První konference PERUN

Prediction, Evaluation and Research for Understanding National sensitivity and impacts of drought and climate change for Czechia (SS02030040)

První konference PERUN

Sborník příspěvků

16.–18. října 2023

Praha, Průhonice (Vzdělávací a informační centrum Floret)

Česká geologická služba (ČGS)

Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ)

Matematickofyzikální fakulta Univerzity Karlovy (MFF)

PROGEO, s.r.o. (PROGEO)

Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy (PřF)

Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i. (ÚVGZ)

Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i. (ÚFA)

Výzkumný ústav vodohospodářský, v. v. i. (VÚV)

Recenze: Jan Brus
Pavol Nejedlík

Editace: Eliška Polcarová
Radim Tolasz

Projekt je podpořen Technologickou agenturou České republiky (TA ČR) a je garantován Ministerstvem životního prostředí České republiky.

Tento projekt je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Centra kompetence.
www.tacr.cz
Výzkum užitečný pro společnost.

Za věcnou a jazykovou správnost příspěvků odpovídají autoři.

Texty neprošly redakční úpravou.

Slovo úvodem

Řešení projektu PERUN (*Prediction, Evaluation and Research for Understanding National sensitivity and impacts of drought and climate change for Czechia*) jsme zahájili v docela nepříznivé době časů „covidových“ v červenci 2020. I přes nepříznivé okolnosti spojené s různými covidovými opatřeními a omezeními se projekt dobře rozběhl a po prvních třech letech můžeme opatrně bilancovat. Řešitelé připravili pět průběžných výzkumných zpráv, publikovali již 29 odborných článků v recenzovaných časopisech, prezentovali první průběžné výsledky na desítkách odborných konferencí a poskytli základní informace, popřípadě komentovali události spojené se změnou klimatu v mnoha mediálních vystoupeních.
V říjnu 2021 jsme se sešli na prvním interním projektovém semináři v hotelu Klášter Želiv. Tento v podstatě zahajovací seminář byl plný různých oficialit, ale také jsme si utřídili obsah celého projektu a navzájem se seznámili s celou jeho šíří. Druhý seminář proběhl v říjnu 2022 v hotelu Jezerka u Sečské přehrady. Byl také interní, ale již zaměřený na první výsledky a expertní diskuse. V polovině projektu, jehož řešení máme naplánováno do prosince 2026, se setkáváme ve Vzdělávacím a informačním centru Floret v Průhonicích u Prahy na První konferenci projektu PERUN. Konferenci, která je otevřená i expertům z jiných organizací a jsem rád, že se o své zkušenosti z oblasti výzkumu změny klimatu s námi podělí i kolegové ze Slovenského hydrometeorologického ústavu.

Konference se zúčastnilo 72 zájemců a zájemkyň o klimatologii, hydrologii a změnu klimatu, 11 účastníků není součástí řešitelských týmů projektu PERUN. Předneseno bylo 25 odborných přednášek a 12 prezentací bylo vystaveno v jednacím sále ve formě posterů. Sborník je pěkným shrnutím aktuálního stavu řešení projektu PERUN i obecného pohledu na řešenou problematiku.

Věřím, že se nám na první konferenci projektu PERUN podaří rozšířit a zkvalitnit vzájemnou spolupráci a získat i zpětnou vazbu od účastníků, kteří nejsou řešiteli projektu.

V Ostravě 6. listopadu 2023

RNDr. Radim Tolasz, Ph.D., hlavní řešitel projektu PERUN

Praha 2023

© Český hydrometeorologický ústav, Radim Tolasz a Eliška Polcarová (ed.)

ISBN 978-80-7653-063-8

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8

Obsah

Slovo úvodem 4

Obsah 5

Blok 1 – modelování, validace, scénáře změny klimatu, sezónní predikce 7

Romana Beranová, Zuzana Rulfová, Zbyněk Sokol
Validace reanalýzy pro střední Evropu PERUN/Reanalysis 7

Vojtěch Bližňák, Petr Zacharov
Hodnocení úhrnů srážek simulovaných atmosférickou reanalýzou ALADIN/PERUN ve vysokém prostorovém rozlišení 15

Tomáš Halenka, Eva Holtanová
Scénáře změny klimatu 27

Eva Holtanová, Tomáš Halenka
Hodnocení nejistoty připravovaných scénářů změny klimatu 34

Stanislava Kliegrová, Michal Belda, Ladislav Metelka, Petr Štěpánek
Dlouhodobá předpověď teploty vzduchu a srážek pro letní měsíce v České republice 40

Ján Mašek
Klimatická konfigurácia modelu ALADIN na ČHMÚ 45

Marta Martínková
Odstraňování systematických chyb výstupů z regionálních klimatických modelů: statistické transformace řad atmosférických srážek z modelu ALADIN v projektu PERUN 53

David Němec
Vývoj schématu mikrofyziky v modelu ALADIN 59

Milan Onderka
Scenáre budúceho vývoja subdenných intenzít atmosférických zrážok na Slovensku 66

Petr Zacharov, Radmila Brožková, Daniela Řezáčová
Srážky podle PERUNa 70

Petr Zacharov, Martin Vokoun
Charakteristiky konvektivního prostředí v reanalýze ALADIN 76

Blok 2 – rizika hydrometeorologických jevů, dopady změny klimatu, biometeorologické aspekty, návrhové srážky 82

Martin Dubrovský, Petr Štěpánek, Jan Meitner, Pavel Zahradníček
Stochastické meteorologické generátory a regionální klimatické modely: konkurence či spojenci? 82

Lenka Crhová
Měření krátkodobých srážek a časové změny v jejich charakteristikách 91

Michal Jeníček, Ondřej Nedělčev, Radovan Tyl, Ondřej Ledvinka, Václav Vajskebr, Jan Unucka, Petr Šercl, Jana Bernsteinová, Jakub Langhammer
CAMELS-CZ: Databáze atributů povodí pro hydrologické a klimatologické studie na velkém vzorku malých povodí 99

Marek Kašpar, Miloslav Müller

Vyhodnocení plošné extremity extrémních povětrnostních událostí v Česku v období 1961–2020 ..... **106**

Zbyněk Sokol, Daniela Řezáčová
Změna rozdělení srážek při růstu teploty vyjádřená v diagnostických a prognostických datech **112**

Kristína Szabóová
Number of Sultry Days in the Territory of Slovakia **123**

Radim Tolasz, Veronika Šustková
Rajonizace kategorií vybraných hydrometeorologických rizik **139**

Anna Valeriánová
Změny v četnosti výskytu a intenzity vybraných extrémních meteorologických jevů vedoucích k rizikům na území ČR mezi obdobím 1961–1990 a 1991–2020. ..... **144**

Radek Vlnas
Detekce trendu v časových řadách hydrometeorologických veličin: vizuální dojmy a statistické poznatky **152**

Blok 3 – řízení a plány pro sucho, jeho monitoring a varovný systém, metodiky a zákonná omezení, vodoprávní řízení, přírodní zdroje a modely podzemní vody, změna zdrojů povrchové a zásob podzemní vody, hydro extrémy, hydrologická bilance **162**

Jan Baier, Martin Milický
Využití modelů transientního proudění podzemní vody k hodnocení vývoje zásob podzemní vody v průběhu suchých period v prostoru terciérních a křídových sedimentů jihočeských pánví a pravostranných přítoků Labe **162**

Ondřej Ledvinka, Anna Lamačová
Změny ve vydatnosti pramenů na území Česka v letech 1971–2020 ..... **175**

Miloslav Müller, Marek Kašpar, Filip Hulec
Plošné návrhové srážky v českých povodích **179**

Ondřej Nol, Martin Zrzavecký
Historický vývoj hladin podzemní vody ve vybraných oblastech **184**

Martin Pecha, Radek Čekal
Zahájení provozu Informačního systému o stavu a vývoji sucha na území České republiky **193**

Jaroslava Slavková
Porovnanie indexov sucha SPEI s 3 rôznymi štatistickými rozdeleniami na základe meteorologických údajov zo Slovensku **201**

Petr Šercl, Vojtěch Svoboda
Analýza plošných 1denních sezónních srážkových maxim na základě rastrů interpolovaných denních hodnot srážek **212**

Veronika Šustková, Šimon Bercha, Jan Jirák
Longterm Changes and Future of Snow in the Czech Republic **220**

Adam Vizina, Petr Pavlík, Irina Georgievová, Martin Hanel, Martina Peláková, Eva Melišová
Výstražné informace a místní směrodatné limity v systému HAMR **236**

Blok 4 – kvalita povrchových vod, rizika v krajině, uhlíkový cyklus a emise **242**

Kateřina Fraindová, Milada Matoušková, Zdeněk Kliment

Water quality trends and concentration-discharge changes during different rainfall-runoff conditions in headwaters – Blanice River case study 242

Petra Havlíková, Anna Pavlíková
Vliv změn srážko-odtokového režimu na kvalitu vody vybraných toků v povodí řeky Sázavy 247

Vít Kodeš, Markéta Ackermanová
Výsledky pasivního vzorkování vod, organické mikropolutanty..... 261

Kateřina Fraindová, Milada Matoušková, Zdeněk Kliment, Lukáš Vlček, Vojtěch Vlach, Lucie Šajnarová
Dynamics of surface water quality changes in model headwater areas of the Czech Republic 269

Milada Matoušková, Kateřina Fraindová, Marie Bejčková, Zdeněk Kliment, Vojtěch Vlach, Lukáš Vlček
Dynamics of dissolved organic carbon in surface water during extreme rainfall-runoff events..... 281

Tomáš Mičaník, Silvie Semrádová, František Sýkora
Změny dílčích parametrů jakosti povrchových vod v kontextu změny klimatu 288

Blok 1 – modelování, validace, scénáře změny klimatu, sezónní predikce

Validace reanalýzy pro střední Evropu PERUN/Reanalysis
(Validation of reanalysis for Central Europe PERUN/Reanalysis)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.01

Romana Beranová, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., rber@ufa.cas.cz
Zuzana Rulfová, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., rulfova@ufa.cas.cz
Zbyněk Sokol, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., sokol@ufa.cas.cz

Abstrakt: Regionální reanalýza PERUN/Reanalysis je založena na numerickém předpovědním modelu ALADIN, který byl upraven pro klimatologické výpočty. Aby mohla sloužit jako jeden z referenčních setů pro odhady očekávaných změn klimatu v následujících desetiletích, je potřeba ji validovat vůči staničním měřením, případně i vůči jiným běžně používaným datovým souborům. V tomto konferenčním příspěvku se podíváme na validace základních meteorologických veličin na celé výpočetní doméně modelu ALADIN. Použijeme k tomu staniční data z databáze ECA&D, staniční data v pravidelné síti Eobs a globální reanalýzu ERA5. Validace bude provedena pro období 1990–2014. Při validaci se budeme soustředit zejména na teplotu vzduchu (minimální, maximální a průměrnou) a srážky, ale podíváme se i na další veličiny jako je například rychlost větru.

Klíčová slova: numerický model předpovědi počasí – reanalýza – validace

Abstract: PERUN/Reanalysis is based on the ALADIN numerical forecast model, which has been adapted for climatological calculations. To serve as one of the reference sets for estimating expected climate changes in the coming decades, it needs to undergo validation against station measurements and possibly against other commonly used data sets. In this conference paper, we will examine the validation of basic meteorological quantities across the computational domain of the ALADIN model. To achieve this, we will use station data from the ECA&D database, station data in the regular network (Eobs), and the ERA5 global reanalysis. Validation will be conducted for the period from 1990 to 2014. During validation, our primary focus will be on air temperature (minimum, maximum, and mean) and precipitation. We will also examine additional variables, including wind speed.

Keywords: NWP model – reanalysis – validation

1. Úvod

Reanalýzy jsou v současnosti běžným nástrojem pro sledování stavu atmosféry a vývoje klimatu. Reanalýzy jsou vytvářeny prostřednictvím numerického předpovědního modelu, do kterého v pravidelných intervalech (6 až 12 hodin) vstupují všechna dostupná pozorovaná data v procesu tzv. asimilace. Tímto způsobem lze simulovat různé charakteristiky, které nejsou přímo měřeny. Proto reanalýzy poskytují více informací, než lze získat ze samotných staničních dat. Simulovaná pole meteorologických prvků mají pravidelnou prostorovou síť a jsou vzájemně propojena jak horizontálně, tak vertikálně. Důležitým rysem je, že výsledná data jsou získávána jednotným postupem a často, ale ne vždy, za použití stejných typů

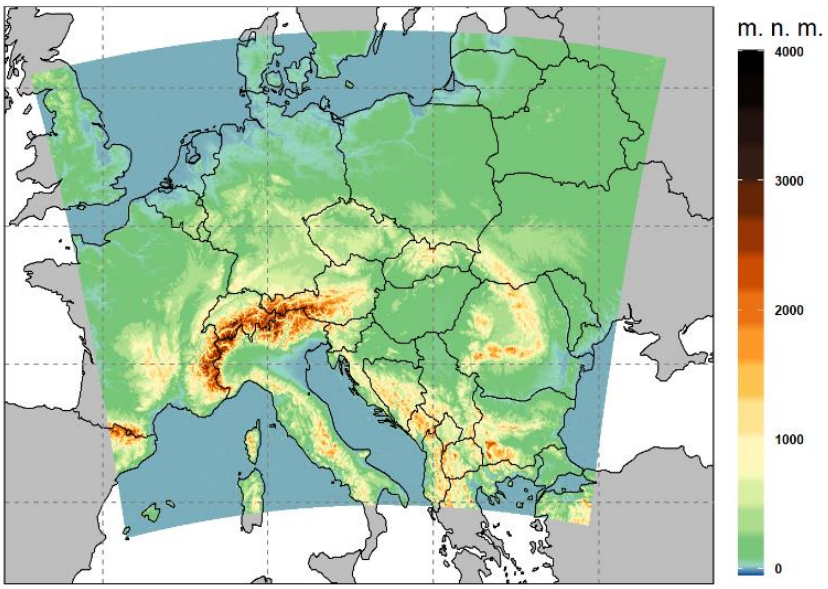
vstupních dat. Reanalýzy lze také využít pro validaci předpovědních metod a předpovědí získaných numerickým předpovědním modelem počasí (NWP) a pro kalibraci těchto modelů.

V současnosti existuje celá řada reanalýz, které se liší prostorovým rozlišením a geografickou oblastí, kterou svými daty pokrývají. Bez ohledu na rostoucí výpočetní výkon superpočítačů je příprava globálních reanalýz časově velmi náročná a naráží i na jiná technická omezení. Proto se pomocí modelů NWP s omezenou oblastí (LAM) vytvářejí regionální reanalýzy, které se zaměřují na určitou omezenou oblast a mají mnohem vyšší rozlišení (jednotky km) a kratší časový krok (1 h) než globální reanalýzy. LAM modely využívají podrobnější fyzikální parametrizace včetně detailní mikrofyziky a popisu konvekce. Tyto modely mají větší šanci dobře modelovat extrémy počasí a proměnné v blízkosti povrchu, které jsou potřebné pro hodnocení možného vlivu vývoje klimatu.

Tato studie má za cíl ověřit kvalitu reanalýzy PERUN/Reanalysis, která byla vytvořena pomocí LAM modelu ALADIN-CLIMAT/CZ s vysokým rozlišením. Hlavní motivací tohoto výzkumu je posouzení přesnosti této reanalýzy, protože má být využita k hodnocení aktuálního stavu klimatu a k interpretaci scénářů změny klimatu v oblasti střední Evropy.

2. Model ALADIN-CLIMAT/CZ

Model ALADIN-CLIM-CZ použitý pro reanalýzu, je založen na kanonické konfiguraci ALARO, která je popsána v publikaci Termonia et al., 2018. Prostorové rozlišení modelu je přibližně 2,3x2,3 km, model má 87 vertikálních úrovní, přičemž nejvyšší hladina je asi 53 km nad zemí. Model využívá plně elastické nehydrostatické dynamické jádro a patří do tzv. konvekčních modelů, což znamená, že hluboká konvekce je modelem částečně zachycena, ale ještě není plně vyřešena (Gerard et al. 2009). Výpočetní doména modelu pokrývá téměř celou Evropu kromě Středomoří, Skandinávie a východní Evropy (obr. 1). Jádrem reanalýzy je 6hodinový asimilační cyklus, kde je hlavní pozornost zaměřena na analýzu povrchu. Počáteční podmínky horní atmosféry jsou vytvářeny metodou Digital Filter Blending (Brožková et al. 2006) a pro přípravu okrajových podmínek je použita globální reanalýza ERA5.



Obr. 1 Výpočetní doména a orografie modelu ALADIN-CLIMAT/CZ.
Fig. 1 Computational domain and orography of the ALADIN-CLIMAT/CZ model.

3. Data a metody validace

Validaci reanalýzy PERUN/Reanalysis byla provedena pro období 1990–2014. Zaměřili jsme se na validaci několika základních meteorologických veličin a dále na některé často používané odvozené charakteristiky jako je počet letních dní nebo počet dní se silnými srážkami. V tomto příspěvku se zaměříme pouze na některé z nich: denní průměrnou teplota vzduchu ve 2 m, denní minimální a maximální teplotu, úhrn srážek, relativní vlhkost a průměrnou denní rychlost větru. Jelikož data z modelu jsou ukládána v hodinovém kroku, museli jsme je nejprve přepočítat na denní hodnoty. Validace probíhala na celé modelové doméně a analyzovali jsme měsíční, sezónní a roční průměry jednotlivých veličin. V případě srážek jsme validovali sumy za dané období. V tomto příspěvku ukážeme výsledky průměrované za celé roční období.

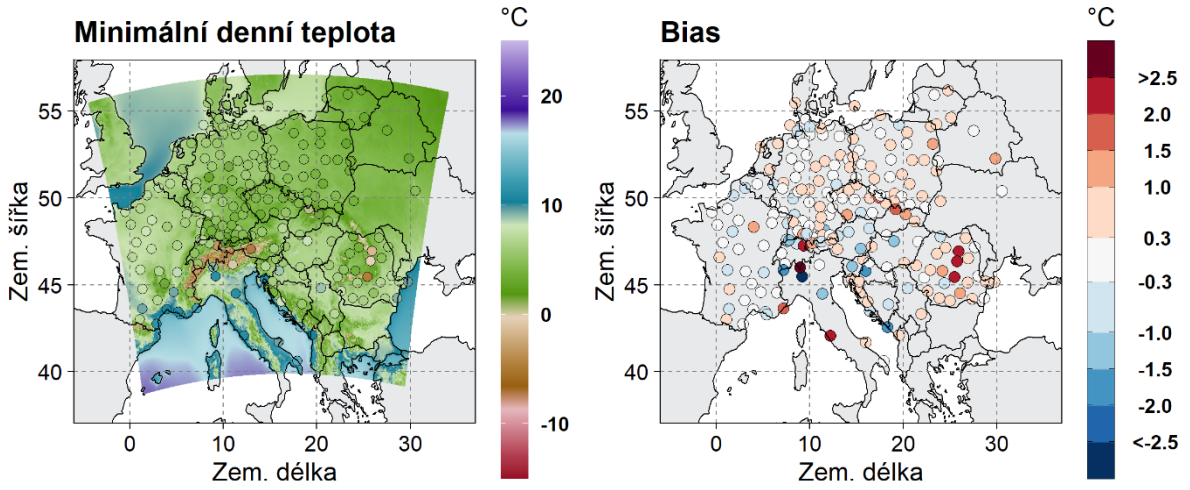
Data z PERUN/Reanalysis jsme porovnávali s globální reanalýzou ERA5 (Hersbach et al. 2020), regionální reanalýzou CERRA (Schimanke et al. 2021) a s denními pozorovanými daty v pravidelné síti tzv. Eobs (Cornes et al. 2018). Avšak hlavní důraz jsme kladli na porovnání s naměřenými hodnotami na evropských stanicích. Důvodem bylo to, že zmíněné datové soubory mají horší rozlišení než výstupy našeho modelu a cílem validace bylo posouzení, jak je model schopen simulovat reálná naměřená data na stanicích.

Stanice, které byly použity pro porovnání pocházejí z databáze ECA&D (European Climate Assessment & Dataset) a byly doplněny několika stanicemi ze sítě ČHMÚ. Stanice jsme vybrali tak, aby měly alespoň 15 let měření v rámci období 1990–2014 a zároveň aby byly přibližně rovnoměrně rozmístěny v modelové oblasti. Staniční data prošla kontrolou kvality. Ukázalo se, že počet stanic splňujících uvedené podmínky, je omezený. Malý počet stanic je k dispozici pro měření rychlosti větru nebo vlhkosti. V některých oblastech (například ve východní Evropě nebo v Itálii), se nám nepodařilo získat žádná data. Je třeba poznamenat, že soubor použitých stanic pro validaci se liší pro jednotlivé proměnné. Důležité je, že máme velmi dobře pokrytu oblast střední Evropy, která nás nejvíce zajímá.

Pro ohodnocení shody mezi reanalýzou a staničními daty používáme střední chybu, označovanou také jako bias. Střední chyba je vypočtena jako průměrný rozdíl mezi denními hodnotami reanalýzy a stanice ($Xrea - Xst$). V případě srážek používáme relativní chybu vypočtenou jako poměr $Xrea/Xst$. Vždy bereme hodnotu nejbližšího uzlového bodu modelu k dané stanici. Vzhledem k rozlišení modelu je největší vzdálenost mezi stanicí a nejbližším uzlovým bodem 1,3 km, ale ve většině případů je menší než 1 km. V rovinatém terénu je tento postup bezproblémový, avšak v horských oblastech může být rozdíl v nadmořských výškách uzlu (modelová orografie) a stanice i několik set m (např. v oblasti rumunských Karpat). Výsledky v těchto bodech jsou pochopitelně zatíženy velkou systematickou chybou.

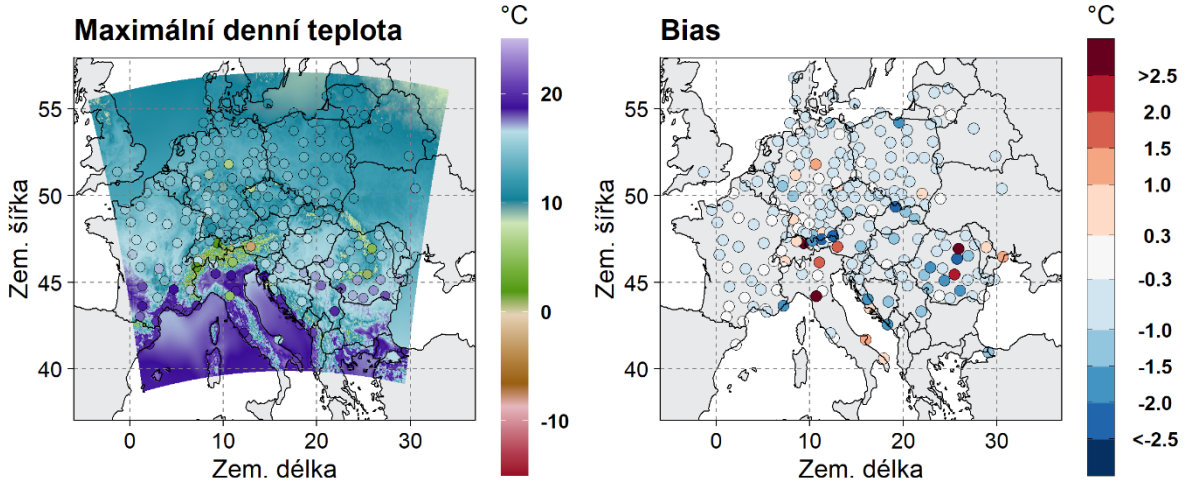
4. Výsledky

Obrázky 2 a 3 ukazují mapy průměrných ročních minimálních a maximálních teplot a střední chybu (bias) mezi reanalýzou a staničními měřeními za období 1990–2014. Pro validaci minimální a maximální teploty bylo použito 223 a 229 stanic. Z pravého panelu obr. 2 je zřejmé, že model obecně nadhodnocuje denní minimální teplotu a to v průměru o 0,22 ^{o}C. Naopak denní maximální teplota je v reanalýze podhodnocena a to v průměru o 0,41 ^{o}C (pravý panel obr. 3). Větší hodnoty biasu na některých stanicích lze vysvětlit umístěním stanic v orograficky členitém terénu, kde je velký rozdíl mezi modelovou nadmořskou výškou v nejbližším uzlu a skutečnou nadmořskou výškou stanice.



Obr. 2 Roční průměr denní minimální teploty v PERUN/reanalysis, hodnoty naměřené na stanicích jsou v kroužcích (vlevo) a průměrný rozdíl mezi hodnotou v reanalýze a na stanici (vpravo) za validační období 1990–2014.

Fig. 2 Annual average of daily minimum temperature in PERUN/reanalysis, the values measured at the stations are in circles (left) and the average difference between the reanalysis values and the station measurements (right) for the validation period 1990–2014.

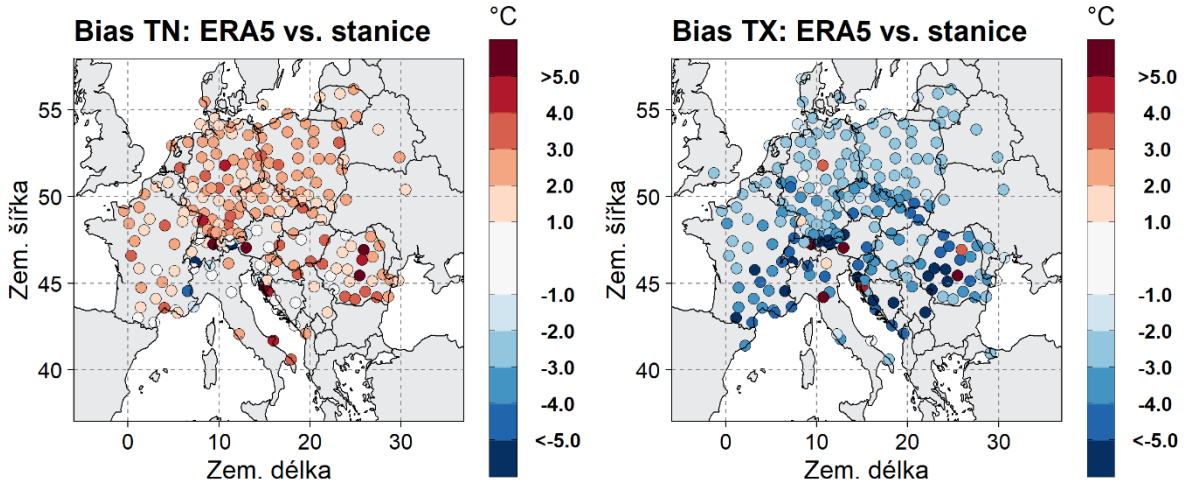


Obr. 3 Jako obr. 2, ale pro roční průměr denní maximální teploty.

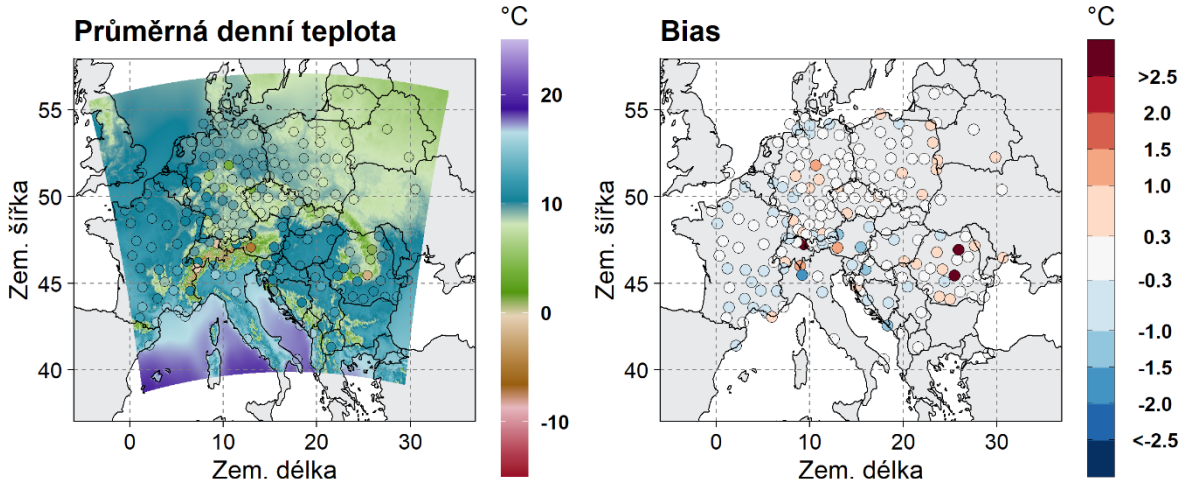
Fig. 3 As in Fig. 2, but for annual average of daily maximum temperature.

Na obr. 4 jsou pro zajímavost znázorněny rozdíly mezi teplotami v reanalýze ERA5 a teplotami na stanicích. Opět bereme nejbližší uzlový bod k dané stanici. Vzhledem k hrubému rozlišení reanalýzy ERA5 (0.25°) si musíme uvědomit, že hodnoty v jednotlivých uzlových bodech v ERA5 reprezentují plošný průměr a nikoli bodovou hodnotu jako na stanicích. Z toho důvodu jsou biasy v absolutní hodnotě větší v porovnání s PERUN/reanalysis. I v případě reanalýzy ERA5 dochází k nadhodnocení denní minimální teploty (v průměru o 2,1 °C) a podhodnocení denní maximální teploty (v průměru o 2,7 °C).

Obdobně jako jiné reanalýzy i PERUN/Reanalysis dává nejlepší výsledky pro průměrnou denní teplotu. Velká většina stanic má absolutní hodnotu střední chyby vůči staničním hodnotám menší než 1 °C a průměr přes 214 stanic je 0 °C (obr. 5).



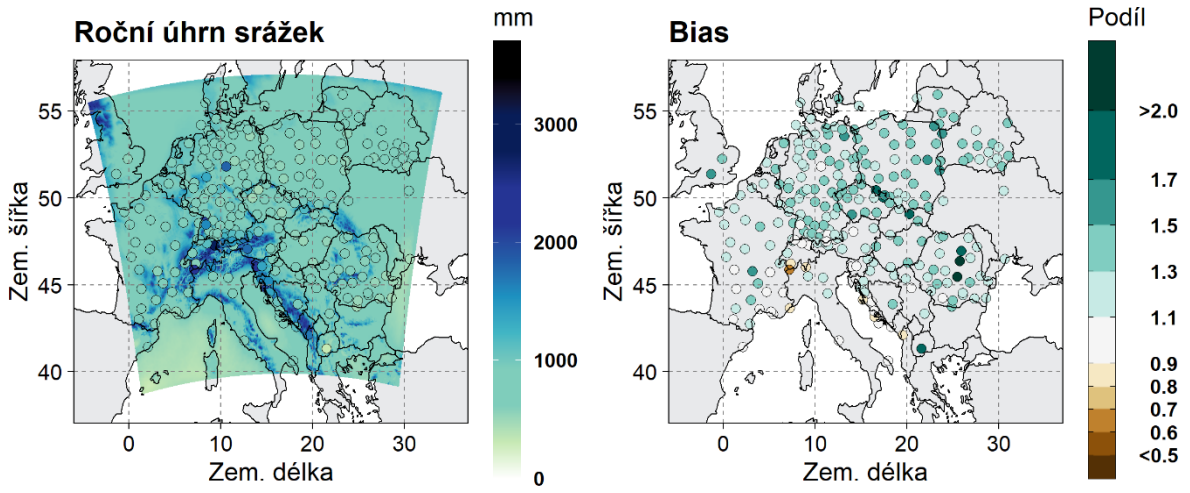
Obr. 4 Rozdíl mezi ročním průměrem denní minimální teploty (TN) v reanalýze ERA5 a na stanicích (vlevo) a rozdíl průměrné denní maximální teploty (TX, vpravo).
Fig. 4 The difference between the annual average daily minimum temperature (TN) in the ERA5 reanalysis and at the stations (left) and the difference in the average daily maximum temperature (TX, right).



Obr. 5 Jako obr. 2, ale pro roční průměr průměrné denní teploty.
Fig. 5 As in Fig. 2, but for annual average of daily mean temperature.

Prostorová variabilita srážek a složité srážkotvorné procesy v oblačnosti často způsobují nepřesnosti v simulaci srážek numerickými předpovědními modely. Obr. 6 ukazuje průměrné roční úhrny srážek v PERUN/Reanalysis a jejich porovnání se stanicemi (levý panel). Celkem bylo použito měření z 252 stanic. V pravém panelu obr. 6 je průměrná relativní chyba vyjádřena jako podíl hodnoty v reanalýze ku hodnotě na stanici. Průměrná hodnota tohoto poměru je 1,27, což znamená, že model nadhodnocuje úhrny srážek o téměř 30 %. Nadhodnocení úhrnu

srážek nejspíše souvisí s faktem, že reanalýza dává obecně více dní se srážkami než pozorování. Nadhodnocení úhrnu srážek je poměrně homogenní a týká se velké většiny stanic. Velké podhodnocení srážek se týká jediné stanice v Alpách, kde sice uzlová hodnota má podobnou nadmořskou výšku jako stanice, ale model zřejmě v členitém terénu nedokáže i s daným rozlišením správně modelovat lokální podmínky.

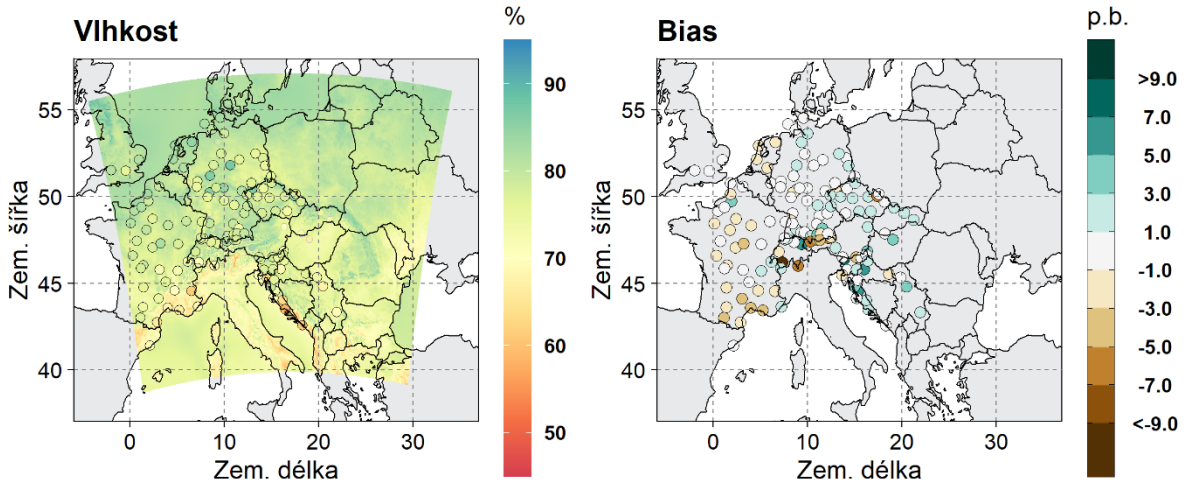


Obr. 6 Průměrný roční úhrn srážek v PERUN/reanalysis, hodnoty naměřené na stanicích jsou v kroužcích (vlevo) a relativní střední chyba vyjádřená jako podíl modelové a staniční hodnoty (vpravo) za validační období 1990–2014.

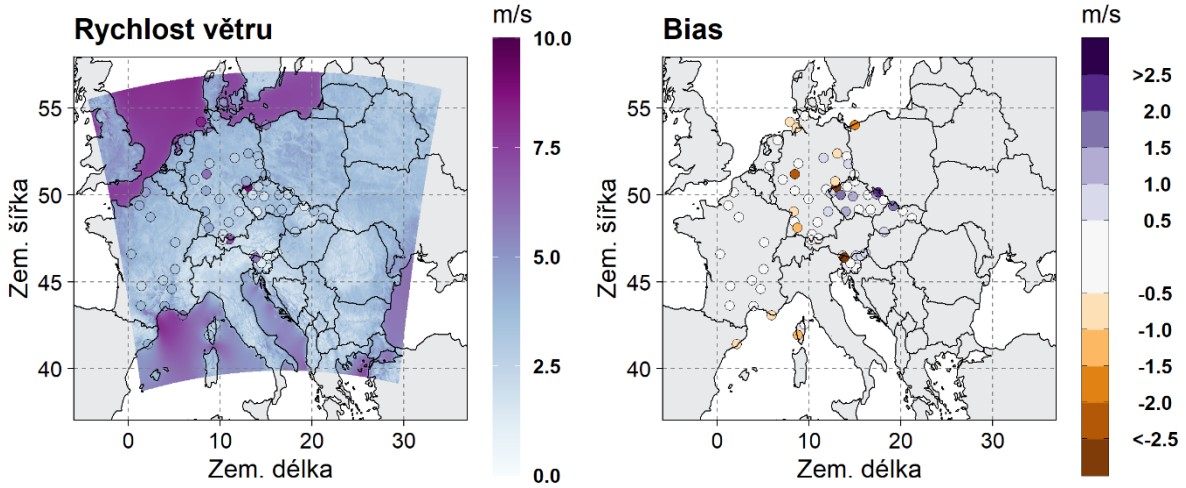
Fig. 6 Average annual precipitation in PERUN/reanalysis, values measured at stations are in circles (left) and relative mean error expressed as a ratio of model and station values (right) for the validation period 1990–2014.

Roční průměrné hodnoty pro relativní vlhkost a příslušné střední chyby jsou zobrazeny na obr. 7. Absolutní hodnota rozdílu mezi reanalýzou a staniční hodnotou na většině stanic nepřevyšuje 5 procentních bodů a průměrná hodnota počítaná přes 144 použitých stanic je 0,1 procentní bod. Je zajímavé, že v oblasti Německa a České republiky je vlhkost spíše nadhodnocována a ve Francii podhodnocována. Což může poukazovat na rozdílné způsoby měření relativní vlhkosti v jednotlivých státech než na nějakou systematickou chybu v reanalýze.

Hodnotit kvalitu reanalýzy pro rychlosti větru (obr. 8) je obtížné. Jednak proto, že je málo stanic s potřebnými daty, ale také proto, že měření větru mohou mít velmi lokální charakter, který se liší od modelových dat (např. drsnost okolí). Průměrný bias rychlosti větru přes 72 použitých stanic je sice malý (−0,1 $m \cdot s^{-1}$), ale rozdíly mezi stanicemi jsou výrazné. V České republice je rychlost větru nadhodnocována, ale rozdíl je menší než 2 $m \cdot s^{-1}$.



Obr. 7 Roční průměr relativní vlhkosti v PERUN/reanalysis, hodnoty naměřené na stanicích jsou v kroužcích (vlevo) a průměrný rozdíl (v procentních bodech) mezi hodnotou v reanalýze a na stanici (vpravo) za validační období 1990–2014.
Fig. 7 Annual average of relative humidity in PERUN/reanalysis, values measured at stations are in circles (left) and the average difference (in percentage points) between the reanalysis values and the station measurements (right) for the validation period 1990–2014.



Obr. 8 Jako na obr. 7, ale pro roční průměr rychlosti větru.
Fig. 8 As in Fig. 7, but for annual average of wind speed.

5. Závěr

Regionální reanalýza PERUN/Reanalysis s vysokým rozlišením je založena na numerickém předpovědním modelu, který byl upraven pro klimatologické výpočty ALADIN-CLIMAT/CZ. Pro validaci této reanalýzy na celé výpočetní doméně jsme využili zejména staniční data z databáze ECA&D. Analyzovali jsme 25leté období 1990–2014. Při validaci jsme se soustředili hlavně na teplotu vzduchu (minimální, maximální a průměrnou) a srážky. Základní validaci jsme provedli také pro rychlost větru či relativní vlhkost.

Reanalýza a pozorované hodnoty denních teplot vykazují určité rozdíly. Nejmenší střední chyba (do 1 °C) byla zjištěna pro denní průměrné teploty. Denní minimální teploty jsou v reanalýze nadhodnoceny a denní maximální teploty jsou naopak podhodnoceny. Úhrny srážek jsou téměř na celém území v reanalýze nadhodnoceny a to průměru téměř o 30 %.

Validace vlhkosti a rychlosti větru se potýkala s nedostatkem vhodných stanic k porovnání. Na území České republiky jsou vlhkost i rychlost větru mírně nadhodnoceny.

Výsledky validace ukazují, že i když existují určité rozdíly mezi hodnotami z PERUN/Reanalysis a staničními daty, tak tyto rozdíly jsou relativně malé. Díky vysokému prostorové rozlišení představuje tato regionální reanalýza cenný zdroj dat, který lze použít k dalšímu studiu klimatických charakteristik v oblasti střední Evropy.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

BROŽKOVÁ, R., DERKOVÁ, M., BELLUŠ, M., FARDA, F., 2006. Atmospheric forcing by ALADIN/MFSTEP and MFSTEP oriented tunings. *Ocean Science*, **2**, 113–121, ISSN 1812-0784. https://doi.org/10.5194/os-2-113-2006

CORNES, R. C., van der SCHRIER, G., van den BESSELAAR, E. J. M., JONES, P. D., 2018. An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **123**, 9391–9409, ISSN 2169-897X. https://doi.org/10.1029/2017JD028200

GERARD, L., PIRIOU, J., BROŽKOVÁ, R., GELEYN, J., BANCIU, D., 2009. Cloud and Precipitation Parameterization in a Meso-Gamma-Scale Operational Weather Prediction Model. *Monthly Weather Review*, **137**, 3960–3977, ISSN 0027-0644. https://doi.org/10.1175/2009MWR2750.1

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S., HORÁNYI, A., et al., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 1999–2049, ISSN 0035-9009. https://doi.org/10.1002/qj.3803

TERMONIA, P., FISCHER, C., BAZILE, E., BOUYSSEL, F., BROŽKOVÁ, R., et al., 2018. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geoscientific Model Development*, **11**, 257–281. ISSN 1991-9603. https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018

SCHIMANKE, S., RIDAL, M., LE MOIGNE, P., BERGGREN, L., UNDÉN, P., et al., 2021. CERRA sub-daily regional reanalysis data for Europe on single levels from 1984 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). https://doi.org/10.24381/cds.622a565a

Hodnocení úhrnů srážek simulovaných atmosférickou reanalýzou ALADIN/PERUN ve vysokém prostorovém rozlišení

(Evaluation of precipitation totals simulated by the ALADIN/PERUN atmospheric reanalysis at high spatial resolution)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.02

Vojtěch Bližňák, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., bliznak@ufa.cas.cz
Petr Zacharov, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., petas@ufa.cas.cz

Abstrakt: Atmosférické reanalýzy patří mezi účinné nástroje získávání informací o stavu atmosféry v historii, které jsou získávány pomocí numerických předpovědních (NWP) modelů, jejichž předpovědi mohou (ale nemusí) být zpřesňovány prostřednictvím asimilace naměřených dat. Významný rozvoj výpočetní techniky v poslední době umožnil zvýšit jejich prostorové rozlišení tak, aby bylo možné lépe zachytit i meteorologické jevy lokálního charakteru. Většina NWP modelů však tuto schopnost kompenzuje zmenšením výpočetní domény, což do značné míry omezuje využití těchto předpovědí pro následné meteorologické, klimatologické a/nebo hydrologické aplikace. Nově vzniklá atmosférická reanalýza ALADIN/PERUN poskytuje simulace různých meteorologických veličin ve vysokém prostorovém (2,3 km) i časovém (1 h) rozlišení na většině území Evropy v rozmezí 1989–2020. Vzhledem k vysokému rozlišení reanalyzovaných dat lze předpokládat, že srážková pole budou dobře zachycovat procesy lokálního měřítka, a budou tak věrohodněji reprodukovat například silné konvektivní srážky. Prezentovaný příspěvek si klade za cíl tuto schopnost vyhodnotit na základě adjustovaných radarových odhadů úhrnů srážek v teplých částech roku, kdy se ve střední Evropě vyskytují silné konvektivní, ale i stratiformní srážky. Přesnost lokalizace a celkového úhrnu bude vyhodnocena pro dva různé běhy NWP modelu. První z nich (ALADIN/Reanalysis) zahrnuje kompletní asimilaci pozorovaných dat každých 6 hodin pomocí asimilačního schématu 4D-VAR. Druhý (ALADIN/Evaluation Run) využívá pouze okrajové podmínky z globální reanalýzy ERA-5 a výpočet předpovědí není dále nijak upravován s ohledem na naměřená data. Porovnání obou běhů poskytne informace o úrovni fyzikálního popisu v NWP modelu a také o vlivu asimilace dat na výsledná srážková pole. Kromě toho je příspěvek unikátní v tom, že k hodnocení bude využívat detailní pole „pozorovaných“ úhrnů srážek ve vysokém prostorovém rozlišení, které klasická staniční data nemohou nabídnout.

Klíčová slova: reanalýza atmosférická – verifikace srážek – NWP model – kvantitativní odhad srážek

Abstract: Atmospheric reanalyses represent powerful tools for obtaining information about the state of the atmosphere in history, which is obtained by numerical weather prediction (NWP) models whose predictions may (but may not) be improved through the assimilation of measured data. Significant developments in computer technology have recently enabled to increase their spatial resolution so that even meteorological phenomena of a local nature can be better captured. However, most NWP models compensate this capability by reducing the computational domain, which largely limits the use of these forecasts for the following meteorological, climatological and/or hydrological applications. The newly developed ALADIN/PERUN atmospheric reanalysis provides simulations of various meteorological variables at high spatial (2.3 km) and temporal (1 h) resolution over most of Europe between 1989 and 2020. Due to the high resolution of the reanalysed data, it can be expected that precipitation fields will capture local-scale processes well, and thus reproduce more faithfully, for example, heavy convective precipitation. The presented paper aims to evaluate this

capability based on gauge-adjusted radar estimates of precipitation totals during warm parts of the year when strong convective but also stratiform precipitation occurs in Central Europe. The accuracy of the localization and precipitation sums will be evaluated for two different runs of the NWP model. The first one (ALADIN/Reanalysis) involves a complete assimilation of the observed data every 6 hours using a 4D-VAR assimilation scheme. The second (ALADIN/Evaluation Run) uses only the boundary conditions from the ERA-5 global reanalysis and the calculation of the forecasts is not further modified based on measured data. Comparing the two runs will provide us with information about the level of physical description in the NWP model as well as the effect of assimilation on the resulting precipitation fields. In addition, the paper is unique in that it will use detailed fields of "observed" precipitation totals at high spatial resolution, which conventional rain gauge data cannot offer.

Keywords: atmospheric reanalysis – precipitation verification – NWP model – quantitative precipitation estimation

1. Úvod

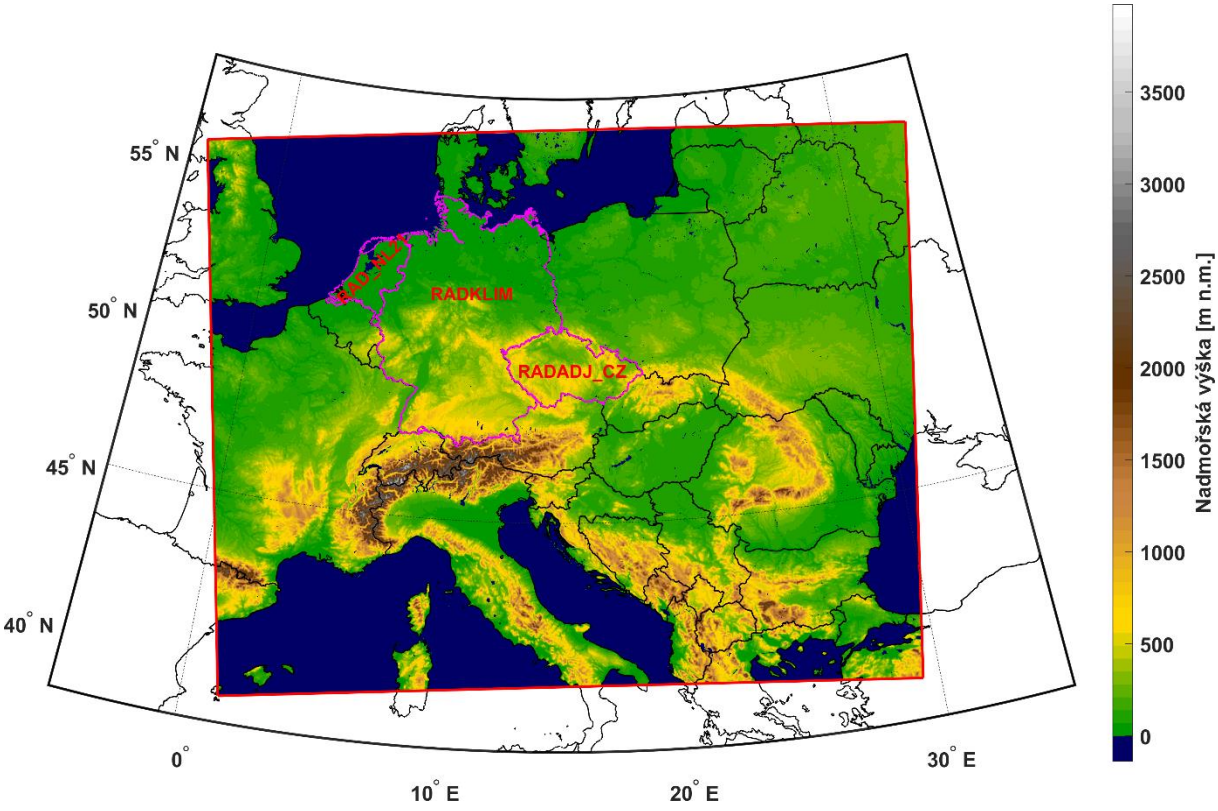
Informace o rozložení srážek ve vysokém horizontálním a časovém rozlišení mají velký význam v mnoha oblastech, jako je klimatologie, hydrologie, vodní hospodářství, územní plánování atd. Jedním z nástrojů, které lze využít k získání historických informací o časoprostorové distribuci srážek, jsou atmosférické reanalýzy, které poskytují konzistentní trojrozměrné časové řady stavu atmosféry, obvykle za několik desetiletí až století. Jsou počítány pomocí numerických předpovědních (NWP) modelů v globálním, regionálním nebo i lokálním měřítku, jejichž výpočty mohou (ale nemusí) být dále zpřesňovány prostřednictvím asimilace naměřených dat.

Většina atmosférických reanalýz je počítána pomocí NWP modelů, ve kterých jsou konvektivní procesy parametrizovány, což vede k významnému zdroji chyb a nejistot (Prein et al. 2015). V současné době jsou však již ke tvorbě reanalýz využívány i nehydrostatické NWP modely umožňující explicitní modelování konvektivních procesů v měřítku, které je v anglické literatuře označované jako „convection-permitting“. Výsledkem pak mohou být dlouhé časové řady pro různé meteorologické prvky pokrývající značnou část kontinentů při současném zachování vysokého a prostorového rozlišení (Wahl et al. 2017; Caillaud et al. 2021; a další).

Jedním z takových produktů je i nově vzniklá atmosférická reanalýza ALADIN/PERUN počítána nehydrostatickým NWP modelem ALADIN, která poskytuje ucelený popis stavu atmosféry a přízemních vrstev reprezentovaný 49 meteorologickými/fyzikálními proměnnými a pokrývá velkou část Evropy (obr. 1). Relativně dlouhé časové rozpětí (více než 30 let) a jemné horizontální (2,325 km) i časové (1 hodina) rozlišení dat jsou hlavními výhodami této reanalýzy, jejíž výstupy (zejména ty, které se týkají srážek) mohou být velice atraktivní pro hydrologickou komunitu.

Před jejím využitím v nejrůznějších odvětvích je však nutné její výstupy verifikovat s naměřenými daty a určit tak její limity a míru nejistoty. Aby byla zachována přidaná hodnota jejich výstupů ve vysokém prostorovém rozlišení, je nutné mít k dispozici i měření ve stejném nebo podobném horizontálním kroku. V případě srážek, které jsou v čase a prostoru velmi variabilní, se jako vhodné jeví využití radarových odhadů srážek adjustovaných pomocí měření na srážkoměrných stanicích. Kombinace radarového a staničního měření zachovává jednak strukturální vlastnosti srážkových polí (v důsledku vysokého prostorového rozlišení radarových měření) a zároveň jejich kvantitativní odhady odpovídají hodnotám naměřeným na stanicích.

Předkládaný příspěvek si klade za cíl zhodnotit simulaci úhrnů srážek v subdenním kroku ve dvou modelových bězích reanalýzy ALADIN/PERUN, které se od sebe liší především vstupními daty (blíže viz část 2.1.). Zvláštní pozornost je pak věnována hodnocení simulace extrémních srážek, které se vyznačují vysokou časoprostorovou proměnlivostí. Verifikace je prováděna v hodinovém časovém kroku oproti adjustovaným radarovým odhadům úhrnů srážek v teplých částech roků 2002–2019 nad územím Česka, Německa a Nizozemska.



Obr. 1 Modelová doména (zmenšená o šestnáct gridových bodů na každé straně; červený obdélník) reanalýzy ALADIN/PERUN. Území České republiky, Německa a Nizozemska, kde je počítána verifikace s využitím datasetů adjustovaných radarových odhadů úhrnů srážek RADADJ_CZ, RADKLIM a RAD_NL21, je zvýrazněno purpurově. Barevné pozadí odpovídá nadmořské výšce vyjádřené v metrech nad mořem [m n. m.] (viz legenda).
Fig. 1 The model domain (reduced by sixteen grid points on each side; red rectangle) of the ALADIN/PERUN reanalysis. The area of the Czech Republic, Germany and the Netherlands, where verification with gauge-adjusted radar precipitation datasets RADADJ_CZ, RADKLIM and RAD_NL21 is performed, is highlighted in magenta. The colour background corresponds to altitude expressed in metres above sea level [m a. s. l.] (see legend).

2. Data

2.1 Reanalýza ALADIN/PERUN

Studie využívá dat reanalýzy ALADIN/PERUN, která je počítána nehydrostatickým NWP modelem ALADIN v časovém kroku 1 hodina a horizontálním rozlišení 2,325 km (v severojižním i západovýchodním směru). Výpočetní oblast modelu má rozměry 1069 (horizontální osa) x 853 (vertikální osa) gridových bodů, přičemž 16 gridových bodů u vnějších okrajů domény představuje zónu párování s globálním modelem a pro verifikační účely se tyto zóny neuvažují. Modelové běhy jsou počítány v 87 vertikálních hladinách od přízemních vrstev

po tlakovou hladinu cca 50 Pa a jsou archivovány v konformní Lambertově projekci (Brožková et al. 2019).

Reanalýza ALADIN/PERUN byla počítána v několika modelových bězích, přičemž v této práci se zaměřujeme na hodnocení dvou modelových variant. První verze reanalýzy nazvaná ALADIN/Reanalysis zahrnuje kompletní asimilaci pozorovaných dat každých 6 hodin pomocí asimilačního schématu 4D-VAR. Druhý modelový běh (ALADIN/Evaluation Run) využívá pouze okrajové podmínky z globální reanalýzy ERA-5 a výpočet předpovědí není dále nijak upravován s ohledem na naměřená data.

2.2 Adjustované radarové úhrny srážek

K hodnocení modelových simulací úhrnů srážek byly využity adjustované radarové odhady úhrnů srážek z Česka (produkt RADADJ_CZ; Sokol 2003; Bližňák et al. 2018), Německa (produkt RADKLIM; Winterrath et al. 2018) a Nizozemska (produkt RAD_NL21; Overeem et al., 2009). Produkty RADADJ_CZ a RADKLIM jsou k dispozici v horizontálním rozlišení 1 km, produkt RAD_NL21 pak v rozlišení 2.4 km. Všechny tři produkty byly následně lineárně interpolovány do sítě NWP modelu ALADIN a jejich kombinací vznikl dataset, který pokrývá území zvýrazněné purpurovou barvou na obr. 1. Pro zjednodušení se budeme v dalším textu odkazovat na tuto oblast jako na oblast verifikační. Vybrané období zahrnuje teplé části roků 2002–2019, přičemž spodní hranice je dána dostupností radarových měření v Česku, horní hranice pak představuje aktuální limit časového rozpětí reanalýzy ALADIN.

3. Metody

Protože jsou úhrny srážek modelované ve vysokém prostorovém rozlišení zatíženy značnou nejistotou, je vhodné hodnotit jejich přesnost nikoliv jen s využitím tradiční verifikace založené na porovnání s odpovídající bodovou (příp. gridovou) informací, ale rovněž s přihlédnutím k informaci z daného okolí. Obdobně je nutné vzít v potaz i časovou nejistotu předpovídaných úhrnů srážek a při hodnocení „zohlednit“ i možné časové posunutí. „Fuzzy metody“, jak se nazývají přístupy založené na uvolnění podmínek přesné časové a/nebo prostorové shody modelových předpovědí, jsou v české (např. Zacharov et al. 2019) i zahraniční (např. Bližňák et al. 2019; Gofa et al. 2018) literatuře hojně využívány při verifikaci modelových úhrnů srážek, a proto jsou i základním nástrojem použitým pro účely této práce.

Prvním přístupem je uvolnění prostorové shody výskytu srážek pro daný gridový bod. Pro každou hodinu v rámci verifikovaného období byl spočten průměrný a vybrán maximální úhrn srážek z celé verifikační oblasti zvlášť pro první i druhý modelový běh a měření. Těsnost vazby mezi oběma renalýzami a měřením byl pak zjišťován s využitím Pearsonova korelačního koeficientu pro všechny 1h úhrny srážek.

Druhý přístup vycházející z uvolnění časové shody úhrnů srážek byl aplikován tak, že pro každý gridový bod verifikační oblasti byl spočten průměrný úhrn srážek za celé období zvlášť pro každou nadprahovou hodnotu naměřeného úhrnu. Při hodnocení jsme uvažovali relativní prahové hodnoty rovné nebo převyšující 95., 99., 99,9. a 99,99. percentil a charakteristiku frekvenčního biasu (BIAS) vycházející z hodnot v kontingenční tabulce (tab. 1). Ta ukazuje kategorickou předpověď události, která je definována jako překročeni předem definované prahové hodnoty gridového úhrnu (Zacharov et al. 2010).

Tab. 2 Kontingenční tabulka použitá pro výpočet charakteristik kategorické verifikace.
Tab. 2 Contingency table used for calculation of categorical skill scores.

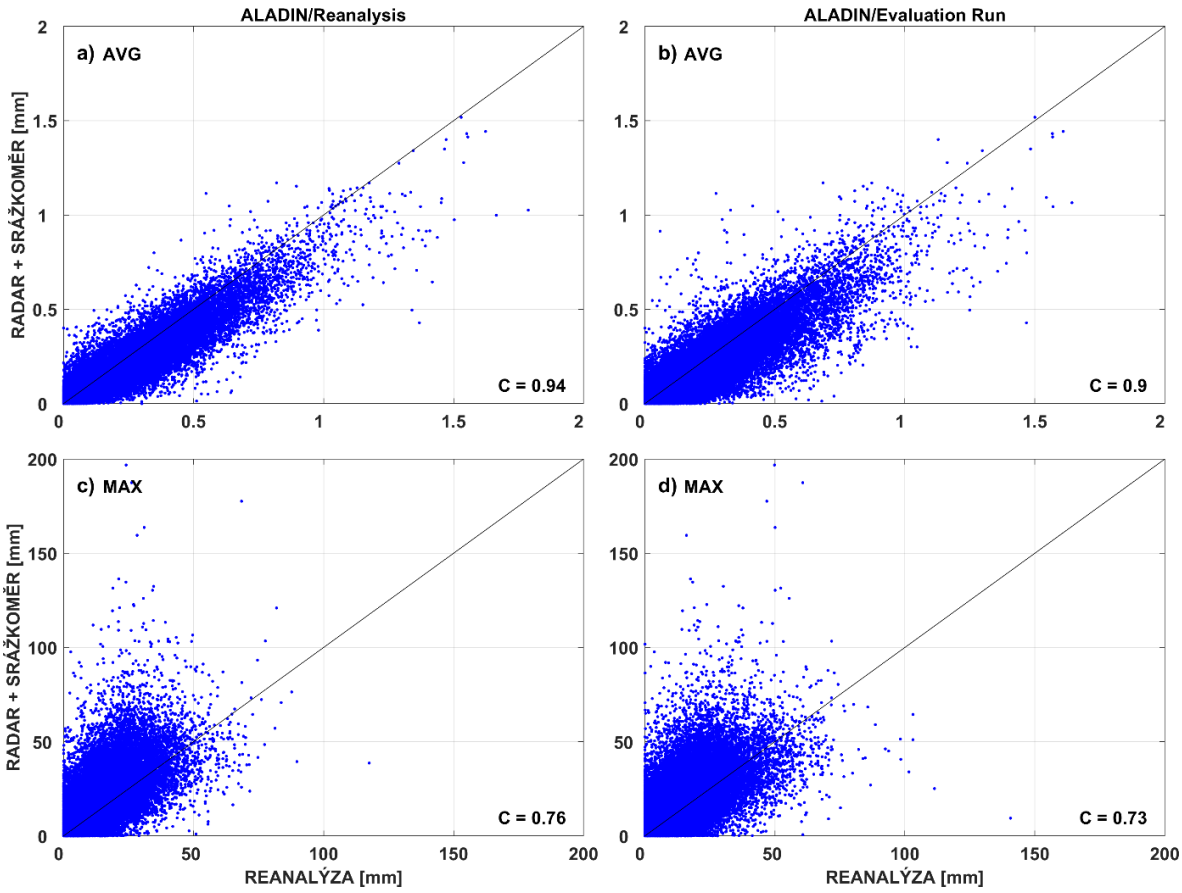
		Předpověď události	
		Ano	Ne
Výskyt události	Ano	a	c
	Ne	b	d

Charakteristika BIAS pak vyjadřuje poměr počtu předpovězených a pozorovaných událostí neboli kolikrát je počet předpovězených nadprahových událostí vyšší než naměřený:

$$BIAS = \frac{a+b}{a+c} \quad (1)$$

4. Výsledky

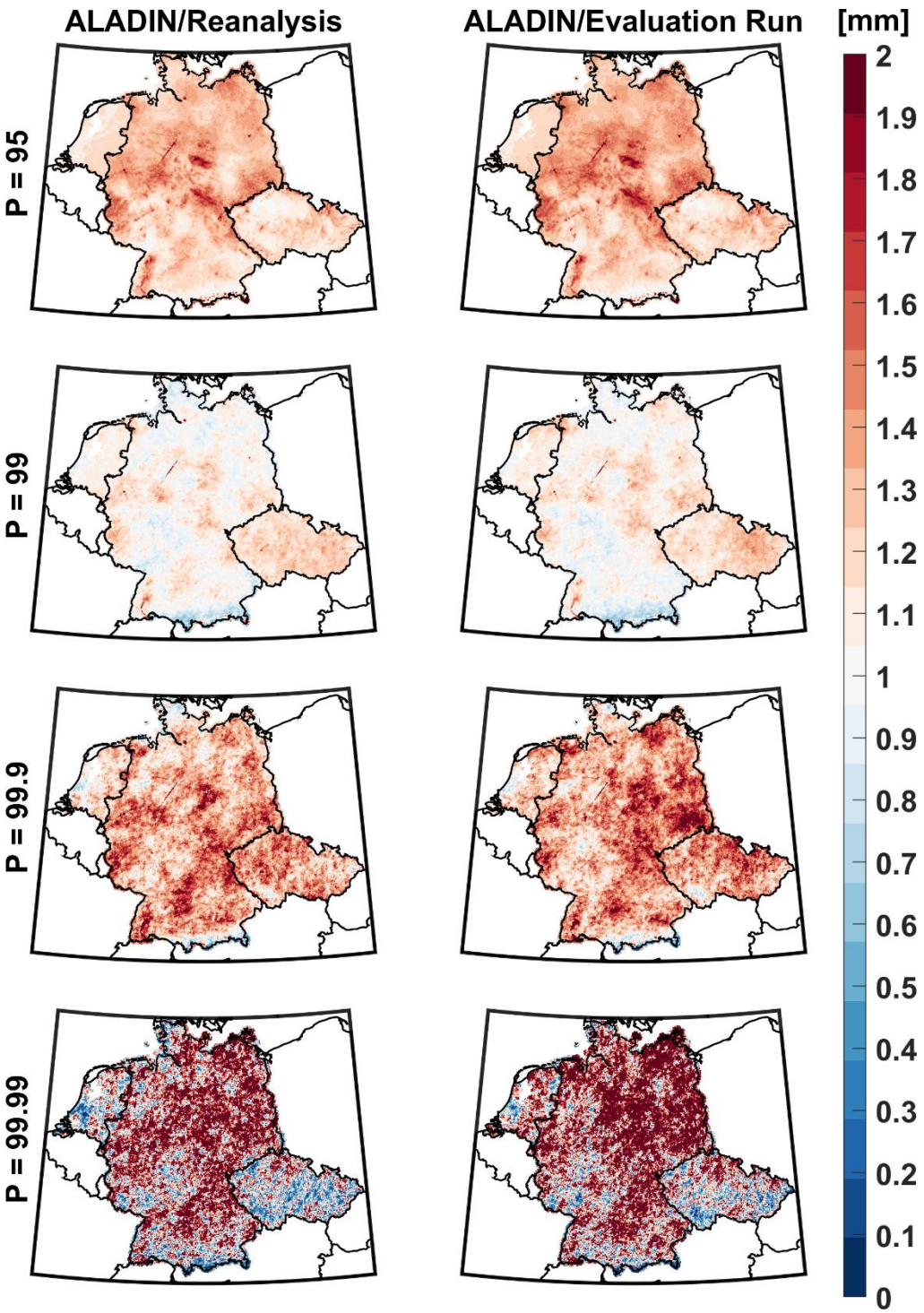
Hodinové úhrny srážek zprůměrované přes celou verifikační oblast naznačují, že verze ALADIN/Reanalysis lépe koresponduje s naměřenými hodnotami srážek než verze ALADIN/Evaluation Run (obr. 2). Pearsonův korelační koeficient (*C*) mezi měřením a reanalýzami dosahuje hodnot 0,94 (ALADIN/Reanalysis), resp. 0,9 (ALADIN/Evaluation Run). Zde je nutné podotknout, že vysoké hodnoty *C* jsou do značné míry dány vysokým počtem uvažovaných gridových bodů (celkem 92 546), kdy s velikostí uvažované plochy klesá průměrná hodnota srážkového úhrnu. Vyšší hodnoty *PKK* u ALADIN/Renalysis (0,76) oproti ALADIN/Evaluation Run (0,73) je možné pozorovat i v případě hodnocení maximálních hodinových úhrnů srážek z celé verifikační domény. Oba rozptylové grafy tedy ukazují, že asimilace pozorovaných dat do NWP modelu má pozitivní vliv na velikost modelových úhrnů srážek. Zároveň je možné konstatovat, že oba modelové běhy nadhodnocují průměrnou hodnotu 1h úhrnu srážek, přičemž toto nadhodnocení je více patrné v případě ALADIN/Evaluation Run. Naopak, velikost maximálních 1h úhrnů srážek je spíše podhodnocena s ohledem na naměřená data, což platí především u nejextrémnějších srážkových událostí. Ačkoliv verze ALADIN/Evaluation Run vykazuje nižší hodnoty *C*, je schopná generovat vyšší hodnoty srážkových maxim ve srovnání s ALADIN/Reanalysis.



Obr. 2 Scatterploty průměrných (a, b) a maximálních (c, d) 1h úhrnů srážek dle adjustovaných radarových měření (RADAR + SRÁŽKOMĚR) v porovnání s daty ALADIN/Reanalysis a ALADIN/Evaluation Run. Každý bod představuje 1h úhrn srážek zprůměrovaný přes společnou oblast České republiky, Německa a Nizozemska. Pearsonův korelační koeficient (C) je uveden v pravém dolním rohu.

Fig. 2 Scatterplots of the mean (a, b) and maximal (c, d) 1h precipitation totals observed by gauge-adjusted weather radars (RADAR + GAUGE) against ALADIN/Reanalysis and ALADIN/Evaluation Run. Each dot represents precipitation total averaged over the Czech Republic, Germany and the Netherlands. Pearson's correlation coefficient (C) is shown in the lower right corner.

Celkové nadhodnocení 1h úhrnů srážek u nižších prahových hodnot je patrné i v případě jiného přístupu založeného na průměrování hodnot nikoliv v ploše, ale v čase pro daný gridový bod. Obr. 3 ukazuje prostorové rozložení frekvenčního biasu hodinových úhrnů srážek pro oba modelové běhy a pro uvažované relativní prahové hodnoty definované dle měření. Modelové 1h úhrny srážek rovné nebo převyšující 95. percentil, kterému odpovídají úhrny do cca 1,7 mm (v závislosti na lokalitě), jsou až na drobné výjimky u obou běhů nadhodnocené. S rostoucí prahovou hodnotou (99. percentil) se míra nadhodnocení úhrnů srážek snižuje nebo dokonce přechází v jejich podhodnocení, které je nejpatrnější v oblasti německých Alp, což je dáno přítomností vyšších úhrnů srážek. U nejextrémnějších úhrnů srážek (tj. 99,9. a 99,99. percentil) je již zjevná značná prostorová nehomogenita u obou modelových běhů související se skutečností, že vysoké úhrny srážek pocházející výhradně z konvektivní oblačnosti jsou v prostoru velmi variabilní a nejsou nijak vázány na orografii (Sokol a Bližňák 2009). Díky tomu dochází k vysokému nadhodnocení i podhodnocení bez ohledu na nadmořskou výšku.



Obr. 3 Frekvenční bias (BIAS) 1h úhrnů srážek odvozených z ALADIN/Reanalysis (1. sloupec) a ALADIN/Evaluation Run (2. sloupec) oproti pozorováním. BIAS se počítá porovnáním počtu naměřených a modelových 1h úhrnů srážek, které se rovnají nebo překračují danou prahovou hodnotu P v daném gridové bodě za celé uvažované období (2002–2019).

Fig. 3 Frequency bias (BIAS) of 1h precipitation totals derived from ALADIN/Reanalysis (1st column) and ALADIN/Evaluation Run (2nd column) against observations. BIAS is calculated by comparing the number of measured and simulated 1h precipitation totals equal to or exceeding a given threshold P at a given grid point over the whole considered period (2002–2019).

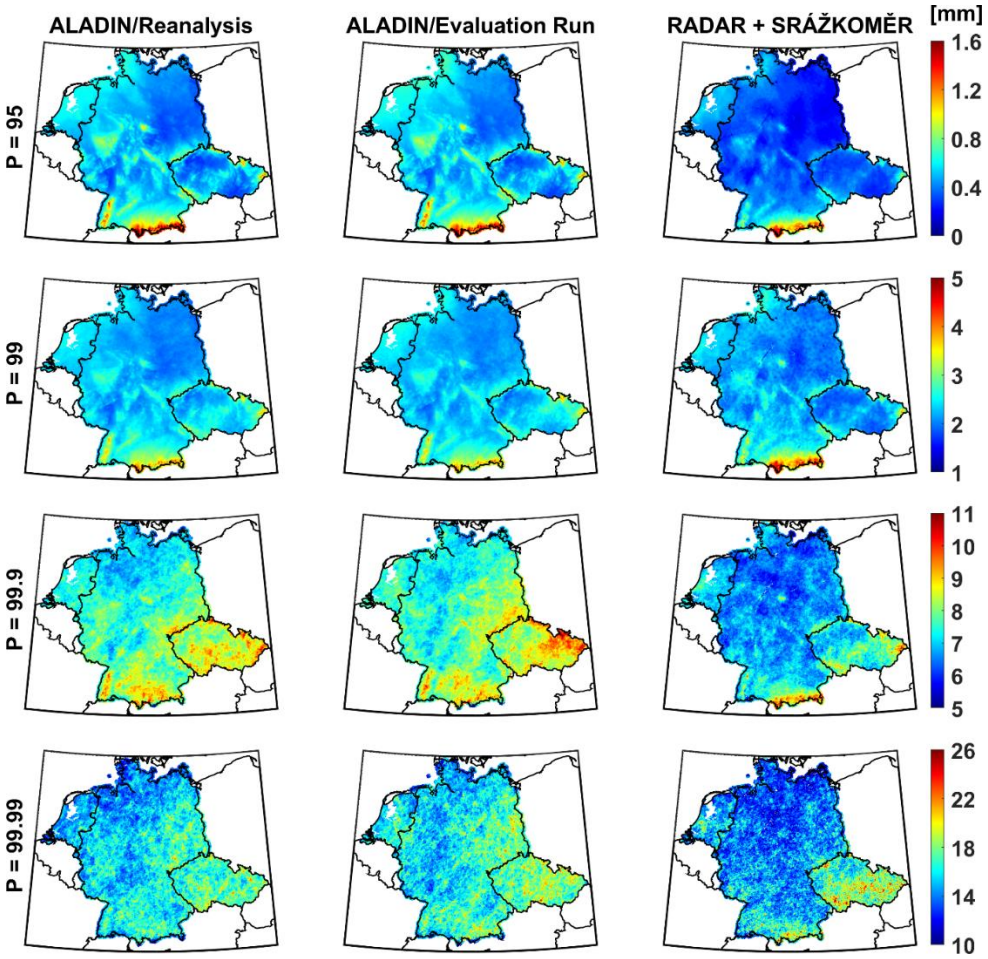
Hodnoty 1h úhrnů srážek pro uvažované prahové hodnoty jsou zobrazeny zvlášť pro oba modelové běhy i měření na obr. 4. Z nich je patrné, že obě verze reanalýzy nižší 1h úhrny srážek nadhodnocují, a to jak v nižších, tak vyšších nadmořských výškách. Naopak vysoké úhrny (rovné nebo převyšující 99,99. percentil) jsou střídavě nadhodnocené (především ve východní polovině Německa) i podhodnocené (oblast jižních Čech a západního Nizozemska). Dle měření se nejvyšší hodnoty těchto úhrnů vyskytují v oblasti německých Alp, Krušných hor a jižní a východní části ČR, což je do značné míry dáno rostoucí kontinentalitou od západu k východu. Obecně totiž platí, že kontinentální typ podnebí podmiňuje vyšší výskyt konvektivních srážek v teplé polovině roku. I když je pro NWP modely obecně problém lokalizovat předpovídané úhrny srážek z konvektivní oblačnosti, z obr. 4 je u obou modelových běhů patrný nárůst velikosti úhrnů ve směru od západu k východu, což značí schopnost modelu generovat vysoké úhrny srážek v kontinentálním typu prostředí. Zároveň je možné konstatovat, že ALADIN/Evaluation Run je schopen produkovat v průměru o 4 % vyšší hodnoty úhrnů srážek rovných nebo převyšujících 99,99. percentil než verze ALADIN/Reanalysis. To je patrné především ve východní polovině Německa a ČR, tedy v oblastech s nejvyššími hodnotami extrémních úhrnů.

Pro účely výběru extrémních srážkových událostí jsme využili charakteristiku WEI (Weather Extremity Index; Müller a Kašpar 2014), která hodnotí extremitu srážek nejen z pohledu velikosti úhrnů, ale rovněž i s ohledem na velikost zasažené plochy a doby trvání dané události. V práci Kašpar et al. (2023) bylo klasifikováno celkem 60 srážkových událostí s nejvyšší hodnotou WEI za období 1961–2020 a prvních 12 událostí (s délkou trvání od 24 do 120 hodin) od roku 2002 bylo využito pro účely této práce. Události zahrnují především srážky pocházející z převážně stratiformní oblačnosti, obsaženy jsou však i srážky převážně konvektivního charakteru (29. 6. 2006, 22. 7. 2010), případně kombinace obou typů (1. 6. 2013 a 16. 8. 2015). Srovnání časového chodu rozdílů úhrnů srážek mezi ALADIN/Reanalysis a měřením (modrá barva) a ALADIN/Evaluation Run a měřením (červená barva) pro každou z těchto událostí je zobrazeno na obr. 5. Kladné hodnoty rozdílů představují nadhodnocení danou reanalýzou, záporné hodnoty naopak její podhodnocení. Míra nadhodnocení/podhodnocení je navíc barevně zvýrazněna plochou mezi danou křivkou a nulovým rozdílem. Dobu výskytu maxim v rámci každé události je možné odvodit podle časového průběhu adjustovaných radarových měření (zelená křivka), kde hodnoty 1h úhrnů srážek jsou zprůměrovány přes všechny gridové body ležící uvnitř ČR.

Z grafů je patrné, že přesnost obou modelových běhů je různá pro různé typy událostí. Obecně je však možno říci, že největší chyby jsou způsobeny výskytem vysokých ryze konvektivních srážek, jejichž naměřená a modelová velikost se může značně lišit. V případě události z 22.–23. 7. 2010, kdy byly pozorovány bouře jak první, tak druhý den vždy v pozdně večerních hodinách, došlo k výraznému podhodnocení srážek modelovým během ALADIN/Reanalysis v případě první „vlny“. Událost ve druhém dni byla již zachycena oběma běhy, přičemž obě verze vyprodukovaly vyšší průměrné plošné úhrny, které byly oproti pozorování (jižní Morava) lokalizovány v oblasti jižních a středních Čech. Zde je nutné podotknout, že se jednalo o velice vysoké 1h úhrny srážek překračujících 50 mm. Obdobně, ALADIN/Reanalysis výrazně podcenil výši průměrných úhrnů srážek souvisejících s výskytem bouře z 29. až 30. 6. 2006, která byla pozorována v oblasti střední Moravy. Naproti tomu ALADIN/Evaluation Run dokázal vygenerovat pásmo vysokých úhrnů srážek v oblasti jihozápadní, střední až severní Moravy, které však byly v průměru oproti měření nadhodnocené.

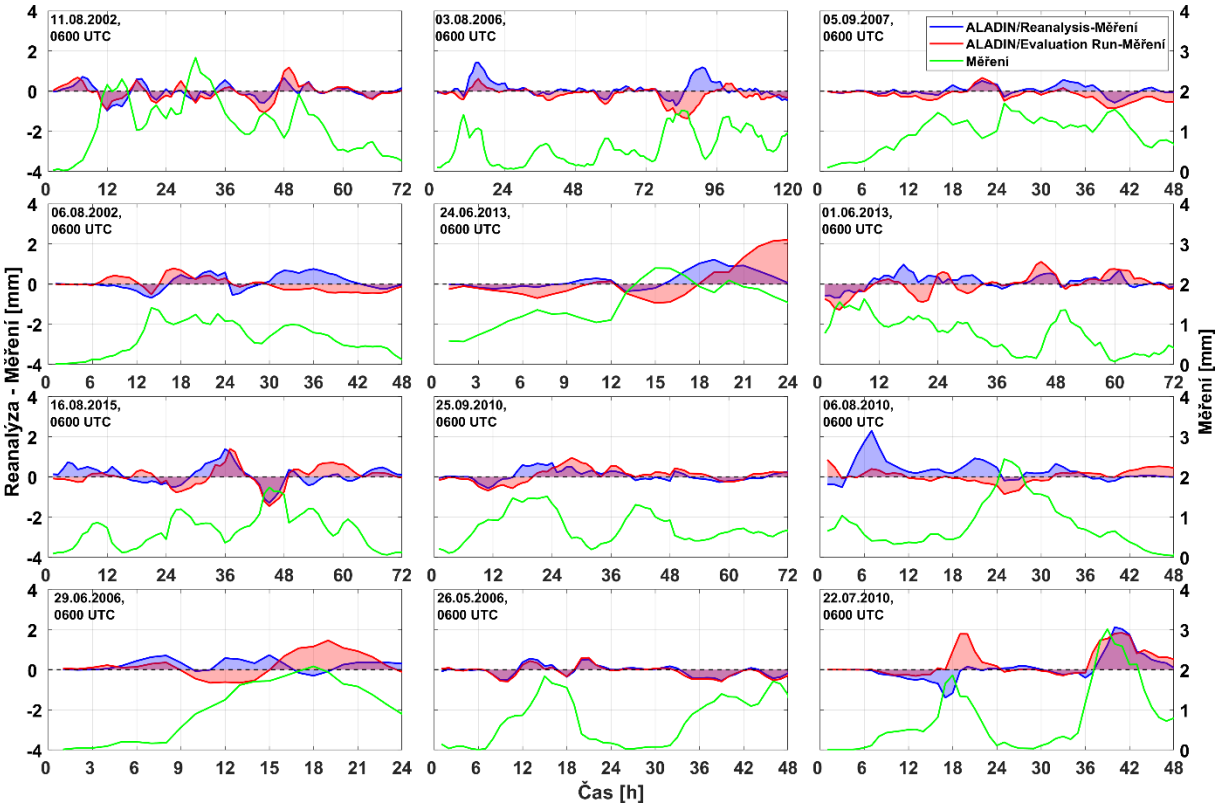
Přesnost simulací průběhu vrstevnatých srážek není jednoznačná, přičemž může docházet střídavě jak k jejich podhodnocení, tak nadhodnocení. Z plošné distribuce srážkových úhrnů

pocházejících z vrstevnaté oblačnosti (bez obrázku) také vyplývá, že NWP model obvykle správně lokalizuje oblast významných srážek. Důležitým faktorem s ohledem na přesnost výše modelových úhrnů se zdá být přítomnost lokálně vymezených oblastí s vyššími úhrny srážek způsobených tzv. vnořenou konvekcí. To je patrné například u situace z 6. 8. 2010, kdy v severočeských Hejnicích spadlo mezi 7. a 8. hodinou UTC 57,6 mm srážek (Kyselý et al. 2013), zatímco vliv asimilovaných dat na předpovězené úhrny srážek se projevil až o přibližně 3 hodiny později, kdy ALADIN/Reanalysis dával v této oblasti hodinové úhrny srážek dosahujících 26 mm. Naopak ALADIN/Evaluation Run vycházející jen z okrajových podmínek globální reanalýzy ERA-5 předpovídal v této oblasti pouze nízké srážkové úhrny do 10 mm.



Obr. 4 Prostorové rozložení 95. (1. řádek), 99. (2. řádek), 99,9. (3. řádek) a 99,99. (4. řádek) percentilu pro 1h úhrny srážek odvozené z ALADIN/Reanalysis (1. sloupec), ALADIN/Evaluation Run (2. sloupec) a adjustovaných radarových měření (3. sloupec).

Fig. 4 Spatial distribution of the 95th (1st row), 99th (2nd row), 99.9th (3rd row) and 99.99th (4th row) percentile for 1h precipitation totals derived from ALADIN/Reanalysis (1st column), ALADIN/Evaluation Run (2nd column) and gauge-adjusted radar precipitation measurements (3rd column).



Obr. 5 Časový průběh rozdílů 1h úhrnů srážek mezi ALADIN/Reanalysis a měřením (modré čáry) a ALADIN/Evaluation Run a měřením (červené čáry) pro 12 extrémních srážkových událostí vybraných na základě charakteristik WEI. Zelené čáry znázorňují 1h úhrny srážek podle adjustovaných radarových měření. Hodnoty 1h úhrnů srážek jsou zprůměrovány přes oblast České republiky. Začátek každé události je uveden v levém horním rohu každého dílčího grafu a její délka (v hodinách) je znázorněna na ose x.

Fig. 5 Time course of 1h precipitation total differences between ALADIN/Reanalysis and measurements (blue lines) and ALADIN/Evaluation Run and measurements (red lines) for 12 extreme precipitation events selected based on WEI characteristics. The green lines show 1h precipitation totals measured by gauge-adjusted weather radars. The values of 1h precipitation totals are averaged over grid boxes inside of the Czech Republic. The start of each event is given in the upper left corner of each subplot and its length (in hours) is shown in x-axis.

5. Závěr

Závěrem je možné konstatovat, že reanalýza ALADIN/PERUN představuje slibný nástroj k získání subdenních úhrnů srážek ve vysokém prostorovém rozlišení. Při jejich následné aplikaci je však nutné zohlednit několik skutečností. Především je to celkové nadhodnocení velikosti průměrných 1h úhrnů srážek, přičemž toto nadhodnocení je více patrné v případě modelového běhu ALADIN/Evaluation Run. Zároveň je nutné vzít v úvahu plošnou nejistotu reanalyzovaných dat, jejíž důležitost roste s rostoucí extrémností dané srážkové události. Získané výsledky naznačují, že varianta ALADIN/Evaluation Run je schopná generovat vyšší 1h úhrny srážek při extrémních srážkových událostech ve srovnání s variantou ALADIN/Reanalysis, které ovšem ve výsledku mohou způsobit jejich značné nadhodnocení. Na druhou stranu běh modelu s asimilací pozorovaných dat ALADIN/Reanalysis vykazuje těsnější vazbu s naměřenými 1h úhrny srážek, a to jak průměrovaných přes celou verifikační oblast, tak vybraných maximálních úhrnů bez ohledu na místo výskytu.

Poděkování

Tato práce vznikla za finanční podpory Technologické agentury ČR, projekt SS01020366 a projekt SS02030040. Autoři článku taktéž děkují Deutscher Wetterdienst za poskytnutí datasetu RADKLIM, dr. A. Overeem z Royal Netherlands Meteorological Institute za poskytnutí datasetu RAD_NL21 a dr. Z. Sokolovi z ÚFA AV ČR, v. v. i. za poskytnutí adjustační procedury.

Literatura

BLIŽŇÁK, V., KAŠPAR, M., MÜLLER, M., 2018. Radar-based summer precipitation climatology of the Czech Republic. *International Journal of Climatology*, **38**, 677–691, ISSN 0899-8418. https://doi.org/10.1002/joc.5202

BLIŽŇÁK, V., KAŠPAR, M., MÜLLER, M., ZACHAROV, P., 2019. Sub-daily temporal reconstruction of extreme precipitation events using NWP model simulations. *Atmospheric Research*, **224**, 65–80, ISSN 0169-8095. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.03.019

BROŽKOVÁ, R., BUČÁNEK, A., MAŠEK, J., SMOLÍKOVÁ, P., TROJÁKOVÁ, A., 2019. Nová provozní konfigurace modelu ALADIN ve vysokém rozlišení. *Meteorologické zprávy*, **72**, 129–139, ISSN 0026-1173.

CAILLAUD, C., SOMOT, S., ALIAS, A., BERNARD-BOUISSIÈRES, I., FUMIÈRE, Q., LAURANTIN, O., SEITY, Y., DUCROCQ, V., 2021. Modelling Mediterranean heavy precipitation events at climate scale: An object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model. *Climate Dynamics*, **56**, 1717–1752, ISSN 0930-7575. https://doi.org/10.1007/s00382-020-05558-y

GOFA, F., BOUCOUVALA, D., LOUKA, P., FLOCAS, H. A., 2018. Spatial verification approaches as a tool to evaluate the performance of high resolution precipitation forecasts. *Atmospheric Research*, **208**, 78–87, ISSN 0169-8095. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.09.021

KAŠPAR, M., MÜLLER, M., BLIŽŇÁK, V., VALERIÁNOVÁ, A., 2023. CZEXWED: The unified Czech extreme weather database. *Weather and Climate Extremes*, **39**, 100540, ISSN 2212-0947, https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100540

KYSELÝ, J., GAÁL, L., PICEK, J., SCHINDLER, M., 2013. Return periods of the August 2010 heavy precipitation in Northern Bohemia (Czech Republic) in the present climate and under climate change. *Journal of Water & Climate Change*, **4**, 265–286, ISSN 2040-2244. https://doi.org/10.2166/wcc.2013.051

MÜLLER, M., KAŠPAR, M., 2014. Event-adjusted evaluation of weather and climate extremes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **14**, 473–483, ISSN 1561-8633. https://doi.org/10.5194/nhess-14-473-2014

OVEREEM, A., HOLLEMAN, I., BUISHAND, A., 2009. Derivation of a 10-year radar-based climatology of rainfall. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **48**, 1448–1463, ISSN 1558-8424, https://doi.org/10.1175/2009JAMC1954.1

PREIN, A. F., LANGHANS, W., FOSSER, G., FERRONE, A., BAN, N., GOERGEN, K., LEUNG, R., 2015. A review on regional convection-permitting climate modeling: demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of Geophysics*, **53**, 323–361, ISSN 8755-1209, https://doi.org/10.1002/2014RG000475

SOKOL, Z. 2003. The use of radar and gauge measurements to estimate areal precipitation for several Czech river basins. *Studia Geophysica et Geodaetica*, **47**, 587–604, ISSN 0039-3169.

SOKOL, Z., BLIŽŇÁK, V., 2009. Areal distribution and precipitation-altitude relationship of heavy short-term precipitation in the Czech Republic in the warm part of the year. *Atmospheric Research*, **94**, 652–662, ISSN 0169-8095. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.03.001

WAHL, S., BOLLMEYER, C., CREWELL, S., FIGURA, C., FRIEDERICHS, P., HENSE, A., KELLER, J.D., OHLWEIN, C., 2017. A novel convective-scale regional reanalyses COSMO-REA2: improving the representation of precipitation. *Meteorologische Zeitschrift*, **26**, 345–361, ISSN 0941-2948. https://doi.org/10.1127/metz/2017/0824

WINTERRATH, T., BRENDEL, C., HAFER, M., JUNGHÄNEL, T., KLAMETH, A., LENGFELD, K., WALAWENDER, E., WEIGL, E., BECKER, A., 2018. RADKLIM version 2017.002: Reprocessed gauge-adjusted radar data, one hour precipitation sums (rw) – Open Data DWD. https://doi.org/10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002

ZACHAROV, P. ŘEZÁČOVÁ, D., BROŽKOVÁ, R., 2019. Verifikace kvantitativní předpovědi srážek produkované modelem ALADIN-CZ. *Meteorologické zprávy*, **72**, 140–151, ISSN 0026-1173.

ZACHAROV, P. ŘEZÁČOVÁ, D., 2010. Verifikace kvantitativní předpovědi srážek. *Meteorologické zprávy*, **63**, 133–146. ISSN 0026-1173.

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.03

Scénáře změny klimatu
(Climate change scenarios)

Eva Holtanová, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova,
eva.holtanova@matfyz.cuni.cz
Tomáš Halenka, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova,
tomas.halenka@matfyz.cuni.cz

Abstrakt: Scénáře změny klimatu představují přijatelné alternativní stavy klimatu v budoucnosti, které mohou nastat za určitých předpokladů o vývoji antropogenních vlivů na klima, zejména emisí a koncentrací skleníkových plynů a aerosolů, ale také změn ve využívání povrchu. Možné cesty vývoje byly dříve předkládány ve formě emisních scénářů, dnes jsou k dispozici šířeji pojaté "*socio-economic pathways - SSPs*". Scénáře změny klimatu jsou nástrojem pro nalezení mezí možného budoucího vývoje. Odhady budoucího vývoje klimatu lze vytvářet různými způsoby. Základní metody vycházejí dnes nejčastěji z hodnocení výstupů globálních klimatických modelů, s případnou aplikací některé z metod zmenšování měřítka (downscalingu). Výstupy modelů je poté třeba před další aplikací podrobit některému z postupů postprocessingu, s cílem zmenšit vliv známých modelových chyb. Dále je třeba hodnotit rozsah nejistoty spojené s výslednými daty. Představeny budou zejména postupy používané v rámci projektu PERUN, ale i další možnosti, včetně nejnovějších přístupů, např. tzv. "storylines".

Klíčová slova: antropogenní vlivy na klima – socio-ekonomický scénář – scénář změny klimatu

Abstract: Climate change scenarios represent plausible alternative future climate states that can occur under certain assumptions about the evolution of anthropogenic climate forcings, in particular emissions and concentrations of greenhouse gases and aerosols, but also changes in land use. Possible pathways used to be presented in the form of emission scenarios, but today more broadly defined *'socio-economic pathways*' (SSPs) are available. Climate change scenarios are a tool for finding the limits of possible future developments. Estimates of future climate can be made in different ways. Nowadays they are mostly based on the outputs of global climate models, with possible application of downscaling approach. The model outputs then need to be subjected to some form of post-processing before further application in order to reduce the impact of known model errors. The extent of uncertainty associated with the resulting data should also be assessed. In particular, the procedures used in the PERUN project will be presented, but also other options, including recent approaches such as storylines and global warming levels will be mentioned.

Keywords: anthropogenic climatic forcings – socio-economic pahtway – climate change scenario

1. Úvod

Scénáře změny klimatu představují přijatelné alternativní stavy klimatu v budoucnosti, které mohou nastat za určitých předpokladů o vývoji antropogenních vlivů na klima, zejména emisí a koncentrací skleníkových plynů a aerosolů. Vliv přirozených faktorů, jako je sopečná činnost či změny sluneční aktivity se většinou v těchto scénářích neuvažují, především z důvodu jejich omezené předpověditelnosti. Scénáře jsou tedy nástrojem pro nalezení rámce či meze budoucího vývoje. V žádném případě se nejedná o předpovědi budoucího vývoje

v deterministickém smyslu. V současnosti jsou obvykle scénáře postaveny na výstupech klimatických modelů, dříve byly používány i jiné přístupy, např. hledání analogů v geologické minulosti Země apod. (viz např. IPCC-TGICA 2007). S rostoucí dostupnou výpočetní kapacitou a pokrokem ve formulaci klimatických modelů se v poslední době pozornost upírá téměř výhradně na klimatické modely.

2. Scénáře emisí

Prvním krokem před samotným odhadem budoucích změn klimatu je stanovení možného vývoje faktorů, které klima ovlivňují. Míru jejich působení lze posoudit podle tzv. radiačního působení na klimatický systém. Jde o vliv uvažovaných faktorů na radiační bilanci na horní hranici atmosféry (Forster et al. 2007). Radiační působení se udává ve $W \cdot m^{-2}$. Kladné radiační působení implikuje zvýšení radiační bilance a tedy oteplení klimatického systému.

Vývoj v oblasti nových technologií, ekonomie, životního stylu i politických opatření je značně nejistý. Proto se pro odhady dopadů možných změn klimatu používají scénáře možného socio-ekonomického vývoje. Jednou z prvních generací byly tzv. SRES emisní scénáře (zkratka odvozená ze „*Special report on emission scenarios*“, Nakićenović et al. 2000). Tyto scénáře počítaly s různými směry demografického, společenského, ekonomického, technologického i ekologického vývoje společnosti. Žádnému se nepřisuzovala větší ani menší pravděpodobnost ani přijatelnost. SRES emisní scénáře byly vyvinuty tak, že nejdříve bylo vytvořeno celkem 40 různých socio-ekonomických scénářů a následně byl pro každý z nich navržen možný vývoj antropogenních emisí skleníkových plynů a aerosolů. Tento „sériový“ postup byl značně časově náročný a málo pružný (Moss et al. 2010), proto byl postupně nahrazen jiným přístupem. Nový „paralelní“ přístup vedl k vytvoření čtyř tzv. „*Representative concentration pathways*“ (RCPs). Ty charakterizují různé možnosti vývoje koncentrací skleníkových plynů, aerosolů a změn využívání povrchu v průběhu 21. století (Moss et al., 2010). Číselné označení RCP popisuje odhad radiačního působení v roce 2100 oproti období před průmyslovou revolucí. Nejnovější přístup představují SSPs (shared socio-economic pathways), které svým způsobem kombinují oba předchozí přístupy. Klasifikují různé možnosti vývoje společnosti a přístupy k adaptaci a mitigaci změn klimatu (jako to bylo u SRES scénářů), ale využívají odhady radiačního působení pro studium dopadů změny klimatu (jako RCPs). Základní rozdělení SSPs je ukázáno na obr. 1. V dalším textu budeme pro jednoduchost často používat termín emisní scénář i pro RCPs nebo SSPs.

Obr. 1 Schematické znázornění charakteristik jednotlivých „shared socio-economic pathways“. Převzato z O'Neill et al. (2014).
Fig. 1 Schematic overview of shared socio-economic pathways. Adopted from O'Neill et al. (2014).

