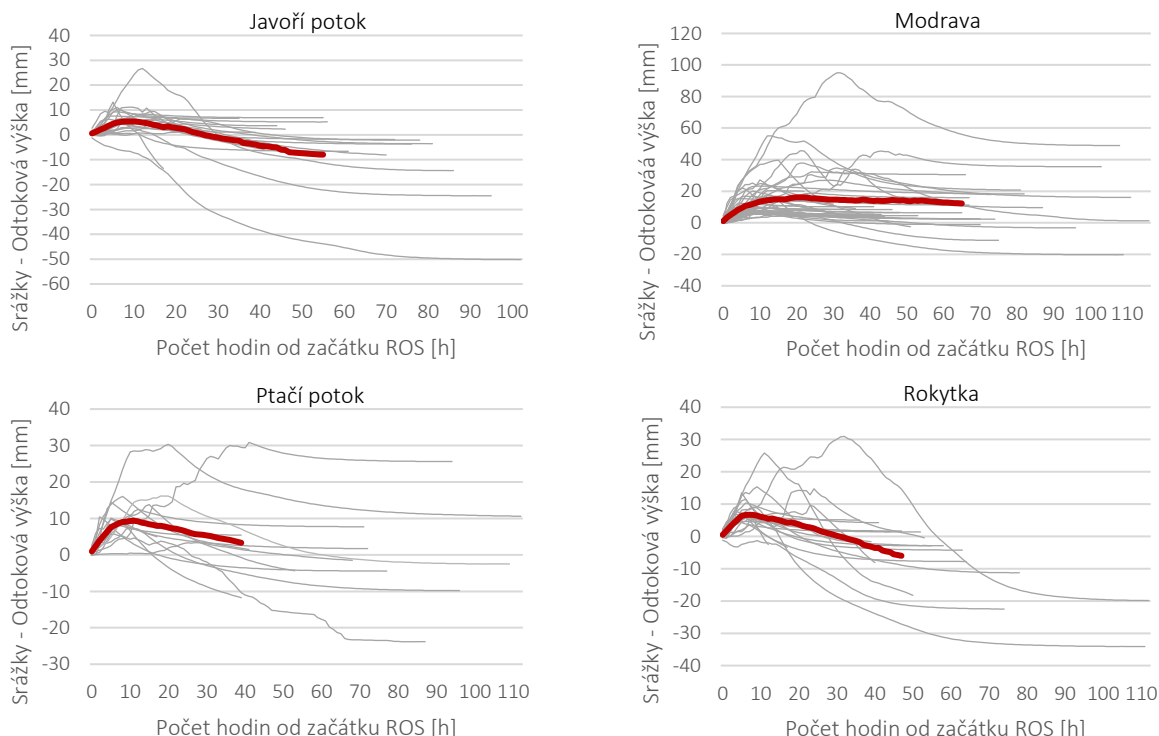
Dlouhovlnné záření pak tvořilo nejméně významnou složku energetické bilance při událostech ROS, kdy ve většině případů nedosahovalo více než 10 % z celkové bilance. Odlišné hodnoty vykazovala

stanice na Ptačím potoce, kdy v listopadu tvořila dlouhovlnná radiace hned druhou nejvýznamnější složku bilance, kdy dosahovala bezmála 30 % a i v dalším měsících byla důležitým energetickým tokem, neboť vždy dosahovala nejméně 12 %. Stejně jako u krátkovlnného záření, tak i zde byl zaznamenán postupný nárůst hodnot v měsíčním kroku, a to zejména u stanic na Javořím potoce a Rokytcce.