3. Globální klimatické modely a metody zmenšování měřítka

V posledních dvou desetiletích je dominantní metodou tvorbou scénářů změny klimatu pro daný emisní scénář použití klimatických modelů, tedy numerických modelů procesů v klimatickém systému. V nejnovějších globálních klimatických modelech (GCM), nebo přesněji „*Earth system models (ESMs)*“, jsou zahrnuty i komponenty popisující celou řadu dějů v oceánu, na mořském ledu, zemském povrchu, chemismus atmosféry i procesy v biosféře. V některých modelech je tak dokonce možná simulace uzavřeného uhlíkového cyklu a tím přímé určení koncentrací CO_2 na základě předepsaných emisí (Taylor et al. 2012). Jde o vskutku revoluční pokrok, protože dosud bylo nutné klimatickým modelům předepisovat přímo koncentrace skleníkových plynů, což vnášelo nepřesnosti do modelové simulace.

Z různých typů experimentů prováděných s GCM jsou pro tvorbu scénářů změny klimatu klíčové dva. Jednak historické běhy, tedy simulace pro zvolené referenční období, kdy jsou modelu zadávány vnější vlivy (okrajové podmínky) podle známých pozorování. Na těchto simulacích se jednak hodnotí schopnost GCM simulovat základní klimatické charakteristiky, dále pak slouží jako základní kámen pro vytvářený scénář (viz dále). Dále jsou důležité samozřejmě samotné scénářové běhy, tzn. simulace pro zvolené budoucí období, kdy jsou modelu vnější vlivy zadávány podle zvoleného emisního scénáře. V poslední generaci CMIP6 GCMs (Eyring et al. 2016) jsou scénářové běhy startovány v roce 2015 a pokračují do roku 2100 nebo dále.

Horizontální rozlišení atmosférické části GCM se pohybuje mezi 0.5° až 4° zeměpisné délky/šířky. Jejich výstupy jsou tedy použitelné v globálním či kontinentálním měřítku, ale pro aplikace v měřítku regionálním či lokálním je nutné uplatnit některou z metod zmenšování měřítka (downscalingu). Tyto metody lze rozdělit do dvou hlavních skupin. Prvním je statistický downscaling, založený na popisu statistických vztahů mezi velkoprostorovými prediktory a klimatickými prvky v regionálním či lokálním měřítku. Tyto vztahy jsou zjišťovány na pozorovaných datech, a následně aplikovány na výstupy GCM. Bližší popis metod statistického downscalingu viz např. (Huth 2002; Maraun et al. 2015). Zcela odlišným přístupem je dynamický downscaling, tedy aplikace numerického modelu analogicky ke GCM, kdy ale simulace neprobíhá na celém glóbu, ale pouze na určité omezené oblasti. Tyto numerické modely se nazývají regionální klimatické modely (RCM). Okrajové podmínky zadávané na hranicích integrační domény jsou přebírané buď z výstupů GCM, anebo z reanalýz. Horizontální rozlišení RCM je v současnosti obvykle méně než 25 km, výjimkou nejsou simulace v tzv. „*convection-permitting*“ módu s rozlišením pod 3 km (Lucas-Picher et al. 2021).

4. Zpracování modelových výstupů a tvorba scénáře

Tvorba scénáře, postaveného na výstupech GCM nebo RCM, může probíhat různými způsoby. Při výběru konkrétního postupu je potřeba zohlednit účel, pro který je scénář tvořen (region, časové období, proměnné). Je důležité mít na paměti, že základem všech metod tvorby scénáře změny klimatu jsou kvalitní pozorovaná data. Bez nich by nebylo možné validovat klimatické modely ani aplikovat žádnou z dále zmíněných metod.

Nejjednodušším postupem je tzv. delta metoda. Z historického a scénářového modelového běhu se spočtou dlouhodobé průměry pro zvolená časová období (z historického běhu pro referenční období, ze scénářového pro budoucí období), a spočte se jejich rozdíl. Podle povahy zkoumané veličiny se jedná buď o relativní, nebo absolutní rozdíl. Vypočtená hodnota představuje modelový odhad změny průměrné hodnoty dané veličiny. Podobně lze určovat i změny dalších statistických charakteristik, např. variability. Zjištěné odhady změn následně

poslouží k modifikaci pozorovaných časových řad v referenčním období. Delta metoda byla v projektu PERUN použita pro první odhady změn teploty a srážek.

Pokročilejší metodou, která byla a je používána pro zpracování výstupů modelu ALADIN-CLIMATE/CZ je tzv. postprocessing nebo „bias-korekce“, kdy jsou simulované časové řady pro budoucí období upravovány tak, aby byly odstraněny odchylky (chyby) zjištěné jako rozdíly mezi časovými řadami v historickém běhu a pozorovanými hodnotami. Jednou z nejrozšířenějších metod je kvantilová metoda (Déqué 2007), která aplikuje korekce pro jednotlivé kvantily statistického rozložení zkoumané veličiny. Základním předpokladem, na kterém stojí všechny metody bias-korekce je, že modelové chyby jsou konstantní v čase, a tedy korekce nastavená pro referenční období bude platná a dostačující i pro období budoucí. Nevýhodou většiny těchto metod je navíc fakt, že korekce jsou určovány a aplikovány pro jednotlivé proměnné zvlášť. Hrozí tak zpřetrhání fyzikálních vztahů mezi meteorologickými prvky. Tento problém alespoň částečně řeší nové postupy, které zohledňují právě vícerozměrnou povahu meteorologických dat (Canon 2018).

Existují i další metody pro tvorbu scénářů změny klimatu, např. „pattern scaling“ (viz např. Lee et al. 2021) nebo použití generátorů počasí (viz např. Wilks 2010).

5. Zdroje nejistot

Pokud odhlédneme od nejistoty ve vývoji faktorů, které klima ovlivňují, tak nejistoty ve výstupech klimatických modelů vycházejí ze dvou hlavních zdrojů: nejistá reakce klimatického systému na dané vnější působení a velikost a povaha vnitřní variability (proměnlivost vycházející z nelineární deterministicky chaotické povahy klimatického systému) (viz např. Abramowitz et al. 2019). Nejistotu vycházející z vnitřní variability klimatu odhadujeme pomocí souborů simulací jednoho GCM s „perturbovanými“, tj. mírně pozměněnými, počátečními podmínkami. Odhad celkové nejistoty je obvykle postaven na rozsahu multi-modelového souboru (ansámblu). GCMs dnes existuje na šest desítek, do jisté míry se vzájemně liší svou strukturou, tj. zejména prostorovým a časovým rozlišením, typem sítě uzlových bodů, použitými numerickými metodami a schématy pro parametrizaci procesů malých měřítek. Nikdy ale nebudeme schopni vytvořit takový multi-modelový soubor, který by vystihoval celý rozsah neurčitosti. V poslední době intenzivně diskutované téma je vzájemná podobnost některých modelů, kterou je třeba nějakým způsobem zohlednit při zpracování jejich výstupů (viz např. Merrifield et al. 2023).

Rozsah neurčitosti postavený na základě multi-modelového souboru lze zmenšit pomocí vážení modelů, příkladem jednoho z nejnovějších přístupů může být např. „*ClimWIP*“ (Brunner et al. 2020). V této metodě je kombinováno hodnocení schopnosti modelů vystihnout klima ve zvoleném referenčním období a vzájemná závislost modelů (menší váha je dána modelům, které mají v ansámblu své blízké „příbuzné“).

6. Závěr

Vedle výše popsaných, dnes už prakticky „klasických“ metod tvorby klimatických scénářů a hodnocení souvisejících nejistot, chceme závěrem zmínit i alternativní přístup, který se v odborné literatuře čím dál více objevuje. Jedná se o „storylines“, které představují určité „příběhy“, které mohou za daných okolností v budoucnu nastat (Shepherd et al. 2019). Zpravidla se takové analýzy zaměřují na nějaký konkrétní region a určitý aspekt klimatu. Může se jednat např. o analýzu toho, jaký by mělo dopad nějaké určité adaptační nebo mitigační opatření na lokální úrovni. Jiným příkladem může být zkoumání dopadů velmi silných bouří na určitý region a možný vliv opatření v rámci městské zástavby apod. (Shepherd et al. 2019).

Dále je nutné zmínit problém, který se týká nejnovější generace CMIP6 globálních modelů. U některých z nich byla totiž zjištěna výrazně vyšší citlivost klimatu (climate sensitivity, tj. reakce klimatického systému na zdvojnásobení koncentrací oxidu uhličitého) než u předešlé generace. Výsledkem je řada projekcí změny klimatu, které dávají výrazně vyšší změny průměrné globální teploty. Tato vyšší citlivost pravděpodobně neodpovídá realitě (Hausfather et al. 2022). Zároveň ale nelze jednoduše vynechat z našich analýz všechny modely, které mají citlivost vyšší než je určitá zvolená mez. Jedním z řešení tohoto problému, které se nabízí, je metoda „global warming levels“. Zde se pro konkrétní hodnotu změny globální průměrné teploty hledá regionální odpověď, např. pro aktuální cíle globálního oteplení o 1,5 °C nebo 2 °C. Nastává zde tedy posun od zkoumání klimatu v určitém časovém období ke zkoumání klimatických podmínek na regionální úrovni za daných globálních průměrných hodnot. Zůstává ještě řada otevřených otázek, např. závislost na trajektorii předcházející dosažení dané hodnoty oteplení (např. James et al. 2017).

V neposlední řadě zmíníme přístup „seamless prediction“, který lze do češtiny přeložit asi jako „bezešvá předpověď“. Smazávají se zde hranice mezi deterministickou předpovědí počasí a projekcemi vývoje klimatu, protože v klimatickém systému probíhá množství procesů a zpětných vazeb na celém spojitém spektru časových a prostorových měřítek (Hurrel et al. 2007). Určitým vyústěním tohoto přístupu jsou nejnovější inciativy, které si kladou za cíl vytvoření tzv. „digital twins“, tedy počítačových modelů vybraných komponent klimatického systému do všech detailů. V Evropě nyní např. vzniká ambiciózní projekt „*Destination Earth*“ (https://destination-earth.eu/). V kombinaci s nástroji strojového učení (machine learning) slibují takovéto iniciativy velký pokrok ve zkoumání procesů v klimatickém systému a možný posun v tvorbě scénářů změny klimatu.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

ABRAMOWITZ, G., HERGER, N., GUTMANN, E., HAMMERLING, D., KNUTTI, R., LEDUC, M., et al., 2019. ESD reviews: Model dependence in multi-model climate ensembles: Weighting, sub-selection and out-of-sample testing. *Earth System Dynamics*, **10**(1), 91–105. https://doi.org/10.5194/esd-10-91-2019

BRUNNER, L., PENDERGRASS, A. G., LEHNER, F., MERRIFIELD, A. L., LORENZ, R., KNUTTI, R., 2020. Reduced global warming from CMIP6 projections when weighting models by performance and independence. *Earth System Dynamics*, **11**(4), 995–1012.

CANNON, A. J., 2018. Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate dynamics*, **50**, 31–49. https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6

DÉQUÉ, M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, **57**, 16–26.

EYRING, V., BONY, S., MEEHL, G. A., SENIOR, C. A., STEVENS, B., STOUFFER, R. J., et al., 2016. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model. Dev.*, **9**(5), 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

FORSTER, P., RAMASWAMY, V., ARTAXO, P., BERNTSEN, T., BETTS, R., et al., 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

HAUSFATHER, et al., 2022. Climate simulations: recognize the 'hot model'problem. *Nature*, 605.7908 (2022): 26–29.

HURRELL, J., BADER, D., DELWORTH, T., KIRTMAN, B., MEEHL, J., et al., 2007. Seamless Prediction. White paper for the U.S. Inter-Agency Working Group on Climate Modeling.

HUTH, R., 2002. Statistical Downscaling of Daily Temperature in Central Europe. *Journal of Climate*, **15**, 1731–1742.

IPCC-TGICA, 2007. General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment, 66 pp.

JAMES, R., et al., 2017. Characterizing half-a-degree difference: a review of methods for identifying regional climate responses to global warming targets. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **8**(2), e457.

LEE, J.-Y., MAROTZKE, J., BALA, G., CAO, L., CORTI, S., et al., 2021. Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553–672, https://doi.org/10.1017/9781009157896.006

Lucas-Picher, P., Argüeso, D., Brisson, E., Tramblay, Y., Berg, P., Lemonsu, A., et al., 2021. Convection-permitting modeling with regional climate models: Latest developments and next steps. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **12**(6), e731.

MARAUN, D., et al., 2015. VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. *Earth's Future*, **3**(1), 1–14. https://doi.org/10.1002/2014EF000259

MEINSHAUSEN, M., NICHOLLS, Z. R., LEWIS, J., GIDDEN, M. J., VOGEL, E., FREUND, M., et al., 2020. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development*, **13**(8), 3571–3605. https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020

MERRIFIELD, A. L., BRUNNER, L., LORENZ, R., HUMPHREY, V., KNUTTI, R., 2023. Climate model Selection by Independence, Performance, and Spread (ClimSIPS v1. 0.1) for regional applications. *Geoscientific Model Development*, **16**(16), 4715–4747.

MOSS, R. H., EDMONDS, J. A., HIBBARD, K., MANNING, M., ROSE, S. K., et al., 2010. The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. *Nature*, **463**(7282): 747–756. https://doi.org/10.1038/nature08823

NAKIĆENOVIĆ, N., SWART, R. (Eds.), 2000. Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

O'NEILL, B.C., KRIEGLER, E., RIAHI, K., et al., 2014. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, **122**, 387–400.

SHEPHERD, T. G., 2019. Storyline approach to the construction of regional climate change information. *Proceedings of the Royal Society*, A 475.2225:20190013. https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rspa.2019.0013

TAYLOR, K., STOUFFER, R. J., MEEHL, G. A., 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of American Meteorological Society*, **93**, 485–498. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1

WILKS, D. S., 2010. Use of stochastic weathergenerators for precipitation downscaling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **1**(6), 898–907.

Hodnocení nejistoty připravovaných scénářů změny klimatu
(Assessment of uncertainty of the PERUN climate change scenarios)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.04

Eva Holtanová, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova,
eva.holtanova@matfyz.cuni.cz
Tomáš Halenka, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova,
tomas.halenka@matfyz.cuni.cz

Abstrakt: Základním zdrojem dat o možném vývoji klimatu v České republice je v rámci projektu PERUN série simulací modelu ALADIN-CLIMATE/CZ řízená globálním klimatickým modelem CNRM-ESM2-1. Pro odhady nejistot, kterými je každý scénář změny klimatu zatížen, slouží další dostupné modelové simulace, zejména soubory běhů CMIP5 a CMIP6 globálních klimatických modelů, Euro-CORDEX regionálních klimatických modelů, a dalších nových simulací ve vysokém horizontálním rozlišení. Příspěvek představí výsledky analýzy nejistot z těchto datových zdrojů, konkrétně bude pozornost věnována porovnání řídícího modelu CNRM-ESM2-1 s ostatními globálními modely.

Klíčová slova: antropogenní vlivy na klima – socio-ekonomický scénář – scénář změny klimatu

Abstract: The main source of data about possible future climate change over the Czech Republic studied within the project PERUN is a series of ALADIN-CLIMATE/CZ model simulations driven by the global climate model CNRM-ESM2-1. Other available model simulations, in particular the CMIP5 and CMIP6 global climate models, Euro-CORDEX regional climate models, and other new simulations at high horizontal resolution, will be used to estimate the uncertainties in the climate change scenarios. This paper presents examples of such uncertainty analysis.

Keywords: anthropogenic climatic forcings – socio-economic pahtway – climate change scenario

1. Úvod

Základním zdrojem dat o možném vývoji klimatu v České republice je v rámci projektu PERUN série simulací modelu ALADIN-CLIMATE/CZ řízená globálním klimatickým modelem CNRM-ESM2-1. Nejistota spojená s neznámým vývojem emisí skleníkových plynů, změn ve využívání povrchu a dalších lidských aktivit, které mohou potenciálně ovlivnit podnebí, je zohledněna díky použití několika scénářů, resp. tzv. SSPs (shared socio-economic pathways). Tyto SSPs zahrnují celou řadu procesů, v dalším textu budeme pro zjednodušení používat termín „emisní scénář“. Více informací o SSPs lze nalézt např. v Meinshausen et al. (2020). V předchozí generaci modelových simulací byly využívány „representative concenration pathways“ (RCPs, Moss et al., 2010). Číselné označení daného scénáře indikuje velikost změny (nárůstu) radiačního působení očekávané na konci 21. století oproti polovině 19. století.

Jelikož jsou ale výstupy klimatických modelů (pro daný emisní scénář) nevyhnutelně zatíženy celou řadou nejistot (Abramowitz et al. 2019; Holtanová a Kalvová 2015), je nutné navržený scénář doprovodit odhadem rozsahu neurčitosti. Zdroje nejistot lze rozdělit do dvou hlavních skupin. Prvním je vnitřní variabilita klimatu a druhým je samotná formulace modelu, kam patří celé spektrum metod, rozlišení modelu, parametrizace apod. U použití regionálního klimatického modelu sem pak spadá i interakce mezi řídícím a vnořeným modelem, a vnořený model samotný.

Vliv vnitřní variability na projekce budoucího klimatu lze do jisté míry zohlednit použitím tzv. „pertureb initial conditions ensemles“, tedy souborů simulací jednoho modelu s modifikovanými počátečními podmínkami. Nejistotu spojenou se strukturou samotného modelu odhadujeme pomocí ansámblů simulací různých modelů. Ani jeden „typ“ nejistoty nejsme schopni postihnout v celé šíři, takže předpokládáme, že výsledný odhad nejistoty skutečnou neurčitost spíše podhodnocuje (Abramowitz et al. 2019).

V souvislosti s nejnovější generací globálních klimatických modelů CMIP6 (Eyring et al. 2016) je kromě zmíněných dvou skupin zdrojů nejistot diskutována i nejistota ve velikosti citlivosti klimatu, tzn. výraznosti reakce klimatického systému na určité vnější působení. Ukazuje se, že některé modely z nové generace mají výrazně větší tuto citlivost než jejich předchůdci. „Citlivější“ modely pak dávají vyšší hodnoty změn teploty pro daný emisní scénář (v globálním, ale často i v regionálním měřítku, viz např. Hausfather et al. 2022). Existují různé postupy, jak se s touto nejistotou vypořádat. Jedním z nich je výběr pouze určité skupiny modelů, s vyřazením těch, které mají nejvyšší citlivost, anebo určité „vážení“ modelů, např. na základě jejich schopnosti simulovat klimatické charakteristiky v nedávné minulosti.

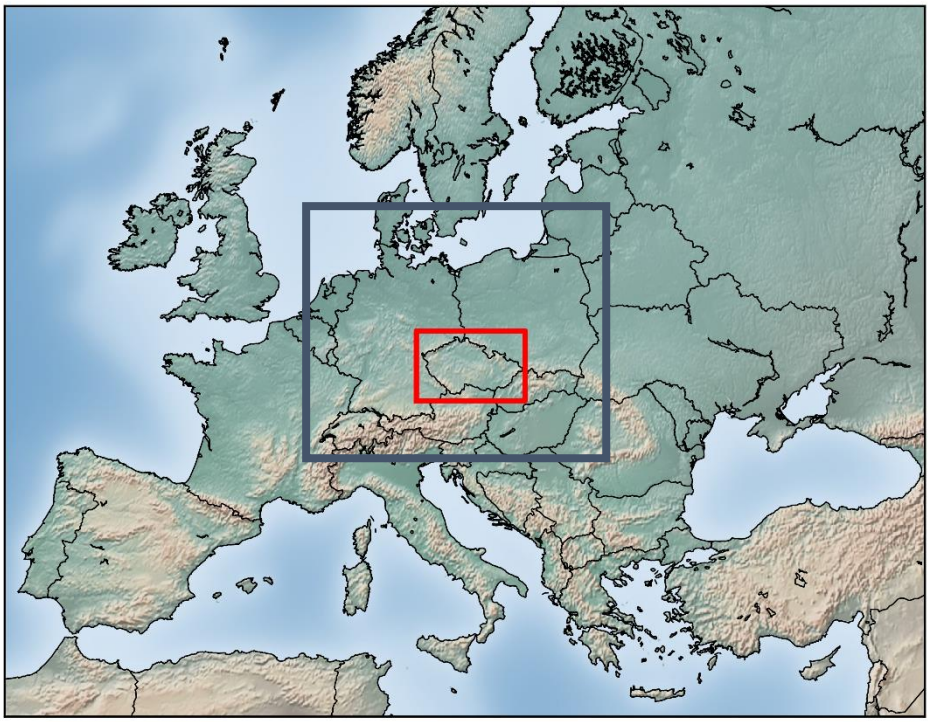
V tomto příspěvku představíme dvě ukázky hodnocení nejistoty. Změny průměrného ročního chodu teploty vzduchu a srážek simulované „naším“ řídícím modelem CNRM-ESM2-1 budou porovnány s rozsahem změn podle dvou souborů globálních klimatických modelů (generace CMIP5 a CMIP6). Zde bude ukázán i rozsah nejistoty daný vnitřní variabilitou modelu. Změny v průměrných četnostech vybraných extrémních charakteristik dané opět CNRM-ESM2-1 budou porovnány se souborem simulací CMIP6, a bude ukázán možný postup pro zohlednění úspěšnosti modelů ve vystižení klimatu v posledních desetiletích.

Zde představené výsledky byly převzaty z našich publikací Holtanová et al. (2022) a Dhib et al. (2023).

2. Data

Byly použity výstupy CMIP5 (Taylor et al. 2012) a CMIP6 (Eyring et al. 2016) globálních klimatických modelů. Zvláštní pozornost je věnována modelu CNRM-ESM2-1 z generace CMIP6, který je použit jako řídící model pro simulaci modelu ALADIN-CLIMATE/CZ v projektu PERUN. Představené analýzy byly provedeny pro oblast střední Evropy s Českou republikou ve středu studované oblasti (viz obr. 1), modelové výstupy v jednotlivých uzlových bodech byly zprůměrovány přes vybranou obast. Data byla zpracována prostřednictvím uživatelské platformy Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ).

Pozornost je věnována změnám simulovaných hodnot pro období 2070–2099 v porovnání s referenčním obdobím 1961–1990. V části 3.1 bylo použito 47 CMIP5 modelů a 57 CMIP6 modelů. Pro model CNRM-ESM2-1 byly použity ještě další členy ansámblu s perturbovanými počátečními podmínkami, konkrténě pro scénář SSP2-4.5 deset členů, pro scénář SSP5-8.5 jen pět členů (více nebylo k dispozici). V části 3.2 bylo použito 48 CMIP6 globálních modelů pro čtyři různé emisní scéníře SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 a SSP5-8.5.



Obr. 1 Geografické oblasti, pro které byly provedeny analýzy v části 3.1 (červený obdélník) a 3.2 (modrý obdélník).
Fig. 1 Areas of analysis in section 3.1 (red rectangle) and 3.2 (blue rectangle).

3. Ukázky hodnocení nejistoty

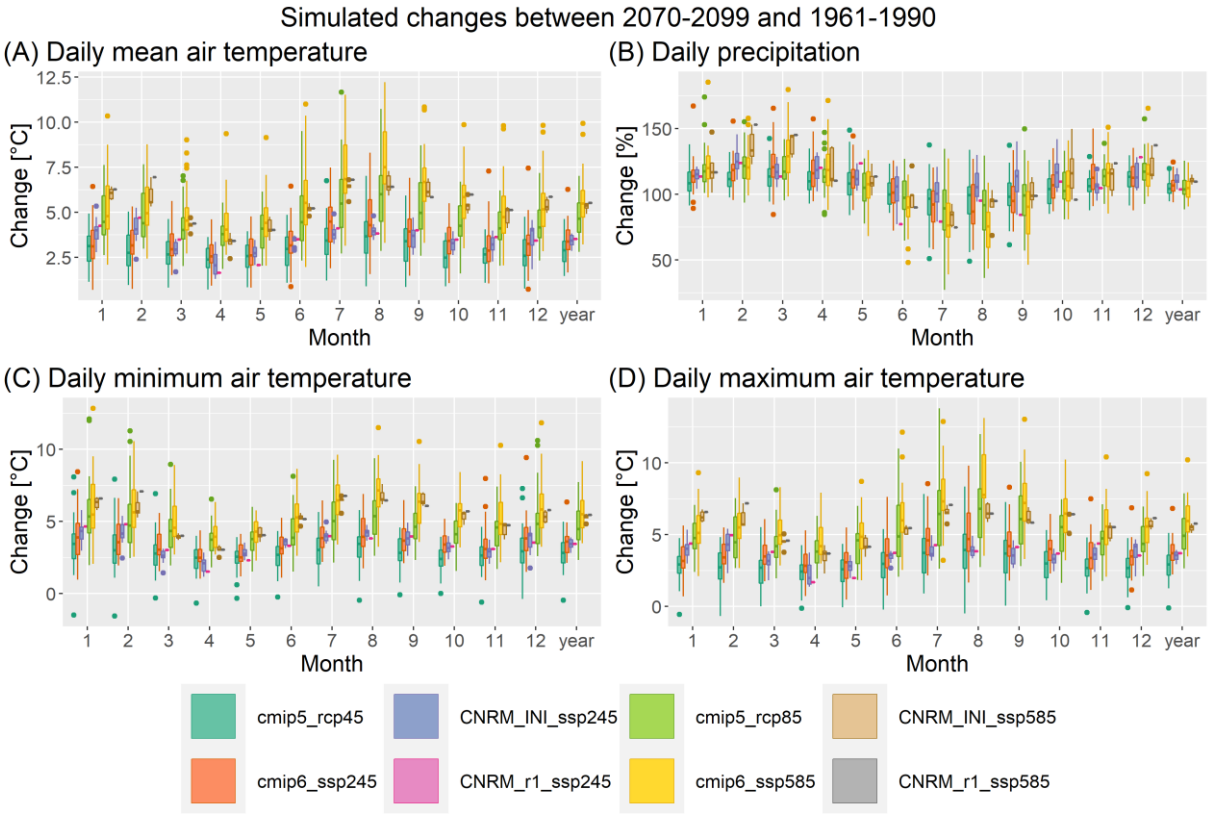
Odhad nejistoty je proveden na základě rozsahu studovaného ansámblu simulací. Tento rozsah může být zhodnocen na základě některé charakteristiky rozptýlenosti, např. směrodatné odchylky. V tomto příspěvku ilustrujeme rozsah souboru simulací pomocí zobrazení tzv. boxplotů, tj. krabicových grafů, kde horizontální úsečka uvnitř „boxu“ ukazuje polohu mediánu daného souboru, hranice „boxu“ odpovídají dolnímu a hornímu kvartilu, vertikální úsečky udávají rozsah 1,5násobku mezikvartilového rozpětí, a případné body ukazují polohy odlehlých hodnot.

3.1 Změny ročního chodu teploty vzduchu a srážek

V této části je ilustrováno hodnocení rozsahu nejistoty simulovaných změn průměrných měsíčních teplot vzduchu (průměrné, minimální a maximální denní teploty vzduchu) a srážek v období 2070–2099 oproti období 1961–1990 (obr. 2). Porovnány jsou dva emisní scénáře, mírnější scénář počítá s nárůstem radiačního forcingu o 4,5 $W \cdot m^{-2}$ (RCP4.5, SSP2-4.5), méně optimistický scénář s nárůstem 8,5 $W \cdot m^{-2}$ (RCP8.5, SSP5-8.5). Teplotní změny jsou ve všech měsících kladné, s nejvyšším očekávaným nárůstem teploty v letních měsících, nejnižší změny jsou simulovány v zimě a na jaře (obr. 2). GCM z generace CMIP6 dávají většinou vyšší změny teploty než CMIP5, rozdíl mezi generacemi je větší v létě a na podzim. Roční průměrné teplotní změny simulované modelem CNRM-CM2-1 (řídící simulace pro regionální simulaci v projektu PERUN) jsou blízko mediánu celého multi-modelového souboru. V zimě je tato simulace mezi modely, které dávají vyšší teplotní změny, v létě spíše naopak.

Pokud se týká změn srážek, tak průměrné roční změny jsou u většiny modelů mírně kladné (medián modelů v obou zkoumaných souborech odpovídá nárůstu ročních srážek o 5 %). V zimní části roku se většina modelů shoduje na mírném nárůstu srážek, v létě se ale modely zcela neshodují na znaménku změny. U CMIP5 modelů je medián celého souboru blízko nule,

některé modely dávají mírný nárůst srážek, jiné pokles. CMIP6 modely dávají spíše pokles letních srážek, výraznější u scénáře SSP5-8.5. Simulace CNRM-ESM2-1 předpokládá pokles srážek o 10 až 25 % v letní polovině roku, a nárůst srážek v podobném rozsahu v dalších měsících, přičemž rozdíly mezi jednotlivými scénáři jsou jen nepatrné.



Obr. 2 Simulované změny měsíčních průměrů průměrné denní teploty vzduchu (A), denního úhrnu srážek (B), minimální denní teploty vzduchu (C) a denních maximálních teplot vzduchu (D) pro období 2070–2099 v porovnání s obdobím 1961–1990, průměr pro oblast České republiky. "Year" označuje průměrnou roční změnu. Boxploty znázorňují medián, dolní a horní kvartily, vertikální úsečky udávají rozsah 1,5násobku mezikvartilového rozpětí, a případné body ukazují polohy odlehlých hodnot. Výsledky jsou ukázány pro GCM generace CMIP5 podle RCP4.5 a RCP8.5, CMIP6 podle SSP2-4.5 a SSP5-8.5 a mini-ansámbl modelu CNRM-ESM2-1 s perturbovanými počátečními podmínkami. (Převzato z Holtanová et al. 2022)

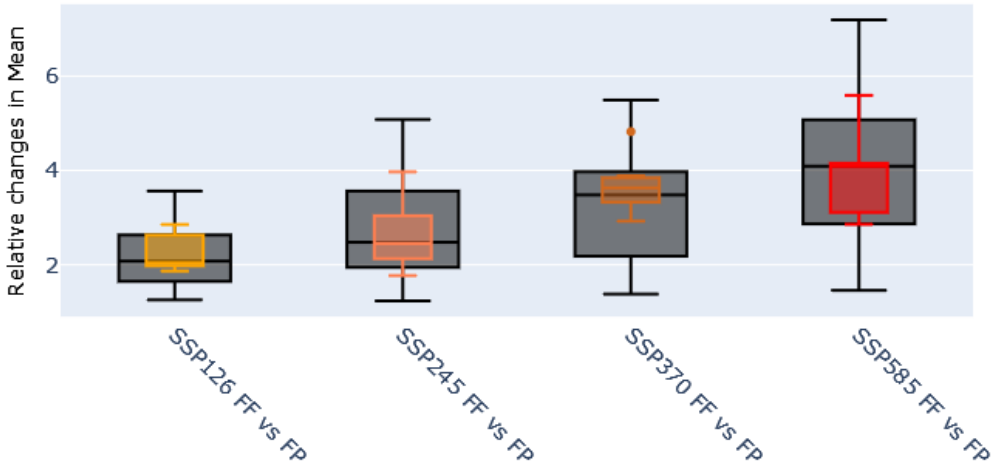
*Fig. 2 Projected changes of monthly means of daily mean air temperature (A), daily precipitation amount (B), daily minimum air temperature (C) and daily maximum air temperature (D) for the period of 2070–2099 in comparison to 1961–1990 averaged over the area of the Czech Republic, "year" denotes annual mean change. Boxplots show intra-ensemble statistical distribution (median, lower and upper quartiles, whiskers representing 1.5 *IQR, and outliers as dots) of CMIP5 under RCP4.5 (dark green), CMIP6 under SSP2-4.5 (orange), perturbed initial conditions mini-ensemble of CNRM-ESM2-1 GCM under SSP2-4.5 (10 members, blue), CMIP5 under RCP8.5 (light green), CMIP6 under SSP5-8.5 (yellow), perturbed initial conditions mini-ensemble of CNRM-ESM2-1 GCM under SSP5-8.5 (5 members, brown). The CNRM-ESM2-1 r1i1p1f2 simulation is plotted as a pink line for SSP2-4.5 and as grey line for SSP5-8.5. (published in Holtanová et al. 2022)*

3.2 Změny v četnostech extrémních situací

V této části ilustrujeme zhodnocení rozsahu nejistoty změn počtu letních dní, tj. dní s maximální denní teplotou vzduchu nad 25 °C, na základě souboru simulací CMIP6 globálních modelů. Obr. 3 ukazuje boxploty změn simulovaných pro čtyři různé emisní scénáře. Šedé boxploty ukazují rozsah celého dostupného souboru simulací, barevné boxploty odpovídají

výběru deseti modelů, které byly zhodnoceny jako nejúspěšnější v simulaci vybraných charakteristik klimatu v referenčním období 1961–1990 (více informací o výběru modelu lze nalézt v Dhib et al. 2023).

Jak je vidět na obr. 3, simulované relativní změny se pohybují v rozsahu 1,5 až 7, tzn. všechny modely pro všechny emisní scénáře počítají s nárůstem počtu letních dní na území střední Evropy na konci 21. století. Velikost změny narůstá s vyšším radiačním forcingem (tedy je nejnižší pro SSP1-2.6 a nejvyšší pro SSP5-8.5). Omezením výběru modelů na „nejlepší výběr“ (sytě barevné boxploty na obr. 3) bylo dosaženo snížení rozsahu souboru. Snížení hodnoty mediánu očekávaných změn bylo dosaženo pouze u scénáře SSP5-8.5, u ostatních scénářů tedy není takovýto výběr modelů řešením výše diskutovaného „citlivějších“ modelů. Některý jiný postup výběru anebo vážení modelů by ale pravděpodobně očekávaný výsledek mohl přinést, hodnocení modelů totiž vždy závisí na výběru kritérií a metrik (např. Holtanová et al. 2012).



Obr. 3 Relativní změny počtu letních dnů (dnů s maximální denní teplotou vzduchu nad 25 °C) simulované souborem CMIP6 globálních modelů podle čtyř SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-3.7, SSP5-8.5) pro období 2070–2099 (FF, „far future“) ve srovnání s referenčním obdobím 1961–1990 (FP, „far past“). Boxploty znázorňující rozložení celého souboru více modelů jsou šedé. Boxploty znázorňující rozložení nejlepších vybraných modelů jsou barevné.
Fig. 3 Relative changes in the number of summer days (days with maximum daily air temperature above 25 °C) as simulated by a suite of CMIP6 GCMs under four socio-economic pathways (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-3.7, SSP5-8.5) for the period of 2070–2099 (FF, far future) in comparison the reference period of 1961–1990 (FP, far past). The boxplots showing the distribution of the whole multi-model ensemble are grey. The boxplots showing the distribution of the best selected models are colored.

4. Závěr

Vyhodnocování nejistot je úzce spjato s hodnocením úspěšnosti modelů v simulaci pozorovaných klimatických charakteristik. Řada studií již potvrdila, že je prakticky nemožné vybrat jeden model, který by vykazoval nejlepší shodu s pozorováním ve všech hodnocených ohledech. Právě proto jsou využívány multi-modelové soubory (ansámbly) simulací.

Jak zde bylo ilustrováno, pro účely vytváření scénářů změny klimatu existují postupy, jak se alespoň částečně vyrovnat s neurčitostmi výstupů klimatických modelů. Nicméně je stále třeba základního výzkumu s cílem lépe porozumět tomu, co klimatické modely dokážou, a kde jsou naopak jejich slabiny. Zjemňování prostorového rozlišení, v poslední době až do módu

"*convection-permitting*" simulací, je zcela jistě správným krokem. Je ale nutno zdůraznit, že se tím automaticky nezlepšují všechny rysy simulovaného klimatu, vždy je nutno při aplikaci modelových výstupů v následných studiích postupovat obezřetně a zohlednit známé zdroje nejistot.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)".

Literatura

ABRAMOWITZ, G., HERGER, N., GUTMANN, E., HAMMERLING, D., KNUTTI, R., LEDUC, M., et al., 2019. ESD reviews: Model dependence in multi-model climate ensembles: Weighting, sub-selection and out-of-sample testing. *Earth Syst. Dyn.*, **10**(1), 91–105. https://doi.org/10.5194/esd-10-91-2019

DHIB, S., HOLTANOVÁ, E., VERMA, S., HALENKA, T., 2023. Projections of Climatic Extremes over Central Europe with performance based constraints. Weather and Climate Extremes, in preparation.

EYRING, V., BONY, S., MEEHL, G. A., SENIOR, C. A., STEVENS, B., STOUFFER, R. J., et al., 2016. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model. Dev.*, **9**(5), 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

HAUSFATHER, Z., et al., 2022. Climate simulations: recognize the 'hot model' problem. *Nature*, 605.7908:26–29.

HOLTANOVÁ, E., BELDA, M., HALENKA, T., 2022. Projected changes in mean annual cycle of temperature and precipitation over the czech Republic: Comparison of CMIP5 and CMIP6. *Frontiers in Earth Sciences*, **10**, 1018661. https://doi.org/10.3389/feart.2022.1018661

Holtanová, E., Halenka, T., 2023: Scénáře změny klimatu. In: Tolasz, R. (Ed.), Sborník příspěvků z První Konference projektu PERUN (TA ČR, SS02030040). ČHMÚ, Praha, s. 28–34, ISBN 978-80-7653-063-8. https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.04

HOLTANOVÁ, E., KALVOVÁ, J., 2015. Neurčitosti výstupů regionálních klimatických modelů. *Meteorologické zprávy*, **68**, 4, 116–123.

HOLTANOVÁ, E., MIKŠOVSKÝ, J., KALVOVÁ, J., PIŠOFT, P., MOTL,. M., 2012. Performance of ENSEMBLES regional climate models over Central Europe using various metrics. *Theoretical and Applied Climatology*, **108**, 463–470. https://doi.org/10.1007/s00704-011-0542-5

MEINSHAUSEN, M., NICHOLLS, Z. R., LEWIS, J., GIDDEN, M. J., VOGEL, E., FREUND, M., et al., 2020. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci. Model. Dev.*, **13**(8), 3571–3605. https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020

MOSS, R. H., EDMONDS, J. A., HIBBARD, K. A., MANNING, M. R., ROSE, S. K., van VUUREN, D. P., et al., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, **463**, 747–756. https://doi.org/10.1038/nature08823

Dlouhodobá předpověď teploty vzduchu a srážek pro letní měsíce v České republice

(Long-range forecast of air temperature and precipitation for summer months in the Czech Republic)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.05

Stanislava Kliegrová, Český hydrometeorologický ústav, stanislava.kliegrova@chmi.cz
Michal Belda, Katedra fyziky atmosféry, Univerzita Karlova
Ladislav Metelka, Český hydrometeorologický ústav
Petr Štěpánek, Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i., Český hydrometeorologický ústav

Abstrakt: Dlouhodobé předpovědi poskytující informace o očekávaných budoucích atmosférických a oceánských podmínkách na období jednoho až tří měsíců jsou atraktivní pro mnoho odvětví. Tato studie analyzuje vybrané globální modely pro dlouhodobé předpovědi dostupné v archivu Copernicus Climate Change Service (C3S), které poskytují data o teplotě vzduchu a srážkách v blízkosti povrchu v prostorovém rozlišení 1° x 1°, zaměřuje se na předpověď letních měsíců (počáteční datum 1. května) v období 2000–2016 (období hindcastů společné pro všechny globální modely) a oblast České republiky. Pro srovnání se používají datové soubory E-OBS denních napozorovaných dat pro srážky a teplotu vzduchu v prostorovém rozlišení 0,25°. Každý model pro dlouhodobé předpovědi má několik desítek členů ansámblu. Vzhledem ke způsobu vydávání a zpracování sezónních předpovědí mohou být při zveřejnění nejnovější předpovědi k dispozici naměřená data již za přibližně 25 dní. V analýze jsou uvažována 3 kritéria (korelační koeficient mezi denní teplotou vzduchu, rozdíl teploty vzduchu a rozdíl úhrnu srážek, vždy v prvních 24 dnech mezi členem ansámblu a E-OBS), na jejichž základě jsou vybrány ty členy ansámblu, které v počátečním období lépe popisují skutečný vývoj teploty vzduchu a srážek. V dalším zpracování jsou porovnávány výsledky pro soubor všech členů ansámblu a soubor členů vybraných podle stanovených kritérií.

Klíčová slova: dlouhodobá předpověď – ansámblová předpověď – vhodné členy ansámblu

Abstract: Long-range forecasts, providing information on expected future atmospheric and oceanic conditions for periods of one to three months, are attractive to many sectors. This study analyses selected global models for long-range forecasts available in the Copernicus Climate Change Service (C3S) archive, which provide air temperature and near-surface precipitation data at a spatial resolution of 1° x 1°, focusing on the forecast of the summer months (starting date 1 May) in the period 2000–2016 (a period of hindcasts common to all global models) and the area of the Czech Republic. E-OBS datasets of daily observed data for precipitation and temperature at a spatial resolution of 0.25° are used for comparison. Each long-range forecast model has several dozen ensemble members. Due to the way seasonal forecasts are issued and processed, measured data may be available for approximately 25 days when the latest forecast is published. In the analysis, 3 criteria are considered (correlation coefficient between daily air temperature, air temperature difference, and total precipitation difference, always in the first 24 days between an ensemble member and E-OBS), on the basis of which ensemble members are selected which in the initial period better they describe the actual course of temperatures and precipitation. In further processing, the results for the set of all members of the ensemble and the set of members selected according to the established criteria are compared.

Keywords: long-range forecast **–** ensemble forecast – credible ensemble members

1. Úvod

Předpovědi počasí na měsíc až několik měsíců dopředu jsou uživateli velmi žádané. Podle definice Světové meteorologické organizace (WMO) se předpovědi na více než 30 dnů a méně než 2 roky dopředu nazývají dlouhodobé předpovědi. Na časové škále leží mezi předpovědí počasí a předpovědí klimatu. Na současné úrovni poznání má dlouhodobá předpověď užitečnou hodnotu hlavně v tropickém pásu, kde existuje těsná vazba mezi převládajícím cirkulačním režimem a indexy popisujícími fáze velkoplošných oscilací, jako například ENSO (El Niño Southern Oscillation, respektive El Niño a Jižní Oscilace). Současné numerické předpovědní systémy kombinující globální cirkulační modely s modelem oceánu a kryosféry už dokážou tyto oscilace předpovědět, za příznivých podmínek až na několik sezón dopředu. Situace v mírných zeměpisných šířkách je podstatně méně příznivá. Dlouhodobá předpověď je tu prakticky na hranici použitelnosti, a to i při použití ansámblového přístupu.

V tomto příspěvku jsou zkoumány možnosti využití výsledků vybraných globálních modelů pro dlouhodobé předpovědi teploty vzduchu a srážek v letních měsících z archivu *Copernicus Climate Change Service* (C3S), se zaměřením na jejich statistické předzpracování pro oblast České republiky.

Každý model pro dlouhodobé předpovědi má několik desítek členů ansámblu, což komplikuje jejich další zpracování. Zejména kvůli potřebě konzistentnosti předpovědí jednotlivých meteorologických prvků nejsou vždy nejvhodnější průměrné hodnoty, případně jinak statisticky vytvořené řady, proto by pro mnoho účelů bylo dobré vybrat do dalšího zpracování „věrohodnější“ členy ansámblu.

2. Data

Tato studie zvažuje dva sezónní předpovědní systémy dostupné v archivu Copernicus Climate Change Service (C3S), které poskytují data o teplotě vzduchu a srážkách v blízkosti povrchu v prostorovém rozlišení 1° na 1°: Météo – France System 8 (MF) a Evropské středisko pro systém střednědobé předpovědi počasí SEAS5 (ECMWF).

Pro každý rok v období 2000–2016 (období hindcastů společné pro oba systémy) je stanoveno jedno počáteční datum (1. května) pro předpověď až na tři měsíce (červen, červenec, srpen) pro střed České republiky (jeden gridový bod: 15°E, 50°N).

Pro srovnání se používají datové soubory denních pozorování převedené do pravidelného gridu (E-OBS) pro srážky a teplotu vzduchu v prostorovém rozlišení 0,25°.

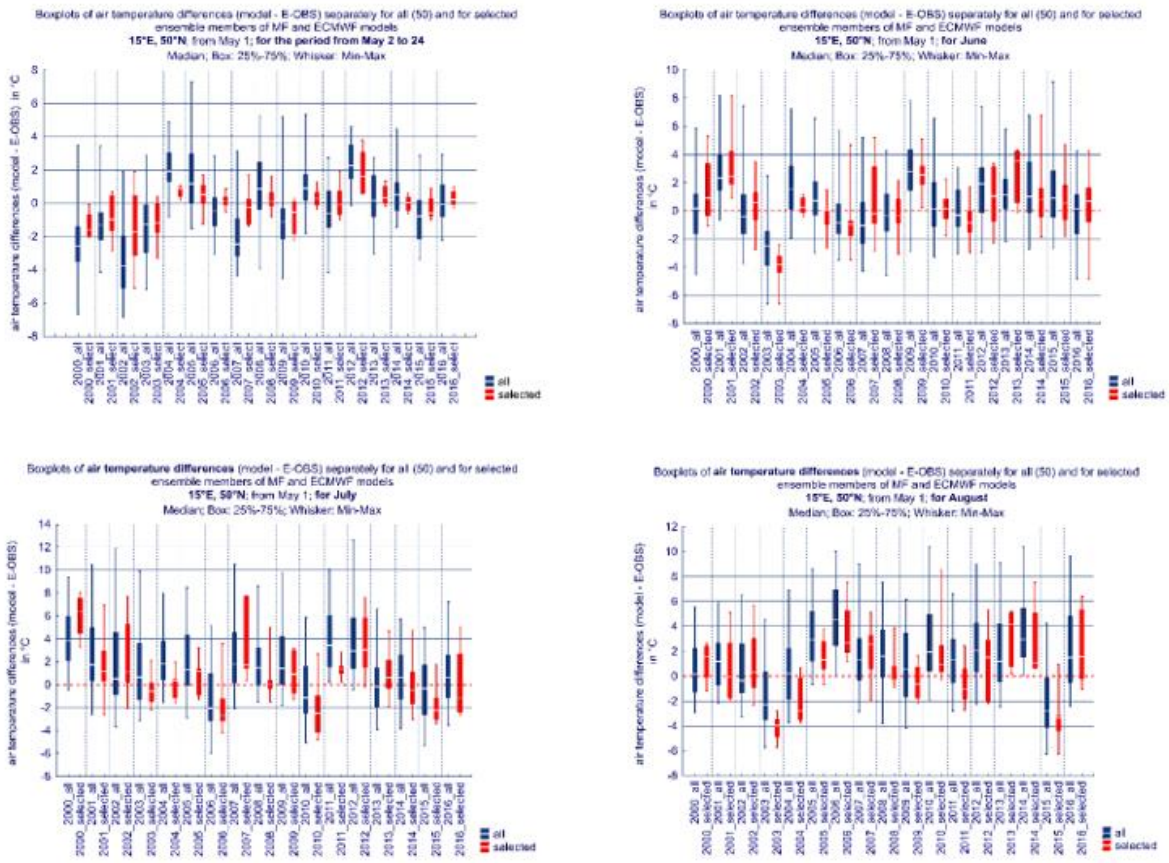
3. Metoda

Vzhledem ke způsobu vydávání a zpracování sezónních předpovědí mohou být při zveřejnění nejnovější předpovědi k dispozici naměřená data již za přibližně 25 dní. V analýze jsou uvažována 3 kritéria (Pearsonův korelační koeficient mezi denní teplotou vzduchu, rozdíl teploty vzduchu a rozdíl úhrnu srážek, vždy v prvních 24 dnech, mezi členem ansámblu a odpovídající řadou E-OBS), na jejichž základě jsou vybrány ty členy ansámblu, které v počátečním období lépe popisují skutečný vývoj teploty vzduchu a srážek.

3.1 Popis metody

Jsou uvažována následující 3 kritéria: 1. korelační koeficient mezi teplotou vzduchu za období 1. 5. až 24. 5. mezi každým členem ansámblu a odpovídající řadou E-OBS, 2. rozdíl mezi průměrnou teplotou vzduchu za období 1. 5. až 24. 5. mezi každým členem ansámblu a odpovídající řadou E-OBS, 3. rozdíl mezi sumou srážek za období 1. 5. až 24. 5. mezi každým členem ansámblu a odpovídající řadou E-OBS. Každému členu ansámblu je přiřazeno pořadí od „nejlepšího“ (číslo 1) po „nejhorší“ (číslo 50) podle dosažených výsledků, a to pro

každé ze tří uvažovaných kritérií zvlášť. Členy ansámblu jsou seřazeny podle součtu pořadí ze všech tří kritérií (skóre), kdy nejmenší součet znamená nejlepší výsledek. Do další analýzy jsou uvažovány členy ansámblu se skóre do 50. V jednotlivých letech se jedná o 4 až 10 členů ansámblu.



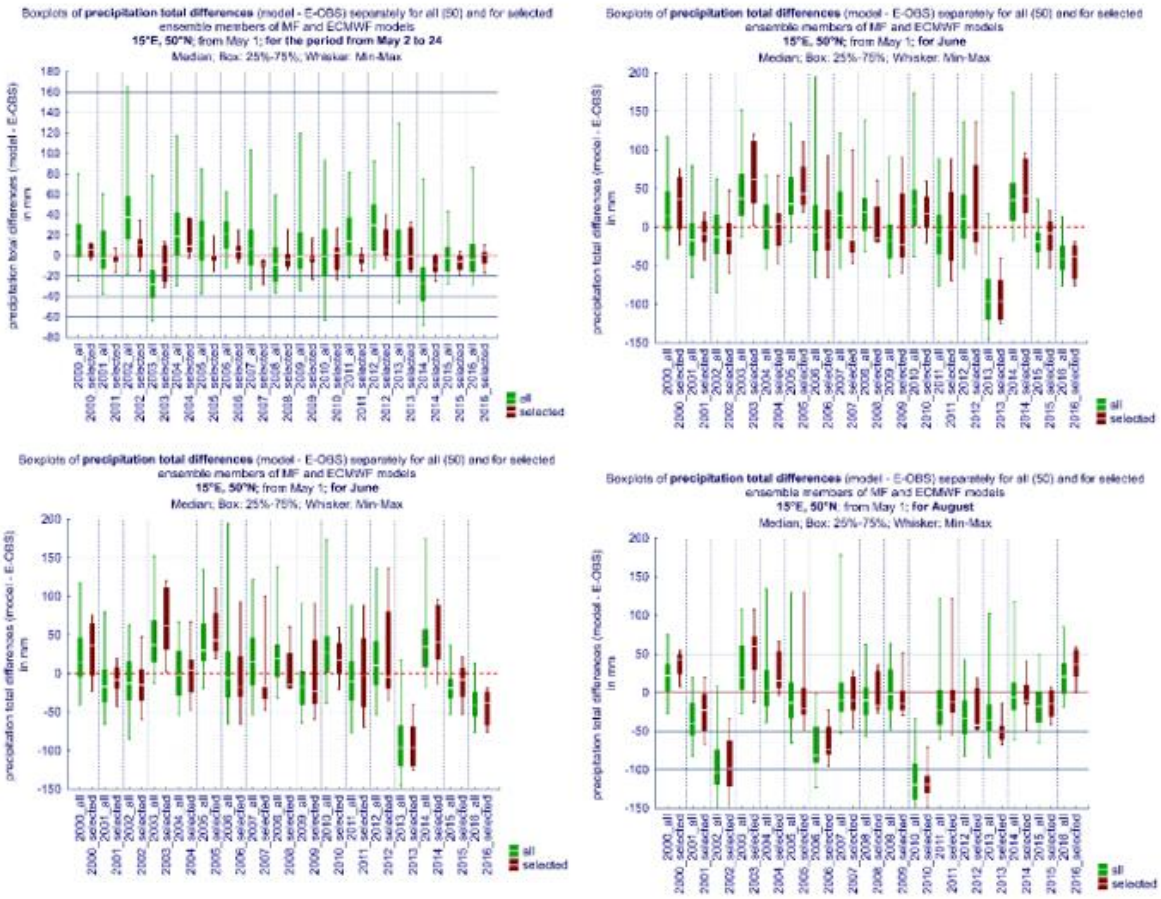
Obr. 1 Krabicové grafy průměrných rozdílů teploty vzduchu (vždy model – E-OBS) pro všechny členy ansámblu (all) a členy ansámblu vybraných podle stanovených kritérií (selected) za období 2. až 24. května (vlevo nahoře), červen (vpravo nahoře), červenec (vlevo dole) a srpen (vpravo dole), pro každý rok období 2000–2016. Obdelníčky znázorňují medián, 25. a 75. percentil těchto rozdílů, krajní body potom minimum a maximum.

Fig. 1 Boxplots of mean air temperature differences (always model – E-OBS) for the periods 2–24 May (upper left), June (upper right), July (lower left), and August (lower right), for each year of the period 2000–2016. The rectangles represent the median, 25th, and 75th percentiles of these differences, the extreme points then the minimum and maximum.

V dalším zpracování jsou porovnávány výsledky pro soubory všech členů ansámblu a soubory členů vybraných podle stanovených kritérií.

4. Výsledky

Výsledky jsou prezentovány pomocí krabicových grafů průměrných rozdílů teploty vzduchu na obr. 1 a srážek na obr. 2 (vždy model – E-OBS) za období 2. až 24. května, červen, červenec a srpen, pro každý rok období 2000–2016.



Obr. 2 Krabicové grafy průměrných rozdílů úhrnů srážek (vždy model – E-OBS) pro všechny členy ansámblu (all) a členy ansámblu vybraných podle stanovených kritérií (selected) za období 2. až 24. května (vlevo nahoře), červen (vpravo nahoře), červenec (vlevo dole) a srpen (vpravo dole), pro každý rok období 2000–2016. Obdelníčky znázorňují medián, 25. a 75. percentil těchto rozdílů, krajní body potom minimum a maximum.
Fig. 2 Boxplots of the average differences of precipitation totals (always model – E-OBS) for the periods 2–24 May (upper left), June (upper right), July (lower left), and August (lower right), for each year of the period 2000– 2016. The rectangles represent the median, 25th, and 75th percentiles of these differences, the extreme points then the minimum and maximum.

5. Závěr

Tato studie se zaměřuje na dva sezónní předpovědní systémy; systém Météo – France 8 (MF) a systém Evropského centra pro střednědobou předpověď SEAS5 (ECMWF), které jsou dostupné v archivu Copernicus Climate Change Service. Jsou analyzovány dlouhodobé předpovědi pro teplotu vzduchu a úhrn srážek z 1. května, až na 3 měsíce (červen, červenec, srpen), pro roky 2000–2016 a v jednom gridovém bodě ve střední Evropě (15°E, 50°N).

Na základě korelací a rozdílů mezi modelovanou a pozorovanou teplotou vzduchu a úhrny srážek v prvních 24 dnech po datu výpočtu předpovědi jsou vybrány ty členy ansámblu pro dlouhodobé předpovědi ve střední Evropě, které v počátečním období lépe popisují skutečný vývoj teploty vzduchu a srážek.

U teploty vzduchu jsou výsledky pro vybrané členy ansámblu ve více než polovině let téměř stejné nebo lepší ve srovnání s výsledky pro všechny členy ansámblu pro červnové, červencové a srpnové předpovědi.

U srážkových úhrnů jsou výsledky pro vybrané členy ansámblu ve více než polovině let téměř stejné nebo lepší oproti výsledkům pro všechny členy ansámblu pouze pro červnovou předpověď. Pro červencové a srpnové předpovědi jsou výsledky ve více než polovině let téměř stejné nebo horší.

Zjištěné výsledky ukazují jistý potenciál pro výběr menšího počtu „věrohodnějších“ členů z ansámblu dlouhodobých předpovědí, zejména pro teplotu vzduchu, ale je potřeba více analýz. V plánu je rozšíření výpočtů i pro další roční období (nejprve zimní), a také experimenty s nastavováním kritérií pro výběr vhodných členů ansámblu, například i v závislosti na jejich dalším využití.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

CALI QUAGLIA, F., et al., 2022. Temperature and precipitation seasonal forecasts over the Mediterranean region: added value compared to simple forecasting methods. *Clim Dyn*, **58**, pp. 2167–2191. https://doi.org/10.1007/s00382-021-05895-6

JOHNSON, S. J., et al., 2019. SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system. *Geoscientific Model Development*, **12**(3), 1087–1117.

MANZANAS, R., et al., 2018. Dynamical and statistical downscaling of seasonal temperature forecasts in Europe: Added value for user applications. *Climate Services*, **9**, 44–56, ISSN 2405-8807.

MISHRA, N., et al., 2019. Multi-model skill assessment of seasonal temperature and precipitation forecasts over Europe. *Clim Dyn*, **52**, 4207–4225. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4404-z

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.06

Klimatická konfigurácia modelu ALADIN na ČHMÚ
(Climate configuration of the model ALADIN at CHMI)

Ján Mašek, Český hydrometeorologický ústav, jan.masek@chmi.cz

Abstrakt: Pre operatívnu predpoveď počasia na ČHMÚ využívame konfiguráciu ALARO numerického systému ALADIN s horizontálnym rozlíšením 2,3 km. Jedná sa teda už o tzv. konvekciu umožňujúci model. Cieľom prezentovanej práce bolo zhodnotiť potenciál operatívnej ALARO konfigurácie používanej pre oblasť strednej Európy a s minimálnymi úpravami ju využiť pre výpočet podkladových regionálnych klimatických simulácií v projekte PERUN. Boli vykonané testy v duchu tzv. big brother experimentálneho protokolu, demonštrujúce schopnosť regionálneho modelu doplniť v oblasti záujmu na území ČR krátke škály absentujúce v okrajových podmienkach z riadiaceho globálneho modelu ESM2-1, a to aj napriek jeho rádovo nižšiemu horizontálnemu rozlíšeniu. Ďalej bolo overené, že vo výpočtovej doméne sú synoptické škály dostatočne kontrolované bočnými okrajovými podmienkami. Vďaka tomu je konzistencia s globálnym scenárom zabezpečená aj bez použitia spektrálneho nudgingu. To umožňuje naplno profitovať z vysokého rozlíšenia regionálneho modelu, keď vnútorná variabilita generovaná konvektívnymi alebo orografickými cirkuláciami nie je umelo obmedzená.

Kľúčové slová: konvekciu umožňujúci regionálny klimatický model – párovanie – skok v rozlíšení – big brother experimentálny protokol

Abstract: For operational weather forecast at CHMI we use the ALARO configuration of the numerical system ALADIN with horizontal resolution 2.3 km. It is so-called convection permitting model. The goal of presented work was to evaluate potential of operational ALARO configuration used for Central Europe, and apply it with minimal changes for baseline regional climate simulations realized within the PERUN project. Tests following the so-called big brother experimental protocol were performed, demonstrating ability of the regional model to add short scales missing in the boundary conditions from driving model ESM2-1 in the region of interest over Czech territory, even though the resolution of driving model is more than order of magnitude coarser. Further it was verified that in the computational domain synoptic scales are sufficiently controlled by lateral boundary conditions. Thanks to this, consistency with driving global scenario is ensured even without use of spectral nudging. Such approach enables to fully profit from high resolution of the regional model, when internal variability generated by convective or orographic circulations is not artificially restricted.

Keywords: convection permitting regional climate model – coupling – resolution jump – big brother experimental protocol

1. Úvod

Numerické simulácie vývoja zemskej klímy si vyžadujú komplexné globálne systémy, zahŕňajúce všetky podstatné komponenty klimatického systému (atmosféra, oceán, sladkovodné plochy, kryosféra, pôdny kryt, biosféra) a interakcie medzi nimi. Tieto systémy sú extrémne výpočtovo náročné. Horizontálne rozlíšenie použiteľné pre globálne simulácie v časovom rozpätí desaťročí až storočí je preto silne limitované, krok výpočtovej siete sa typicky pohybuje v ráde 100 km. Pri takto slabom rozlíšení musia byť mnohé dôležité procesy, ako napríklad konvekcia, plne parametrizované. Na druhej strane, regionálne modely pre

predpoveď počasia v súčasnosti bežne využívajú krok výpočtovej siete pod 3 km, keď už je hlboká konvekcia čiastočne alebo úplne rozlíšená (hovoríme o tzv. konvekciu umožňujúcich modeloch). Tieto modely používajú nehydrostatické dynamické jadro a rozlišujú postatnú časť spektra meteorologicky významných gravitačných vĺn. Jedným z ich hlavných prínosov je realistickejšia simulácia konvektívnych javov, vrátane štatistického výskytu extrémnych úhrnov zrážok.

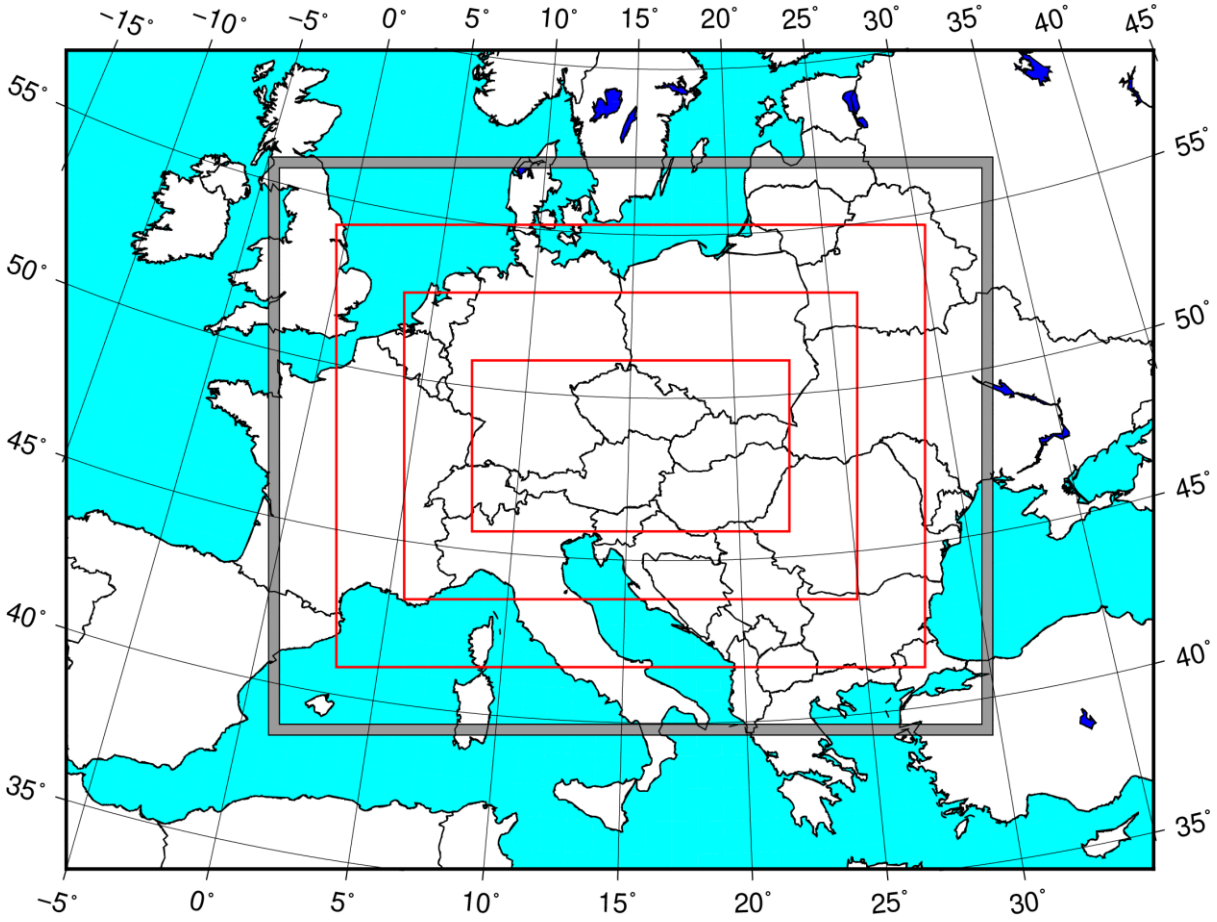
Podobne ako pri numerickej predpovedi počasia, aj pri klimatickom modelovaní je snaha zvýšiť rozlíšenie predpovede v ohraničenej oblasti záujmu použitím vloženého regionálneho klimatického modelu, párovaného s riadiacim globálnym modelom. Pri vhodnej voľbe výpočtovej domény a spôsobu párovania s riadiacim modelom je možné dosiahnuť, že vložený model zachováva dlhé škály popísané riadiacim modelom a dynamicky dotvára kratšie škály správnej amplitúdy. Náplňou prezentovanej práce je demonštrovať, nakoľko úspešne je tento cieľ dosiahnutý v simuláciach s ALARO konfiguráciou systému ALADIN (Termonia et al. 2018) s horizontálnym krokom siete Δx = 2,3 km, párovanými s reanalýzou ERA5 (Hersbach et al. 2020; Δx = 31 km), resp. s globálnym systémom CNRM ESM2-1 (Séférian et al. 2019; Δx = 156 km) na doméne pokrývajúcej strednú Európu. Druhý zmienený systém používame pri simuláciach budúcej klímy podľa vybraných CMIP6 scenárov (Eyring et al. 2016). Tu je hlavným problémom veľký skok v horizontálnom rozlíšení medzi riadiacim a vloženým modelom, dosahujúci hodnotu 67. Ako ukážeme ďalej, aj pri takto veľkom skoku v rozlíšení je možné dostať v regionálnej simulácii hodnoverné krátke škály bez použitia medziľahlého modelu, za predpokladu že výpočtová oblasť pokrýva oblasť záujmu s dostatočnou priestorovou rezervou.

2. Konfigurácia ALARO-Climate

Konfigurácia ALARO-Climate vychádza z operatívnej ALARO konfigurácie používanej pre krátkodobú predpoveď počasia na ČHMÚ (Brožková et al. 2019). Je použitá zhodná výpočtová doména (obr. 1), ako aj nastavenie ladiacich parametrov modelu. Hlavnou odlišnosťou je zvýšenie počtu hladín pri výpočte toku tepla v pôde z dvoch na štyri, tak aby v simuláciach s autonómne cykleným pevninským povrchom bolo možné správne zachytiť nielen denný, ale aj ročný chod povrchovej teploty. Základné nastavenia modelovej konfigurácie ALARO-Climate sú zhrnuté v nasledovnej tabuľke:

krok horizontálnej siete Δx	2,325 km	
počet uzlových bodov	1069x853	
šírka párovacej zóny	16 bodov	
počet vertikálnych hladín	87; strop vo výške ~50 km	
časový krok Δt	90 s	
frekvencia párovania	3 h (ERA5, Δx = 31 km) 6 h (CNRM ESM2-1, Δx = 156 km)	
schéma párovania	jednosmerná, relaxačná	Davies (1976)
dynamické jadro	nehydrostatické, spektrálne	Bénard et al. (2010)
vertikálna súradnica	hybridná eta, založená na hydrostatickom tlaku	Laprise (1992)
časová schéma	dvojhladinová, iterované centrované diferencie	Bénard et al. (2010)
advekčná schéma	semi-lagranžovská	Temperton et al. (2001)
horizontálna difúzia	SLHD	Váňa et al. (2008)

mikrofyzika a sedimentácia		Catry (2006), Geleyn et al. (2008)
hlboká konvekcia	3MT	Gerard et al. (2009)
plytká konvekcia	TOUCANS	Marquet-Geleyn (2013), Bašták Ďurán et al. (2018)
turbulencia	TOUCANS	Bašták Ďurán et al. (2014, 2018), Mašek et al. (2022)
radiácia	ACRANEB2	Mašek et al. (2016), Geleyn et al. (2017)
povrchová schéma	ISBA	Noilhan-Planton (1989), Noilhan-Mahfouf (1996)



Obr. 1 Výpočtová oblasť klimatickej konfigurácie modelu ALADIN na ČHMÚ. Šedý pás predstavuje 16 bodov širokú párovaciu zónu, kde je regionálne riešenie relaxované k riešeniu riadiaceho globálneho modelu. Červené rámiky označujú zóny vzdialené 100, 200 a 300 uzlových bodov od hranice domény.

Fig. 1 Computational domain of climate configuration of the model ALADIN at CHMI. The grey belt represents the 16-point wide coupling zone, where the regional solution is relaxed to the solution of the driving global model. The red frames denote zones 100, 200 and 300 grid-points far from the domain boundary.

3. Párovanie riadiaceho a vloženého modelu

Pri použití jednosmerného párovania riadiaceho modelu s vloženým modelom (Davies 1976) sa vychádza z niekoľkých predpokladov, formulovaných a analyzovaných v práci Laprise et al. (2008). Z nich sú za vhodných podmienok spoľahlivo potvrdené prvé dva:

1. regionálny klimatický model je schopný vygenerovať krátke škály chýbajúce v riadiacich poliach použitých ako bočné okrajové podmienky;
2. takto vygenerované krátke škály majú správne amplitúdy a klimatickú štatistiku.

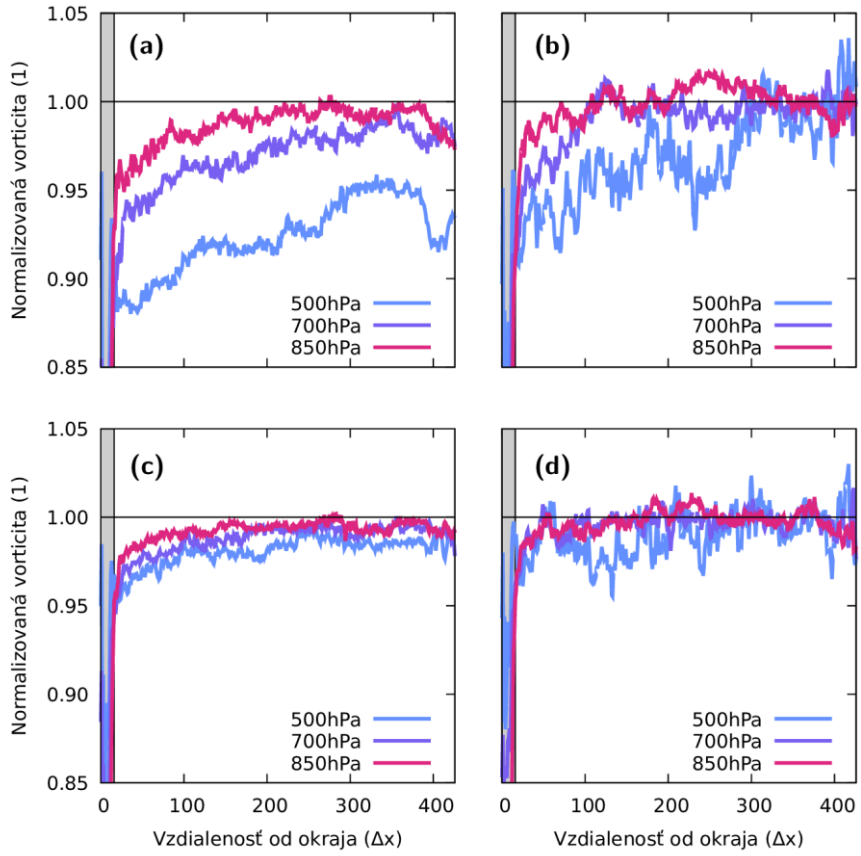
Treba zdôrazniť, že krátke škály vygenerované vloženým regionálnym modelom podliehajú vnútornej variabilite, ktorá v časovom horizonte klimatických simulácií postráda deterministický charakter. Preto tieto škály nie sú robustne určené okrajovými podmienkami – stačí malá zmena na úrovni numerického šumu a ich realizácia sa zmení. Dôležité pritom ale je, že sa zachová ich klimatická štatistika.

Detailný rozbor v nadväzujúcej práci Matte et al. (2017) ukazuje, že na vygenerovanie správnych krátkych škál musí prúdenie vo vloženom modeli prekonať určitú vzdialenosť od bočného okraja domény, kde prebieha tzv. priestorový spin-up. Táto vzdialenosť je tým väčšia, čím rýchlejšie je prúdenie a čím väčší je skok v rozlíšení medzi riadiacim a vloženým modelom. Krátke škály správnej amplitúty je teda možné získať len v centrálnej časti domény. Kvantitatívny odhad jej veľkosti je možné urobiť pomocou tzv. big brother experimentálneho protokolu. Pri ňom je najskôr spočítané referenčné riešenie s vysokým rozlíšením na veľkej doméne (veľký brat). Jeho priestorovým filtrovaním sú získané okrajové podmienky s nižším rozlíšením, simulujúce riadiaci model. Tie sú použité pre integráciu modelu s vysokým rozlíšením na malej doméne (malý brat). Variabilita krátkych škál vloženého riešenia je potom porovnaná s variabilitou krátkych škál referenčného riešenia.

Nevýhodou big brother experimentálneho protokolu je nutnosť vykonať dostatočne dlhú referenčnú integráciu s vysokým rozlíšením na podstatne väčšej oblasti ako je zamýšľaná doména regionálneho modelu. V našich podmienkach sa to ukázalo ako výpočtovo neúnosné. Preto sme protokol modifikovali a premenovali ho na experiment malých sestier: Referenčné riešenie získame integráciou na cieľovej doméne, párovanej s operatívnymi analýzami. Tie vďaka lokálnej asimilácii dát kombinovanej s technikou blendingu (Bučánek et al. 2015) obsahujú krátke škály z regionálneho modelu optimálne kombinované s dlhými škálami analyzovanými globálnym modelom ARPEGE technikou 4D variačnej asimilácie. Takto získané referenčné riešenie (bohatá sestra) má realistické spektrum až po vlnovú dĺžku $3\Delta x$, na ktorej je orezaná orografia. Druhá integrácia (chudobná sestra) je urobená s identickými modelovými nastaveniami a na rovnakej doméne, ale s tým rozdielom že operatívne analýzy použité na párovanie sú priestorovo sfiltrované na rozlíšenie uvažovaného riadiaceho modelu. Tým simulujeme výpočet na cieľovej oblasti riadený globálnym modelom s nižším rozlíšením. Vyhodnotenie krátkych škál vygenerovaných chudobnou sestrou robíme podobne ako v prípade big brother experimentálneho protokolu, teda ich porovnaním voči bohatej sestre. Vhodným diagnostickým prvkom je pole relatívnej vorticity, ktorého spektrum je bohaté na krátke škály (Matte et al. 2017).

Experiment malých sestier sme vykonali pre zimnú a letnú sezónu. Integračné obdobie malo vždy dva mesiace, pričom prvý mesiac slúžil na odoznenie nerovnováh v počiatočných podmienkach (tzv. časový spin-up) a druhý mesiac bol použitý na výpočet diagnostík. Zimný výpočet štartoval 1. 12. 2021, letný 1. 6. 2022. Diagnostiky sme teda počítali pre január a júl 2022, pričom sme používali hodinové modelové výstupy. Priestorové filtrovanie operatívnych analýz sme robili metódou kĺzavých priemerov, pričom šírka filtrovacieho okna bola rovná vlnovej dĺžke najkratšej vlny rozlíšenej riadiacim modelom. V našom prípade sme ako riadiaci model uvažovali ERA5 reanalýzu a systém CNRM ESM2-1. Okrem referenčného výpočtu bohatej sestry sme teda urobili dva výpočty chudobných sestier.

Výsledky experimentov sú zhrnuté na obr. 2. Zobrazená je tam stredná kvadratická hodnota relatívnej vorticity normalizovaná referenčnou hodnotou, ako funkcia vzdialensti od okraja domény. Pole vorticity sme najskôr sfiltrovali pomocou kĺzavých priemerov s oknom 11x11 bodov. Takto sfiltrované pole vorticity sme odpočítali od pôvodného poľa, čím sme izolovali vlny kratšie ako 11Δx (26 km). Výpočet strednej kvadratickej hodnoty sme robili pre rámiky s konštantnou vzdialenosťou od okraja domény, pričom ustredňovanie zahŕňalo aj časový rozmer. Takto získaná stredná hodnota charakterizuje mesačnú variabilitu krátkych škál vorticity v danej vzdialenosti od okraja domény. Jej pomer k referenčnej hodnote ukazuje, či majú krátke škály vygenerované chudobnou sestrou správnu amplitúdu. Pomer väčší ako jedna znamená nadhodnocovanie krátkych škál, pomer menší ako jedna ich podhodnocovanie. Diagnostiku sme robili na štandardných tlakových hladinách 500, 700 a 850 hPa, reprezentujúcich spodnú polovicu troposféry.



Obr. 2 Normalizovaná stredná kvadratická vorticita vĺn kratších ako 11Δx (26 km) na hladinách 500, 700 a 850 hPa, vynesená ako funkcia vzdialenosti od okraja domény. Hore: párovanie s rozlíšením zodpovedajúcim CNRM ESM2-1 dátam (Δx = 156 km) pre január (a) a júl (b). Dolu: párovanie s rozlíšením zodpovedajúcim ERA5 dátam (Δx = 31 km) pre január (c) a júl (d). Šedý pás označuje párovaciu zónu.

Fig. 2 Normalized root mean square vorticity of the waves shorter than 11Δx (26km) on 500, 700 and 850hPa levels, plotted as a function of distance from the domain boundary. Top: coupling with resolution corresponding to CNRM ESM2-1 data (Δx = 156km) for January (a) and July (b). Bottom: coupling with resolution corresponding to ERA5 data (Δx = 31km) for January (c) and July (d). The grey belt represents the coupling zone.

Na základe obr. 2 môžeme vyvodiť nasledovné závery:

1. Krátke škály absentujú v párovacej zóne, ale rýchlo sa dotvárajú smerom dovnútra domény. Najrýchlejšie sú generované na hladine 850hPa, najpomalšie na hladine

500hPa. Deficit krátkych škál je väčší v zime ako v lete. Obe tieto pozorovania súvisia s väčšou rýchlosťou vetra vo výške, resp. v zime – prúdenie prekoná väčšiu vzdialenosť kým priestorový spin-up dynamicky vygeneruje krátke škály.

2. Čím väčší je skok v rozlíšení, tým širšiu zónu zaberá priestorový spin-up. V najnepriaznivejšom prípade – párovanie so systémom CNRM ESM2-1 v zime, panel (a) – sa krátke škály na hladine 850 hPa dostanú na úroveň referencie cca 250 bodov od okraja domény, čo dostatočne pokrýva našu oblasť záujmu, ktorou je územie ČR. Na hladine 500 hPa dosiahnu v tomto prípade krátke škály maximálne 95 % referenčnej hodnoty, čo nepredstavuje problém, keďže kľúčovým výstupom z klimatických simulácií sú prízemné prvky. V lete pri párovaní so systémom CNRM ESM2-1 dosahujú krátke škály na všetkých hladinách referenčnú hodnotu najneskôr vo vzdialenosti 300 bodov od okraja domény – panel (b), čo pokrýva celú oblasť nášho záujmu.
3. Pri párovaní s ERA5 reanalýzou je situácia podstatne priaznivejšia. V zime sa krátke škály na hladine 500 hPa saturujú na 98 % referenčnej hodnoty, zatiaľ čo priestorový spin-up na hladine 850 hPa zaberá zónu širokú 150 bodov, panel (c). V lete takto široká zóna postačuje aj pre priestorový spin-up na hladine 500 hPa, panel (d). Párovanie s ERA5 reanalýzou teda podstatne rozširuje oblasť, v ktorej naplno využívame vysoké rozlíšenie konfigurácie ALARO-Climate. Reanalýzu ale nie je možné použiť na riadenie simulácií budúcej klímy.

Druhou dôležitou otázkou je, nakoľko riešenie vloženého regionálneho modelu reprodukuje dlhé škály z riadiaceho modelu. Pre veľké domény nemusí byť kontrola regionálneho modelu prostredníctvom bočných okrajových podmienok dostatočná – ďaleko od okrajov regionálny model môže vygenerovať vlastnú synoptickú cirkuláciu nekonzistentnú s riadiacim modelom. V takom prípade treba dlhé škály v regionálnom modeli kontrolovať pomocou techniky tzv. spektrálneho nudgingu (Radu et al. 2008). Pri menších doménach to nutné nie je. Aby sme overili že je to aj náš prípad, spočítali sme strednú kvadratickú odchýlku geopotenciálu na hladine 500 hPa (referencia voči analýze) pre dvojmesačnú sériu polí s krokom 6 hodín. V najnepriaznivejšom prípade bol Pearsonov korelačný koeficient referenčnej predpovede s analýzou, spočítaný cez celú doménu, rovný 0,987. To je veľmi dobrá zhoda, potvrdzujúca konzistenciu vygenerovaného veľkoškálového prúdenia s riadiacim modelom. Na doméne pokrývajúcej strednú Európu teda spektrálny nudging nie je potrebný.

4. Záver

Hlavnou motiváciou pri navrhovaní konfigurácie ALARO-Climate bolo v maximálnej miere využiť schopnosti operatívnej ALARO konfigurácie prevádzkovanej na ČHMÚ v konvekciu umožňujúcom rozlíšení 2,3 km. Zvláštnu pozornosť si pritom vyžiadala párovacia stratégia, keďže skok v rozlíšení je pri párovaní s globálnym systémom CNRM ESM2-1 rádovo vyšší ako v režime krátkodobej predpovede počasia (67 versus 3). Ukázali sme, že aj pri takto vysokom skoku v rozlíšení je možné použiť párovanie bez medziľahlého modelu, čo predstavuje značné technické zjednodušenie. Pomocou experimentu malých sestier sme demonštrovali, že naša výpočtová doména je dostatočne veľká na to, aby sa cez priestorový spin-up v oblasti záujmu vygenerovali krátke škály absentujúce v riadiacom modeli. Na druhej strane je dostatočne malá na to, aby synoptická cirkulácia bola kontrolovaná okrajovými podmienkami, bez nutnosti použiť spektrálny nudging. To zaručuje vnútornú konzistenciu vloženého riešenia naprieč celým spektrom rozlíšených škál.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatúra

BAŠTÁK ĎURÁN, I., GELEYN, J.-F., VÁŇA, F., 2014. A Compact Model for the Stability Dependency of TKE Production–Destruction–Conversion Terms Valid for the Whole Range of Richardson Numbers. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 3004–3026. https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0203.1

BAŠTÁK ĎURÁN, I., SCHMIDLI, J., BROŽKOVÁ, R., 2018. A turbulence scheme with two prognostic turbulence energies. *J. Atmos. Sci.*, **75**, 3381–3402. https://doi.org/10.1175/JAS-D-18-0026.1

BÉNARD, P., VIVODA, J., MAŠEK, J., SMOLÍKOVÁ, P., YESSAD, K., SMITH, C., BROŽKOVÁ, R., GELEYN, J.-F., 2010. Dynamical kernel of the ALADIN-NH spectral limited-area model: Revised formulation and sensitivity experiments. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 155–169. https://doi.org/10.1002/qj.522

BROŽKOVÁ, R., BUČÁNEK, A., MAŠEK, J., SMOLÍKOVÁ, P., TROJÁKOVÁ, A., 2019. Nová provozní konfigurace modelu ALADIN ve vysokém rozlíšení. *Meteorologické Zprávy*, 68,180–185. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/casmz/assets/2019/chmu_mz_5-19.pdf

BUČÁNEK, A., TROJÁKOVÁ, A., BROŽKOVÁ, R., 2015. Asimilační schéma BlendVar v ČHMÚ. *Meteorologické Zprávy*, **72**,129–139, Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/casmz/assets/2015/chmu_mz_6-15.pdf

CATRY, B., 2006. Effects of moisture and mountains in Numerical Weather Prediction. Ph.D. thesis, University of Ghent.

DAVIES, H. C., 1976. A lateral boundary formulation for multilevel prediction models. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **102**, 405–418. https://doi.org/10.1002/qj.49710243210

EYRING, V., BONY, S., MEEHL, G. A., SENIOR, C. A., STEVENS, B., STOUFFER, R. J., TAYLOR, K. E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, **9**, 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

GELEYN, J.-F., CATRY, B., BOUTELOUP, Y., BROŽKOVÁ, R., 2008. A statistical approach for sedimentation inside a micro-physical precipitation scheme. *Tellus A*, **60**, 649–662. https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2008.00323.x

GELEYN, J.-F., MAŠEK, J., BROŽKOVÁ, R., KUMA, P., DEGRAUWE, D., HELLO, G., PRISTOV, N., 2017. Single interval longwave radiation scheme based on the net exchange rate decomposition with bracketing. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 1313–1335. https://doi.org/10.1002/qj.3006

GERARD, L., PIRIOU, J.-M., BROŽKOVÁ, R., GELEYN, J.-F., BANCIU, D., 2009. Cloud and precipitation parameterization in a meso-gamma-scale operational weather prediction model. *Mon. Weather Rev.*, **137**, 3960–3977. https://doi.org/10.1175/2009MWR2750.1

HERSBACH, H., et al., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **146**, 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

LAPRISE, R., 1992. The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. *Mon. Weather Rev.*, **120**, 197–207. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120<0197:TEEOMW>2.0.CO;2

LAPRISE, R., et al., 2008. Challenging some tenets of Regional Climate Modelling. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **100**, 3–22. https://doi.org/10.1007/s00703-008-0292-9

MARQUET, P., GELEYN, J.-F., 2013. On a general definition of the squared Brunt–Väisälä frequency associated with the specific moist entropy potential temperature. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **139**, 85–100. https://doi.org/10.1002/qj.1957

MAŠEK, J., GELEYN, J.-F., BROŽKOVÁ, R., GIOT, O., ACHOM, H. O., KUMA, P., 2016. Single interval shortwave radiation scheme with parameterized optical saturation and spectral overlaps. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**, 304–326. https://doi.org/10.1002/qj.2653

MAŠEK, J., BAŠTÁK ĎURÁN, I., BROŽKOVÁ, R., 2022. Stable Numerical Implementation of a Turbulence Scheme with Two Prognostic Turbulence Energies. *Mon. Weather Rev.*, **150**, 1667–1688. https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0172.1

MATTE, D., LAPRISE, R., THÉRIAULT, J. M., LUCAS-PICHER, P., 2017. Spatial spin-up of fine scales in a regional climate model simulation driven by low-resolution boundary conditions. *Clim. Dyn.*, **49**, 563–574. https://doi.org/10.1007/s00382-016-3358-2

NOILHAN, J., PLANTON, S., 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Weather Rev.*, **117**, 536–549. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2

NOILHAN, J., MAHFOUF, J.-F., 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme. *Glob*. *Plan*. *Change*, **13**, 145–159. https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00043-7

RADU, R., DÉQUÉ, M., SOMOT, S., 2008. Spectral nudging in a spectral regional climate model. *Tellus*, **60A**, 898–910. https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2008.00341.x

SÉFÉRIAN, R., et. al., 2019. Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1: Role of Earth System Processes in Present-Day and Future Climate. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **11**, 4182–4227. https://doi.org/10.1029/2019MS001791

TEMPERTON, C., HORTAL, M., SIMMONS, A., 2001. A two-time-level semi-Lagrangian global spectral model. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 111–127. https://doi.org/10.1002/qj.49712757107

TERMONIA, P., et al., 2018. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geosci. Model Dev.*, **11**, 257–281. https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018

VÁŇA, F., BÉNARD, P., GELEYN, J.-F., SIMON, A., SEITY, Y., 2008. Semi-Lagrangian advection scheme with controlled damping: An alternative to nonlinear horizontal diffusion in a numerical weather prediction model. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 523–537. https://doi.org/10.1002/qj.220

Odstraňování systematických chyb výstupů z regionálních klimatických modelů: statistické transformace řad atmosférických srážek z modelu ALADIN v projektu PERUN

(Bias correction of regional climate model outputs: statistical transformations of precipitation series from the climate model ALADIN in the project PERUN)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.07

Marta Martínková, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., marta@ufa.cas.cz

Abstrakt: Výstupy z regionálních klimatických modelů jsou zatíženy systematickými chybami. Z hlediska způsobu použití dat existují dva základní přístupy k řešení tohoto problému: přírůstková metoda (například Delta change method) získává z porovnání výstupů klimatického modelu pro kontrolní a budoucí období informaci o klimatickém signálu (faktor změny – change factor). Tato informace je pak následně použita k modifikaci pozorovaných časových řad ve stanicích. Metoda korekce systematických chyb získává informaci o systematických chybách výstupů z klimatického modelu porovnáním výstupů z modelu s pozorovanými časovými řadami. O tuto chybu jsou pak opraveny výstupy z klimatických modelů pro budoucí období. Tento příspěvek se zabývá možnostmi odstraňování systematických chyb výstupů modelu ALADIN (řídící globální model je CNRM-ESM2-1) v rámci projektu PERUN, konkrétně časovými řadami srážek v denním kroku pro scénář SSP5-8.5. Je porovnáván potenciál různých metod statistických transformací: metody založené na statistickém rozdělení, parametrické transformace a neparametrické metody (metoda empirických kvantilů).

Klíčová slova: úhrny srážek – scénář změny klimatu – korekce systematických chyb

Abstract: The outputs of regional climate models are biased. Regarding the bias correction of outputs from a climate model, the two fundamental approaches exist. First approach (e.g., Delta change method) gets the information on climate signal from comparison of the model control and future periods. Such information (change factor) is then applied to modify the observational data. Bias correction method gets the information on model bias from comparison of observational data and model outputs for the control period. The model outputs for future period are than corrected using this information on the model bias. This contribution is focused on the possibilities for bias correction of the model ALADIN (CNRM-ESM2-1) in the project PERUN and the precipitation series in daily time step for SSP5-8.5 scenario. Different statistical transformations are compared: methods based on statistical distribution, parametric transformations and non-parametric transformations (empirical quantiles method).

Keywords: precipitation – climate change scenario – bias correction

1. Úvod

Je zřejmé, že výstupy z klimatických modelů jsou zatíženy chybami různého původu. Tato skutečnost byla podrobně popsána v odborné literatuře a existuje mnoho různých ověřených metod, jak tuto chybovost snížit. Využití konkrétní metody se řídí hlavně účinností metody a dále mj. typem dopadové studie pro kterou se mají využít výstupy klimatického modelu. Např. aplikaci metod vhodných ke korekci výstupů z klimatických modelů v denním kroku pro hydrologické dopadové studie zkoumá Sunyer et al. 2015.

Podle použitých prediktorů je možné rozlišovat tři základní přístupy k odstraňování systematických chyb výstupů klimatických modelů (např. Maraun et al., 2010): tzv. perfect prognosis, přístupy založené na statistických vlastnostech výstupů modelu a generátory

počasí. Přístupy založené na statistických vlastnostech výstupů modelu můžeme dále dělit podle způsobu jakým je získána a aplikovaná informace o signálu klimatické změny nebo o rozdílu mezi výstupy z klimatického modelu a pozorovanými daty.

Z hlediska způsobu použití dat můžeme tedy u metod založených na statistických vlastnostech výstupů modelu rozlišovat dva základní přístupy:

- Přírůstková metoda (např. Delta change method) získává z porovnání výstupů klimatického modelu pro kontrolní a budoucí období informaci o klimatickém signálu (faktor změny – change factor). Tato informace je pak následně použita k modifikaci pozorovaných časových řad ve stanicích. Přírůstková metoda je založená na předpokladu, že klimatický model reprezentuje lépe změnu mezi kontrolním a budoucím obdobím než absolutní hodnoty meteorologických proměnných a zachovává časovou strukturu pozorovaných řad.
- Metoda korekce systematických chyb získává informaci o systematických chybách výstupů z klimatického modelu porovnáním výstupů z modelu s pozorovanými časovými řadami. O tuto chybu jsou pak opraveny výstupy z klimatických modelů pro budoucí období. Metoda korekce systematických chyb zachovává časovou strukturu výstupů klimatického modelu.

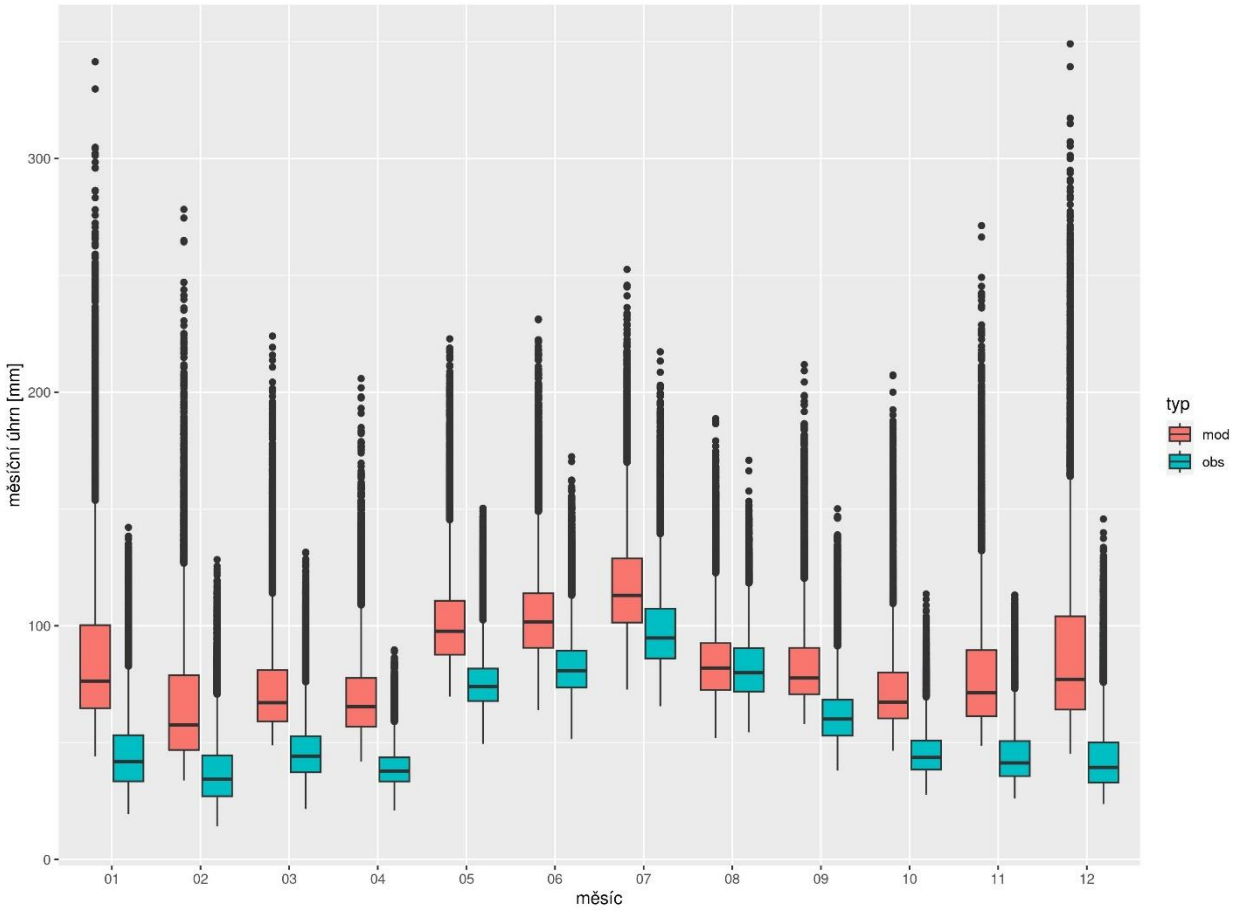
Je důležité zdůraznit, že oba tyto přístupy jsou založeny na předpokladu, že systematické chyby (bias) výstupů klimatického modelu jsou stejné pro kontrolní a budoucí období. Tento předpoklad nemusí být vždy splněn, např. studie Sunyer et al. (2014) ukázala, že systematické chyby srážek závisí na intenzitě srážek, a tudíž mohou být v budoucnu odlišné.

Tento příspěvek se zabývá možnostmi odstraňování systematických chyb výstupů klimatických modelů. Popisuje různé metody statistických transformací výstupů modelu a jejich výhody i omezení. Vybrané přístupy jsou pak aplikovány na výstupy modelu ALADIN (řídící globální model je CNRM-ESM2-1) v rámci projektu PERUN, konkrétně na časový řady srážek v denním kroku pro scénář SSP5-8.5. Účinnost vybraných metod, které jsou pracují se statistickými vlastnostmi výstupů modelu, konkrétně metody založené na statistickém rozdělení, parametrické transformace a neparametrické metody (metoda empirických kvantilů), je pak ilustrována na příkladu měsíčních úhrnů srážek.