4.4 Odtokové charakteristiky

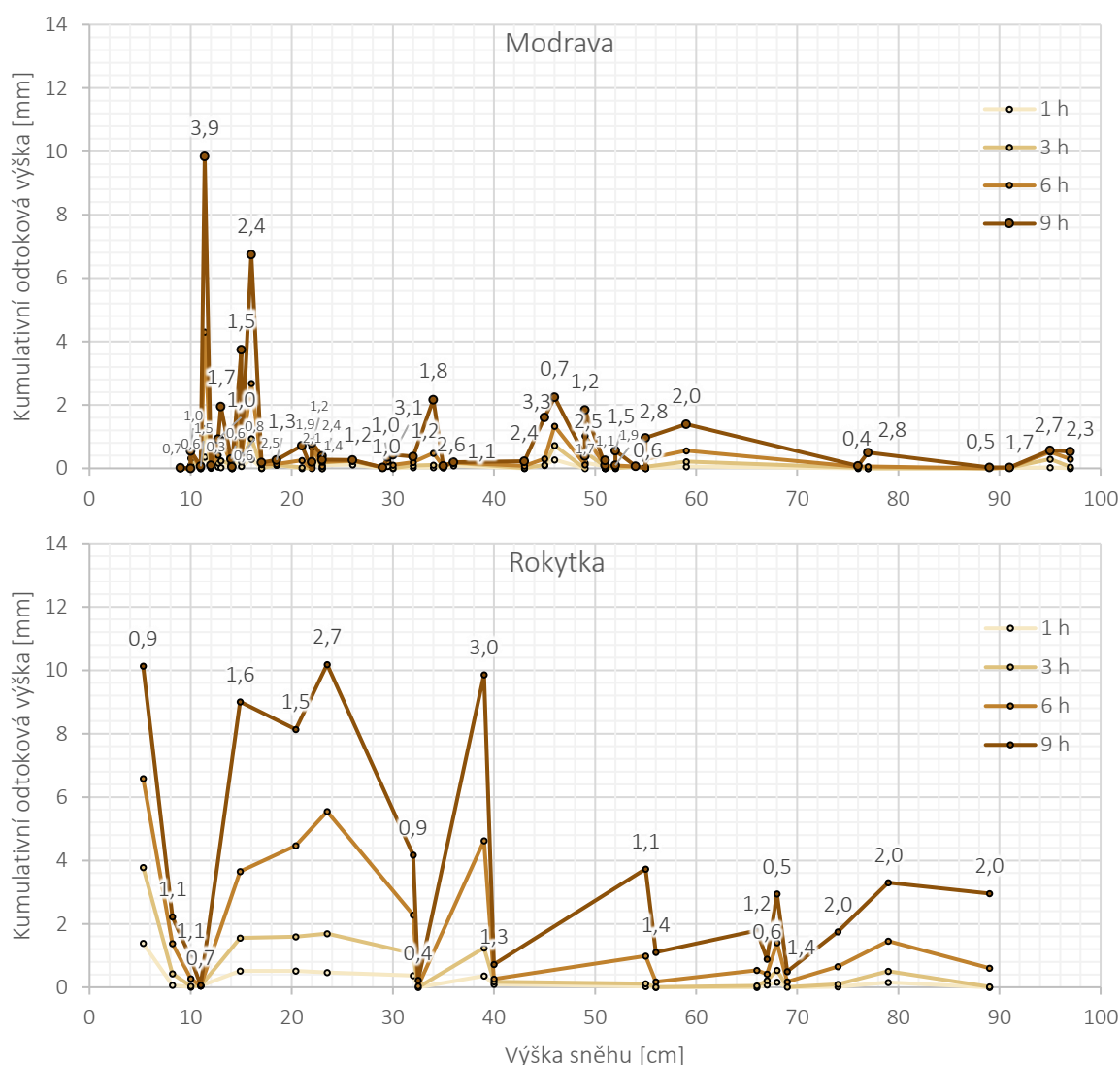
Jednou z nejdůležitějších otázek při zkoumání ROS je, jaké množství dešťových srážek sněhová pokrývka zadrží a jaký bude celkový odtok. Jedním ze způsobů, jak daný problém analyzovat, je výpočet rozdílu kumulativních srážek a kumulativní odtokové výšky v čase od začátku události ROS. Pokud ve výsledku převažují srážky nad odtokovou výškou, dochází k významnému zadržení srážek ve sněhové pokrývce. Když nastane opačná situace, převažuje při následném odtoku z povodí kombinace přírodních srážek a vody, která otekla ze sněhové pokrývky.

Při porovnání průběhu rozdílu srážek a odtokové výšky při událostech ROS na jednotlivých stanicích (Obr. 5) lze říci, že k nejvyšší převaze srážkových úhrnů došlo na Modravě, kde tento rozdíl dosahoval u velkého počtu událostí až 20 mm, ve dvou extrémních případech 60 mm, resp. až 120 mm. U dalších stanic se daný rozdíl pohyboval zhruba do 10 mm. Z průběhu červené křivky lze zjistit, po jaké době průměrně začíná převažovat kumulativní odtoková výška nad kumulativními srážkami. Ta se výrazněji odlišuje u stanice na Modravě, jenž se nachází v dolní části toku Roklanského potoka na rozdíl od ostatních stanic, které jsou lokalizovány v horních částech toku u pramenných oblastí. K dané změně poměru srážky/odtok tak v průměru na stanici na Modravě došlo až po 22 hodinách. U ostatních stanic tato změna nastala mnohem dříve, nejméně pak na stanici na Rokytcce, a to po 7 hodinách.



Obrázek 5: Rozdíl kumulativních srážek a odtokové výšky v závislosti na čase od začátku události ROS pro jednotlivé stanice. Červená křivka znázorňuje průměr ze všech časových řad.

Ačkoliv nebyla zjištěna závislost doby zpoždění odtoku na počáteční výšce sněhové pokrývky, lze pozorovat její tlumící efekt na průběh odtokové výšky v průběhu události ROS. Na příkladu stanic na Modravě a Rokytce (Obr. 6) lze pozorovat vliv počáteční výšky sněhové pokrývky na kumulativní odtokovou výšku v 1, 3, 6 a 9 hodinách od začátku události ROS. U obou stanic je viditelný u většiny událostí ROS rychlejší nárůst příčinného odtoku u pokrývek, jejichž počáteční výška je nižší než 60 cm oproti pokrývkám s vyšší počáteční výškou. U těch se naopak odtok kumuluje pomaleji, což naznačuje, že se značná část dešťových srážek akumuluje ve sněhové pokrývce. Pro každou událost je navíc zobrazena její průměrná intenzita srážek. Lze tak pozorovat, že i při stejné či dokonce vyšší intenzitě srážek reaguje odtok pomaleji u vyšší pokrývky nežli u té nižší.



Obrázek 6: Kumulativní odtoková výška po 1, 3, 6 a 9 hodinách od začátku události deště na sněhovou pokrývkou v závislosti na počáteční výšce sněhu pro stanice na Modravě a Rokytce. Pro každou událost znázorněna její průměrná intenzita deště

U obou zobrazených stanic dosahovala sněhová pokrývky maximálně 100 cm a hodnoty kumulativního odtoku dosahovali po 9 hodinách od začátku deště maximálně 10 mm. Na Rokytce byla poté odtoková