2. Data

Použitými daty jsou výstupy denních úhrnů srážek z modelu ALADIN (řídící globální model je CNRM-ESM2-1). Tato data jsou porovnávána s pozorovanými staničními daty denních úhrnů srážek, která byla zgridována do stejné sítě jako je síť modelu ALADIN. Metody jsou testovány pro kontrolní období modelu a pozorovaná data pro roky 1995–2014.

Na obr. 1 jsou uvedeny krabicové grafy průměrných měsíčních srážkových úhrnů pro pozorovaná data a výstupy z modelu ALADIN. Výrazné rozdíly v poloze i variabilitě mezi výstupy modelu a pozorovanými daty jsou vidět pro všechny měsíce s výjimkou měsíce srpna, kde je sice vidět vyšší poloha i variabilita jako u ostatních měsíců, ale rozdíl mezi pozorováními a výstupem modelu je relativně menší než po zbytek roku.



Obr. 1 Porovnání průměrných měsíčních úhrnů srážek pro pozorovaná data (obs) a výstupu z modelu (mod).
Fig. 1 The comparison of the average monthly precipitation for observations (obs) and model outputs (mod).

3. Metody

Jak již bylo řečeno, tento příspěvek je zaměřen na metody založené na statistických vlastnostech výstupů modelu, konkrétně metody korekce systematických chyb klimatických modelů, které získávají informaci o rozdílu mezi pozorovanými daty a výstupu z modelu a o tuto informaci pak upraví výstupy z klimatického modelu pro budoucí období. Účinnost metod je pak testována na datech pro kontrolní období klimatického modelu. Pro všechny výpočty bylo použito prostředí R (R Core Team 2021) a balík qmap (Gudmundsson 2016).

Cílem metod založených na statistických vlastnostech výstupů modelu (statistické transformace) je identifikovat funkci, která modifikuje modelovanou proměnou takovým způsobem, že nové statistické rozdělení modelované proměnné odpovídá statistickému rozdělení pozorované proměnné.

V tomto příspěvku jsou testovány statistické transformace tří skupin: metody založené na statistickém rozdělení, parametrické transformace a neparametrické transformace.

3.1 Metody založené na statistickém rozdělení

Tyto metody používají teoretická rozdělení a předpokládají, že výstupy z modelu a pozorovaná data mají stejné statistické rozdělení. Obvykle se používá kombinace Bernouliho a některého ze šikmých rozdělení používaných pro modelování množství srážek (např. gamma, Weibulovo

nebo log-normální rozdělení). Tento příspěvek testuje kombinace Bernoulliho a Weibullova rozdělení a Bernoulliho s log-normálním rozdělením.

3.2 Parametrické transformace

Parametrické transformace pracují přímo s modelovanými a pozorovanými proměnnými. Tento příspěvek na trasformace typu scale a linear (Gudmundsson et al. 2012).

3.3 Neparametrické transformace

Jejich hlavní výhodou je to, že mohou být aplikovány nezávisle na odhadu parametrů statistického rozdělení, díky čemuž ubývá jeden ze zdrojů nejistot. Konkrétně je zde testována metoda empirických kvantilů a dvě různé metody interpolace: lineární a monotonic tricubic spline interpolace.

4. Implementace testovaných metod

Na obr. 2 jsou uvedeny měsíční úhrny srážek pro pozorovaná data, výstupy z modelu a všechny testované metody. Je zjevné, že všechny testované metody přibližují výstupy modelu pozorovaným datům. Po většinu roku se výsledky pro jednotlivé metody příliš neliší, výjimkou je statistické rozdělení Bernoulliho a Weibullovo, které má nižší polohu než ostatní metody. Tento jev je vidět zvláště v letních a podzimních měsících.

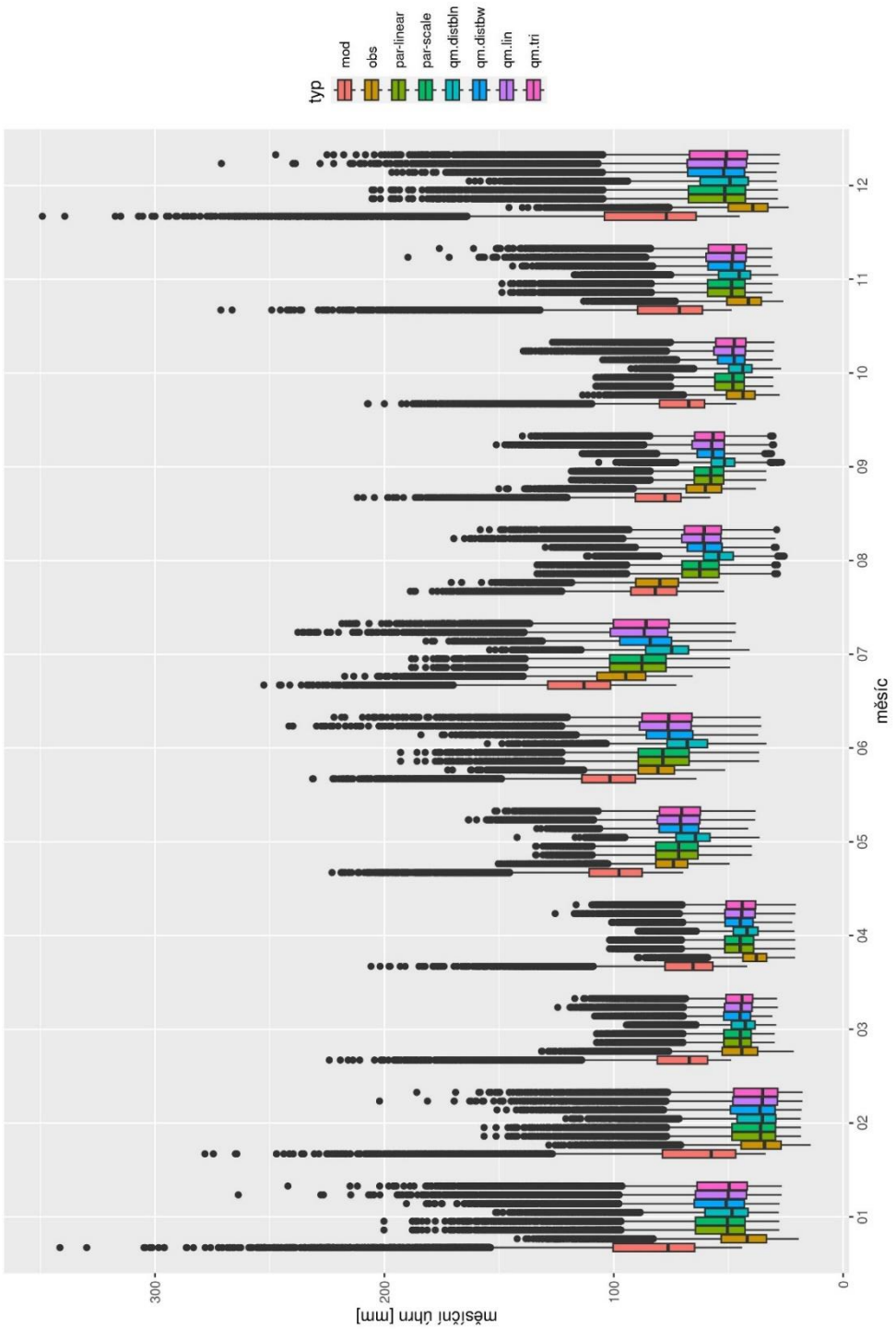
Zajímavý je rozdíl mezi metodami korekce na jedné straně a pozorovanými daty spolu s výstupy modelu na straně druhé v měsíci srpnu, kde dochází k tomu, že metody korekce oddalují výstupy modelu od pozorovaných dat. Možnou příčinou je skutečnost, že model ALADIN výborně modeluje v srpnu a relativně hůře v ostatních měsících, přičemž všechny testované metody nejsou fitovány pro každý měsíc zvlášť.

Úspěšnost testovaných metod vyplývá i z hodnot střední absolutní odchylky (mean absolute error, *MAE*) pro dvojice pozorovaná data – metoda pro denní data a zprůměrované přes všechny gridy. Hodnoty *MAE* pro jednotlivé dvojice typu dat jsou následující: pozorovaná data a výstupy modelu 3,66 mm, pozorovaná data a Bernoulli a lognormální rozdělení 2,91 mm, pozorovaná data a Bernoulli a Weibullovo rozdělení 3,08 mm, pozorovaná data a parametrická transformace typu linear 3,10 mm, pozorovaná data a parametrická transformace typu scale 3,10 mm, pozorovaná data a empirické kvantily s lineární interpolací 3,13 mm a pozorovaná data a empirické kvantily s monotonic tricubic spline interpolací 3,11 mm.

5. Závěr

Přístupy k odstraňování systematických chyb ve výstupech klimatických modelů se vzájemně velmi liší, co se týká předpokládaných vlastností hodnocených dat. Tento příspěvek se zaměřil na metody založené na statistických vlastnostech výstupů modelu (statistických transformací). Konkrétně na různé metody korekce systematických chyb výstupů z klimatického modelu. Důležitým předpokladem těchto metod je, že systematické chyby výstupů modelu jsou stejné pro kontrolní a budoucí období.

Konkrétně byly testovány metody založené na statistickém rozdělení (Bernoulliho a lognormální, Bernoulliho a Weibullovo), parametrické transformace (typu linear a scale) a metoda empirických kvantilů (s lineární nebo monotonic tricubic spline interpolací).



Obr. 2 Porovnání průměrných měsíčních úhrnů srážek pro pozorovaná data (obs), výstupu z modelu (mod) a testované metody: parametrická typu linear (par-linear), parametrická typu scale (par-scale), statistické rozdělení Bernoulliho a log-normální (qm.distbln) a Bernoulliho a Weibullovo (qm.distbw), empirické kvantily lineární interpolace (qm.lin) a monotonic tricubic spline interpolace (qm.tri).
Fig. 2 The comparison of the average monthly precipitation for observations (obs), model outputs (mod) and tested methods: parametric transformation linear (par-linear) and scale (par-scale), distribution Bernoulli and log-normal (qm.distbln) and Bernoulli and Weibull (qm.distbw), empirical quantiles linear interpolation (qm.lin) and monotonic tricubic spline interpolation (qm.tri).

Všechny zde testované metody přibližují výstupy z klimatického modelu ALADIN pozorovaným úhrnům srážek. Při výběru konkrétní metody odstraňování systematických chyb výstupů z klimatických modelů je ale vždy třeba přihlédnout ke specifikům dané dopadové studie a případně testovat různé přístupy, tak aby byla zvolena co nejúčinnější metoda.

Vzhledem k robustnosti a absenci konkrétních předpokladů o statistickém rozdělení dat se neparametrické transformace (zde metoda empirických kvantilů) jeví jako nejvíc univerzální a nejvhodnější metoda odstraňování systematických chyb výstupů z klimatických modelů.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

GUDMUNDSSON, L., 2016. qmap: Statistical transformations for post-processing climate model output. R package version 1.0-4.

GUDMUNDSSON, L., BREMNES, J. B., HAUGEN, J. E., ENGEN-SKAUGEN, 2012. Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **16**, 3383–3390. https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012, 2012

GUTIÉRREZ, J. M., MARAUN, D., WIDMANN, M., HUTH, R., HERTIG, E., BENESTAD, R., RÖSSLER, O., WIBIG, J., WILCKE, R., KOTLARSKI, S. AND SAN MARTIN, D., 2019. An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment. *International journal of climatology*, **39**(9), 3750–3785. https://doi.org/10.1002/joc.5462

MARAUN, D., WETTERHALL, F., IRESON, A. M., CHANDLER, R. E., KENDON, E. J., WIDMANN, M., BRIENEN, S., RUST, H. W., SAUTER, T., THEMEßL, M. AND VENEMA, V. K. C., 2010. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of geophysics*, **48**(3).

R Core Team, 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/

SUNYER, M. A., HUNDECHA, Y., LAWRENCE, D., MADSEN, H., WILLEMS, P., MARTINKOVA, M., VORMOOR, K., BÜRGER, G., HANEL, M., KRIAUČIŪNIENĖ, J., LOUKAS, A., OSUCH, M., YÜCEL, I., 2015. Inter-comparison of statistical downscaling methods for projection of extreme precipitation in Europe. Hydrol. *Earth Syst. Sci.*, **19**, 1827–1847. https://doi.org/10.5194/hess-19-1827-2015

SUNYER, M. A., MADSEN, H. ANG, P. H., 2012. A comparison of different regional climate models and statistical downscaling methods for extreme rainfall estimation under climate change. *Atmospheric Research*, **103**, 119–128.

SUNYER, M. A., MADSEN, H., ROSBJERG, D., ARNBJERG-NIELSEN, K., 2014. A Bayesian approach for uncertainty quantification of extreme precipitation projections including climate model interdependency and nonstationary bias. *Journal of Climate*, **27**(18), 7113–7132.

Vývoj schématu mikrofyziky v modelu ALADIN
(Microphysics developments in the ALADIN model)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.08

David Němec, Český hydrometeorologický ústav, david.nemec@chmi.cz

Abstrakt: Mikrofyzikální schéma je jedním ze základních fyzikálních parametrizací v klimatických modelech a je esenciální pro přesnou simulaci srážkových úhrnů. V nedávné době došlo v modelu ALADIN k úpravám tohoto schématu, zejména byly přidány prognostické krupky a změnil se výpočet evaporace srážek. Díky těmto úpravám se částečně redukuje systematická odchylka srážkových úhrnů a je lépe modelován srážkový stín.

Klíčová slova: předpověď počasí numerická – mikrofyzika oblaků a srážek – parametrizace

Abstract: The microphysics scheme is one of the fundamental physical parametrizations in climate models. The microphysics scheme is essential for precise precipitation forecasts. Recently, the microphysics scheme in the ALADIN model was enhanced; particularly, prognostic graupel was added and the computation of evaporation was changed. As a consequence, the bias of precipitation accumulations is partially reduced and the precipitation shadow is better simulated.

Keywords: numerical weather prediction – microphysics of clouds and precipitation – parameterization

1. Úvod

Schéma mikrofyziky oblaků a srážek je v klimatických modelech zodpovědné za tvorbu srážek v subgridovém měřítku. Silně tedy ovlivňuje jejich časové a prostorové rozložení. Proto je klíčové, aby srážkové úhrny generované schématem odpovídaly co nejlépe měřením při zachování co nejvyšší fyzikální realističnosti popisu mikrofyzikálních procesů. Kromě toho je také důležité, aby schéma dobře interagovalo s ostatními parametrizacemi, zejména schématem radiace a hluboké (srážkové) konvekce.

Pro dosažení lepších výsledků simulace srážek v modelu ALADIN, konkrétně v jeho kanonické modelové konfiguraci ALARO, bylo provedeno několik úprav jeho mikrofyzikálního schématu. Tyto změny mají jako jeden z cílů redukovat nadhodnocování srážkových úhrnů.

Schéma samotné a jeho úpravy jsou popsány v sekci 2, v sekci 3 jsou představeny experimenty a popsány metody validace. Sekce 4 pak diskutuje dosažené výsledky.

2. Mikrofyzikální schéma modelu ALADIN a jeho navrhované úpravy

Mikrofyzikální schéma modelu ALADIN nyní prognosticky simuluje pět hydrometeorů, konkrétně oblačnou vodu, oblačný led, dešťové kapky, sněhové vločky a sněhové krupky. Sněhové krupky byly do schématu přidány v nedávné době a v první sadě klimatických projekcí projektu PERUN nebyly užity.

Množství oblačné vody a oblačného ledu vstupujícího do mikrofyziky je určeno kombinací kondenzátů z termodynamického přizpůsobení a ze schématu hluboké konvekce. Rozdělení mezi oblačnou vodu a oblačný led je diagnostikováno pomocí analytické funkce (Gerard 2007).

Nad sumou kondenzátů z termodynamického přizpůsobení a ze schématu hluboké konvekce se provede společný výpočet mikrofyziky srážek. Zdrojovým členem deště je autokonverze z oblačných kapek a tání sněhu, případně tání sněhových krupek, jsou-li prognostické. Sníh je tvořen autokonverzí z oblačného ledu. Pokud jsou sněhové krupky ošetřeny prognosticky, pak

je jejich prvním zdrojovým členem Wegener–Bergeron–Findeisenův (WBF) proces, který je v rámci schématu reprezentován jako speciální typ autokonverze, a druhým mrznutí deště. Nejsou-li sněhové krupky prognostické, pak WBF proces vede k tvorbě sněhu a také déšť mrzne ve sníh.

Původní parametrizace sněhových krupek uvažovala jejich mechanické vlastnosti, tedy pádovou rychlost, velikostní distribuci a sběrovou účinnost, shodné s deštěm. Naopak termodynamické vlastnosti, tedy tání a sublimace, byly shodné se sněhem. Tato idea je zde revidována. Sněhové krupky v přírodě nabývají mnoha tvarů a jejich hustota má velký rozptyl, což činí jejich parametrizaci obtížnější. Obvykle se proto v operativně používaných mikrofyzikálních schématech uvažuje určitá střední hodnota jejich hustoty a tvar sféry či sféře blízký tvar (Pinty a Jabouille 1998; Hong a Lim 2006; Thompson et al. 2008). Tvar koule s konstantní hustotou ρ_g = 400 kg·m^{-3} byl zvolen i v tomto případě.

Další úpravy se týkají velikostní distribuce sněhových krupek. Pro déšť je použita velikostní distribuce, která uvažuje velmi malé částice v případě nízkých srážkových toků (Abel a Boutle 2012), což zlepšuje reprezentaci mrholení. Dle původního návrhu byl tento koncept převzat rovněž pro sněhové krupky. Zde však navrhujeme užití standardní Marshall-Palmerovy distribuce s konstantním koeficientem. Dalším návrhem je volba nižší pádové rychlosti krupek oproti dešti, podobně jako je uvažováno v jiných schématech (Pinty a Jabouille 1998; Hong a Lim 2006).

Poslední úpravy mikrofyzikálního schématu se týkají zvýšení prahové hodnoty množství oblačné vody pro autokonverzi do deště, která by dále měla redukovat srážkové úhrny zejména v případě slabých srážek z vrstevnatých oblaků. Také je dosaženo výraznějšího výparu při použití parametrizace výparu dle Lopeze (Lopez 2002) než při použití dosud užívaného schématu Kesslerova.

3. Popis experimentů a metody jejich validace

Pro validaci modifikací mikrofyzikálního schématu byl využit model ALADIN v operativní konfiguraci používaný v Českém hydrometeorologickém ústavu (Brožková et al. 2019). Jeho horizontální rozlišení činí 2,325 km v síti s 1080x864 body a 87 vertikálními hladinami. Časový krok je 90 s. Doba předpovědi modelu vždy činila 72 hodin, inicializace proběhla v 00 UTC.

Modelové konfigurace jsou označeny takto:

- ALAD: Konfigurace modelu ALADIN bez použití prognostických krupek. Hodnota koeficientu úměrnosti rychlosti WBF procesu je 4,3krát vyšší než pro následující experimenty.
- GRAU: Originální verze s prognostickými krupkami, tedy ta, která uvažuje mechanické vlastnosti sněhových krupek shodné s deštěm a termodynamické vlastnosti shodné se sněhem.
- OPGR: Verze s navrženými úpravami parametrizace prognostických krupek (velikostní dstribuce, pádová rychlost a kolekční účinnost).
- MPKA: OPGR s přidanými úpravami představenými v posledním odstavci sekce 2, tedy schématu evaporace a zvýšené prahové hodnoty oblačné vody pro autokonverzi do deště.

Pro testy byly použity 10 dnů dlouhá období mezi 21.–30. 6. 2021, 25. 11.–4. 12. 2021 a 21.–29. 6. 2022. Obě letní období se vyznačují výraznou konvektivní aktivitou s mnoha mezoměřítkovými konvektivními systémy i supercelami. Podzimní perioda je vybrána tak, aby se v modelové doméně vyskytovalo dostatečné množství srážek.

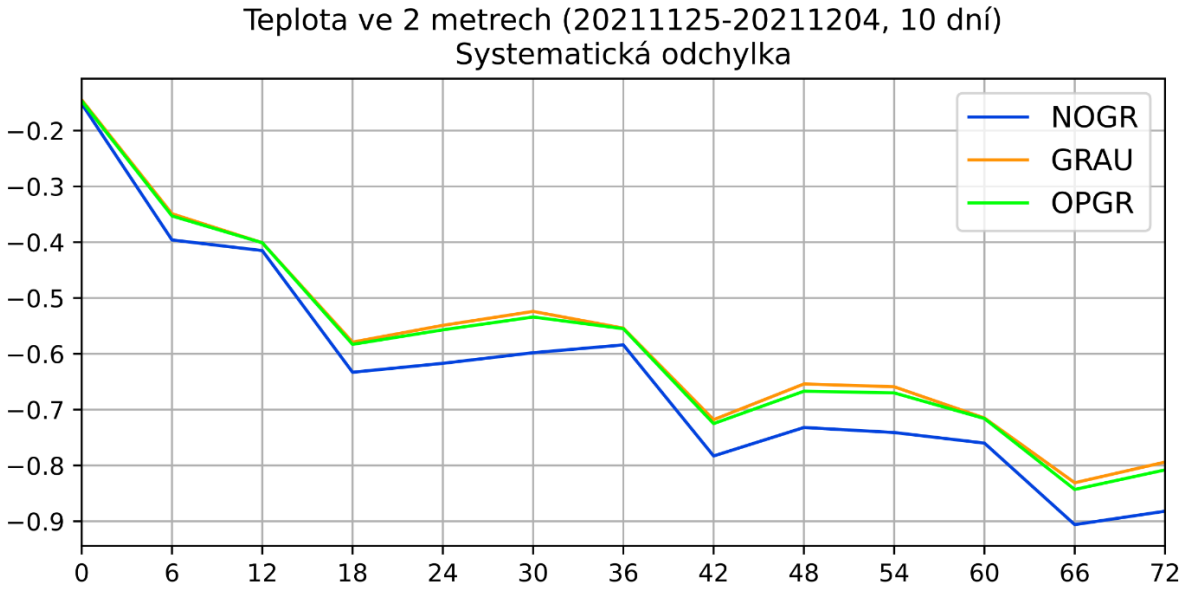
Pro validaci byla použita atmosférická skóre, která porovnávají základní meteorologické prvky předpovězené modelem s měřeními SYNOP a TEMP ve střední Evropě a jejím přilehlém okolí. Z nich byly spočítány systematická odchylka, odmocnina ze střední kvadratické chyby a standardní chyba (Janoušek a Mládek 2008).

Pro validaci srážek byla rovněž použita fraction skill score (*FSS*). *FSS* zkoumá překročení prahových hodnot srážkových úhrnů na okolí ohraničeném čtverci o definovaných stranách, čímž zabraňuje započítání jedné chyby předpovědi dvakrát, tzv. dvojité penalizaci (Roberts a Lean 2008). Pro validaci byl použit nástroj vyvinutý na Oddělení numerické předpovědi počasí Českého hydrometeorologického ústavu (Bučánek 2020) který porovnává srážková pole s produktem MERGE, který kombinuje data z radarů a srážkoměrů (Novák a Kyznarová 2016).

4. Validace úprav mikrofyzikálního schématu

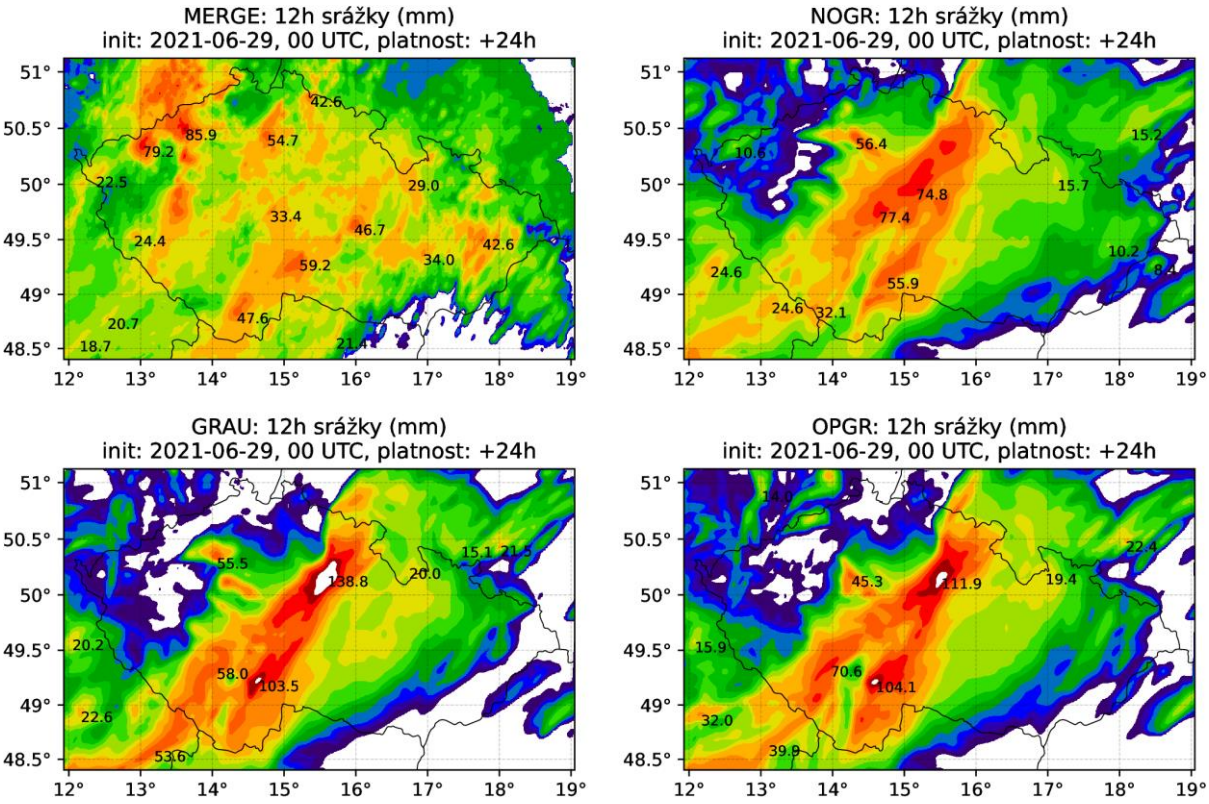
4.1 Porovnání verzí s prognostickými sněhovými krupkami a bez nich

Porovnání konfigurací ALAD, GRAU a OPGR proběhlo pro periody 21. 6.–30. 6. 2021 a 25. 11.–4. 12. 2021, základní charakteristiky jsou podobné pro obě periody. Porovnání těchto konfigurací ukazuje, že při použití prognostických krupek dochází ke snižování systematické odchylky geopotenciálu redukovaného na hladinu moře pro zimní i letní periodu. Geopotenciál se zvyšuje nad přibližně 850 hPa, pod touto hranicí je snížen. Teplota je pak zvýšena pod 600 hPa v létě a 850 hPa v zimě a snížena nad touto hranicí. Oba projevy jsou pozitivní. Skóre dalších veličin jsou neutrální.



Obr. 1 Systematická odchylka teploty ve 2 metrech nad zemí pro 10denní periodu v chladné části roku pro experimenty NOGR, GRAU a OPGR.
Fig. 1 Systematic temperature deviation at 2 m above ground for a 10-day period in the cold part of the year for the NOGR, GRAU and OPGR experiments.

Konfigurace OPGR dosahuje podobných výsledků na atmosférických skóre jako GRAU, nicméně systematické odchylky teploty a geopotenciálu se v důsledku snížené pádové rychlosti lehce přibližují konfiguraci ALAD bez prognostických krupek (obr. 1). Tento efekt je výraznější v létě než v zimě. Efekt přidání prognostických krupek převyšuje vliv úprav jejich parametrizace.



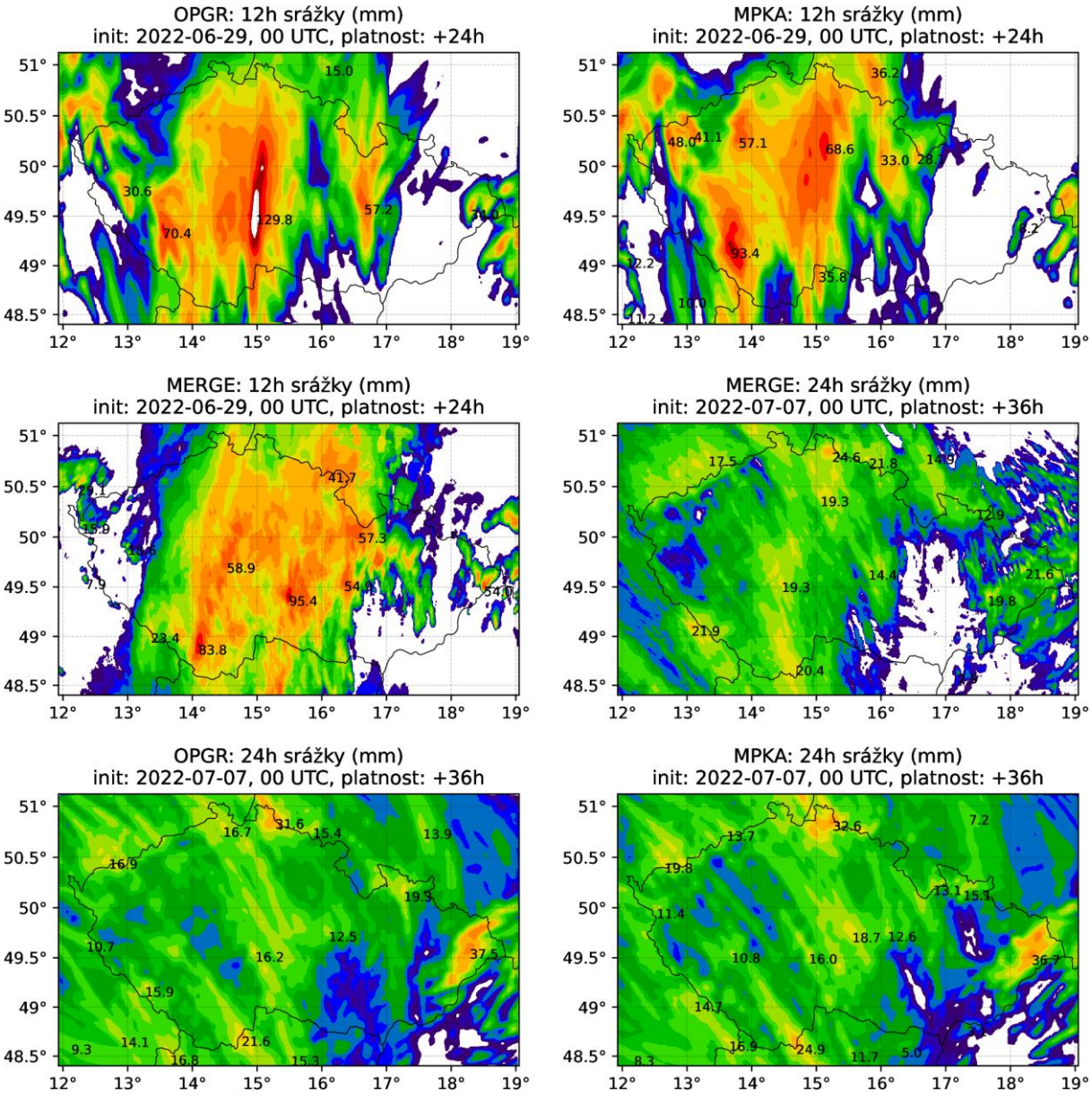
Obr. 2 Srovnání 12hodinnových srážkových úhrnů experimentů NOGR, GRAU a OPGR v mezoměřítkovém konvektivním systému.
Fig. 2 Comparison of 12-hour rainfall totals of the NOGR, GRAU and OPGR experiments in a mesoscale convective systém.

V poli srážek pak lze nalézt dvě charakteristiky při přechodu k prognostickým krupkám: zatímco celková systematická odchylka se obvykle výrazněji nemění, maxima srážkových úhrnů v konvekci jsou zvýšená, podobně jako srážkové úhrny v horských oblastech. Oba tyto jevy jsou částečně redukovány konfigurací OPGR. Obr. 2 ukazuje částečnou redukci maxim srážkových úhrnů pro případ konvekce. V tomto konkrétním případě je však nejblíže skutečnosti varianta NOGR.

4.2 Validace dalších úprav schématu mikrofyziky

Validace těchto úprav byla provedena v periodě 21.–29. 6. 2022. Modelová konfigurace MPKA je srovnávána s konfigurací OPGR, která slouží jako reference.

Díky vyššímu toku výparu se daří redukovat maxima srážek při konvekci a je rovněž lépe modelován srážkový stín za horskými překážkami. Obr. 3 pak ukazuje konkrétní případ z 29. 6. 2022 pro konvekci a ze 7. 7. 2022 pro srážkový stín. Zároveň dochází k celkovému snížení srážkových úhrnů, zejména na podzim a v zimě, k čemuž rovněž přispívá zvýšení prahové hodnoty množství oblačné vody nutné pro autokonverzi do deště.



Obr. 3 Porovnání srážek experimentů OPGR a MPKA pro konvektivní bouři 29. 6. 2022 nahoře a měření vlevo uprostřed a 7. 7. 2022 ukazující výraznější srážkový stín za Krušnými horami dole a vpravo uprostřed.

Fig. 3 Comparison of OPGR and MPKA precipitation experiments for the June 29, 2022 convective storm at the top and measurements at the middle left and July 7, 2022 showing a more pronounced precipitation shadow behind the Ore Mountains at the bottom and middle right.

Pro letní období mezi 21. 6. a 29. 6. 2022 byla spočtena FSS, která ukazují jisté zlepšení pro 6hodinové kumulace srážek v termínech 18 a 24 UTC pro všechny tři dny integrace. Zlepšuje se jak prostorová přesnost, tak systematická odchylka předpovědi srážek, zejména pro vyšší prahové hodnoty srážkových úhrnů. Naopak v termínech 06 a 12 UTC dochází ke zhoršování *FSS* díky záporné systematické odchylce srážek. Tento rozdíl je dán tím, že zatímco v termínech 18 a 24 UTC převládaly v daném období silné konvektivní bouře, v termínech 06 a 12 byly srážky výrazně slabší.

Úprava výparu vede ke stabilizaci troposféry, zejména jejích spodních částí. Díky tomu je zvýrazněna systematická odchylka teploty ve 2 metrech nad zemí a také systematická chyba geopotenciálu redukovaného na hladinu moře. Dále je zhoršena náhodná chyba větru, jeho

rychlosti i směru, jako důsledek stabilizace této vrstvy. Tyto nedostatky by mělo být možné odstranit pomocí dalšího ladění paremetrů modelu.

5. Závěr

V tomto textu byly představeny modifikace mikrofyzikálního schématu klimatického modelu ALADIN, konkrétně byl vysvětlen princip parametrizace prognostických krupek a její úpravy. Přidání prognostických krupek do schématu má výraznější vliv na výsledky modelu než navržené úpravy jejich parametrizace. Ty by však měly vést k jejich fyzikálně realističtějšímu popisu.

Dále byly validovány další úpravy schématu, z nichž je dominantní účinnější parametrizace výparu, která pomáhá redukovat systematickou odchylku srážek zejména v chladné polovině roku. Na druhou stranu tato modifikace bez dalších úprav modelu způsobuje zhoršení atmosférických skóre.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

ABEL, S. J., BOUTLE, I. A., 2012. An improved representation of the raindrop size distribution for single-moment microphysics schemes, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **138**, qj.1949, ISSN 0035-9009. https://doi.org/10.1002/qj.1949

BROŽKOVÁ, R., BUČÁNEK, A., MAŠEK, J., SMOLÍKOVÁ, P., TROJÁKOVÁ, A., 2019. Nová provozní konfigurace modelu ALADIN ve vysokém rozlišení. *Meteorologické zprávy*, **72**, 5, 129–139, ISSN 0026-1173.

BUČÁNEK, A., 2020. Verification of the ALADIN precipitation forecast using Fraction Skill Score, dokumentace.

GERARD, L., PIRIOU, J., BROŽKOVÁ, R., GELEYN, J., BANCIU, D., 2009. Cloud and Precipitation Parameterization in a Meso-Gamma-Scale Operational Weather Prediction Model. *Monthly Weather Review*, **137**, MWR2750.1. ISSN 0027-0644. https://doi.org/10.1175/2009MWR2750.1

HONG, S-Y, LIM, J., 2008. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, **42**, MWR2387.1, ISSN 2288-3266.

JANOUŠEK, M., MLÁDEK, R., 2008. Verification package VERAL. Description and user’s guide, dokumentace.

LOPEZ, P., 2002. Implementation and validation of a new prognostic large-scale cloud and precipitation scheme for climate and data-assimilation purposes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **128**, 00359000260498879, ISSN 0035-9009. https://doi.org/10.1256/00359000260498879

NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., 2016. MERGE2 – modernizovaný systém kvantitativních odhadů srážek provozovaný v Českém hydrometeorologickém ústavu. *Meteorologické zprávy*, **69**, 5, 137–144, ISSN 0026-1173.

PINTY, J.-P., JABOUILLE, P., 1998. A mixed-phase cloud parameterization for use in mesoscale non-hydrostatic model: simulations of a squall line and of orographic precipitations, Proc. Conf. of Cloud Physics, Everett, WA, USA, **137**, American Meteorological Society.

ROBERTS, N. M., LEAN, H. W., 2008. Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Forecasts of Convective Events. *Monthly Weather Review*, **136**, MWR2123.1, ISSN 0027-0644. https://doi.org/10.1175/2007MWR2123.1

THOMPSON, G., FIELD, P. R., RASMUSSEN, R. M., HALL, W. D., 2008. Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Monthly Weather Review*, **136**, MWR2387.1, ISSN 0027-0644. https://doi.org/10.1175/2008MWR2387.1

Scenáre budúceho vývoja subdenných intenzít atmosférických zrážok na Slovensku

(Scenarios of Future Subdaily Rainfall Intensities in Slovakia)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.09

Milan Onderka, Slovenský hydrometeorologický ústav, Ústav vied o Zemi SAV,
milan.onderka@shmu.sk

Abstrakt: V predloženej štúdii sme odhadli možný vývoj sub-denných intenzít zrážok pre scenár RCP8.5 získaný z ansámblu regionálnych klimatických modelov EURO-CORDEX. Z ročných maximálnych úhrnov sme vypočítali hodnoty kvantilov pre 3hodinové zrážky s využitím GEV rozdelenia v nestacionárnom tvare. S využitím obalovej krivky transférových funkcií (empirické škálovanie) krátkodobých intenzít dažďa sme odhadli sub-denné (5 až 180 minútové) kvantily intenzít atmosférických zrážok pre časové horizonty 2040 a 2080 s priestorovým rozlíšením 0,11°. Následne sme pomocou nelineárnej triangulácie regridovali rastrové mapy z pôvodného rozlíšenia 0,11° do gridu 500x500 metrov.

Klíčová slova: intenzity atmosférických zrážok – regionálne klimatické scenáre

Abstract: Time series of 3-hour precipitation totals for the RCP8.5 scenario obtained from regional climate models EURO-CORDEX were processed to derive estimates of future rainfall frequencies. From the annual maxima of 3-hour precipitation totals, quantile values were estimated using a non-stationary GEV distribution with Bayesian inference. Using the envelope curves of short-term rainfall intensities, we estimated possible sub-hourly design intensities for the time horizons of 2040 and 2080 with a spatial resolution. The raster maps were subsequently re-gridded into 500x500 meter resolution using non-linear triangulation.

Keywords*:* rainfall intensities – regional climate scenarios, bias correction

1. Úvod

Pravdepodobnosť výskytu dažďov s trvaním niekoľko minút až hodín je najdôležitejšou štatistickou charakteristikou dažďa využívanou v inžinierskej praxi pri dimenzovaní vodohospodárskej infraštruktúry, obzvlášť v urbanizovanom prostredí. Návrhové intenzity dažďa sa štandardne určujú na základe historických pozorovaní atmosférických zrážok. Avšak klimatické extrémy vrátane extrémnych krátkodobých intenzít zrážok sa v mnohých častiach sveta zintenzívňujú. Za hlavnú príčinu tohto trendu sa považuje predovšetkým vyšší obsah vodnej pary v atmosfére, ako dôsledok rastúcej teploty troposféry.

2. Dáta

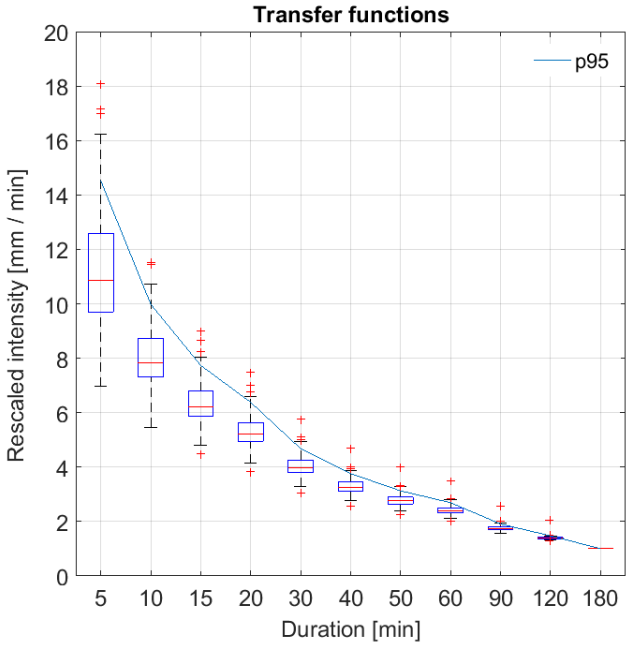
V práci sme použili regionálne klimatické modely EURO-CORDEX (ALADIN63, RACMO, RCA a HIRHAM5RCP) pre RCP8.5 (GCM: HadGEM2DMI). Za účelom korekcie modelov na odstránenie systematických chýb (bias correction) sme analyzovali historické simulácie z obdobia od roku 2005 do 2020, ktoré korešpondujú s obdobím pozorovaní zrážok v staničnej sieti SHMÚ na 150 lokalitách v rámci Slovenska, vybavených zrážkomermi (automatickými zrážkomermi s minútovým záznamom a digitalizovanými ombrografickými páskami s minútovým časovým rozlíšením).

Minútové časové rady boli najprv agregované na 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120 a 180minútové rady pomocou klzavých súm. Pre každý časový rad ročných maximálnych hodnôt a pre každú lokalitu boli vyčíslené ročné maximá, ktoré boli použité na výpočet jednotlivých

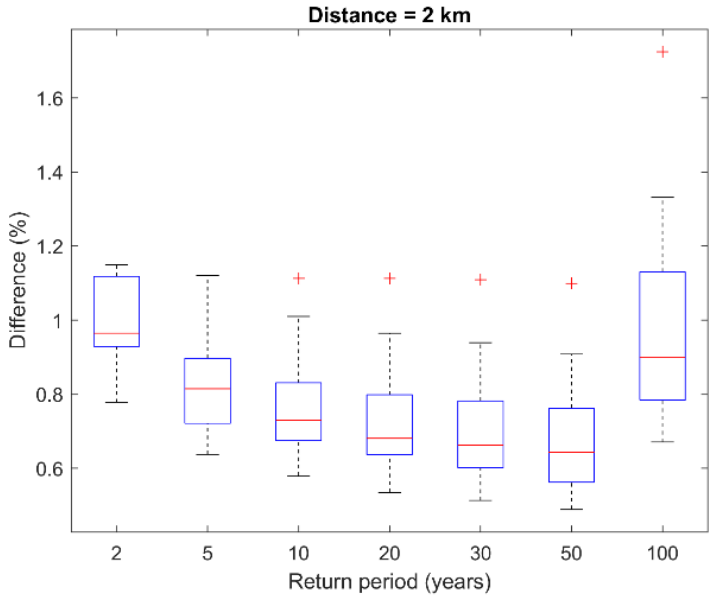
kvantilov. Obdobným spôsobom boli získané časové rady ročných maximálnych hodnôt 3hodinových úhrnov z regionálnych klimatických modelov pre každý gridový bod zvlášť.

3. Metódy

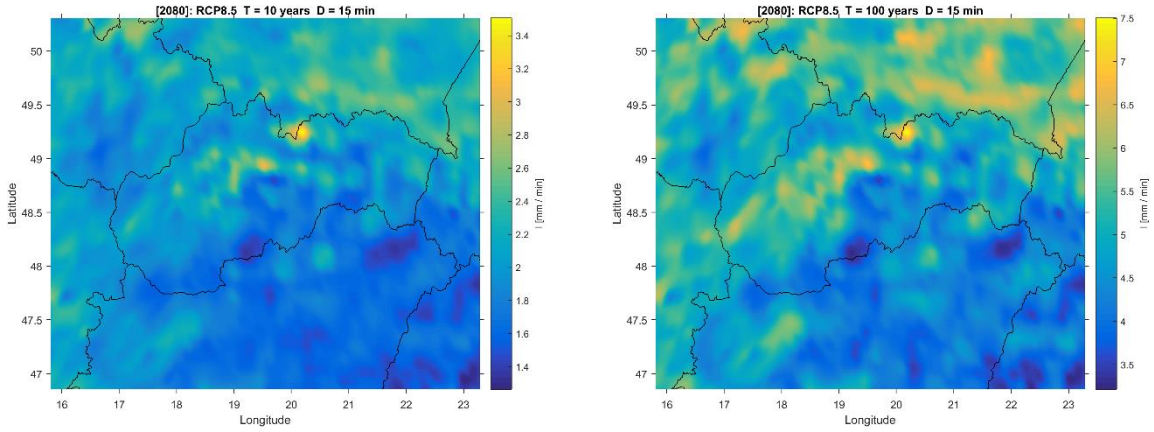
Na odhadnutie kvantilov intenzít dažďa s dĺžkou dažďových blokov sme použili Generalizované rozdelenie extrémnych hodnôt (GEV), ktorého parametre (parameter polohy, škály a tvaru) sme odhadli Bayesovskou inferenciou (Onderka a Pecho 2023; Coler 2001). Kvantily zodpovedajúce dobám opakovania 2, 5, 10, 20, 30, 50 a 100 rokov boli vypočítané v nestacionárnom tvare, t.j. parameter tvaru GEV rozdelenia bol modelovaný ako parameter lineárne závislý od času. Kvantily boli počítané zvlášť pre ročné maximá získané zo zrážkomerov a zvlášť pre každý gridový bod jednotlivých regionálnych klimatických modelov. Z dôvodu výpočtovej náročnosti odhadu parametrov rozdelenia Bayesovskou inferenciou, ktorá vyžaduje Monte Carlo simulácie, sme využili služby CVTI (Centra vedecko-technických informácií SR) so vzdialeným prístupom k výpočtovému klastru a akademickou licenciou Matlab®. Výsledkom boli odhady 180minútových kvantilov pre horizonty 2040, 2060 a 2080. Aby sme boli schopní určiť aj kvantily sub-hodinových intenzít, zostrojili sme transférovú funkciu zo zrážkomerných údajov, ktorá bola následne použitá na empirické preškálovanie 180minútových intenzít na intenzity dažďa s kratším trvaním (obr. 1). Vyhodnotili sme relatívne rozdiely ako pomer medzi staničnými 180minútovými kvantilmi s dobou opakovania 2 až 100 rokov a nekorigovaným ansámblom kvantilov (z historických behov) regionálnych klimatických modelov (obr. 2).



Obr. 1 Box-ploty transferových (škálovacích) funkcií medzi referenčnými 180minútovými intenzitami a intenzitami dažďa s trvaním od 5 do 120 minút (pozorovanými v rámci zrážkomernej siete SHMÚ). Obalová krivka bola určená ako 95ty percentil. Preškálované intenzity sú vynesené na vertikálnej osy.
Fig. 1 Box-plots of transfer (scaling) functions between reference 180-minute intensities and rain intensities with durations from 5 to 120 minutes (observed within the SHMÚ rainfall gauge network). The envelope curve was determined as the 95th percentile. The rescaled intensities are plotted on the vertical axis.



Obr. 2 Relatívne rozdiely medzi staničnými 180minútovými kvantilmi s dobou opakovania 2 až 100 rokov a nekorigovaným ansámblom kvantilov (získaných z historických behov) regionálnych klimatických modelov. Zobrazené rozdiely boli počítané pre tie gridové body pri ktorých vzdialenosť centroidu gridového bodu k najbližšiemu zrážkomeru bola menšia ako 2 km.
Fig. 2 Relative differences between the station 180-minute quantiles with recurrence times of 2 to 100 years and the uncorrected ensemble of quantiles (derived from historical runs) of regional climate models. The differences shown were calculated for those grid points where the distance of the grid point centroid to the nearest rain gauge was less than 2 km.



Obr. 3 Scenár vývoja kvantilov 15minútových dažďov na Slovensku s dobou opakovania 2 a 100 rokov pre horizont 2080.
Fig. 3 Scenario of the evolution of 15-minute rainfall quantiles in Slovakia with recurrence intervals of 2 and 100 years for the horizon 2080.

4. Záver

Odhadli sme možný vývoj sub-denných intenzít zrážok pre scenár RCP8.5 získaný z ansámblu regionálnych klimatických modelov EURO-CORDEX. Z ročných maximálnych úhrnov sme vypočítali hodnoty kvantilov pre 3hodinové zrážky s použitím GEV rozdelenia v nestacionárnom tvare. Porovnaním kvantilov získaných z údajov zo staničnej siete zrážkomerov a kvantilov získaných z regionálnych klimatických modelov možno usúdiť, že najmenšie rozdiely sú v prípade 2ročných zrážok, pričom so zvyšujúcou dobou opakovania (5,

10, 20, 30, 50 rokov) majú klimatické modely tendenciu nadhodnocovať (~20–30 %) kvantily zrážok oproti kvantilom počítaným z údajov zo zrážkomerov. Výnimku tvorí iba kvantil zodpovedajúci dobe opakovania 100 rokov. Ako príklad odhadovaných kvantilov uvádzame scenár 15minútových intenzít s dobou opakovania 10 a 100 rokov (obr. 3). Použitie obalovej krivky transférových funkcií zostrojenej vo forme 95. percentilu všetkých lokálnych transférových funkcií nevyhnutne vedie k nadhodnoteniu kvantilov intenzít pre všetky trvania dažďa. Treba tu však podotknúť, že už samotné kvantily počítané pre údaje zo zrážkomerov môžu vykazovať pomerne veľkú mieru neistoty. Ak pripustíme skutočnosť, že namerané intenzity zrážok v zrážkomeroch sú často podhodnotené (predovšetkým vysoké intenzity) v dôsledku účinku vetra, hlavne v horských oblastiach a vysokých hrebeňových polohách, tak nadhodnotenie kvantílov zapríčinené použitím obalovej (škálovacej) krivky tieto diskrepancie môže čiastočne korigovať. Predložená štúdia však nerieši systematické chyby zrážkomerov a s tým spojené aj chyby v odhadoch kvantilov intenzít zrážok. Za účelom korekcie systematických chýb (bias correction) v súčasnosti pracujeme na metóde kvantilového mapovania na nestacionárnej forme GEV distribučnej funkcii.

Literatura

COLES S., 2001. An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer Series in Statistics (SSS), Springer, London, pp 209.

ONDERKA M., PECHO J., 2023. Návrhové hodnoty intenzít krátkodobých dažďov na Slovensku. Národný klimatický program Slovenskej republiky, **17/22**, ISBN 978-80-99929-40-2.

Srážky podle PERUNa
(Precipitation by PERUN)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.10

Petr Zacharov, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., petas@ufa.cas.cz
Radmila Brožková, Český hydrometeorologický ústav, radmila.brozkova@chmi.cz
Daniela Řezáčová, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., rez@ufa.cas.cz

Abstrakt: Reanalýzy počasí jsou mocným nástrojem pro studium historického počasí jak v jednotlivých bodech, tak především v ploše. Detailní reanalýza, která vznikla v rámci projektu PERUN, tak umožňuje odhalit různé aspekty atmosféry v míře, kterou nejsme schopni měřením dosáhnout. Vzhledem k tomu, že se stále jedná o modelové přiblížení, je samozřejmě před jejím využitím odhalit systematické odchylky verifikací. Klimatické modelové běhy naopak mohou odhalovat vývoj atmosféry do budoucna. Vzhledem k tomu, že se tyto výpočty zatím nedají verifikovat, je potřeba validovat historický běh stejného modelu a odhalené systematické chyby odečíst od výhledu do budoucna. V rámci projektu PERUN byl spočten jak historický běh, tak i dva klimatické běhy až do roku 2100. V rámci této práce předkládáme základní verifikaci a validaci předpovědí srážek a vyhodnocení rozdělení srážek na stratiformní a konvektivní a navíc i na kapalné a tuhé srážky.

Klíčová slova: srážky – verifikace – validace

Abstract: Weather reanalyses are a powerful tool for studying historical weather both at individual points and especially over an area. The detailed reanalysis produced by the PERUN project thus makes it possible to reveal various aspects of the atmosphere to a degree that we are unable to achieve with measurements. Since it is still a model approximation, it is of course necessary to detect systematic biases by verification before its use. Climate model runs, on the other hand, can uncover the future evolution of the atmosphere. Since these calculations cannot yet be verified, it is necessary to validate a historical run of the same model and subtract the revealed systematic errors from the future projections. In the PERUN project, both the historical run and two climate runs up to 2100 have been calculated. In this work, we present a basic verification and validation of the precipitation forecasts and an evaluation of the separation of precipitation into stratiform and convective precipitation and, in addition, into liquid and solid precipitation.

Keywords: precipitation – verifikace – validation

1. Úvod

I přes výrazné úspěchy na poli vývoje numerických modelů předpovědi počasí představují srážky pro modely stále jednu z nejkomplikovanějších veličin. Modelová zjednodušení mikrofyzikálních procesů v oblačnosti ruku v ruce s nedokonalým měřením struktury oblačnosti znamenají velkou pravděpodobnost nepřesného výpočtu. Na druhou stranu srážky zajímají širokou veřejnost ať už ve formě předpovědi či plošného vyhodnocení spadlých srážek. Meteorologické radary v současnosti sice umí popsat plošné rozložení srážek na daném území, při obsáhlé analýze ovšem stále narážíme na časové a případně i prostorové omezení jejich měření. Detailní reanalýza srážek tak představuje mocný nástroj pro přehled o plošných srážkách v relativně dlouhém časovém období. Vzhledem k využití současných modelů předpovědi počasí je ale nutné vzniklé reanalýzy verifikovat dostupnými daty, abychom si vytvořili dobrou představu o slabinách dané reanalýzy, podcenění nebo přecenění srážek jak v čase, tak i v ploše.

V Českém hydrometeorologickém ústavu vznikla díky projektu PERUN reanalýza PERUN/Reanalysis, označovaná kódem ALADIN.aaa (dále A.aaa, viz tab. 1) a vzhledem k náročnosti výpočtu i druhá zjednodušená verze ALADIN.aab (dále A.aab, viz tab. 1). PERUN/Reanalysis využívá metodu Digital Filter blending výškových polí (Brožková et al. 2006) s evropskou reanalýzou ERA5 (Hersbach et al. 2020). Počáteční podmínky jsou určeny asimilací pozorování teploty a vlhkosti ve 2 m ze zpráv SYNOP. Teplota povrchu moře je převzata z ERA5. Zjednodušená verze A.aab je řízena pouze okrajovými podmínkami z ERA5.

Obě reanalýzy byly vytvořeny modelem ALADIN, který byl upraven pro klimatologické výpočty. Prostorové rozlišení modelu je přibližně 2,3x2,3 km na výpočetní doméně pokrývající téměř celou Evropu kromě Středomoří, Skandinávie a východní Evropy. Pro potřeby podrobné verifikace srážek jsme se zaměřili pouze na oblast České republiky. Obě reanalýzy jsou v současné době dostupné v období 1990–2019, reanalýza PERUN/Reanalysis se aktuálně doplňuje do roku 2022.

Tab. 1 Přehled použitých modelových běhů a v textu použitých kódů.
Tab. 1 Summary of model runs and codes used in the text.

Modelový běh	Kód	Dostupná data	Popis
ALADIN.aaa	A.aaa	1990–2021	Reanalýza řízená ERA5 s asimilací staničních měření
ALADIN.aab	A.aab	1990–2019	Reanalýza řízená ERA5
ALADIN.aaf	A.aaf	1980–2014	Historický klimatický běh
ALADIN.sad	A.sad	2015–2100	Klimatický běh v pesimistickém scénáři SSP5-8.5
ALADIN.sae	A.sae	2015–2100	Klimatický běh ve scénáři SSP2-4.5

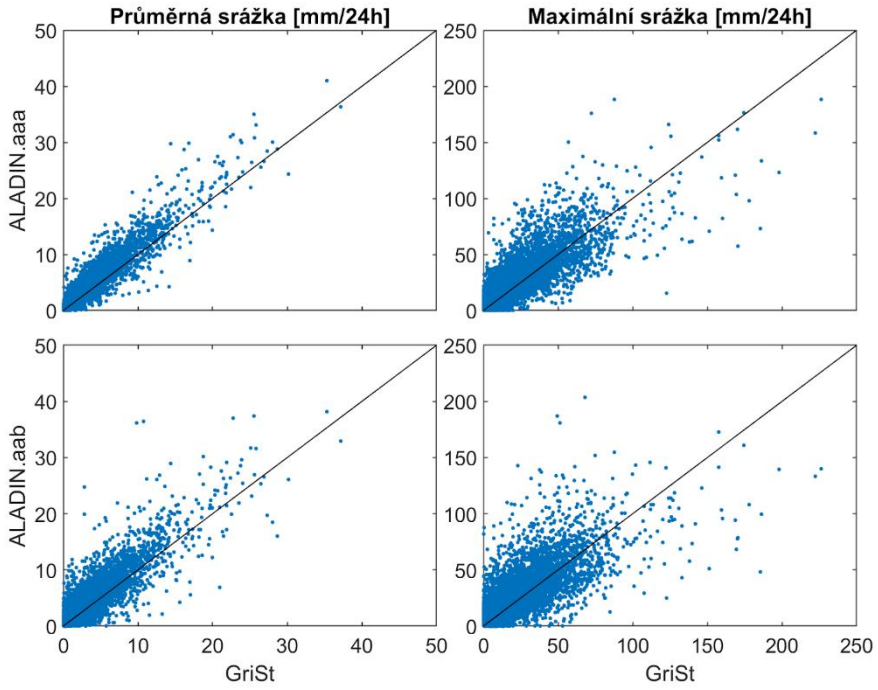
Vzhledem k probíhající klimatické změně poutá pozornost klimatologů celého světa hodnocení vývoje klimatu v příštích dekádách či století. Pokračováním historických reanalýz v projektu PERUN je pak klimatický běh modelu ALADIN do roku 2100. Pro potřeby validace byl vytvořen jednak historický klimatický běh označovaný jako ALADIN.aaf (dále A.aaf, viz tab. 1), do budoucna jsou zatím k dispozici dvě projekce označované jako ALADIN.sad a ALADIN.sae (dále A.sad a A.sae, viz tab. 1), které se od sebe liší vybraným emisním scénářem. Klimatické běhy modelu ALADIN jsou počítány ve stejném nastavení, jako reanalýzy, tedy s horizontálním rozlišením přibližně 2,3 km. Běhy jsou párované s klimatickým modelem CNRM-ESM2-1, A.sad v pesimistickém scénáři SSP5-8.5 a A.sae v optimističtějším scénáři SSP2-4.5.

2. Verifikace reanalýz srážek

Verifikace reanalýz srážek byla provedena proti gridovanému staničnímu měření (GriSt) pro 24h úhrny srážek. Vzhledem k pokrytí domény měřením srážek byly vybrány pouze body pokrývající území České republiky. Pro verifikaci byly vybrány přehledné charakteristiky a to střední chyba, střední relativní chyba a korelace.

Při verifikaci reanalýzy A.aaa a A.aab byly zjištěny výborné korelace a to jak průměrných denních úhrnů (0,95 pro A.aaa a 0,90 pro A.aab), tak bodových maxim (0,90 pro A.aaa a 0,79 pro A.aab). To je patrné i na dobré shodě průměrných a maximálních denních úhrnů na obr. 1. Z obrázku je patrné přecenění průměrných srážek reanalýzou, maximální denní gridové úhrny jsou v průměru bez přecenění. Průměrná relativní střední chyba reanalýzy A.aaa je 32,5 % a reanalýzy A.aab je 34,7 %. I když průměrná střední chyba jednoznačně roste

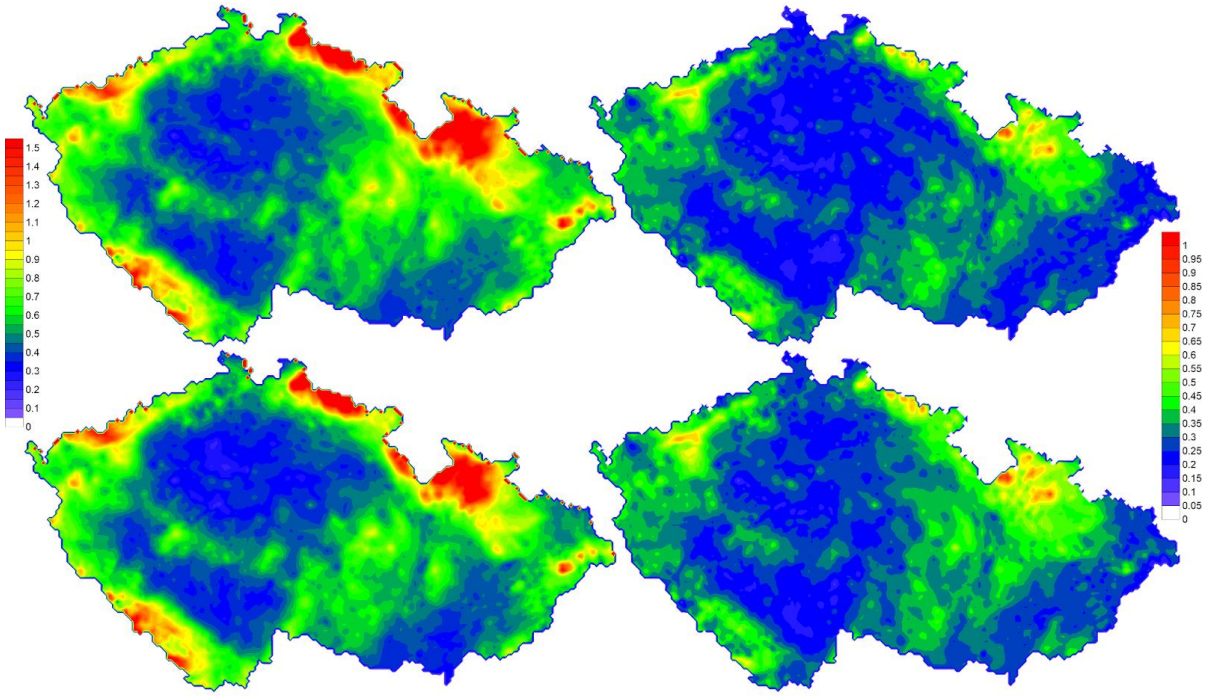
s nadmořskou výškou (obr. 2a), relativní střední chyba díky růstu srážkových úhrnů s nadmořskou výškou takový nárůst nevykazuje (obr. 2b).



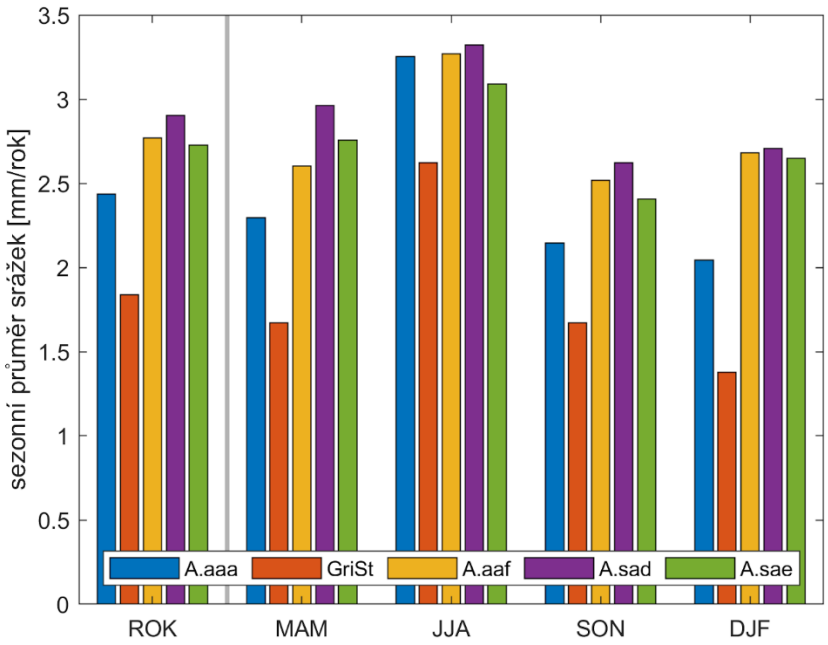
Obr. 1 Scatterplot průměrných (levý sloupec) a maximálních (pravý sloupec) denních úhrnů z reanalýzy A.aaa (horní řádka) a A.aab (dolní řádka) oproti hodnotám GriSt (vodorovná osa).
Fig. 1 Scatterplot of mean (left column) and maximum (right column) daily totals from A.aaa (top row) and A.aab (bottom row) reanalysis against GriSt values (horizontal axis).

Historický klimatický běh A.aaf přeceňuje za porovnávané období 1990–2014 srážky o 50 %, klimatické běhy A.sad i A.sae počítají roční průměry za etapu 2015–2100 velmi podobně historickému běhu (obr. 3). V porovnání jednotlivých sezon vidíme vyšší přecenění všech modelů v zimě, což ale může být způsobeno problematickým měřením sněhu na stanicích a tedy poklesem v zimě měřených srážek oproti modelovým běhům. Klimatické běhy včetně historického běhu shodně ukazují oproti reanalýze relativní pokles srážek v letním období a naopak nárůst srážek v zimním období (obr. 3). Tento jev je tedy spíše systematickou odchylkou běhu řízeného globálním klimatickým modelem než změnou rozdělení srážek. Rozdělíme-li srážky do pětiletých období, vidíme, že oproti A.aaf předpovídá A.sad o něco vyšší a A.sae naopak zanedbatelně nižší průměrnou srážku. A.sad zároveň předpovídá průměrný nárůst srážek během let 2015–2100.

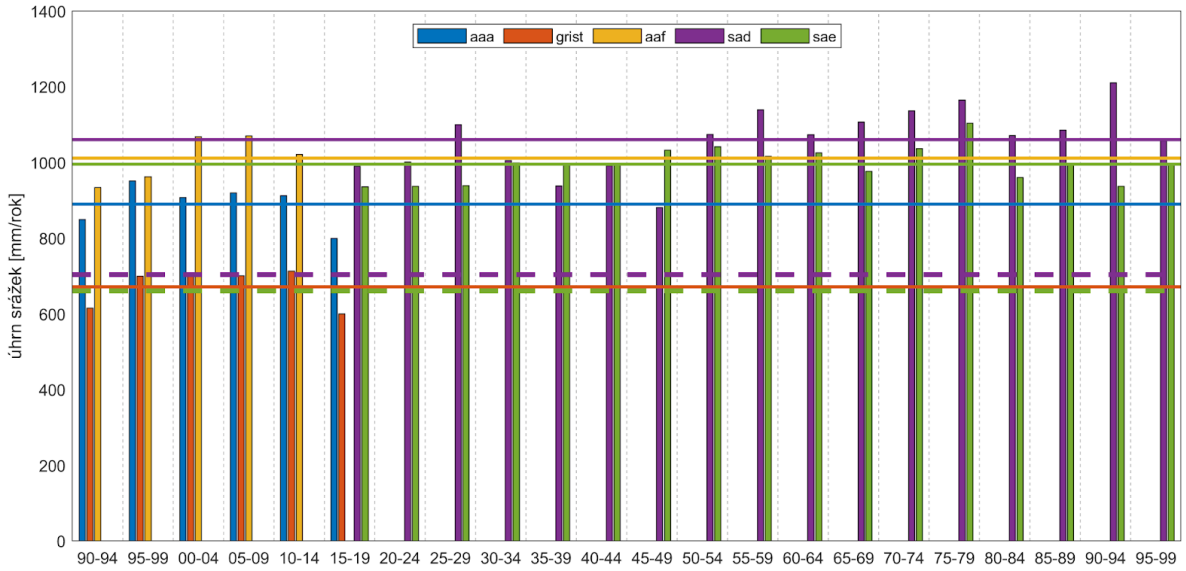
Výstupy reanalýz ALADIN umožňují rozdělit srážky na stratiformní a konvektivní a také na kapalné a tuhé srážky. Tuhé srážky představují v průměru 25 % všech srážek za celé studované třicetileté období, rozdělíme-li etapu na pětiletá období tak dostáváme nejvyšší podíl tuhých srážek v období 1995–1999 a to 29 %, od té doby podíl tuhých srážek postupně klesá (obr. 5). Ve výhledu do budoucna klesá významně podíl tuhých srážek pro oba studované běhy, výrazněji pro pesimistický A.sad, kde podíl tuhých srážek v poslední pentádě 2095–2099 dosahuje 8,7 %, A.sae počítá s podílem 19 %.



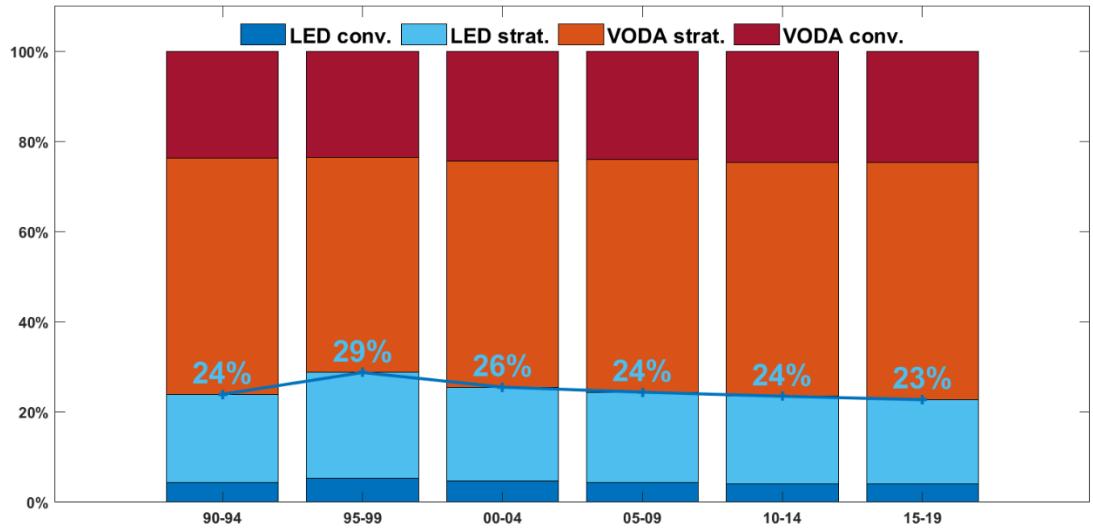
Obr. 2 a) vlevo střední chyby a b) vpravo střední relativní chyby pro reanalýzy A.aaa (horní řádek) a A.aab (dolní řádek). Barevné rozdělení chyb viz legendy [mm/24].
Fig. 2 (a) left - mean errors and (b) right - mean relative errors for reanalyses A.aaa (top row) and A.aab (bottom row). See legends [mm/24] for the color distribution of the errors.



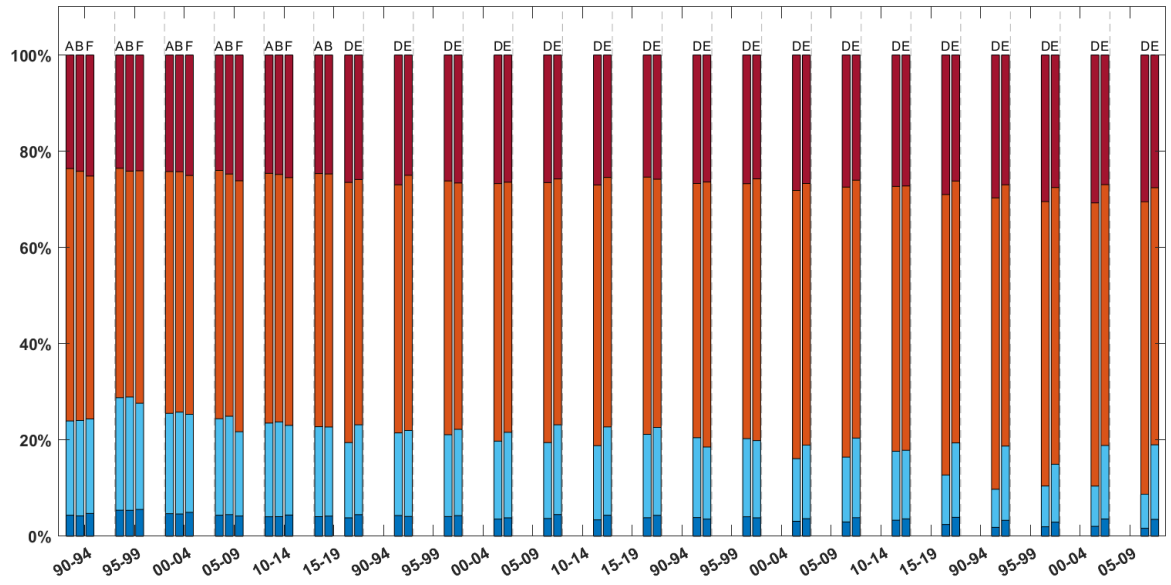
Obr. 3 Srovnání průměrných ročních (první sada sloupců) a průměrných sezónních srážek (druhá až pátá sada sloupců, viz legenda na vodorovné ose) pro reanalýzu A.aaa, historický běh A.aaf a klimatické běhy A.sad a A.sae (barevné odlišení viz legenda).
Fig. 3 Comparison of mean annual (first set of columns) and mean seasonal precipitation (second to fifth set of columns, see legend on horizontal axis) for the reanalysis of A.aaa, the historical run of A.aaf, and the climate runs of A.sad and A.sae (see legend for color differentiation).



Obr. 4 Srovnání průměrných srážek za jednotlivé pentády od roku 1990 do 2099 (vodorovná osa) pro dostupná data reanalýzy A.aaa, gridovaného měření srážek GriSt, historického běhu A.aaf a klimatických běhů A.sad a A.sae (barevné odlišení viz legenda). Plné vodorovné čáry představují průměrnou roční srážku každého běhu i měření, přerušovaná čára představuje normování klimatických běhu podílem měřeného ročního úhrnu a průměru běhu A.aaf.
Fig. 4 Comparison of average precipitation for each pentad from 1990 to 2099 (horizontal axis) for the available data of the A.aaa reanalysis, the GriSt gridded precipitation measurements, the A.aaf historical run, and the A.sad and A.sae climate runs (see legend for colour differentiation). The solid horizontal lines represent the average annual precipitation of each run and measurement, the dashed line represents the normalization of the climate runs by the fraction of the measured annual precipitation and the average of the A.aaf run.



Obr. 5 Rozdělení srážek na kapalné nebo ledové a konvektivní nebo stratiformní (viz legenda) pro jednotlivé pentády reanalýzy A.aaa (výsledek pro A.aab je takřka identický).
Fig. 5 Separation of precipitation into liquid or ice and convective or stratiform (see legend) for each pentad of the A.aaa reanalysis (the result for A.aab is almost identical).



Obr. 6 Rozdělení srážek na kapalné nebo ledové a konvektivní nebo stratiformní (viz legenda) za jednotlivé pentády od roku 1990 do 2099 (vodorovná osa) pro dostupná data reanalýzy A.aaa (A) a A.aab (B), historického běhu A.aaf (F) a klimatických běhů A.sad (D) a A.sae (E).
Fig. 6 Separation of precipitation into liquid or ice and convective or stratiform (see legend) for each pentad from 1990 to 2099 (horizontal axis) for the available data of the reanalysis runs A.aaa (A) and A.aab (B), the historical run A.aaf (F) and the climate runs A.sad (D) and A.sae (E).

3. Závěr

Detailní reanalýza A.aaa, která vznikla v rámci projektu PERUN, sice přeceňuje srážky v průměru o 32,5 %, nicméně průměrné i maximální gridové denní úhrny jsou vysoce korelované a i v ploše srážky dobře odpovídají měřením. Nejvyššího přecenění dosahuje reanalýza v zimním období, což je ale pravděpodobně důsledkem problematického měření sněhových srážek. I přes výrazné zjednodušení výpočtu reanalýzy A.aab, kde chybí asimilace staničních měření, dosahuje reanalýza A.aab velmi obdobných výsledků, jako A.aaa, většinou s drobně vyšším rozptylem. Historický klimatický běh A.aaf přeceňuje srážky o 50 % a tento bias bude třeba zohlednit při použití klimatických předpovědí A.sad a A.sae. I přes projekce zatížené systematickou chybou lze konstatovat, že A.sad postupně zvyšuje do roku srážky na území ČR narozdíl od A.sae, který srážky nechává na úrovní srážek historického běhu A.aaf.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

BROŽKOVÁ, R., DERKOVÁ, M., BELLUŠ, M., FARDA, A., 2006. Atmospheric forcing by ALADIN/MFSTEP and MFSTEP oriented tunings. *Ocean Sci.*, **2**, 113–121. https://doi.org/10.5194/os-2-113-2006

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., et al., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.*, **146**, 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

Charakteristiky konvektivního prostředí v reanalýze ALADIN
(Characteristics of convective environment in ALADIN reanalysis)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.11

Petr Zacharov, Ústav fyziky atmosféry AV ČR v. v. i., petas@ufa.cas.cz
Martin Vokoun, Ústav fyziky atmosféry AV ČR v. v. i., martin.vokoun@ufa.cas.cz

Abstrakt: Pro předpověď a hodnocení potenciálu atmosféry ke vzniku konvektivní oblačnosti se používají různé charakteristiky konvektivního prostředí. Z výstupů reanalýzy ALADIN jsou k dispozici hodnoty *CAPE*, *CIN*, rychlosti větru a teploty v několika standardních hladinách, ze kterých je možné spočítat střih větru a vertikální teplotní gradient. Verifikaci umožňuje bodové srovnání s daty ze sondážních měření, např. z Prahy, Libuš.

Klíčová slova: konvekce – CAPE – CIN – ALADIN – reanalýza

Abstract: For the prediction and assessment of the potential for convective cloud formation, various characteristics of the convective environment are used. Values of *CAPE*, *CIN*, wind speed, and temperature at several standard levels are available from the ALADIN reanalysis outputs, from which wind shear and vertical temperature gradient can be calculated. Verification allows for point comparison with data from sounding measurements, for example, from Prague, Libuš.

Keywords: convection – CAPE – CIN – ALADIN – reanalysis

1. Úvod

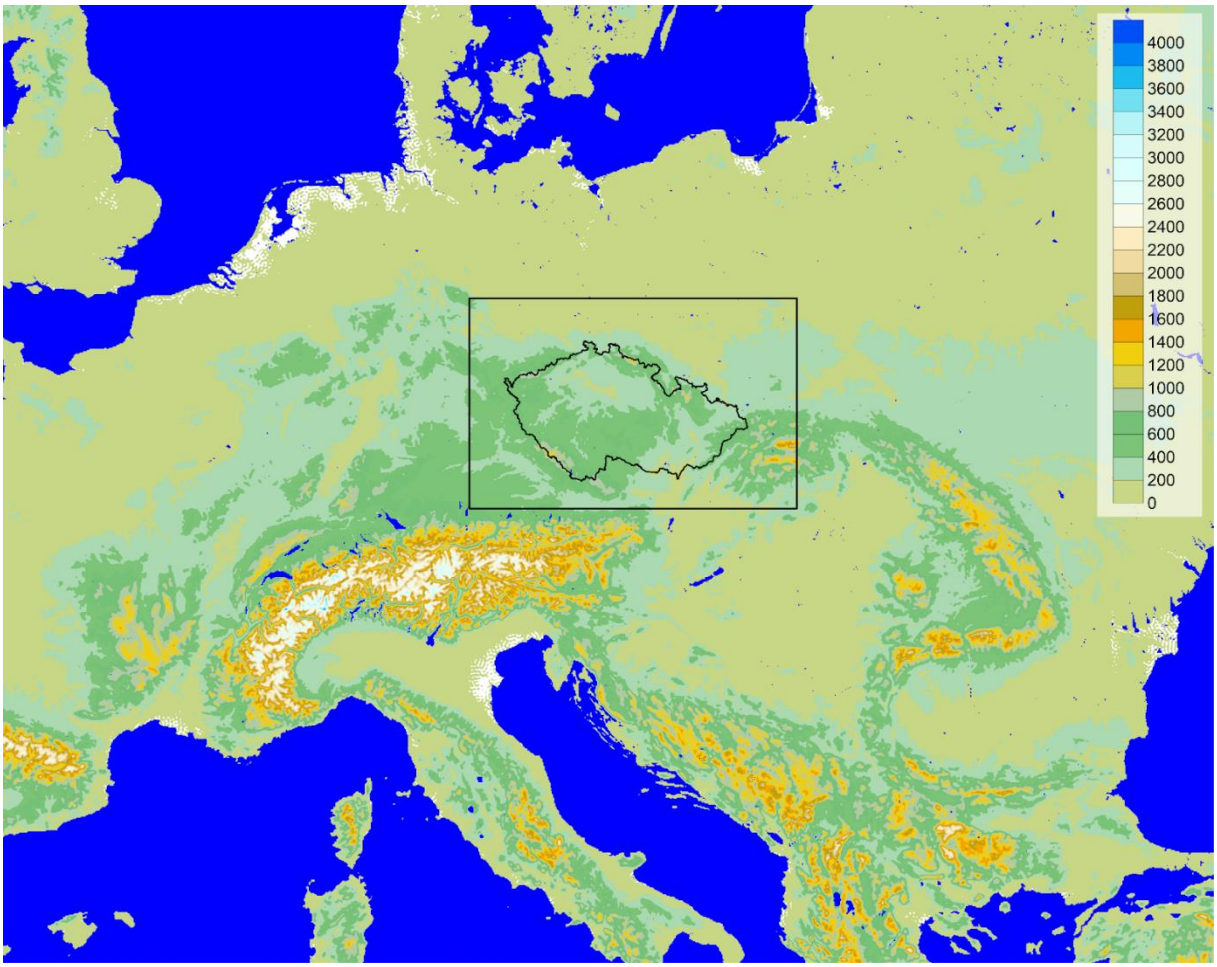
Silné konvektivní bouře způsobují v České republice každoročně škody na majetku a jsou tedy významným meteorologickým prvkem, který je potřeba měřit, zkoumat a předpovídat. Pro předpověď vzniku silných bouří potřebujeme popsat instabilitu atmosféry, vlhkost vzduchu v přízemní vrstvě a možnosti počátečních impulsů vzniku bouří. Vzhledem k tomu, že jsou počáteční impulsy velmi těžko předvídatelné, zužuje se předpověď rizika silných bouří na popis konvektivního prostředí, tedy na popis připravenosti atmosféry spustit silné bouře.

V rámci projektu PERUN jsou v Českém hydrometeorologickém ústavu pomocí modelu ALADIN počítány reanalýzy historického klimatu (PERUN/Reanalysis) od roku 1990. Výstupy jsou dostupné v horizontálním rozlišení 2,3x2,3 km a umožňují zkoumat konvektivní jevy a obecně konvektivní prostředí, tedy časové a prostorové podmínky pro vznik konvektivních bouří. Jako řídící indexy konvekce byly k posouzení vybrány hodnoty *MUCAPE* (*Most Unstable Convective Available Potential Energy*), *MUCIN* (*Most Unstable Convective Inhibition*), a střih větru ve vrstvě přibližně 6000 m. Výstupy poskytují unikátní plošné informace ve vysokém horizontálním rozlišení, které nebyly dosud nikterak dostupné. Historická data poslouží zároveň jako podklad k hodnocení změn klimatu, resp. konvektivního prostředí, na základě výpočtů budoucího stavu klimatu modelem ALADIN.

2. Data

PERUN/Reanalysis poskytuje předpověď s počátkem každý den v 00h a časovým horizontem 30h. Model využívá 6h asimilační okno pro analýzy hodnot u povrchu a blending ERA5 dat z vyšších polí. V současnosti jsou dostupné výstupy pro období 1990–2019. Počáteční rok 1989 sloužil k ustálení výpočtu modelu a není do studie zahrnut. Naopak výstupy z let 2020–2022 jsou momentálně dopočítávány a do studie budou v budoucnu postupně doplněny. Prostorové pokrytí modelu zahrnuje střední Evropu (obr. 1), nicméně pro účely studie byla vybrána menší subdoména pokrývající Českou republiku a její blízké okolí (obr. 1). Zatímco

celá výpočetní doména zahrnuje 1037x821 gridových bodů, subdoména obsahuje 281x181 g.b. Pro hodnocení konvektivního prostředí jsme využili *MUCAPE*, *MUCIN* a rychlost a směr větru v 10 m nad povrchem a v hladině 500 hPa. Vzhledem k tomu, že se srovnatelný střih větru počítá ve vrstvě 6 km, byla provedena korekce výšky vrstvy střihu větru na základě geopotenciální výšky v 500 hPa na zmíněnou výšku 6000 m. Pro verifikaci modelových výstupů hodnot *MUCAPE* a *MUCIN* byly využity zpracované výsledky sondážní měření ze stanice Praha, Libuš.



Obr. 1 Výpočetní doména modelu ALADIN s vyznačením vybrané subdomény pro účely studie.
Fig. 1 ALADIN model computing domain and bounded subdomain for the study purposes.

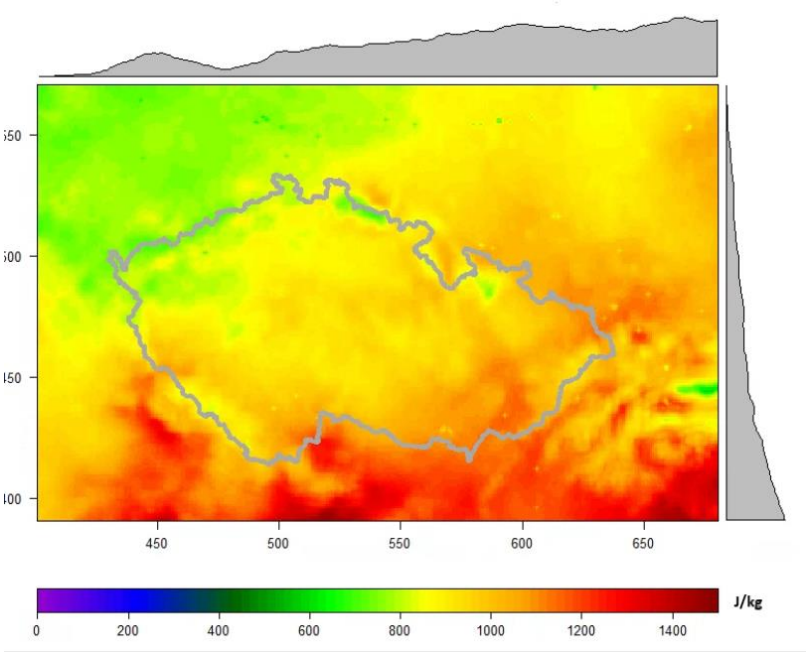
3. Vyhodnocení

Datová řada pokrývající období 30 let zahrnuje poměrnou částí i dny, kdy se podmínky pro konvekci nevyskytovaly. Jedná se především o dny v zimní polovině roku. Z tohoto důvodu byly k vyhodnocení charakteristik vybrány pouze tzv. konvektivní dny. Konvektivní den je takový den, kdy hodnoty *MUCAPE* byly vyšší jak 100 $J \cdot kg^{-1}$ alespoň na 10 % plochy subdomény.

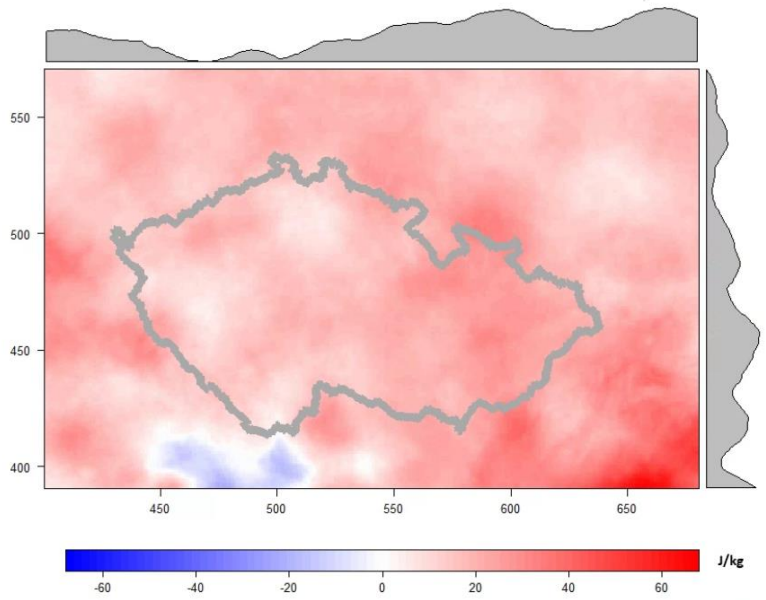
3.1 Prostorové rozložení MUCAPE

Při rozdělení datových řad do 4 ročních sezón je evidentní stabilně rozdílné rozložení hodnot *MUCAPE* v rámci ČR a nejbližšího okolí. Nejvyšší hodnoty se vyskytují v jižní části domény, zejména v Bavorsku. V rámci ČR se jedná o oblast JZ Čech, JV a SV Moravy a také Polabí. Z oblastí čitelně vystupují hraniční pohoří s nižšími hodnotami v porovnání s okolím. Tomuto rozložení odpovídá také obr. 2, na kterém jsou zobrazeny průměrné maximální hodnoty pro

letní období červen–srpen. Grafy po stranách zobrazují průměrnou hodnotu v každém příslušejícím gridovém řádku nebo sloupci. I z tohoto zobrazení lze rozpoznat směr a míru nárůstu hodnot *MUCAPE*. Obr. 3 pak popisuje, jak se plošně změnily průměrné celoroční hodnoty *MUCAPE* mezi obdobími 1990–2004 a 2005–2019. K nárůstu hodnot došlo na téměř celém území subdomény, vyjma oblasti v JZ části, mezi hranicemi ČR a Alpami. Změny hodnot jsou prostorově proměnlivější a k výraznějším nárůstům dochází i v oblastech s obecně nižšími hodnotami *MUCAPE*, např. v SZ části subdomény.



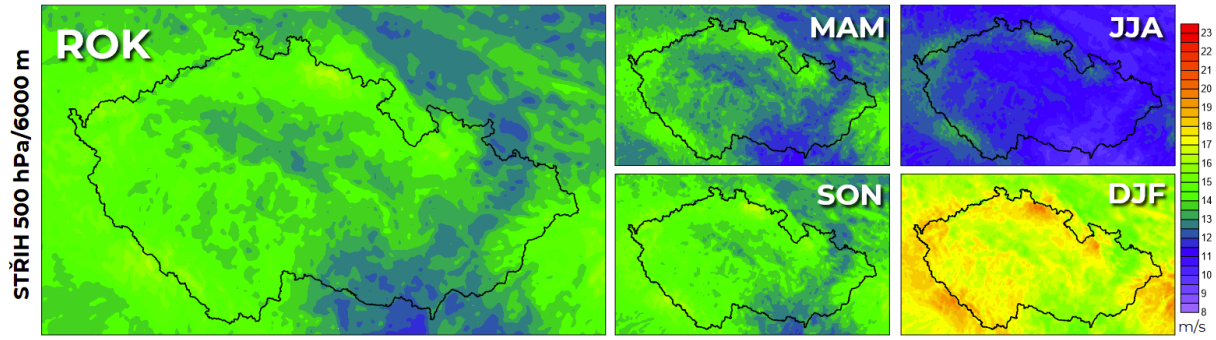
Obr. 2 Průměrné maximální denní hodnoty MUCAPE pro období červen–srpen.
Fig. 2 Mean maximum daily MUCAPE values in June–August.



Obr. 3 Rozdíl v průměrných hodnotách MUCAPE mezi obdobími 1990–2004 a 2005–2019.
Fig. 3 Difference between mean MUCAPE values from 1990–2004 and 2005–2019.

3.2 Prostorové rozložení střihu větru

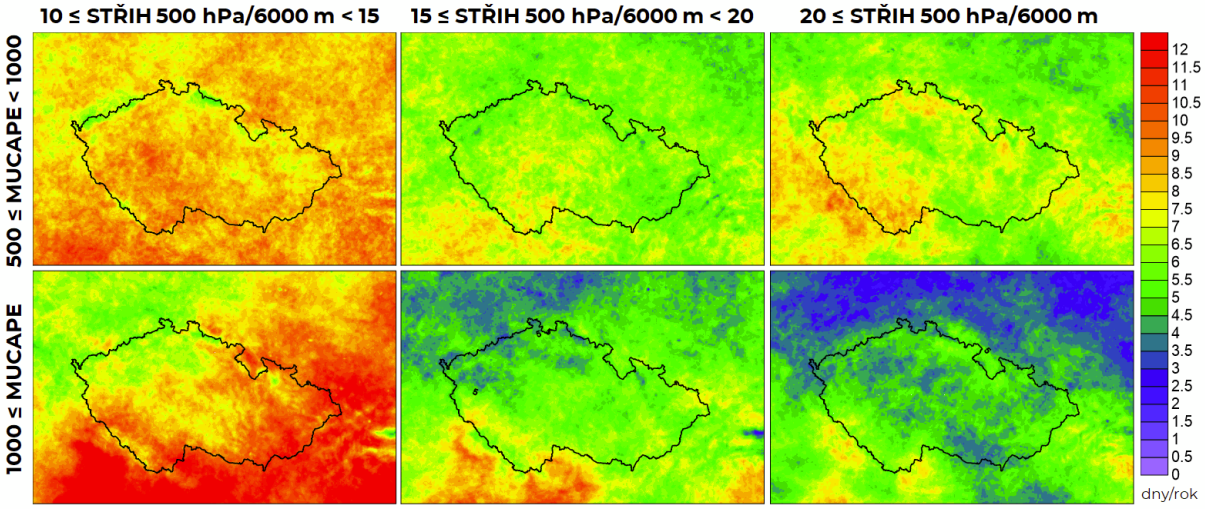
Zatímco *MUCAPE* hodnoty dosahují nejvyšších hodnot v letních měsících, v případě střihu větru je tomu naopak (obr. 4). Střih větru narůstá v zimním období a zejména pak v příhraničních horských oblastech. Po provedení geopotenciální výškové korekce lze obecně pozorovat nárůst střihu větru s rostoucí nadmořskou výškou. Prostorové rozložení je po celý rok velmi podobné a mění se pouze intenzita.



Obr. 4 Průměrné prostorové rozložení střihu větru během celého roku a v jednotlivých sezónách (500 hPa/6000 m).
Fig. 4 Annual and seasonal spatial distribution of mean wind shear (500 hPa/6000 m).

3.3 Kombinace MUCAPE a střihu větru

Veličina *MUCAPE* patří mezi základní parametry pro odhad vzniku silných bouří, na jejich organizaci má však zásadní vliv střih větru. Na obr. 5 je znázorněno prostorové rozložení průměrného ročního počtu dní, kdy bylo dosaženo významných hodnot *MUCAPE* a střihu větru. Z výsledků lze odvodit, že v případě kombinace těchto dvou prvků nastává vyšší prostorová diverzifikace při hodnotách *MUCAPE* nad 1000 J·kg^{-1}. Zde opět vystupuje s vyšší četností takových dnů jižní a jihozápadní část ČR.



Obr. 5 Prostorové rozložení průměrného ročního počtu dní s významnými hodnotami MUCAPE a střihu větru (500 hPa/6000 m).
Fig. 5 Spatial distribution of mean annual number of days with significant MUCAPE and wind shear (500 hPa/6000 m).