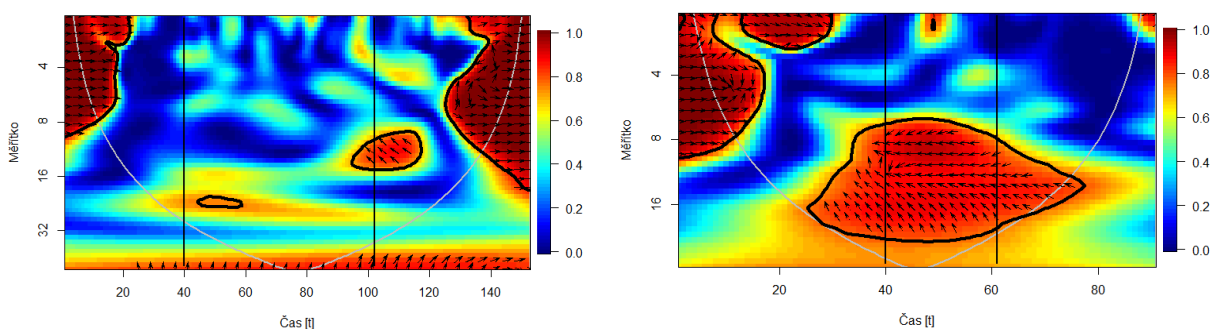
odezva ze všech stanic nejrychlejší. Pouze u nejnižších intenzit deště nebyla odezva téměř žádná, s vyšší intenzitou se u nižší pokrývky zvyšovala za každou hodinu o více jak 1 mm. S vyššími intenzitami deště u vyšších pokrývek už nebyla tato odezva tak rychlá, i tak při porovnání s ostatními stanicemi při intenzitě deště 2 mm/h reagovala velice rychle. Na Modravě poté trvala odtoková odezva ze všech stanic nejdéle. U nižší sněhové pokrývky bylo zapotřebí vysokých intenzit deště (nad 1,5 mm/h), aby kumulovaný odtok přesahoval po 9 hodinách od začátku deště alespoň 2 mm. U nízkých intenzit deště byl poté odtok i po 9 hodinách téměř zanedbatelný. Při výšce pokrývky nad 50 cm nedosahoval odtok po 6 hodinách ani při intenzitě deště přes 2 mm výšku jednoho milimetru.

4.5 Vlnková transformace srážkově významných událostí ROS

K zjištění míry zachycení srážek ve sněhové pokrývce při srážkově významných událostech ROS byla využita vlnková transformace, jenž je prostředkem k integrální transformaci signálu a poskytuje tak časově-frekvenční popis signálu. Obrázek 7 znázorňuje dvě odlišné situace, u kterých se zjišťuje vliv srážek na následný odtok. Barevná škála od 0 do 1 značí míru závislosti, šedá linie poté ohraničuje kužel vlivu, za kterým jsou po obou stranách oblasti, ve kterých dochází k chybám z důvodů diskontinuit ve vlnkové transformaci. Statisticky významné oblasti na 5% hladině významnosti ohraničuje černá linie. Černé šipky poté značí rozdílné fáze dvou zkoumaných časových řad. Každá z těchto šipek se odkazuje na určitý čas a časové měřítko.

Při události ROS v listopadu dopadlo za 62 hodin na sněhovou pokrývku o výšce 40 cm celkem 80,9 mm srážek o intenzitě 1,3 mm. Celá pokrývka po 85 hodinách od začátku deště kompletně roztála. Na příčinném odtoku se podíleli jak samotné dešťové srážky, tak voda ze sněhové pokrývky. Dle vlnkové transformace nebyla po celou dobu události ROS žádná významná závislost mezi dvěma proměnnými, pouze zhruba v posledních 5 hodinách lze sledovat menší vliv, při kterém šipky směřují nahoru doleva, což indikuje odtok řízený srážkami. Při události ROS z března dopadlo na sněhovou pokrývku o výšce 89 cm celkem 42,9 mm srážek o intenzitě 2,0 mm. U této události lze již naopak pozorovat významnou závislost srážek a odtoku z pokrývky, kdy je významná většina šipek okolo stejné oblasti měřítka v anti-fázi (směřují doleva), což naznačuje, že se srážky zachytili ve sněhové pokrývce a nepodílely se na příčinném odtoku. Sněhové pokrývka v tomto případě zcela neroztála.

V této studii sloužila vlnková transformace spíše k doplňující analýze extrémních událostí, které jsou z hlediska ROS asi tím nejzajímavějším prvkem, neboť právě z nich může docházet k významné odtokové odezvě, která může vést až k povodňovým situacím. Vytvořené vlnkové transformace poté především přispěly k pochopení dynamiky celého procesu při různých počátečních vlastnostech sněhové pokrývky.