3.4 Porovnání MUCAPE s daty ze sondážního měření

Verifikaci výstupů reanalýzy nelze provézt plošně pro celou doménu, jelikož neexistují relevantní plošná měřená data. Proto bylo přistoupeno k verifikaci bodové, tedy ke srovnání měřených sondážních dat ze stanice Praha, Libuš a k ní odpovídající data z příslušného gridu,

kde se stanice nachází. Při rozdělení hodnot *MUCAPE* do 6 kategorií je shoda modelu s měřením 61,5 % případů s lehkým nadhodnocováním, a to konkrétně v 28,6 % případů (tab. 1).

Tab. 1 Kontingenční tabulka hodnot MUCAPE ze sondážního měření a odpovídajících hodnot z reanalýzy ALADIN.
Tab. 1 Contingency table of MUCAPE values from the sounding with corresponding values from ALADIN/Reanalysis.

MUCAPE [J·kg⁻¹]		**PERUN/Reanalysis**					
		0–10	**10–50**	**50–100**	**100–250**	**250–500**	**≥500**
PRAHA, LIBUŠ	**0–10**	**17884**	3677	1348	530	158	76
	10–50	1479	**1235**	705	676	265	138
	50–100	280	494	**477**	673	316	172
	100–250	123	244	293	**829**	673	446
	250–500	26	47	59	229	**431**	682
	≥500	19	15	27	87	213	**1802**
HIT = 61,5 %			***OVEREST. = 28,6 %***			***UNDEREST. = 9,9 %***	

Pokud snížíme nároky na hodnocení modelu a zjednodušíme kategorie hodnot MUCAPE (tab. 2), dochází k navýšení případů shody měření a předpovědi na výbornou hodnotu 85,6 %. Počet nadhodnocujících případů se sníží na 11,2 %. K ještě výraznější korekci dochází u případů nadhodnocení, které poklesly na pouhých 3,1 %. V tomto případě je korelační koeficient pro *MUCAPE* mezi modelem a sondážním měřením 0,81. Nižších hodnot dosahuje pro hodnoty *MUCIN*, a to pouze 0,43. Ve srovnání mezi sondážním měřením vychází hodnoty *MUCAPE* až překvapivě dobře, hodnoty MUCIN ovšem tak výborných výsledků nedosahují, zřejmě díky obtížnému modelovému popisu mezní vrstvy.

Tab. 2 Zjednodušená tabulka 1.
Tab. 2 Simplified Table 1.

MUCAPE [J·kg⁻¹]		**PERUN/Reanalysis**		
		0–100	**100–500**	**≥500**
PRAHA, LIBUŠ	**0–100**	**27579**	2618	386
	100–500	792	**2162**	1128
	≥500	61	300	**1802**
HIT = 85,6 %		***OVEREST. = 11.2 %***		***UNDEREST. = 3.1 %***

4. Závěr

Charakteristiky konvektivního prostředí jsou důležitým podkladem pro hodnocení potenciálu atmosféry produkovat silné konvektivní bouře. Ve vyhodnocení reanalýzy PERUN/Reanalysis jsme se zaměřili na *MUCAPE*, *MUCIN* a střih větru ve vrstvě přibližně 6000 m. Výsledky budou mimojiné použity k hodnocení výstupů klimatických předpovědí modelem ALADIN. Prvotní verifikace výstupů hodnotí výstupy *MUCAPE* jako velmi uspokojivé, naopak hodnoty *MUCIN* vykazují vyšší míru nepřesnosti, pravděpodobně díky obtížnému modelovému popisu mezní vrstvy. V jižních až jihovýchodních částech domény nacházíme vyšší hodnoty *MUCAPE*,

v jihozápadní části domény nacházíme vyšší množství dnů s překryvem vyšších hodnot *MUCAPE* a střihu větru, což jsou podmínky pro vznik organizované konvekce, především supercel. Hodnocení změn počtu těchto dní ve výpočtech do roku 2100 bude důležitou informací o potenciálu budoucího počasí.

Poděkování

Autoři děkují Technologické agentuře ČR za finanční podporu v rámci grantu č. SS02030040 (Prediction, Evaluation and Research for Understanding National sensitivity and impacts of drought and climate change for Czechia, PERUN) a také Davidu Rývovi (Český hydrometeorologický ústav) za přípravu sondážních dat ze stanice Praha, Libuš.

Blok 2 – rizika hydrometeorologických jevů, dopady změny klimatu, biometeorologické aspekty, návrhové srážky

Stochastické meteorologické generátory a regionální klimatické modely: konkurence či spojenci?

(Stochastic Weather Generators and Regional Climate Models: Rivals or Allies?)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.12

Martin Dubrovský, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., dub@ufa.cas.cz
Petr Štěpánek, Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i., Český hydrometeorologický ústav
Jan Meitner, Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i.
Pavel Zahradníček, Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i., Český hydrometeorologický ústav

Abstract: The paper demonstrates "collaboration" between the stochastic weather generator SPAGETTA (WG) and Regional Climate Models (RCM) in analysing impacts of Climate Change (CC). In the first part of the paper, the generator is compared with the ensemble of 19 RCMs in terms of their ability to reproduce 11 spatial temperature and precipitation indices in eight European regions; the indices are based on registering days and spells exhibiting spatially significant occurrence of dry, wet, hot or cold weather, or possible combination of dry-or-wet and hot-or-cold conditions. The obtained results indicate that both methodologies provide weather series of comparable quality. In the second part of the paper (which was done only for the Central Europe region), the WG parameters are modified using the RCM-based CC scenarios and the synthetic weather series representing the future climate are produced. This experiment is based on a set of CC scenarios, which consist of changes in selected combinations of following characteristics: (1) mean temperature, (2) temperature variability, (3) daily average precipitation (considering only wet days), (4) probability of wet day occurrence, (5) spatial lag-0 and lag-1day correlations of temperature and precipitation series. The synthetic series generated for each version of the CC scenario are analysed in terms the above mentioned spatial validation indices, the stress was put on effect of each of the five component of the CC scenario on individual validation indices. The results of the experiment indicate that the changes in temperature means is the main contributor to the changes in the validation obviously, except for the purely precipitation-based indices. Positive changes in the lag-0 and lag-1day correlations of both temperature and precipitation are the second most significant contributor to the changes in the validation indices.

Keywords: generators – regional climate models – temperature – precipitation – validation – compound indices

Abstrakt: Článek demonstruje „spolupráci" prostorového stochastického meteorologického generátoru SPAGETTA (WG) a regionálních klimatických modelů (RCM) při analýze dopadů změny klimatu (ZK). V první části je porovnán generátor se sadou 19 RCM modelů prostřednictvím jejich schopnosti reprodukovat 11 prostorových teplotních a srážkových indexů v osmi evropských regionech; indexy jsou založeny na registraci dnů a období s prostorově významným výskytem sucha, srážek, horka, zimy, a možných teplotně-

srážkových kombinací. Na základě získaných výsledků je konstatováno, že obě metodologie dávají srovnatelně kvalitní výsledky. V druhé části experimentu (ta je provedena pouze pro oblast Střední Evropy) je generátor, jehož parametry jsou modifikovány scénáři změny klimatu odvozenými z RCM simulací, použit ke generování syntetických řad reprezentujících změněné klima. V experimentu je použita sada scénářů, které zahrnují změny vybraných kombinací následujících charakteristik: (1) průměrná teplota, (2) variabilita teploty, (3) průměrný úhrn srážek (průměr pouze ze srážkových dnů), (4) četnost výskytu srážkových dnů a (5) prostorové korelace a autokorelace teplotních i srážkových časových řad. Syntetické řady pro každý scénář jsou analyzovány prostřednictvím výše uvedených indexů, přičemž je sledován (mimo jiné) vliv změn jednotlivých charakteristik zahrnutých ve scénářích změny klimatu na jednotlivé indexy. V souladu s očekáváním bylo zjištěno, že výrazně největší vliv mají změny průměrných teplot – samozřejmě vyjma ryze srážkových indexů. Druhou nejvýznamněší charakteristikou, která významně ovlivňuje validační indexy, jsou změny korelací, které dle scénářů ZK pro Střední Evropu budou převážně pozitivní.

Klíčová slova: generátory – regionální klimatické modely – teplota – srážky – validace – sdružené indexy

1. Introduction

Various weather-dependent models (e.g. agricultural crop growth models or hydrological rainfall-runoff models are used in analysing impacts of the Climate Change (CC). For their simulations, these models require realistic multi-dimensional weather time series representing present and future climate in one or more locations. To create such weather series, one of the two approaches is commonly used: (1) Regional Climate Model, or (2) Stochastic Weather Generator. Both approaches can produce multidimensional (i.e. more than one weather variable) time series representing present and future climates. Both approaches have their advantages and disadvantages. Apparent advantage of the RCMs consists in the fact that they are based on mathematical equations representing physical and chemical processes driving the processes in the atmosphere and thereby forming the weather, which allows to simulate weather variables in arbitrary set of grid-points at any radiation forcing related to chosen emission scenario. Unfortunately, considering the complexity of the equations and necessity to run it at high spatial and temporal resolution (to adequately simulate weather forming processes), the simulations with RCMs are very slow so that it takes days, weeks or even months to produce sufficianly long weather series required as inputs to the weather-dependent models. In contrast with RCMs, the stochastic weather generators are based on using statistical and stochastic modelling (often including autoregressive models and Markov chains models). In the first step, parameters of the generator are derived from the calibration time series (mostly being the observational data). Subsequently, the generator may produce synthetic time series with a speed several orders faster that RCMs, so that one can get a large number of realisations of time series having statistical structure similar to observational data. To produce time series representing the future climate, parameters of the generator are modified using the climate change scenarios typically derived from GCM or RCM simulations. The main advatages of the generators are: (1) High speed in producing the synthetic meteorological time series. Ensemble of synthetic series may be used to make an effective probabilistic assessment of outputs from any model fed by the synthetic series. (2) The generators may produce meteorological time series even for the emission scenarios, for which the RCM or GCM simulations are not available. The series may be produced by modifying the WG parameters using the scenarios obtained by pattern scaling approach and MAGICC model

(Dubrovsky et al. 2005). (3) In generating the series representing the future climate one may modify only selected WG parameters so that effect of changes in individual climatic characteristics may be assesses (e.g. changes in the means of the weather variables, changes in their variability, changes in precipitation sums or in precipitation occurrence, etc.).

The present paper aims to demonstrate that the two above mentioned methodologies (WGs and RCMs) need not be considered to be competitors, but rather as two complimentary methodologies which may effectively collaborate when used together. In our two experiments we use spatial weather generator SPAGETTA (Dubrovsky et al. 2020) and outputs rom 19 RCM simulations available from CORDEX database. In the first part of the paper (experiment #1), we show results of the validation tests, in which the WG and RCMs were validated in terms of their ability to reproduce a set of spatial temperature and precipitation indices. It is shown that the performance of both approaches is similar and none of them is a clear winner. In the second experiment, we demonstrate how the two methodologies may be used together: The RCM simulations are used to derive climate change scenarios consisting of changes in selected climatic characteristics, and afterwards the generator is used to analyse effect of changes in individual climatic characteristics.

2. Data

In our experiments, we employ time series *(*time step = 1 day) of daily average temperature and daily precipitation sums for grid = points in 8 target regions shown in Fig. 1. The data come from two sources. First, to calibrate our spatial weather generator and as a reference weather series representing present climate conditions, we use E-OBS gridded data for 1971–2000 period. Second, ensemble of 19 RCM simulations are taken from CORDEX database. We took RCM simulations for RCP8.5 emission scenario (1971–2000 representing the baseline climate and 2070–2099 representing the future climate), which implies that the RCM simulated time series exhibit signal-to-noise ratio which is highest of all emission scenarios – this will allow more robust analysis of climate change impacts. The RCM-based climate change scenarios consist of changes in WG parameters derived from the two periods: 2070–2099 vs. 1971–2000. Considering the limitations of our generator, which may produce spatial data only for a limited number of grid-points, we took only every second column and every second row from each of the two datasets. While the first experiment was made for 8 EU regions shown in Fig. 1, the second experiment was made fonly for the Central Europe region.

3. Methodology

The present version of our parametric stochastic weather generator SPAGETTA is an updated version of the generator described in Dubrovsky et al. (2020). The generator was based on a single-site parametric weather generator M&Rfi, which is an improved version of the Met&Roll single-site generator described and validated in in Dubrovsky (1997) and Dubrovsky et al. (2000, 2004). In M&Rfi, precipitation occurrence is modelled by the first order Markov chain, non-precipitation variables by the multivariate 1st order autoregressive model and precipitation amount on wet days by Gamma distribution. M&Rfi was converted into the SPAGETTA spatial generator by using the spatialization technique proposed by Wilks (1998, 2009).

The present experiment consists of two experiments which both together may be desribed as a sequence of following steps:

1. Daily time series of temperature and precipitation for the 8 regions (Fig. 1) and two periods (1971–2000, 2070–2099; the second time slice is applied only with RCMs) are created from E-OBS and 19 RCMs.

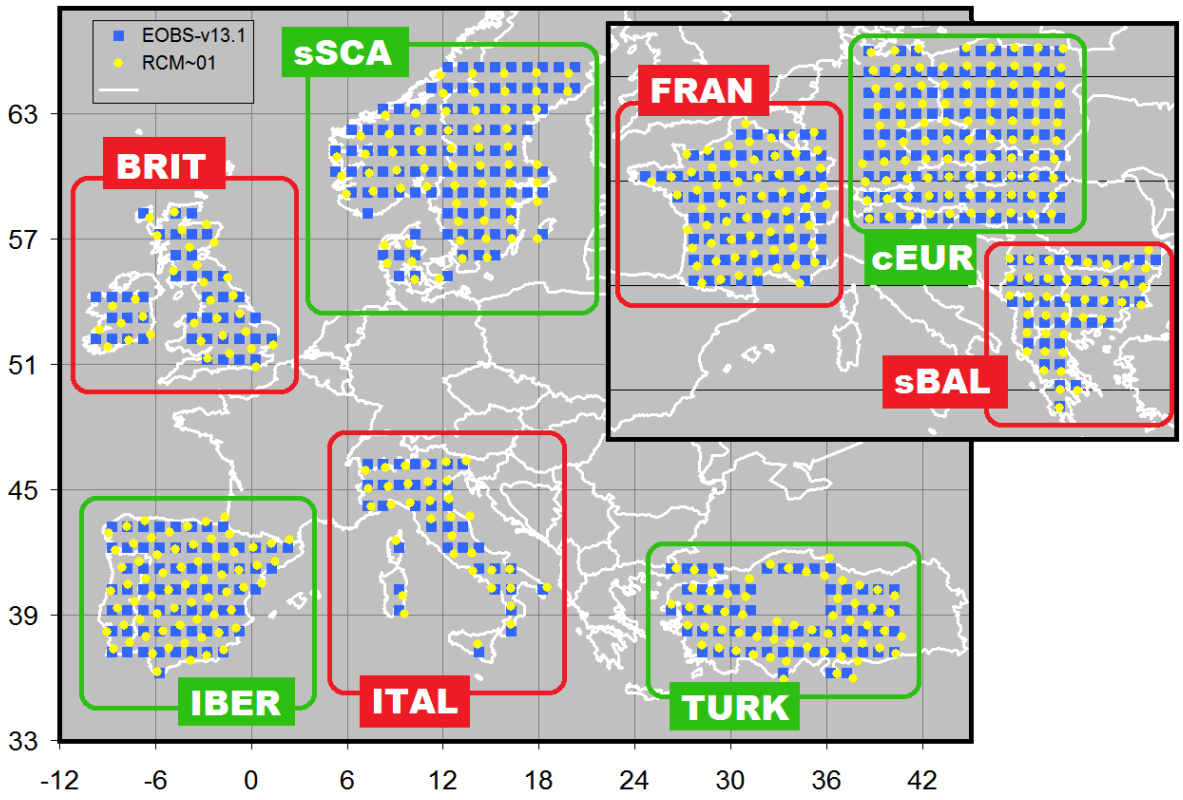


Fig. 1 Eight target regions used in the experiment. The blue squares and yellow circles represent E-OBS and RCM grid-points employed in the experiment.

2. WG is calibrated with E-OBS data for the 8 regions.
3. Synthetic weather series representing the present climate are generated using the WG parameters obtained in Step 2.
4. To complete the First Experiment (Comparison of WG vs. RCM), a set of spatial climatic characteristics derived from the synthetic series (produced in Step 3) and the RCM series (made in step 1) are compared with those derived from the reference E-OBS series.
5. RCM-based climate change scenarios are constructed by comparing WG parameters derived from the future vs. reference time slices, separately from all 19 RCMs included in our database. The complete climate change scenarios consist of changes in following characteristics: *A* = changes in temparature means, *S* = changes in temperature variability, *O* = changes in frequency of days with non-zero precipitation amount, *R* = changes in mean precipitation amount (considering only on wet days!), *C* = changes in spatial lag-0 and lag-1day spatial correlations of temperature and precipitation (both variables are considered separately).
6. To produce synthetic weather series representing future (2070–2099) climate, the generator is run using WG parameters modified with CC scenarios obtained in step 5. To assess effect of changes in individual climate characteristics, couple of CC scenarios are assumed: *A, S, R, O, C, ASP* and *ASPC*, where letters in the acronyms indicate which groups of WG parameters are modified by the CC scenario (see previous paragraph for the descriptions). Having modified WG parameters, weather series representing the future climate are produced with each of the 7 CC scenario.
7. To complete the Second Experiment (results are shown here only for cEUR; more complete set of figures is planned to be published in Dubrovsky et al. 202Xb),

synthetic series representing the future climates are analysed for occurrences of the 11 types of the Days and the Spells: the Day is defined as a **Dry**/**Wet**/**Xwet** day when the Dry/Wet/XWet day is registered at least at *PthrshP*N*$_G$ grid-points (N_G is numer of grid-points in the given region and *Pthrsh* is reasonably high percentage. **Hot** or **Cold** Day is registered when the temperature is higher than *Tthrsh* at least at *PthrshT*N*$_G$ grid-points. Apart from these 5 types of Days, additional 6 types of Days is obtained by combining 3 types of precipitation days with 2 types of temperature days: **Hot-Dry**, **Hot-Wet**, **Hot-Xwet**, **Cold-Dry**, **Cold-Wet**, **Cold-Xwet**.

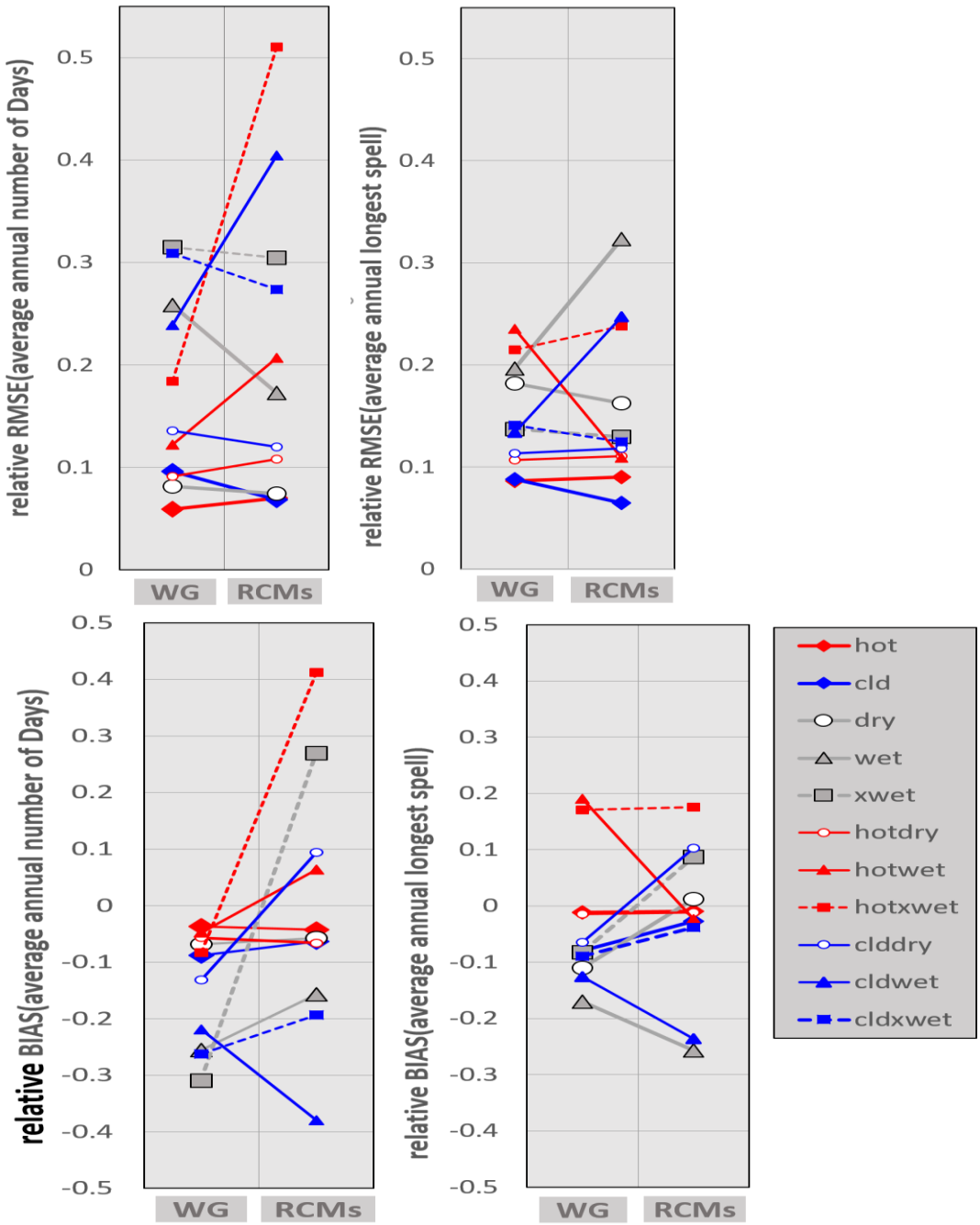


Fig. 2 Performance of the generator and ensemble of 19 RCMs in reproducing the 11 validation characteristics – "Days" are on the left, "Spells" are on the right (The Days and the Spells are defined in the text). The performance is shown in terms of the relative RMSE (top graphs) and relative BIAS (bottom) (both RMSE and BIAS are based on eight values related to eight target regions shown in Fig. 1) comparing the means of the validation indices derived from synthetic series (or RCM series) vs. the means derived from E-OBS.

4. Results and Discussion

4.1 Comparison of Weather Generator with Regional Climate Models

The results obtained while comparing performance of the generator with RCMs were processed in many ways. The results are going to be published in Dubrovsky et al. (202Xa), here we show (Fig. 2) only comparison of WG and RCMs in terms of their ability to represent mean values of the 11 validation indices (see the above paragraph) – relative RMSE and relative mean Bias (based on 8 values comparing WG or RCM vs E-OBS in 8 target regions) for the frequency of Days and mean annual maximum length of the Spells are shown in Fig. 3. The graphs shown in the figure indicate:

(A) RMSE: For „Days“, RCMs show higher (compared to WG) RMSE for indices related to hot weather (red symbols), while RCMs are better in representing indices related to cold weather (blue symbols) – except for the cold-wet Days, which are better reproduced by WG. Purely precipitation indices (Wet, Dry and Xwet Days) are better reproduced by RCMs. As for the „Spells“, the pattern of the results is not so simple. One may see, that the performance of WG in reproducing various type of Spells is better balanced within the set of the 11 indices (in other words, the performance of WG is more similar for individual indices) in comparison with RCMs; RCMs shows much higher differences across the 11 indices.

(B) Bias: WG tends to underestimate the means of the most of the spatial validation indices (both Days and Spells). Similarly to RMSE, RCMs exhibit larger dispersion of the mean biases of the 11 indices. Biases of some indices are positive, some of them are negative, but in terms of the absolute values of the biases, RCMs shows worse performance scores than the generator.

Overall, considering performance of RCMs and WG as represented by RMSE and the mean Bias for both Days and Spells, our results indicate that the performance of the generator and RCMs are comparable, none of the two methodologies is an apparent winner. In other words, both methodologies may be considered as legitimate approaches to producing weather inputs for climate change impact experiments.

4.2 Effect of changes in WG parameters on selected spatial climatological indices

Although the second experiment was also performed for all 8 regions, we present here (Figs. 3 and 4) results related only to Central Europe region (cEUR). In this experiment, the CC scenarios were based on RCM simulations for RCP8.5 emissions. The CC scenarios for the Central Europe shown in Fig. 3 indicate: (i) Temperature will increase in all seasons – differences between the seasons are not great, but it may be noted that the highest increase is projected for winter and the lowest for spring. (ii) Temperature variability will increase in summer while it will decrease in winter and in spring (less significantly than in winter). (iii) Precipitation amounts on wet days will increase in all seasons, the lowest increse will be in summer, the highest in winter. (iv) Probability of wet day occurrence will increase in winter and spring but decrease in summer and autumn. (4) Both lag-0 and lag-1day correlations of both temperature and precipitation will increase in all seasons – except for the slight decrease of lag-1day correlation of temperature in spring and autumn.

As a result of the climate change, our spatial validation indices will change their means (Fig. 4). The highest effect comes apparantly from changes in TEMP means. Interestingly, effect of the three other characteristics (temperature variability, frequency of wet days and precipitation

amount on wet days) have small effects, while changes in spatial correlation is significanly positive and gets the second rank just behind the effect of change in the temperature means.

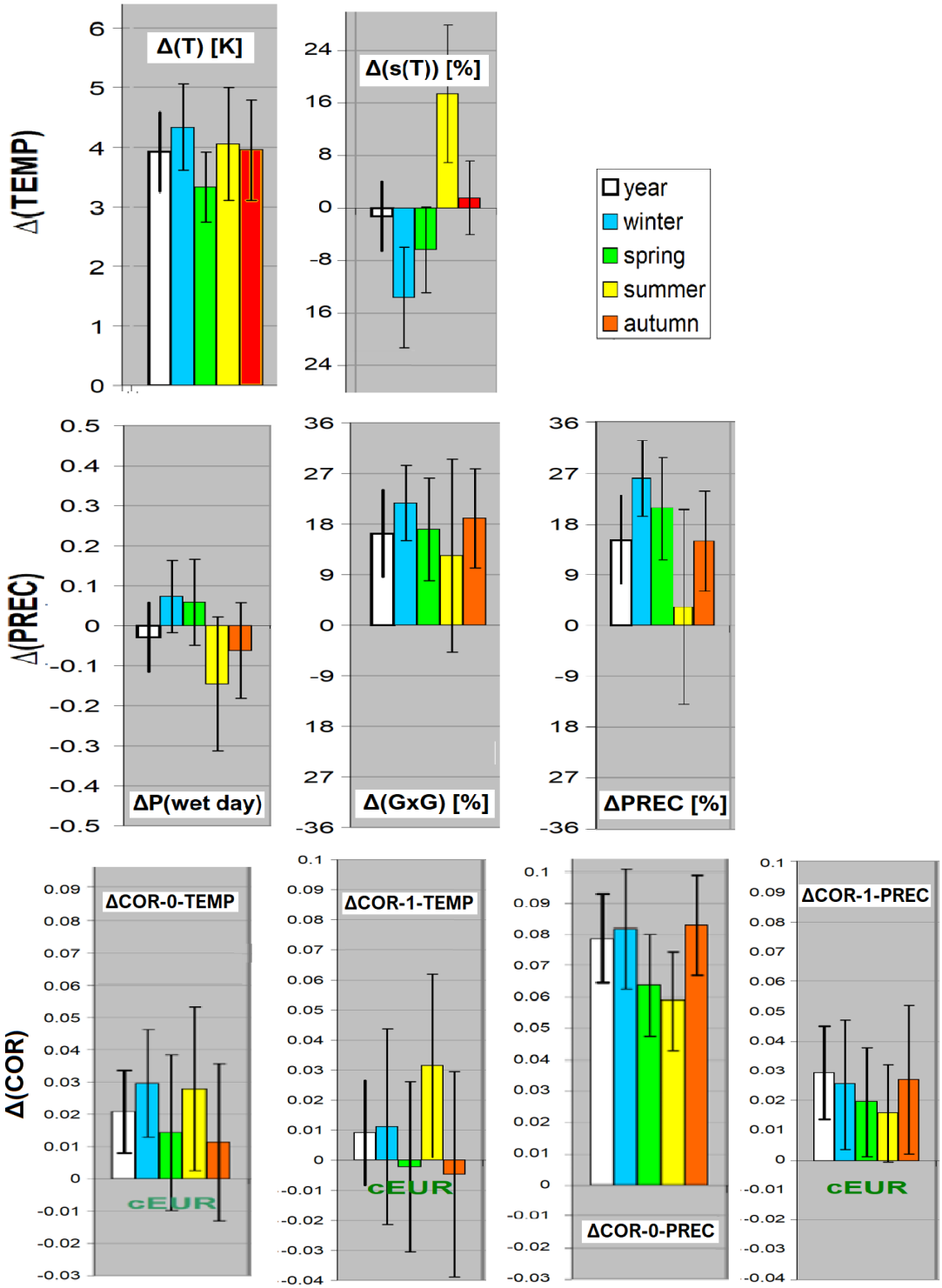


Fig. 3 Climate change scenarios for cEUR region derived from 19 RCM simulations. The bars with the whiskers show average plus/minus standard deviation from the 19 values. Individual bars show annual and seasonal changes in (1: top row) temperature averages and variability (standard deviation of temperature deviations from its mean annual cycle), (2: middle row) probability of wet day occurrence, mean precipitation sum on wet day and monthly precipitation amounts, and (3: bottom row) lag-0 and lag-1day spatial correlations of temperature and precipitation.

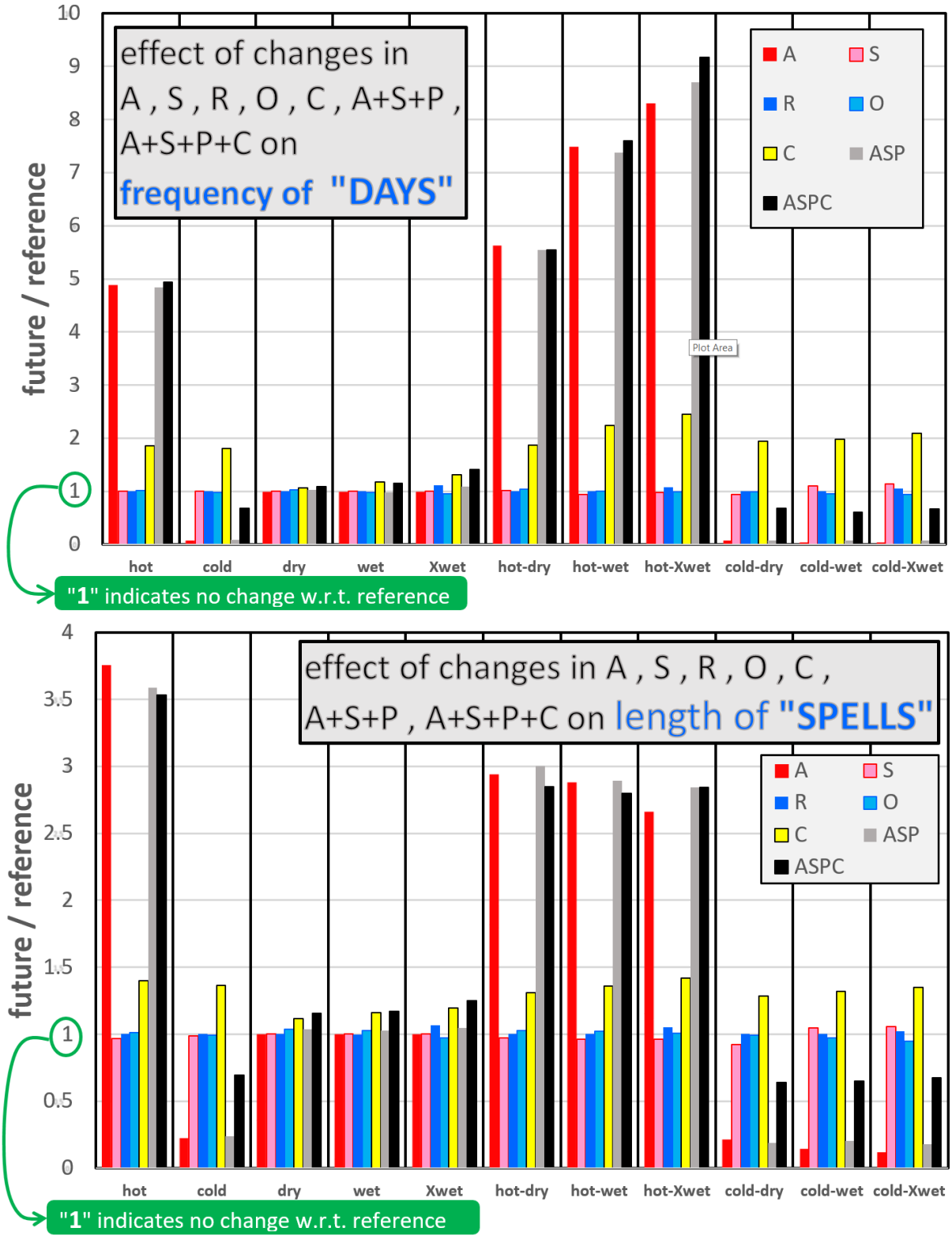


Fig. 4 Changes in the means (the ratios with respect to the values for the reference period) of the 11 spatial validation indices under 7 types of CC scenario (A, S, R, O, C, ASP and ASPC types are explained in the text). Changes in the Days are shown in the top graph, changes in the Spells are shown in the bottom graph.

5. Conclusion

The present paper focused on a demostration of effective co-existence of two common downscaling approaches used to prepare meteorological inputs to various models (e.g.

agricultural crop growth models and hydrological rainfall-runoff models) used in assessing possible impacts of climate change or climate variability on various weather-dependent processes. In the first experiment we have shown that the two „competing“ approaches have good performance in reproducing various spatial climatic characteristics and none of the two is a winner. In the second part of the paper we have shown how the generator may be effectively used to show effects of changes in individual statistical characteristics of multisite weather series.

Acknowledgements

The present experiment was supported by the Czech Science Foundation, project 18-15958S & project PERUN (funded by The Technology Agency of the Czech Republic, SS02030040).

References

DUBROVSKY, M., HUTH, R., DABHI, H., ROTACH, M., 2020. Parametric gridded weather generator for use in present and future climates: focus on spatial temperature characteristics. *Theor Appl Climatol*, **139**, 1031–1044.

DUBROVSKY, M., NEMESOVA, I., KALVOVA, J., 2005. Uncertainties in climate change scenarios for the Czech Republic. *Clim Res*, **29**,139–156.

DUBROVSKY, M., et al., 202Xa. Simulation of the Spatial Temperature-Precipitation Compound Events by Weather Generator.

DUBROVSKY, M., et al., 202Xb. Projection of Future-Climate Temperature-Precipitation Compound Events with Use of Spatial Weather Generator and Regional Climate Models.

WILKS, D. S., 1998. Multisite generalization of a daily stochastic precipitation generation model. *J Hydrol*, **210**, 178–191. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00186-3

WILKS, D. S., 2009. A gridded multisite weather generator and synchronization to observed weather data. *Water Resources Res*, **45**, 1–11.

Měření krátkodobých srážek a časové změny v jejich charakteristikách

(Measurement of short-term rainfalls and changes in their characteristics)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.13

Lenka Crhová, Český hydrometeorologický ústav, lenka.crhova@chmi.cz

Abstrakt: Návrhové hodnoty krátkodobých úhrnů srážek jsou velmi potřebným podkladem pro další výpočty v hydrologické a technické praxi, pro plánování a údržbu odvodňovacích systémů a vyhodnocení dalších rizik spojených s intenzivními srážkami (např. přívalové povodně či plošná eroze půdy). Je proto nutné věnovat pozornost i možným změnám v četnosti a intenzitě krátkodobých srážek jako jednomu z možných dopadů probíhající změny klimatu.

Příspěvek popisuje současný stav dostupnosti a zpracování dat srážkových intenzit na stanicích Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) se zaměření na nejdelší řady měření intenzit srážek (s uvážením spojení historických ombrografických a současných automatických měření). Pro tyto řady jsou vyhodnoceny časové změny v charakteristikách krátkodobých srážek.

Klíčová slova: intenzita srážek – ombrograf – automatický srážkoměr – návrhová hodnota srážek

Abstract: The design values of short-term rainfalls are very important for subsequent calculation in hydrological and technical practice, e.g. planning and maintenance of sewage system, torrential floods or soil erosion. Thus, it is important to analyse potential changes in frequency and intensity of short-term rainfalls as one of the potential impact of ongoing climate change.

The contribution describes a recent state of availability and processing of short-term rainfalls at stations of Czech Hydrometeorological Institute (CHMI). It is focused on the longest series of short-term rainfalls (concerning joined digitalized pluviograph records and automatic rain gauge measurement). The temporal changes in characteristics of short-term rainfalls in these series are analysed.

Keywords: rainfall intensity – pluviograph – automatic rain gauge – design rainfall values

1. Úvod

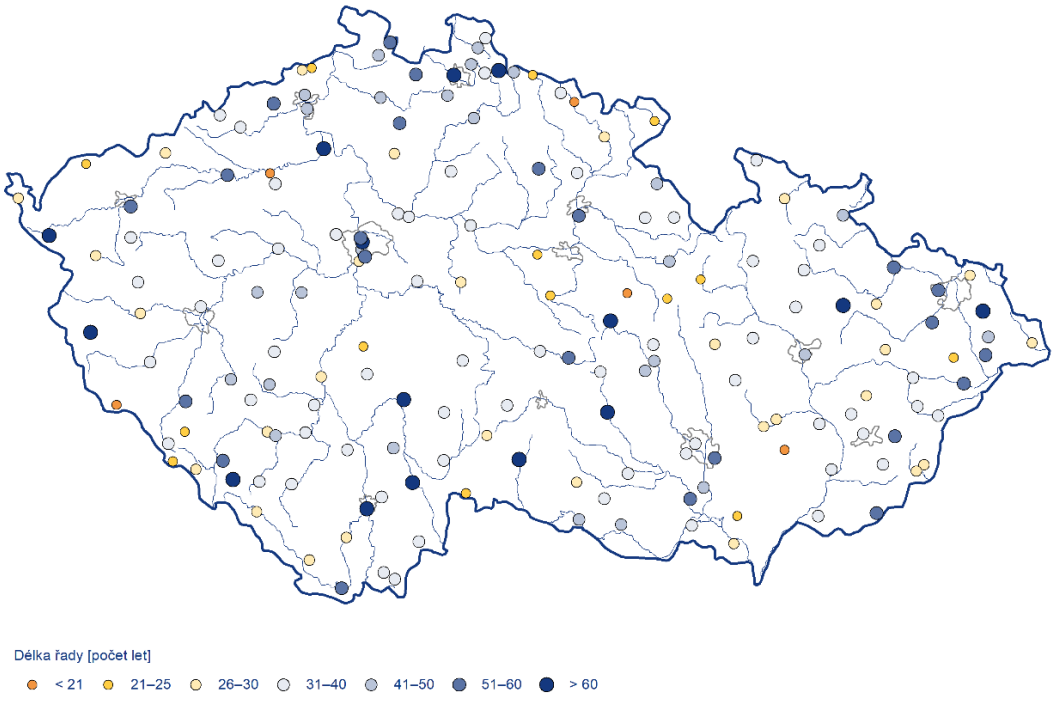
Nové zpracování návrhových hodnot krátkodobých úhrnů srážek je jedním z úkolů probíhajícího projektu PERUN (TAČR SS02030040). Návrhovými charakteristikami srážek se zabývá dílčí cíl 6.1 (DC 6.1) „*Standardizace návrhových hodnot srážek (regionální časové řady srážek, aktualizované tabulky a čáry náhradních vydatností) se zahrnutím možného vlivu změny klimatu“,* který řeší aktualizaci návrhových hodnot a také možné dopady klimatické změny na tuto charakteristiku.

Podklady dosud používané v technické praxi jsou často více než půl století staré (často dodnes užívány výsledky práce Trupl 1958) a nové zpracování tedy velmi potřebné. Určení návrhových hodnot krátkodobých úhrnů srážek je však poměrně obtížným úkolem, neboť síť automatických srážkoměrů (i jejich předchůdců manuálních ombrografů) Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) s dostatečně dlouhou řadou měřením intenzit srážek (srážkových úhrnů v 1min či 10min kroku) pro zpracování návrhových srážek je poměrně řídká a tato data vykazují poměrně časté výpadky a chyby (Crhová et al. 2022).

V rámci DC 6.1 projektu PERUN budou provedeny regionální odhady návrhových srážek pro délky trvání deště 10min až 3dny a odvozeny IDF křivky (z angl. *Intensity-Duration-Frequency*), které pro danou dobu opakování zobrazují závislost intenzity dešťových srážek na délce trvání deště. IDF křivky budou vyhotoveny pro doby opakování od 2 do 100 let. V současnosti je pravděpodobné doplnění návrhových odhadů i pro kratší doby opakování (1/2 roku a 1 rok) vzhledem k potřebnosti těchto údajů v technické praxi.

V prvním kroku jsou prováděny odhady návrhových hodnot na základě historických dat staničních měření srážkových intenzit. K tomu byla využita digitalizovaná historická měření manuálními ombrografy a měření automatickými srážkoměry, které začaly být do sítě ČHMÚ osazovány v roce 1997. Digitalizované ombrografické záznamy i měření automatickými srážkoměry poskytují data srážek v časovém rozlišení 1 minuta. Po provedených kontrolách dat intenzit srážek a ověření jejich kompletnosti v jednotlivých letech bylo do zpracování vybráno přes 170 stanic, které mají k dispozici dostatečně dlouhou řadu měření intenzit srážek (většinou delší než 25 let) po spojení ombrografických a automatických měření v období 1951–2022 (obr. 1). Pro určení finálních návrhových hodnot srážek budou využity metody regionální frekvenční analýzy, a to především metoda ROI (z angl. *Region of Influence*, Gaál a Kyselý 2009).

V rámci tohoto příspěvku jsou analyzovány dílčí výstupy tohoto projektu, a to časové změny v statistických charakteristikách připravených řad ročních maxim.

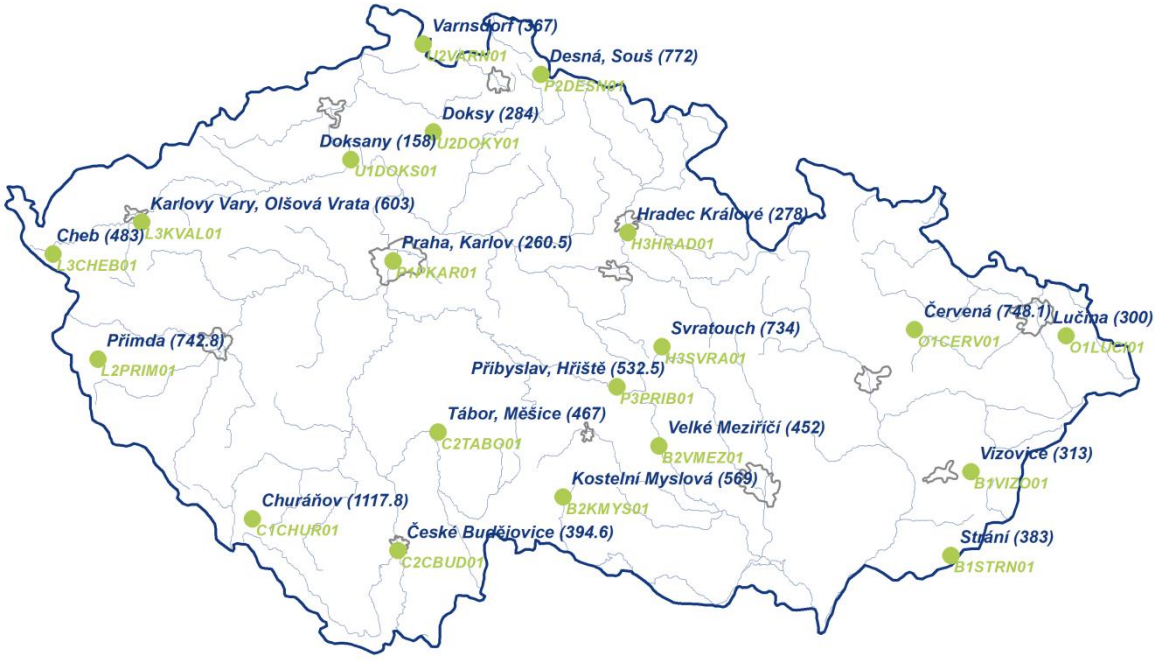


Obr. 1 Rozmístění stanic vybraných pro zpracování návrhových hodnot krátkodobých srážek s rozlišením dle délky řady maxim v období 1951–2022.
Fig. 1 The selected stations used for estimation of design values of short-term rainfalls distinguished according to a final length of annual maxima series from 1951–2022.

2. Data

Dále jsou analyzovány časové změny v charakteristikách řad ročních maxim krátkodobých srážek (5–360 min úhrny). Do zpracování vstupovalo 20 stanic s alespoň 54letou řadou v období 1961–2022 (s uvážením spojených historických ombrografických a současných automatických měření) vybraných z připravených řad v rámci zpracování návrhových srážek (obr. 2).

Tato analýza byla provedena pro zkrácené období (1961–2022) oproti zpracování návrhových srážek v rámci DC 6.1. Důvodem je, že v prvním desetiletí zpracovávaného období (1951–1960) jsou data dostupná pouze na velmi malém počtu stanic a řady by tak pro analýzu časových změn nebyly kompletní a srovnatelně dlouhé.



Obr. 2 Rozmístění stanic použitých pro analýzu časových změn charakteristik krátkodobých srážek s uvedením ID a nadmořské výšky stanice (m n. m.).
Fig. 2 The stations used in the analysis of short-term rainfall characteristics changes. The station ID and elevation (m a.s.l.) is given.

3. Metoda

Pro všechna 30 letá plovoucí časová okna z období 1961–2022 byly z řad ročních maxim krátkodobých srážek napočteny statistické charakteristiky: medián, mezikvartilové rozpětí (*IQR*) a 90. percentil (*p90*).

Analyzována byla rozmezí, v kterých se tyto charakteristiky pohybují (rozdíl mezi největší a nejnižší hodnotou), doba výskytu nejvyšších a nejnižších hodnot a trendy v těchto napočtených charakteristikách.

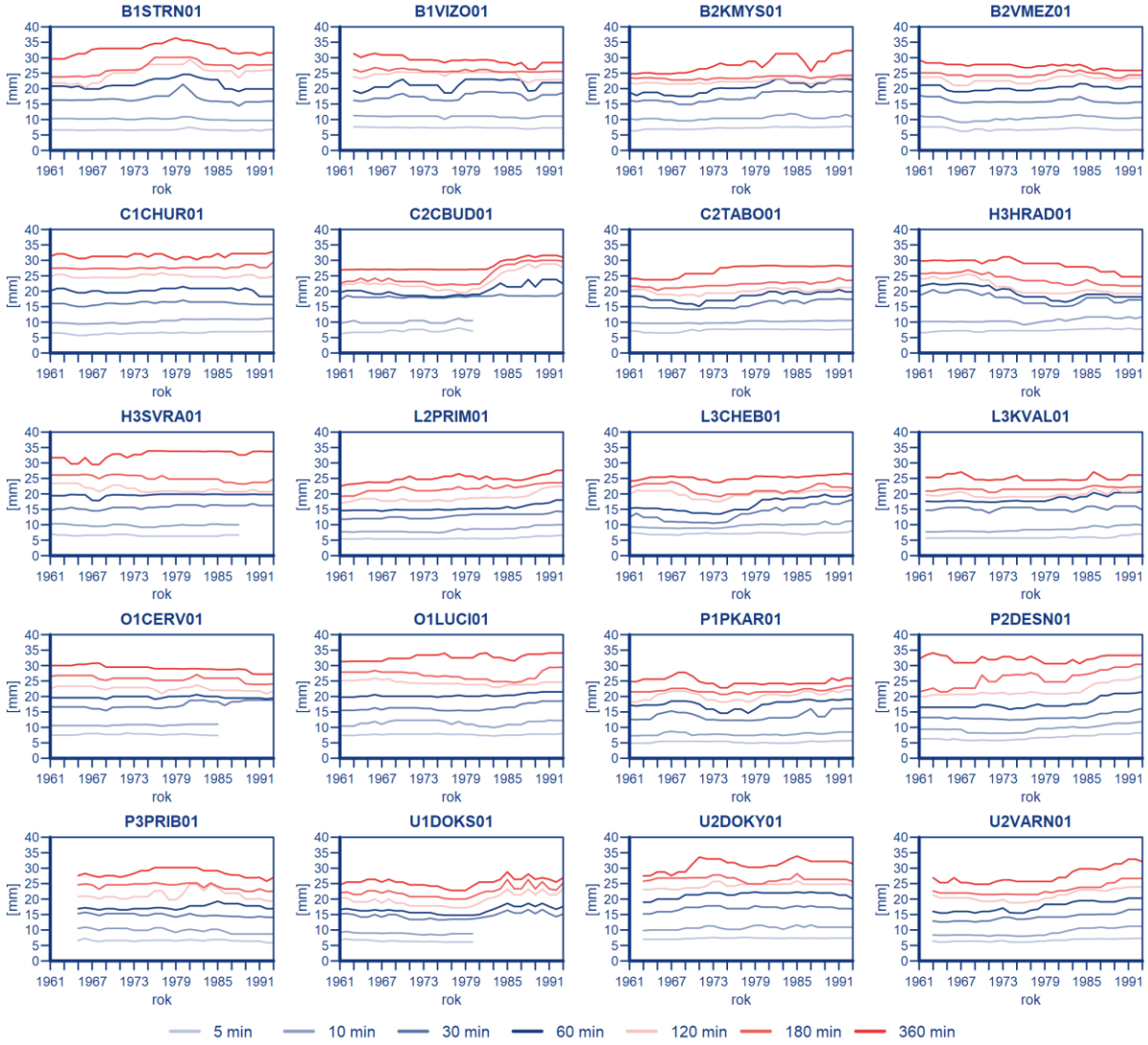
4. Výsledky

4.1 Změny mediánu ročních maxim

Vývoj mediánů ročních maxim se liší na jednotlivých stanicích (obr. 3). Ve většině (81 %) případů (myšleno z celkem 140 případů, tj. 20 stanic a 7 různých dob trvání srážky) se však hodnota mediánu mění pouze mírně, tj. rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou je do 30 % nejnižší hodnoty.

Nejnižší hodnota se nejčastěji vyskytuje na začátku hodnoceného období (v 79 % případů v 30letém okně začínajícím před rokem 1981), naopak nejvyšší na konci hodnoceného období (v 64 % případů v 30letém okně začínajícím po roce 1981).

V 61 % případů byl nalezen statisticky významný rostoucí trend. Naopak v 17 % případů byl nalezen statisticky významný klesající trend (obr. 6).



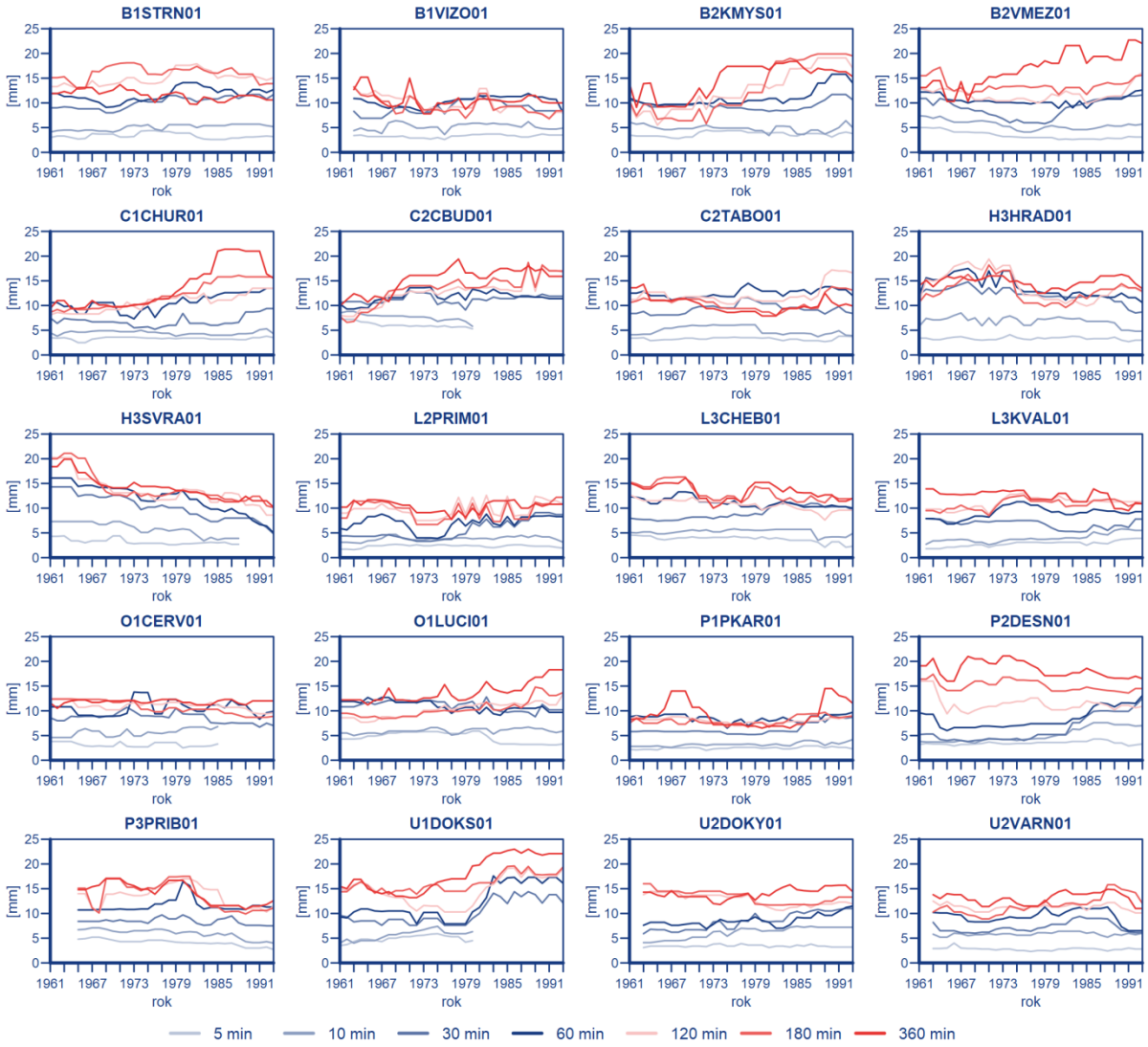
Obr. 3 Průběh mediánu ročních maxim krátkodobých srážek (o trvání 5–360 min) spočtených pro 30letá klouzavá okna pro 20 vybraných stanic.
Fig. 3 The course of median values of short-term rainfall annual maxima (duration of 5–360 min) calculated from 30-year running windows at 20 selected stations.

4.2 Změny ve variabilitě ročních maxim

Obdobně jako u mediánů i vývoj variability (*IQR*) ročních maxim se na jednotlivých stanicích liší a často je značně rozkolísaný (obr. 4). Během hodnoceného období se vyskytují v *IQR* výrazné změny, v 68 % případů je rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou *IQR* větší než 50 % nejnižší hodnoty.

Nejnižší hodnoty *IQR* se nejčastěji (65 % případů) vyskytly na začátku hodnoceného období (začátek 30letého okna před rokem 1980), zatímco výskyt nejvyšší hodnoty se značně liší dle stanice a trvání srážky.

V 38 % případů byl nalezen statisticky významný rostoucí trend *IQR*. Naopak v 28 % případů byl nalezen statisticky významný klesající trend (obr. 6).



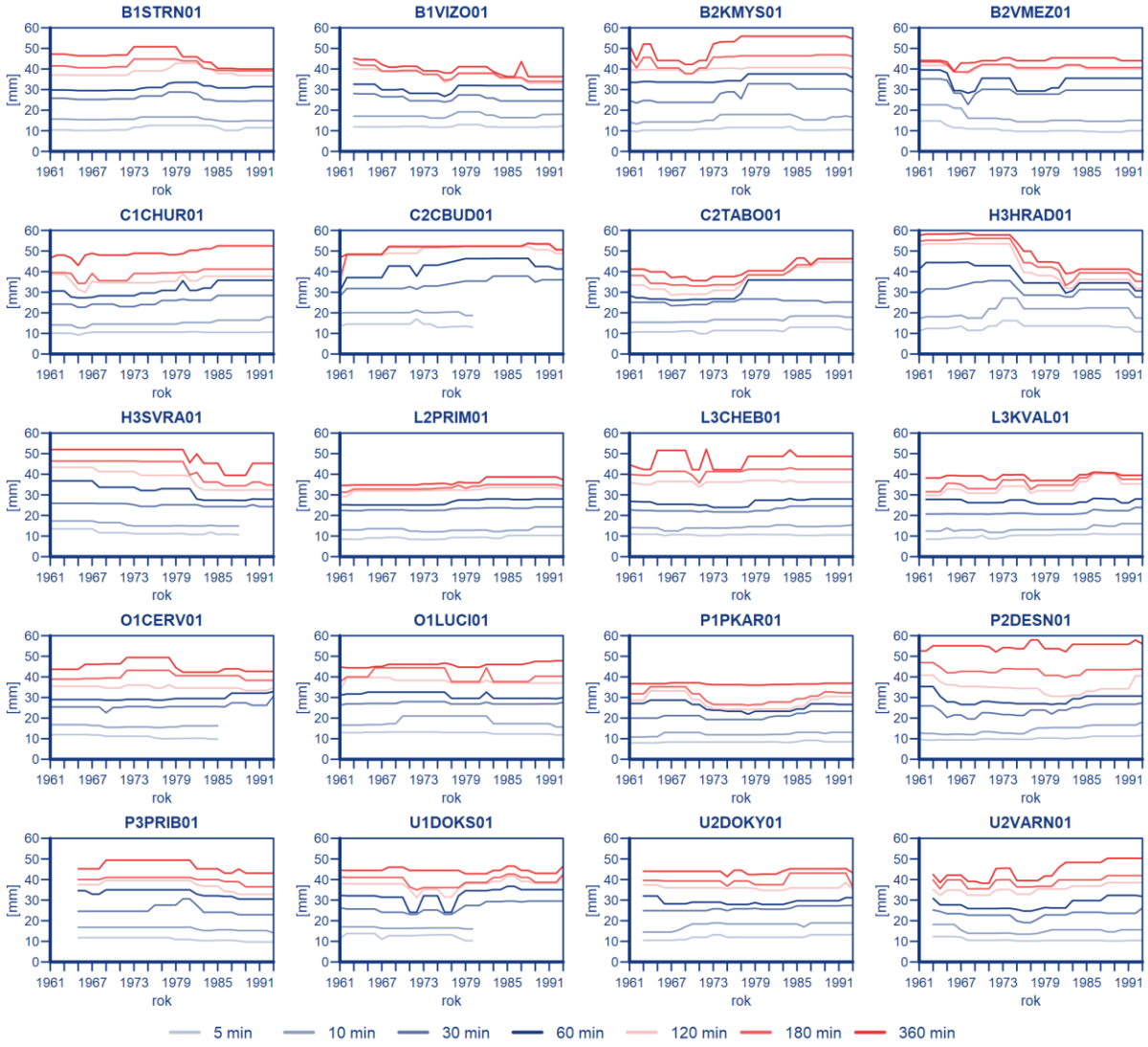
Obr. 4 Průběh variability (IQR) ročních maxim krátkodobých srážek (5–360 min) spočtených pro 30letá klouzavá okna pro 20 vybraných stanic.
Fig. 4 The course of IQR values of short-term rainfall annual maxima (duration of 5–360 min) calculated from 30-year running windows at 20 selected stations.

4.3 Změny v extremitě ročních maxim

Hodnocení změn v extremitě ročních maxim krátkodobých srážek bylo provedeno pomocí 90. percentilů (*p90*).

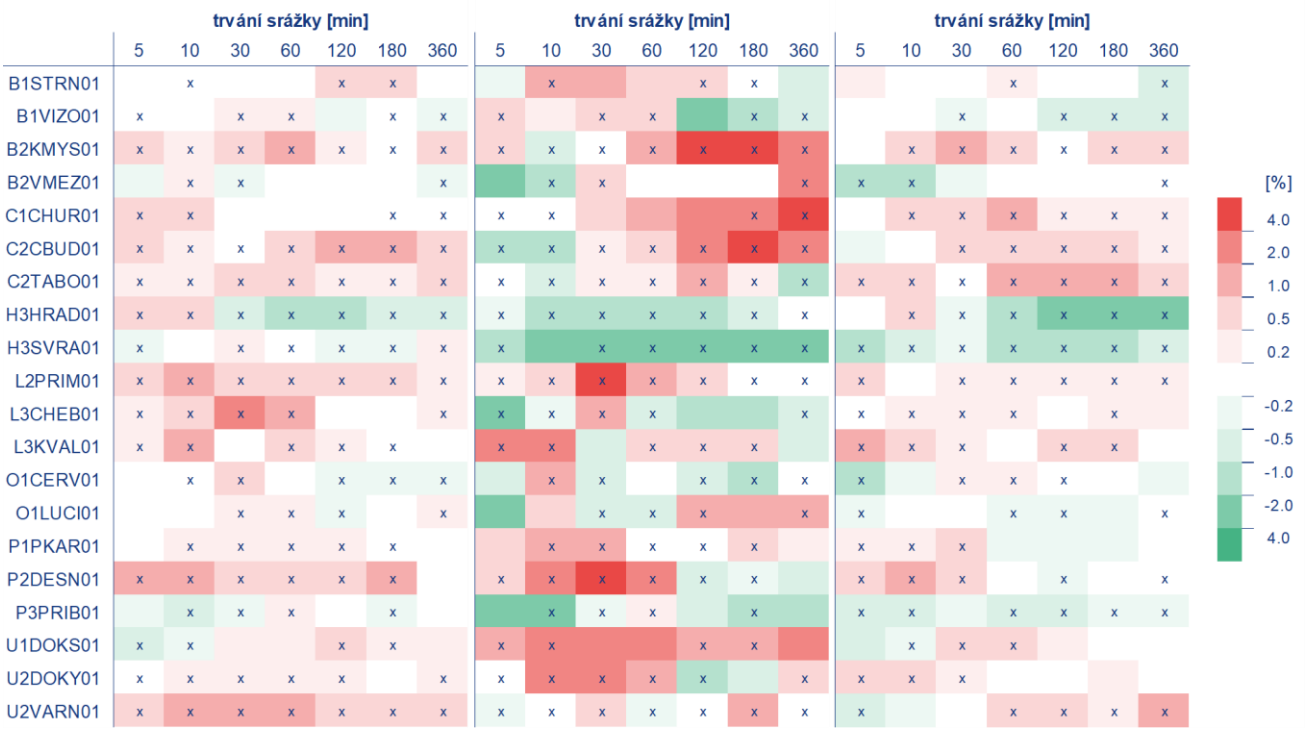
V 65 % případů je rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou *p90* menší než 30 % nejnižší hodnoty. Stejně jako v případě *IQR* se nejnižší hodnoty *p90* často vyskytují na začátku hodnoceného období a výskyt nejvyšší hodnoty se značně liší dle stanice a trvání srážky (obr. 5).

V 44 % případů byl nalezen statisticky významný rostoucí trend *p90*. Naopak v 24 % případů byl nalezen statisticky významný klesající trend (obr. 6).



Obr. 5 Průběh 90. percentilu (p90) ročních maxim krátkodobých srážek (5–360 min) spočtených pro 30letá klouzavá okna pro 20 vybraných stanic.

Fig. 5 The course of 90th percentile (p90) values of short-term rainfall annual maxima (duration of 5–360 min) calculated from 30-year running windows at 20 selected stations.



Obr. 6 Velikost lineárního trendu v řadách mediánů (vlevo) a IQR (uprostřed) a p90 (vpravo) spočtených pro 30letá klouzavá okna ročních maxim krátkodobých srážek v období 1961–2022 pro jednotlivé stanice a doby trvání. Hodnota trendu je dána v % nejnižší hodnoty příslušné charakteristiky v řadě. Statisticky významný trend na hladině významnosti 5 % (dle p-hodnoty i Mann-Kendalova testu) je označen křížkem.

Fig. 6 The value of linear trend in the series of median (left), IQR (middle) and p90 (right) of short-term rainfall annual maxima calculated for 30-year running windows from 1961–2022 at 20 selected stations and different rainfall durations. The trend value is given in % of minimum value of corresponding characteristics in the series. The statistically significant trends at 5% level (according to p-value and Mann-Kendal test) is marked with cross.

5. Závěr

V předloženém příspěvku byl na úvod stručně popsán současný stav zpracování krátkodobých úhrnů srážek na stanicích ČHMÚ v rámci projektu PERUN. Na připravených řadách ročních maxim byla poté provedena analýza časových změn v jejich statistických charakteristikách pro vybraných 20 stanic v období 1961–2022 s využitím 30letého klouzavého období.

Časový průběh mediánů, variability (*IQR*) a extremity (*p90*) ročních maxim se na jednotlivých stanicích značně liší, často není postupně rostoucí či klesající ale značně rozkolísaný.

V případě mediánu byl však ve většině případů (stanic a trvání srážky) nalezen statisticky významný rostoucí trend. Pro *IQR* i *p90* byly nalezeny statisticky významné rostoucí i klesající trendy. Průběh *IQR* byl často značně rozkolísaný.

Pro hodnocení možného vlivu změn hodnocených statistický charakteristik ročních maxim na odhady návrhových hodnot srážek byly navíc spočteny i odhady 10, 20, 50 a 100 letých hodnot pro všechna 30letá plovoucí časová okna z období 1961–2022 a jejich korelace se statistickými charakteristikami ročních maxim. Hodnoty korelací se opět velmi liší v závislosti na stanici a délce trvání srážky. V případě mediánů a *IQR* vycházejí korelace ve většině případů poměrně slabé (do 0,6), výrazné korelace byly nejčastěji nalezeny s charakteristikou *p90*. Korelace mezi 10letou hodnotou a *p90* jsou vyšší než 0,6 v 89 % případů a v 71 % případů dokonce vyšší než 0,8. Počet případů s vysokou korelací však klesá s rostoucí dobou

opakování návrhové srážky, korelace mezi 100letou hodnotou a *p90* jsou vyšší než 0,6 už pouze v 65 % případů a vyšší než 0,8 v 32 % případů.

Na závěr je nutné zmínit, že nalezené hodnoty trendů mohou být ovlivněny případnou nehomogenitou danou použitím dvou typů měření (ombrografů a automatických srážkoměrů). Nicméně porovnání hodnot ročních maxim získaných z ombrografů a automatických srážkoměrů pro překrývající se měření (v tomto příspěvku neukázáno), žádnou výraznou nehomogenitu nenaznačují.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

CRHOVÁ, L., KLIEGROVÁ, S., VALERIÁNOVÁ, A., 2022. Měření srážkových intenzit na stanicích Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) a průběh jejich zpracování. *Meteorologické zprávy*, **75**, 2, 37–43, ISSN 0026-1173.

GAÁL, L., KYSELÝ, J., 2009. Comparison of region-ofinfluence methods for estimating high quantiles of precipitation in a dense dataset in the Czech Republic. *Hydrology and Earth System Sciences*, **13**, 2203–2219. https://doi.org/10.5194/hess-13-2203-2009

TRUPL, J., 1958. Intenzity krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy. *Práce a studie*, **97**, Praha: VÚV.

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.14

CAMELS-CZ: Databáze atributů povodí pro hydrologické a klimatologické studie na velkém vzorku malých povodí

(CAMELS-CZ: A catchment attribute database for hydrological and climatological studies using a large sample of catchments)

Michal Jeníček, Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie, michal.jenicek@natur.cuni.cz
Ondřej Nedělčev, Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie
Radovan Tyl, Český hydrometeorologický ústav
Ondřej Ledvinka, Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie, Český hydrometeorologický ústav
Václav Vajskebr, Český hydrometeorologický ústav
Jan Unucka, Český hydrometeorologický ústav
Petr Šercl, Český hydrometeorologický ústav
Jana Bernsteinová, Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie
Jakub Langhammer, Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie

Abstrakt: Hydrologické metody založené na analýze dat z velkého vzorku povodí s různými charakteristikami (large-sample hydrology; comparative hydrology) umožňují komplexní analýzu hydrologického režimu, a tím i popisu hydrologické variability a změn složek vodní bilance v prostoru a čase. Tyto metody poskytují vhled do hydrologických procesů, které jsou utvářeny faktory prostředí a klimatem a umožňují vyvozovat závěry s obecnější platností. Nicméně, pro efektivní analýzy hydrologického chování jsou kromě dat odtoku a klimatických proměnných nezbytná také data o vlastnostech povodí, především geologie, půdy, topografie a vegetace. Z těchto důvodů vytvořila světová hydrologická komunita řadu volně dostupných rozsáhlých datových sad známých pod zkratkou CAMELS (Catchment Attributes and MEteorology for Large-sample Studies), které nejčastěji na národní úrovni poskytují ve srovnatelné struktuře atributy povodí, a dále hydrologické a meteorologické časové řady. Cílem tohoto příspěvku je prezentovat aktuální stav přípravy databáze CAMELS pro území Česka (CAMELS-CZ) jako jednotné referenční datové platformy pro analýzy a modelování, využívající velký vzorek povodí.

Klíčová slova: databáze charakteristik povodí – komparativní hydrologie – regionalizace – hydrologické modelování

Abstract: Hydrological methods based on the analysis of data from a large sample of catchments with different characteristics (large-sample hydrology; comparative hydrology) allow a comprehensive analysis of the hydrological regime and thus a description of hydrological variability and change in the components of the water balance. These methods provide insight into hydrological processes that are shaped by environmental and climatic factors and allow more general conclusions to be drawn. However, in addition to climate and runoff data, catchment attributes, such as geology, soils, topography and vegetation, are essential for effective hydrological behaviour analysis. For these reasons, the global hydrological community has recently developed a number of freely available large-scale datasets known as CAMELS (Catchment Attributes and MEteorology for Large-sample

Studies), which provide catchment attributes, as well as hydrological and meteorological time series, in a comparable structure at national scales. The aim of this contribution is to present the current state of preparation the CAMELS database for Czechia (CAMELS-CZ) as a reference data platform for analysis and modelling, using large-sample of catchments.

Keywords: catchment attributes database – comparative hydrology – large-sample hydrology – regionalization – hydrological modelling

1. Úvod

Hydrologické metody založené na analýze dat z velkého vzorku povodí s různými charakteristikami (large-sample hydrology; comparative hydrology) umožňují komplexní analýzu hydrologického režimu, a tím i popisu hydrologické variability a změn složek vodní bilance v prostoru a čase (Addor et al. 2020). Tyto metody poskytují vhled do hydrologických procesů, které jsou utvářeny faktory prostředí a klimatem a navzdory neznalostí místních specifik v měřítku jednotlivých povodí, umožňují vyvozovat závěry s obecnější platností. Takováto srovnávací hydrologie dokáže lépe zkoumat rozdíly a podobnosti mezi povodími, což dále dovoluje jejich klasifikaci a regionalizaci (Kuentz et al. 2017). Práci s velkými sety povodí navíc výrazně zefektivňují hydrologické modely (Jenicek et al. 2021; Jenicek a Ledvinka 2020). Výsledky studií na velkém vzorku dat pak umožňují zobecnění dosažených poznatků a jejich přenesení na větší měřítkové úrovně.

Pro efektivní analýzy hydrologického chování jsou kromě dat odtoku a klimatických proměnných nezbytná také data o vlastnostech povodí, především jejich přírodní charakteristiky, jako jsou geologie, půdy, topografie či vegetace. Datové podklady pro výpočet těchto charakteristik jsou většinou dostupné odděleně pro jednotlivé země, nicméně jejich jednorázové zpracování pouze pro konkrétní studii je časově velmi náročné. Navíc, pokud chce uživatel analyzovat zvolený jev v regionálním či globálním měřítku, naráží na dostupnost a nekonzistentnost podkladů napříč jednotlivými zeměmi. I z těchto důvodů v nedávné době vytvořila světová hydrologická komunita řadu volně dostupných rozsáhlých datových sad známých pod zkratkou CAMELS (*Catchment Attributes and MEteorology for Large-sample Studies*), které nejčastěji na národní úrovni poskytují ve srovnatelné struktuře atributy povodí, a dále hydrologické a meteorologické časové řady. Tato aktivita se i nadále rozvíjí, a přibývají datové sady z dalších zemí. Cílem tohoto příspěvku je prezentovat aktuální stav přípravy databáze CAMELS pro území Česka (CAMELS-CZ) jako jednotné referenční datové platformy pro analýzy a modelování, využívající velký vzorek povodí (large-sample studies). Tento příspěvek představuje aktualizaci příspěvku, který byl v květnu 2023 prezentován na konferenci Hydrologie malých povodí (Jeníček et al. 2023).

2. Proč potřebujeme CAMELS?

Databáze atributů povodí CAMELS představuje konzistentní, úplnou, volně dostupnou databázi povodí a jejich charakteristik, která má potenciál výrazně podpořit hydrologický výzkum a výuku. Databáze rozšíří současné možnosti provádět regionální analýzy hydrologického režimu v povodích v Česku s různými vlastnostmi (např. Hotovy et al. 2023; Jenicek et al. 2021). Velký vzorek povodí umožňuje hodnotit hydrologickou variabilitu a změny v prostoru i čase (rozdíly, podobnosti, regionalizace, klasifikace). Významnou přidanou hodnotou je skutečnost, že jde o zdola budovanou iniciativu jdoucí napříč mnoha vědecky vyspělými zeměmi (tab. 1), je tedy možné propojit jednotlivé datové sady a studovat chování povodí v regionálním až globálním měřítku zahrnující povodí v mnoha odlišných oblastech světa pokrývající velkou škálu přírodních podmínek a charakteristik klimatu. Navzdory celé

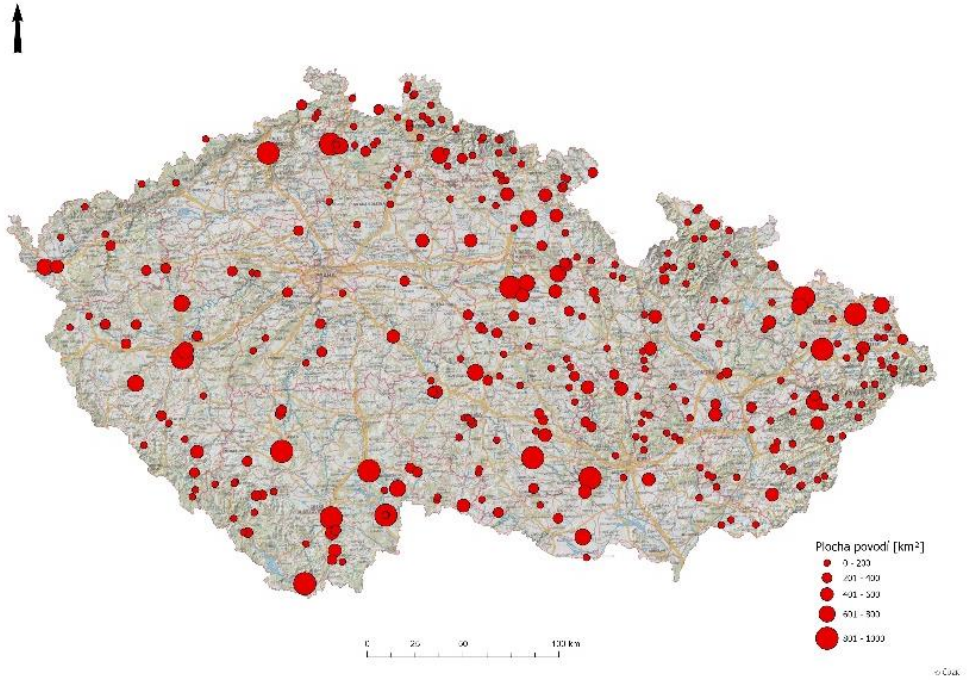
řadě různých a často kvalitních dílčích datových podkladů a databází, pro Česko taková ucelená hydrologická databáze dosud neexistuje.

Tab. 1 Existující a připravované datasety pro velké hydrologické studie.
Tab. 1 Existing and in-progress datasets for large-sample hydrological studies.

Publikované		**Připravované**	
Název	**Reference**	**Název**	**Reference**
CAMELS-US	Addor et al. (2017)	CAMELS-SAX	Hauffe et al. (2023)
CAMELS-CL	Alvarez-Garreton et al. (2018)	CAMELS-DE	Loritz et al. (2022)
CAMELS-GB	Coxon et al. (2020)	CAMELS-FR	Andréassian et al. (2021)
CAMELS-BR	Chagas et al. (2020)	CAMELS-CZ	–
CAMELS-AUS	Fowler et al. (2021)		
CAMELS-CH	Höge et al. (2023)		
LAMAH-CE	Klingler et al. (2021)		

3. Výběr povodí, datová struktura a podkladová data

Do databáze budou zahrnuta všechna povodí, která jsou uzavřena limnigrafickou stanicí, a která splňují definovaná kritéria, především velikost povodí (500 nebo 1000 km^2) a doba pozorování průtoku (minimálně 30 let). Tuto podmínku splňuje 330 povodí zahrnutých v síti ČHMÚ (obr. 1). Míra ovlivnění povodí lidskou činností (přehrady, odběry) bude v databázi klasifikována, přičemž některá povodí mohou být označena jako referenční, což umožní uživateli výběr přírodě blízkých povodí pro analýzy jejich hydrologického chování a trendů. Odhadovaný počet povodí řadí databázi CAMELS-CZ k těm početnějším s ohledem na plochu celého zájmového území, přičemž by povodí měla pokrývat více jak 2/3 rozlohy Česka.



Obr. 1 Přehled povodí ČHMÚ s plochou do 1000 km^2 a dobou pozorování delší než 30 let. Body představují polohu závěrového profilu s limnigrafickou stanicí, jejich velikost určuje plochu povodí.

Fig. 1 An overview of catchments maintained by CHMI with area below 1000 km^2 and observed time series longer than 30 years. Red points represent outlet profile location, point size represents catchment area.

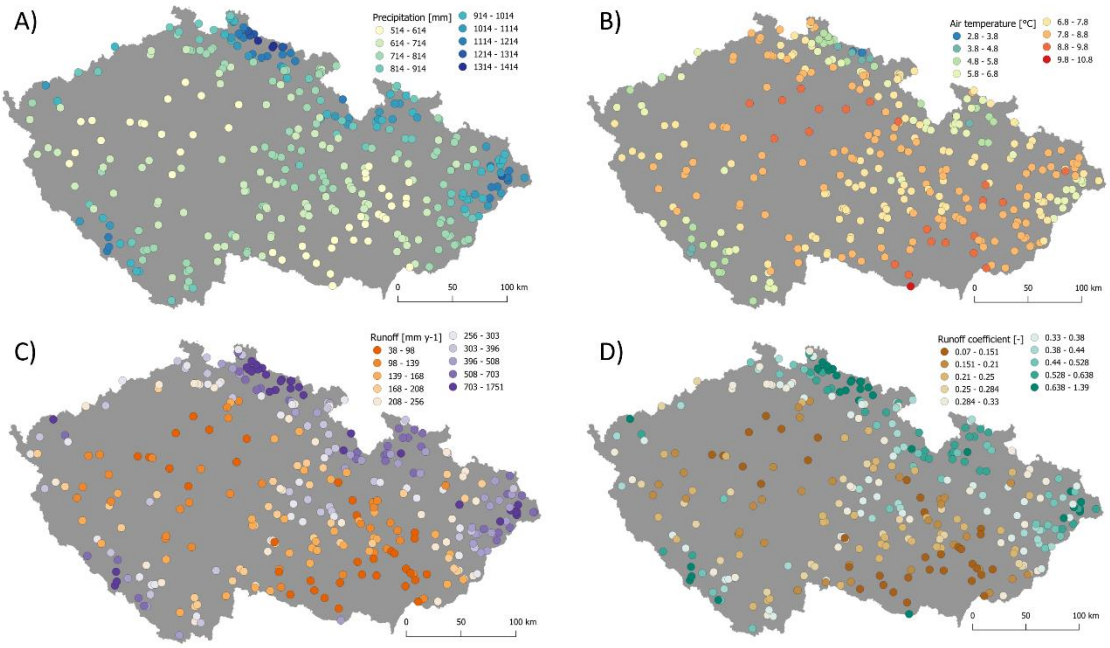
Tab. 2 Příklad atributů povodí pro jednotlivé třídy parametrů.
Tab. 2 Examples of catchment attributes for specified parameter classes.

Třída parametrů	**Vybrané parametry**	**Datové podklady pro výpočet**
Topografie	Nadmořská výška, sklon, hustota říční sítě	DMR 4G (ČÚZK)
Klima	Úhrn srážek, teplota vzduchu, podíl sněhových srážek, index aridity	Staniční i gridové časové řady základních klimatických proměnných (ČHMÚ)
Hydrologie	Kvantily průtoku, sklon křivky *M*-denních *Q*, počet dní s nízkými/vysokými *Q*	Časové řady průtoku ze stanic (ČHMÚ), hydrografie (DIBAVOD)
Půdy	Pórovitost, podíl půdních frakcí, nasycená hydraulická vodivost, RVK	Mapy zrnitosti, databáze hydraulických vlastností půd (VÚMOP, ČVÚT)
Vegetace	Podíl lesa, mokřadů, orné půdy atd., Leaf Area Index (LAI)	CORINE Landcover (Copernicus),
Geologie	Nejčastější typ hornin, propustnost, podíl krasových hornin	Geologické mapy (ČGS)

Jednotlivé charakteristiky povodí jsou rozděleny do šesti hlavních tříd – topografie, klima, hydrologie, vegetace, půdy a geologie. Navíc budou pro každé povodí doplněny základní údaje (např. poloha, id stanice apod.) a míra antropogenního ovlivnění. Příklady některých charakteristik a podkladových dat jsou uvedeny v tab. 2. Charakteristiky povodí budou agregovány pro celé povodí. Kromě toho budou uvedeny odkazy na dostupné datové podklady, ze kterých byly charakteristiky spočteny. Mezi ty hlavní patří časové řady průtoku ze závěrových stanic a průměrné denní hodnoty vybraných klimatických prvků (teplota vzduchu, srážky).

4. Příklad mapových výstupů

Pro povodí vybrané na základě definovaných kritérií byly spočteny základní klimatické a hydrologické charakteristiky (obr. 2). Výpočty byly provedeny prozatím po několik vybraných atributů, další budou počítány průběžně s plánem dokončit výpočty během roku 2024.



Obr. 2 Průměrný roční úhrn srážek (A), průměrná roční teplota vzduchu (B), průměrná roční odtoková výška (C), průměrný roční odtokový koeficient (D) na povodích v Česku v období 1960–2020.

Fig. 2 Mean annual precipitation (A), mean annual air temperature (B), mean annual runoff depth (C), mean annual runoff coefficient (D) in catchments in Czechia in the period 1960–2020.

5. Další postup a možné budoucí směry vývoje

V současné době probíhá v rámci dílčího úkolu projektu TA ČR PERUN diskuze nad výběrem povodí, a především nad strukturou databáze a konkrétními charakteristikami, které budou pro jednotlivá povodí počítány. Navržená struktura je v současnosti také konzultována s možnými koncovými uživateli databáze napříč českou hydrologickou komunitou. Diskutovanou otázkou také zůstává míra otevřenosti a dostupnosti datových podkladů, které budou použity pro výpočet jednotlivých charakteristik. Pro výslednou databázi je zásadní její otevření pro volné použití, například pod některou z variant licence CC BY.

Další vývoj naznačují současné snahy o propojení datových sad CAMELS do větších celků (CARAVAN), ve kterých je pro výpočet použita jednotná metodika a datové podklady (Kratzert et al. 2023). Cílem je tak vytvořit databázi atributů povodí spočtených nad jednotnými datovými podklady, což dále prohloubí možnosti globálních analýz hydrologického režimu.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

ADDOR, N., DO, H. X., ALVAREZ-GARRETON, C., COXON, G., FOWLER, K., MENDOZA, P. A., 2020. Large-sample hydrology: recent progress, guidelines for new datasets and grand challenges. *Hydrological Sciences Journal*, **65**(5), 712–725. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1683182

ADDOR, N., NEWMAN, A. J., MIZUKAMI, N., CLARK, M. P., 2017. The CAMELS data set: catchment attributes and meteorology for large-sample studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, **21**(10), 5293–5313. https://doi.org/10.5194/hess-21-5293-2017

ALVAREZ-GARRETON, C., MENDOZA, P. A., BOISIER, J. P., ADDOR, N., GALLEGUILLOS, M., ZAMBRANO-BIGIARINI, M., LARA, A., PUELMA, C., CORTES, G., GARREAUD, R., MCPHEE, J., AYALA, A., 2018. The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, **22**(11), 5817–5846. https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018

ANDRÉASSIAN, V., DELAIGUE, O., PERRIN, C., JANET, B., ADDOR, N., 2021. CAMELS-FR: A large sample, hydroclimatic dataset for France, to support model testing and evaluation. EGU General Assembly 2021. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13349

CHAGAS, V. B. P., L. B. CHAFFE, P., ADDOR, N., M. FAN, F., S. FLEISCHMANN, A., C. D. PAIVA, R., SIQUEIRA, V. A., 2020. CAMELS-BR: Hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil. *Earth System Science Data*, **12**(3), 2075–2096. https://doi.org/10.5194/ESSD-12-2075-2020

COXON, G., ADDOR, N., BLOOMFIELD, J. P., FREER, J., FRY, M., HANNAFORD, J., HOWDEN, N. J. K., LANE, R., LEWIS, M., ROBINSON, E. L., WAGENER, T., WOODS, R., 2020. CAMELS-GB: hydrometeorological time series and landscape attributes for 671 catchments in Great Britain. *Earth System Science Data*, **12**(4), 2459–2483. https://doi.org/10.5194/essd-12-2459-2020

FOWLER, K. J. A., ACHARYA, S. C., ADDOR, N., CHOU, C., PEEL, M. C., 2021. CAMELS-AUS: hydrometeorological time series and landscape attributes for 222 catchments in Australia. *Earth System Science Data*, **13**(8), 3847–3867. https://doi.org/10.5194/essd-13-3847-2021

HAUFFE, C., BRANDES, C., LEI, K., PAHNER, S., KÖRNER, P., KRONENBERG, R., SCHUETZE, N., 2023. CAMELS-SAX: A meteorological and hydrological dataset for spatially distributed modeling of catchments in Saxony. EGU General Assembly 2023. https://doi.org/10.5194/EGUSPHERE-EGU23-14357

HÖGE, M., KAUZLARIC, M., SIBER, R., SCHÖNENBERGER, U., HORTON, P., SCHWANBECK, J., FLORIANCIC, M. G., VIVIROLI, D., WILHELM, S., SIKORSKA-SENONER, A. E., ADDOR, N., BRUNNER, M., POOL, S., ZAPPA, M., FENICIA, F., 2023. CAMELS-CH: hydro-meteorological time series and landscape attributes for 331 catchments in hydrologic Switzerland. Earth System Science Data Discussion. https://doi.org/10.5194/essd-2023-127

HOTOVY, O., NEDELCEV, O., JENICEK, M., 2023. Changes in rain-on-snow events in mountain catchments in the rain–snow transition zone. *Hydrological Sciences Journal*, **68**(4), 572–584. https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2177544

JENICEK, M., HNILICA, J., NEDELCEV, O., SIPEK, V., 2021. Future changes in snowpack will impact seasonal runoff and low flows in Czechia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **37**, 100899. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100899

JENICEK, M., 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. https://doi.org/10.5194/hess-24-3475-2020

JENÍČEK, M., NEDĚLČEV, O., TYL. RADOVAN, VAJSKEBR, V., UNUCKA, J., ŠERCL, P., BERNSTEINOVÁ, J., LANGHAMMER, J., 2023. CAMELS-CZ: Databáze atributů povodí pro hydrologické a klimatologické studie na velkém vzorku malých povodí. In S. Hnilicová & M. Tesař (Eds.), Hydrologie malého povodí 2023, 7–10, Ústav pro hydrodynamiku AV ČR.

KLINGLER, C., SCHULZ, K., HERRNEGGER, M., 2021. LamaH-CE: LArge-SaMple DAta for Hydrology and Environmental Sciences for Central Europe. *Earth System Science Data*, **13**(9), 4529–4565. https://doi.org/10.5194/essd-13-4529-2021

KRATZERT, F., NEARING, G., ADDOR, N., ERICKSON, T., GAUCH, M., GILON, O., GUDMUNDSSON, L., HASSIDIM, A., KLOTZ, D., NEVO, S., SHALEV, G., MATIAS, Y., 2023. Caravan - A global community dataset for large-sample hydrology. *Scientific Data*, **10**(1), 1–11. https://doi.org/10.1038/s41597-023-01975-w

KUENTZ, A., ARHEIMER, B., HUNDECHA, Y., WAGENER, T., 2017. Understanding hydrologic variability across Europe through catchment classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, **21**(6), 2863–2879. https://doi.org/10.5194/hess-21-2863-2017

LORITZ, R., STÖLZLE, M., GUSE, B., KIESEL, J., HAßLER, S., MÄLICKE, M., TARASOVA, L., HEIDBÜCHEL, I., EBELING, P., HAUFFE, C., MÜLLER-THOMY, H., JEHN, F. U., BRUNNER, M., GÖTTE, J., ROHINI, K., 2022. CAMELS-DE: Initiative für einen konsistenten, frei verfügbaren Datensatz für hydro-meteorologische Analysen in Einzugsgebieten in Deutschland. https://doi.org/10.5281/ZENODO.6517142

Vyhodnocení plošné extremity extrémních povětrnostních událostí v Česku v období 1961–2020

(Evaluation of the areal extremeness of extreme weather events in Czechia in the period of 1961–2020)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.15

Marek Kašpar, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., kaspar@ufa.cas.cz
Miloslav Müller, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., Přírodovědecká fakulta UK

Abstrakt: S ohledem na násobné dopady povětrnostních extrémů při zasažení většího území jsme navrhli plošný způsob jejich hodnocení. Hodnotili jsme šest typů extrémních povětrnostních událostí, které zahrnují vlny veder, studené vlny, prudká ochlazení, větrné bouře, silné srážky a silná sněžení. Využili jsme původní metodiku pracující s tzv. indexem extremity počasí odvozeným z dob opakování hodnot příslušných meteorologických veličin v zasažené oblasti. Každá událost je charakterizována nejen plošnou extremitou kvantifikovanou indexem, ale také prostorovým rozsahem a délkou trvání. Vlny veder a studené vlny ve sledovaném období dosahují ve spojitosti s větším prostorovým rozsahem obecně vyšších hodnot indexu. Růst četnosti a extremity vln veder kontrastuje s poklesem četnosti studených vln a významných silných sněžení. Četnost větrných bouří mírně klesá, přičemž nejvýznamnější z nich se koncentrují v chladném půlroce. Prudká ochlazení jsou nejčastější v teplém půlroce, nicméně tři ze čtyř nejextrémnějších událostí se vyskytly v lednu. Četnost silných srážek má tendenci kolísat. Získaná meteorologická databáze extrémních událostí může pomoci při odhadech parametrů budoucích událostí s využitím modelů klimatu.

Klíčová slova: povětrnostní extrém – index extremity počasí – doba opakování – meteorologická databáze

Abstract: Due to the multiplication of impacts of weather extremes when occurring in larger area, we proposed an areal approach of their evaluation. We evaluated six types of extreme weather events, namely, heat waves, cold waves, air temperature drops, windstorms, heavy precipitation, and heavy snowfalls. We employed the original method using the Weather Extremity Index derived from return periods of values of relevant meteorological variables in the affected area. Each event is characterized not only by the areal extremeness quantified with the index but also by the spatial extent and duration. In the studied period, heat and cold waves generally reach higher index values in relation with larger affected area. The increase in the frequency and extremity of heat waves is in contrast with the decrease in the frequency of cold waves and significant heavy snowfalls. The frequency of windstorms is slightly decreasing with the most significant ones concentrated in the cold half-year. Air temperature drops are the most frequent in the warm half-year, nevertheless three of four top events occurred in January. The frequency of heavy precipitation tends to fluctuate. The obtained meteorological database of extreme events may help to estimate the parameters of future ones using climate models.

Keywords: weather extreme – Weather Extremity Index – return period – meteorological database

1. Úvod

Problémy související se změnou klimatu vedou v současnosti mnoho zemí k rozvíjení svých národních strategií zmírňování přírodních rizik spojených zejména s extrémními projevy počasí. Primární součástí vývoje každé takové strategie je analýza extrémů, které se vyskytly

v minulosti, a to s využitím odpovídajících datových zdrojů nebo přímo již existujících různě zaměřených databází extrémních povětrnostních událostí. V konferenčním příspěvku hodnotíme celkem šest typů těchto událostí, které se vyskytly v Česku mezi roky 1961 a 2020. Jedním z výstupů hodnocení je meteorologická databáze, kterou jsme pod zkratkou CZEXWED (z anglického „*CZech EXtreme WEather Database*“) publikovali v časopise „Weather and Climate Extremes“ (Kašpar et al., 2023). Databázi jsme vedle hodnocení parametrů jednotlivých událostí použili i k analýze jejich rozdělení v čase.

2. Data a metody

Vstupní data a použité metody jsou podrobně popsány v (Kašpar et al. 2023). Pro účely jednotného hodnocení různých typů extrémních povětrnostních událostí jsme aplikovali metodiku vyvinutou autory konferenčního příspěvku, která pracuje s tzv. indexem extremity počasí *WEI* (z anglického „*Weather Extremity Index*“; Müller a Kašpar 2014). Hodnoty *WEI* jsou odvozeny z dob opakování hodnot meteorologických veličin charakterizujících daný typ události za různě dlouhá období od jednoho dne až v řádu několika dnů a v různě velkých postupně zvětšujících se oblastech Česka. Frekvenční analýzu hodnot veličin jsme provedli s využitím časových řad denních hodnot maximální a minimální teploty vzduchu, úhrnu srážek, homogenizovaných maximálních nárazů větru (Kašpar et al. 2017) a výšky celkové sněhové pokrývky naměřených staniční sítí Českého hydrometeorologického ústavu ve sledovaném období (tab. 1).

Tab. 1 Uvažované typy extrémních povětrnostních událostí a meteorologické veličiny odvozené z řad staničních měření v denním kroku, které byly použity při hodnocení událostí.
Tab. 1 Considered types of extreme weather events and meteorological variables derived from station data series in 1-day step used in the evaluation of the events.

Typ události	**Zkratka**	**Meteorologická veličina**	**Počet použitých řad staničních měření**
Vlna veder	HW	Maximální teplota vzduchu	168
Studená vlna	CW	Minimální teplota vzduchu	165
Prudké ochlazení	TD	Pokles maximální teploty vzduchu	163
Větrná bouře	WS	Maximální náraz větru	18
Silné srážky	PP	Úhrn srážek	814
Silné sněžení	SF	Nárůst výšky sněhové pokrývky	416

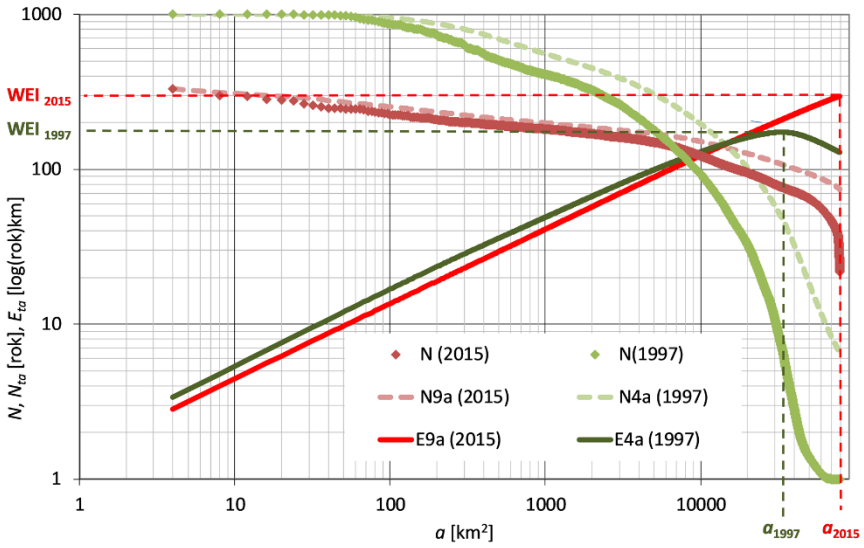
Index *WEI* je definován následovně:

$$WEI = \max_{t,a}(E_{ta}), \quad (1)$$

$$E_{ta} = \log N_{ta} \sqrt{a/\pi}. \quad (2)$$

V prvním kroku jsou odhadnuty doby opakování denních a průměrných (příp. akumulovaných) vícedenních hodnot příslušné veličiny na stanicích. Pro jednotlivé uvažované délky průměrování ve dnech *t* jsou poté hodnoty logaritmu doby opakování na stanicích interpolovány do pravidelné sítě uzlových bodů. Nakonec jsou takto získané interpolované doby opakování seřazeny sestupně podle velikosti a jsou spočteny jejich geometrické průměry N_{ta} v postupně zvětšujícím se počtu uzlových bodů odpovídajících postupně zvětšující se ploše území *a*. Index *WEI* je roven maximální hodnotě plošné extremity E_{ta} určené jako součin logaritmu N_{ta} a poloměru kruhové plochy odpovídající ploše *a* přes všechny uvažované hodnoty *t* a *a*. Kromě samotné maximální plošné extremity tak index *WEI* a způsob jeho

výpočtu umožňují objektivně kvantifikovat další parametry jednotlivých událostí, jako jsou prostorový rozsah a délka trvání včetně prostorové koncentrace projevů v zasažené oblasti a časová koncentrace projevů v průběhu trvání události. Detailní způsob výpočtu *WEI* a uvažované intervaly hodnot *t* a *a* se mohou mezi jednotlivými typy událostí lišit. Grafické znázornění postupu výpočtu pro dvě konkrétní extrémní události ukazuje obr. 1.



Obr. 1 Určení indexu WEI pro vlnu veder ze srpna 2015 (červeně) a událost silných srážek z července 1997 (zeleně). Největší plošnou extremitu E_{ta} dosahují události pro devítidenní průměrnou maximální teplotu 6.–14. 8. 2015 (tj. pro t = 9) a čtyřdenní úhrn srážek 4.–7. 7. 1997 (tj. pro t = 4). V grafu jsou znázorněny do pravidelné sítě interpolované a sestupně seřazené doby opakování hodnot těchto veličin (N), geometrický průměr dob opakování v postupně zvětšující se ploše (N_{9a}, resp. N_{4a}) a odpovídající plošná extremita (E_{9a}, resp. E_{4a}). WEI je rovno maximu plošné extremity, které také určuje prostorový rozsah dané události (a).

Fig. 1 Computation of the WEI index for the heat wave from August 2015 (red) and the event of heavy precipitation from July 1997 (green). The events reach the highest areal extremeness E_{ta} for the 9-day mean of daily maximum temperature 6–14th August 2015 (t = 9) and for 4-day precipitation total 4–7th July 1997 (t = 4), respectively. The graph depicts return periods of respective variables interpolated into a regular grid and sorted in descending order (N), geometric means of return periods in the gradually increasing area (N_{9a}, N_{4a}) and the corresponding areal extremeness (E_{9a}, E_{4a}). WEI equals the maximum areal extremeness that determines also the spatial extent of the given event (a).

3. Výsledky

Pro uvažované šedesátileté období bylo detekováno pro každý typ extrémních povětrnostních událostí šedesát událostí s největší plošnou extremitou vyjádřenou indexem *WEI*. Události byly hodnoceny z pohledu jejich struktury dané parametry získanými při výpočtu *WEI* a z pohledu jejich rozdělení v čase. Zjištěné nejdůležitější poznatky jsou shrnuty níže. Podrobnou analýzu detekovaných událostí včetně jejich seznamu a parametrů, příp. jejich ztotožnění s událostmi v širším středoevropském prostoru, lze nalézt v již zmiňované publikaci (Kašpar et al. 2023). Vybrané parametry tří událostí každého typu s největší plošnou extremitou uvádí tab. 2. Meziroční a sezónní rozdělení třiceti událostí každého typu s největší plošnou extremitou ilustruje obr. 2.

Vlny veder a studené vlny dosahují obecně vyšších hodnot *WEI*, neboť mají obvykle velký prostorový rozsah a delší délku trvání než ostatní typy extrémních událostí. Jejich pořadí je tedy určeno zejména jejich intenzitou úměrnou době opakování. Studené vlny zároveň

dosahují v průměru nepatrně vyšších hodnot *WEI* než vlny veder. Četnost výskytu vln veder se mezi dekádami 1961–1970 a 2011–2020 zvýšila pětinásobně, přičemž žádná z dvanácti událostí s největší plošnou extremitou nenastala v první polovině sledovaného období. Studené vlny vykazují opačný trend se zvýšenou četností v období 1981–1990 a velmi nízkou četností v poslední dekádě, ve které byla přesto detekována v únoru 2012 událost čtvrtá v pořadí. Vlny veder se zpočátku vyskytovaly až od druhé poloviny července do první poloviny srpna. V poslední dekádě byly už rozděleny do všech tří letních měsíců. V tento čas kompletně vymizely prosincové studené vlny.

Prudká ochlazení obvykle nepostihují více jak dvě třetiny Česka vyjma těch s největší plošnou extremitou. Z těchto událostí vyniká dobře známá událost z Nového roku 1979, při které doby opakování mezidenního poklesu maximální teploty dosáhly v průměru téměř 60 roků a hodnoty *WEI* byly téměř o polovinu vyšší oproti události druhé v pořadí. Devadesát procent prudkých ochlazení se vyskytlo v teplém půlroce, zatímco tři ze čtyř s největší plošnou extremitou v lednu.

Větrné bouře jsou charakterizovány velmi rozdílným prostorovým rozsahem. Nejrozsáhlejší z nich bývají spojeny s hlubokými tlakovými níženi, ty méně rozsáhlé s konvektivními bouřemi. Největší plošnou extremitu vykazuje větrná bouře z ledna 2007 („Kyrill“), kdy k vysokým hodnotám *WEI* vedla kombinace velkého prostorového rozsahu a poměrně vysokých dob opakování maximálních denních nárazů větru. Od roku 1990 četnost výskytu větrných bouří celkově klesá, nicméně tři z pěti s největší plošnou extremitou byly detekovány v první dekádě nového tisíciletí. Ze všech typů extrémních událostí jsou větrné bouře nejvíce rovnoměrně rozděleny během roku, přičemž ty nejvýznamnější se vyskytují spíše v chladném půlroce díky jejich pro tento čas typickému velkému prostorovému rozsahu.

Silné srážky postihují ze všech typů extrémních událostí obecně nejmenší část území Česka. Mezi tři události s největší plošnou extremitou a s podobnými hodnotami *WEI* se řadí dobře známé události spojené s katastrofálními povodněmi. Nejvyššími průměrnými dobami opakování úhrnů srážek je charakterizována nejextrémnější událost z července 1997, kdy k vysoké plošné extremitě přispěla i poměrně dlouhá délka trvání události. Největším prostorovým rozsahem je pak charakterizována událost třetí v pořadí ze srpna 2002. Četnost výskytu silných srážek za sledované období spíše kolísá. Zvýšenou četnost významnějších událostí můžeme pozorovat v dekádách 1981–1990 a 2001–2010.

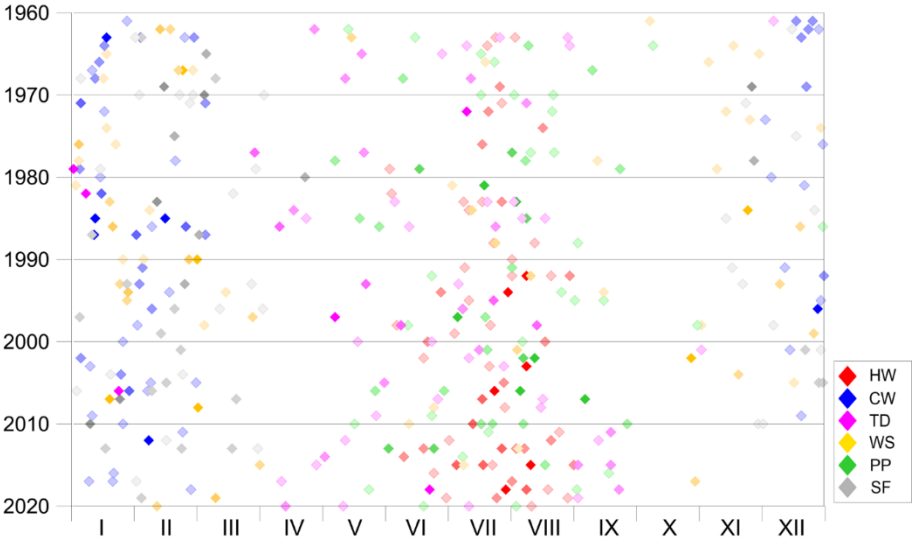
Silná sněžení jsou ze všech typů extrémních událostí charakterizována nejmenšími rozdíly v hodnotách *WEI* a délce trvání, která se ze 75 % pohybuje v rozmezí od 1 do 2 dnů. Evidentní jsou však rozdíly v prostorovém rozsahu událostí, protože v některých případech bylo silné sněžení vázáno pouze na vyšší nadmořské výšky, což platí podle očekávání zejména pro březnové a dubnové události. Po roce 2000 se vyskytly pouze dvě události z prvních dvanácti, a to v lednu. Zbývajících starších deset událostí bylo detekováno v listopadu a mezi únorem a dubnem. Změna v sezónním rozdělení silných sněžení je tedy zřejmá a může souviset s celkovým oteplováním chladného půlroku.

V druhé polovině sledovaného období bylo celkově detekováno zhruba o 20 % více extrémních událostí. Poslední dekáda však byla charakterizována, vyjma vln veder, podstatně nižší četností významnějších událostí než dekáda předchozí. V obdobích 1972–1976, 1991–1996 a 2016–2020 byly detekovány poměrně extrémní vlny veder, zatímco událostí silných dešťů a významnější studené vlny, větrné bouře a silná sněžení se téměř nevyskytovaly. Naopak větší počet extrémních studených vln, silných dešťů a větrných bouří můžeme pozorovat v obdobích 1981–1987 a 2001–2008. Koncept indexu *WEI* umožňuje detekovat a hodnotit i tzv. sdružené

extrémní události, které mohou mít závažnější dopady než samostatné události daného typu. Konkrétně jsme se zaměřili na případy po sobě jdoucích událostí jednoho typu a případy současného či postupného výskytu událostí více typů. Do první skupiny sdružených extrémů patří např. poměrně ojedinělý případ dvou krátce po sobě jdoucích událostí silných dešťů ze srpna 2002, do druhé skupiny pak např. případ prudkého ochlazení následovaný studenou vlnou a později i silným sněžením z ledna 1979.

Tab. 2 Parametry 3 událostí každého typu s nevětší plošnou extremitou vyjádřenou indexem WEI. Parametr t_{WEI} značí délku trvání, a_{WEI} prostorový rozsah a N_{WEI} geometrický průměr dob opakování hodnot příslušných meteorologických veličin v ploše a_{WEI} (viz též tab. 1).
Tab. 2 Parameters of 3 events of each type with the highest areal extremeness quantified by the WEI index. The parameter t_{WEI} denotes duration, a_{WEI} the spatial extent and N_{WEI} the geometrical mean of return periods of respective meteorological variables in the area a_{WEI} (see also Tab. 1).

Typ události	První den [dd. mm. rrrr]	t_{WEI} [den]	WEI [log(rok)km]	a_{WEI} [km^2]	N_{WEI} [rok]
HW	06. 08. 2015	9	296.3	78884	74
HW	28. 07. 1994	17	273.2	78884	53
HW	19. 07. 2006	10	202.1	78880	19
CW	03. 01. 1985	18	324.4	78184	114
CW	21. 12. 1996	14	235.7	78424	31
CW	07. 01. 1987	9	232.7	74580	32
TD	01. 01. 1979	.	256.4	66352	58
TD	22. 06. 2018	.	176.3	66696	16
TD	23. 01. 2006	.	147.4	30764	31
WS	18. 01. 2007	2	212.6	73300	25
WS	23. 11. 1984	2	178.4	71400	15
WS	23. 02. 1967	1	111.9	50600	8
PP	04. 07. 1997	4	173.6	33464	48
PP	17. 07. 1981	4	168.5	39272	32
PP	11. 08. 2002	3	166.4	49380	21
SF	08. 01. 2010	3	146.4	32164	28
SF	25. 11. 1969	2	131.2	20224	43
SF	23. 01. 2007	2	117.0	53928	8



Obr. 2 Meziroční a sezónní rozdělení událostí každého typu. Odstíny od světlejšího zvýrazňují postupně 30, 12 a 6 událostí s největší plošnou extremitou (viz též tab. 1).
Fig. 2 Interannual and seasonal distribution of events of each type. Shades from lighter highlight 30, 12, and 6 events with the highest areal extremeness, respectively (see also Tab. 1).

4. Závěr

Šest různých typů extrémních povětrnostních událostí bylo vyhodnoceno pro území Česka a období 1961–2020 s využitím metodiky založené na univerzálním ukazateli odvozeným z dob opakování naměřených hodnot vhodně zvolených meteorologických veličin v zasažené oblasti. Aplikovaný jednotný přístup hodnocení umožnil porovnat jednotlivé parametry událostí od plošně zprůměrované doby opakování po prostorový rozsah a délku trvání a analyzovat jejich rozdělení v čase. Vytvořená databáze událostí vykazuje poměrně dobrou shodu s publikovanými seznamy událostí v širším středoevropském prostoru. Probíhající aktivity se nyní zaměřují na detekci změn četností budoucích událostí a jejich parametrů prostřednictvím srovnání získaných výsledků se simulacemi kontrolního a následně budoucího období modelem ALADIN-CLIMATE/CZ. Další možné aplikace zahrnují např. kvantitativní analýzu vazeb mezi parametry událostí a příčinnými cirkulačními podmínkami.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

KAŠPAR, M., MÜLLER, M., BLIŽŇÁK, V., VALERIÁNOVÁ, A., 2023. CZEXWED: The unified Czech extreme weather database. *Weather and Climate Extremes*, **39**, 100540, ISSN 2212-0947. https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100540

KAŠPAR, M., MÜLLER, M., CRHOVÁ, L., HOLTANOVÁ, E., POLÁŠEK, J. F., POP, L., VALERIÁNOVÁ, A., 2017. Relationship between Czech windstorms and air temperature. *Int. J. Climatol.*, **37**, 11–24, ISSN 0899-8418. https://doi.org/10.1002/joc.4682

MÜLLER, M., KAŠPAR, M., 2014. Event-adjusted evaluation of weather and climate extremes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **14**, 473–483, ISSN 1684-9981. https://doi.org/10.5194/nhess-14-473-2014

Změna rozdělení srážek při růstu teploty vyjádřená v diagnostických a prognostických datech

(Change in precipitation distribution as temperature rises expressed in diagnostic and prognostic data)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.16

Zbyněk Sokol, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., sokol@ufa.cz
Daniela Řezáčová, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., rez@ufa.cz

Abstrakt: Shrnujeme hlavní výsledky, které ukazují, jak se mění rozdělení srážek s rostoucí teplotou. Hodnocení využívá hodinové úhrny z 97 srážkových stanic z území České republiky za roky 1997 až 2019. Hodnoty přízemní teploty, přízemního rosného bodu a výstupné kondenzační hladiny jsou užity pro vyjádření teplotní změny. Výsledky ukazují, jak se teplotní růst napětí nasycení (*CC scaling*) projevuje v rozložení hodnot srážek na studovaném území. Obecně se nárůst srážek v závislosti na sledovaných teplotách zřetelně projevuje u horních kvantilů avšak pouze pro určité intervaly teplot, což potvrzuje závěry i jiných prací. V práci jsou obdobně jako naměřená data zpracována data z reanalýz provedených modelem ALADIN-CLIMAT/CZ.

Klíčová slova: Clausiusova Clapeironova rovnice – srážky – závislost intenzity srážek na teplotě

Abstract: We summarize the main results that show how the distribution of precipitation changes with increasing temperature. Hourly rainfall totals from 97 rain gauge stations in the Czech Republic for the years 1997 to 2019 are used for the evaluation. Ground temperature, ground dew point temperature and temperature at the lifting condensation level are used to express the temperature change. The results show how an increase in temperature and a corresponding increase in saturation humidity (CC scaling) affects the distribution of precipitation in the study area. In general, the increase in precipitation as a function of observed temperature is clearly evident for the upper quantile values, but only for certain temperature intervals. It confirms the findings of other studies. In this paper, data from reanalyses performed by the ALADIN-CLIMAT/CZ model are treated similarly to the measured data.

Keywords: Clausius Clapeiron equation – precipitation – dependence of precipitation intensity on temperature

1. Úvod

Nárůst silných srážek vyvolaný zvyšující se povrchovou teplotou bývá prezentován jako závažný důsledek zvýšení teploty a z toho vyplývajícího nárůstu absolutní vlhkosti nasycení popsané Clausiovým Clapeyronovým vztahem (viz např. IPCC 2007; IPCC 2021). Průměrné zvýšení tlaku nasycení s teplotou je podle Clausiusova Clapeyronova vztahu 7 %·K^{-1}. Tato hodnota se často označuje jako referenční hodnota *CC*. Nárůst není konstantní a klesá s vyššími teplotami; např. hodnota 7 %·K^{-1} platí pro 10 °C a 6 %·K^{-1} pro teploty kolem 30 °C (viz např. Buerger et al. 2014).

Studie IPCC (2007) vychází z prací o zvýšení globální teploty a srážek, ale zdůrazňuje také význam změn v silných srážkách, které se vyznačují vysokými hodnotami srážkové vody (účinností srážek). Proto se zkoumá změna srážek s teplotou. Budeme ji vyjadřovat v % a označovat *CC*. Vypočtený gradient *CC* se porovnává s referenční hodnotou *CC* = 7 %·K^{-1}.

V poslední době vznikla řada studií, které používají různé postupy při statistickém zpracování změny srážek s teplotou. Změna byla sledována nejen jako funkce povrchové teploty, ale také s ohledem na význam vlhkosti, například jako funkce teploty přízemního rosného bodu a zkoušely se různé postupy, jak oslabit vliv srážek na přízemní teplotu. Byly také zkoumány rozdíly v charakteristikách konvektivních a stratiformních srážek. Odkazy na práce týkající se této problematiky lze nalézt v přehledové publikaci (Martínková a Kyselý 2020).

Změna rozdělení srážek s rostoucí teplotou je v řadě studií vyjádřena jako změna hodnoty vysokých kvantilů, typicky kvantilů nad 95 %, které charakterizují výskyt silných srážek. Pro danou pravděpodobnost změna kvantilu s teplotou odpovídá kombinované změně hodnoty a frekvence srážek (Myhre et al. 2019).

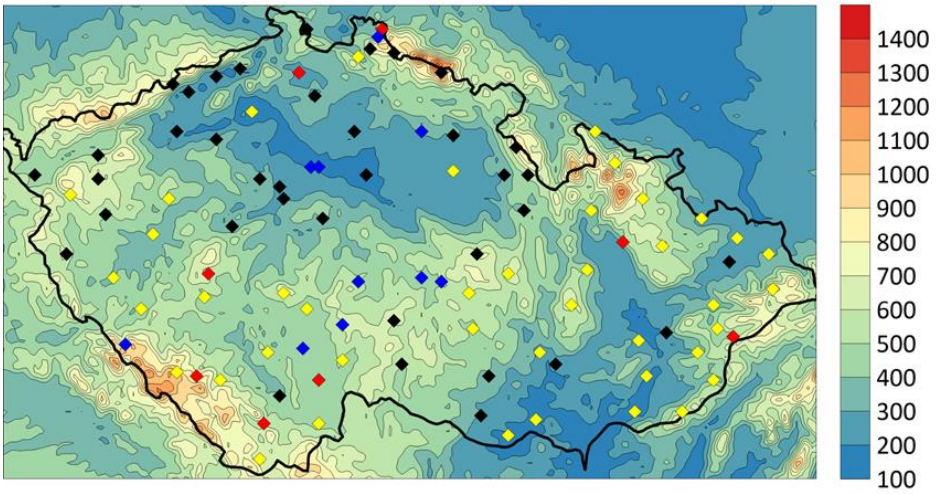
Cílem této práce je popsat vztah mezi teplotou a silnými srážkami s využitím hodinových úhrnů (1h) srážek ze stanic z ČR s dostatečně dlouhými řadami a porovnat je se vztahy, které vzniknou analýzou dat z reanalýz pomocí modelu ALADIN-CLIMAT/CZ (AC).

Příspěvek je uspořádán následovně: Dostupná vstupní data jsou popsána v následující části. V sekci 3 se zabýváme analýzou 1h měření srážek. V sekci 4 a 5 je popsána závislost 1h srážek na teplotě a teplotě rosného bodu ve výšce 2 m nad terénem a dále na teplotě ve výškové kondenzační hladině vlhkosti v přízemní atmosféře pro naměřené hodnoty srážek a srážek z reanalýz a následuje. Sekci 5 obsahuje závěr.

2. Data

Vstupní data se skládají ze dvou datových typů z teplé poloviny roku (duben–září). Diagnostická data jsou reprezentována měřením vybraných českých meteorologických stanic a modelová data jsou odvozena z reanalýz modelu AC.

Diagnostická data byla sestavena z klimatologické databáze ČHMÚ CLIDATA (Coufal a Tolasz 1997) z období 1997 až 2019. Hodnoty srážek za 1 hodinu byly analyzovány v závislosti na teplotě (*T*) a teplotě rosného bodu (*Td*) ve výšce 2 m nad terénem a dále na teplotě ve výškové kondenzační hladině (*Tlcl*, vypočteno podle Romps 2017).



Obr. 1 Umístění stanic a orografie (barevná škála je v m). Barvy označují délku měření na stanicích (žlutá – 8 až 10 let, modrá – 11 až 15 let, černá – 16 až 20 let a červená – více než 20 let).
Fig. 1 Location of stations and orography (color scale is in m). Colours indicate the length of measurements at stations (yellow – 8 to 10 years, blue – 11 to 15 years, black – 16 to 20 years and red – more than 20 years).

Na základě dostupnosti dat byla použita data z 97 srážkoměrných stanic. Jednotlivá měření srážek byla v provozu v různých časech a po různou dobu (viz obr. 1). Pro analýzu bylo k dispozici celkem 44635 hodinových hodnot srážek. Analyzované hodinové hodnoty pocházejí ze dnů s denním úhrnem srážek alespoň 5 mm. Tato data navíc splňují podmínku, že měření teploty a vlhkosti jsou k dispozici v okruhu 10 km od srážkoměrné stanice a měření tlaku vzduchu v okruhu 150 km. Tato data byla potřeba pro výpočet *Td* a *Tlcl*. Hodnoty *T* a *Td* se běžně používají při analýze *CC*. Přidali jsme hodnoty *Tlcl* na základě předpokladu, že teplé základny oblaků jsou výhodnější pro vývoj srážek právě díky vyšší absolutní vlhkosti nasyceného vzduchu.

Modelová data byla získána z reanalýz vypočtených modelem AC, který vychází z konfigurace modelu ALARO systému ALADIN (Termonia et al. 2018). Dynamika a parametrizační schémata modelu ALARO jsou uvedeny v odkazované publikaci. Modelová oblast pokrývá střední Evropu, horizontální krok sítě má délku 2.3 km a model má 87 vertikálních hladin, přičemž nejvyšší hladina je ve výšce přibližně 53 km nad zemí. Vertikální rozlišení u povrchu je přibližně 20 m. Model využívá plně elastické nehydrostatické dynamické jádro a fyzikální model vzniku a vývoje srážek 3MT (Gerard et al. 2009).

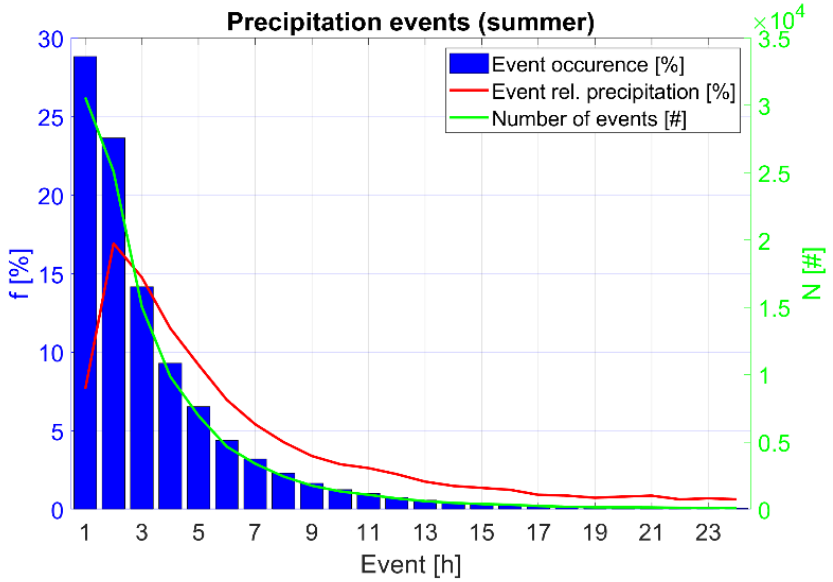
Jádrem reanalýzy je šestihodinový asimilační cyklus, kde je hlavní pozornost zaměřena na analýzu povrchových dat, která vychází z práce Giarda a Bazileho (2000). Při přípravě počátečních podmínek se využívá metoda Digital Filter Blending (Brožková et al. 2006), kdy jsou modelová data propojena s reanalýzou ERA5, která je rovněž použita pro boční okrajové podmínky a ty se připravují s časovým krokem 1 h. Při výpočtech se využívá reanalýza ERA5 z 00 h UTC a délka předpovědi je 30 h.

Při analýze byla využita modelová data odpovídající poloze stanic, tj. hodnoty z nejbližšího modelového uzlu, přičemž vzdálenost mezi stanicí a nejbližším uzlem je maximálně 1,3 km. Kromě toho byla použita pouze data splňující stejnou podmínku jako v případě staničních dat a to, že v daný den byly srážky minimálně 5 mm.

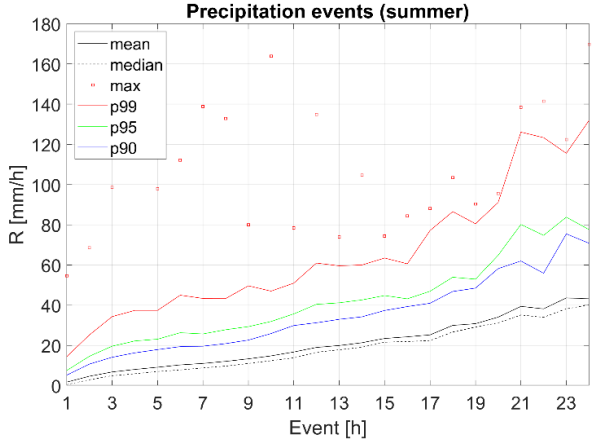
3. Analýza srážkových událostí

Účelem této sekce je prezentovat základní statistiky srážkových událostí. Definice události byla založena na poklesu srážek v hodině před a po události. Obr. 2 ukazuje charakteristiky izolovaných událostí, jejichž časové hranice jsou definovány poklesem srážek pod 0,2 mm/h. Základní statistické charakteristiky pro události různého trvání jsou uvedeny na obr. 3.

Obr. 2 potvrzuje klesající počet událostí s jejich délkou trvání. Kombinovaný vliv kratšího trvání a vyšší četnosti výskytu způsobuje, že nejvyšší maximální srážky jsou v kategorii trvání 2h. Obr. 3 ukazuje, že hodnoty charakteristik rozdělení srážek s výjimkou maxim rostou s dobou trvání události, a to i přes klesající počet událostí s delší dobou trvání. Nízký počet delších událostí však způsobuje „nehladký“ charakter závislostí v charakteristikách rozdělení. Zajímavý je výskyt vysokých maximálních srážek u kratších událostí, které pravděpodobně představují přívalové konvektivní přeháňky.

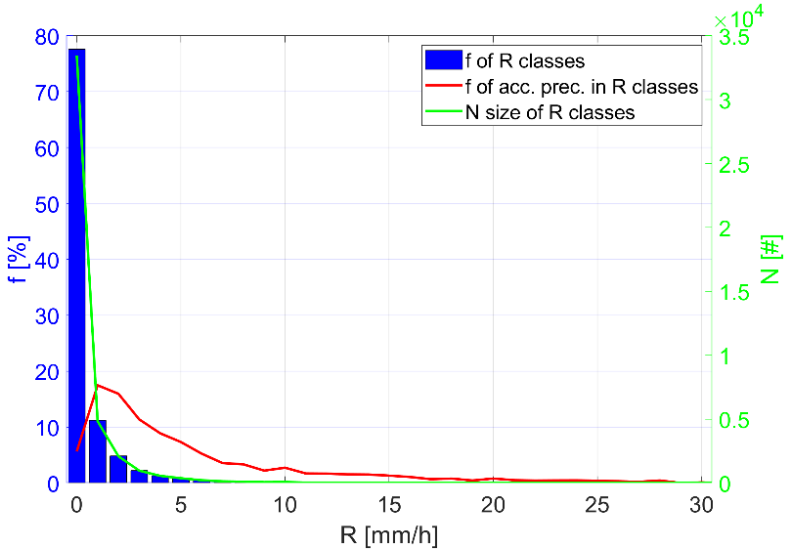


Obr. 2 Rozdělení n-hodinových srážkových událostí (horizontální osa) v souboru pozorovaných hodnot. Vodorovná osa – délka události [h]; levá svislá osa: relativní četnost f [%] hodnot délky události – modrý histogram, relativní množství vody [%] pro jednotlivé srážkové události – červená křivka; pravá svislá osa: absolutní četnost [#] jednotlivých srážkových událostí – zelená křivka.
Fig. 2 Distribution of n-hour precipitation events (horizontal axis) in a set of observed values. Horizontal axis – event length [h]; left vertical axis: relative frequency f [%] of event length values – blue histogram, relative amount of water [%] for individual precipitation events – red curve; right vertical axis: absolute frequency [#] of individual precipitation events – green curve.



Obr. 3 Pro různé délky trvání srážkových událostí (horizontální osa) jsou zobrazeny charakteristiky srážek R: průměry, mediány, maxima a kvantily 90 %, 95 % a 99 %. Viz legenda.
Fig. 3 Rrecipitation characteristics R [mm/h] are shown for different duration of precipitation events (horizontal axis): averages, medians, maxima and quantiles of 90%, 95% and 99%. See legend.

Rozdělení 1h srážek z hlediska intenzity je zobrazeno na obr. 4. Je zřejmé, že nízké srážkové úhrny jsou nesrovnatelně četnější než vysoké a zároveň přinášejí mnohem větší množství srážek. V souboru hodnot 1h na obr. 4 je průměrná hodnota srážek 0,54 mm/h, maximální hodnota 42,70 mm/h a percentily 90, 95 99 a 99,5 % nabývají hodnot 1, 60, 2, 90, 7, 65 a 10, 90 mm/h.



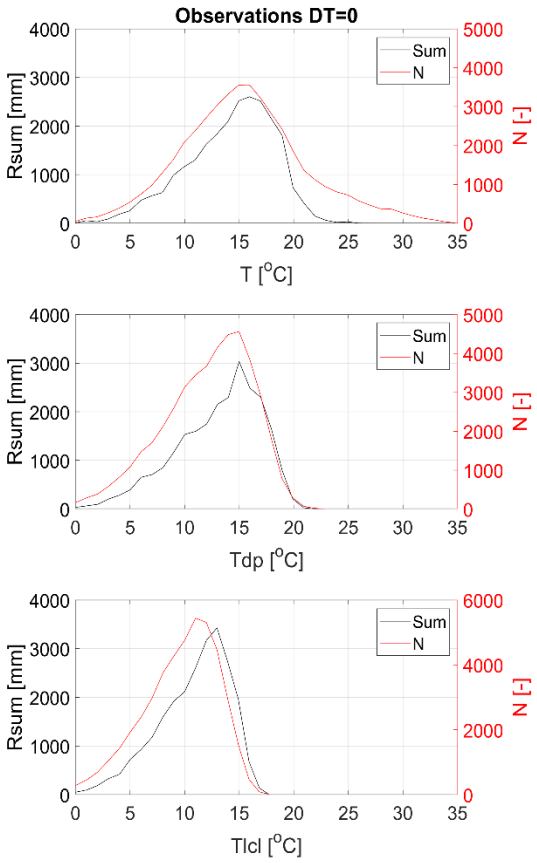
Obr. 4 Rozdělení 1h srážek v souboru pozorovaných hodnot. Vodorovná osa: hodnoty 1h srážek R [mm/h]: levá svislá osa: relativní četnost [%] hodnot v každé kategorii R – modrý histogram, relativní četnost [%] vodního množství v každé kategorii – červená křivka, pravá svislá osa: absolutní četnost [#] hodnot v každé kategorii – zelená křivka. Všechny hodnoty nad 30 mm/h jsou zahrnuty v poslední kategorii.

Fig. 4 Distribution of 1h precipitation in the set of observed values. Horizontal axis shows 1h precipitation values R [mm/h]. Left vertical axis shows relative frequency [%] of values in each R category by blue histogram and relative frequency [%] of water amount in each category as a red curve. Right vertical axis depicts absolute frequency [#] of values in each category as a green curve. All values above 30 mm/h are summarized in the last category.

4. Závislost 1h naměřených srážek na teplotě a vlhkosti v přízemní atmosféře

V této sekci jsou závislosti 1h srážek na charakteristikách teploty a vlhkosti ukázány na obr. 5, 6 a 7. Obr. 5 ukazuje celkový úhrn srážek Rsum a celkový počet hodinových úhrnů *N* v závislosti na hodnotách *T*, *Td* a *Tlcl*, které byly stanoveny na konci hodiny měření srážek (*dt* = 0).

Obrázek 5 ukazuje rozdíly v intervalu hodnot *T*, *Td* a *Tlcl*. Zatímco přízemní teplota dosahuje až k 35 °C, teplota přízemního rosného nedosahuje 25 °C a nejvyšší hodnoty teploty výstupné kondenzační hladiny jsou pod 20 °C. Maximum dosahují obě hodnoty *Rsum* a *N* kolem 15 °C, v důsledku větší výšky dosažené adiabatickým výstupem s odpovídajícím ochlazováním je maximum *Tlcl* mezi 10 °C and 15 °C.



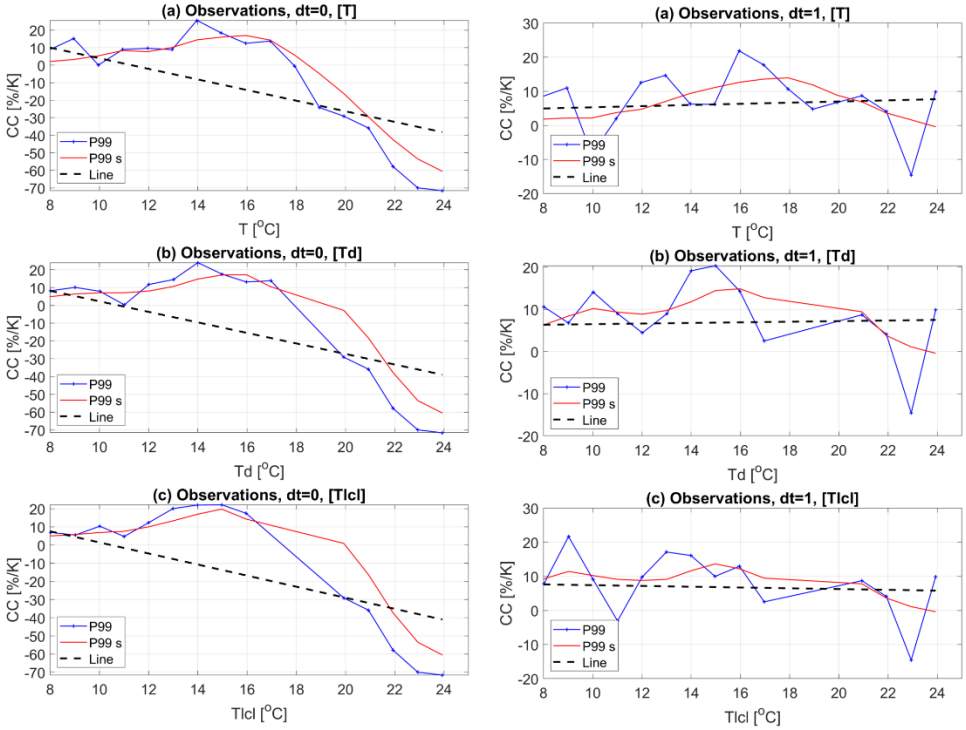
Obr. 5 Celková srážka Rsum [mm] a celkový počet 1h úhrnů N [-] v závislosti na hodnotě přízemní teploty T [°C], teploty přízemního rosného bodu Td [°C] a teploty výstupné kondenzační hladiny Tlcl [°C].
Fig. 5 Total precipitation Rsum [mm] and the number of 1h totals N [-] depending on ground temperature T [°C], ground dew point temperature Td [°C] and output condensation level temperature Tlcl [°C].

Obrázek 6 ukazuje závislost *CC* pro srážkové úhrny přesahující 99% kvantil na *T*, *Td* a *Tlcl*. Levý sloupec s označením *dt* = 0 využívá naměřené hodnoty *T*, *Td* a *Tlcl* na konci 1h srážkového intervalu (obdobně jako obr. 5). Pravý sloupec *dt* = 1 používá srážky, které jsou naměřeny v hodině následující po naměření/vypočtení hodnot *T*, *Td* a *Tlcl*. Křivka *P99* ukazuje přímo vypočtené hodnoty 99% kvantilu a *P99* s je shlazená křivka *P99* běžícím průměrem s využitím 5 bodů. Přerušovaná přímka ukazuje trend za celý zobrazený interval. Mezi pravým a levým sloupcem je patrný rozdíl, který je nepochybně způsoben tím, že v levém sloupci srážky způsobují v některých případech ochlazení vzduchu a změnu relativní vlhkosti, což ovlivňuje *T*, *Td* a *Tlcl*. V případech s *dt* = 1 může obdobné ovlivnění také nastat, ale nastává méně často, protože v čase měření nemusí vypadávat srážky. Pro všechny zobrazené závislosti je patrné, že *CC* do určité teploty narůstá, ale pak klesá. Tato vlastnost je typická i pro jiné studie. Konkrétní hodnota, kdy dochází ke zlomu trendu *CC*, se však výrazně v jednotlivých studiích liší a pravděpodobně závisí na lokalitě. Je však třeba upozornit na to, že pro vysoké hodnoty *T*, *Td* a *Tlcl* je k dispozici menší počet dat, a proto získané vztahy nejsou robustní.

Hodnoty *CC* ve svých maximech významně překračují *CC* = 7 %·K^{-1} a někde se blíží i k *CC* = 20 %·K^{-1}, což se shoduje s jinými pracemi. Tento fakt svědčí o tom, že procesy, které vedou

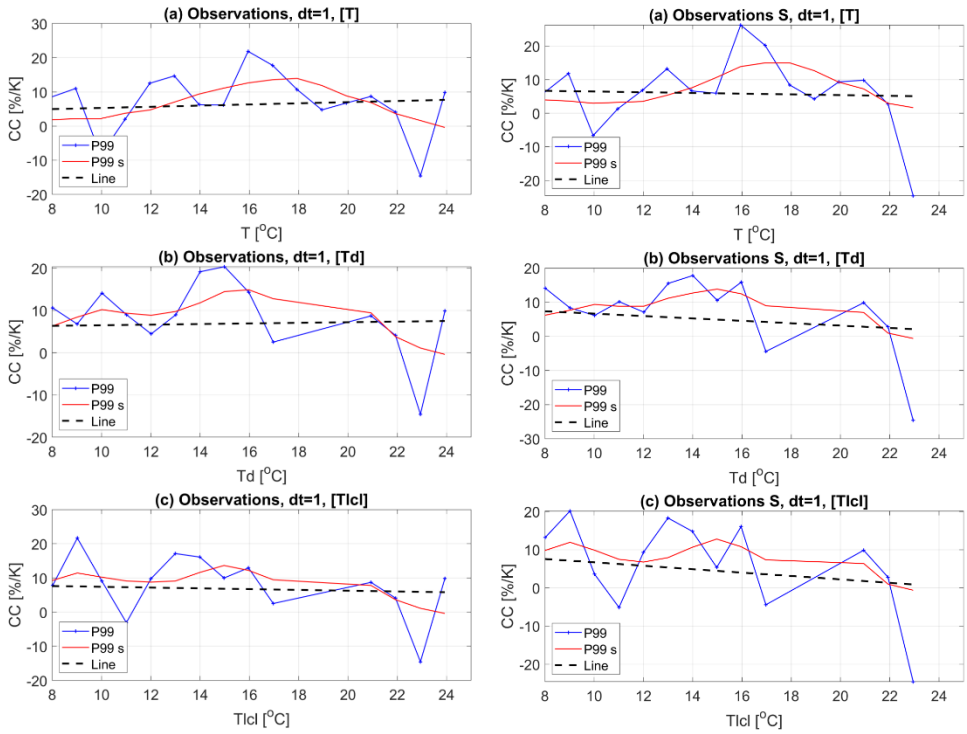
k přízemním srážkám, jsou komplikované a je obtížné či nemožné odhadovat srážky s využitím jednoduchým parametrů, např. teploty rosného bodu při zemi.

Obrázek 7 porovnává, jak se mění závislost *CC* pro srážkové úhrny přesahující 99% kvantil na *T*, *Td* a *Tlcl* pro naměřené hodnoty srážek v závislosti na výběru srážkových dat. Levý sloupec je totožný s pravým sloupcem na obr. 6. Pravý sloupec uvažuje pouze ty srážkové úhrny, kdy v hodině předcházející měření *T*, *Td* a *Tlcl* napršelo méně než 0,2 mm, tj. nepršelo a srážková událost začíná až po měření *T*. Mezi sloupci je zřetelná podobnost bez ohledu, která veličina je zobrazena na horizontální ose a to především v centrální části grafu. Z toho lze usuzovat, že intenzivní 1h srážky mají krátké trvání a zpravidla předcházející hodinu jsou srážky menší nebo žádné.



Obr. 6 Závislost CC na T, Td a Tlcl pro naměřené hodnoty 1h srážek. Levý sloupec s označením dt = 0 využívá naměřené hodnoty T, Td a Tlcl na konci 1h hodinového srážkového intervalu. Pravý sloupec dt = 1 používá srážky, které jsou naměřeny v hodině následující po naměření hodnot T, Td a Tlcl.

Fig. 6 Dependence of CC on T, Td and Tlcl for measured values of 1h precipitation. The left column marked dt = 0 uses the measured values of T, Td and Tlcl at the end of the 1h hourly precipitation interval. The right column dt = 1 uses precipitation that is measured in the hour following the measurement of T, Td and Tlcl.



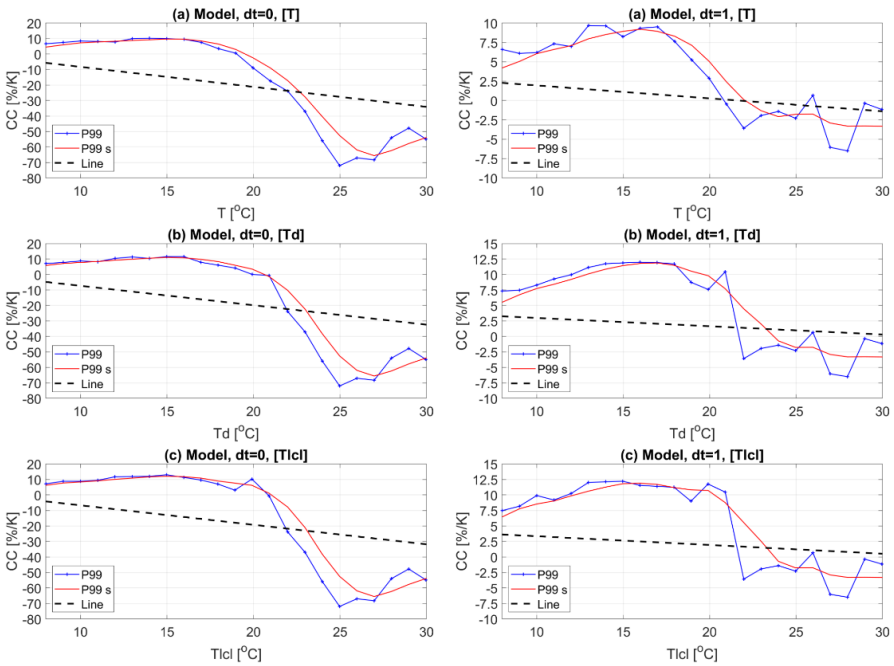
Obr. 7 Závislost CC na T, Td a Tlcl pro naměřené hodnoty srážek. Oba sloupce využívají naměřené hodnoty T, Td a Tlcl na začátku 1h srážkového intervalu. Pravý sloupec s označením S vybírá pouze data, kdy v hodině předcházející měření T, Td a Tlcl srážky byly menší než 0,2 mm.
Fig. 7 Dependence of CC on T, Td and Tlcl for measured precipitation values. Both columns use the measured values of T, Td and Tlcl at the beginning of the 1h precipitation interval. The right column marked S selects only the dates when less than 0.2 mm of precipitation fell in the hour preceding the measurement T, Td and Tlcl.

5. Závislost modelových 1h srážek na teplotě a vlhkosti v přízemní atmosféře

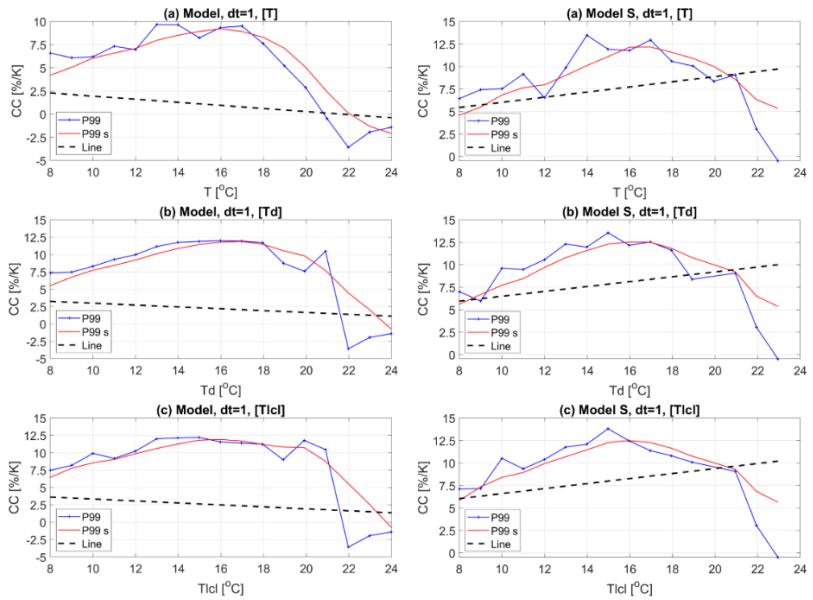
V této sekci jsou zpracována srážková a teplotní data stejně jako v Sekci 4 ale pro hodnoty získané z reanalýz, které budeme označovat jako modelové hodnoty. Vypočtené základní závislosti 1h srážek na charakteristikách teploty a vlhkosti jsou zobrazeny na obr. 8 a 9, které odpovídají obr. 6 a 7, kde se použila naměřená data. Modelových dat je daleko více, a proto jsou zobrazeny hodnoty teplot až do 30 °C.

Levý sloupec na obr. 8, který ukazuje závislost *CC* na *T*, *Td* a *Tlcl* pro srážkové úhrny odpovídající 99% kvantilu dává trochu nižší hodnoty *CC*, ale je kvalitativně velmi podobný levému sloupci na obr. 6 pro naměřené hodnoty. Významnější je rozdíl mezi modelovými a naměřenými hodnotami pro *dt* = 1 (pravý sloupec na obr. 6 a 8). Model dává nižší hodnoty *CC* a křivka *CC* je zřetelně hladší než u naměřených hodnot, což je zřejmě dáno větším počtem vstupních modelových dat. Za pozornost stojí, že modelová data obdobně jako data naměřená mají zlomový bod, po kterém *CC* klesá se vzrůstající teplotou, a tyto zlomové body docela dobře sobě odpovídají pro oba typy dat.

Obr. 9 ukazuje, že podmínka *S* (v hodině, na jejímž konci se měřila teplota, srážky byly menší než 0,2 mm) pro *dt* = 1 nemá zásadní vliv na tvar křivky *CC*. Zřetelně se však projevuje v závislosti na hodnotách *T* (obr. 9), což lze vysvětlit tím, že srážky v minulé hodině ovlivňují modelovou teplotu a tento vliv je větší než v případě hodnot měřených.



Obr. 8 Závislost CC na T, Td a Tlcl pro modelové hodnoty. Levý sloupec s označením dt = 0 využívá modelové hodnoty T, Td a Tlcl na konci 1h srážkového intervalu. Pravý sloupec dt = 1 používá srážky, které odpovídají hodině následující po termínu s vypočtenými hodnotami T, Td a Tlcl.
Fig. 8 Dependence of CC on T, Td and Tlcl for model values. The left column marked dt = 0 uses the model values T, Td and Tlcl at the end of the 1h precipitation interval. The right column dt = 1 uses precipitstion that correspond to the hour following the term with calculated values of T, Td and Tlcl.



Obr. 9 Závislost CC na T, Td a Tlcl pro modelové hodnoty srážek. Oba sloupce využívají modelové hodnoty T, Td a Tlcl na začátku 1h srážkového intervalu. Pravý sloupec s označením S vybírá pouze data, kdy v hodině předcházející vypočteným hodnotám T, Td a Tlcl napršelo méně než 0,2 mm.
Fig. 9 Dependence of CC on T, Td and Tlcl for model precipitation values. Both columns use the model values T, Td and Tlcl at the beginning of the 1h precipitation interval. The right column marked S selects only dates when less than 0.2 mm of rain fell in the hour preceding the calculated values of T, Td and Tlcl.

6. Závěr

Získané výsledky lze vyjádřit následujícími body:

- Obecně existuje nárůst frekvence vysokých hodinových srážkových úhrnů, ale je omezen pouze na určitý interval teplot bez ohledu na to, kterou teplotu používáme *T*, *Td* nebo *Tlcl* . Pro vyšší teploty nastává naopak pokles. Maximální hodnoty nárůstu vysokých srážek representovaných 99% kvantilem jsou okolo 15 %·K^{-1}. Získané výsledky jsou srovnatelné s výsledky jiných studií. Je potřeba poznamenat, že publikované výsledky se navzájem výrazně liší a jsou silně závislé na typu užitých dat a na lokalitě, odkud data pocházej.
- Je zřetelný rozdíl ve vypočtených závislostech podle toho, v jakém časovém vztahu jsou měření teploty a hodinového srážkového úhrnu. V případě, že se teplota měří na konci srážkového intervalu, srážky ovlivňují (snižují) naměřené hodnoty teploty na rozdíl od případu, kdy se srážky měří až v hodině následující po měření teploty. Tato zkušenost je známa. Je však zajímavé, že když jsme v druhém případě z analýzy vyloučili data, kdy v hodině, na jejímž konci se měřila teplota, tj. srážková událost začala v čase analyzované srážky, nedostali jsme příliš rozdílné výsledky. To lze vysvětlit tím, že intenzivní srážky netrvají dlouho a vyskytly se právě v analyzované hodině. Proto není zásadní, zda v předchozí hodině vypadávaly srážky.
- Stejně zpracované hodnoty srážek a teplot pro modelová data získaná reanalýzou dat dávají kvalitativně obdobné výsledky jako data naměřená. Tento výsledek lze chápat jako nepřímé potvrzení, že fyzikální procesy v modelu odrážejí realitu.
- Za nejcennější výsledek této studie lze považovat to, že analýza naměřených i modelových hodnot se shoduje v tom, že pro hodnoty vysokých kvantilů (95 % a více) hodinových srážek s teplotou (*T*, *Td* nebo *Tlcl*) celkově stoupají. Ale existuje zlomový bod, po kterém dochází ke zřetelnému poklesu srážek. Nelze tedy s odkazem na Clausiusův Clapeyronův vztah tvrdit, že se vzrůstající teplotou budou vždy narůstat silné srážky.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

BROŽKOVÁ, R., DERKOVÁ, M., BELLUŠ, M., FARDA, A., 2006. Atmospheric forcing by ALADIN/MFSTEP and MFSTEP oriented tunings. *Ocean Sci.*, **2**, 113–121. https://doi.org/10.5194/os-2-113-2006

BUERGER, G., HEISTERMANN, M., BRONSTERT, A., 2014. Towards subdaily rainfall disaggregation via Clausius–Clapeyron. *Journal of hydrometeorology*, **15**(3), 1303–1311. https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0161.1

COUFAL, L., TOLASZ, R., 1997. A Climate Data Processing, Control, Information and Archiving System (tentative proposal). At: World Climate Programme – Data and Monitoring, **34**, Annex 14, WMO-TD Preliminary, Geneva 1997.

GERARD, L., PIRIOU, J.-M., BROZKOVÁ, R., GELEYN, J.-F., BANCIU, D., 2009. Cloud and precipitation parameterization in a meso-gamma scale operational weather prediction model. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 3960–3977. https://doi.org/10.1175/2009MWR2750.1

GIARD, D., BAZILE, E., 2000. Implementation of a New Assimilation Scheme for Soil and Surface Variables in a Global NWP Model. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 997–1015. https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<0997:IOANAS>2.0.CO;2

ROMPS, D. M., 2017. Exact expression for the lifting condensation level. *Journal of the Atmospheric Sciences,* **74**, 3891–3900. https://doi.org/10.1175/JAS-D-17-0102.1

MARTÍNKOVÁ, M., KYSELÝ, J., 2020. Overview of Observed Clausius-Clapeyron Scaling of Extreme Precipitation in Midlatitudes. *Atmosphere*, **11**(8), 786. https://doi.org/10.3390/atmos11080786

MYHRE, G., ALTERSKJÆR, K., STJERN, C. W., HODNEBROG, O., MARELLE, L., SAMSET, B. H., SILLMANN, J., SCHALLER, N., FISCHER, E., SCHULZ, M., STOHL, A., 2019. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Scientific Reports*, **9**, 16063. https://doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4

TERMONIA, P., FISCHER, C., BAZILE, E., BOUYSSEL, F., BROŽKOVÁ, R., BÉNARD, P., BOCHENEK, B., DEGRAUWE, D., DERKOVÁ, M., EL KHATIB, R., HAMDI, R., MAŠEK, J., POTTIER, P., PRISTOV, N., SEITY, Y., SMOLÍKOVÁ, P., ŠPANIEL, O., TUDOR, M., WANG, Y., WITTMANN, C., JOLY, A., 2018. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geosci. Model Dev.*, **11**, 257–281. https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018

IPCC, 2007. Dostupné z: https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/

IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Počet dusných dní na území Slovenska
(Number of Sultry Days in the Territory of Slovakia)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.17

Kristína Szabóová, Slovenský hydrometeorologický ústav, kristina.szaboova@shmu.sk

Abstract: Sultriness is formed by the interaction of several weather factors. It is the state of the atmosphere when the water vapor pressure exceeds 18.7 hPa. This condition has adverse physiological effects on plants, animals and especially on the human body. For this reason, in this research, emphasis was placed on the time evolution of sultriness at the meteorological station Hurbanovo in the Slovak Republic. The paper will examine the 40-year period (1981–2020). The study is a continuation of the work of Štefan Kveták, who examined the previous 30-year period (1951–1980). We hypothesized that the number of sultry days is also increasing due to climate change. The basis of the whole assumption was hourly data from meteorological stations in the database of the Slovak Hydrometeorological Institute. As the scientific goals of the project, we preferred the categorization of sultriness according to various criteria, the evaluation of their frequency and time trends of occurrence, and we compared their development with the previous period.

Keywords: sultriness – bioclimatology – climate change

Abstrakt: Dusno vzniká pôsobením viacerých poveternostných faktorov. Je to stav atmosféry, keď tlak vodnej pary prekročí 18,7 hPa. Tento stav má nepriaznivé fyziologické účinky na rastliny, živočíchy a najmä na ľudský organizmus. Z tohto dôvodu sa v tomto výskume kládol dôraz na časový vývoj sultrín na meteorologickej stanici Hurbanovo v Slovenskej republike. V príspevku sa bude skúmať 40ročné obdobie (1981–2020). Štúdia nadväzuje na prácu Štefana Kvetáka, ktorý skúmal predchádzajúce 30ročné obdobie (1951–1980). Predpokladali sme, že počet dusných dní sa zvyšuje aj v dôsledku klimatických zmien. Základom celého predpokladu boli hodinové údaje z meteorologických staníc v databáze Slovenského hydrometeorologického ústavu. Ako vedecké ciele projektu sme uprednostnili kategorizáciu dusných dní podľa rôznych kritérií, vyhodnotenie ich frekvencie a časových trendov výskytu a porovnali sme ich vývoj s predchádzajúcim obdobím.

Kľúčové slová: dusno – bioklimatológia – klimatické zmeny

1. Introduction

With the increasing summer heat waves, the impact of the weather on the human body is coming into focus. With this work, we want to find out whether climate change is increasing the number of sultry days at the weather station, which may have a negative impact on the health of the population. If the increasing trend is confirmed, appropriate adaptation measures should be chosen. The results of the work can also be used as background material for further bioclimatic as well as technical analyses. The topic has a wide application not only for meteorologists, climatologists but also for example for health professionals, foresters, biologists and experts in many other scientific disciplines. The main aim of the work was to evaluate the temporal distribution of the sultriness and its evolution at the professional meteorological station Hurbanovo. Specifically, in which seasons it occurs most frequently, which months are most affected by it and which hour. We also investigated what values are favourable for humans, in which situations we have the most pleasant conditions in terms of air temperature and relative humidity. Slovak Hydrometeorological Institute provided values for two climatic indicators for meteorological weather station in Hurbanovo, namely hourly data on

air temperature and relative humidity. Both for the period 1981–2020, actually a 40-year period. Without them, it would not be possible to calculate the water vapour pressure, which is an indispensable data for specifying the occurrence of sultriness in our country.

The paper followed the work of K. Scharlau (Scharlau 1943). Within the domestic publications, a scientific article by Štefan Kveták, a former employee of the Slovak Hydrometeorological Institute, who in 1986 made a research on dry and sultry weather in Hurbanovo for the period 1951–1980, was taken as a basis for the research (Kveták 1986). From the foreign literature we had at our disposal during the processing a scientific article (Zarnowiecky 2003) in English version. From the literature used, the boundaries of the sultriness as established by K. Scharlau, where asphyxiation occurs when the water vapour pressure exceeds 18.7 hPa (Scharlau 1943).

2. Data

2.1 Geographical characteristics of meteorological station Hurbanovo

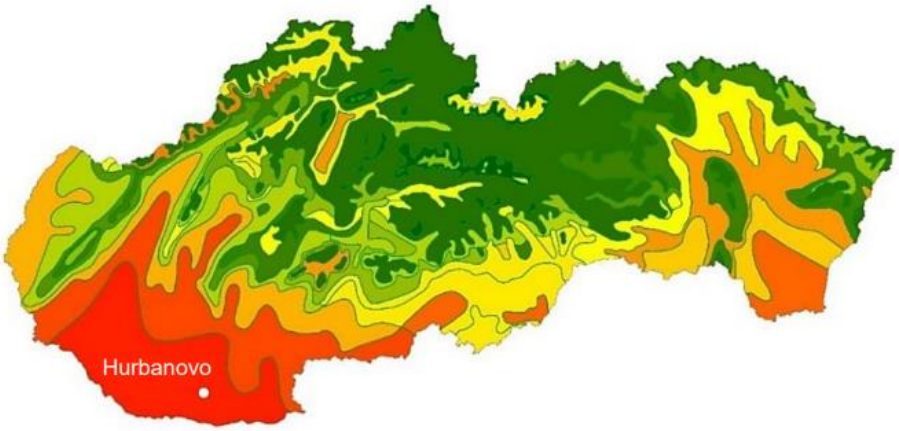


Fig. 1 Location of meteorological station Hurbanovo within Slovakia.

The professional meteorological station Hurbanovo was chosen because it is our most southern located station, which belongs in terms of climatic regionalization to the warm region and to the climatic-geographical type of warm lowland climate. This station characterises a climatically extensive part of the Danube Plain, our warmest and most agriculturally productive area (Fig. 1). As previously mentioned, Hurbanovo is a professional station located in central Europe (47°52′23″N, 18°11′36″E). It is located at the climatically warmest point of the Danubian Lowland of southern Slovakia, at the confluence of the Žitava and Nitra rivers (Hurbanovo city 2021). Hurbanovo has a long-term observation station with more than 100-years of meteorological observations. Data from Hurbanovo, historically the most important station-observatory for meteorology and climatology on the territory of Slovakia, have been available practically continuously for a century and a half (Výberči et al. 2021). The oldest published weather data for Hurbanovo in the professional literature are from 1871, but we have daily Hurbanovo meteorological data since 1. 1. 1872. The Meteorological Observatory in Hurbanovo is a professional station with the most complete and best processed observational material in Slovakia. It is not only the basic station for Slovak climatological research, but also its flagship. The importance of the station is also evidenced by the fact that in September 2020 it was included in the important list of the so-called "*Centennial Observing Stations of the World Meteorological Organization (WMO)*". As can be seen in Fig. 1, the station is characterized by a lowland relief. Its elevation is 115 m (Bochníček et al. 2015). As the whole Slovakia lies in the temperate zone, the weather is characterized by the regular alternation of four seasons.

The distance from the sea causes that the climate here is transitional between oceanic and continental climate (Balážovičová 2015). In the west of Slovakia, where the station Hurbanovo is also located, oceanic and in the east continental airs have a greater influence masses, but altitude has the greatest influence on climate formation (Bochníček et al. 2015). Due to the high quality of soils, the area ranks among the most fertile and most agriculturally exploited in Slovakia. This causes that natural vegetation had to give way to human needs and the surroundings of the intravilan are mainly arable land. Animal species are abundantly represented here especially birds, which are the reason for the creation of the town's several protected areas (Jobbágy 2013).

2.2 Sultry weather

An indispensable step to find out where and when sultry weather has occurred is to calculate the water vapour pressure. For this calculation, we needed air temperature and relative humidity data. Water vapor pressure, like air temperature, decreases with increasing altitude (Chromov 1968). It reaches its maximum values on the lowlands in the summer months, lowest at high mountain altitudes in winter. Annual course of water vapour pressure is similar to the annual course of air temperature (Trizna 2012). It is characterised by one maximum occurring in July and one minimum in January. The water vapour pressure has its minimum in the morning hours, before sunrise. During day, as the air temperature rises evaporation increases, increasing the water vapour pressure up to reaching a maximum around 14:00. Later, it starts to gradually decrease towards morning minimum. This simple diurnal course of pressure water vapour pressure is particularly common in high mountain climates and, in winter, at lower (Wiederhold 1997). In the warm half of the year, thermal turbulence is manifested at lower altitudes, water vapour moving away from the earth's surface into the upper atmosphere, modifying the daily water vapour pressure.

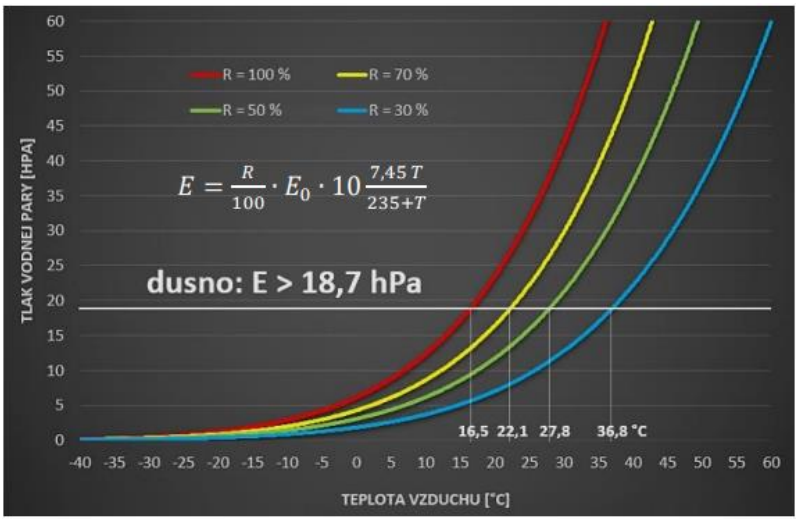


Fig. 2 Dependence of water vapor pressure on air temperature at a given relative humidity (M. Šinger 2016; taken from the official website of the Slovak Hydrometeorological Institute).

The daily run has two peaks, a major maximum in the morning around 9:00 h, a secondary one in the evening (around 20:00 h) and two minima, the main minimum is identical to that of the simple daily course, i.e. before sunrise, and the secondary minimum occurs at the time of the daily maximum air temperature around 15:00 h (Bochníček O. et al. 2015). As already mentioned, sultriness occurs when the water vapour pressure exceeds 18.7 hPa (all gases in the atmosphere together form a total pressure of air (in our area an average of 1 013.25 hPa)

and part of it water vapour). The amount of water vapour in a given volume of air is limited by its temperature, the higher it is, the higher the temperature, the more water vapour a given volume of air can contain. This dependence can be described by the so-called Clausius Clapeyron equation (SHMÚ 2016). In Fig. 2 we can be seen in a simplified expression of sultriness, because there are several variants. On the x-axis (vertical axis), the pressure of the water vapour. On the y-axis (horizontal axis) is the air temperature. The minimum value of sultriness is shown by the white line. On the graph we can see 4 more curves describing this dependence at different relative humidity (100, 70, 50, 30%). This shows that it is not possible for sultriness to occur at temperatures below 16.5 °C, because the water vapour pressure at 100% relative humidity would always be below 18.7 hPa. One hundred percent relative humidity during the day is rare (e.g. after/during rain, especially in summer), so the graph shows dependencies even for lower relative humidity values. For a given relative humidity, the minimum values of air temperature at which sultriness occurs are also given. It can be seen that in dry air (30% relative humidity), sultriness is reached at very high temperature values, up to almost 37 °C (SHMU 2016). It clearly has harmful physiological effects on humans and some animals. It adversely affects people with diseases of the cardiovascular system and puts a strain on the thermoregulatory mechanisms of the organism, which is reflected in the reduced working capacity of healthy people (Kveták 1986). It is largely related to the physiological process of thermal regulation in the human body. Heat dissipation is self-regulated by the body through evaporation, conduction, and last but not least, radiation. Heat dissipation from the body can be prevented by heat input from outside in very warm weather, which limits evaporation and thus the dissipation of excess heat. In such circumstances, an uncomfortable feeling of sultriness may arise. Climatological variables such as effective longwave radiation, wind speed, as well as body work and clothing are involved. As previously written, sultriness can occur at higher air temperatures (e.g. at an air temperature of 30 °C it occurs when the relative humidity reaches at least 45%) or at high humidity (e.g. at a relative humidity of 100% and an air temperature of at least 17 °C). It is not an easy job to identify and assess the threshold of sultriness, thermal comfort and cold in humans, because the thermal sensation in the same meteorological conditions may be different in different people, as it depends greatly on the human body and on the current physiological state of the person. It should be remembered that the human body gives off heat not only by conduction, convection and radiation, but also by evaporation. As a result of thermal regulation the organism reacts to external weather influences in such a way that heat expenditure in a warm environment increases and decreases in cold environments. The human body can, to a certain extent to protect itself from overcooling and overheating through thermoregulatory mechanisms. To be taken into account clothing, physical load, acclimatisation, etc. The fact is that increased temperature is more easily tolerated if the relative humidity is lower. But if the relative humidity is less than 20%, evaporation from the surface of the mucous membranes of the respiratory tract is so great that the mucous membranes begin to dry out. It is also worth pointing out the loss of water due to evaporation and perspiration of the human body. It is now known that air purity, ionisation, the electrical properties of the air environment, the magnetic field and the content of various impurities in the air also affect well-being. Several observations have shown that the thermal equilibrium of a person at rest is already difficult to maintain at an air temperature of 40 °C and a relative humidity of 30% or at 30 °C and a relative humidity of 85%. Beyond these limits, the subjective sensation of most people deteriorates. It is recommended to pay close attention to the measurement and recording of infrared radiation because it affects the thermal sensation of a person. It fluctuates strongly with changes in various atmospheric factors (e.g. cloud cover, content of water vapour, fog, airborne dust concentration). This

circumstance is of particular importance in the occurrence of summer sultriness situations. For example, for a long time before a thunderstorm, an increase in the sensation of sultriness has been known to be associated with an increase in cloud cover and vapour in the air (Švec 2014). Sultriness is more common in large cities, where increased air pollution and increased infrared radiation due to hot asphalt and house walls contribute (Kolesár 1989). In our country, it occurs mainly in the summer half of the year, mainly in the lowlands. The number of sultry days with increasing altitude altitude decreases, in mountainous areas at 1 000 m above sea level rarely occurs. The most pleasant weather for man may be considered a state when the air temperature is around 17 °C and the humidity is on average humid, around 50% (Kveták 1986).

2.3 Relationship between climate change and sultry weather

The threat of climate change and its negative impacts is now a very serious and immediate problem. The most striking manifestation of climate change is undoubtedly global warming, manifested both on land and in the oceans. Warming on land brings with it a number of remarkable, particularly negative, consequences. The increase in average air temperature is having a particularly negative impact on natural ecosystems, which are finding it very difficult to adapt to this change, in addition to the increasingly frequent extreme weather events such as: heat waves, prolonged more prolonged and intense droughts, stronger and more violent storms, etc. (SHMÚ 2019). The occurrence of showers depends mainly on the temperature (Lapin 2001). Consequently, we assume that if a longer time series of increasing temperature is observed air in Slovakia, and the whole world, the sultry weather will show a similar trend. The sultry weather may, to a large extent promote the formation of thunderstorms, as sufficient moisture in the lower levels of the troposphere is one of the basic conditions for their development (SHMÚ 2016). As we can see in Fig. 3 The occurrence of sultriness has a similar pattern of development as temperature of air, which is of course not surprising, as long as the calculation of sultriness includes the element of air temperature.

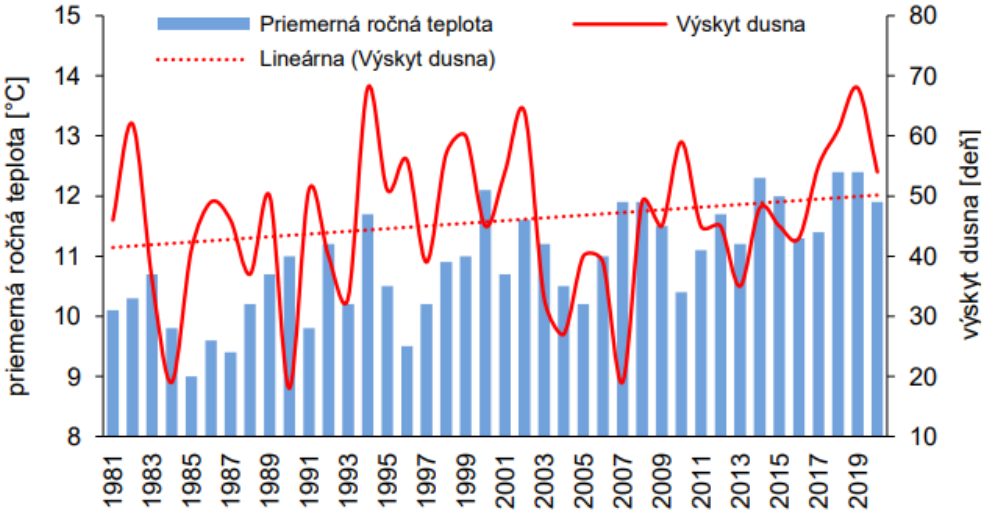


Fig. 3 Relationship between average of air temperature and occurrence of sultriness.

3. Methods

From the air temperature and relative humidity data, water vapour pressure was calculated as it is the basic data in detecting the occurrence of sultriness. Sultriness is the result of limited evaporation and is dependent on the water vapour pressure in the air. It is measured in Pascals (Pa) (Kvetak 1986). It has been calculated using the formulas below. We used 2 different

formulas to calculate the water vapor pressure, depending on whether it was the summer (March to August) or winter (September to February) season. For the winter months, the formula for the flat ice surface has an exponent of the form:

$$e = R\left(6{,}1.10^{\frac{9{,}5t}{265{,}5+t}}\right) \quad (1)$$

and for the summer period:

$$e = R\left(6{,}1.10^{\frac{7{,}45t}{235+t}}\right) \quad (2)$$

where

e = water vapour pressure

R = relative humidity (%)

t = air temperature (°C)

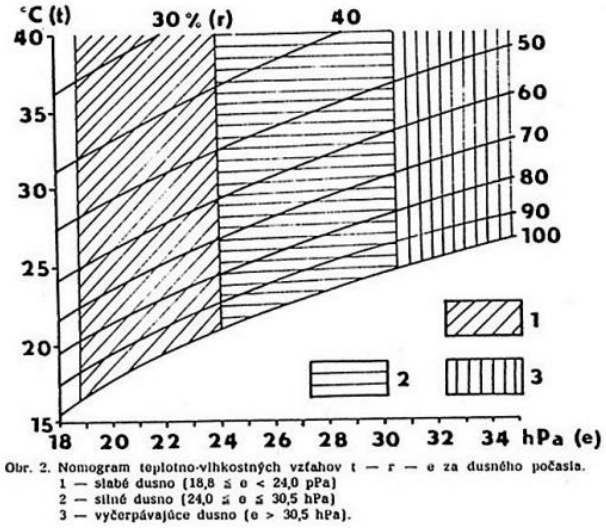
(Matveev, 1965).

According to the work of Stefan Kveták (Kveták 1986), the number of days with the occurrence of sultriness and the categorization into three types was found according to the value of water vapour pressure. K. Scharlau (Scharlau 1943) determined the beginning of the of the occurrence of sultriness when the water vapour pressure reaches the value of >18.7 hPa. The interval 18.8 ≤ *e* < 24.0 hPa he designated as weak sultriness, 24.0 ≤ *e* ≤ 30.5 hPa strong sultriness, and when *e* > 30.5 hPa exhaustive sultriness (Fig. 4).

4. Results

4.1 Temporal distribution of sultriness

When examining the diurnal pattern of the occurrence of sultriness over a single day, we found that sultry days occur most frequently in the morning at 7:00 am, 8:00 am and evening 7:00 pm, 8:00 pm. The most rarely occurring sultry days are occurring at 3:00 and 4:00. The most common onset of sultry weather is between 6:00 a.m. and 10:00 a.m. maximum onset is between 7:00 p.m. and 9:00 p.m. in the evening, and sporadic occurrences in the overnight and early morning hours. We have obtained a double daily water vapour pressure run with two minima and two maxima (Fig. 5). The cause of this of the double diurnal run may be that the soil is warming from the sunrise, around 7:00 to 9:00 h, when it increases evaporation and the water vapour pressure near the ground surface increases. Gradually, the temperature increases and convection intensifies. As a result of the increasing turbulence and convection, there is an increased transport of water vapour to altitude. In this case evaporation can no longer make up for the so-called loss and therefore the water vapour content drops to a second minimum, which becomes apparent around 15:00 to 16:00 h. Evening maximum around 19:00 to 20:00 h is related to a decrease in turbulence intensity. In the night hours we can again see a decrease in the content of water vapour in the air as the air begins to cool from the ground surface and condensation of water vapour occurs.



Obr. 2. Nomogram teplotno-vlhkostných vzťahov t — r — e za dusného počasia.
1 — slabé dusno (18,8 ≤ e < 24,0 pPa)
2 — silné dusno (24,0 ≤ e ≤ 30,5 hPa)
3 — vyčerpávajúce dusno (e > 30,5 hPa).

Fig. 4 Nomogram of thermal-moisture relations t - r - e for sultry weather. Taken from the Geographical Journal, Yearbook 38, Number 1 (1986) (own development).

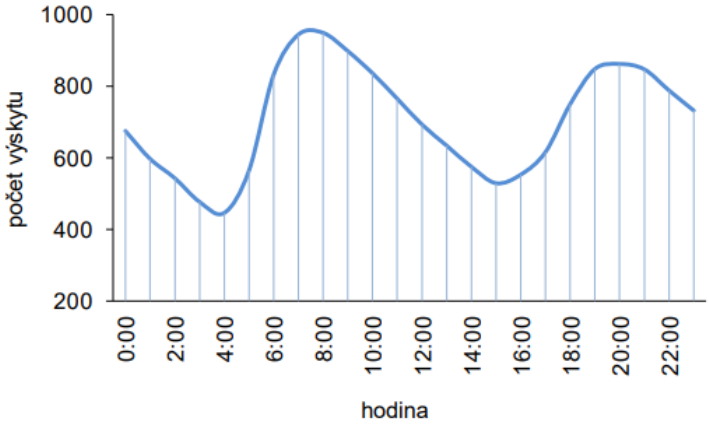


Fig. 5 Daily course of sultriness in the period 1981–2020 at meteorological station Hurbanovo.

4.2 Occurrence of sultiness in the individual categories

The highest total number of hours of sultry weather in Hurbanova over the 40-year period was in 2019 (987 h) and 2002 (722 h). The lowest number was recorded in 1990 (75 h) and the second lowest was 1984 (109 h). The average number of hours with sultry weather per year is approximately 424 h. It can be concluded that the number of hours with sultry weather increases from 1981 to 2020. This increase has been represented by a linear trend line (Fig. 6). From the value of the coefficient of determination also shown in the graph (*R2*) shows that the linear dependence is slight, insignificant, because the tightness of the dependence (*R2* = 0.0435) is close to zero, it is independence (Nováková 2013). The second way we examined the change in the number of sultry days was by comparing the data with the previous period, detailed below. As previously mentioned, the occurrence of sultriness by intensity can be categorized into 3 types – weak, strong, exhausting sultriness (Scharlau 1943). In our case, we have defined two groups similarly to S. Kveták in his work (Kveták 1986). The first group included the occurrence of sultry days, all days in which the water vapor pressure exceeded 18.7 Pa at least once (Fig. 6), and the second group represented the occurrence of severe and exhausting sultry days, i.e., cases in which the water vapor pressure exceeded 24.0 hPa (Fig. 7).

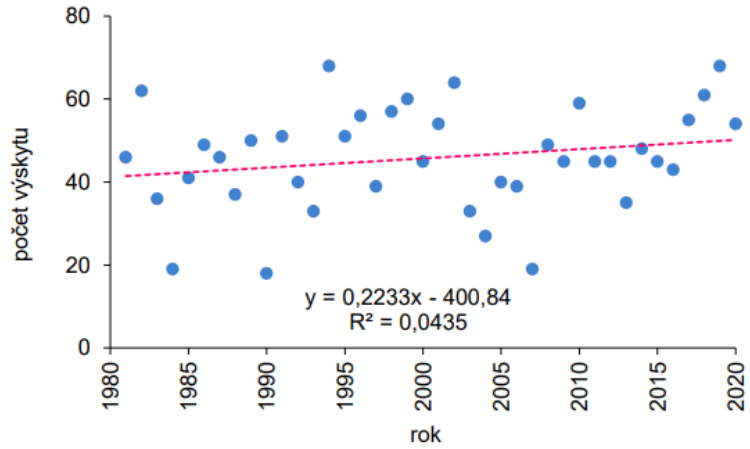


Fig. 6 Occurrence of sultry days in the period 1981–2020 for the station Hurbanovo.

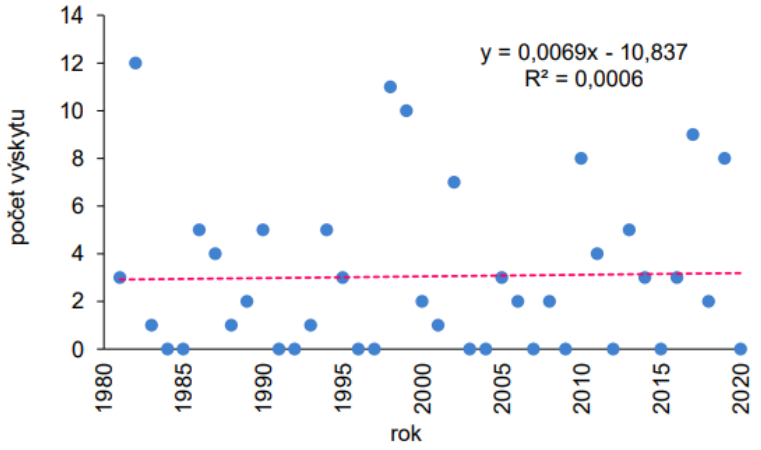


Fig. 7 Occurrence of strong and exhausting sultry days for the period from 1981 to 2020 for the station Hurbanovo

Comparison of sultriness occurrence (1981–2020) with the previous period (1951–1980)

Comparing the 1951–1980 period with the 1981–2020 period, we see that the number of days with sultry weather has in Hurbanovo increases by 1.9. Kveták's work (Kveták 1986) gives 43.9 days of sultry weather per year, and the last 40-year period shows us 45.8 days per year. With severe and debilitating sultriness, the situation is reversed. It decreases by −1.2 days. Previously it was 4.2 days per year, which is now 3.1 days per year for the 40-year period (Tab. 1).

Occurrence records

Extreme values of sultriness within the study period occurred mainly in 1987, 1998 and 2010, 2017, and most frequently in the months of July and August at 18:00 hours. The station recorded the highest value of the occurrence of sultriness when the water vapour pressure exceeded 29.65 hPa, which corresponded to an air temperature of 27.2 °C and 82% relative humidity. This record water vapour pressure occurred on 2 July 1987. Another extreme value (28.3 hPa) was recorded by the station at 85% relative humidity and an air temperature of 25.8 °C (Tab. 2).

Tab. 1 Comparison of the occurrence of sultriness 1981–2020) with the previous period (1951–1980) in Hurbanovo.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
	s dusným počasím (e ≥ 18,8 hPa)												
1951 – 1980	-	-	-	-	1,4	10,6	14,3	12,2	4,8	0,6	-	-	43,9
1981 – 2010	-	-	-	-	2,1	9,7	14,9	13,9	3,5	0,3	-	-	44,4
1981 – 2020	-	-	-	-	1,8	10,5	15,3	14,5	3,5	0,3	-	-	45,8
rozdiel 30 rokov	-	-	-	-	0,7	-0,9	0,6	1,7	-1,3	-0,3	-	-	0,5
rozdiel 40 rokov	-	-	-	-	0,4	-0,1	0,9	2,3	-1,3	-0,4	-	-	1,9
	so silným a vyčerpávajúcim dusnom (e ≥ 24,0 hPa)												
1951 – 1980	-	-	-	-	-	1,1	1,5	1,5	0,1	-	-	-	4,2
1981 – 2010	-	-	-	-	-	0,6	1,2	1,0	0,0	-	-	-	2,9
1981 – 2020	-	-	-	-	-	0,7	1,2	1,1	0,0	-	-	-	3,1
rozdiel 30 rokov	-	-	-	-	-	-0,5	-0,3	-0,5	-0,1	-	-	-	-1,3
rozdiel 40 rokov	-	-	-	-	-	-0,4	-0,3	-0,4	-0,1	-	-	-	-1,2

Maximum duration

The longest continuous duration of the sultriness was 155 h from 5:00 pm on August 22, 2019 to 3:00 am on August 29, 2019 (Tab. 3). At that time, the sultry weather in Hurbanova persisted for almost 6.5 days. The next maximum is 127 h on 9/7/1999 9:00–14/7/1999 16:00, 5/8/1999 19:00–10/8/1999 22:00; further in 2013 (114 h on 18/6/2013 18:00–23/6/2013 12:00). Also significant are the years with continuous duration of the shower, namely: 2002 (95 h on 30/07/2002 15:00–3/08/2002 14:00) and 2016 (89 h on 25/07/2016 20:00–29/07/2016 13:00. In 40 years, more than 50 cases of sultry weather with a duration longer than 24 h have been recorded in Hurbanova. The longest continuous duration of severe sultriness was 16 h from 19:00 on 15 July 2010 to 10:00 on 16 July 2010 (Tab. 4). The next maximum in this category lasted 14 h on 14 Aug 2010 21:00–15 Aug 2010 10:00 in the same year; then in 1987 (12 h on 2 Jul 1987 8:00–2 Jul 1987 19:00) and in 1999 (12 h on 9 Aug 1999 15:00–10 Aug 1999 2:00). Significant years with continuous duration of heavy rain are 1998 (11 h on 3/8/98 17:00–4/8/98 3:00), 1994 (9 h on 29/6/94 18:00–30/6/94 2:00) and 1999 (9 h on 7/8/99 9:00–7/8/99 17:00).

The most pleasant conditions for humans and animals

Almost all meteorological elements influence the stay of man in nature. The humidity of the air in conjunction with the temperature has a considerable influence on the organism. The most pleasant conditions for humans are those where the relative humidity is 50% and the air temperature is 16–18 °C (and where the other values are $9.1 \geq e \geq 10.3$ hPa). Both cold and heat are more easily tolerated in dry climates than in humid climates. Taking into account the precision of the relative humidity measurement and its variability, we extended the value to the interval $48 \leq r \leq 52\%$. The selected criterion defining very pleasant conditions for humans ($48 \leq r \leq 52\%$, $16 \leq t \leq 18$ °C) occurs in all months in Hurbanov except January. These results were obtained after processing data for 40 years (1981–2020). Very pleasant conditions occur most often in spring (April and May) and autumn (September and October) over the 40-year period. This is when there is an almost synchronous occurrence of peaks in daytime temperature (16–18 °C) and relative humidity (48–52%) abundance, e.g. around midday in April. In winter, very pleasant conditions are practically absent, as high relative humidity and low air temperatures prevail.

Tab. 2 Maximum values of sultriness for the period 1981 – 2020 at the meteorological station Hurbanovo.

dátum	čas	teplota vzduchu [°C]	vhkosť vzduchu [%]	tlak vodnej pary [hPa]
8-8-1981	18:00	23,6	0,94	27,44
19-7-1982	09:00	22,8	0,95	26,42
27-6-1983	17:00	23,0	0,93	26,18
12-7-1984	00:00	24,5	0,71	21,88
17-7-1985	08:00	22,8	0,84	23,36
18-6-1986	08:00	25,5	0,79	25,84
2-7-1987	10:00	27,2	0,82	29,65
2-9-1988	18:00	25,3	0,77	24,88
20-8-1989	19:00	23,6	0,84	24,52
30-6-1990	10:00	28,8	0,58	23,02
13-7-1991	19:00	24,2	0,90	27,24
2-8-1992	20:00	22,2	0,86	23,06
18-7-1993	12:00	22,4	0,91	24,70
29-6-1994	21:00	25,3	0,83	26,82
14-7-1995	20:00	21,6	0,97	25,07
15-7-1996	20:00	23,9	0,80	23,78
7-9-1997	12:00	20,1	1,00	23,57
3-8-1998	21:00	25,8	0,85	28,30
9-8-1999	21:00	25,1	0,85	27,14
14-8-2000	18:00	23,5	0,87	25,24
15-7-2001	08:00	30,2	0,61	26,24
16-7-2002	11:00	26,9	0,76	27,00
13-6-2003	18:00	27,2	0,60	21,69
25-7-2004	11:00	22,2	0,82	21,99
28-7-2005	06:00	24,8	0,78	24,47
26-6-2006	19:00	28,6	0,63	24,72
20-7-2007	17:00	33,2	0,42	21,42
15-8-2008	15:00	31,1	0,58	26,27
22-8-2009	17:00	23,7	0,81	23,79
15-8-2010	13:00	27,9	0,73	27,50
14-7-2011	23:00	23,5	0,90	26,11
25-7-2012	14:00	23,4	0,81	23,36
19-6-2013	19:00	29,9	0,63	26,64
18-7-2014	15:00	23,6	0,87	25,39
17-8-2015	13:00	24,4	0,76	23,28
25-7-2016	08:00	26,0	0,75	25,27
5-8-2017	03:00	23,8	0,93	27,47
3-8-2018	07:00	23,2	0,88	25,07
27-6-2019	11:00	32,6	0,55	27,12
15-8-2020	11:00	23,2	0,83	23,65

In summer, temperatures of 16–18 °C occur most often at night and relative humidity 48–52% around midday. This temporal discrepancy in the daily timing of these intervals of meteorological elements results in the sporadic occurrence of very pleasant conditions for humans in summer, which usually occur only under certain meteorological situations. The assessed criterion of very favourable conditions is defined by a relatively narrow range of air temperature and relative humidity, which results in relatively low frequencies of occurrence of this phenomenon compared to other similar criteria. Since 1981, very pleasant conditions have increased by 2.4 days in 40 years, as shown in tab. 5. In 30 years this has increased by 3.1 days. The average number of days per year for the period 1951–1980 was 19.2. For the period 1981–2020 it increased to 21.6 days. The table shows that these numbers decrease in August and October, i.e. the last examined period shows less pleasant conditions than in the previous period. The month of April shows the highest number of such pleasant days.

Tab. 3 10 longest periods with continuous duration of sultry weather for the period 1981–2020 for Hurbanovo.

	rok	počet hodín	počet dní	odkedy	dokedy
1.	2019	155	6,4	22-08-19 17:00	29-08-19 03:00
2.	1999	127	5,3	09-07-99 09:00	14-07-99 16:00
3.	2013	114	4,8	18-06-13 18:00	23-06-13 12:00
4.	2014	101	4,2	27-07-14 06:00	31-07-14 11:00
5.	2002	95	4,0	30-07-02 15:00	03-08-02 14:00
6.	2016	89	3,7	25-07-16 20:00	29-07-16 13:00
7.	1994	83	3,5	27-06-94 18:00	01-07-94 05:00
8.	2010	80	3,3	13-08-10 06:00	16-08-10 14:00
9.	2006	73	3,0	20-06-06 17:00	23-06-06 18:00
10.	2008	72	3,0	31-07-08 15:00	03-08-08 15:00

Tab. 4 10 longest periods with continuous duration of strong sultry weather for the period 1981–2020 for Hurbanovo.

	rok	počet hodín	počet dní	odkedy	dokedy
1.	2010	16	0,6	15-07-10 19:00	16-07-10 10:00
2.	2010	14	0,5	14-08-10 21:00	15-08-10 10:00
3.	1987	12	0,5	02-07-87 08:00	02-07-87 19:00
4.	1999	12	0,5	09-08-99 15:00	10-08-99 02:00
5.	1998	11	0,4	03-08-98 17:00	04-08-98 03:00
6.	1994	9	0,3	29-06-94 18:00	30-06-94 02:00
7.	1999	9	0,3	07-08-99 09:00	07-08-99 17:00

Tab. 5 Average number of days in Hurbanovo with very pleasant conditions.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
	s veľmi príjemnými podmienkami (48 ≤ r ≤ 52 %, 16 ≤ t ≤ 18 °C)												
1951 – 1980*	-	0,1	1,2	4	4,3	1,8	0,6	1,0	3,5	2,5	0,2	-	19,2
1981 – 2010	-	0,2	1,3	5,3	4,4	2,4	1,0	1,0	3,6	2,7	0,3	-	22,3
1981 – 2020	-	0,2	1,3	5,5	4,3	2,1	1,0	0,9	3,5	2,4	0,5	-	21,6
rozdiel 30 rokov	-	0,1	0,1	1,3	0,1	0,6	0,4	0,0	0,1	0,2	0,1	-	3,1
rozdiel 40 rokov	-	0,1	0,1	1,5	0,0	0,3	0,4	-0,2	0,0	-0,1	0,3	-	2,4

5. Discussion

The weather is constantly changing across the Earth and we are we have to adapt. Sometimes it makes life easier, but sometimes just the opposite. So it is with sultry weather. In the last few years of our century, the temperature has been rising continuously, and as the occurrence of sultry weather is related to the air temperature, the number of sultry days has also been increasing. Experts have not been studying sultry weather for long, although this state of the atmosphere has been present in the past. Nowadays, during the summer season, air-conditioning is used, which was rare twenty years ago and is now found in almost every shopping centre. The question arises, is air conditioning healthy for the human body? And what is the situation with sultriness? It has been mentioned many times that it is an unpleasant sensation when we do not feel well. The question arises as to how we can defend ourselves against it. In our opinion, adaptation measures could be implemented more widely in cities, for example, in the form of more vaulted showers in the streets, which blow water and air at the same time and under which people can walk and freshen up. This could be expanded

especially on asphalt surfaces. Unfortunately, we cannot escape the sultriness. And they don't have to be forty degrees Celsius right away, twenty-five is enough. With high humidity, sweat has nowhere to evaporate and the body can't cool itself. You can go in the water, but you go out and it's the same sweltering air again. The overworked body feels no relief. When it's sultriness, a thin, half-centimeter layer of air saturated with water vapor sticks over the skin and can't take in any more. You wait for the movement of the breeze as for a ready-made miracle. Even the slightest breeze is a refreshing gift because it blows away the vapor-saturated air and allows the body to let out more sweat (Čabajová 2011). Compared to the scientific work of Kvetak (1986), there were continuing developments rather than similarities. It can be seen that individual values shift to later periods. This can be clearly seen in the occurrence of sultriness, which shifts towards the month of August, whereas previously it was clearly the month of July. In recent decades, it has also been much more pronounced in the earlier autumn months, such as September and rarely October. However, on a day-to-day basis, we get similar results. Towards the limit of sultriness we have reached according to the Scharlau criterion and we have to note, that his classification only applies to climates in which Slovakia is located. In our latitudes the relative humidity depends significantly on the direction of the flow, the vegetation cover and the precipitation regime, the leeward effects, the presence of urban agglomerations or water areas. The potential evaporation (maximum possible under given meteorological conditions) depends on the relative humidity and air temperature. It is still sultriness in the equatorial region, where in places the water vapour pressure exceeds the above limit, sometimes even over 40 hPa (in our case it is exhaustive sultriness according to Scharlau's criterion). Periodic sultriness is in the subtropics in summer, especially in areas of monsoon rains. Episodic sultriness can occur in all other regions of the world except polar and high mountain areas, in Slovakia about 30% of days in summer (lowlands) and in 10% at 700 m a.s.l. (Lapin 2001). In the previous section we explained the spatial distribution of moisture characteristics in different parts of the world. We can add to this that mainly due to the change in air temperature in the last two decades, the incidence of sultriness has been increasing not only in our territory, but also in neighbouring countries such as Poland, Hungary and the Czech Republic (Zarnowiecki 2003). When characterizing sultry weather within the framework of bioclimatology, one sentence could be said to be: 'Sweat is, evaporation is not'. From the respiratory point of view, the ideal humidity is between 40–60%. If it is less than 40%, the mucous membranes dry out; if it is above 60%, the body risks overheating. Because of the high humidity, we cannot sweat normally, and one of the main functions of sweat is to cool the body. When the ambient temperature approaches the human body temperature (roughly 36 °C), our body starts to cool down. We start to sweat, blood circulation changes, breathing becomes faster.