Obrázek 7: Vlnkové transformace pro události ROS na stanici Rokytka v listopadu (vlevo) a březnu (vpravo); černé svislé linie označují začátek a konec události ROS

5 Závěr

Na základě dostupných měření meteorologických a hydrologických stanic v pramenné oblasti Vydry na Šumavě mezi lety 2013 a 2020 a z nich plynoucích následných analýz bylo zjištěno, že oproti tání sněhu za jasného počasí, jsou při událostech ROS mnohem významnějším zdrojem energie pro samotné tání toky turbulentní, především pak zjevné teplo. Turbulentní toky tvořily dle měsíčních průměrů téměř u všech zájmových stanic minimálně 40 %, v prosinci až 60 % z celkové dostupné energie pro tání sněhu. Důležitou složkou byla taktéž krátkovlnná radiace, jejíž poměr se zvyšoval s pokročilostí sezóny, kdy v březnu tvořila okolo 30–40 % z celkové dostupné energie. Nejnižší poměr průměrné měsíční energie k celkové dostupné energii tvořila dlouhovlnná radiace, která téměř u žádné ze stanic nepřesahovala 10 %. Teplo dodané srážkami se poté pohybovalo mezi 10 a 18 %. Významný vliv na zpoždění odtoku ze sněhové pokrývky hraje její výška. S ní se zároveň zvyšuje i následný příčinný odtok, uvažujeme-li podobné počáteční vlastnosti sněhové pokrývky. V rámci zkoumaných povodí se nejvíce liší charakter událostí ROS dle dat ze stanice na Modravě. Jako u jediné ze stanic zde průměrný rozdíl kumulovaných srážek ke kumulovanému odtoku neklesnul pod 0 mm a průměrná doba, po které začíná převažovat kumulovaný odtok nad kumulovanými srážkami, byla 22 hodin, čili dvojnásobně více než v pořadí dalšího povodí Ptačího potoka.

6. Zdroje

Blahušiaková, A. et al. 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, 12, 1–14

Blöschl, G. et al. 2019: *Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)—a community perspective*. Hydrological Sciences Journal, 10, 64, 1141–1158

Estilow, T. W., A. H. Young, D. A. Robinson, 2015: *A long-term Northern Hemisphere snow cover extent data record for climate studies and monitoring*. Earth System Science Data, 1, 7, 137–142

Hock, R. et al. 2022: *High Mountain Areas*. In: *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Cambridge University Press, 131–202

Jennings, K., J. A. Jones 2015: *Precipitation-snowmelt timing and snowmelt augmentation of large peak flow events, western Cascades, Oregon*. Water Resources Research, 9, 51, 7649–7661

Jennings, K. S. N. P. Molotch 2020: *Snowfall Fraction, Cold Content, and Energy Balance Changes Drive Differential Response to Simulated Warming in an Alpine and Subalpine Snowpack*. Frontiers in Earth Science, June, 8, 1–16

Kocum, J. 2012: *Tvorba odtoku a jeho dynamika v pramenné oblasti Vydry*. Disertační práce. Univerzita Karlova, Praha, 208 s.

Marks, D., J. Kimball, D. Tingey, T. Link 1998: *The sensitivity of snowmelt processes to climate conditions and forest during rain on snow (SNOBAL)*. Hydrological Processes, 1587, 1569–1587

Pall, P., L. M. Tallaksen, F. Stordal 2019: *A climatology of rain-on-snow events for Norway*. Journal of Climate, 20, 32, 6995–7016

Sezen, C., M. Šraj, A. Medved, N. Bezak 2020: *Investigation of rain-on-snow floods under climate change*. Applied Sciences (Switzerland), 4, 10.

Surfleet, C. G., D. Tullos 2013: *Variability in effect of climate change on rain-on-snow peak flow events in a temperate climate*. Journal of Hydrology, 479, 24–34

Würzer, S., T. Jonas, N. Wever, M. Lehning 2016: *Influence of initial snowpack properties on runoff formation during rain-on-snow events*. Journal of Hydrometeorology, 6, 17, 1801–1815