However, the sweat cooling function only works if sweat evaporates from the skin. If the humidity is high, it will not be able to absorb the amount of liquid on the surface of the skin, so the sweat will not evaporate and our body will not be able to cool down. In addition, the lack of cooling effect leads to increased sweating and subsequent significant loss of fluids and mineral salts. High humidity not only worsens our comfort, but can also trigger serious health problems. Excessive sweating can cause the body's equilibrium to tip, and the continuous loss of fluids leads to thickening of the blood and lowering of blood pressure. Blood thickening is dangerous because it contributes to the formation of blood clots and blood clots can cause heart attacks, strokes, embolism, and blockage of blood vessels (Stvorecz 2014). In case of increased sweating, we lose not only liquid but also vital salts (*potassium*, *sodium* and *magnesium*). Their deficiency can cause arrhythmias. Less blood flows to the muscles, brain and other organs

when the body overheats, leading to impaired physical fitness and physical and mental fatigue. The severity of symptoms is influenced by the age and physical strength of the person concerned. Although the elderly are the most vulnerable, irresponsibility of the younger age group can often contribute to a more serious condition (e.g., performing heavy physical work in a warm, high-humidity environment). Heat-sensitive people with cardiovascular problems may be adversely affected by the sultry climate, so these people should avoid increased physical and mental exertion, burdensome foods and direct sunlight (Čabajová 2007). The increase in the average annual air temperature in Hurbanova has been the most pronounced in the last thirty years. Average annual air temperature for the period 1981–2010 reached 10.6 °C in Hurbanovo, an increase of 0.7 °C compared to the period 1951–1980 (Lieskovská 2017). In 2019 and also in 2018, the average annual temperature in Hurbanovo was 12.42 °C. This value is a record high for Hurbanovo in the entire history of measurements (Lieskovská 2020).

6. Conclusion

In the annual course of water vapour pressure in Hurbanovo (1981–2020) reaches its highest values in July (the previous 40-year period (1951–1980) also, (hereafter referred to as the previous period)) and coincides with the annual course of air temperature, which can be seen in tab. 5. In the daily water vapor pressure run at Hurbanovo (1981–2020), the maximum appears around 7:00 and 8:00 a.m. (previous period 9:00 a.m.) and the minor maximum around 19:00 and 20:00 h (previous period 21 h), minimum at 3:00 and 4:00 h (previous period 4:00–5:00 h) and a minor minimum at 15:00 and 16:00 h (previous period 17:00 h). In the period 1981–2020, the in Hurbanovo 16 952 h (previous period 11 607 h) with sultry weather ($e \geq 18{,}8$ hPa). In the daily run we recorded sultry weather at 8:00 h (949 times) (previous period 10:00 h (746 times)) and most rarely at 4:00 h (446 times) (previous period 5:00 (155 times). Fig. 5 informs us about the double daily progression of clock frequencies ($\sum$ h) with sultry weather and shows an analogous trend with the daily progression of water vapor pressure. We observed sultry weather ($e \geq 18.8$ hPa) in April–October (previous period May–October) and it can occur throughout the day (24 h). Sultry weather occurs most frequently in summer with peak abundances in July, when the probability of occurrence of hours with sultry weather reaches 35.7% (previous period 19.0%). The most frequent onset of sultry weather is between 7:00 and 9:00 am, with a minor peak of onsets between 7:00 and 9:00 pm, and sporadic occurrences during nighttime hours. A one-hour duration of sultry weather is most common. Opposite contrast, the longest continuous duration reached 155 h between 22 Aug 2019 17:00 and 29 Aug 2019 3:00 (Tab. 3). Sultry weather lasting more than 1 day occurs approximately once or twice per year. Continuous duration of severe sultry weather was manifested in 2010. At that time, the water vapour pressure in Hurbanova was continuously above 24.0 hPa for more than half a day (16 h) (Tab. 4).

Exhaustive sultry weather ($e > 0.5$ hPa) in Hurbanovo did not occur, the water vapour pressure only approached 30.50 hPa (29.65 hPa) in July 1987. In the previous period (1981–2020) this most burdensome category of sultriness lasted only a few hours at the time of the occurrence of the absolute maximum water vapour pressure (34.5 hPa). Fig. 7 mainly informs us about the evolution of the strongly sultry weather ($24.0 \leq e \leq 30.5$ hPa) in Hurbanova. We recorded strong sultry weather in the months of June to September, with peak abundances in July (previous period in August). The onset of severe sultry weather most often occurs between 8:00–9:00 h (previous period 10:00–12:00 h) and the minimum occurrence at night at 5:00 am. In 40 years in Hurbanova, there have been only 2 cases of severe sultriness with a duration longer than 12 h (previous period also). The longest duration of severe sultry weather was 16 h on 15–16 July 2010 (in the previous period it was 19 h on 19–20 August 1974). Of the total

number of sultry days in Slovakia, weak sultry weather is the most frequent, followed by strong sultry weather. Exhaustive sultriness did not occur, i.e. the water vapour pressure of 30.5 hPa line was not crossed, only approached it. The most frequent droughts occurred in July and August. Conversely, the lowest numbers of hours with sultry weather were found in the winter months: December, January and February + March and November. Within the seasons, sultriness was most frequent in summer (87.7%) in the month of July (33.3%), closely followed by the month of August (31.6%) with only a difference of 1.69%. In the autumn period, sultriness occurred much more frequently than in the spring. Autumn has recently been much warmer than spring (Pecho et al., 2018). Within the year, the warmer period does not begin until May, and does not end until late October. Sultry weather occurs in 8.19% in autumn and 4.04% in spring. This can be explained by the presence of singularities. These are deviations from the smooth (idealised) curve of the long-term annual behaviour of a meteorological element, mainly air temperature and atmospheric precipitation. In central Europe, the more significant singularities include the Medard weather, then Indian summer and Christmas warming. All of the above also influence the sultry weather. For example, Indian summer results in more sultry days occurring in autumn than in spring. The reason for the frequent occurrence of Indian summer is the extensive and temporally stable pressure high over central and southern Europe during this period. With little cloud there is a relatively large temperature amplitude of 15 to 18 °C, which means that nights are already cold, there may be ground frost or fog in the morning, but the afternoons are calm, sunny and pleasantly warm. In the first half of September, the sunshine is still so strong that the temperature rises up to 30 degrees in low cloud pressure. This is the so-called late summer. A typical Indian summer does not occur until the second half of September and the first half of October (Department of Climatological Service, 2018). Heat radiation is considered as one of the main causes of the occurrence of sultry weather in May, particularly because at that time the rise in radiation is already very high and the organism has not yet had time to adapt to these conditions. The most pleasant conditions for humans are those where the relative humidity is 50% and the air temperature is 16–18 °C (and where the other values are $9.1 \geq e \geq 10.3$ hPa) (Kveták 1986). Very pleasant conditions occur most often in spring (April and May) and autumn (September and October) over a 40-year period. In winter, very pleasant conditions are practically absent (17 h over a 40-year period) because high relative humidity and low air temperatures prevail. In summer, temperatures of 16–18 °C occur most often at night and relative humidity 48–52% around midday. Extremes occurred mainly in 1987, 1998, 2010 and 2017 and most frequently in July and August at 18:00. Maximum values are most likely to occur at 8:00–11:00 am and 6:00–7:00 pm. Conversely, they are most rare between 1:00 h and 2:00 h at dawn. It can be concluded that the occurrence of sultriness is also related to the ongoing climate change, as it has a similar trend to the air temperature. When the evolution of the occurrence of sultry days from 1981 to 2020 at the Hurbanovo station was investigated, it was found that the occurrence of sultry days is slightly increasing. A statistically insignificant increase was observed for heavy and exhausting sultry days.

In the past, larger extremes were less frequent, which is now becoming a natural part of the weather, especially summer weather. A similar increase in the number of weakly and strongly sultry days was also noted by Kveták (1986) in his work when processing the results from the previous period (1951–1980). The hypothesis was confirmed. The gradual increase in air temperature influences the more frequent occurrence of sultry weather in our area. Further research on these days in terms of bioclimatology will be needed (e.g., by using additional climatological elements such as wind strength in the processing). We will also focus research

on other bioclimatological indices to get a clearer picture in terms of thermal comfort of the organism.

References

BALÁŽOVIČOVÁ, L., 2015. Základy meteorológie a klimatológie pre geografov. Banská Bystrica: Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici Belianum, 149 s. (47–48), ISBN 978-80-557-0954-3.

BOCHNÍČEK, O., et al., 2015. Klimatický atlas Slovenska: Climate atlas of Slovakia. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav, ISBN 978-80-88907-91-6.

ČABAJOVÁ, Z., 2007. Bude teplo a dusno [online]. Bratislava: Petit Press, a. s., [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: https://primar.sme.sk/c/3336836/bude-teplo-adusno.html#ixzz5kWfpeWxs)/

ČABAJOVÁ, Z., 2011. Počasie ovplyvňuje aj choroby: Čo robiť, keď je teplo a zima [online]. Bratislava: News and Media Holding a. s. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://www.pluska.sk/izdravie/archiv/top-tema/pocasieovplyvnuje-aj-choroby-co-robit-ked-je-teplo-zima.html/

CHROMOV, S. P., 1968. Meteorológia a klimatológia. Bratislava: Slovenská akadémia vied, 453 s., 129–132, ISBN 71-056-68.

JOBBÁGY, J., 2013. Integrovaná stratégia miestneho rozvoja „mikroregión Hurbanovo“. Dostupné z: https://www.nesvady.sk/e_download.php?file=data/editor/79sk_1.pdf&original=ISMR_VSP_Hurbanovo.pdf

KOLESÁR, J., 1989. Humánna bioklimatológia a klimatoterapia. Martin: Osveta, 344 s. 46–56), ISBN 80-217-0006-8.

KVETÁK, Š., 1986. Výsušné a dusné počasie v Hurbanove. *Geografický časopis*, **38**, 1, 24–42.

LAPIN, M., TOMLAIN, J., 2001. Všeobecná a regionálna klimatológia. Bratislava: Univerzita Komenského, 2001, ISBN 80-223-1433-1.

LIESKOVSKÁ, Z., MIČUDA, J., et al., 2020. Správa o strave životného prostredia Slovenskej republiky v roku 2019. Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky, ISBN 978-80-8213-028-0. Dostupné z: https://www.enviroportal.sk/uploads/report/10661.pdf

LIESKOVSKÁ, Z., MIČUDA, J., et al., 2017. Správa o strave životného prostredia Slovenskej republiky v roku 2016. Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky, ISBN 978-80-8213-028-0. Dostupné z: https://www.enviroportal.sk/uploads/report/7043.pdf

MATVEEV, A. T., 1965. Osnovy obščej meteorologii. Fyzika atmosfery. Leningrad, 481 s. Mesto Hurbanovo. Oficiálna webstránka mesta Hurbanovo. Dostupné z: https://www.hurbanovo.sk/mestohurbanovo/

NOVÁKOVÁ, G., 2013. Štatistika pre geografov 1. 2. vyd. Bratislava: Geografika, 227 s. ISBN 978-80-89317-24-0.

Odbor Klimatologická služba. Singularity. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: http://www.shmu.sk/sk/?page=1637/

PECHO, J. et al., 2018. Klimatologické zhodnotenie roka 2017. *Meteorologický časopis*, **21**, 1, Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav, 55–61, ISSN 1335-339X.

SCHARLAU, K., 1943. Die Schwüle als Meßbare Größe. *Bioklimatische Beiblätter*, **10**, 19–23.

STVORECZ, A., 2014. Egyelőre feleslegesen izzadunk [online]. New wave media group kft., [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: https://www.origo.hu/egeszseg/20140804-tobbszempontbol-is-megterheli-szervezetunket-a-levegomagas-paratartalma.html/

ŠINGER, M., 2018. Slovenský hydrometeorologický ústav. Dusno a microbrust [online]. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav [cit. 2018-06-30]. Dostupné z: http://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=734/

ŠVEC, M., 2018. Dusné dni na Slovensku od roku 1951 [online]. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: http://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=532/

TRIZNA, M., 2012. Klimageografia a hydrogeografia. Bratislava: Geografika, 144 s (17), ISBN 978-80-89317-20-2.

WIEDERHOLD, R. P., 1997. Water Vapor Measurement: Methods and Instrumentation. CRC Press, 384 s., ISBN 9780824793197.

ZARNOWIECKI, G., 2003. Sultry Weather Characteristics in Kielce. [Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Climate], Poland: University of Kielce.

Rajonizace kategorií vybraných hydrometeorologických rizik
(Regionalisation of selected hydrometeorological risk categories)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.18

Radim Tolasz, Český hydrometeorologický ústav, radim.tolasz@chmi.cz
Veronika Šustková, Český hydrometeorologický ústav, veronika.sustkova@chmi.cz

Abstrakt: Pro analýzu rajonizace území Česka z pohledu rizikovosti a změn frekvence extrémních jevů byla připravena první sada „rizikových charakteristik“ popisujících vybrané kategorie nebezpečných jevů – horko, mráz, sucho, přívalové deště, bouře a požáry. Testováno na období 1991–2020 bylo zatím 12 charakteristik, některé z nich i pro více limitních hodnot. Například počet horkých dnů s maximální teplotou 34 °C a více pro limit 3 a 6 dní v průměru v daném období nebo průměrná denní maximální teplota v prodlouženém vegetačním období duben–říjen pro limit 21 °C apod.

Klíčová slova: rajonizace – extrémní jevy – scénář změny klimatu

Abstract: To analyse the regionalisation of the territory of the Czech Republic in terms of risk and changes in the frequency of extreme events, a first set of "risk characteristics" describing selected categories of hazardous events – heat, frost, drought, torrential rains, storms and fires – was prepared. So far 12 characteristics have been tested for the period 1991–2020, some of them for multiple thresholds. For example, the number of hot days with a maximum temperature of 34 °C or more for a limit of 3 and 6 days on average in a given period, or the average daily maximum temperature in the extended growing season April–October for a limit of 21 °C, etc.

Keywords: regionalisation – extreme events – climate change scenario

1. Úvod

Popis možných změn rizikovosti dopadů některých klimatických charakteristik ovlivněných změnou klimatu na území Česka v dalších desetiletích je přehledně uveden v tomto článku. V analýze je věnována pozornost mimo jiné intenzitě, plošnému rozsahu, délce trvání a frekvenci výskytu v jednotlivých sezónách pro vybrané charakteristiky průměrné, maximální a minimální teploty a pro srážky. Časové změny těchto vybraných charakteristik poslouží k rajonizaci ČR podle míry ohrožení jednotlivých oblastí z pohledu rizikovosti a změn frekvence nebezpečných jevů a adaptačních možností na ně s využitím dostupných GIS analýz. Nejprve je však nutné testovat použitelnost limitů vybraných pro jednotlivé charakteristiky na základě aktuálních dat popřípadě na základě požadavků odborné veřejnosti.

2. Data

Scénářová data byla připravena modelem ALADIN-CLIMATE/CZ. V článku je provedena analýza prvního scénáře projektu PERUN, který využil RCP8.5 (vysoké budoucí emisní) SSP scénář (SSP5-8.5). Tento typ společného socioekonomického vývoje (SSP5) je založen na předpokladu budoucího světa rychlého a neomezeného růstu ekonomické produkce a spotřeby energie. Druhým scénářem v projektu PERUN bude SSP2-4.5, který je někdy nazýván jako střední emisní scénář. Jednotlivé SSP scénáře jsou přehledně popsány v literatuře, například v pracích Meinshausen et al. (2020) nebo Riahi et al. (2017) a samozřejmě ve zprávách šestého hodnotícího cyklu IPCC (2022). V rámečku popisné srovnání těchto dvou SSPx scénářů.

SSP2	SSP5
Svět se ubírá cestou, na níž se sociální, ekonomické a technologické trendy výrazně neodchylují od historického vývoje. Rozvoj a růst příjmů probíhá nerovnoměrně, přičemž některé země dosahují relativně velkého pokroku, zatímco jiné zaostávají za očekáváním. Globální a národní instituce usilují o dosažení cílů udržitelného rozvoje, ale postupují pomalu. Environmentální systémy degradují, i když dochází k určitému zlepšení a celkově se snižuje intenzita využívání zdrojů a energie. Růst světové populace je mírný a ve druhé polovině století se zastaví. Příjmová nerovnost přetrvává nebo se zlepšuje jen pomalu a problémy se snižováním zranitelnosti vůči společenským a environmentálním změnám přetrvávají.	Tento svět stále více věří v konkurenční trhy, inovace a participativní společnosti, které mají přinést rychlý technologický pokrok a rozvoj lidského kapitálu jako cestu k udržitelnému rozvoji. Globální trhy jsou stále více integrovány. Rovněž se výrazně investuje do zdravotnictví, vzdělávání a institucí s cílem posílit lidský a sociální kapitál. Současně je snaha o hospodářský a sociální rozvoj spojena s využíváním hojných zdrojů fosilních paliv a zaváděním životního stylu náročného na zdroje a energii po celém světě. Všechny tyto faktory vedou k rychlému růstu světové ekonomiky, zatímco světová populace v 21. století dosáhne svého maxima a bude klesat. Lokální problémy životního prostředí, jako je znečištění ovzduší, jsou úspěšně zvládány. Existuje víra ve schopnost účinně řídit sociální a ekologické systémy, v případě potřeby i pomocí geoinženýrství.

Z modelových výstupů byly pomocí bias korekcí (Räty 2014) připraveny časové řady klimatologických prvků, které byly využity pro první výpočty vybraných indexů (tab. 1) pro jednotlivá dvacetiletá období od 2021–2040 do 2081–2100. Stejné indexy byly vypočteny i pro aktuální normálové období 1991–2020. Pro aktuální klima (uvedené normálové období) byly v jednotlivých indexech spočteny vybrané percentily, podle kterých byly určeny testovací limity rizikovosti daného indexu. První odhady považovaly za rizikové takové hodnoty indexů, které byly menší než 20. nebo větší než 80. percentil. Tyto teoretické limity musely být poté podle aktuálních a scénářových dat upraveny tak, aby bylo možné získat smysluplné hodnoty pro analýzy. Aktuálně použité limity jsou rovněž uvedeny v tab. 1.

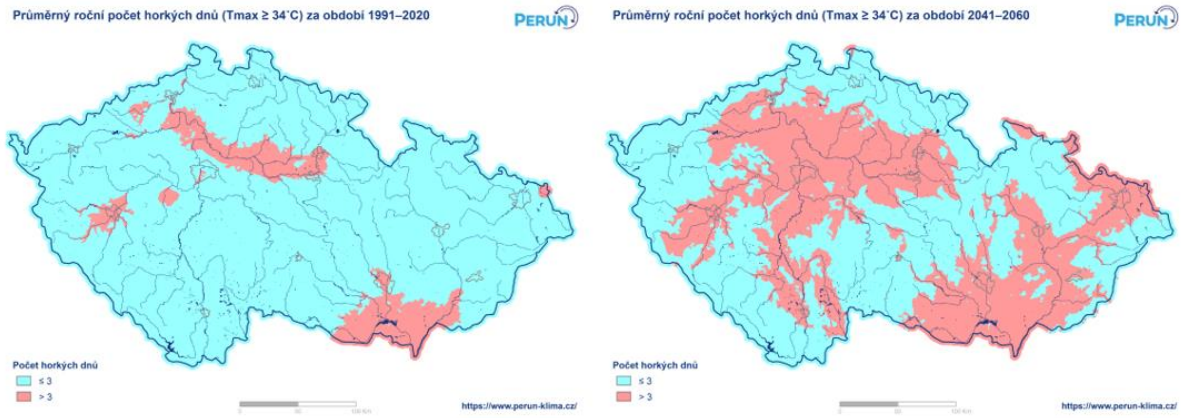
Tab. 1 Definice použitých indexů a možné hranice jejich rizikovosti.
Tab. 1 Definitions of the indices used and possible limits of their riskiness.

Index	Charakteristika	Limity
Počet horkých dnů	Tmax >= 30 ˚C	15 dní / rok
	Tmax >= 34 ˚C	3, 6 dní / rok
Počet letních dnů	Tmax >= 25 ˚C	60 dní / rok
Počet tropických nocí	Tmin >= 20 °C	4 noci / rok
Počet dní s horkou vlnou	Tmax >= 30 °C / 3 dny	10, 15 dní / rok
Počet horkých vln	Tmax >= 30 °C / 3 dny	2, 4 vlny / rok
Počet ledových dnů	Tmax < 0˚C	50 dní / rok
Denní maximální teplota ve vegetačním období IV–X	AVG	Průměr nad 21 °C
Počet dní bez srážek při vyšších teplotách	SRA = 0 mm, TMI > 5 °C	100 dní / rok
Počet dní se srážkou nad limit	SRA >= 20 mm	6 dní / rok
Počet dní se silným větrem	F > 10 $m \cdot s^{-1}$	6 dní / rok

3. Metoda

Vypočtené indexy podle tab. 1 byly pro aktuální klima (1991–2020) i pro jednotlivá scénářová dvacetiletí jsou pomocí desktopová verze systému ArcGIS od firmy Esri (ESRI 2020) interpolovány metodou ClidataDEM pro tvorbu rastrových map (Stříž 2008), která je součástí databázové aplikace CLIDATA (Tolasz 2009). Tato interpolační metoda zohledňuje vliv nadmořské výšky (případně orientace a sklonitosti svahů nebo krajinného pokryvu) na interpolovanou charakteristiku a zachovává původní hodnotu ve známém bodě.

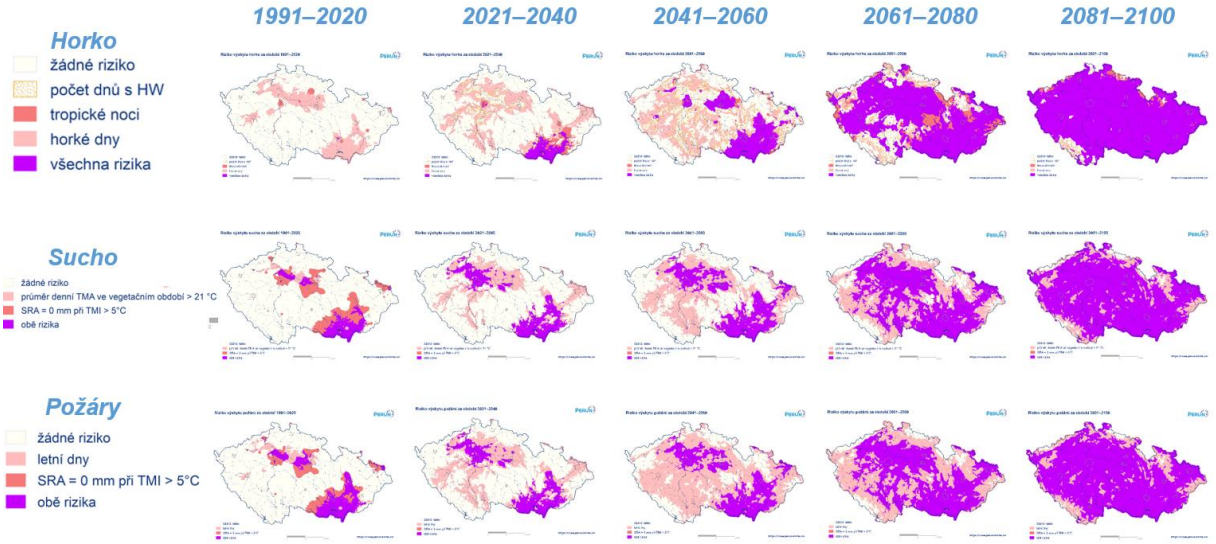
Nejprve byly připraveny mapy pro všechny kombinace navržených indexů a limitů, které byly upraveny tak, aby výsledek interpolace pro území Česka ukazoval použitelné výsledky. Příklad map pro počet horkých dnů s limitní maximální teplotou 34 °C nebo vyšší je uveden na obr. 1. Zobrazené plochy ukazují oblasti s průměrným počtem dní za uvedené období vyšším než 3 dny (oranžová), které jsou v tomto výstupu považovány za riziko. Modrá barva ukazuje oblasti, které tohoto rizika nedosahují, mají v průměru 3 a méně horké dny s maximální teplotou nad 34 °C.



Obr. 1 Příklad mapového výstupu pro horké dny (Tmax >= 34 °C), limit 3 dny, pro období 1991–2020 a 2041–2060.
Fig. 1 Example map output for hot days (Tmax >= 34 °C), limit 3 days, for the period 1991–2020 and 2041–2060.

Takto získané rizikové oblasti byly pro jednotlivá rizika a vybraný limit spojeny v obdobích do jedné mapy zobrazující území dotčené příslušným rizikem (například letní dny nebo období beze srážek při vyšší teplotě) a zároveň území „zasažená“ více jednotlivými riziky sdruženými do kategorie horko, sucho a požáry takto:

- Horko
  - počet dnů s horkou vlnou,
  - počet tropických nocí a
  - počet horkých dnů.
- Sucho
  - průměr maximální teploty vyšší než 21 °C a
  - počet dní s minimální teplotou nad 5 °C a žádné srážky.
- Požáry
  - počet letních dnů a
  - počet dní s minimální teplotou nad 5 °C a žádné srážky.



Obr. 2 Sdružená rizika pro horko, sucho a požáry v jednotlivých obdobích.
Fig. 2 Combined risks for heat, drought and fire in different seasons.

4. Závěr

Prvotní analýzy ukazují, že bias korigovaná data jsou pro další zpracování dobře připravena, výsledky odpovídají očekáváním. Je samozřejmě nutné připravit stejné zpracování i pro střední emisní scénář a výsledky srovnat. Stejně tak bude ještě probíhat diskuse o zařazení jednotlivých rizik do sdružených kategorií, bude nutné doplnit některé další indexy založené na rychlosti větru a vlhkosti pro kategorie sucho a požáry.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

ESRI, 2020. Documentation. [online]. [cit. 20. 10. 2023]. Dostupné z: https://desktop.arcgis.com/en/documentation/

IPCC, 2022. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. https://doi.org/10.1017/9781009157926.001

MEINSHAUSEN, M., et al., 2020. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci. Model. Dev.*, **13**(8), 3571–3605. https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020

RÄTY, O., RÄISÄNEN, J., YLHÄISI, J. S., 2014. Evaluation of delta change and bias correction methods for future daily precipitation: intermodel cross-validation using ENSEMBLES simulations. *Clim Dyn*, **42**, 2287—2303. https://doi.org/10.1007/s00382-014-2130-8

RIAHI, K., et al., 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change, Vol.*, **42**, 153–168, ISSN 0959-3780. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

STŘÍŽ, M., 2008. Popis metod CLIDATA-GIS [online]. [cit. 20. 10. 2023]. Dostupné z: http://www.infomet.cz/fil/1295510217.pdf

TOLASZ, R., 2009. Database Processing of Climatological Data. Praha: Czech Hydrometerological Institute, 66 pp., ISBN 978-80-86690-68-1.

Změny v četnosti výskytu a intenzity vybraných extrémních meteorologických jevů vedoucích k rizikům na území ČR mezi obdobím 1961–1990 a 1991–2020

(Changes in the Frequency and Intensity of Selected Extreme Meteorological Phenomena Leading to the Risk in the Czech Republic between the Period 1961–1990 and 1991–2020)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.19

Anna Valeriánová, Český hydrometeorologický ústav, anna.valerianova@chmi.cz

Abstrakt: Zpráva Evropské agentury pro životní prostředí (EEA) „Europe's changing climate hazards – an index-based interactive EEA report“ definuje pro oblast Evropy 16 rizik spojených se změnou klimatu, které jsou přiřazené k 6 typům rizik dle identifikace Mezivládního panelu pro změnu klimatu (IPCC) v Šesté hodnotící zprávě. Z uvedených oblastí jsou pro území České republiky relevantní rizika spojená s výskytem extrémní teploty vzduchu a změnami průměrné teploty vzduchu, změny srážkového režimu a výskyt extrémních srážek, výskyt sucha, výskyt počasí vhodného pro vznik požárů, změny v proudění vzduchu a výskyt extrémního větru, změny sněhové pokrývky. V příspěvku se zaměříme na hodnocení změn výskytu extrémně vysoké teploty vzduchu a extrémního větru na území ČR mezi obdobím 1961–1990 a 1991–2020. Budeme analyzovat změnu četnosti výskytu těchto jevů, vyhodnotíme jejich trend a intenzitu.

Klíčová slova: extrémně vysoká teplota vzduchu – vlna veder – extrémní vítr

Abstract: The European Environment Agency (EEA) report "Europe's changing climate hazards – an index-based interactive EEA report" defines 16 climate change risks for Europe, which are assigned to the 6 types of risk identified by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in the Sixth Assessment Report. Of the above-mentioned areas, the relevant risks for the territory of the Czech Republic are associated with the occurrence of extreme air temperature and changes in average air temperature, changes in precipitation regime and occurrence of extreme precipitation, occurrence of drought, occurrence of weather suitable for fires, changes in air flow and occurrence of extreme wind, changes in snow cover. In my contribution, I focus on assessment of changes in the occurrence of extremely high air temperature and extreme wind in the Czech Republic between 1961–1990 and 1991–2020. The changes in the frequency of occurrence of these phenomena have been evaluated and the trend and intensity studied.

Key words: extreme air temperature – heat waves – extreme wind speed

1. Úvod

Vyhodnocení změn v četnosti výskytu hydrometeorologických jevů vedoucích k vzniku rizika je důležité pro tvorbu adaptačních opatření vůči skutečné nebo předpokládané změně klimatu a jejím dopadům.

Období s extrémně vysokou teplotou vzduchu představují zátěž pro živé organizmy, jsou náročná pro sektor energetiky a bývají spojená s dalšími riziky – dlouhotrvající období s vysokou teplotou vzduchu bývají doprovázena obdobím sucha, což může vést k nedostatku vody, případně ve spojení s dalšími meteorologickými podmínkami mohou vést k vyššímu nebezpečí vzniku požárů. Větrné bouře se významnou měrou podílejí na škodách způsobených přírodními živly (Hov et al. 2013).

2. Data

Pro hodnocení četnosti a intenzity výskytu extrémně vysoké teploty vzduchu a extrémního větru byla využita data denní maximální a minimální teploty vzduchu a denní maximální rychlosti větru naměřená na stanicích ve správě ČHMÚ za období 1961–2020. Tato data jsou archivována v klimatologické databázi CLIDATA a prošla všemi stupni kontroly.

Pro zpracování indexů charakterizujících výskyt extrémně vysoké teploty vzduchu byla využita data denní maximální a minimální teploty vzduchu ze stanic, které za období 1961–2020 pozorovaly alespoň 50 let (102 stanic). Do zpracování prostorového rozložení počtu dní s maximální a minimální teplotou vzduchu nad stanovenou mez vstupovala data ze stanic, které za období 1961–1990 (1991–2020) měly dostupná data za alespoň 26 let. S ohledem na nižší dostupnost dat měření rychlosti větru byla do hodnocení extrémního větru za období 1961–2020 použita data pouze z 24 stanic s dobou měření 40 let a více.

3. Metoda

Pro hodnocení výskytu extrémně vysoké teploty vzduchu byly použity následující indexy:

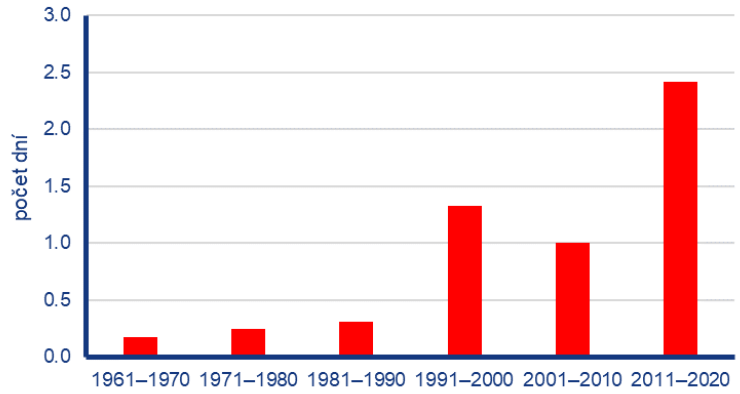
- Počet dní s maximální denní teplotou vzduchu alespoň 34 °C (dále označené jako *TMA34*). Limit 34 °C odpovídá II. stupni nebezpečí pro výstrahy na výskyt velmi vysokých teplot v rámci Systému integrované výstražné služby.
- Počet dní s minimální denní teplotou vzduchu alespoň 20 °C (dále označené jako *TMI20*). Tyto dny jsou označovány jako dny s tropickou nocí, vyskytují se zejména v průběhu horkých vln.
- Počet a délka trvání vln vedra: Pro extrémní vlny veder, tzv. heat waves, byla použita definice vlny veder (horké vlny) jako období, kdy maximální denní teplota vzduchu dosáhla alespoň 30 °C po dobu aspoň 3 po sobě jdoucích dnů.
- Pro hodnocení změn v četnosti výskytu extrémního větru jsme vycházeli z doporučení WMO, podle kterého mezi nebezpečné meteorologické jevy je zařazen vítr dosahující rychlosti od 17,2 $m \cdot s^{-1}$ (tj. vítr od 8. stupně Beaufortovy stupnice). Hodnocen byl počet dní s denní maximální rychlostí větru 17 $m \cdot s^{-1}$.

Pro jednotlivé stanice byly vypočteny základní klimatologické charakteristiky (průměrný a maximální počet dní), pro hodnocení trendu byl dle doporučení (Tank et al. 2009) spočten průměr pro ČR ze stanic, které pozorovaly celé období 1961–2020 bez přerušení. Trend byl stanoven lineárním regresním modelem využívajícím k odhadu parametrů metodu nejmenších čtverců. Statistická významnost trendu byla testovaná pomocí Mann–Kendallova testu pro hladinu významnosti 5 %.

4. Rizika spojená s extrémně vysokou teplotou

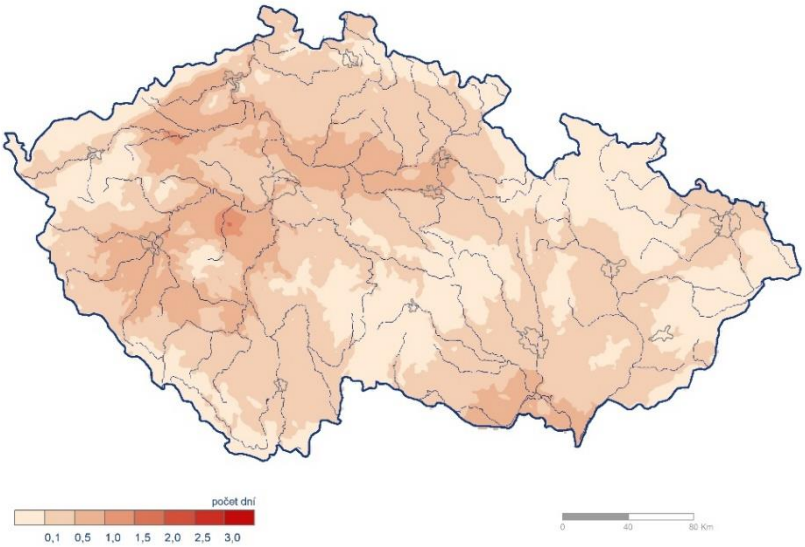
4.1 Dny s maximální teplotou vzduchu alespoň 34 °C

Dny *TMA34* se na území ČR v období 1961–2020 vyskytovaly zejména v letních měsících června až srpnu, ojedinělý výskyt byl zaznamenán koncem května a na začátku září. Oblasti s nejvyšším průměrným počtem dní *TMA34* se nacházejí na jihu Moravy a v oblasti Polabské nížiny, v Praze, Plzni a jejich okolí, téměř se nevyskytují ve vyšších a horských polohách. Vyšší počty těchto dní jsou pozorovány v období od 90. let minulého století (obr. 1).

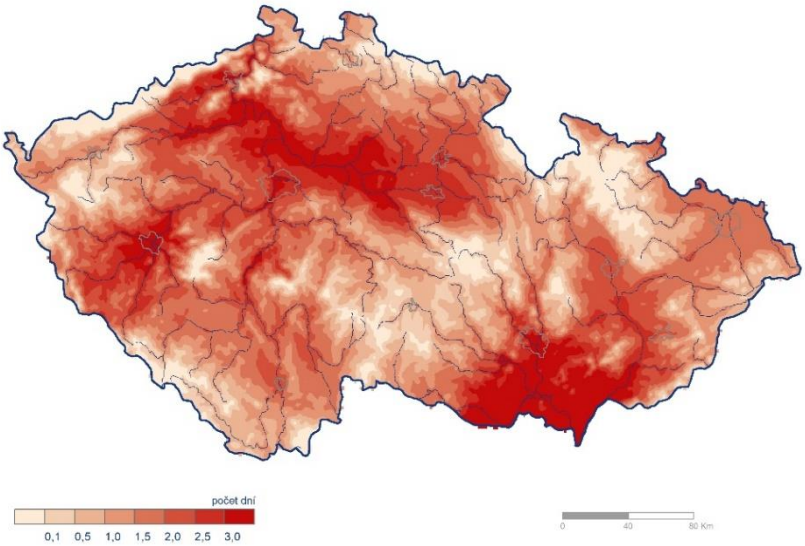


Obr. 1 Průměrný roční počet dní TMA34 na území ČR za jednotlivé dekády v období 1961–2020.
Fig. 1 Annual average number of TMA34 days over the CZ for decades for the period 1961–2020.

Průměrný roční počet dní *TMA34* pro území ČR v období 1961–1990 činí 0,3 dne s maximem ročního průměru 1,5 dne (rok 1983). V období 1991–2020 potom průměrný roční počet těchto dní činí 1,6 dne s maximem 10,4 dne (rok 2015). Nárůst průměrného ročního počtu dní *TMA34* mezi těmito obdobími činí ca 1,4 dne, v nižších polohách 2 dny. Statisticky významný trend nárůstu počtu dní *TMA34* v období 1961–2020 je pozorován pro červenec a rok. Hodnota tempa růstu ročního počtu dní *TMA34* dosahuje 0,39 dne za 10 let.



Obr. 2 Průměrný roční počet dní TMA34 za období 1961–1990.
Fig. 2 Average annual number of the TMA34 days for the period 1961–1990.

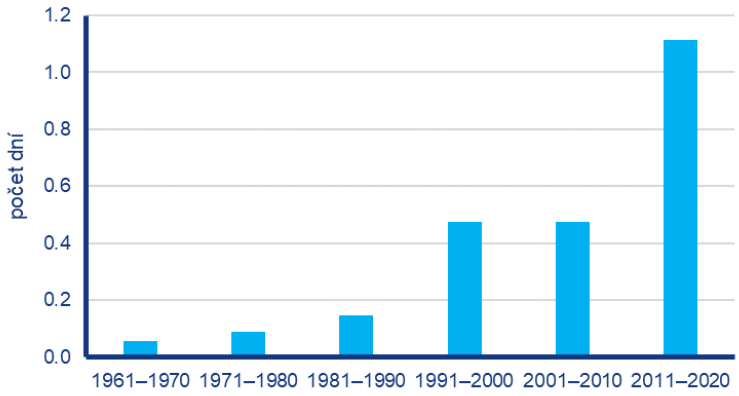


Obr. 3 Průměrný roční počet dní TMA34 za období 1991–2020.
Fig. 3 Average annual number of the TMA34 days for the period 1991–2020.

4.2 Dny s tropickou nocí (minimální teplota vzduchu alespoň 20 °C)

Dny *TMI20* se nejčastěji na území ČR v období 1961–2020 vyskytovaly v letních měsících červnu až srpnu, méně častý výskyt byl zaznamenán i v květnu a září. Výskyt dní *TMI20* je poměrně vzácný, převážně se roční počty těchto dní pohybují v závislosti od mikroklimatu stanice od 0 do 10 dní, vyšší počty tropických nocí se vyskytují ve větších městských aglomeracích. Na stanici Praha, Klementinum počet tropických nocí dosáhl v roce 2015 až 27 dní.

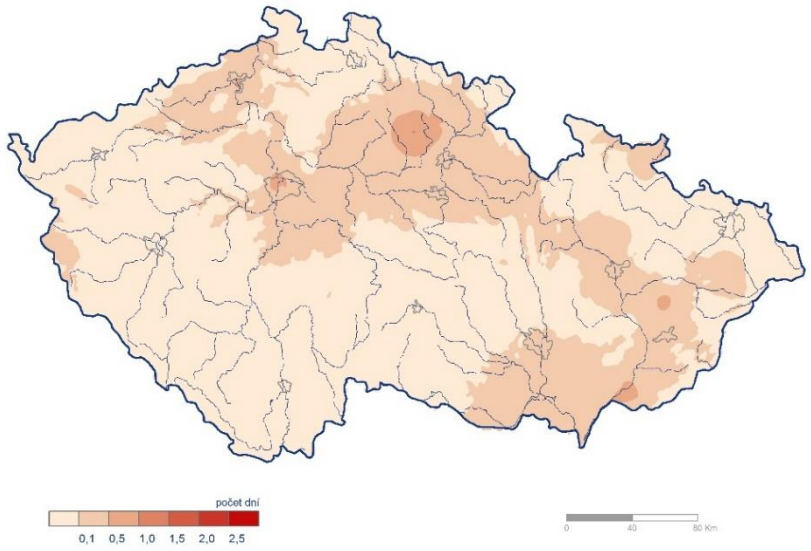
Na obr. 4 je patrný značný nárůst počtu tropických nocí na území ČR v poslední dekádě 2011–2020.



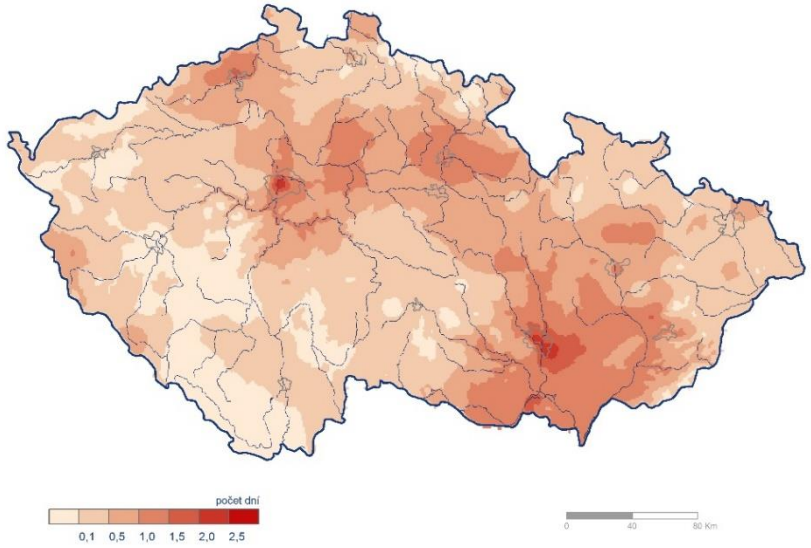
Obr. 4 Průměrný roční počet dní TMI20 na území ČR za jednotlivé dekády v období 1961–2020.
Fig. 4 Annual average number of TMI20 days over the CZ for decades for the period 1961–2020.

Průměrný roční počet dní *TMI20* na jednotlivých stanicích v období 1961–1990 činí 0,1 dne s maximem ročního průměru 0,4 dne (rok 1983). V období 1991–2020 potom roční průměr činí 0,7 dne s maximem 3,7 dne (rok 2015). Nárůst průměrného ročního počtu dní TMI20 mezi těmito obdobími činí ca 0,5 dne, ve velkých městech dosahuje 2 dny (Praha, Klementinum).

Statisticky významný trend u počtu dní *TMI20* v období 1961–2020 je pozorován pro červenec, srpen a rok. Hodnota tempa růstu ročního počtu dní *TMI20* dosahuje 0,18 dne za 10 let.



Obr. 5 Průměrný roční počet dní TMI20 za období 1961–1990.
Fig. 5 Average annual number of the TMI20 days for the period 1961–1990.

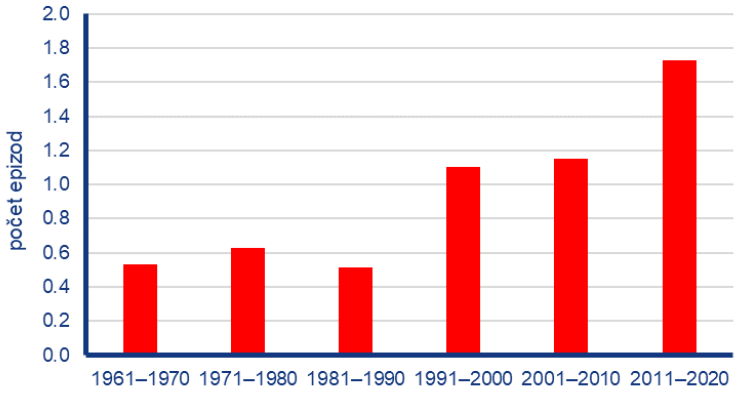


Obr. 6 Průměrný roční počet dní TMI20 za období 1991–2020.
Fig. 6 Average annual number of the TMI20 days for the period 1991–2020.

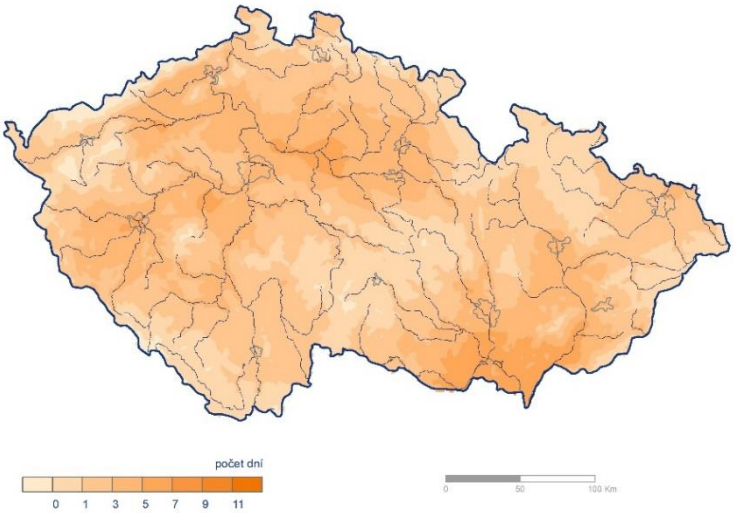
4.3 Extrémní vlny vedra

Vlny vedra se nejčastěji na území ČR v období 1961–2020 vyskytovaly v letních měsících červnu až srpnu, méně často v květnu a září. Vyšší výskyt vln vedra pozorujeme v nižších polohách na jihu Moravy, v Polabské nížině a v Poohří. Vlny vedra dle použité definice nebyly zaznamenány v horských polohách nad 1000 m n. m. V období 1991–2020 byl zaznamenán vyšší výskyt epizod vln vedra než v období 1961–1990 (obr. 7), prodlužuje se také doba trvání jednotlivých epizod. Zatímco v období 1961–1990 byl průměrný roční počet epizod vln vedra

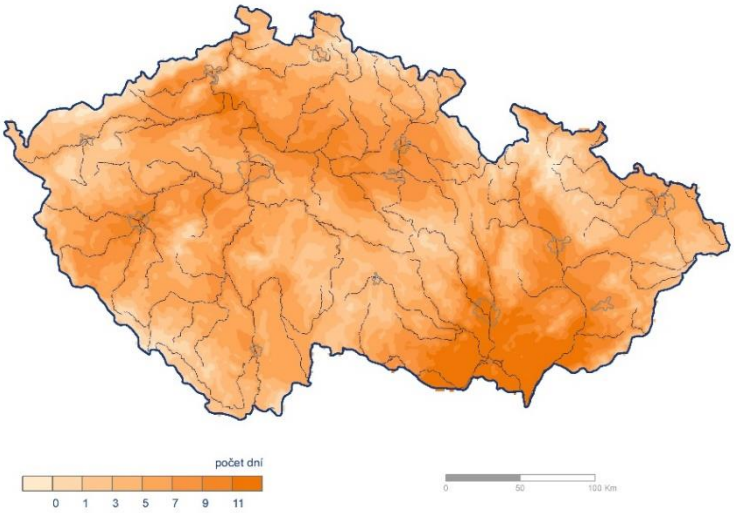
pro území ČR 0,6 epizody a průměrný roční počet dní s vlnou vedra činil 2,3 dne (v letech 1977 a 1980 nebyla vlna vedra zaznamenána), v období 1991–2020 byl průměrný roční počet epizod 1,3 a průměrný roční počet dní s vlnou vedra činil 6 dní. V období 1961–1990 bylo 55 % vln vedra v délce trvání 3 dny, 28 % epizod vln vedra mělo délku trvání 4 dny, 5 a více dní trvalo 17 % epizod. Nejdelší epizoda v roce 1976 trvala 10 dní. V období 1991–2020 mělo délku trvání 3 dny 49 % vln vedra, 24 % epizod trvalo 4 dny a zbytek epizod (27 %) mělo délku trvání 5 a více dní. V roce 1994 dosáhla maximální délka trvání vlny vedra na jižní a střední Moravě 17 až 19 dní a v roce 2018 17 až 18 dní.



Obr. 7 Průměrný roční počet epizod vln vedra na území ČR za jednotlivé dekády v období 1961–2020.
Fig. 7 Annual average number of heat waves episodes over the CZ for decades for the period 1961–2020.



Obr. 8 Průměrný roční počet dní v epizodách vln vedra za období 1961–1990.
Fig. 8 Annual average number of days in heat waves epizodes for the period 1961–1990.

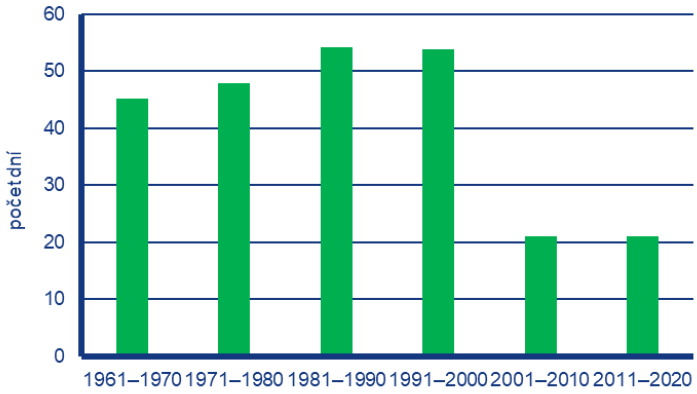


Obr. 9 Průměrný roční počet dní v epizodách vln vedra za období 1991–2020.
Fig. 9 Annual average number of days in heat waves epizodes for the period 1991–2020.

5. Rizika spojená se změnou proudění

5.1 Dny s maximální rychlostí větru 17 m·s^{-1} a více

Pro stanice s nadmořskou výškou do 700 m n. m. se průměrný roční počet dní s maximální rychlostí větru 17 m·s^{-1} a více pohybuje nejčastěji mezi 10 až 60 dny. Vyšší četnost těchto dní pozorujeme u horských stanic, kdy se v závislosti na poloze stanice pohybuje nejčastěji mezi 40 až 120 dny. V období od druhé poloviny 90. let minulého století je pozorován výrazný pokles počtu dní s maximální rychlostí větru 17 m·s−1 a více (obr. 10).



Obr. 10 Průměrný počet dní s maximální rychlostí větru 17 m·s^{-1} a více na území ČR za jednotlivé dekády 1961–2020 (stanice do 700 m n. m.).
Fig. 10 Annual average number of days with maximum wind speed over 17 m·s^{-1} over the CZ for decades for the period 1961–2020 (only stations with altitude up to 700 m a.s.l.).

6. Závěr

V období 1991–2020 pozorujeme na území ČR nárůst počtu dní s extrémně vysokou teplotou vzduchu v porovnání s obdobím 1961–1990, prodlužuje se délka epizod vln vedra. V poslední dekádě 2011–2020 byl pozorován výrazný nárůst výskytu tropických nocí. Výsledky

zpracování dní s maximální rychlostí větru nad stanovenou mez jsou v souladu s pozorovaným poklesem průměrné rychlosti vzduchu na území ČR na začátku 90. let minulého století (Brázdil et al. 2009). Při interpretaci těchto výsledků je nutné zahrnout vliv změn v pozorování a měření rychlosti větru, které souvisí s automatizací staniční sítě ČHMÚ.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

BRÁZDIL, R., CHROMÁ, K., DOBROVOLNÝ, P., TOLASZ, R., 2009. Climate fluctuations in the Czech Republic during the period 1961–2005. *Int. J. Climatol.*, **29**(2), 223–242. https://doi.org/10.1002/joc.1718

HOV, Ø., et al., 2013. Extreme Weather Events in Europe: preparing for climate change adaptation. Norwegian Meteorological Institute, ISBN 978-82-7144-100-5.

TANK, A., ZWIERS, F., ZHANG, XUEBIN, 2009. Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation. WMO-TD No. 1500, 2009.

Detekce trendu v časových řadách hydrometeorologických veličin: vizuální dojmy a statistické poznatky

(Trend detection in time series of hydrometeorological variables: visual impressions and statistical insights)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.20

Radek Vlnas, Český hydrometeorologický ústav, radek.vlnas@chmi.cz

Abstrakt: Cílem příspěvku je na sadě malých povodí ve Frýdlantském výběžku ukázat: (i) jak různé verze Mann-Kendallova testu detekují existenci trendu v časových řadách srážek, teploty a relativní vlhkosti vzduchu, sněhové vodní hodnoty a průtoku), (ii) jak se opticky liší vizuální vnímání trendu v časové řadě od statistického testu, (iii) nakolik zavádějící je určení trendu metodou nejmenších čtverců oproti statistickému testu. Přestože se jedná o geograficky příbuzná povodí s podobným režimem tvorby odtoku, analýza trendu ukázala překvapivou rozmanitost.

Klíčová slova: trend – autokorelace

Abstract: The aim of the paper is to show on a set of small catchments in the Frýdlant area: (i) how different versions of the Mann-Kendall test detect the existence of a trend in the time series of precipitation, air temperature, relative air humidity, snow water values and discharge), (ii) how the visual perception of a trend in the time series differs from the statistical test, (iii) how misleading the least squares method is in determining a trend compared to the statistical test. Although these are geographically related catchments with similar runoff generation regimes, the trend analysis showed a surprising diversity.

Keywords: trend – autocorrelation

1. Úvod

Mann-Kendallův test je často používán pro analýzu trendu v datových sadách environmentálních systémů (Kendall 1975; Libiseller a Grimvall 2002). Jedná se o test neparametrický, který nepředpokládá normalitu dat a není citlivý vůči odlehlým hodnotám a nelineárním trendům nízkého stupně. Test lze použít v případech, kdy je v datových sadách předpokládána spojitá monotónní rostoucí nebo klesající funkce času a rezidua rozložení s nulovou střední hodnotou. Jinými slovy za předpokladu, že rozptyl rozložení je v čase konstantní.

Von Storch (1995) ukázal, že přítomnost autokorelace v časové řadě zvyšuje pravděpodobnost, že Mann-Kendallův test detekuje statisticky významný trend, tzn. že autokorelace zvyšuje pravděpodobnost chyby I. typu. Funkce omezující vliv autokorelace obsahuje např. balík *zyp* (Bronaugh et al. 2023) v prostředí R (R Core Team 2020), a to metodou podle Zhang et al. (2000) nebo podle Yue et al. (2002). Porovnání obou metod je jedním z cílů příspěvku.

2. Data

K hodnocení trendu byly použity časové řady měsíčních a ročních srážkových úhrnů, vodní hodnoty sněhu, teploty a relativní vlhkosti vzduchu, měřených a přirozených průtoků pro povodí a mezipovodí vodoměrných stanic Lužické Nisy a Smědé (Vlnas 2023). Průtoky jsou k dispozici za období evidence ovlivnění průtoků, tzn. 1979–2021 (43 let), ostatní veličiny od roku 1971 (51 let). Z důvodu kompatibility výsledků bylo šetření trendu provedeno na stejných řadách, tzn. na období 1980–2021 (42 let).

Trend byl šetřen zejména v mezipovodích vodoměrných stanic 320000m Lužická Nisa-Hrádek n. Nisou a 326000m Smědá-Předlánce. Za účelem ověření výsledků pak také v celých povodích 3200000 Lužická Nisa-Hrádek n. Nisou a 326000 Smědá-Předlánce a v souvisejících povodích horních částí toků 316000 Lužická Nisa-Liberec, 323000 Smědá-Frýdlant v Čechách a v povodích přítoků 319000 Jeřice-Chrastava, 323100 Řasnice-Frýdlant v Čechách a 325000 Bulovský potok-Předlánce.

Mezipovodí Lužické Nisy nad Hrádkem nad Nisou:

320000m Lužická Nisa – Hrádek n. Nisou (320000 – 316000 – 317000 − 319000)

- 316000 Lužická Nisa – Liberec
- 317000 Černá Nisa – Stráž. N. Nisou
- 319000 Jeřice – Chrastava

Mezipovodí Smědé nad Předlánci:

326000m Smědá – Předlánce (326000 – 323000 – 323100 – 325000)

- 323000 Smědá – Frýdlant v Čechách
- 323100 Řasnice – Frýdlant v Čechách
- 325000 Bulovský potok – Předlánce

Specifickou datovou sadu pak představuje soubor účelového pozorování ČGS v zájmové oblasti, sledující průtoky na drobných příhraničních vodotečích v období 1997–2022 (26 let): Oldřichovský p., Václavický p., Vítkovský p., Heřmanický p., Minkovický p., Višňovský p. a Saňský p. Vzhledem ke kvalitě a spojitosti pozorovaných řad lze však za spolehlivé považovat pouze řady průtoku z Václavického, Vítkovského a Višňovského potoka.

Statistická významnost trendu byla testována na hladině významnosti α = 0,05 a α = 0,10. Do hodnocení byly zahrnuty pouze statisticky významné trendy. Výsledný trend sledovaných veličin je uváděn jako průměrná změna za desetileté období. V grafech jsou okrovou barvou vyznačeny časové řady s trendem z bilančního hlediska negativním, modře s trendem pozitivním. Z bilančního hlediska negativním trendem se rozumí pokles srážek, průtoku, zásob vody ve sněhu a relativní vlhkosti vzduchu a naopak vzestup teploty vzduchu. Slabou čarou je vyznačen statisticky méně významný trend (α = 0,10), silně pak statisticky významný trend (α = 0,05). Daty je proložena střední hodnota (šedá) a přímka trendu (černá).

3. Metoda

Existence a velikost trendu byla šetřena pomocí neparametrického Mann-Kendallova testu a Theil-Senova odhadu směrnice trendu v prostředí R (R Core Team, 2020).

Nulová hypotéza testu H_0 je, že pozorovaná data $\{X_i, i = 1,2,...n\}$ jsou nezávislá a se shodným rozdělením. Alternativní hypotéza H_1 je, že ve výběru dat je přítomen monotónní trend. Statistika S Mann-Kendallova testu je definována jako:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \mathrm{sgn}(X_j - X_i) \qquad (1)$$

kde $$\operatorname{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{když} \quad \theta > 0 \\ 0 & \text{když} \quad \theta = 0 \\ -1 & \text{když} \quad \theta < 0 \end{cases} \tag{2}$$

Mann (1945) a Kendall (1975) ukázali, že pro $n \geq 8$ je statistika S přibližně normálně rozdělená se střední hodnotou:

$$\mathrm{E}(S) = 0 \tag{3}$$

a rozptylem:

$$\mathrm{V}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{m=1}^{n} t_m m(m-1)(2m+5)}{18} \tag{4}$$

kde t_m je počet skupin (dvojic, trojic, atd.) shodných párových hodnot v rozsahu m, přičemž m = 2 pro dvojice shodných hodnot, m = 3 pro trojice atd. Standardizovaná testová statistika Z je potom:

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & \text{když} \quad S > 0 \\ 0 & \text{když} \quad S = 0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & \text{když} \quad S < 0 \end{cases} \tag{5}$$

Testová statistika Z má standardní normální rozdělení s nulovou střední hodnotou a rozptylem rovným jedné.

Výsledná směrnice trendu b je počítána metodou Theil-Sen (Sen, 1968), tedy jako medián směrnic všech párů dat podle rovnice:

$$b = \operatorname{med}\left(\frac{X_j - X_i}{j - i} \right), \quad \forall i < j \tag{6}$$

3.1 Vliv autokorelace

Balík *zyp* (Bronaugh et al. 2023) obsahuje dvě funkce za účelem omezení vlivu autokorelace, a to metodou podle Zhang et al. (2000) nebo podle Yue et al. (2002). Nutno podotknout, že obě mají za cíl omezit pouze vliv autokorelace 1. řádu (AR(1). Tyto metody se liší přístupem k předběžnému vybělení (pre-whitening) za účelem odstranění AR(1). Do verze programu *zyp 0.11-1* byla nastavena jako defaultní metoda Yue-Pilon.

V metodě Yue-Pilon je nejprve spočtena směrnice trendu metodou Theil-Sen (1968). Je-li směrnice nenulová a statisticky významná, je z časové řady odstraněn trend daný touto směrnicí a v takto upravené řadě posouzena přítomnost AR(1). Tento postup se označuje jako TFPW (Trend Free Pre-whitening). Výsledná rezidua by měla být nezávislá. Je-li autokorelační koeficient statisticky významný, je směrnice trendu původní řady uplatněna na rezidua autokorelace a na této řadě je teprve posouzena významnost trendu pomocí Mann-Kendallova testu (Bronaugh et al. 2023).

Při Zhangově metodě se z řady odstraní trend, pokud je významný, a vypočítá se autokorelace. Tento proces pokračuje, dokud rozdíly v odhadech sklonu a AR(1) ve dvou po sobě jdoucích iteracích nejsou menší než 1 %. Na výsledné časové řadě se poté provede Mann-Kendallův test trendu a k výpočtu sklonu trendu se použije metoda Theil-Sen (Bronaugh et al. 2023).

Dokumentace programu *zyp 0.11-1* z dubna 2022 přitom uvádí: V současné době se v hydrologické komunitě *nedoporučuje používat metodu Yue-Pilon* (Yue et al. 2002). Důvodem je skutečnost, že postup TFPW použitý v metodě Yue Pilon vykazuje s rostoucí autokorelací *velmi vysokou chybovost typu I, a proto je míra falešné detekce trendu touto metodou nepřijatelná* (Buerger 2017; Zhang a Zwiers 2004). Verze programu *zyp 0.11-1* byla proto upravena tak, aby standardně používala metody detekce trendů podle Zhang et al. (2000).

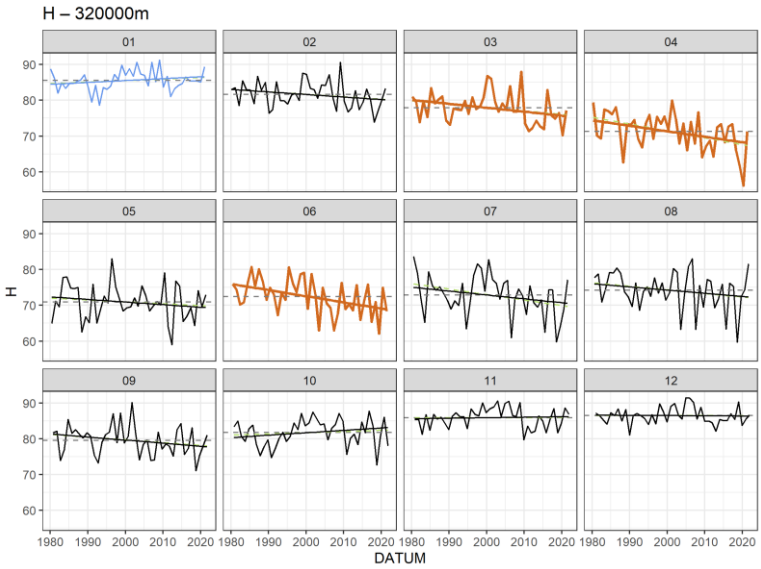
4. Výsledky

Zpracované časové řady bilančních veličin ukazují, že AR(1) detekována testem *acf* se v nich vyskytuje zřídka. Lze ji nalézt např. v časových řadách průměrných ročních průtoků, v měsíčních řadách bilančních veličin se vyskytuje zřídka a v podstatě náhodně. Z popisu metod k řešení problému AR(1) metodami Zhang a Yue-Pilon vyplývá, že není-li v časových řadách autokorelace, není třeba s nimi nijak manipulovat a pro ověření existence trendu se rovnou aplikuje Mann-Kendallův test. Čili ve většině případů (není přítomna autokorelace), by výsledky šetření trendu oběma přístupy měly být shodné. Toto tvrzení ale neplatí. A dále, přijmeme-li tvrzení Buerger (2017) a Zhang a Zwiers (2004) o vysoké míře falešné detekce trendu metodou Yue-Pilon s rostoucí autokorelací, měla by být metoda podle Zhang přísnější, tzn., že trend může být potvrzen podle Yue-Pilon a nepotvrzen podle Yhang, ale ne naopak. Ani toto tvrzení však neplatí bez výjimek.

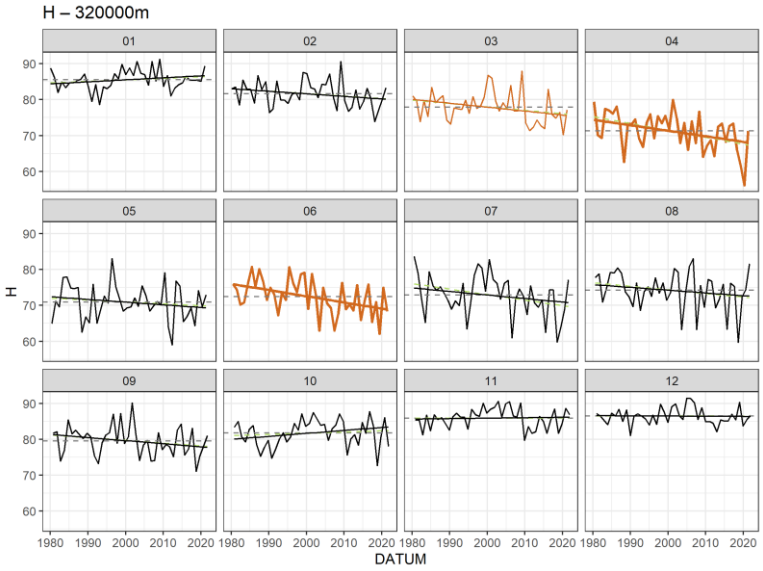
Obr. 1 uvádí trend vlhkosti vzduchu v mezipovodí Lužické Nisy nad Hrádkem n. N. 320000m (320000 – 316000 – 317000 − 319000) v jednotlivých měsících (1 až 12) podle Yue-Pilon (a) a Zhang (b). AR(1) se podle *acf* vyskytuje pouze v řadách v prosinci. Výsledky šetření trendu se ale podle obou metod liší v lednu a v březnu. Přitom samotný Mann-Kendall test existenci rostoucího trendu v lednu podle Zue-Pilon zamítne (*pvalue* = 0,255). A dále, vizuálně oproti lednu se ale spíše trend vyskytuje v červenci, kde ale potvrzen nebyl.

Obr. 2 uvádí trend přirozeného průtoku v mezipovodí Smědé nad Předlánci 326000m. Oproti očekávání byl naopak potvrzen trend v únoru podle Zhang.

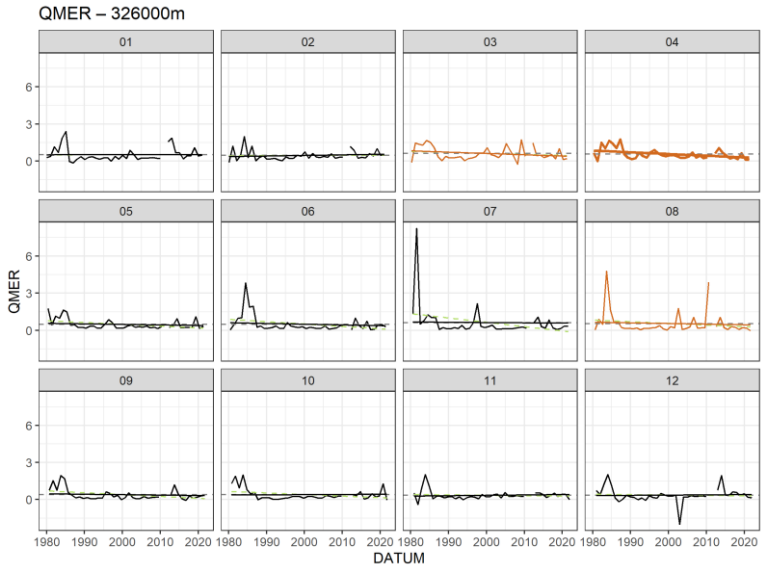
Obr. 3 uvádí trend přirozeného průtoku v povodí Bulovského p. v Předláncích 325000 v jednotlivých měsících (1 až 12) podle Yue-Pilon (a) a Zhang (b). Výsledky šetření trendu metodou Zhang jsou podle očekávání, metoda existenci trendu častěji zamítá nebo potvrzuje s menší statistickou významností. Zvláštní je nicméně nepotvrzení trendu v prosinci, zejména např. ve srovnání s trendem v srpnu (*acf* 0,0). Při podrobnějším zkoumání vyjde najevo, že prosinec je jediný měsíc s významnou autokorelací (*acf* 0,4, limit je 0,3). Zdá se tedy, že metoda Zhang odstraňuje autokorelaci tak dlouho, až nakonec zamítne samotný trend (Zhang pvalue 0,113, Yue-Pilon pvalue 0,0072). Přitom čistý Mann-Kendallův test existenci trendu potvrdí jednoznačně (*tau* 0,266, *pvalue* 0,013). Nabízí se tedy otázka, proč odstraňovat autokorelaci právě a pouze v prosinci s tímto výsledkem. Vyskytuje-li se pouze v prosinci, jedná se pravděpodobně o náhodu.



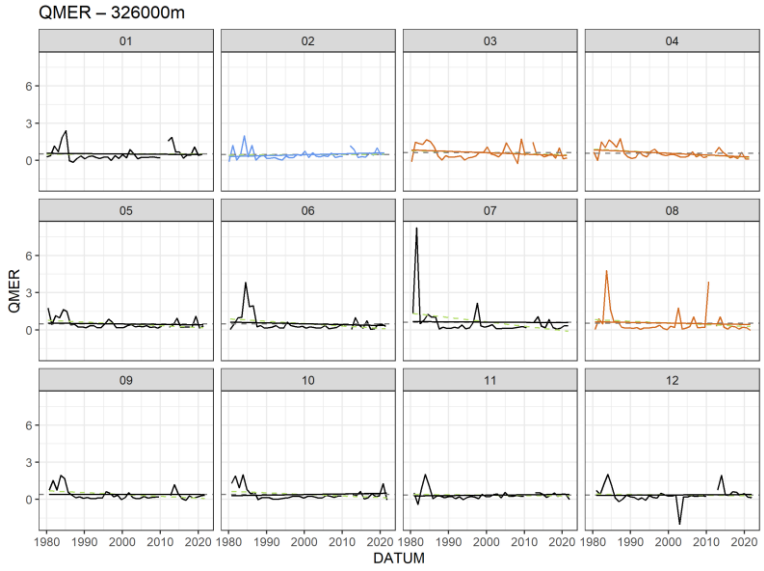
Obr. 1a Trend vlhkosti vzduchu (p.b.) v mezipovodí Lužické Nisy nad Hrádkem n. N. 320000m (320000 – 316000 – 317000 − 319000) v jednotlivých měsících (1 až 12) podle Yue-Pilon.
Fig. 1a Trend in relative air humidity (p.b.) in the subbasin Lužická Nisa above Hrádek n. N. 320000m (320000 – 316000 – 317000 – 319000) in individual months (1 to 12) according to Yue-Pilon.



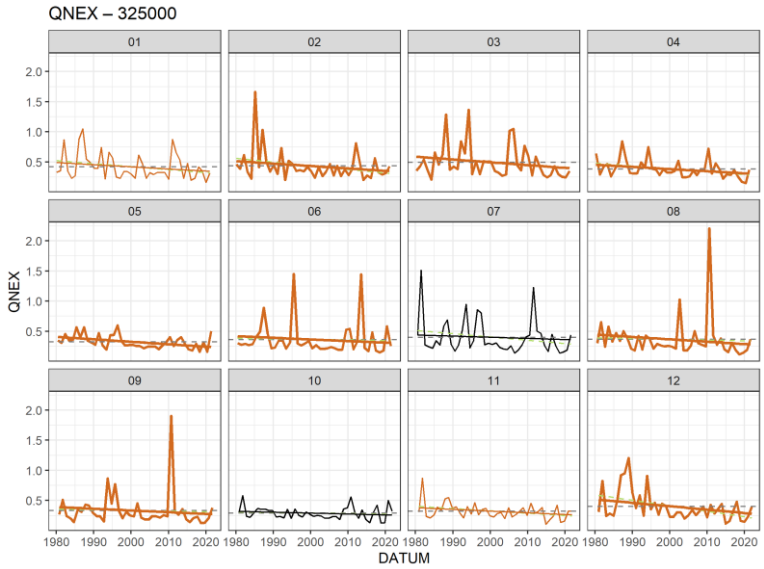
Obr. 1b Trend vlhkosti vzduchu (p.b.) v mezipovodí Lužické Nisy nad Hrádkem n. N. 320000m (320000 – 316000 – 317000 − 319000) v jednotlivých měsících (1 až 12) podle Zhang.
Fig. 1b Trend in relative air humidity (p.b.) in the subbasin Lužická Nisa above Hrádek n. N. 320000m (320000 – 316000 – 317000 – 319000) in individual months (1 to 12) according to Zhang.



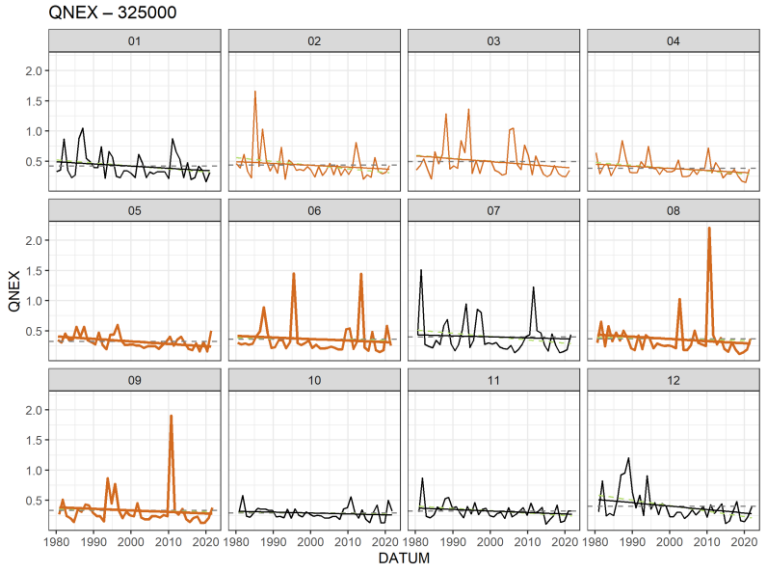
Obr. 2a Trend měřeného průtoku ($m^3 \cdot s^{-1}$) v mezipovodí Smědé nad Předlánci 326000m (326000 – 323000 – 323100 – 325000) v jednotlivých měsících (1 až 12) podle Yue-Pilon.
Fig. 2a Trend in natural discharge ($m^3 \cdot s^{-1}$) in subbasin Smědá nad Předlánci 326000m (326000 – 323000 – 323100 – 325000) in individual months (1 to 12) according to Yue-Pilon.



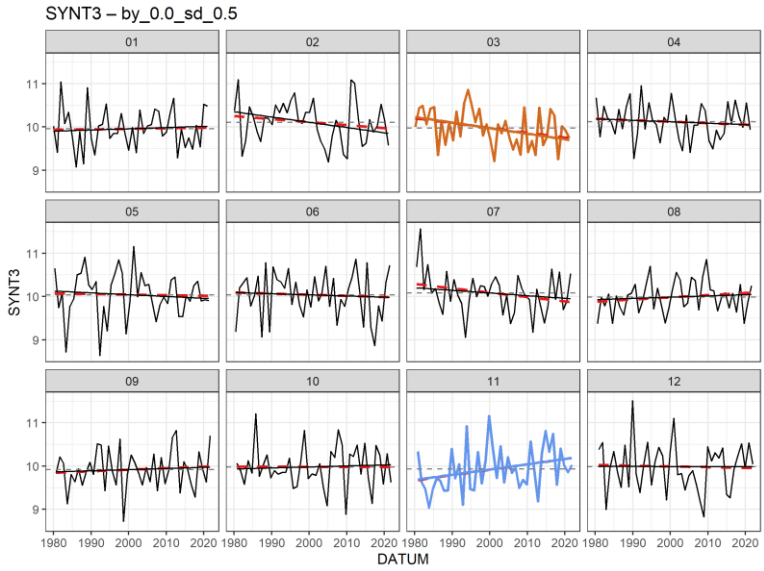
Obr. 2a Trend přirozeného průtoku ($m^3 \cdot s^{-1}$) v mezipovodí Smědé nad Předlánci 326000m (326000 – 323000 – 323100 – 325000) v jednotlivých měsících (1 až 12) podle Zhang.
Fig. 2a Trend in observed discharge ($m^3 \cdot s^{-1}$) in subbasin Smědá nad Předlánci 326000m (326000 – 323000 – 323100 – 325000) in individual months (1 to 12) according to Zhang.



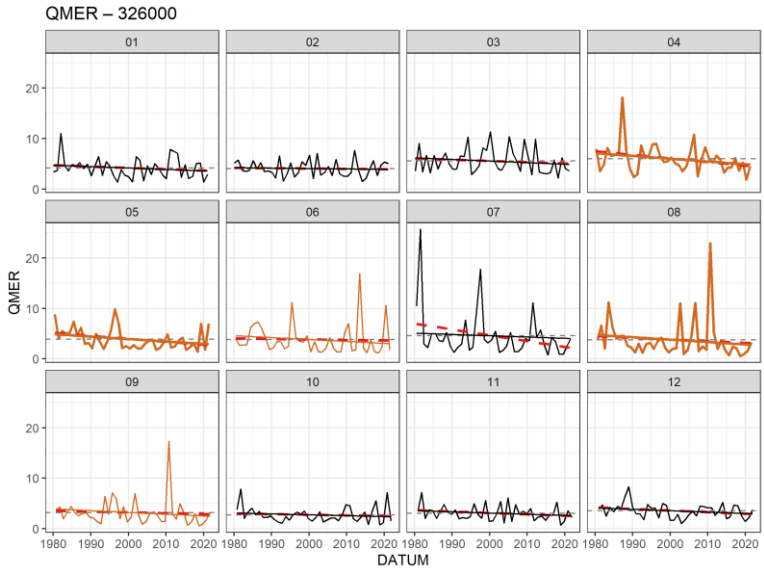
Obr. 3a Trend měřeného průtoku ($m^3 \cdot s^{-1}$) v povodí Bulovského p. v Předláncích 325000 v jednotlivých měsících (1 až 12) podle Yue-Pilon.
Fig. 3a Trend in observed discharge ($m^3 \cdot s^{-1}$) in basin Bulovský p. in Předlánce 325000 in individual months (1 to 12) according to Yue-Pilon.



Obr. 3a Trend přirozeného průtoku ($m^3 \cdot s^{-1}$) v povodí Bulovského p. v Předláncích 325000 v jednotlivých měsících (1 až 12) podle Zhang.
Fig. 3a Trend in natural discharge ($m^3 \cdot s^{-1}$) in basin Bulovský p. in Předlánce 325000 in individual months (1 to 12) according to Zhang.



Obr. 4 Trend v konstantní syntetické řadě se šumem sd 0,5 podle Zhang.
Fig. 4 Trend in constant synthetic serie with the noise sd 0,5 podle Zhang.

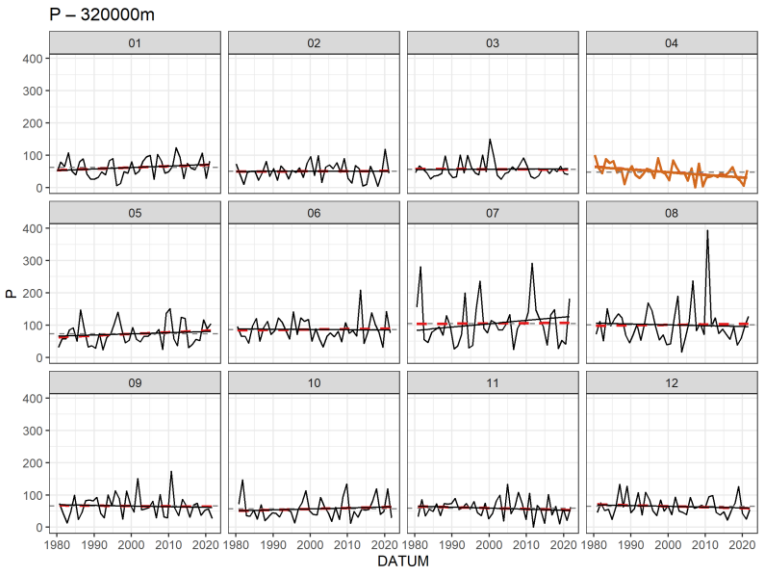


Obr. 5 Trend přirozeného průtoku ($m^3 \cdot s^{-1}$) v povodí Smědé v Předláncích 326000 v jednotlivých měsících (1 až 12) podle Yue-Pilon. Červeně proložení lineární regresí.
Fig. 5 Trend in natural discharge ($m^3 \cdot s^{-1}$) in basin Smědá. in Předlánce 326000 in individual months (1 to 12) according to Yue-Pilon. Linear regression line in red.

Zajímavý pohled na celou problematiku nabízí šetření trendu v syntetických řadách. Vytvoříme-li např. konstantní řadu s hodnotou rovnou 10 a šumem s normálním rozdělením a střední hodnotou rovnou 0 a sd rovnou 0,5, můžeme nalézt trend i v takové řadě (obr. 4). V tomto konkrétním příkladu byl nalezen statisticky významný trend poklesu v březnu a naopak růstu v listopadu.

Dosud se lze často i v odborných studiích setkat s prokládáním časových řad lineární regresí metodou nejmenších čtverců s tím, že se jedná o potvrzení trendu. Tak tomu ale v žádném případě není. Především zde chybí test statistické významnosti. A dále, metoda nejmenších čtverců je z definice silně ovlivněna extrémními hodnotami na začátku a konci řady. Obr. 5 ukazuje, jak lineární regrese v řadách přirozeného průtoku v červenci (řada s extrémním

průtokem na začátku) zvětšuje velikost trendu. Obr. 6 naopak ukazuje, jak lineární regrese v řadách srážkových úhrnů opět v červenci (vyrovnaná řada) naopak velkost trendu snižuje.



Obr. 6 Trend srážek (mm) v mezipovodí Lužické Nisy nad Hrádkem n. N. 320000m (320000 – 316000 – 317000 − 319000) v jednotlivých měsících (1 až 12) podle Zhang. Červeně proložení lineární regresí.
Fig. 6 Trend in precipitation (mm) in the subbasin Lužická Nisa above Hrádek n. N. 320000m (320000 – 316000 – 317000 – 319000) in individual months (1 to 12) according to Zhang. Linear regression line in red.

5. Závěr

Z uvedených zjištění je patrné, že existenci trendu je vždy nutné testovat na statistickou významnost, tzn., zda trend není výsledkem náhody. I tak lze ukázat, že trend může vzniknout právě jako výsledek náhodně generovaných dat. V případě reálně měřených veličin se pak může jednat o vliv náhodných proměnných. Metody odstranění vlivu autokorelace v časových řadách před testováním existence trendu pomocí Mann-Kendallova testu se ukazují jako nespolehlivé.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

BRONAUGH, D., SCHOENEBERG, A., ZEMAN, L., 2023. zyp: Zhang + Yue-Pilon Trends Package (v. 0.11-1) [cit. 2023-03-22]. https://CRAN.R-project.org/package=zyp

BUERGER, G., 2017. On trend detection. *Hydrological Processes*, **31**, 4039-4042.

KENDALL, M. G., 1975. Rank correlation methods. London: Griffin.

LIBISELLER, C., GRIMVALL, A., 2002. Performance of partial Mann Kendall tests for trend detection in the presence of covariates. *Environmetrics*, **13**, 71–84.

MANN, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 45–259.

R Core Team., 2020. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Dostupné z: http://www.R-project.org

SEN, P. K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, **63**, 1379–1389.

VLNAS, R., 2023. Zpracování hydrologického modelu pro příhraniční oblasti frýdlantského výběžku a Hrádku nad Nisou v Libereckém kraji. Souhrnná výzkumná zpráva za rok 2022. VÚV TGM.

VON STORCH, V. H., 1995. Misuses of statistical analysis in climate research. In Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques, von Storch, H., and Navarra, A. (eds). Berlin: Springer-Verlag, 11–26.

WANG, X. L., SWAIL, V. R., 2001. Changes in extreme wave heights in northern hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes. *Journal of Climate*, **14**: 2204–2221.

YUE, S., PILON, P., PHINNEY, B., CAVADIAS, G., 2002. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, **16**, 1807–1829.

ZHANG, X., VINCENT, L. A., HOGG, W. D. AND NIITSOO, A., 2000. Temperature and Precipitation Trends in Canada during the 20th Century. *Atmosphere-Ocean*, **38**(3), 395–429.

ZHANG, X., ZWIERS, F. W., 2004. Comment on "Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test" by Sheng Yue and Chun Yuan Wang. *Water Resources Research*, **40**.

Blok 3 – řízení a plány pro sucho, jeho monitoring a varovný systém, metodiky a zákonná omezení, vodoprávní řízení, přírodní zdroje a modely podzemní vody, změna zdrojů povrchové a zásob podzemní vody, hydro extrémy, hydrologická bilance

Využití modelů transientního proudění podzemní vody k hodnocení vývoje zásob podzemní vody v průběhu suchých period v prostoru terciérních a křídových sedimentů jihočeských pánví a pravostranných přítoků Labe

(Use of groundwater flow models to assess the evolution of groundwater supplies over the dry periods in the Cretaceous sediments)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.21

Martin Milický, PROGEO, s. r. o., progeo@1progeo.cz
Jan Baier, PROGEO, s. r. o., baier@1progeo.cz

Abstrakt: Jednou z náplní projektu PERUN je zpracování a verifikace komplexních modelů proudění podzemních vod pro vybrané oblasti vodohospodářsky významných akumulací podzemních vod a zhodnocení dosavadní a očekávané změny zdrojů povrchových vod a zásob podzemní vody v kontextu změny klimatu a sucha. V realizovaných etapách projektu byly sestaveny modely ustáleného proudění podzemní vody v pěti lokalitách (jihočeských křídových pánvích, v křídě pravostranných přítoků Labe, ve Vysokomýtské a Ústecké synklinále, v terciéru karpatské předhlubně a v křídě dolní Kamenice a Křinice). Na tyto modely navazovaly simulace transientního proudění podzemní vody pro období 1980–2020, při využití vstupů (měsíční dotace podzemní vody) z hydrologického modelu Bilan (zpracované zvlášť pro útvary podzemních vod a hydrogeologické rajóny). Modelové výsledky byly porovnány s měřenými hladinami a vyhodnocenými základními odtoky v simulovaném období. Jedním z cílů realizovaných transientních modelů proudění podzemní vody bylo zhodnocení využití výstupů z hydrologického modelu jako vstupních dat modelu hydraulického. V navazujících etapách projektu budou výsledky hydrologických modelů, vypočtených pro různé klimatické scénáře, využity jako vstupy pro prediktivní simulace proudění podzemní vody. Součástí simulovaného období byly dvě výrazné suché periody v letech 1981–1984, a zejména v letech 2015–2020 (s pokračováním do současnosti). Vliv těchto suchých period na vývoj zásob podzemní vody a jejich modelové hodnocení je prezentováno pro vybraný hydrogeologický rajón.

Klíčová slova: zásoby podzemní vody – změny klimatu – hydrologický model – hydraulický model

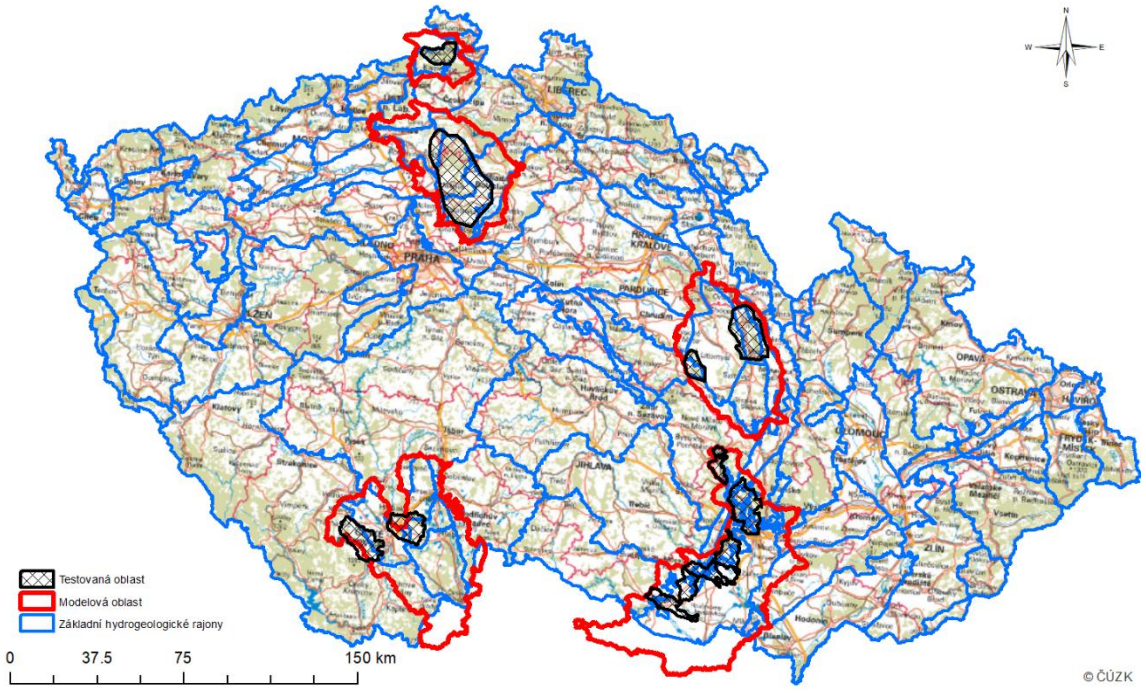
Abstract: The development and verification of comprehensive groundwater flow models for selected areas of water-important groundwater accumulations and the assessment of existing and expected changes in surface water resources and groundwater supplies in the context of climate change and drought are one of the objectives of the PERUN project. In the

implemented phases of the project, steady-state groundwater flow models were constructed in five locations (South Bohemian Cretaceous basins, Cretaceous sediments of the right-hand tributaries of the Elbe, Vysokomýtská and Ústecká Syncline, Tertiary of the Carpathian Foothills and Chalk of the Lower Kamenice and Křinice chalk). These models were followed by simulations of transient groundwater flow for the period 1980–2021, using inputs (monthly groundwater recharge) from the hydrological model Bilan (prepared separately for groundwater units and hydrogeological regions). The model results were compared with measured levels and evaluated baseflows in the simulated period. One of the objectives of the implemented transient groundwater flow models was to evaluate the use of the hydrological model outputs as input data for the hydraulic model. In subsequent stages of the project, the results of the hydrological models, calculated for different climate scenarios, will be used as inputs for predictive groundwater flow simulations. The simulated period included two significant dry periods in 1981–1984, and in particular in 2015–2020 (continuing to the present). The influence of these dry periods on the development of groundwater supplies and their model evaluation is presented for selected hydrogeological region.

Keywords: groundwater supplies – extreme events – hydrological model – hydraulic model

1. Úvod

V projektu PERUN je problematika podzemních vod v souvislosti s vlivem sucha a změnou klimatu hodnocena v pěti oblastech (obr. 1), které byly vybrány pro svůj vodohospodářský význam, ale podmínkou výběru byla i hustota monitorovací sítě ČHMÚ.



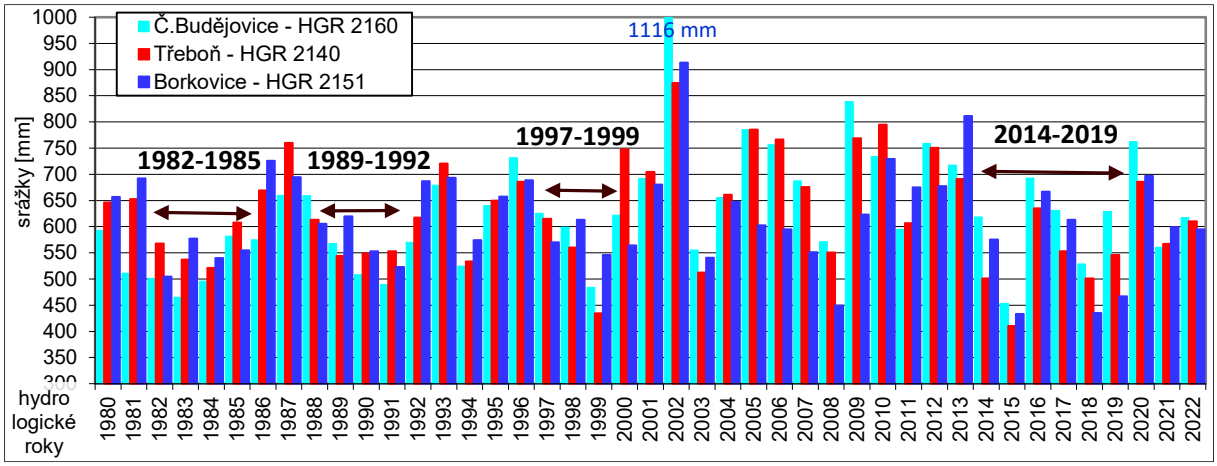
Obr. 1 Situace hodnocených (modelových) oblastí.
Fig. 1 Situation of the modelled areas.

V realizovaných etapách projektu byly sestaveny modely ustáleného proudění podzemní vody, na které navázaly simulace transientního proudění podzemní vody pro období let 1980–2020. Pro modely transientního (neustáleného) proudění byly jako vstupy efektivní infiltrace využity výstupy hydrologického modelu Bilan (ve formě měsíční dotace podzemní vody), zpracované zvlášť pro útvary podzemních vod (ÚPOV) a hydrogeologické rajóny (HGR). Pro tento článek

(a prezentaci výsledků) jsme vybrali stručnou dokumentaci zpracování hydraulických modelů a hodnocení ve vodohospodářsky významné oblasti jihočeských pánví. Na rozdíl od standardních bilančních hodnocení zásob podzemní vody, která jsou realizována pravidelně nebo příležitostně ve vybraných hydrogeologických rajónech, jsou hodnocení v rámci projektu PERUN zaměřena i na okrajové nebo mezilehlé oblasti tvorby zdrojů podzemních vod (na oblasti krystalinika mimo HGR).

2. Měřené srážky a úrovně hladin podzemních vod

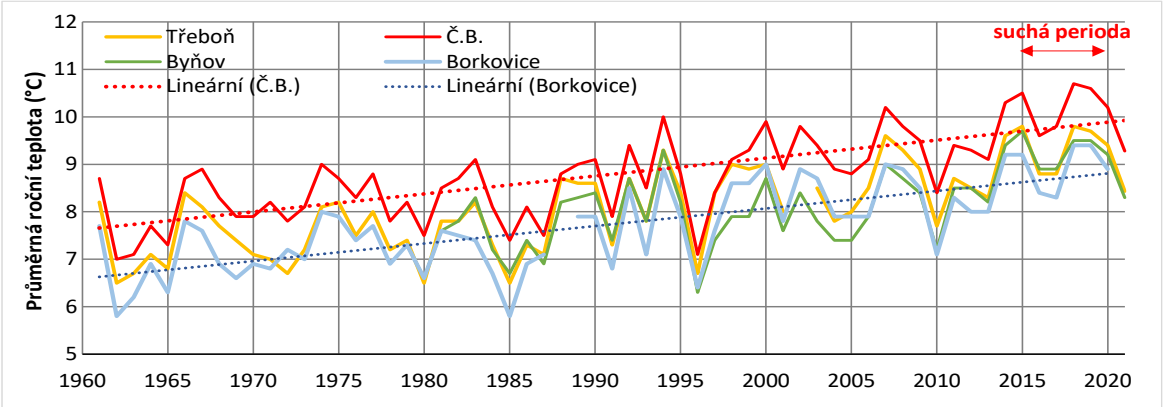
Vývoj hladin a zásob podzemní vody dominantně ovlivňuje časově nerovnoměrný příron vody infiltrované ze srážek (efektivní infiltrace). Velikost efektivní infiltrace významně závisí především na velikosti, časové distribuci a kumulaci srážek v průběhu hydrologických roků. Vývoj srážek v prostoru jihočeských pánví, měřených ve stanicích České Budějovice (394,6 m n. m.), Třeboň-Lužnice (428 m n. m.) a Borkovice (419 m n. m.) je zobrazen na obr. 2, včetně vyznačení kumulací suchých period v tomto období.



Obr. 2 Měřené srážkové úhrny ve stanicích ČHMÚ situovaných v jihočeských pánvích.
Fig. 2 Measured rainfall in the CHMI stations in South Bohemian basin.

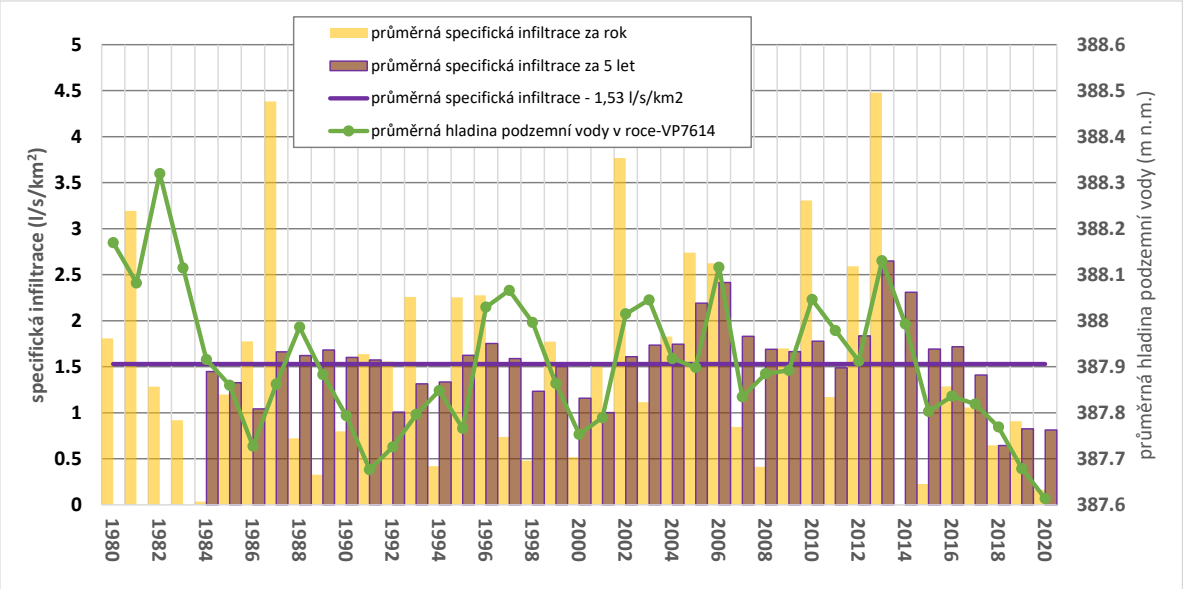
Suché periody se vyskytovaly v obdobích 1982–1985, 1989–1992, 1997–1999 a 2014–2019, extrémně suchý byl i rok 2003. V oblasti jihočeských pánví byla poslední suchá perioda ukončena vlhkým rokem 2020 a i poslední 2 roky jsou srážkově střední. Vlhké periody se vyskytovaly v obdobích 1986–1988, 2000–2002 a 2010–2013, extrémní srážky byly měřeny v roce 2002.

Důležitým faktorem ovlivňujícím srážkovou infiltraci je teplota vzduchu podmiňující výpar z půdy a transpiraci rostlin. Pro zpracování bilance podzemní vody je proto hodnocen i vývoj teplot, který je ze stanic situovaných v jihočeských pánvích dokumentovaný na obr. 3.



Obr. 3 Vývoj průměrných ročních teplot ve stanicích ČHMÚ situovaných v jihočeských pánvích.
Fig. 3 Measured temperature in the CHMI stations in South Bohemian basins.

V rámci řešení projektu (DC 1.4) byly předány hydrologické bilance vypočtené modelem Bilan, které obsahují data o množství infiltrované srážkové vody na hladinu podzemní vody (efektivní infiltrace).



Obr. 4 Vývoj dotace podzemí vody a hladiny podzemní vody v jihočeských pánvích.
Fig. 4 Measured Development of groundwater recharge and groundwater level in South Bohemian basin.

Kumulativní vývoj dotace podzemní vody v pětiletých obdobích spolu s průměrnou roční hladinou ve vrtu VP7614 (Pištín), který je lokalizovaný v infiltrační oblasti budějovické pánve, je dokumentovaný na obr. 4. Průběh průměrné kumulativní dotace dobře odpovídá vývoji hladiny podzemní vody ve vrtu. Nejmenší kumulativní dotace podzemní vody (v pěti po sobě jdoucích letech 2014–2018) byla vypočtena v roce 2018 (ovlivněno zejména rokem 2014, kdy vyšla téměř nulová dotace podzemní vody). Hladina podzemní vody klesala, zejména díky minimálním srážkám v mimovegetačním období, až do roku 2020 (v roce 2021 hladina mírně vzrostla, v roce 2022 spíše stagnovala). Hydrologické bilance jsou použity jako vstupy do modelů transientního proudění (viz kap. 3.1). V obdobích, kdy množství dotace neodpovídá vývoji hladiny (např. roky 2007–2010 v obr. 4), lze předpokládat horší shodu modelových a měřených hladin podzemní vody (kap. 4).

3. Hydraulický model proudění podzemní vody a jeho využití

3.1 Metodika zpracování a hodnocení

Hlavním cílem realizace hydraulických modelů proudění podzemní vody v rámci projektu PERUN je prognózní zhodnocení vlivu sucha na hladiny a zásoby podzemní vody (DC 6.2).

Zpracování modelů proudění podzemní vody bylo zahájeno v DC 1.4. Nejdříve byly zpracovány simulace stacionárního proudění podzemní vody. Výstupem simulací stacionárního proudění podzemní vody jsou průměrné (obvyklé) úrovně hladiny a směry proudění podzemní vody při průměrné (obvyklé) drenáži podzemní vody do říčních toků a průměrné velikosti odběrů s vyčíslením průměrných zásob podzemní vody.

Na zpracované modely stacionárního proudění navázalo sestavení modelů transientního proudění podzemní vody pro období let 1980 až 2020. Základním vstupem pro zpracování

transientního proudění je proměnná (v rámci řešení v intervalu 1 měsíce) infiltrace srážek. Infiltrace ze srážek byly odvozeny ze základních odtoků, stanovených hydrologickým modelem Bilan (pro hydrogeologické rajóny (HGR) a pro útvary povrchových vod (ÚPOV)). V aktuální etapě bude doplněno zadání infiltrace stanovené separací pomocí Eckhardtova filtru. Kalibrace modelů transientního proudění byla provázána s výsledky DC 1.3. Při kalibraci byly s modelovými výsledky porovnány různě kolísající měřené hladiny ve vrtech s odlišným výskytem dlouhodobého a sezónního kolísání hladin podzemní vody, s různou rychlostí reakce na významné dotační epizody (tj. odlišným zpožděním) a různou mírou antropogenního ovlivnění (výsledky DC 1.3 budou i v dalších etapách projektu porovnávány (testovány) s výstupy modelů transientního proudění).

3.2 Model proudění podzemní vody v oblasti jihočeských pánví (JP)

Diskretizace, vstupní data a okrajové podmínky

Modelová oblast byla vymezena tak, aby pokrývala celou plochu základních rajónů – HGR 2140 (Třeboňská pánev–jižní část, TJ) HGR 2152 (Třeboňská pánev–střední část, TSS), HGR 2151 (Třeboňská pánev–severní část, TS) a HGR 2160 (Budějovická pánev, BP), spolu s kompletními povodími toků, které z přilehlých, většinou krystalinických, oblastí směřují do prostoru zájmových základních rajónů (voda z těchto povodí se zčásti uplatňuje ve vodní bilanci oblasti vymezené základními rajóny). Plocha modelu má celkovou rozlohu 2777 km^2 a horizontálně byla diskretizována do pravidelné čtvercové výpočetní sítě s délkou strany elementu 100 m.

Prostor modelu je ve vertikálním směru diskretizován do pěti vrstev. Vzhledem k limnickému charakteru sedimentární výplně pánví (rychlé a nepravidelné střídání propustných a nepropustných poloh) nelze v JP vymezit obvyklé vertikální horizonty (vrstvy) reprezentující samostatné kolektory a izolátory. První čtyři vrstvy (číslováno odshora) mají plošný rozsah odpovídající celé ploše modelového území. Rozsah 5. vrstvy se zmenšuje v závislosti na úrovni báze sedimentární pánve na její nejhlubší části v oblasti Českých Budějovic a stropnického příkopu.

První modelová vrstva reprezentuje vrstvu kvartérních uloženin a vrstvu zvětralin, pokrývající pánevní sedimenty křídy, terciéru a skalní horniny krystalinika v celé ploše modelového území a také zprostředkovává infiltraci a drenáž vody pro horniny pánevní výplně a krystalinika. Druhou modelovou vrstvu tvoří v ploše pánve křídové a terciérní sedimenty do hloubky cca 60 m p.t., u kterých z hydrogeologického hlediska převládá funkce kolektoru, v oblastech pánve s menší mocností (TSS) představuje tato vrstva prakticky celou mocnost pánevních sedimentů. Báze třetí modelové vrstvy dosahuje převážně do úrovně 100 m p.t., v oblastech mimo hluboké příkopy v ní probíhá proudění v bazální části pánve a zejména v TS jsou z tohoto horizontu realizované významné odběry podzemní vody. V mělčích částech pánví (TSS) jsou zadané hydraulické parametry odpovídající podložním krystalinickým horninám. Báze čtvrté modelové vrstvy v oblasti zahrnující podloží pánve je zadána rovinou v úrovni 280 m n. m. v TP a 210 v m n. m. v BP. Pátá vrstva reprezentuje bazální vrstvu pánevních sedimentů vyskytující v oblastech nejhlubších částí pánví, bází modelové vrstvy je báze pánevních sedimentů. V nejhlubší části pánve proudí podzemní voda v tektonicky založených příkopech v linii toku Vltavy a v povodí Stropnice. Z nejhlubšího horizontu pánve jsou realizovány odběry minerální vody v Byňově (Mattoni 1873 a.s.), v Hrdějovicích a v Českých Budějovicích.

Voda infiltrovaná do přípovrchové vrstvy je částečně drénována do lokálních drenážních bází, částečně se účastní prostorového proudění, při kterém infiltruje do svrchní části pánve

dosahující mocnosti do cca 100 m. V JP lze tedy ještě pod mělkou přípovrchovou vrstvou vymezit dva prostorové proudy podzemní vody. Svrchní proud směřují od míst infiltrace k drenážním bázím tvořených významnějšími toky (Stropnice v TP, Blatská stoka v TS nebo Bezdrevský potok v BP). Tento horizont je zejména v TP významně využíván k odběrům podzemní vody.

Proudění podzemní vody v nejhlubším horizontu pánví je dotováno zejména efektivní infiltrací, ke které dochází na výchozech klikovského souvrství na okrajích pánví. Okrajová zlomová pásma drénují horniny krystalinika a podzemní voda po nich přetéká do spodních propustných poloh. Podzemní voda hlubokého proudění podzemní vody odtéká do oblastí regionálních drenážních bází v údolí Vltavy a Malše v BP a v oblasti Lužnice severně od Třeboně v TP a část podzemní vody je jímána.

Srážková infiltrace je v modelu stacionárního proudění zadána na celou plochu první modelové vrstvy formou dílčích zón s konstantní hodnotou toku – okrajovou podmínkou 2. typu. Velikost infiltrace (v rozsahu 0,7–3,0 $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$) je zadána na základě výsledků projektu Rebilance a na základě map základních odtoků podzemní vody (Krásný 1982). Vyšší hodnota infiltrace byla v procesu kalibrace stacionárního modelu odladěna v krystaliniku v zázemí bilancovaných HGR, nižší infiltrace byla naopak odladěna v prostoru výskytu méně propustných sedimentů v ploše pánve (spraše v TS). Průměrná infiltrace pro celé modelové území dosahuje hodnoty 2,36 $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$.

Hladina podzemní vody je v oblasti kvartérních sedimentů a přípovrchové vrstvy rozpojného krystalinika volná. V oblasti mimo výchozy křídových a terciérních sedimentů je hladina podzemní vody napjatá.

Výsledky modelu ustáleného proudění

Hlavními výstupy modelu stacionárního proudění podzemní vody jsou úrovně hladin a směry proudění podzemní vody a bilance podzemní vody.

Izolinie úrovně hladiny podzemní vody a směrů proudění v první modelové vrstvě, reprezentující přípovrchový kolektor zvětralin, eluvia a lokálně vyvinutého kvartéru obsahuje obr. 5. Hladina podzemní vody v první modelové vrstvě je generelně konformní s terénem. Směry proudění ovlivňují lokální drenážní báze, které tvoří i drobné vodoteče. Velké hydraulické gradienty jsou patrné především v jihozápadní části území, kde jsou toky hluboce zařízlé, a úroveň terénu v některých místech přesahuje 1000 m n. m. Podobně je to i v oblasti tzv. lišovského prahu, který odděluje budějovickou a třeboňskou pánev. V centrální části pánví jsou hydraulické gradienty menší a více se uplatňuje drenáž podzemní vody do rozsáhlé sítě vodních toků. Proudění podzemní vody v severní části TP je významně ovlivněno tzv. mažickým zlomem, který zamezuje pokračování proudu podzemní vody ze severu dále na jih a dochází zde k významnému vertikálnímu přetoku podzemní vody do svrchní části pánve a kvartérních sedimentů, který způsobuje vznik rozsáhlých podmáčených území (blata, rašeliniště). Mažický zlom zároveň omezuje šíření deprese podzemní vody, způsobené odběry z horusické jímací linie (ČEVAK Dolní Bukovsko, cca 90 $l \cdot s^{-1}$), lokalizované jižně od mažického zlomu.

Výslednou bilanci podzemní vody, rozdělenou na jednotlivé hydrogeologické rajóny a jejich zázemí, obsahuje tab. 1.

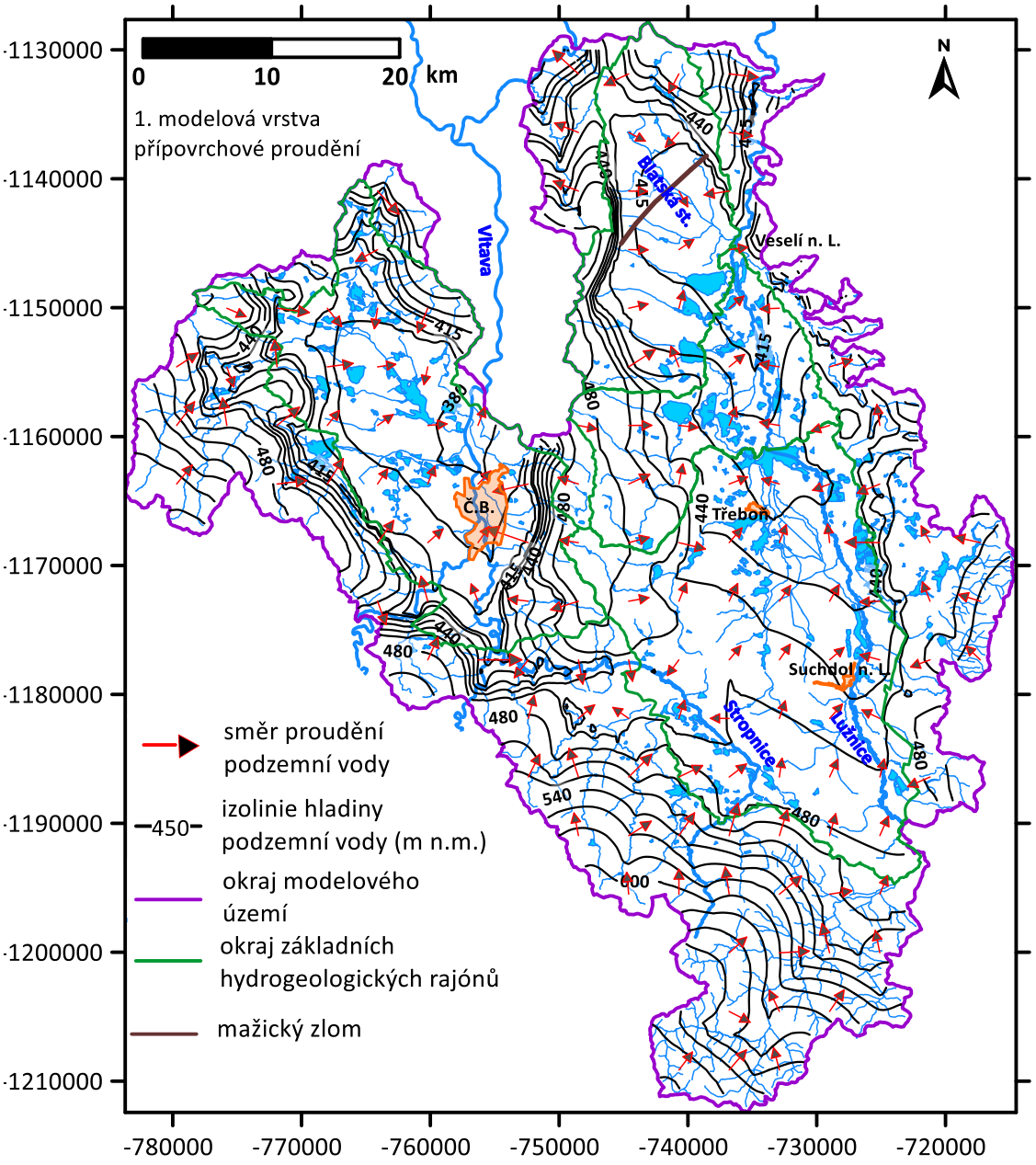
Tab. 1 Bilance modelu stacionárního proudění podzemní vody ($l \cdot s^{-1}$) – jihočeské pánve.
Tab. 1 Groundwater balance of stationary groundwater flow model ($l \cdot s^{-1}$) – South Bohemian basin.

HGR	2140	2152	2151	2160	zázemí	CELKEM
Infiltrace	1227,5	273,1	401,3	861,7	3183,7	5947,4
drenáž do toků	−1287,5	−319,8	−291,9	−749,4	−3006,1	−5654,6
odběry	−79,6	−2,2	−102,5	−98,7	−11,9	−294,9
zázemí a okolní HGR	139,5	48,8	−9,0	−13,7	−165,6	0,0
rozdíl	0,0	0,0	−2,1	0,0	0,0	−2,1

Výsledky modelu transientního proudění podzemní vody

Cílem zpracovaných simulací neustáleného (transientního) proudění podzemní vody je:

- vyhodnocení dlouhodobých a ročních změn doplňování a prázdnění zásob podzemní vody v období let 1980–2020,
- zhodnocení klasifikace měřených vrtů ČHMÚ dle míry shody s rozpoznanými trendy vývoje zásob podzemní vody v modelovaných strukturách, identifikovány jsou objekty vhodné (reprezentativní) pro hodnocení regionálních změn hydrogeologických poměrů lokality, a naopak vrty s „neobvyklým“ vývojem hladiny, reprezentující lokální specifické geologické a hydrogeologické podmínky v okolí daného vrtu,
- identifikace vrtů v oblasti hydraulického ovlivnění realizovanými odběry podzemní vody,
- identifikace period (období) s nedostatečnou shodou modelového a pozorovaného vývoje zásob podzemní vody při zadání infiltrace z výstupů hydrologického modelu BILAN, při porovnání výstupů pro HGR a ÚPOV,
- simulace vývoje proudění, hladin a zásob podzemní vody pro vyhodnocené klimatické scénáře v dalších částech projektu PERUN (s cílem názorně popsat důsledky nepříznivého vývoje).



Obr. 5 Úroveň hladiny podzemní vody a směry proudění v první modelové vrstvě – jihočeské pánve.
Fig. 5 Groundwater levels and flow directions in first model layer – South Bohemian basin.

Kombinace hydrologických modelů a modelů proudění podzemní vody umožňuje vzájemné zpřesňování popisu vývoje zásob podzemních vod. Přednosti hydrologických modelů spočívají především v podrobnějším popisu procesů ovlivňujících (snižujících) průsak srážkové vody na hladinu podzemní vody (intercepce, povrchový odtok, retence vody v půdním horizontu, evapotranspirace). Modely proudění podzemní vody s podstatně větší podrobností popisují proudění a vývoj zásob podzemní vody v saturované zóně (při prostorovém zohlednění geologických a hydrogeologických charakteristik modelové oblasti).

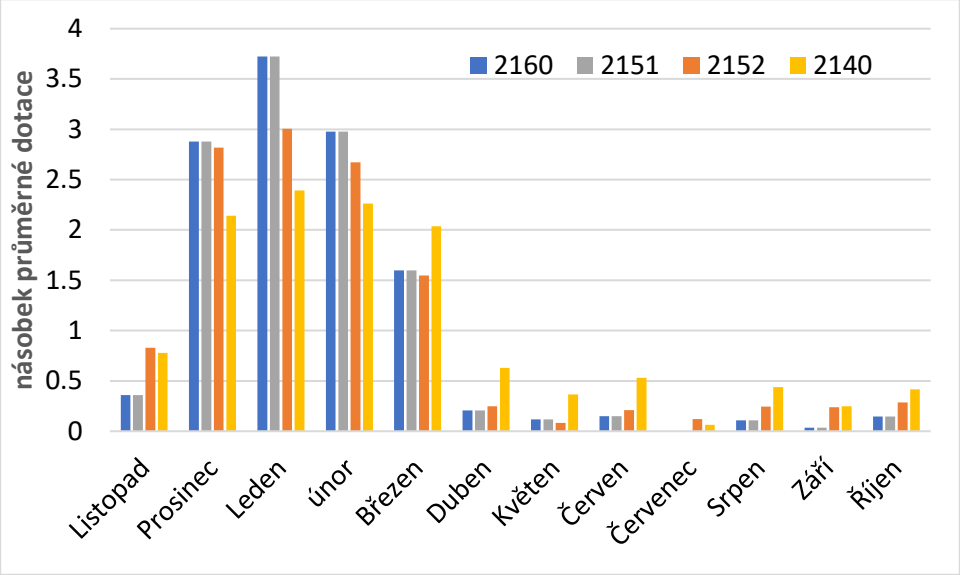
Pro modelové hodnocení vývoje zásob a hladin podzemní vody v čase (transientní proudění) byla použita vstupní data vypočtená modelem hydrologické bilance Bilan, stanovená pro plochy HGR a ÚPOV (relativní změny infiltrace stanovené modelem Bilan byly zadány jako relativní změny velikosti modelové infiltrace stanovené stacionárním modelem). Největším rozdílem mezi HGR a ÚPOV, kromě jejich vlastní definice, je velikost ploch se stanovenou

infiltrací, kdy v zájmovém území jsou 4 základní HGR (a přilehlé oblasti krystalinika) a 52 ÚPOV. Vybrané výsledky hydrologického modelu Bilan jsou uvedeny v tab. 2 a na obr. 6 a 7. Počet měsíců s nulovou dotací podzemní vody a počty měsíců s dotací větší, než je průměrná dotace pro simulované 40. leté období, jsou uvedeny v tab. 2. Pro dotaci podzemí vody stanovenou pro HGR vychází výrazně větší množství měsíců s nulovou dotací a menší množství dní s nadprůměrnou dotací podzemní vody. Pro ÚPOV je dotace rozložena do větší části roku. I když vychází více dní s nadprůměrnou dotací pro ÚPOV, tak její násobky nejsou tak výrazné, jako u HGR (tab. 2).

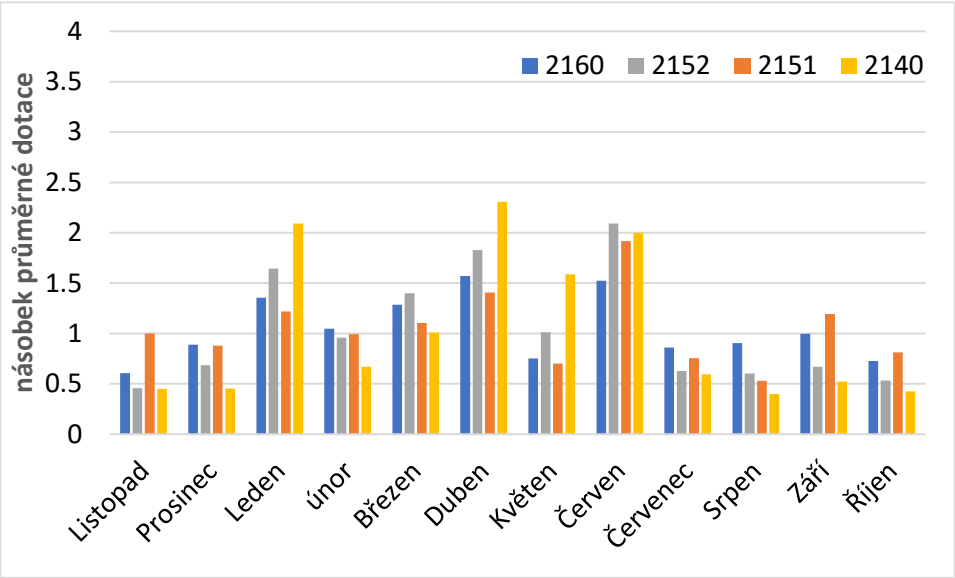
Tab. 2 Porovnání dotace podzemní vody stanovené modelem bilan – pro HGR a ÚPOV.
Tab. 2 Comparison of the groundwater recharge determined by the Bilan model for HGR and ÚPOV.

	HGR 2160	HGR 2152	HGR 2151	HGR 2140
počet měsíců s nulovou dotací (HGR)	336	248	336	310
počet měsíců s nulovou dotací (UPOV)	85	237	180	2
Počet měsíců s nadprůměrnou dotací (HGR)	107	139	107	133
nadprůměrnou dotací (UPOV)	157	143	157	167

Z hlediska doplňování zásob podzemní vody jsou podle modelu Bilan vypočteného pro HGR nejvydatnější měsíce prosinec až březen (obr. 6). Průměrné násobky ustálené dotace podzemní vody pro jednotlivé měsíce, stanovené z dotací vypočtených pro ÚPOV (vymezených na území HGR), jsou dokumentovány na obr. 7. Při srovnání vypočtených dotací v jednotlivých měsících nedosahují dotace dle ÚPOV tak velkých hodnot a jsou rozloženy v průběhu celého roku. Vypočtené infiltrace pro jednotlivé ÚPOV pravděpodobně více odrážejí hydrologickou situaci vycházející z odtoku vody na menších tocích, které ovšem nemusí reprezentovat dotaci podzemní vody (s výjimkou mělkých hydrogeologických rajónů, např. TSS).



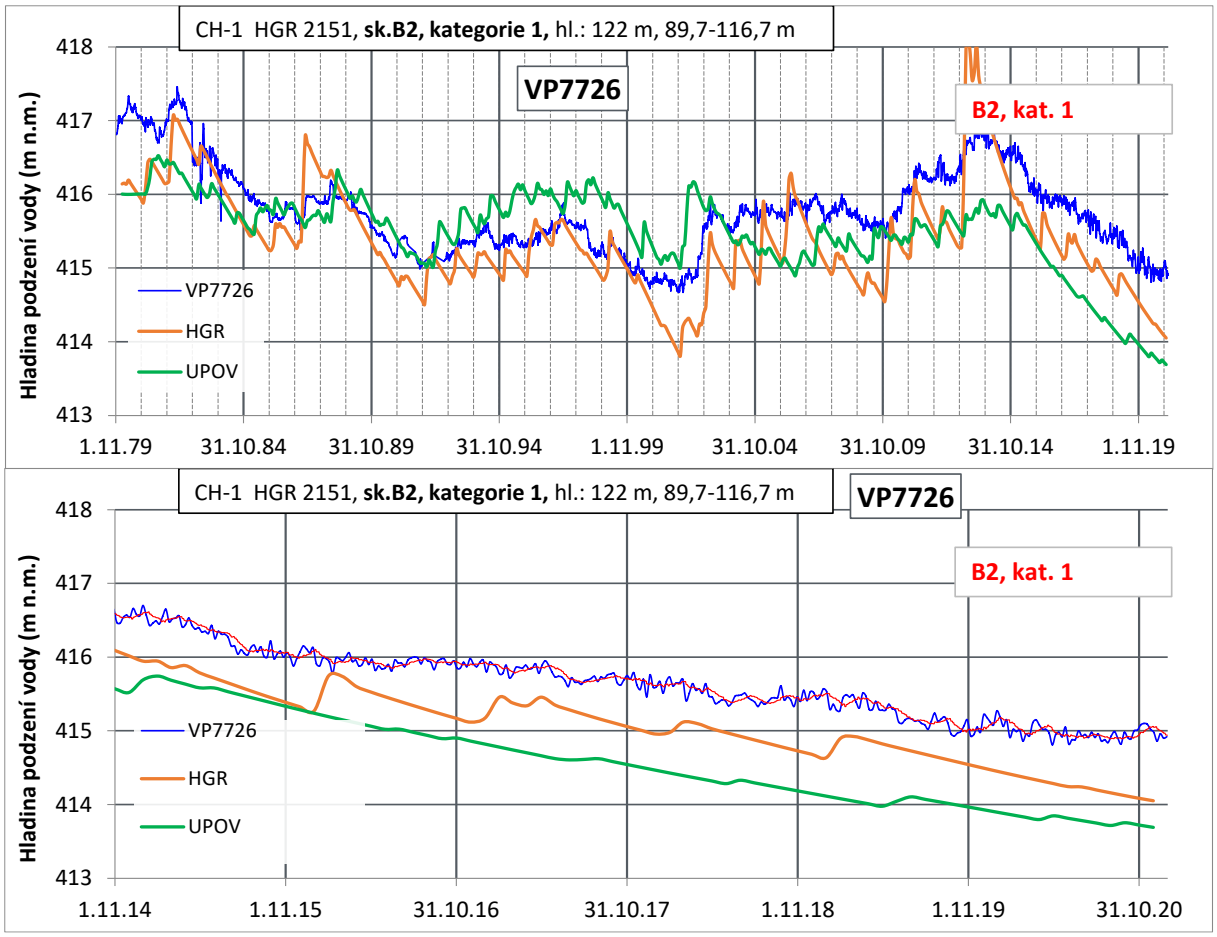
Obr. 6 Průměrné násobky dotace podzemní vody pro jednotlivé měsíce – HGR.
Fig. 6 Average multiplies of groundwater recharge for individual months – HGR.



Obr. 7 Průměrné násobky dotace podzemní vody pro jednotlivé měsíce – UPOV.
Fig. 7 Average multiplies of groundwater recharge for individual months – ÚPOV.

Odlišná dotace podzemní vody stanovená pro HGR a ÚPOV má za následek různý průběh modelových hladin podzemní vody, který je pro vrt VP7726 (situovaný v TS) dokumentován na obr. 8. K měřeným datům hladiny ve vrtu (v grafu modře) jsou k dispozici vždy dva ekvivalenty modelového vývoje hladiny podzemní vody (varianta pro HGR (hnědá) a pro ÚPOV (zelená)). Krátkodobé kolísání měřené hladiny podzemní vody v řádech jednotek cm je způsobeno propagací tlaku vzduchu do volné hladiny ve vrtu. Na monitorovaných hladinách se výrazně méně projevují změny vyvolané pravidelným ročním (jarním) doplňováním a následným prázdněním zásob podzemní vody (dotace stanovené modelem Bilan pro HGR jsou soustředěny zejména do jarních měsíců). Modelové hladiny pro obě zadané dotace podzemní vody vykazují také větší amplitudu kolísání, a to zejména v ročním cyklu. Velikosti poklesu a nárůstu vlivem delších suchých nebo vlhkých period jsou zachyceny dobře.

Modelem transientního proudění podzemní vody jsou stanoveny úrovně hladiny na konci jednotlivých měsíců a lze tak testovat shody vzestupů a poklesů modelových a měřených hladin (bez ohledu na velikost vzestupu/poklesu). Procenta modelových period, ve kterých byl vývoj hladin podzemní vody odlišný (při porovnání na začátku a na konci měsíce), jsou uvedena v tab. 3. Pro vybrané vrty charakterizované různým zatříděním do skupin (DC 1.3) vychází menší chybovost (cca 35 %) pro infiltraci stanovenou pro hydrogeologické rajóny. Pro vrty zatříděné do skupiny A i B vychází shoda měřených a modelových zachycení trendů nárůstu a poklesu hladin obdobně.



Obr. 8 Vývoj měřených a modelových hladin podzemní vody ve vrtu VP7726.
Fig. 8 Development of measured and modelled groundwater levels in the borehole VP7726.

Tab. 3 Porovnání úspěšnosti zachycení trendů nárůstu a poklesu hladin v jednotlivých měsících.
Tab. 3 Comparison of the success of capturing the trends of increase and decrease of levels in individual month.

		chybovost (%)	
vrt	**zatřídění**	**HGR**	**UPOV**
VP7726	B2, Kat.1	0.36	0.47
VP0813	A5, kat.1	0.35	0.48
VP7638	B1, kat. 2	0.33	0.44
VP1003	A2, kat. 1	0.33	0.43

Hodnoty efektivní infiltrace stanovené modelem Bilan pro ÚPOV a HGR, indexem BFI pro HGR a modely transientního a stacionárního proudění podzemní vody jsou shrnuty v tab. 4. Vzhledem k metodice zadávání transientních dotací podzemní vody jsou hodnoty pro modelové infiltrace shodné (stacionární i transientní). Nejmenší dotace jsou stanoveny indexem BFI pro jednotlivé HGR, menší hodnoty mohou být způsobeny ovlivněním základního odtoku odběry podzemní vody. Dotace vypočtené modelem Bilan pro HGR jsou větší než při stanovení pro ÚPOV. Na základě porovnání dotací stanovených při kalibraci modelu proudění podzemní vody a dotací vypočtenými modelem Bilan nelze přesně určit, které hodnoty vypočtené hydrologickým modelem jsou přesnější (HGRxÚPOV).

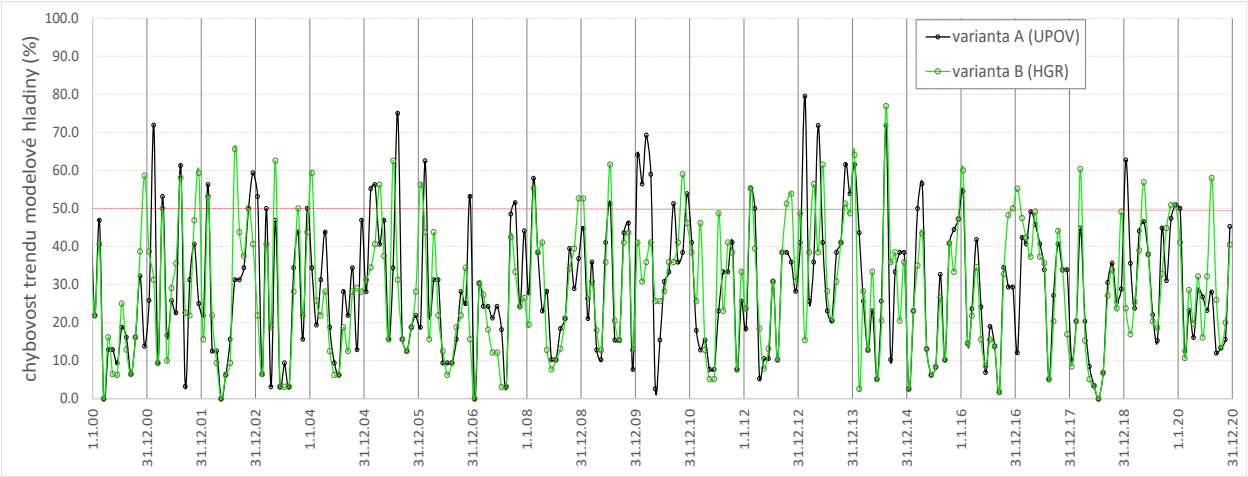
Tab. 4 Efektivní infiltrace stanovená modelem Bilan pro ÚPOV a HGR, indexem BFI a modely stacionárního a transientního proudění podzemní vody – porovnání.
Tab. 4 Effective infiltration determined by the Bilan model for ÚPOV and HGR, the BFI index and models of stationary and transient groundwater flow – comparison.

		efektivní infiltrace ($l.s^{-1}.km^{-2}$)			
Zdroj výpočtu	období	**2140**	**2152**	**2151**	**2160**
Bilan HGR	1961-2021	2.52	2.47	1.53	1.53
Bilan HGR	1981-2020	**2.50**	**2.38**	**1.53**	**1.53**
Bilan UPOV	1981-2020	**2.08**	**1.99**	**0.95**	**1.30**
Odtok ČHMÚ - BFI	1981-2020	1.49	1.23	1.03	1.07
Model transient HGR	1981-2020	2.23	1.35	1.54	1.92
Model transient UPOV	1981-2020	2.23	1.36	1.55	1.92
Model stacionár		**2.23**	**1.35**	**1.54**	**1.92**
	MIN	*1.49*	*1.23*	*0.95*	*1.07*
	MAX	*2.52*	*2.47*	*1.55*	*1.92*

4. Porovnání výsledků hydrologického a hydraulického modelu

Určujícím prvkem pro zadání infiltrace do hydraulického modelu proudění podzemní vody jsou výpočty modelu hydrologického. Aktuálně jsou pro každý vrt k dispozici dvě varianty modelového výpočtu úrovně hladiny podzemní vody (HGRxÚPOV). Pokud ani jedna z variant není uspokojující a modelová hladina se významně odlišuje od pozorovaného vývoje, je jedinou možností další zpřesňování zadání dotace podzemní vody (výpočtů hydrologického modelu). Pro to bude nezbytné, na základě hromadných neshod měřených a modelových hladin podzemní vody, identifikovat výpočetní periody, ve kterých k odlišnému vývoji dochází a výpočetně je upravit. Náročnou alternativou k tomuto postupu je „opuštění“ hydrologického modelu a zadání optimalizované srážkové infiltrace výhradně na základě shody měřených a modelových hladin podzemní vody. Jedním z důvodů nepřesně zadané dotace (infiltrace) může být i vliv desítky metrů mocných, proměnlivě saturovaných zón.

Analýza nepřesností hydrologického modelu ve stanovení infiltrace do horninového prostředí spočívá v průběžné evidenci počtu neshod (vzestupu/poklesu) vývoje měřené a modelové hladiny podzemní vody v každém výpočetním kroku simulace. V případě významného nárůstu počtu vrtů, u nichž je trend vývoje modelové hladiny odlišný od pozorování, je daná výpočetní perioda z hlediska stanovení infiltrace pojata v hydrologickém modelu nepřesně. Chybovost modelových hladin je vykreslena poměrně v procentech (poměr vrtů s chybným trendem vývoje hladiny/celkový počet porovnávaných vrtů), protože od roku 2000 dochází k nárůstu počtu měřených hladin. Grafické znázornění této analýzy, pro období 1. 1. 2000 – 31. 12. 2020, pro varianty zadání infiltrace pro ÚPOV a HGR obsahuje obr. 9. Průměrná chybovost obou variant modelového výpočtu hladin ve srovnání s pozorováním je za vykreslené období velmi blízká (A: 29,1 %, B: 28,8 %). Chybovost v průběhu jednotlivých let pravidelně kolísá. K největším chybám v modelovém a pozorovaném vývoji hladin dochází především v období doplňování zásob podzemní vody (pozdní podzim, zima a jaro). Naopak v letních měsících s největší evapotranspirací a nejmenší pravděpodobností doplnění zásob podzemní vody, ve kterých dochází k poklesu hladiny podzemní vody ve všech vrtech, chybovost v trendu modelové hladiny podzemní vody obvykle klesá až téměř k nule.



Obr. 9 Porovnání chybovosti modelu postihnout pozorovaný trend vývoje hladiny podzemní vody při zadání infiltrace pro ÚPOV a HGR.
Fig. 9 Comparison of the error rate of the model to affect the observed trend of groundwater level development – input of infiltration according to ÚPOV and HGR.

Vyznačenou mez 50% chybovosti (případně vyšší hodnoty meze 60 %, 70 %) přesahuje modelový vývoj hladin jen v některých letech. Výrazně chybové trendy vývoje modelové hladiny podzemní vody se u obou variant zadání infiltrace vyskytují zejména v letech 2005 a 2012. Z předchozího období se výrazněji chybový vývoj hladin podzemní vody vyskytuje v letech 1991 a 1996.

5. Závěr

Sestavování modelů transientního proudění podzemní vody probíhá ve vazbě na dílčí cíle projektu Perun DC1.3 a DC1.4. Hlavním cílem DC 1.3 je vytvoření nové metodiky, která bude umožňovat hodnocení přírodních zdrojů podzemní vody ze vztahů mezi dotací podzemní vody (stanovené hydrologickým modelem Bilan), základním odtokem odvozeným různými přístupy a režimem podzemní vody v charakteristických vrtech státní pozorovací sítě ČHMÚ.

Transientní modely proudění podzemní vody byly v první polovině projektu PERUN použity pro modelové porovnání vztahu dvou hydrologických přístupů stanovení infiltrace ze srážek (modelem Bilan) a měřených hladin podzemní vody. Modelové simulace proudění podzemní vody ukázaly rozdíly měřených a modelových hladin vypočtených z odlišného zadání vstupní infiltrace. Z modelových výsledků jsou identifikovány jednotlivé měsíce s největší neshodou vývoje hladin podzemní vody, a tím i modelové infiltrace. Tyto informace mohou potenciálně sloužit k rekalibraci výpočtů hydrologického modelu Bilan tak, aby v kritických měsících infiltrace do podzemních vod lépe vyhovovala pro zadání infiltrace ze srážek do modelu proudění podzemní vody.

V další etapě prací budou modely transientního proudění podzemní vody rozvíjeny v návaznosti na každoročně měřená data a nově stanovované základní odtoky a infiltrace. V závěrečné fázi projektu PERUN budou do transientních modelů proudění podzemní vody zadány infiltrace získané z hydrologických modelů na základě klimatických scénářů budoucího vývoje, stanovených v rámci projektu Perun.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Změny ve vydatnosti pramenů na území Česka v letech 1971–2020
(Spring yield trends in Czechia between 1971 and 2020)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.22

Ondřej Ledvinka, Český hydrometeorologický ústav, Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, ondrej.ledvinka@chmi.cz
Anna Lamačová, Český hydrometeorologický ústav, Česká geologická služba, anna.lamacova@chmi.cz

Abstrakt: Pro analýzu vydatností pramenů v období 1971–2020 bylo vybráno 136 pramenů v 18 hydrogeologických oblastech (HGR). Byly vyhodnoceny měsíční, sezonní a roční trendy vydatnosti. Většina pramenů (71 %) nevykazovala v ročních vydatnostech žádné dlouhodobé trendy. Jakmile však byl identifikován statisticky významný trend, zmenšování vydatnosti (28 %) převažovalo nad zvětšováním (1,5 %). Roční časové řady u sedmi HGR vykazovaly významný klesající trend ($p < 0,05$). Při analýze ročních vydatností nebyl zjištěn rostoucí trend v žádném HGR.

Klíčová slova: podzemní voda – prameny – trendy – sucho

Abstract: 136 springs in 18 hydrogeological regions (HGR) were selected for analysis of spring yields during the period 1971–2020. Monthly, seasonal and annual trends in yield were evaluated. The majority of springs (71%) showed no long-term trends in annual yields. However, once a statistically significant trend was identified, decreasing yields (28%) outweighed increasing yields (1.5%). The annual time series for seven HGRs showed a significant decreasing trend ($p < 0.05$). When annual yields were analyzed, no increasing trend was found in any HGR.

Keywords: groundwater – springs – trends– drought

1. Úvod

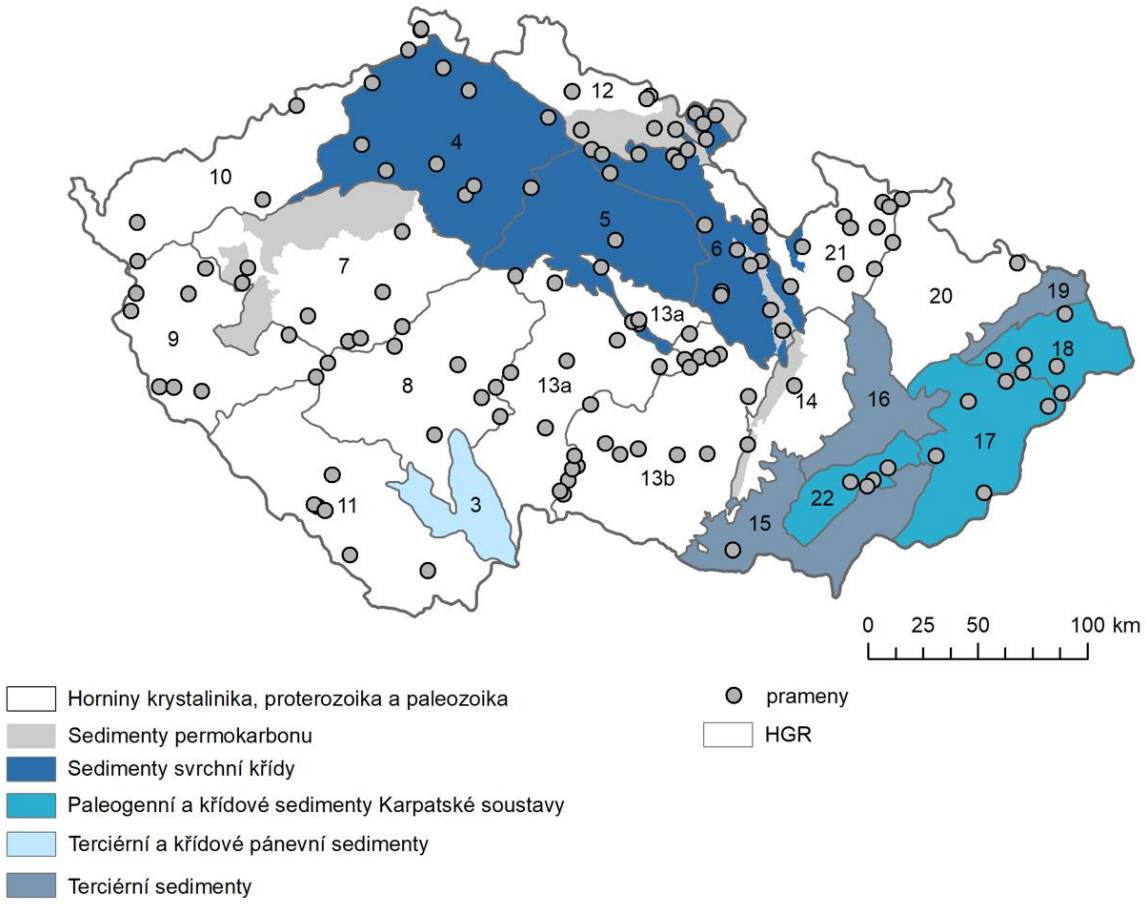
Prameny představují cenný zdroj informací o podzemních vodách. Nárůst teploty vzduchu ve střední Evropě v posledních desetiletích významně ovlivnil hydrologický cyklus, což způsobilo změny v hydrologickém režimu toků (Vlach et al. 2020; Zheng et al. 2021) a sezonnosti sněhu (Jenicek a Ledvinka 2020). Hlavním cílem této studie bylo zjistit statisticky významné trendy ve vydatnostech pramenů v Česku (obr. 1). Za tímto účelem byly testovány údaje 136 pramenů v rámci 18 hydrogeologických oblastí (HGR) za období 1971–2020. Dále byly výsledky porovnány s výsledky získanými v předchozí studii, která hodnotila trendy vydatnosti pramenů v období 1971–2007 (Ledvinka a Lamacova 2015), aby bylo možné zjistit, jak se sucho v letech 2015–2020 projevilo na režimu podzemních vod.

2. Data

Bylo vybráno 136 pramenů patřících do monitorovací sítě Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ). Vydatnost pramenů byla zpravidla měřena přímo na měrném přelivu (převážně konstruovaných jako Thomsonovy přelivy) pomocí kalibrované nádoby jednou týdně dobrovolnými pozorovateli. V posledních deseti letech byla přibližně polovina pramenů automatizována pomocí hladinoměru sbírajícího data v hodinových intervalech. Vodní stavy byly převedeny na vydatnosti pramenů pomocí měrných křivek pramenů a dále zpracovány pro získání denních časových řad. Abychom se vyhnuli nesrovnalostem mezi týdenními a denními intervaly měření na lokalitách, které byly automatizované, použili jsme každý týden denní hodnotu ze středy. Pro účely této studie pak byly vypočteny měsíční průměry pro každý

ze 136 pramenů, z nichž každý měl alespoň 30 let údajů v rámci období 1971–2020 (125 pramenů mělo alespoň 40 let údajů a 98 pramenů mělo alespoň 45 let údajů).

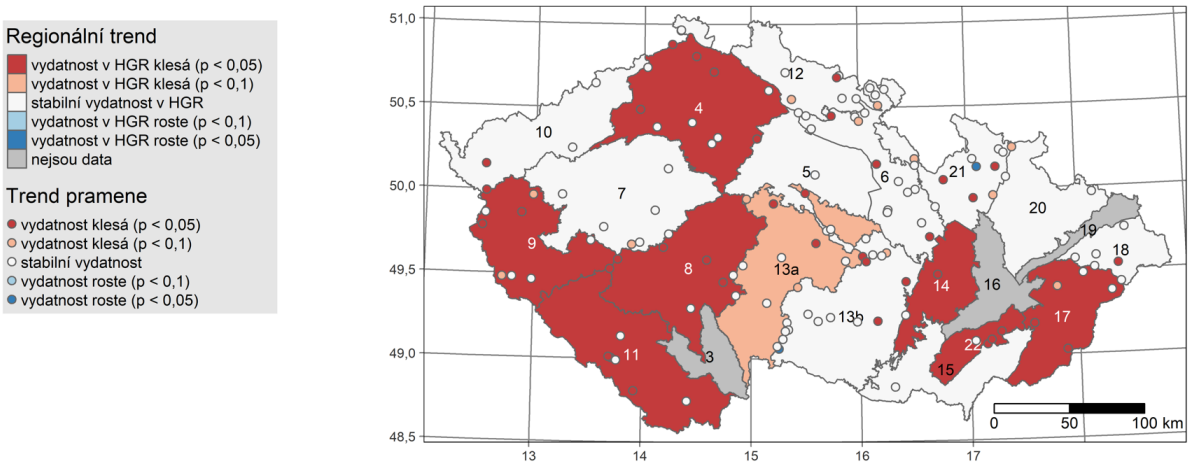
Meteorologické údaje (průměrná měsíční teplota vzduchu a měsíční úhrny srážek; 1971-2020) byly pro území HGR získány agregováním denních hodnot z gridů známých pod pracovním názvem GriSt_DenseNET. Podrobnosti o vzniku takových gridů lze nalézt v publikacích Štěpánek et al. (2013, 2011).



Obr. 1 Hydrogeologické oblasti (HGR) reprezentující různé litostratigrafické jednotky na území Česka se zobrazenými vybranými prameny.
Fig. 1 Hydrogeological regions (HGR) representing different lithostratigraphic units in Czechia, with the selected springs shown.

3. Metoda

Trendy na jednotlivých lokalitách byly testovány pomocí metody TFPW-MK (*Trend-Free Pre-Whitening Mann-Kendall Test*), Yue et al. (2002). Tato metoda zohledňuje autokorelaci ve smyslu autoregresního procesu se zpožděním jedna (AR(1)). Regionální trendy v rámci HGR byly hodnoceny modifikovanou metodou (Yue a Wang 2002), detailní popis metody je možné najít v publikaci Ledvinka a Lamacova (2015).



Obr. 2 Trendy v roční vydatnosti pramenů a hydrogeologických oblastí (HGR) za období 1971–2020.
Fig. 2 Annual spring yields trends at springs and hydrogeological regions (HGR) in the period of 1971–2020.

4. Závěr

Většina pramenů (71 %) nevykazovala v ročních vydatnostech žádné dlouhodobé trendy. Jakmile však byl identifikován statisticky významný trend, zmenšování vydatnosti (28 %) převažovalo nad zvětšováním (1,5 %). Ze sezonního hlediska se vydatnost zmenšovala především v létě (32 % pramenů), zatímco v ostatních ročních obdobích se vydatnost zmenšovala u 23–28 % pramenů. Na měsíční úrovni se vydatnost nejčastěji zmenšovala v květnu (43 % pramenů), červnu (38 %) a červenci (37 %), nejméně často v březnu (15 %) a únoru (18 %).

Roční časové řady u sedmi HGR vykazovaly významný klesající trend ($p < 0,05$). Při analýze ročních vydatností nebyl zjištěn rostoucí trend v žádné oblasti (obr. 2). Jarní zmenšení vydatnosti bylo nejčastější v hydrogeologických oblastech s krystalinickým podložím (5 z 9 HGR). Za zmínku však stojí signifikantní zmenšení vydatnosti v oblasti severočeské křídové pánve, neboť tato oblast představuje chráněnou oblast přirozené akumulace vod. Podobně jako u trendů na jednotlivých lokalitách se většina trendů na regionální úrovni projevila v létě (u 11 HGR) a nejméně v zimě (u 5 HGR).

Nebyly zjištěny žádné významné trendy ($p < 0,05$) ve srážkách na roční ani sezonní úrovni a na měsíční úrovni byly statisticky významné poklesy a nárůsty pouze ojedinělé a vyskytovaly se nahodile. Největší množství klesajících trendů se objevilo v dubnu ($N = 2$ HGR, $p < 0,05$), zatímco největší množství rostoucích trendů bylo pozorováno v květnu ($N = 2$ HGR, $p < 0,05$).

V porovnání s předchozí studií Ledvinky a Lamačové (2015), která hodnotila vydatnosti pramenů v období 1971 až 2007, se počet HGR s výrazně klesajícími regionálními trendy na roční, sezonní i měsíční úrovni výrazně zvýšil. V případě ročních vydatností se počet HGR zvýšil ze čtyř na sedm HGR ($p < 0,05$).

Teplota se významně zvyšovala na roční úrovni, na jaře, v létě a na podzim ve všech HGR; v zimě však nebyl zjištěn žádný významnější trend ($p < 0,05$). Významné zvýšení ($p < 0,05$) na měsíční úrovni bylo zjištěno v dubnu, červnu, červenci, srpnu a listopadu ve všech HGR a v květnu, září, říjnu a prosinci na úrovni $p < 0,1$ ve většině HGR. Nejvýznamnější teplotní trend byl zaznamenán v dubnových datech ($p < 0,0001$; pro všechny HGR, a to včetně těch, pro které nemohly být zjišťovány trendy ve vydatnosti pramenů). V období od ledna do března

však nebyly zjištěny žádné trendy, což lze přisoudit jak metodě zohledňující autokorelaci, tak zvolenému období.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

JENICEK, M., LEDVINKA, O., 2020. Importance of snowmelt contribution to seasonal runoff and summer low flows in Czechia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **24**, 3475–3491. https://doi.org/10.5194/hess-24-3475-2020

LEDVINKA, O., LAMACOVA, A., 2015. Detection of field significant long-term monotonic trends in spring yields. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **29**, 1463–1484. https://doi.org/10.1007/s00477-014-0969-1

ŠTĚPÁNEK, P., ZAHRADNÍČEK, P., FARDA, A., 2013. Experiences with data quality control and homogenization of daily records of various meteorological elements in the Czech Republic in the period 1961–2010. *Idojaras*, **117**, 123–141.

ŠTĚPÁNEK, P., ZAHRADNÍČEK, P., HUTH, R., 2011. Interpolation techniques used for data quality control and calculation of technical series: an example of a Central European daily time series. *Idojaras*, **115**, 87–98.

VLACH, V., LEDVINKA, O., MATOUSKOVA, M., 2020. Changing low flow and streamflow drought seasonality in Central European headwaters. *Water*, **12**, 3575. https://doi.org/10.3390/w12123575

YUE, S., PILON, P., PHINNEY, B., CAVADIAS, G., 2002. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, **16**, 1807–1829. https://doi.org/10.1002/hyp.1095

YUE, S., WANG, C. Y., 2002. Regional streamflow trend detection with consideration of both temporal and spatial correlation. *International Journal of Climatology*, **22**, 933–946. https://doi.org/10.1002/joc.781

ZHENG, W., LAMAČOVÁ, A., YU, X., KRÁM, P., HRUŠKA, J., ZAHRADNÍČEK, P., ŠTĚPÁNEK, P., FARDA, A., 2021. Assess hydrological responses to a warming climate at the Lysina Critical Zone Observatory in Central Europe. *Hydrological Processes*, **35**, 14281. https://doi.org/10.1002/hyp.14281

Plošné návrhové srážky v českých povodích
(Design precipitation in Czech river basins)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.23

Miloslav Müller, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, muller@ufa.cas.cz
Marek Kašpar, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., kaspar@ufa.cas.cz
Filip Hulec, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, hulec@ufa.cas.cz

Abstrakt: Data o srážkové intenzitě na území Česka s horizontálním rozlišením 1 km^2 a časovým krokem 10 minut, získaná adjustací radarových odhadů daty ze srážkoměrných stanic, posloužila k odvození návrhových plošných srážek v českých povodích I. až IV. řádu a v povodích útvarů povrchových vod. Při zdvojnásobení doby akumulace srážky vzroste návrhový úhrn v jednotlivých pixelech v průměru o cca 20 %. S rostoucí plochou povodí velikost návrhových úhrnů klesá, a to především v případě kratších dob akumulace.

Klíčová slova: návrhové srážky – doba opakování – povodí

Abstract: Data on rainfall intensity on the territory of the Czech Republic with a horizontal resolution of 1 km^2 and a time step of 10 minutes, obtained by adjusting radar estimates with data from rain gauge stations, were used to derive design areal precipitation in the Czech river basins of 1st to 4th order and in the basins of surface water bodies. When the rainfall accumulation time is doubled, the design precipitation total in individual pixels increases by about 20% on average. The magnitude of the design totals decreases with increasing catchment area, especially for shorter accumulation periods.

Keywords: design precipitation – return period – catchment

1. Úvod

Pro vodohospodářskou praxi jsou zásadními údaji tzv. návrhové veličiny, tedy hodnoty příslušné veličiny, které se v určitém místě nebo povodí vyskytnou s danou pravděpodobností. Hlavní takto vyhodnocovanou veličinou je průtok, neméně důležité jsou však i návrhové úhrny srážek. K vyjádření návrhových veličin je využíván koncept *N*-letosti, kdy např. 100letý úhrn srážek se v daném místě či povodí opakuje v průměru jednou za 100 roků; pravděpodobnost jeho výskytu v určitém roce je pak rovna převrácené hodnotě *N*, tedy 0,01.

Vyhodnocení návrhových srážek je značně obtížné vzhledem ke kumulativní povaze tohoto meteorologického prvku, proto se řeší pro různě dlouhé časové úseky. Vzhledem k dostupnosti dat jde nejčastěji o návrhové denní úhrny, které pro české stanice zpracovali např. Šamaj et al. (1985). Pro nejrůznější aplikace jsou však zpravidla důležitější návrhové úhrny za kratší časové úseky, kterým se věnoval již Trupl (1958). K jejich zpracování se v poslední době začaly využívat i odhady srážkových intenzit z meteorologických radarů (Haberlandt a Berndt 2016), které byly využity i při nedávném vyčíslení návrhových srážek v ČR (Kavka, Kašpar et al. 2023). Druhým důležitým aspektem je prostorová variabilita srážek, takže kromě bodových odhadů návrhových úhrnů je třeba vyhodnocovat také návrhové plošné srážky, kterým je věnován tento článek.

2. Data a metody

Výchozím datovým souborem byla data radarové odrazivosti v nadmořské výšce 2000 m n. m. (produkt pseudo-CAPPI 2 km), která pokrývají dvacet bezmrazových období od dubna do

října (2002 až 2021) s časovým rozlišením 10 minut a horizontálním rozlišením 1 km. Intenzity srážek byly odhadnuty pomocí standardního Z-R vztahu a poté adjustovány denními úhrny srážek ze srážkoměrných stanic ČHMÚ. Zvolený adjustační algoritmus podle Sokola (2003) nejdříve plošně adjustuje denní úhrny odvozené z radarových dat tak, aby v pixlech se srážkoměrnými stanicemi odpovídaly staničním denním úhrnům. Takto plošně adjustované denní úhrny dále adjustuje lokálně v jednotlivých pixelech úhrny naměřenými na nejbližších stanicích se započtením proměnných vah podle vzdálenosti příslušných stanic. Nakonec získané adjustované denní úhrny rozděluje do desetiminutových intenzit podle časového průběhu radarové odrazivosti.

Z 10minutových intenzit srážek v pixlech o velikosti 1 km^2 byly stanoveny úhrny srážek za časové úseky od 30 minut do 3 dnů, a to klouzavě pro všechna časová okna studovaného 20letého období. Následně byly vypočteny plošné průměry těchto úhrnů v povodích od IV. do I. řádu a v povodích útvarů povrchových vod (ÚPV). Ty byly podrobeny frekvenční analýze pomocí tříparametrického zobecněného rozdělení extrémních hodnot (GEV), jehož parametry byly odvozeny metodou *L*-momentů z ročních maxim plošných srážkových úhrnů na povodí. Pomocí parametrů GEV pak byly stanoveny návrhové plošné úhrny srážek ve všech uvažovaných povodích a pro všechny uvažované doby akumulace.

3. Výsledky

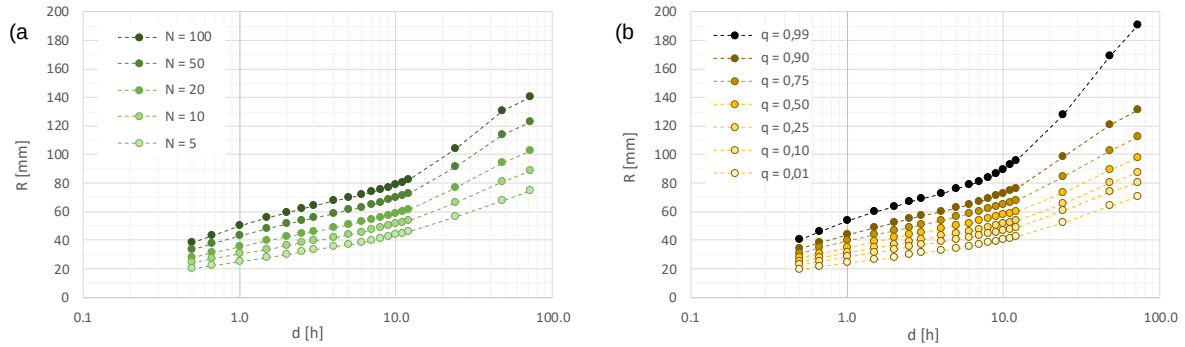
Velikost návrhové plošné srážky na povodí je určována trojicí hlavních parametrů, totiž uvažovanou dobou akumulace srážky, zvolenou dobou opakování a plochou povodí, dále pak jeho fyzicko-geografickými poměry, které navíc mohou mít různý vliv na srážková maxima o různé době trvání. Proto nejprve představíme odhady návrhových srážek pro pixely o velikosti 1 km^2 a dále se budeme věnovat plošným odhadům pro zvolenou dobu opakování N = 20 roků.

3.1 Návrhové srážky v pixelech o velikosti 1 km^2

Návrhové úhrny srážek na plochu o velikosti 1 km^2 s dobou opakování 5 roků činí v průměru např. 25 mm a 56 mm pro hodinovou, resp. 24hodinovou dobu akumulace (obr. 1a). Při zvýšení uvažované doby opakování z 5 na 100 roků vzrostou odhady přibližně na dvojnásobek, přičemž poměr mezi hodinovým a 24hodinovým návrhovým úhrnem zůstává přibližně stejný.

U různě dlouhých návrhových úhrnů lze vyčíslit, jak roste velikost úhrnu s rostoucí dobou akumulace, např. při jejím zdvojnásobení. K nejmenšímu nárůstu návrhových úhrnů dochází mezi 3hodinovým a 6hodinovým úhrnem s velkou dobou opakování, kdy u 100leté srážky vzroste hodnota pouze o cca 11 %. To svědčí o značném vlivu vysokých krátkodobých intenzit na extrémní úhrny o délce vyšších jednotek hodin. Naopak mezi 12hodinovým a 24hodinovým návrhovým úhrnem je nárůst znatelně větší (27 %).

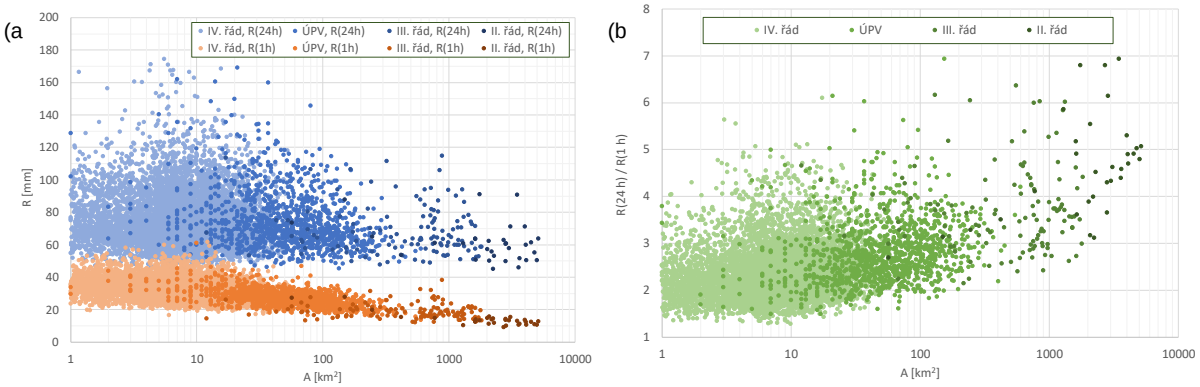
Mezi jednotlivými pixely jsou nicméně značné rozdíly, a to především pro delší doby akumulace srážek a delší uvažované doby opakování (obr. 1b). Např. v případě 24hodinového úhrnu s dobou opakování 20 roků je kvantil $q_{0,99}$ rozdělení těchto hodnot v rámci ČR 2,4násobkem kvantilu $q_{0,01}$, v případě doby opakování 100 roků jde dokonce o 3,5násobek. Jedno procento území ČR by pak mělo být v průměru jednou za 100 roků zasaženo srážkou s 24hodinovým úhrnem přesahujícím 200 mm. V případě těchto nejexponovanějších oblastí je navíc obzvlášť výrazné prohnutí křivky závislosti návrhových úhrnů na době akumulace, kdy mezi 12hodinovým a 24hodinovým návrhovým úhrnem je nárůst dokonce o 33 %, což naznačuje významný podíl trvalých srážek na delších extrémních úhrnech.



Obr. 1 Návrhové úhrny srážek R *[mm] s různou dobou akumulace* d *[h] v pixelech o velikosti 1 km²: (a) průměrné návrhové úhrny s různou dobou opakování* N *[roky]; (b) vybrané kvantily rozdělení návrhových úhrnů v jednotlivých pixelech pro N = 20 roků.*
Fig. 1 Design precipitation totals R *[mm] of various duration* d *[h] in 1 km² pixels: (a) mean design totals with various return periods N [years]; (b) selected quantilies of the distribution of design totals in individual pixels for N = 20 years.*

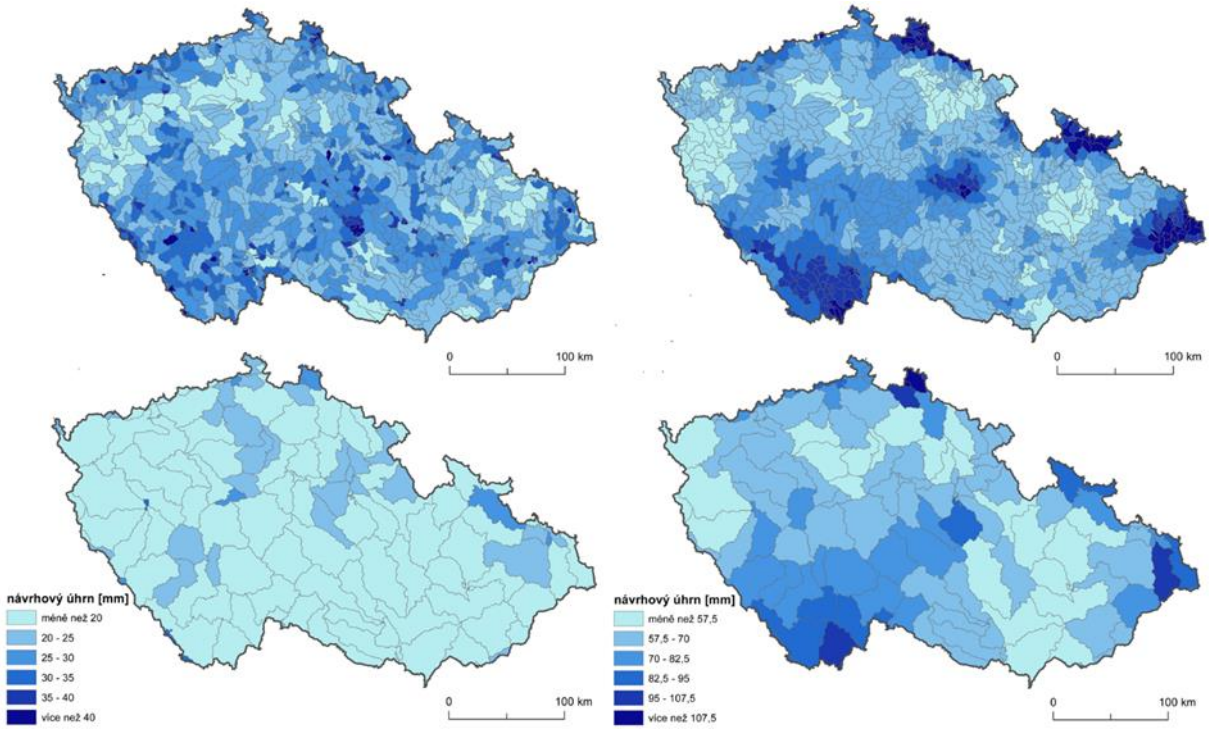
3.2 Návrhové srážky na povodí

S rostoucí plochou povodí návrhové plošné úhrny srážek v průměru klesají, a to pro všechny doby akumulace (obr. 2a). Zatímco pro nejmenší povodí dosahují hodinové úhrny s dobou opakování 20 roků v průměru 36 mm, na povodí o ploše 1000 km² je návrhový úhrn přibližně poloviční. Pokles je znatelný i v případě delší doby akumulace srážek, není nicméně zdaleka tak výrazný (v uvedeném případě jen cca o 20 %). Výsledkem jsou obecně větší podíly mezi návrhovými srážkovými úhrny s delší a s kratší dobou akumulace ve větších povodích (obr. 2b).



Obr. 2 (a) Návrhové hodinové a 24hodinové plošné úhrny srážek R *[mm] s dobou opakování N = 20 roků pro povodí II. až IV. řádu a útvarů povrchových vod (ÚPV) o různé ploše A [km²]; (b) podíly příslušných 24hodinových a hodinových návrhových srážkových úhrnů na různě velkých povodích.*
Fig. 2 (a) Design 1-hour and 24-hour areal precipitation totals R *[mm] with a return period of N = 20 years for catchments of the 2nd, 3rd, and 4th order and of surface water bodies, with area* A *[km²]; (b) ratio between the respective 24-hour and 1-hour design precipitation totals at various catchment sizes.*

Příklady prostorového rozdělení návrhových plošných úhrnů srážek jsou zobrazeny v obr. 3. Je z něj patrná značná prostorová neuspořádanost v případě návrhových hodinových úhrnů, kde zjevně hraje důležitou roli velkost povodí. V případě návrhových 24hodinových úhrnů je tento faktor vedlejší; jako zásadní se jeví vliv topografie, přičemž největší úhrny se vyskytují nejen na horách, ale i v jejich předpolí.



Obr. 3 Návrhové plošné úhrny srážek s dobou opakování 20 roků, s délkami trvání 1 h (vlevo) a 24 h (vpravo) a pro útvary povrchových vod (nahoře) a povodí III. řádu (dole).
Fig. 3 Design areal precipitation totals with a return period of 20 years: 1-hour totals (left) and 24-hours totals (right). Values for catchments of surface water bodies and for catchments of the 3rd order are depicted at the top and bottom, respectively.

4. Závěr

Studie prokázala možnosti využití adjustovaných radarových dat k odhadům návrhových plošných srážek v českých povodích. Vzhledem k 20leté datové řadě jsou návrhové úhrny vyšších dob opakování zatíženy nejistotou, která se uplatňuje především v případě krátkodobých úhrnů v řádu jednotek hodin. Přes toto omezení bude možné využít získané výstupy ve vodohospodářské praxi. Dalším potenciálním využitím je validace návrhových srážek počítaných z výstupů klimatologických modelů, které i vzhledem k horizontálnímu rozlišení modelů musí mít plošný charakter.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

HABERLANDT, U., BERNDT, C., 2016. The value of weather radar data for the estimation of design storms – an analysis for the Hannover region. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, **373**, 81–85.

KAVKA, P., KAŠPAR, M., CRHOVÁ, L., PAVEL, M., MÜLLER, M., BLIŽŇÁK, V., HULEC, F., STROUHAL, L., LANDA, M., WEYSKRABOVÁ, L., KUBÁT, J. F., STEHLÍK, M., PECHA, M., SVOBODA, V., 2023. Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině. České vysoké učení technické, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., Sweco Hydroprojekt, a.s., Praha, 69 s.

ŠAMAJ, F., VALOVIČ, Š., BRÁZDIL, R., 1985. Denné úhrny zrážok s mimoriadnou výdatnosťou v ČSSR v období 1901–1980. *Zborník prác SHMÚ*, **24**, 9–113.

TRUPL, J., 1958. Intensity krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy. Výzkumný ústav vodohospodářský, Praha, 76 s.

Historický vývoj hladin podzemní vody ve vybraných oblastech
(Historical development of groundwater levels in selected areas)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.24

Ondřej Nol, Česká geologická služba, ondrej.nol@geology.cz
Martin Zrzavecký, Český hydrometeorologický ústav, martin.zrzavecky@chmi.cz

Abstrakt: Kolísání hladin podzemní vody se na území ČR vyznačuje různým podílem sezónního kolísání, dlouhodobého trendu v kolísání hladin podzemní vody a rychlostí reakce na výrazné dotační epizody. V rámci jednoho hydrogeologického rajonu se stejnými hydrogeologickými poměry se tak nacházejí vrty s velmi odlišným kolísáním hladin podzemní vody. Jeden hydrogeologický rajon je tedy velmi obtížné popsat jedním typem charakteristického kolísání hladin podzemní vody, které popisuje dynamiku kolísání hladin podzemní vody v hydrogeologickém rajonu. Na druhou stranu různě od sebe vzdálené hydrogeologické rajony v odlišných geologických prostředích mají velmi podobné kolísání hladin podzemní vody. Z těchto důvodů všechny vrty pozorovací sítě ČHMÚ byly rozděleny do 4 hlavních skupin: skupina s převažujícím sezónním kolísáním hladiny podzemní vody, s dlouhodobým trendem kolísání hladiny podzemní vody, skupina dlouhodobě ovlivněných vrtů v hydrogeologických rajonech hlubinné vrstvy a skupina vrtů, které byly vyloučeny z hodnocení hladin podzemní vody. Uvedené zatřídění umožnilo porovnání vývoje hladin podzemní vody v různých oblastech s důrazem na chování hladin podzemní vody v posledních letech.

Klíčová slova: podzemní voda – kolísání hladin podzemní vody

Abstract: Fluctuations in groundwater levels in the Czech Republic are characterized by a different proportion of seasonal fluctuations, a long-term trend in fluctuations in groundwater levels and the speed of reaction to significant recharge episodes. Within one hydrogeological region with the same hydrogeological conditions, there are thus wells with very different fluctuations in groundwater levels. It is therefore very difficult to describe one hydrogeological region with one type of characteristic fluctuation of groundwater levels, which describes the dynamics of fluctuations of groundwater levels in the hydrogeological region. On the other hand, hydrogeological regions at different distances from each other in different geological environments have very similar fluctuations in groundwater levels. For these reasons, all wells of the ČHMÚ observation network were divided into 4 main groups: a group with predominant seasonal fluctuations in the groundwater level, with a long-term trend of fluctuations in the groundwater level, a group of long-term affected wells in the hydrogeological regions of the deep layer, and a group of wells that were excluded from the evaluation underground levels. The above-mentioned classification made it possible to compare the development of groundwater levels in different areas with an emphasis on the behaviour of groundwater levels in recent years.

Keywords: groundwater – groundwater level fluctuation

1. Úvod

Kolísání hladin podzemní vody na celé pozorovací síti ČHMÚ se odlišuje různým podílem sezónního kolísání, dlouhodobého trendu v kolísání hladin podzemní vody a rychlostí reakce na výrazné dotační epizody (Nol a Zrzavecký 2022). V jednom hydrogeologickém rajonu lze nalézt vrty s převažujícím sezónním kolísáním ale i vrty, které jsou bez sezónního kolísání a reagují na výrazné dotační epizody často i s víceletým značným zpožděním. Měřené vrty jsou

dále ovlivňovány vnějšími vlivy jako například různě dlouhými odběry podzemní vody v jejich okolí, stárnutím vrtu a změnou způsobu měření a vyhodnocování, které vedou k více či méně zřetelným hladinovým skokům a propadům hladiny podzemní vody. Ty omezují nebo dokonce znemožňují srovnávání aktuálních stavů hladin podzemní vody s historickými záznamy kolísání hladin podzemní vody. Proto byly pro každou skupinu vrtů hledány vrty s charakteristickým kolísáním, který nejlépe odráží kolísání hladin podzemní vody pro danou skupinu vrtů a dovolují porovnat kolísání hladin podzemní vody v odlišných hydrogeologických prostředích.

2. Klasifikace kolísání hladin podzemní vody na celé pozorovací síti ČHMÚ

Všechny vrty byly podle výskytu dlouhodobého a sezónního kolísání hladin podzemní vody a rychlosti reakce na významné dotační epizody rozděleny do 4 hlavních skupin: skupina s převažujícím sezónním kolísáním hladiny podzemní vody, s dlouhodobým trendem kolísání hladiny podzemní vody, skupina dlouhodobě ovlivněných vrtů v hydrogeologických rajonech hlubinné vrstvy a skupina vrtů, které byly vyloučeny z hodnocení hladin podzemní vody z důvodu obtížně interpretovatelného kolísání hladiny podzemní vody (Nol a Zrzavecký 2022).

Na záznamu hladin podzemní vody některých vrtů není prakticky patrný dlouhodobý trend v sezónních minimech hladiny podzemní vody. Tyto vrty s víceméně konstantní (stagnující) úrovní sezónních minim hladiny podzemní vody byly zařazeny do skupiny A1. Od dílčí skupiny vrtů A2 a výše se začíná ve zvyšující míře projevovat přítomnost dlouhodobého trendu v sezónních minimech hladiny podzemní vody. V dílčích skupinách s vyšším pořadovým číslem postupně roste přítomnost dlouhodobého trendu, které ve skupině A6 již naprosto převažuje (obr. 1 a 3). Stagnující sezónní maxima hladin podzemní vody jsou hlavním rysem skupiny vrtů A7.

Dílčí členění bylo vytvořeno i ve skupině vrtů s převažujícím dlouhodobým trendem, protože zde se záznamy hladin podzemní vody liší v rychlosti jejich odezvy nárůstu hladiny podzemní vody po významné dotační epizodě. Vrty skupiny B1 mají zpravidla pouze dlouhodobý trend v kolísání hladin podzemní vody bez významnějšího zpoždění oproti dotační epizodě (obr. 5). Na vrtech skupiny B3 je již patrná opožděná reakce hladin podzemní vody (obr. 7). Na hladinách podzemní vody se projevují pouze nejvýznamnější dotační epizody s 1–2 letým zpožděním na zvýšenou dotaci do podzemní vody. Skupiny vrtů B4 mají pouze velmi pozvolný dlouhodobý trend v kolísání hladin podzemní vody s velmi opožděnou reakcí na podzemní vody (obr. 9). Vrty se vyznačují nárůstem hladin podzemní vody po výrazné dotaci v roce 2010 a poklesem hladin podzemní vody na přelomu let 2015/2016.

Stejným způsobem podle odezvy na čerpání nebo zatápění byla rozčleněna i skupina dlouhodobě ovlivněných vrtů v hydrogeologických rajonech hlubinné vrstvy a vrty bez identifikovatelného trendu kolísání hladin podzemní vody nebo s neinterpretovatelným kolísáním hladin podzemní vody pro potřeby hodnocení přírodních zdrojů byly zařazeny do skupiny vrtů D1.

3. Historický vývoj hladin podzemní vody pro vybrané skupiny vrtů

V hodnocení historického vývoje hladin podzemní vody byly využity skupiny vrtů se zřetelným a výrazným dlouhodobým trendem v kolísání hladin podzemní vody – skupiny vrtů A6, B1, B3 a B4. V rámci porovnávání vývoje hladin podzemní vody byly hledány společné znaky chování hladin podzemní vod pro jednotlivé skupiny mezi odlišnými hydrogeologickými rajony, které

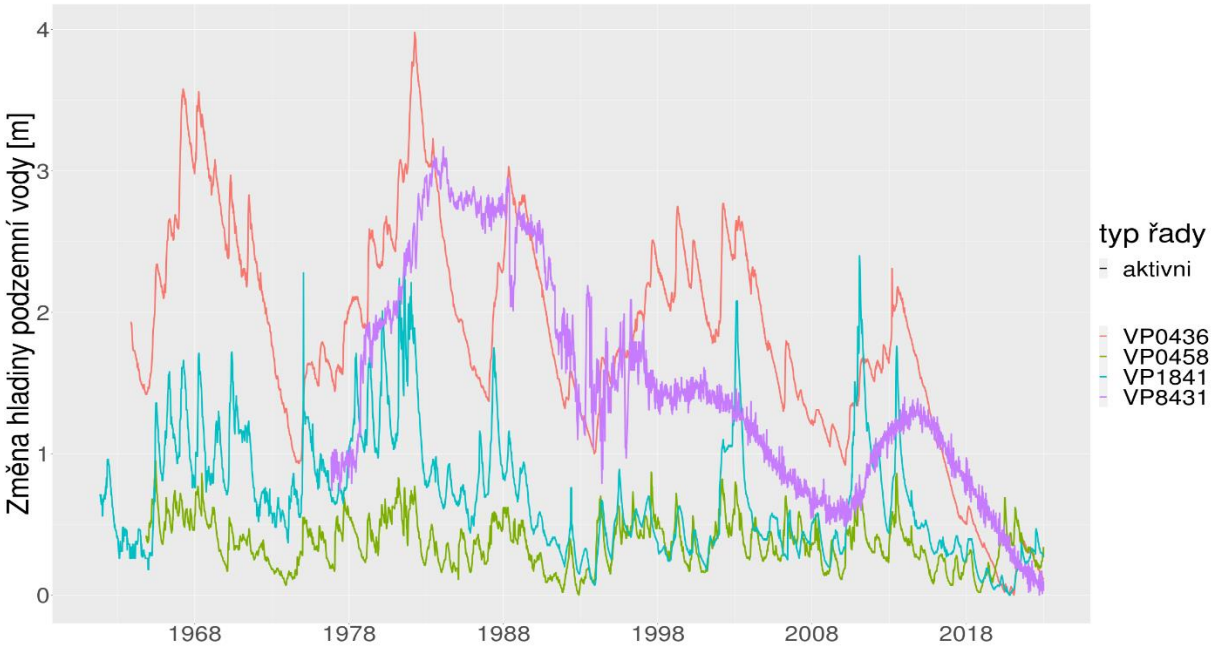
zároveň ověřují výběr charakteristického vrtu nebo charakteristického chování hladin podzemní vody.

Pro vrty skupiny A6, u kterých je ještě patrný roční chod kolísání hladin podzemní vody s výrazným dlouhodobým trendem v kolísání hladin podzemní vody, lze období 1994–2015 považovat převážně za průměrná až nadprůměrná (obr. 3). Naopak období 1990–1994 a v období 2015–2020 jsou zřetelně podprůměrná, často se sezónním minimem hladiny podzemní vody v roce 2018. Potom následuje v letech 2021–2022 růst hladin podzemní vody doprovázený poklesem hladin podzemní vody v letech 2022–2023. Zpravidla není zřetelné, zda hladiny podzemní vody jsou v období 1990–1994 níže či výše než v letech 2015–2020 (obr. 3). Vybrané charakteristické vrty pro tuto skupinu ukazují velmi podobné kolísání hladin podzemní vody mezi vrty podél Dyje, Moravy a Labe (obr. 4). Obdobný charakter kolísání je obvyklý i na řadě míst v České republice, vyjma oblastí např. ve východních Čechách (podorlická křída, vysokomýtská synklinála a ústecká synklinála), kde hladiny podzemní vody jsou v období 1990–1994 níže než v období 2015–2020 a rozkyv sezónního kolísání hladin podzemní vody je zde řádově vyšší.

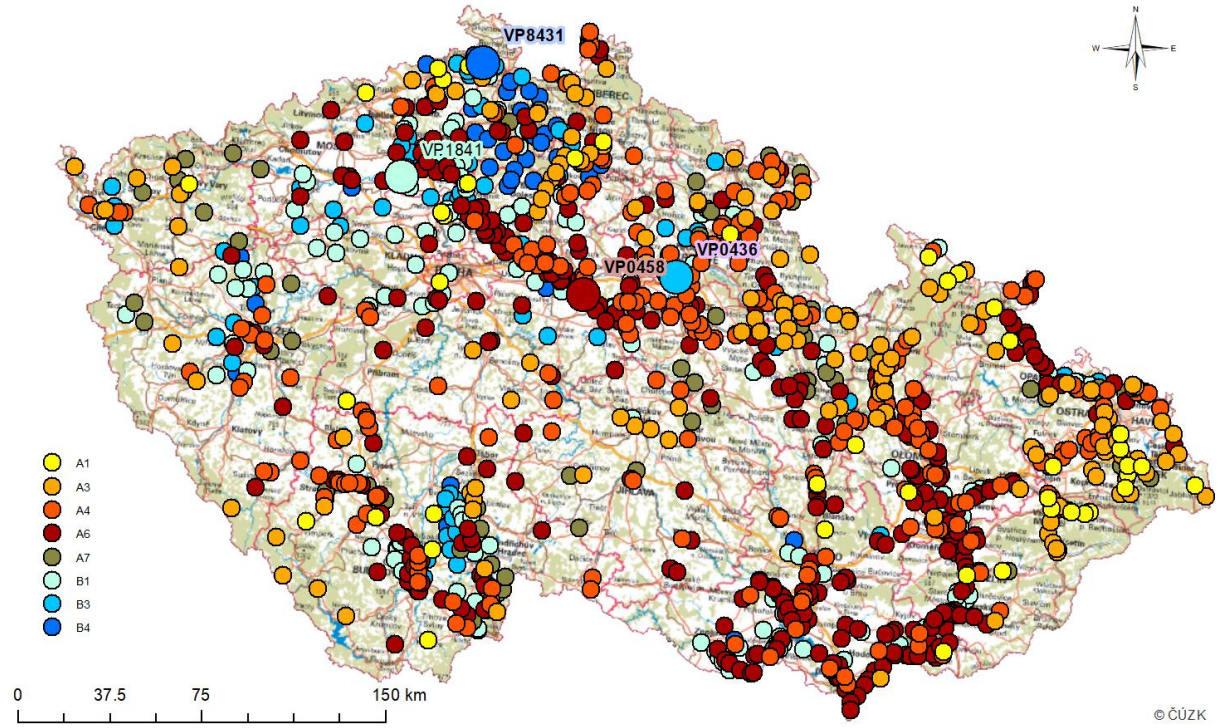
U vybraných charakteristických vrtů skupiny B1, kde je již sezónní chod kolísání velmi zanedbatelný, jsou výrazné dotace v letech 1996–1999, 2001–2002, 2006, 2010–2011 a 2013 (obr. 5). Po období dotace následuje pozvolnější pokles hladin podzemní vody než v případě předchozí skupiny A6. Na těchto vrtech jsou historická minima hladin podzemní vody zpravidla zastižena v letech 2019 – 2020, kdy hladiny podzemní vody se nachází nepatrně níže než v období 1990 – 1994. Vybrané charakteristické vrty se mohou lišit v přítomnosti jednotlivých dotačních období a jejich velikosti, nicméně mezi lety 2013–2022 vykazují velmi podobný vývoj v české křídové pánvi, v jihočeských pánvích, v sedimentech podél Moravy a Dyje.

Na vrtech skupiny B3 s výrazněji zpožděnou odezvou hladiny podzemní vody se projevují pouze nejvýznamnější dotace. Kromě nejvyšších stavů hladin podzemní vody v sedmdesátých a osmdesátých letech minulého století se projevují v historických záznamech nadprůměrná období 1996–2004 a 2010–2014 s výrazným historickým minimem hladin podzemní vody na přelomu let 2020/2021, po kterém následuje nepatrný růst hladin podzemní vody (obr. 7). Takovéto vrty se nacházejí na území české křídové pánve, plzeňské pánve a jihočeských pánví (obr. 8).

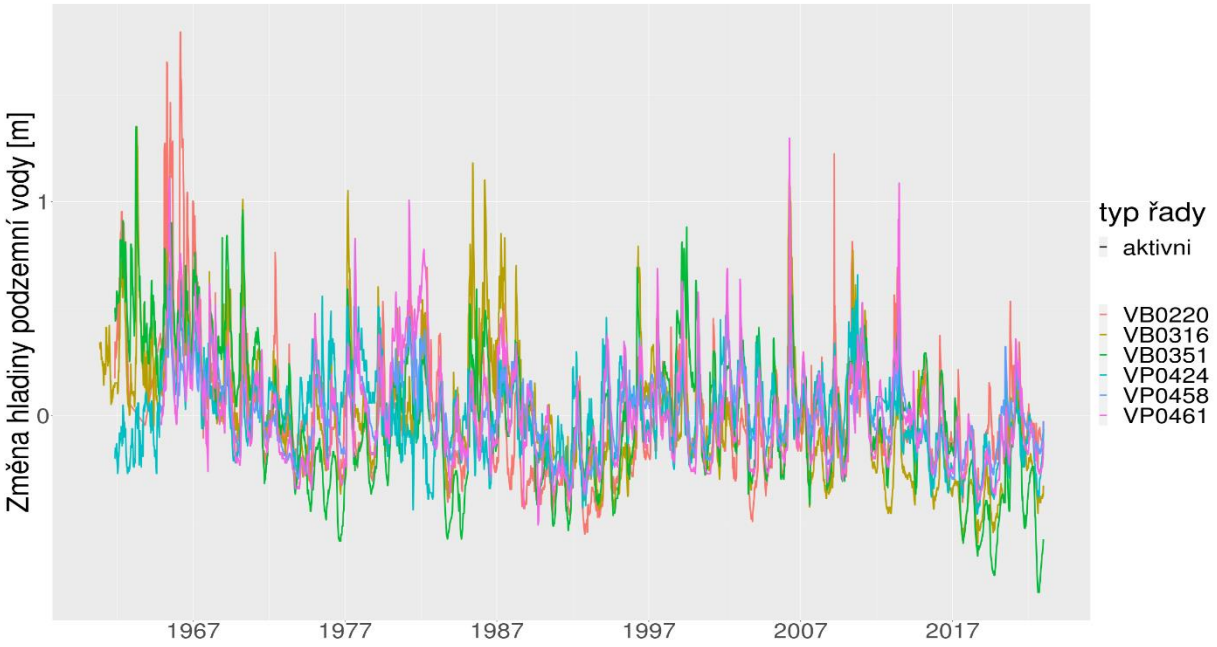
U vrtů s nejzpožděnější reakcí na výraznou dotaci do podzemní vody dochází mezi lety 1983–2010 k postupnému poklesu hladin podzemní vody. Od 2010 do 2015 hladina podzemní vody roste a následně klesá až do současnosti na historické minimum. Obr. 9 ukazuje výbornou shodu mezi kolísáním hladin podzemní vody v různých částech české křídové pánve a v manětínské pánvi (obr. 10).



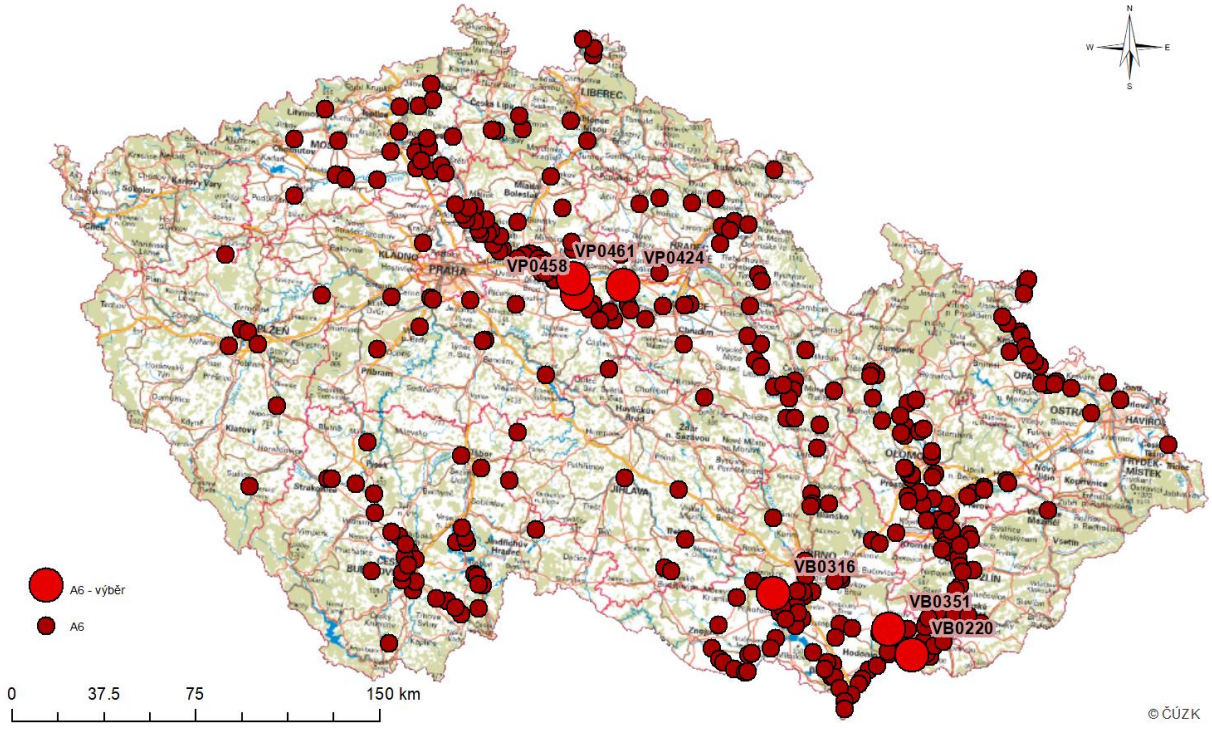
Obr. 1 Kolísání hladin podzemní vody – příklady skupin vrtů A6 (VP0458, zelená čára), B1 (VP1841, tyrkysová čára), B3 (VP0436, červená čára) a B4 (VP8431, fialová čára).
Fig. 1 Groundwater levels fluctuation – examples of well groups A6 (VP0458, green line), B1 (VP1841, turquoise line), B3 (VP0436, red line) and B4 (VP8431, purple line).



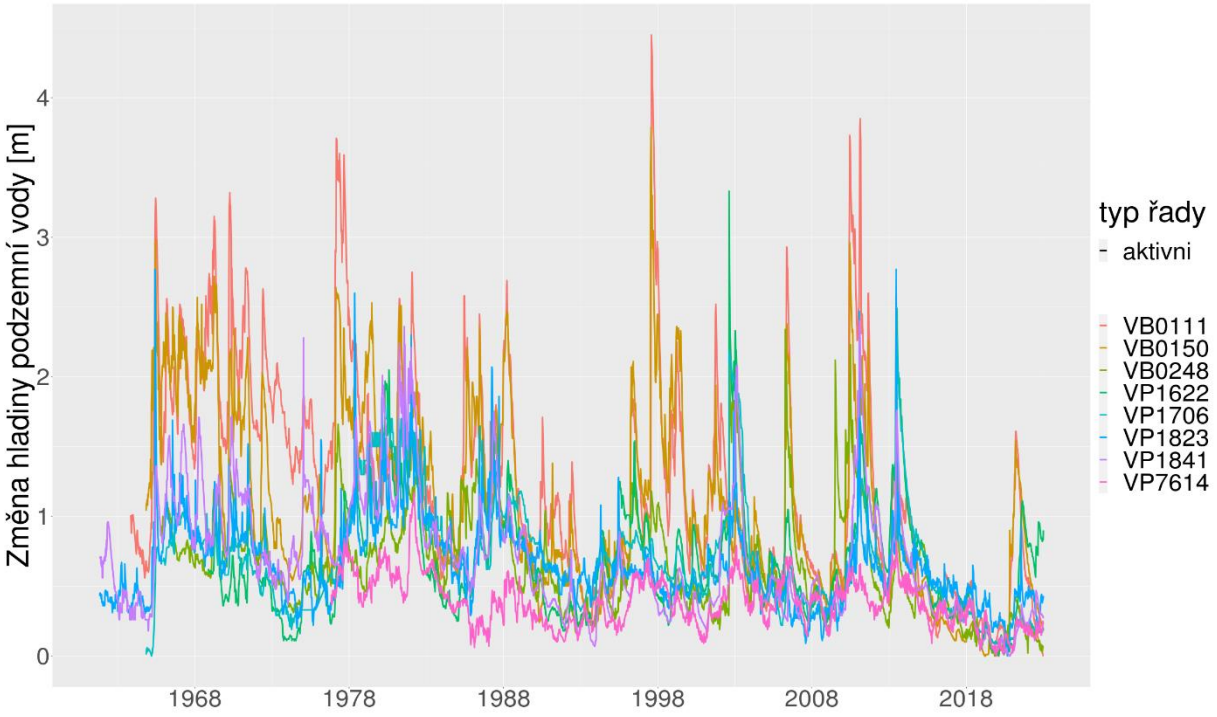
Obr. 2 Klasifikace vrtů do jednotlivých skupin a umístění vrtů z obr 1.
Fig. 2 Classification of wells into individual groups and locations of wells on Fig. 1.



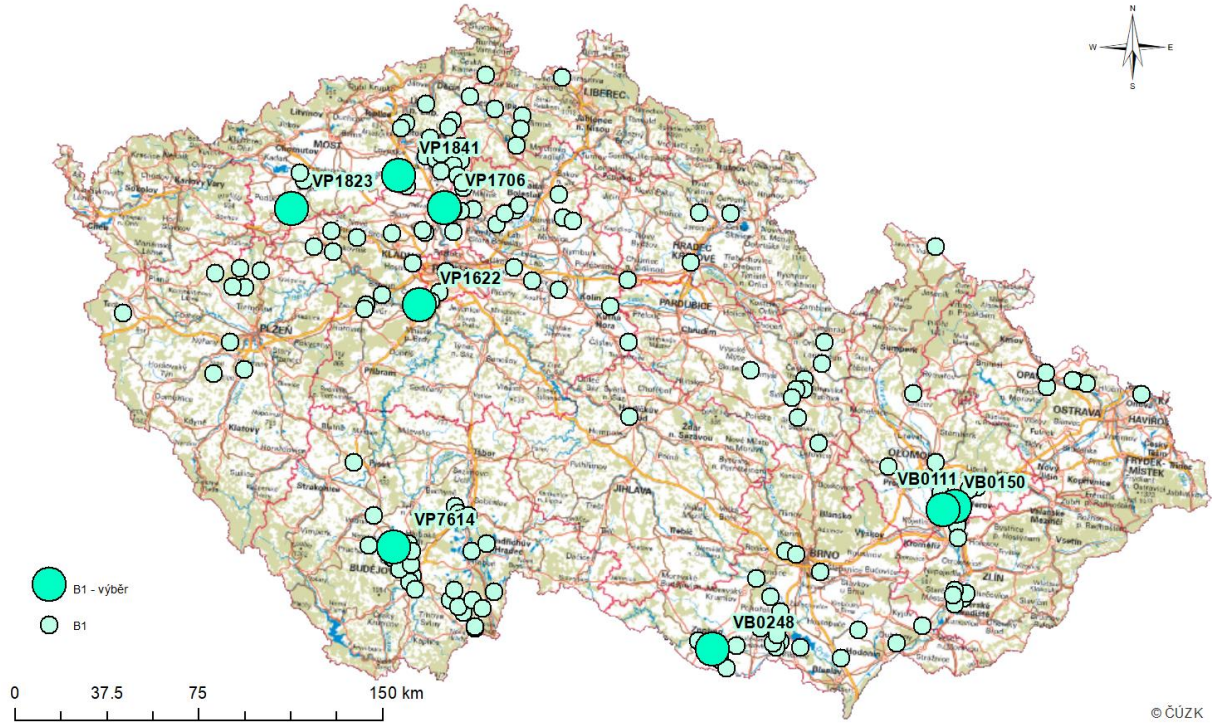
Obr. 3 Kolísání hladin podzemní vody – skupina A6.
Fig. 3 Groundwater levels fluctuation – group A6.



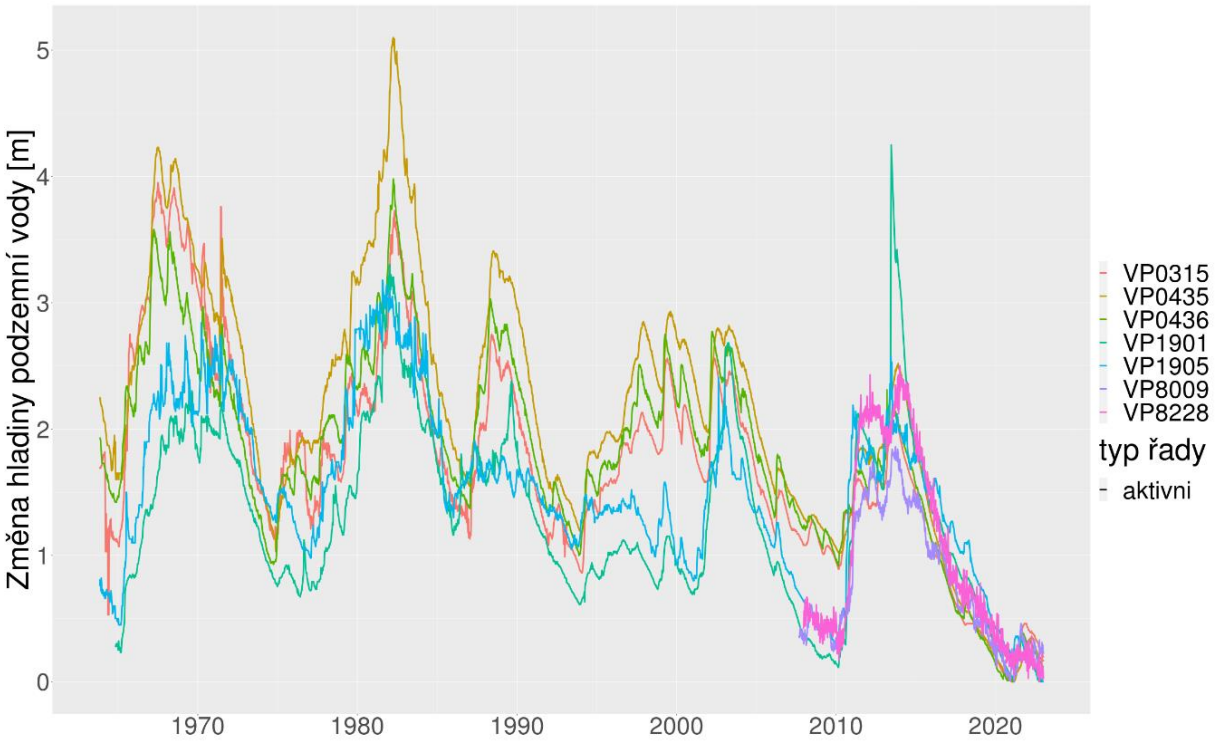
Obr. 4 Klasifikace vrtů do jednotlivých skupin a umístění vrtů z obr 3.
Fig. 4 Locations of wells on Fig. 3.



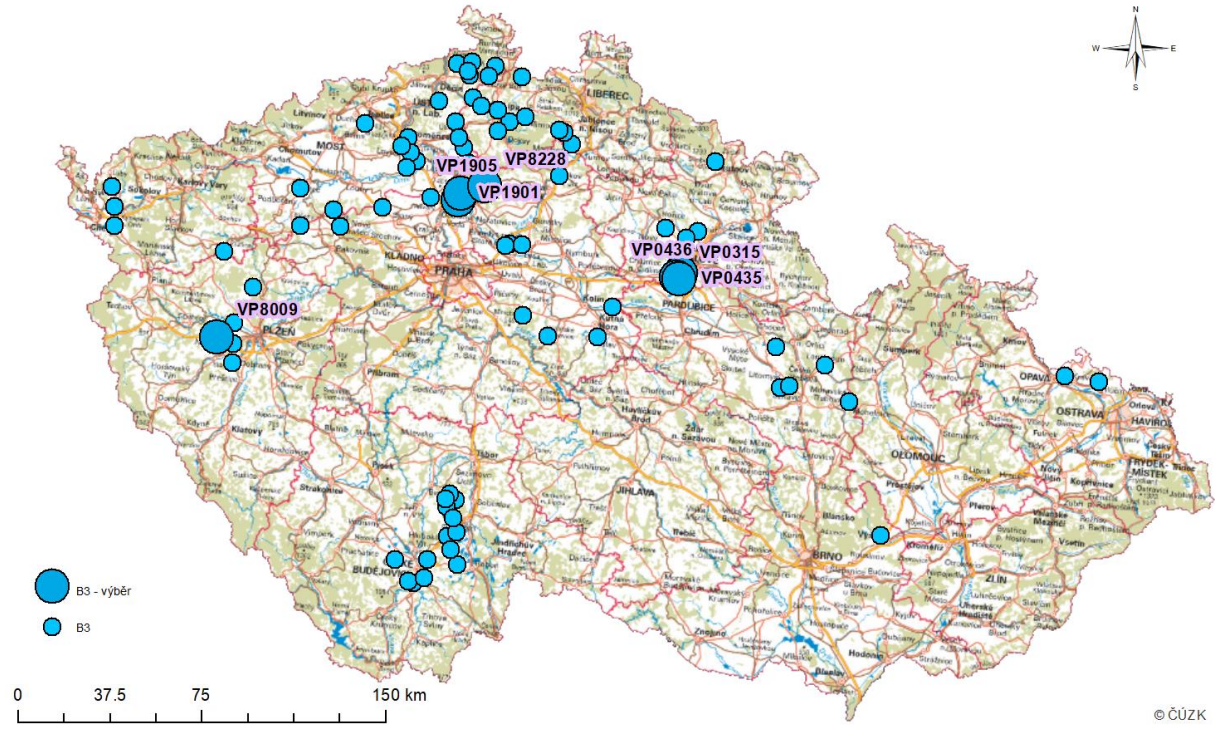
Obr. 5 Kolísání hladin podzemní vody – skupina B1.
Fig. 5 Groundwater levels fluctuation – group B1.



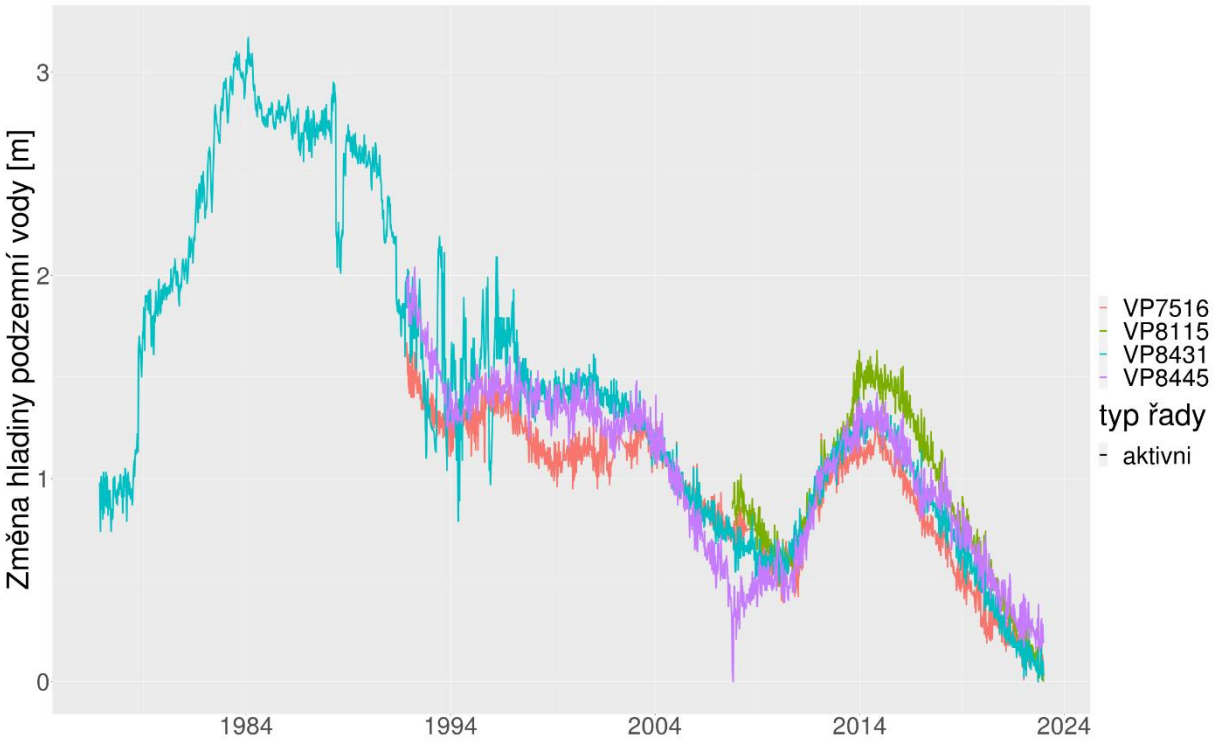
Obr. 6 Umístění vrtů z obr 5.
Fig. 6 Locations of wells on Fig. 5.



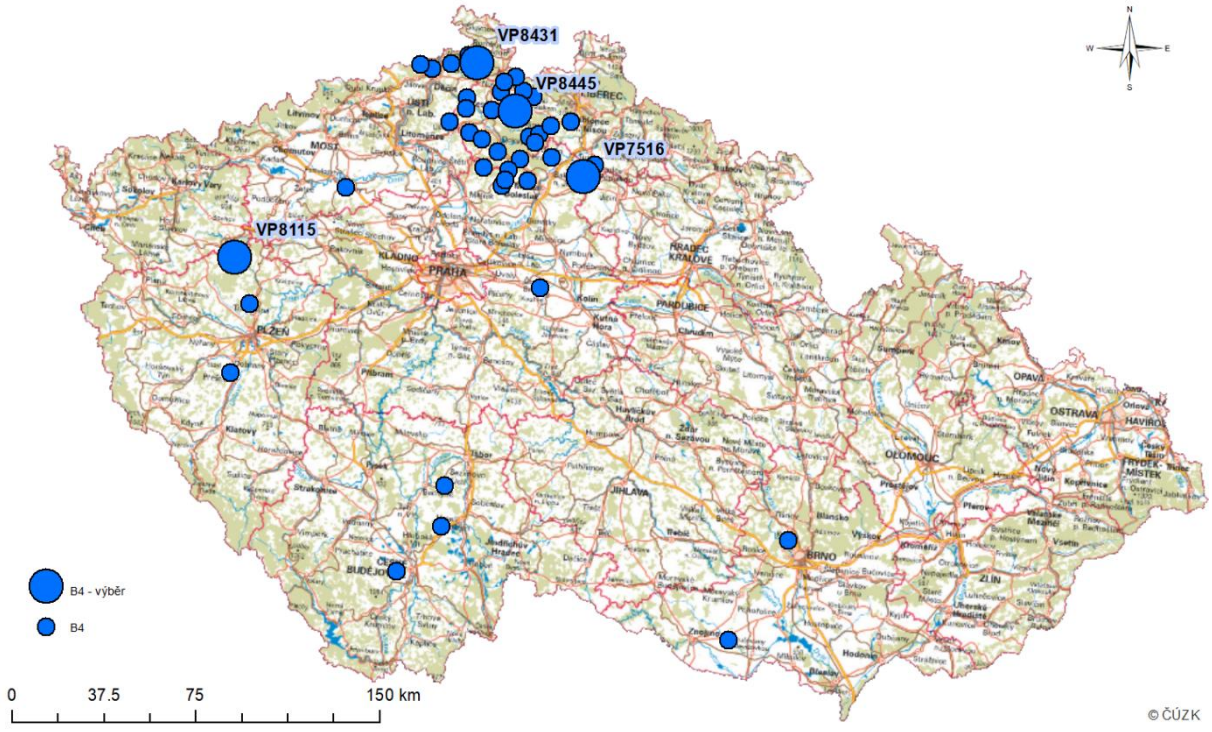
Obr. 7 Kolísání hladin podzemní vody – skupina B3.
Fig. 7 Groundwater levels fluctuation – group B3.



Obr. 8 Umístění vrtů z obr 7.
Fig. 8 Locations of wells on Fig. 7.



Obr. 9 Kolísání hladin podzemní vody – skupina B4.
Fig. 9 Groundwater levels fluctuation – group B4.



Obr. 10 Umístění vrtů z obr 9.
Fig. 10 Locations of wells on Fig. 9.

4. Závěr

Všechny aktuálně sledované vrty pozorovací sítě ČHMÚ byly rozděleny podle jejich kolísání hladin podzemní vody do 4 hlavních skupin a pro každou skupinu byly vybrány charakteristické vrty pozorovaného kolísání hladin podzemní vody. Pro jejich výběr, resp. pro definici skupiny vrtů, pomohlo jejich porovnávání i s vrty v odlišných hydrogeologických prostředích. Nepřekvapivě zmenšující se podíl sezónního chodu odhaluje dlouhodobý vývoj hladin podzemní vody, který může být díky hydrogeologickým podmínkám v okolí vrtu a jeho technickému stavu různě opožděn. Porovnání dále ukazuje, že jednotlivé skupiny vrtů v odlišných hydrogeologických prostředích mohou mít velmi podobný vývoj hladin podzemní vody a porovnávání suchých období se jeví zřetelnějšími na vrtech bez sezónního kolísání a s opožděnou odezvou. Na vrtech s převažujícím dlouhodobým trendem v kolísání hladin podzemní vody je výraznější rozdíl mezi suchými obdobími 1990–1994 a 2015–2020, kde úroveň hladiny podzemní vody 2015–2020 je zřetelně níže než v období 1990–1994.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

NOL, O., ZRZAVECKÝ, M., 2022. Klasifikace kolísání hladin podzemních vod. Sborník XVI. HG a IG kongres Ústí nad Labem.

Zahájení provozu Informačního systému o stavu a vývoji sucha na území České republiky

(Start of the Information System on the state and development of drought on the territory of the Czech Republic)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.25

Martin Pecha, Český hydrometeorologický ústav, martin.pecha@chmi.cz
Radek Čekal, Český hydrometeorologický ústav, radek.cekal@chmi.cz

Abstrakt: Pro území České republiky nebylo až do roku 2022 vydáváno varování před vznikem a vývojem sucha. Novela vodního zákona ale stanovila, že Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) musí začít pravidelně a přehledně informovat kraje a obce s rozšířenou působností právě před nebezpečím vzniku sucha. V průběhu roku 2022 z tohoto důvodu vznikl informační (výstražný) systém upozorňující na vznik a vývoj sucha na našem území. V tomto článku je celý systém, včetně metodiky, stručně představen.

Klíčová slova: sucho – sucho hydrologické – vody povrchové – vody podzemní – výstraha – predikce – změna klimatu – nedostatek vody – informační systém HAMR (IS HAMR) – projekt PERUN

Abstract: No official warnings regarding the drought onset and its development had been issued in the Czech Republic until 2022. The amendment to the Water Act requires the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI) to regularly inform the selfgovernments, such as the Regions and Municipalities with Extended Powers, about the risk of drought onset. In 2022, an information (alert) system was created to inform (alert) about the drought onset and development on the territory of the Czech Republic. This short paper introduces the whole system, including the methodology.

Keywords: drought – hydrological drought – surface water – groundwater – alert – prediction – climate change – water shortage – information system HAMR (IS HAMR) – PERUN project

1. Úvod

Sucho jako fenomén představuje dočasný pokles dostupnosti vody a je považováno za přirozený jev. Sucho je charakteristické svým velmi pozvolným začátkem a typické svým dlouhodobým trváním a velmi malou dynamikou. Často je také charakteristické svým značným plošným rozsahem. Poslední dlouhodobé a plošně významné sucho se na území České republiky vyskytovalo od roku 2014, přičemž nejhorší situace byla v letních obdobích v letech 2015 a 2018 (Daňhelka et al. 2019). Nebezpečnost tohoto jevu je však oproti jiným hydrometeorologickým jevům zcela odlišná. Z tohoto důvodu je nutné k informování o stavu a vývoji sucha přistupovat odlišným způsobem.

Na úrovni Ministerstva zemědělství a Ministerstva životního prostředí vznikla společná metodika, která představuje základní východiska a postupy při tvorbě plánů pro zvládání sucha a stavu nedostatku vody (Kendík a Peštová 2021). Od roku 2023 jsou k dispozici Krajské plány pro sucho a následovat bude plán pro území České republiky. Orgán s rozhodovací pravomocí pro vydávání opatření podle plánů pro sucho při stavu nedostatku vody je komise pro sucho. Jednání komisí na úrovni krajů již probíhají, a to i s účastí zástupců ČHMÚ.

Hlavním cílem plánů pro zvládání sucha je návrh opatření k zajištění dostatku vody, pokrytí základních společenských potřeb, minimalizaci negativních dopadů nakládání s vodami

během sucha na životní prostředí a minimalizaci dopadů sucha a nedostatku vody na hospodářskou činnost.

Informování o stavu a vývoji sucha na území České republiky je dle novely vodního zákona (544/2020 Sb.) v kompetenci ČHMÚ. Tyto informace svou strukturou vychází ze systému již provozované integrované výstražné služby (SIVS). Z důvodu specifické povahy tohoto jevu jsou od začátku vegetační sezóny 2023 pravidelné týdenní informace o vzniku a vývoji sucha zveřejňovány každý týden v systému HAMR.

2. Informační systém HAMR

Vývoj systémového nástroje HAMR financuje Ministerstvo životního prostředí spolu s dalšími aktivitami zabývajícími se dopadem sucha, adaptačními opatřeními, monitoringem a klimatickými změnami (více na www.suchovkrajine.cz). V rámci IS HAMR se sucho dělí na meteorologické, agronomické, hydrologické a socioekonomické. Z toho také vychází samotný název systému HAMR (Hydrologické, Agronomické, Meteorologické sucho a Retence vody v krajině). Více informací o systému HAMR je k dispozici na https://hamr.chmi.cz/metodiky a https://hamr.chmi.cz/o-projektu.

Informační (výstražný) systém o stavu a vývoji sucha je v týdenním cyklu provozován v ČHMÚ na Centrálním předpovědním pracovišti (CPP) v Praze-Komořanech a následně jsou informace o stavu a vývoji sucha posílány do informačního systému (IS) HAMR, kde jsou posléze nejpozději během úterního dne vizualizovány (https://hamr.chmi.cz/hamr-JS/vystraha.html). Součástí pravidelného týdenního informování o stavu a predikci vývoje sucha je i doprovodné video, kde je v krátkosti shrnuto vše podstatné za uplynutý týden, a také naznačen následující vývoj.

3. Metodika informačního systému

Pro hodnocení aktuálního stavu a zejména pro predikci vývoje sucha na území České republiky byla v průběhu roku 2022 na ČHMÚ vytvořena metodika, která zahrnuje predikce tří typů sucha. Sucho povrchových vod, sucho podzemních vod a sucho hydrologické (sucho vyskytující se zároveň u podzemních i povrchových vod). Vzhledem k tomu, že informační systém vychází z výstražného předpovědního systému SIVS ČHMÚ, jsou jednotlivé typy sucha identifikovány pro územní jednotky ORP, tak jako je tomu u všech hydrometeorologických jevů.

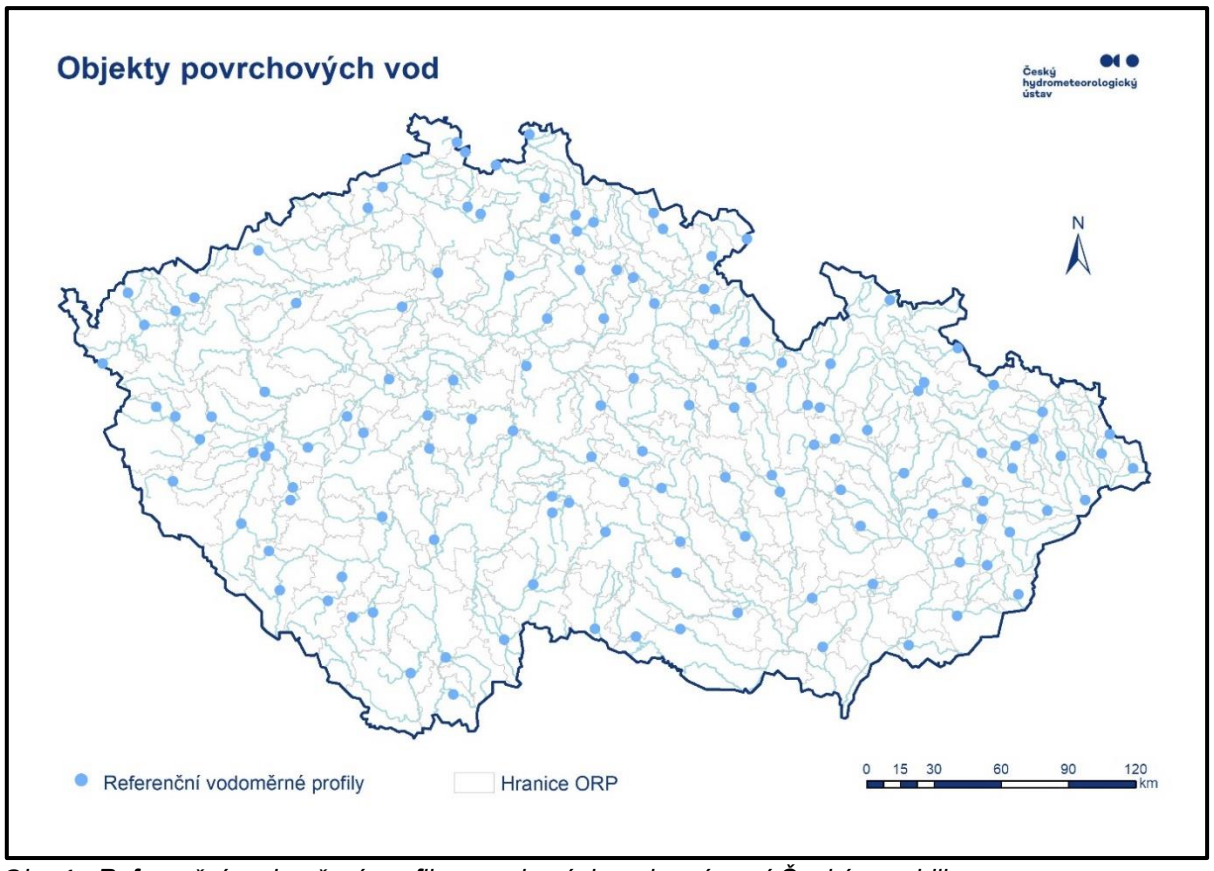
3.1 Povrchové vody

Monitorovací síť povrchových vod využívaná ČHMÚ zahrnuje celkem cca 520 vodoměrných hlásných profilů, ze kterých jsou k dispozici pravidelné informace o vodních stavech a průtocích, a to převážně v intervalu deseti minut. Tyto vodoměrné hlásné profily jsou dle své významnosti rozděleny do tří kategorií. Nejvýznamnější vodoměrné profily spadají do kategorie A, další vodoměrné profily jsou zařazeny do kategorie B a doplňkové vodoměrné profily spadají do kategorie C. Pro účely hodnocení aktuálního stavu a predikce sucha na povrchových vodách byl podle stanovených kritérií vybrán soubor celkem 135 operativních referenčních vodoměrných profilů.

Výběr referenčních vodoměrných profilů pro potřeby informování o nebezpečí vzniku a vývoje sucha probíhal podle reprezentativnosti vodoměrného profilu pro příslušnou ORP. Cílem bylo vybrat vodoměrné profily s menší plochou povodí, které více vypovídají o odtokových poměrech příslušné ORP, než profily s velkou plochou povodí. Z tohoto důvodu se ale některé referenční vodoměrné profily nenacházejí na území příslušné ORP, ale jsou situovány v některé z okolních ORP, a to zejména z důvodu menšího pokrytí našeho území

vodoměrnými profily s menší plochou povodí a zároveň dostatečně dlouhou řadou pozorování. Dále byla snaha vybírat takové vodoměrné profily, jejichž odtokové poměry nejsou významně ovlivněny antropogenní činností (manipulace na vodních dílech, převody vody, významné odběry nebo vypouštění). Na finálním výběru referenčních profilů a jeho následném odsouhlasení se podílely také všechny pobočky ČHMÚ. Do budoucna však nelze vyloučit, že ještě bude výběr referenčních vodoměrných profilů upraven.

Ke každé ORP je přiřazen vždy pouze jeden referenční (reprezentativní) vodoměrný profil. V ideálním případě je vybraný profil přímo součástí příslušné ORP. Pokud se v příslušné ORP nenachází žádný vyhovující profil (dle výše uvedených požadavků), byl této ORP přiřazen nejvíce vyhovující vodoměrný profil z blízkého okolí. Z tohoto důvodu jsou některé vodoměrné profily reprezentativní i pro více ORP, a to zejména v oblastech s řidší říční sítí a menším počtem vyhovujících vodoměrných profilů. Na obr. 1. jsou znázorněny všechny referenční vodoměrné profily. Jelikož je na území České republiky aktuálně 206 ORP, tak pro cca 70 ORP se nepodařilo najít odpovídající referenční vodoměrný profil přímo na území příslušné ORP.



Obr. 1 Referenční vodoměrné profily povrchových vod na území České republiky.
Fig. 1 Reference water-gauging profiles of surface waters on the territory of the Czech Republic.

Při stanovování nebezpečí vzniku a vývoje sucha na povrchových vodách se primárně vychází z údajů referenčního profilu přiřazeného k příslušné ORP, avšak hodnoty z okolních referenčních profilů, ale i z neovlivněných nereferenčních profilů, jsou vzaty také v úvahu, a to zejména v hraničních situacích, kdy jsou hodnoty průměrných průtoků blízké úrovni 355denního průtoku (Q_{355d}) za nové referenční období 1991–2020.

Podkladem pro stanovení nebezpečí vzniku a vývoje sucha je v případě povrchových vod úroveň průměrné 7denní vodnosti[1] v referenčním vodoměrném profilu. Každý týden se tedy vychází z průměrných hodnot vodností v referenčních vodoměrných profilech v posledním týdnu, ale pro vydání (či prodloužení trvání) nebezpečí vzniku sucha na povrchových vodách v nadcházejícím týdnu je podstatný také aktuální vývoj meteorologické situace v nejbližším období. V případě, že se očekává v nejbližších dnech zaklesnutí průměrných denních průtoků na či pod úroveň Q_{355d}, je pro příslušnou ORP indikován stav nebezpečí vzniku sucha na povrchových vodách.

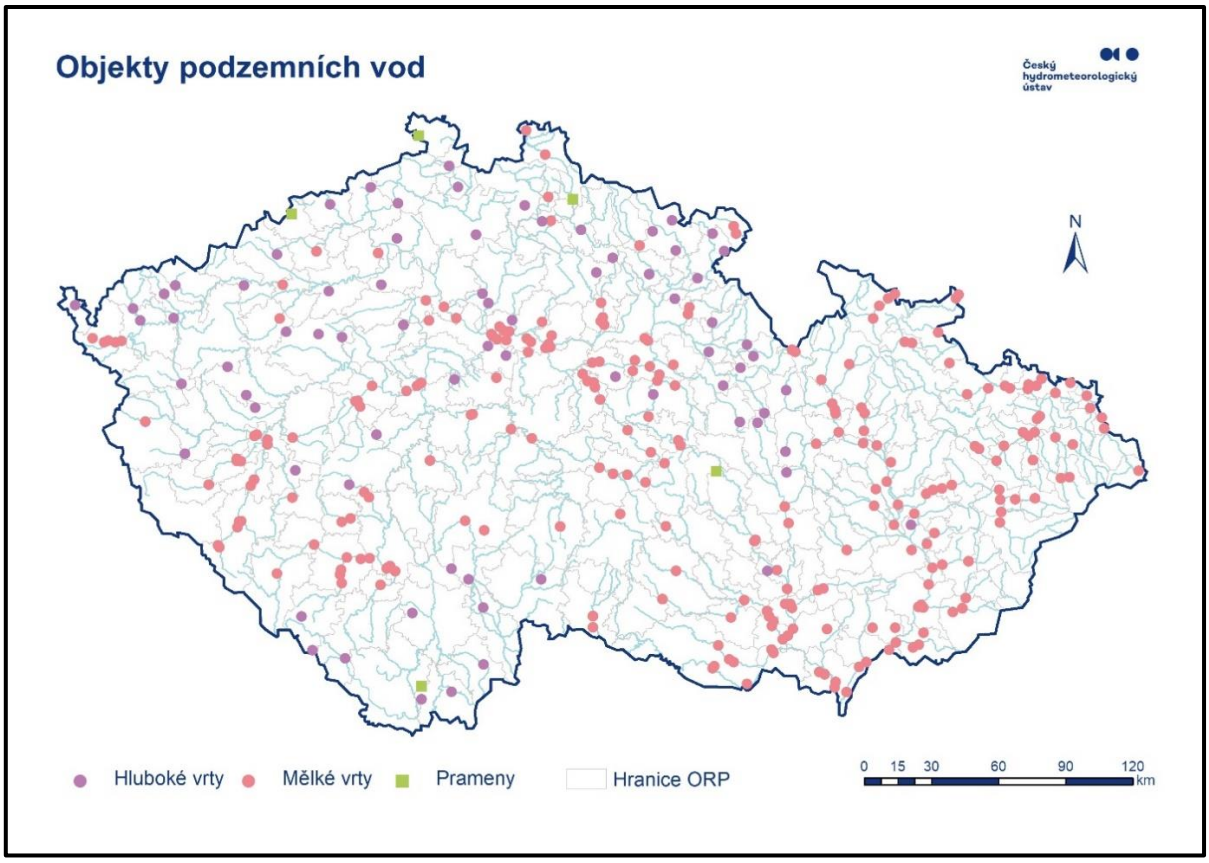
Informace o nebezpečí vzniku (prodloužení trvání) sucha v nadcházejícím týdnu na povrchových vodách pro příslušné ORP vzniká pravidelně syntézou výše uvedeného výpočtu a očekávané hydrometeorologické situace v následujících dnech. Následně je tato predikce zveřejněna na webových stránkách systému HAMR v sekci „Výstražné informace“, a to v samostatné mapě („Povrchové vody“).

3.2 Podzemní vody

Monitorovací síť podzemních vod ČHMÚ zahrnuje celkem 874 mělkých vrtů, 440 hlubokých vrtů a 317 pramenů. Hodnoty hladiny v mělkých vrtech představují úroveň podzemních vod v pokryvných útvarech převážně kvartérního stáří (fluviální, eluviální a deluviální sedimenty) s volnou hladinou. Hodnoty hladiny v hlubokých vrtech představují úroveň podzemních vod podložních struktur s vyloučením vlivu pokryvných útvarů s volnou či napjatou hladinou. Rozlišení na mělké a hluboké vrty tedy není definováno konkrétní hloubkou. Vývěry pramenů reprezentují přirozený odtok podzemních vod z různých struktur, a to jak mělkých, tak i hlubších.

Pro účely hodnocení stavu sucha v podzemních vodách byl vybrán soubor celkem 332 objektů. Jedná se o 251 mělkých vrtů, 75 hlubokých vrtů a 6 pramenů. Reprezentativnost vybraných objektů byla posuzována podle několika kritérií. V první řadě bylo zohledněno, jestli objekt leží na území ORP. V případě vrtů byla při výběru brána v potaz sledovaná zvodeň. Ve vodohospodářsky významných strukturách, jako jsou například oblasti Severočeské a Východočeské křídy, pánevní oblasti Podkrušnohorské pánve, Jihočeské pánve a Permokarbon západních, středních a východních Čech, byla snaha postihnout režim základní vrstvy hydrogeologických rajonů (Olmer et al. 2006). K tomuto účelu byly vybrány hluboké vrty. Na zbylém území byly využity mělké vrty. V případě absence vhodného vrtu, byly využity také prameny. V rámci jedné ORP nejsou kombinovány vrty s prameny, a to s ohledem na jejich obvykle odlišný režim. Většina zvolených referenčních objektů má souvislé pozorování alespoň od roku 1991. Pouze cca 5 % objektů má řady až od roku 2006, případně od roku 2008. Tyto objekty jsou využity buď jako doplňkové, případně byly vybrány v oblastech, kde nebylo možné využít jiné objekty. Každé ORP byl přiřazen alespoň jeden referenční objekt, případně i více objektů (maximálně však 7 objektů) nacházejících se na území ORP. U zhruba poloviny ORP (112) je pro hodnocení využit pouze jeden objekt. V případě, že se vhodný objekt na území ORP nenalézá, je pro příslušnou ORP vybrán nejbližší vhodný objekt sledující stejnou hydrogeologickou strukturu. Z celkových 206 ORP se nepodařilo najít vhodný objekt přímo na území ORP v 33 případech. Poloha vybraných objektů pozemních vod je zobrazená na obr. 2.

[1] 7denní vodnost vyjadřuje porovnání aktuálních průtoků za posledních 7 dní s dlouhodobými charakteristikami hydrologického režimu řek v období 1991 – 2020.



Obr. 2 Referenční objekty podzemních vod na území České republiky.
Fig. 2 Groundwater reference objects on the territory of the Czech Republic.

Všechny vybrané referenční objekty podzemních vod jsou vybaveny dálkovým přenosem dat. Hodnoty za příslušný týden procházejí pravidelnou kontrolou v rámci primárního zpracování dat na jednotlivých územních pracovištích ČHMÚ, a poté jsou odeslány do operativní databáze v průběhu pondělí.

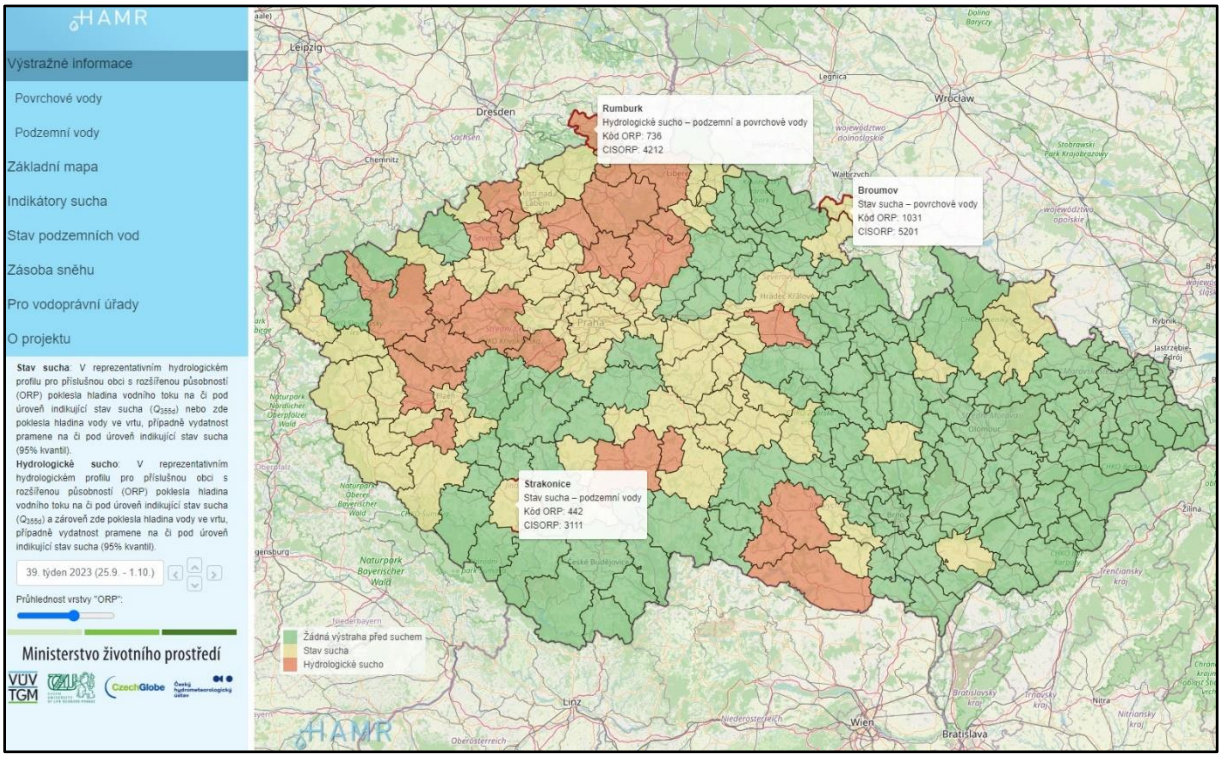
Pro stanovení nebezpečí vzniku sucha v podzemních vodách je rozhodující průměrná týdenní výška hladiny ve vrtu, respektive průměrná týdenní vydatnost pramene. V případě, že se tato hodnota alespoň u jednoho objektu, přiřazeného k příslušné ORP, nachází pod úrovní 95% kvantilu na křivce překročení[2] za referenční období 1991–2020, je pro ORP indikován stav nebezpečí vzniku sucha v podzemních vodách. Hodnocení aktuálního stavu probíhá automaticky začátkem týdne, kdy dochází ke kontrole dat a vydání výsledné informace, která je následně zveřejněna v samostatné mapě („Podzemní vody“) v systému HAMR v sekci „Výstražné informace“. Pro hodnocení nebezpečí vzniku sucha v ORP byl upraven stávající systém režimního hodnocení stavu podzemních vod, který probíhá v týdenním, měsíčním a ročním rozlišení (Vlnas 2015). Systém, který pro režimní hodnocení zahrnuje vliv sezonnosti, kdy je každý týden (měsíc) hodnocen vzhledem k jeho dlouhodobým statistikám (kvantily), byl upraven tak, že limitní charakteristika (95% kvantil) zůstává v průběhu roku konstantní.

3.3 Výsledná informace (výstraha) o stavu a vývoji hydrologického sucha v IS HAMR

Výsledná informace (výstraha) o stavu a vývoji hydrologického sucha vzniká pravidelně kombinací obou výše popisovaných typů sucha pro jednotlivé ORP a je vizualizována

[2] 95% kvantil na křivce překročení je mimořádně podnormální stav odpovídající nejnižším 5 % pozorování za referenční období 1991–2020.

v samostatné mapě v systému HAMR v sekci „Výstražné informace“. Pokud to situace vyžaduje, tak je celý systém nastaven tak, aby bylo možné výslednou informaci opakovaně vydat i v průběhu týdne. V případě, že v příslušné ORP není indikován ani jeden z výše uvedených typů sucha dle vybraných referenčních profilů, je ORP vybarvena ve výsledné informační mapě zeleně. Pokud je indikován pouze jeden typ sucha, a to buď v podzemních, nebo na povrchových vodách, tak je příslušná ORP ve výsledné informační mapě vybarvena žlutě. Pokud je pro příslušnou ORP indikováno zároveň sucho obou typů (v podzemních i povrchových vodách), tak je takové území vybarveno ve výsledné informační mapě oranžově, jak je patrné z obr. 3.



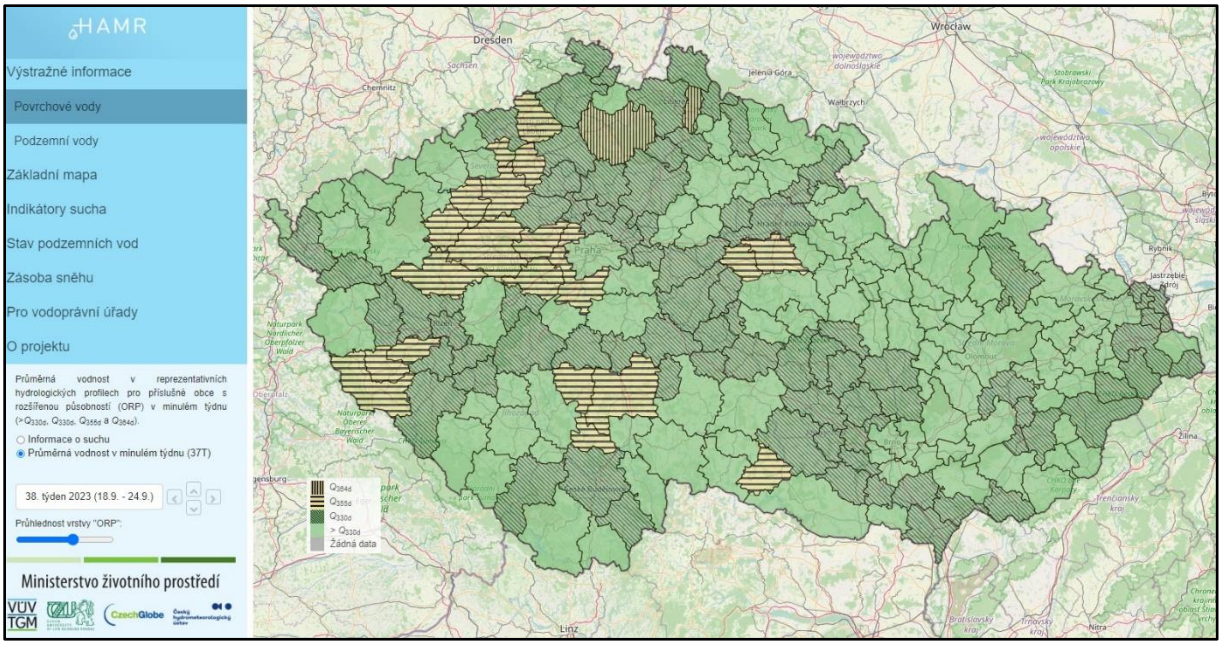
Obr. 3 Ukázka predikce sucha na území České republiky pro jednotlivé ORP.
Fig. 3 Demonstration of drought prediction in the Czech Republic for Municipalities with Extended Powers.

3.4 Doplňková mapa průměrných sedmidenních vodností

Doplňkem informačního systému je také mapa, která zobrazuje pro jednotlivé ORP porovnání průměrného 7denního průtoku v příslušných referenčních vodoměrných profilech ve vztahu k M denním průtokům[3] za nové referenční období 1991–2020. Tato mapa slouží jako indikátor toho, že již v nejbližší době může dojít ve vybraném území (ORP) k dosažení úrovně stavu sucha (Q_{355d}), a to zejména v případě, že se už 7denní průměr vodností pohybuje na úrovni 330 denního průtoku (Q_{330d}).

Zároveň je z této mapy velmi dobře patrné, kde se již sucho na povrchových vodách prohloubilo natolik, že průměrné 7denní vodnosti poklesly až na úroveň Q_{364d}, viz obr. 4. Tato mapa je také zveřejněna v systému HAMR, a to v sekci „Výstražné informace“ a následně v sekci „Povrchové vody“, kde je ještě nutné ve světle modré listě dole zobrazit průměrné vodnosti v uplynulém týdnu.

[3] *M* - denní průtok je v dlouhodobém průměru dosažen či překročen po dobu *M* dní v roce. Hodnoty byly odvozeny z referenčního období 1991–2020.



Obr. 4 Ukázka doplňkové mapy průměrných 7denních vodností v porovnání s vybranými kvantily získanými z křivek překročení průměrných denních průtoků období 1991–2020.
Fig. 4 Example of a complementary map of 7-day flow-rate averages in comparison to selected quantiles taken using flow duration curves of mean daily discharges of the period 1991–2020.

4. Závěr

V červenci 2022 uspořádal ČHMÚ v rámci řešení dílčího cíle 5.4 (Vytvoření metodiky pro hodnocení stavu sucha na území ČR a inovace výstražného systému ČHMÚ) výzkumného projektu PERUN schůzku se zástupci krajů, podniků Povodí, Ministerstva zemědělství a Ministerstva životního prostředí. Účastníci byli podrobně seznámeni s navrženou metodikou informačního (výstražného) systému o stavu a predikci vývoje sucha na území České republiky. Z diskuze vyplynul požadavek o pravidelnou prezentaci a zobrazování dalších úrovní průměrných 7denních vodností u povrchových vod. Proto vznikla doplňková mapa, která zobrazuje pro jednotlivé ORP porovnání průměrného 7denního průtoku v příslušných referenčních vodoměrných profilech ve vztahu k *M*-denním průtokům za nové referenční období 1991–2020.

Od září 2022 ČHMÚ již v testovacím provozu každý týden vyhodnocuje a predikuje stav hydrologického sucha na území České republiky pro jednotlivé obce s rozšířenou působností. Vždy se také přihlíží k dalším hydrologickým stanicím a zejména pak k predikci srážek a teplot na následující období. Od přelomu září a října jsou tyto výstupy k dispozici na webových stránkách IS HAMR v sekci „Výstražné informace“. Během zimní sezony 2022/2023 proběhlo vyhodnocení testovacího provozu. Na základě tohoto testování došlo před novou vegetační sezonou k drobným úpravám systému.

Od začátku vegetační sezony 2023 je informační (výstražný) systém o stavu a predikci vývoje sucha na území České republiky implementován do operativního provozu ČHMÚ a v zimní sezoně 2023/2024 opět proběhne podrobnější vyhodnocení operativním provozu tohoto systému. Na základě výsledků vyhodnocení a komunikace s uživateli bude zvážen celoroční, či pouze sezónní provoz tohoto systému.

Poděkování

Tento výzkum je částečně financován Technologickou agenturou České republiky v rámci programu „Prostředí pro život“ (Program aplikovaného výzkumu, experimentálního vývoje

a inovací v oblasti životního prostředí) a projektu PERUN (SS02030040) – Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (https://www.perun-klima.cz/).

Literatura

ČHMÚ, 2018. Suché období 2014–2017: vyhodnocení, dopady a opatření. Praha: ČHMÚ. ISBN 978-80-87577-81-3. [online]. [cit. 17. 10. 2022]. Dostupné z: WWW: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/publikace/sbornik_Sucho_web.pdf

ČHMÚ, 2019. Sucho 2014–2018: sborník abstraktů. Praha: ČHMÚ. ISBN 978-80-87577-91-2 [online]. [cit. 17. 10. 2022]. Dostupné z: WWW: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/nakladatelstvi/assets/sbornik-sucho_05_08_tisk.pdf

DAŇHELKA, J., KUBÁT, J., ŠERCL, P., eds., 2019. Sucho na území České republiky v roce 2018. Praha: ČHMÚ, ISBN 978-80-87577-98-1.

KENDÍK, A., PEŠTOVÁ, B., 2021. Metodika k přípravě plánů pro zvládání sucha a stavu nedostatku vody. Praha: MZe a MŽP, 33 s. [online]. [cit. 17. 10. 2022]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zvladani_sucha_metodika/$FILE/OOV-Metodika_plan_sucho-20210604.pdf

OLMER, M., HERRMANN, Z., KADLECOVÁ, R., PRCHALOVÁ, H., BURDA, J., ČURDA, J., KREJČÍ, Z., SKOŘEPA, J., HARTLOVÁ, L., MICHLÍČEK, E., 2006. Hydrogeologická rajonizace České republiky. *Sborník geologických věd – Hydrogeologie, inženýrská geologie*, **23**, 5–31.

VLNAS, R., 2015. Metodika pro stanovení mezních hodnot indikátorů hydrologického sucha. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i. 18 s. [online]. [cit. 17. 10. 2022]. Dostupné z: http://sucho.vuv.cz

PECHA, M., ČEKAL, R., LEDVINKA, O., LAMAČOVÁ, A., VLNAS, R., VIZINA, A., GEORGIEVOVÁ, I., PAVLÍK, P., 2022. Informační systém o stavu a vývoji sucha na území České republiky. *Meteorologické zprávy*, **75**, 6, 165–169, ISSN 0026-1173. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/casmz/assets/2022/MZ_06_2022.pdf

Porovnanie indexov sucha SPEI s 3 rôznymi štatistickými rozdeleniami na základe meteorologických údajov zo Slovenska

(Comparison of SPEI drought indexes with three different statistical distributions based on data from Slovakia)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.26

Jaroslava Slavková, Slovenský hydrometeorologický ústav, Jaroslava.Slavkova@shmu.sk

Abstarkt: Štandardizovaný zrážkovo-evapotranspiračný index (*SPEI*) je jedným z najčastejšie používaných indikátorov meteorologického sucha. Predstavuje hodnotu záporného klimatického ukazovateľa zavlaženia-*D* (*D* je rozdiel zrážok a potenciálnej evapotranspirácie) normalizovanú na základe štatistického rozdelenia hodnoty *D* za zvolené referenčné obdobie (ideálne 30 a viac rokov). Spôsob výpočtu SPEI však nie je striktne zadefinovaný a niektoré parametre možno pri výpočte ľubovoľne meniť (napríklad dĺžku indexu, spôsob výpočtu potenciálnej evapotranspirácie, referenčné obdobie, štatistické rozdelenie hodnoty *D*), pričom výsledná hodnota indexu môže byť takýmto spôsobom viac, či menej ovplyvnená. V tejto práci porovnávame indexy s 3 štatistickými rozdeleniami (log-logistické, generalizované extremálne a Pearsonovo III rozdelenie) na základe 3 kritérií: a) počet prípadov, kedy model so zvoleným štatistickým rozdelením nedokázal vypočítať parametre daného rozdelenia, b) počet prípadov, kedy finálne hodnoty *SPEI* nemali normálne rozdelenie (podmienka normality finálnych indexov vyplýva z predpokladu správne zvoleného štatistického rozdelenia pre rozdiel *D*) a c) počet nadhodnotených extrémov *(|SPEI|*>6).

Kľúčové slová: Štandardizovaný zrážkovo-evapotranspiračný index – meteorologické sucho – štatistické rozdelenie

Abstract: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (*SPEI*) is among the most commonly used indicators for assessing meteorological drought. *SPEI* represents the normalized value of the water balance *D* (where D = *precipitation − evapotranspiration*) for a specific station and time period. Normalization is carried out based on the statistical distribution of *D* calculated for a chosen reference period (typically recommended to be 30 years or longer). The calculation process of *SPEI* lacks a strict definition, allowing certain parameters to be user-dependent. For example, the user can determine the index's duration, the method used for potential evapotranspiration calculation, the reference period, and the statistical distribution applied to the water balance parameter (*D*). These choices can impact the resulting index value. This study compares *SPEI* indexes calculated with three different statistical distributions: Log-logistic, Generalized Extreme Value, and Pearson III. Our evaluation is based on three criteria: a) The frequency of cases where the model cannot calculate the parameters of the selected statistical distribution; b) The number of cases where the final *SPEI* values do not conform to a normal distribution (the assumption is that correctly chosen statistical distribution for D should yield normally distributed index results); c) The incidence of overestimated extremes (|SPEI| > 6).

Keywords: Standardized precipiation evapotranspiration index – meteorological drought – statistical distribution

1. Úvod

Slovensko, ako aj celkovo Európa, patrí do oblasti, kde priemerná teplota stúpa rýchlejšie než je globálny priemer nárastu teploty (WMO 2022). Od roku 1881 sa zvýšila priemerná ročná teplota vzduchu na Slovensku o 1,8–2,0 °C, pričom najrýchlejší nárast teploty vzduchu

pozorujeme v letných mesiacoch a v nižších polohách (najviac na juhozápade krajiny) (Dančová, Chovancová et al. 2023; NCP 2022). V posledných dvoch dekádach vzrástol počet extrémov maximálnej a minimálnej dennej teploty vzduchu a najmä po roku 1991 došlo k rýchlemu nárastu frekvencie vĺn horúčav na celom území Slovenska (Dančová, Chovancová et al. 2023). Úhrny zrážok v teplom polroku sú častejšie vo forme krátkych a intenzívnych lejakov, než vo forme dlhotrvajúcich stratiformných zrážok. V zimnom období pozorujeme pokles počtu dní so snehovou pokrývkou, ako aj výšky snehovej pokrývky (okrem lokalít vo vysokej nadmorskej výške) (Faško, Markovič et al. 2020). Napriek tomu, že sme nezaznamenali výraznú zmenu v priemernom ročnom úhrne zrážok, uvedené zmeny vo forme zrážok spolu so zvyšujúcou sa teplotou (a tým aj zvyšujúcim sa výparom) vedú k častejšiemu a plošne rozsiahlejšiemu výskytu sucha (Dančová, Chovancová et al. 2023).

Sucho je pomerne komplexný pojem. Neexistuje jednoznačná definícia ani fyzikálna veličina, ktorou by sa dalo určiť a následne odmerať. Hlavnou príčinou jeho vzniku je deficit zrážok za určitú dobu vzhľadom na klimatický priemer daného územia. Vyššia teplota vzduchu, intenzívnejšie slnečné žiarenie, nízka relatívna vlhkosť vzduchu, malá oblačnosť, či rýchlejšie prúdenie vzduchu zvyšuje mieru evapotranspirácie, čo môže značne prispieť k zintenzívneniu sucha. V súčasnosti existuje veľké množstvo indikátorov sucha z pohľadu rôznych odvetví (indikátory na pôdne sucho, hydrologické sucho, socioekonomické sucho, meteorologické sucho, atď.). Jedným z najčastejšie používaných meteorologických indexov sucha je práve štandardizovaný zrážkovo-evapotranspiračný index (*SPEI*) (Vicente-Serrano, Beguería et al., 2010). Jediným vstupným parametrom pre tento index je záporná hodnota klimatického ukazovateľa zavlaženia-*D* (*D* je rozdiel úhrnu zrážok a potenciálnej evapotranspirácie). Táto hodnota je následne štandardizovaná na základe dlhodobých hodnôt klimatického ukazovateľa zavlaženia na danom území. Index je teda možné použiť v rôznych klimatických podmienkach, avšak treba mať na zreteli, že rovnaká hodnota indexu môže v rôznych klimatických podmienkach charakterizovať rôzne meteorologické podmienky. Záporné hodnoty indexu charakterizujú podmienky sucha, kým naopak kladné indexy predstavujú vlhké podmienky (tab. 1).

Tab. 1 Klasifikácia vlhkostných období podľa hodnoty indexu SPEI.
Tab. 1 Classification of wet seasons according to SPEI index.

Vlhkostné obdobie	SPEI
Extrémne vlhké	≥2
Veľmi vlhké	1.50 to 1.99
Mierne vlhké	1.00 to 1.49
Normále	-0.99 to 0.99
Mierne suché	-1.00 to -1.49
Veľmi suché	-1.50 to -1.99
Extrémne suché	≤-2

Medzi nevýhody tohto indexu v porovnaní s inými meteorologickými indexami sucha môžeme zaradiť jeho nezohľadňovanie typu povrchu a pôdy. Rôzne typy pôd rôzne zadržiavajú, či prepúšťajú vodu a rovnako aj typ povrchu (a porastu na ňom) môže ovplyvniť výpar.

Ďalšou vlastnosťou *SPEI* je nejednoznačnosť v metodike výpočtu indexu. Pri niektorých krokoch výpočtu je totiž možné modifikovať parametre výpočtu. Medzi parametre o ktorých môžeme pri výpočte indexu rozhodovať patria napríklad časová dĺžka indexu, referenčné obdobie použité na určenie dlhodobého stavu klímy danej lokality, metodika výpočtu potenciálnej evapotranspirácie (*PET*), štatistické rozdelenie hodnoty *D*, metodika výpočtu

parametrov zvoleného štatistického rozdelenia. V tejto práci budeme analyzovať, aké štatistické rozdelenie je vhodné zvoliť pri výpočte *SPEI* v podmienkach klímy Slovenska.

Analýzou vhodnosti štatistického rozdelenia pre *SPEI* na území Európy sa zaoberali napríklad Beguería, Vicente-Serrano et al. 2014; Stagge, Tallaksen et al. 2015, avšak uvedení autori nedospeli k jednotnému riešeniu. Autori indexu, (Vicente-Serrano and Beguería 2016; Beguería, Vicente-Serrano et al. 2014), totiž odporúčajú ako najvhodnejšie štatistické rozdelenie používať log-logistické rozdelenie (ktoré je vo vedeckej literatúre aj najviac používané), kým (Stagge, Tallaksen et al. 2015; 2016) poukazujú na lepšiu vhodnosť generalizovaného extremálneho rozdelenia (GEV).

Cieľom tejto práce je zhodnotiť vhodnosť a špecifiká použitia 3 štatistických rozdelení pre účely indexu *SPEI*. Konkrétne budeme analyzovať vhodnosť log-logistického, GEV a Pearsonovho III rozdelenia na základe troch kritérií:

a) Počet prípadov, kedy model nedokázal vypočítať parametre zvoleného štatistického rozdelenia
b) Počet prípadov, kedy indexy *SPEI* nespĺňajú podmienku normálneho rozdelenia
c) Počet nadhodnotených extrémov

2. Metodika

2.1 Výpočet SPEI indexu

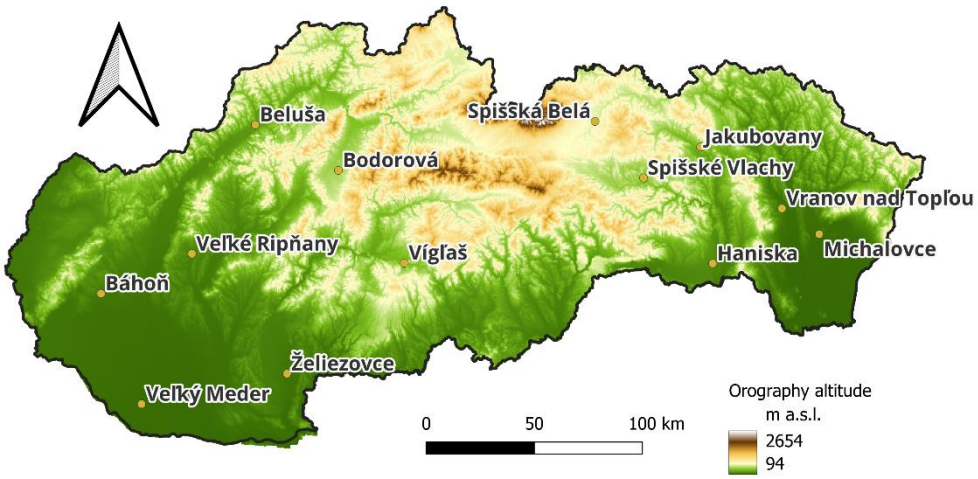
Pri výpočte indexu *SPEI* sme postupovali podľa nasledovných krokov:

1. **Voľba spôsobu výpočtu potenciálnej evapotranspirácie (*PET*):** V tejto práci sme používali duplicitne indexy s dvomi metódami výpočtu *PET* **- Penman-Monteith metódu (P.M.),** ktorá je odporúčaná Organizáciou pre výživu a poľnohospodárstvo (FAO) ako štandardná metóda na výpočet *PET* (Allen, Pereira et al. 1998) a metódu **Hargreaves** (Droogers and Allen 2002), ktorá je odporúčaná ako doplnková metóda s relatívne dobrou presnosťou v prípade nedostatku vstupných údajov na výpočet *PET* P.M. metódou.
2. **Voľba časovej dĺžky indexu:** použili sme 30, 92 a 183-dňové akumulačné obdobia na výpočet sumy zrážok a *PET* (analogicky ku **1, 3 a 6 mesačným obdobiam**). Sumy zrážok a *PET* boli počítané v príslušných dĺžkach pre každý deň v roku retrográdne (30-denná suma prislúchajúca k 30. januáru predstavuje sumu za obdobie od 1. do 30. januára, pre 31. január od 2. do 31. januára, atď.). Takýmto spôsobom sme získali jednak väčšiu štatistickú vzorku indexov, ale zároveň aj detailnejší vývoj indexu.
3. **Výpočet záporného ukazovateľa zavlaženia *D* (rozdiel zrážok a *PET*)** za prislúchajúce časové obdobia
4. **Výpočet parametrov troch analyzovaných štatistických rozdelení (log-logistického, GEV a Pearsonovo III rozdelenie)** na základe hodnôt *D* pre každý deň v roku (ku ktorému prislúchala daná dĺžka akumulačného obdobia) v určenom referenčnom období. Na dostatočné určenie klímy daného územia sa odporúča používať aspoň 30-ročné referenčné obdobie. My sme si ako referenčné obdobie stanovili celkovú dĺžku skúmaného obdobia (1981–2019).
5. Podľa stanovenej distribučnej funkcie sa v ďalšom kroku určila **pravdepodobnosť prekročenia konkrétnych hodnôt *D*** podľa zvoleného štatistického rozdelenia: ***P(x≥D)***.
6. **Normalizácia hodnoty *P*** z predchádzajúceho kroku transformáciou distribučnej funkcie zvoleného štatistického rozdelenia na normálne rozdelenie so strednou

hodnotou v 0 a štandardnou odchýlkou 1. **Táto hodnota je finálnou hodnotou indexu *SPEI***.

Výpočet indexu so všetkými špecifikami sme realizovali pomocou „SCI“ balíčka v programovacom jazyku R (Gudmundsson and Stagge 2016).

Uvedeným spôsobom sme získali pre každú dĺžku indexu (1, 3 a 6 mesiacov) a každú z 13 staníc zahrnutých v analýze (obr. 1) 6 radov indexov (dve metódy *PET* a 3 štatistické rozdelenia) s dĺžkou 14235 (39 rokov x 365 dní). Prehľad skratiek získaných radov indexov uvádzame pre lepšie porozumenie v tab. 2.



Obr. 1 Lokality meteorologických staníc použitých v našej analýze na mape Slovenska. Použité stanice ležia v nadmorskej výške od 112 m (Veľký Meder) po 628 m (Spišská Belá).
Fig. 1 Locations of meteorological stations used in our analysis on the map of Slovakia. The stations used are located at altitudes ranging from 112 m (Veľký Meder) to 628 m (Spišská Bela).

Tab. 2 Zoznam skratiek použitých modifikácií indexu: prvé písmeno skratky reprezentuje použitú metódu výpočtu PET a druhé slovo použité štatistické rozdelenie. Uvedené modifikácie sme počítali pre 13 meteorologických staníc, 3 časové dĺžky indexov (1, 3 a 6 mesačné indexy).
Tab. 2 List of abbreviations of the index modifications used in this study: the first letter of the abbreviation represents the PET calculation method used and the second letter statistical distribution. We calculated the modifications for 13 weather stations and 3 time length of index (1, 3 and 6-month indices).

štatistické rozdelenie	**potenciálna evapotranspirácia**	
	Hargreaves	Penman-Monteith
log-logistické	*hl*	*pl*
Pearsonovo III	*hp*	*pp*
GEV	*hg*	*pg*

2.2 Analýza vhodnosti štatistických rozdelení

a) Počet prípadov, kedy model nedokázal vypočítať parametre zvoleného štatistického rozdelenia

Bez ohľadu na zvolenú metodiku výpočtu *SPEI*, za určitých okolností dochádza k prípadom, kedy sa nevieme dopracovať k výsledku. Ide o to, že z niektorých konkrétnych kombinácií vstupných údajov nie je možné logicky vypočítať parametre zvoleného štatistického rozdelenia

a teda ani index samotný. Frekvencia výskytu takýchto prípadov, kedy nie je možné vypočítať index sa môže líšiť pri použití iných štatistických rozdelení. Túto problematiku rozoberajú napríklad aj (Beguería, Vicente-Serrano et al. 2014; Vicente-Serrano and Beguería 2016; Stagge, Tallaksen et al. 2016). V tejto práci porovnáme počet takýchto prípadov pre 3 analyzované štatistické rozdelenia.

b) Počet prípadov, kedy indexy SPEI nespĺňajú podmienku normálneho rozdelenia

Z definície indexu vyplýva, že pokiaľ analyzujeme indexy za obdobie, ktoré bolo použité ako referenčné obdobie pri výpočte indexu, výsledné hodnoty *SPEI* by mali mať normálne rozdelenie. Ako uvádzajú (Stagge, Tallaksen 2015 a Yimer et al. 2022) výsledky normality testu finálnych hodnôt *SPEI* môžeme použiť na ohodnotenie vhodnosti voľby zvoleného štatistického rozdelenia pre klimatický ukazovateľ zavlaženia (*D*). V uvedených prácach totiž autori hodnotili výber štatistického rozdelenia *D* viacerými štatistickými testami vhodnosti rozdelenia pre klimatický ukazovateľ zavlaženia (*D*). Tieto testy sa vo výsledkoch zhodovali s testami na normalitu finálnych hodnôt *SPEI*. Uvedení autori preto miesto použitia komplexnejších testov vhodnosti rozdelenia klimatického ukazovateľa zavlaženia (*D*) odporúčajú ako jednoduchšiu alternatívnu metódu použiť priamo testy na normalitu finálnych indexov. V našej práci sme normalitu indexov analyzovali na základe Shapiro-Wilks testu na normalitu (S-W), keďže tento test je vhodný pre rad údajov s dĺžkou do 50 členov (v našom prípade išlo o 39-členné rady pre každý deň v roku, analogicky s 39-ročnou dĺžkou analyzovaného obdobia).

c) Počet nadhodnotených extrémov

V treťom kroku overíme počet prípadov, kedy SPEI prekračuje hranicu extrému, t.j. hodnotu ±2. Od voľby štatistického rozdelenia totiž môže závisieť aj rozvrhnutie extrémnych hodnôt a prípadné nadhodnocovanie, či podhodnocovanie extrémov. Zároveň sa pozrieme na to, či pri použití niektorého zo štatistických rozdelení nevznikajú nereálne hodnoty indexu *(|SPEI|*>6). Takéto hodnoty by sa štatisticky mali vyskytovať raz za milióny rokov. Pokiaľ sa v našom 39-ročnom časovom rade objaví viac takýchto hodnôt, pravdepodobne ide o chybu týkajúcu sa zle odhadnutého štatistického rozdelenia.

3. Dáta

Index SPEI sme počítali na základe denných údajov meteorologických veličín z 13 staníc na území Slovenska v období od 1. januára 1981 do 31. decembra 2019. Údaje nám poskytol Slovenský hydrometeorologický ústav.

4. Výsledky

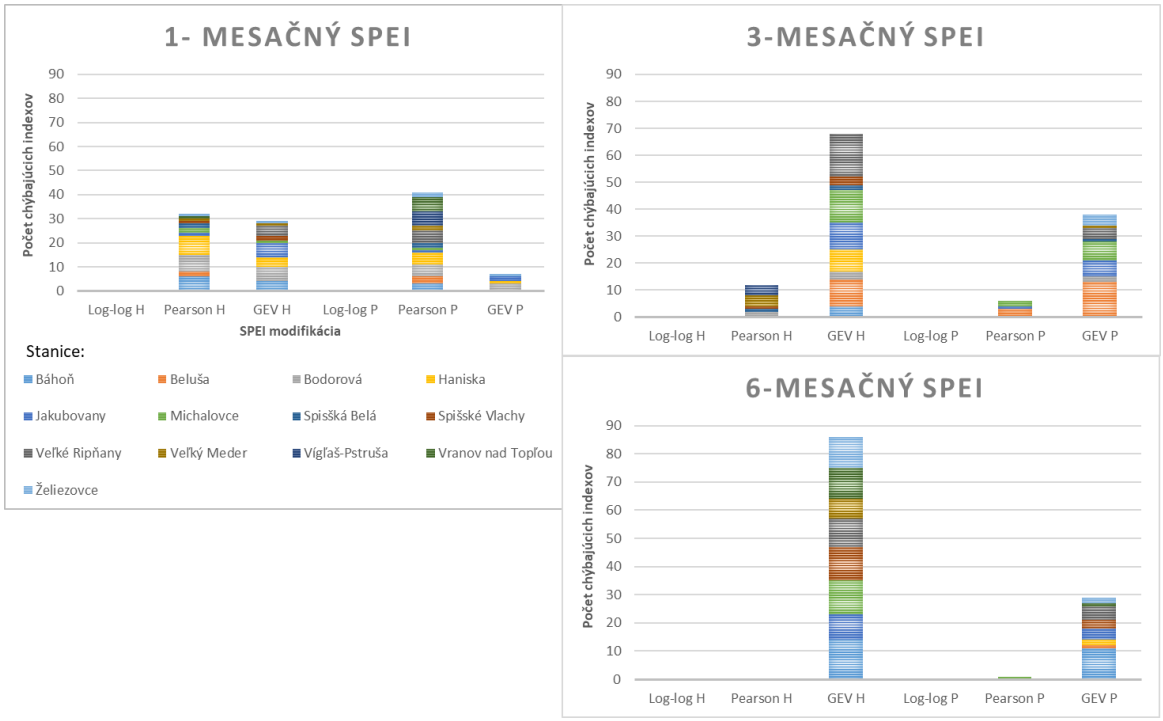
a) Počet prípadov, kedy model nedokázal vypočítať parametre zvoleného štatistického rozdelenia

Ako sme už spomenuli vyššie, za určitých okolností pri výpočte *SPEI* nie je možné vypočítať parametre zvoleného štatistického rozdelenia. Pokiaľ chýbajú parametre rozdelenia, ktoré sa vzťahujú na určitý deň v analyzovanom časovom období, tento deň bude vo výsledkoch chýbať naprieč celým analyzovaným obdobím (v našom prípade teda 39 hodnôt).

Na obr. 2 uvádzame počet prípadov nemožnosti výpočtu parametrov štatistického rozdelenia pre danú modifikáciu indexu.

V tab. 3 sú uvedené počty chýbajúcich indexov týkajúce sa daného štatistického rozdelenia (súhrnne pre 3 dĺžky indexov, 2 metodiky výpočtu *PET*, 13 staníc a 14235 dní/39 rokov)

a zároveň je zo súhrnného počtu vypočítaný aj percentuálny výskyt takéhoto javu pri použití jednotlivých štatistických rozdelení.



Obr. 2 Počet prípadov, kedy z daných vstupných údajov nebolo možné vypočítať parametre zvoleného štatistického rozdelenia pri použití jednotlivých modifikácie indexu. Názvy SPEI modifikácií sú zložené z kombinácie použitého štatistického rozdelenia a písmena označujúceho použitú metodiku na výpočet PET (H = Hargreaves a P = Penman-Monteith). Pri každej modifikácii je v stĺpci vyznačený celkový počet chýbajúcich indexov pre všetkých 13 staníc spolu (jednotlivé stanice v stĺpcoch sú rozlíšené farebne podľa farebnej škály v legende). Maximálny možný počet prípadov kedy nebolo možné vypočítať parametre rozdelenia pre 1 stanicu je 365 (počet dní v roku).
Fig. 2 The number of cases when it was not possible to calculate the parameters of the selected statistical distribution using the given input data with individual modifications of the index. The names of SPEI modifications consist of a combination of the used statistical distribution and a letter indicating the methodology used for calculating PET (H = Hargreaves and P = Penman-Monteith). For each modification, the total number of missing indices for all 13 stations together is shown in the column (individual stations in the columns are distinguished by color according to the color scale in the legend). The maximum possible number of cases when it was not possible to calculate distribution parameters for 1 station is 365 (number of days in a year).

Ako môžeme vidieť na obr. 2, pri 3- a 6-mesačnom indexe najviac prípadov nemožnosti výpočtu parametrov sa vyskytlo pri zvolení GEV štatistického rozdelenia (najmä v kombinácii s Hargreaves metódou výpočtu *PET*). V prípade 1-mesačného indexu vykazoval index najväčší počet týchto prípadov v súvislosti s Pearsonovým III rozdelením. Ako uvádzame v tab. 3, súhrnne najväčší počet prípadov nemožnosti výpočtov pripadá na voľbu GEV štatistického rozdelenia. Takéto výsledky sa zhodujú s výsledkami Vicente-Serrano, Beguería 2016, ktorí tiež zistili vyšší počet prípadov chýbajúcich indexov pri použití GEV štatistického rozdelenia v porovnaní s log-logistickým rozdelením. Na druhej strane Stagge, Tallaksen, et al. 2016, ktorí analyzovali GEV a log-logistické rozdelenie nezistili chýbajúce indexy v dôsledku problému s výpočtom parametrov rozdelení ani pri jednom z 2 analyzovaných štatistických rozdelení. Obe porovnávané štúdie boli zamerané na oblasť Európy.

Tab. 3 Počet chýbajúcich indexov v dôsledku prípadov, kedy z daných vstupných údajov nebolo možné vypočítať parametre rozdelenia. Pri každom zo štatistických rozdelení bolo do analýzy zahrnutých spolu 1110330 indexov (3 časové dĺžky indexu, 2 metodiky výpočtu PET, 13 staníc a 14235 dní/39 rokov).
Tab. 3 Number of missing indices due to the inability to fit the distribution parameters. The full sample of indices with the given distribution consists of 1110330 indices (3 lengths of the index, 2 different PET methods, 13 stations, and 14235 days/39 years).

štatistické rozdelenie	**počet chýbajúcich indexov**	**percent [%]**
log-logistické	*0*	*0.00*
Pearsonovo III	*3588*	*0.32*
GEV	*10023*	*0.90*

b) Počet prípadov kedy indexy SPEI nespĺňali podmienku normálneho rozdelenia

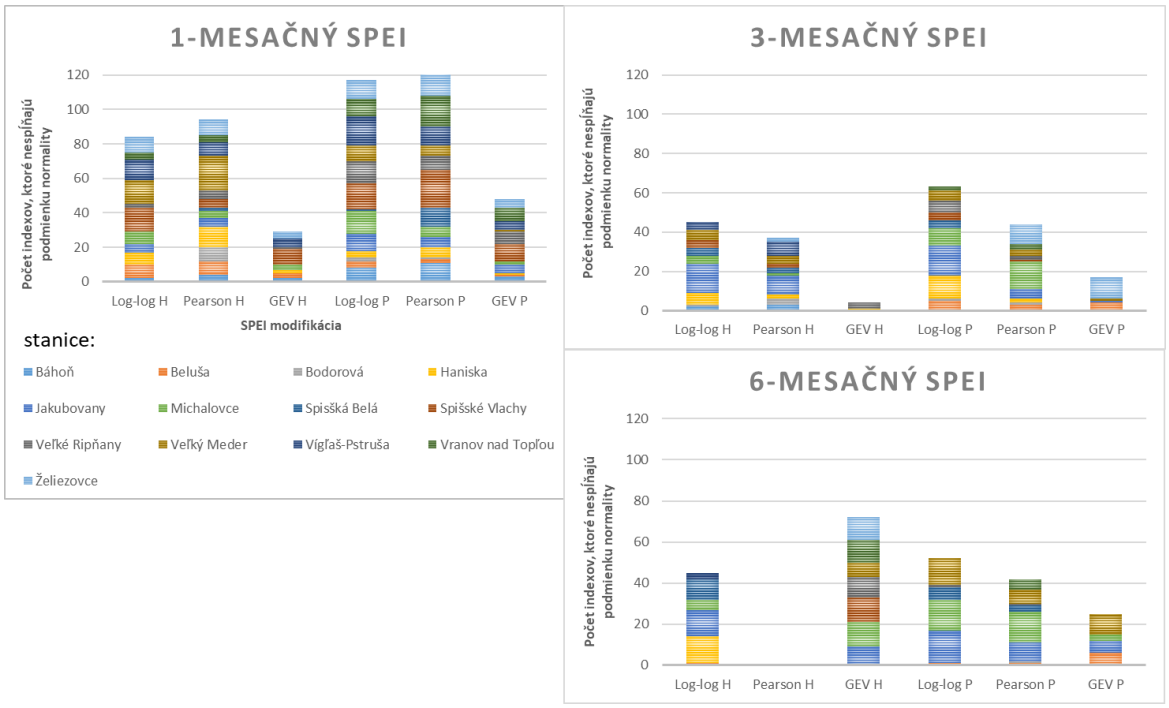
Pokiaľ bolo možné vypočítať parametre štatistického rozdelenia, indexy podstúpili test ďalším kritériom, test na normálne rozdelenie výsledného radu *SPEI*. Ako bolo už predtým uvedené, test na normálne rozdelenie finálnych hodnôt *SPEI* môže byť použitý ako alternatívna metóda namiesto použitia testov na vhodnosť fitu klimatického ukazovateľa zavlaženia (*D*).

Výsledky S-W testu na normalitu rozdelenia ukázali, že pri použití GEV štatistického rozdelenia spĺňa podmienku normality najväčšie percento výsledných indexov, bez ohľadu na použitú metódu výpočtu *PET* (obr. 3). Podmienku normality v tomto prípade nespĺňa 0,08 % až 1,01 % indexov (v závislosti od zvolenej metodiky výpočtu *PET* a časovej dĺžky indexu). Na druhej strane, pokiaľ bolo použité log-logistické rozdelenie, 0,95 % až 2,64 % výsledných hodnôt nespĺňa kritérium o normalite. V prípade použitia Pearsonovho III rozdelenia išlo o 0,74 % až 2,64 % z celkového počtu výsledných indexov.

V našej práci sme indexy, ktoré nespĺňajú podmienku normality vyradili pre ďalšiu analýzu, keďže pokladáme, že tieto indexy nie sú vhodne odhadnuté. Ako je to zobrazené v tab. 4, najväčšie percento „vyradených“ indexov týmto kritériom po spočítaní všetkých modifikácií pripadá na log-logistické rozdelenie.

c) Počet nadhodnotených extrémov

Vylúčenie indexov, ktoré nespĺňajú podmienku normálneho rozdelenia spôsobilo zároveň aj vylúčenie nereálne nadhodnotených extrémov (|*SPEI*|>6). Takto extrémne hodnoty sa vyskytli z troch analyzovaných štatistických rozdelení iba pri Pearsonovom III rozdelení.



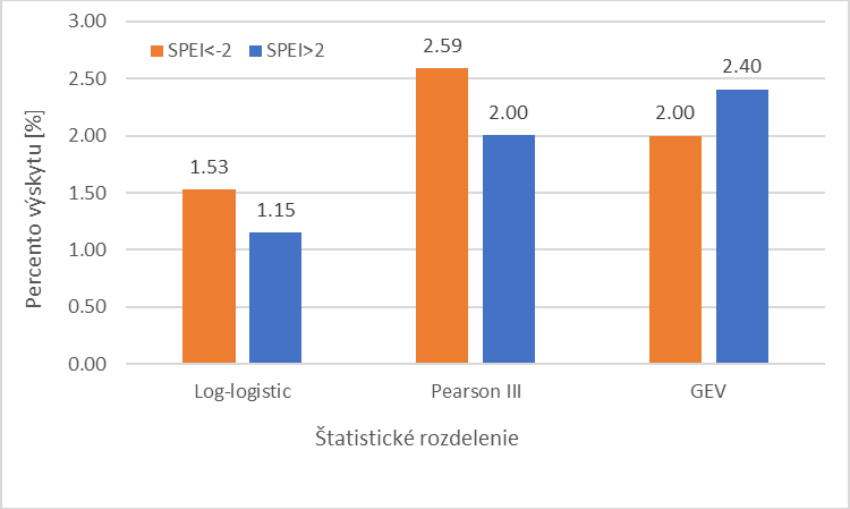
Obr. 3 Počet prípadov, kedy pre určitý deň v roku 39ročný rad výsledných hodnôt SPEI nemal normálne rozdelenie. Názvy SPEI modifikácií sú zložené z kombinácie použitého štatistického rozdelenia a písmena označujúceho použitú metodiku na výpočet PET (H = Hargreaves a P = Penman-Monteith). Pri každej modifikácii je v stĺpci vyznačený celkový počet chýbajúcich indexov pre všetkých 13 staníc spolu (jednotlivé stanice v stĺpcoch sú rozlíšené farebne podľa farebnej škály v legende). Maximálny možný počet prípadov kedy indexy nemali normálne rozdelenie pre 1 stanicu je 365 (počet dní v roku).
Fig. 3 The number of cases when, for a specific day in the year, the 39-year series of SPEI resulting values did not have a normal distribution. The names of SPEI modifications consist of a combination of the used statistical distribution and a letter indicating the methodology used for calculating PET (H = Hargreaves and P = Penman-Monteith). For each modification, the total number of missing indices for all 13 stations together is shown in the column (individual stations in the columns are distinguished by color according to the color scale in the legend). The maximum possible number of cases when indices did not have a normal distribution for 1 station is 365 (number of days in a year.

Pri analýze vzorky údajov z ktorej boli predtým odstránené prípady, ktoré nemali normálne rozdelenie, nebol výskyt extrémov nezvyčajný a preto v tomto kroku a na základe tohto kritéria nevylúčime žiadne indexy ako nesprávne odhadnuté. V prípade log-logistického rozdelenia 1,15 % indexov bolo väčších ako 2 a 1,53 % menších než −2. Pri Pearsonovom III a GEV rozdelení bolo s hodnotou nad 2 2,00 % a 2,40 % indexov a s hodnotou menšou než −2 2,59 % resp. 2,00 % (obr. 4). Podľa definície normálneho rozdelenia 95,4 % dát by malo ležať v úseku medzi -2σ a 2σ. Z toho vyplýva, že približne 2,3 % dát by malo ležať nad a pod uvedenou hranicou. Na základe týchto informácií teda môžeme uzavrieť, že log-logistické rozdelenie mierne podhodnocuje extrémy.

Menej než 0,01 % indexov malo hodnoty väčšie resp. menšie než 3 resp. −3 v prípade log-logistického a GEV rozdelenia. Pri Pearsonovom III rozdelení sa takéto extrémy vyskytli v 0,015 % prípadov. Pri normálnom rozdelení by sa mimo oblasti $\pm 3\sigma$ malo vyskytovať zhruba 0,3 % dát.

Tab. 4 Počet indexov, ktoré nespĺňajú podmienku normálneho rozdelenia. Pri každom zo štatistických rozdelení bolo do analýzy zahrnutých spolu 1110330 indexov (3 časové dĺžky indexu, 2 metodiky výpočtu PET, 13 staníc a 14235 dní/39 rokov).
Tab. 4 Number of indices that do not satisfy the normal distribution condition. For each of the statistical distributions, a total of 1110330 indices were included in the analysis (3 index time lengths, 2 PET calculation methodologies, 13 stations and 14235 days/39 years).

štatistické rozdelenie	počet indexov, ktoré nespĺňaju podmienku normality	percent [%]
log-logistické	*15834*	*1.43*
Pearsonovo III	*14664*	*1.33*
GEV	*5070*	*0.46*



Obr. 4 Percento výskytu SPEI väčšieho než 2 (modrý stĺpec) a menšieho než −2 (oranžový stĺpec) pre 3 analyzované štatistické rozdelenia.
Fig. 4 Percentage of SPEI greater than 2 (blue bar) and less than −2 (orange bar) for the 3 analyzed statistical distributions.

5. Diskusia a záver

Voľba štatistického rozdelenia pri výpočte indexu *SPEI* môže ovplyvniť počet prípadov kedy sa nedopracujeme k výslednému indexu z dôvodu nemožnosti vypočítať parametre rozdelenia. Tak isto môže byť ovplyvnený aj počet nepresne odhadnutých indexov, čo sa môže prejaviť tým, že indexy nespĺňajú normálne rozdelenie, či vykazujú extrémy, ktoré sa vymykajú reálnym hodnotám.

V tejto práci sme na základe počtu prípadov, kedy nebolo možné vypočítať parametre zvoleného štatistického rozdelenia, počtu prípadov, kedy indexy *SPEI* nespĺňali kritérium normálneho rozdelenia a frekvencie výskytu nadhodnotených extrémov analyzovali vhodnosť 3 štatistických rozdelení pre použitie pri výpočte *SPEI* v klimatických podmienkach Slovenska. Konkrétne sme analyzovali log-logistické rozdelenie, Pearsonovo III rozdelenie a GEV rozdelenie.

V tab. 5 uvádzame súhrn výsledkov našej analýzy. Podľa našich troch kritérií bolo najnižšie percento odstránených indexov (či už v dôsledku nemožnosti výpočtu indexu alebo nevhodne odhadnutého indexu) dosiahnuté použitím GEV štatistického rozdelenia. Avšak percento

odstránených indexov nebolo značne vyššie ani pri použití log-logistického rozdelenia. Log-logistické rozdelenie je síce odporúčané autormi indexu a zároveň aj najčastejšie používané pri výpočte *SPEI*, avšak naša analýza poukazuje na možnosť dosiahnutia o čosi lepších výsledkov pri použití GEV rozdelenia. V prospech GEV rozdelenia totiž hrá aj fakt, že pri jeho použití bol síce najvyšší počet prípadov, kedy nebolo možné vypočítať parametre rozdelenia, ale v ďalšom kroku (test na normalitu indexov) bolo o to menej prípadov, kedy indexy nespĺňali kritérium normality. Takýmto spôsobom boli mnohé prípady, (ktoré by sa s veľkou pravdepodobnosťou v druhom kroku prejavili ako nevhodne odhadnuté), eliminované automaticky samým výpočtom indexu. Pokiaľ by sa však použilo log-logistické rozdelenie, odporúčali by sme na základe našich výsledkov urobiť aj test na normálne rozdelenie finálnych indexov, aby sa vylúčili nevhodne odhadnuté indexy. Zároveň analýza extrémov ukázala, že log-logistické rozdelenie mierne podhodnocuje extrémy.

Analýzu extrémov sme vykonávali na radoch indexov z ktorých boli v predchádzajúcom kroku odstránené indexy, ktoré nespĺňali podmienku normality. Za takýchto okolností sa extrémy nevymykali očakávaným hodnotám v oblasti extrémov. Keď sme však rovnakú analýzu vykonali na radoch indexov z ktorých predtým neboli odstránené prípady, ktoré nemali normálne rozdelenie, zistili sme v prípade Pearsonovho III rozdelenia výskyt nezanedbateľného počtu nereálnych hodnôt extrémov |*SPEI*|>6. Takto extrémne prípady by sa podľa definície mali vyskytovať raz za milióny rokov. Na elimináciu nevhodne určených extrémov je preto podľa našej analýzy možné použiť aj test na normalitu indexov.

Tab. 5 Počet eliminovaných indexov na základe 3 kritérií: 1. počet prípadov, kedy model nedokázal odhadnúť parametre zvoleného štatistického rozdelenia; 2. počet prípadov, kedy finálne hodnoty indexov nemali normálne rozdelenie, čo svedčí o nevhodne zvolenom štatistickom rozdelení; 3. počty nereálne nadhodnotených extrémov (|SPEI|>6). Indexy eliminované nižším kritériom neboli zahrnuté do analýzy vyšším kritériom. Celkový počet indexov zahrnutých v analýze pre každé z 3 štatistických rozdelení bol 1110330.

Tab. 5 The number of eliminated indices based on 3 criteria: 1. the number of cases when the model failed to estimate the parameters of the chosen statistical distribution; 2. the number of cases when the final values of the indices did not have a normal distribution, which indicates an inappropriately chosen statistical distribution; 3. the number of unrealistically overestimated outliers (|SPEI|>6). The indices eliminated by the lower criterion were not included in the analysis by the higher criterion. The total number of indices included in the analysis for each of the 3 statistical distributions was 1110330.

	počet eliminovaných indexov na základe 3 kritérií:				
Štatistické rozdelenie	1. chýbajúce parametre rozdelenia	2. nie normálne rozdelenie	3. nadhodnotené extrémy	suma	percento eliminovaných indexov
log-logistické	*0*	*15834*	*0*	*15834*	*1.43%*
Pearsonovo III	*3588*	*14664*	*0*	*18252*	*1.64%*
GEV	*10023*	*5070*	*0*	*15093*	*1.36%*

Literatúra

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper, 300 pp., ISSN 20734395. Dostupné z: http://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm

BEGUERIA, S., VICENTE-SERRANO, S. M., REIG, F., LATORRE, B., 2014. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, **34**, 10, 3001–3023 [accessed. 4. October 2019]. ISSN 10970088. https://doi.org/10.1002/joc.3887

DANČOVÁ, M., CHOVANCOVÁ, L., et al., 2023. The Eight National Communication of the Slovak Republic on Climate Change: Under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol [online]. Dostupné z: https://oeab.shmu.sk/app/cmsSiteBoxAttachment.php?ID=134&cmsDataID=0

DROOGERS, P., ALLEN, R. G., 2002. Estimating Reference Evapotranspiration Under Inaccurate Data Conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, **16**, 33–45, ISSN 1573-0654. https://doi.org/10.1023/A:1015508322413

FAŠKO, P., MARKOVIČ, L., BOCHNÍČEK, O., PECHO, J., 2020. Decadal changes in snow cover characteristics in Slovakia over the period 1921–2020. Conference: EGU General Assembly 2020. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-3405

GUDMUNDSSON, L., STAGGE, J. H.,, 2016. SCI: Standardized Climate Indices Such as SPI, SRI or SPEI. Dostupné z: https://cran.r-project.org/package=SCI

NCP, 2022. National Climate Program of the Slovak Republic, Vol. 16,22: Climatological and phenological normals for period 1991–2020 in Slovakia. ISBN 978-80-99929-35-8.

STAGGE, J. H., TALLAKSEN, L. M., GUDMUNDSSON, L., VAN LOON, A. F., STAHL, K., 2015. Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, **35**, 4027–4040, ISSN 10970088. https://doi.org/10.1002/joc.4267

STAGGE, J. H., TALLAKSEN, L. M., GUDMUNDSSON, L., VAN LOON, A. F., STAHL, K., 2016. Response to comment on 'Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI)'. *International Journal of Climatology*, **36**, 4, 2132–2138, ISSN 10970088. https://doi.org/10.1002/joc.4564

VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERIA, S., 2016. Comment on 'Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI)' by James H. Stagge et al., *International Journal of Climatology*, **36**, 4, 2120–2131, ISSN 08998418. https://doi.org/10.1002/joc.4474

VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERIA, S., LÓPEZ-MORENO, J. I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, **23**, 7, 1696–1718, ISSN 08948755. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

WMO, 2022. Temperatures in Europe increase more than twice global average [online]. Dostupné z: https://public.wmo.int/en/media/press-release/temperatures-europe-increase-more-twice-global-average

Analýza plošných 1denních sezónních srážkových maxim na základě rastrů interpolovaných denních hodnot srážek

(Statistical characteristics of 1-day rainfall maxima and their spatial variability)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.27

Petr Šercl, Český hydrometeorologický ústav, petr.sercl@chmi.cz
Vojtěch Svoboda, Český hydrometeorologický ústav, vojtech.svoboda@chmi.cz

Abstrakt: Pro analýzu plošných 1denních sezónních srážkových maxim byla využita data interpolovaných denních hodnot srážek za období 1961–2020. Analýza byla prováděna v pravidelné síti čtvercových polygonů s plochou od 16 do 324 km². Pro každý polygon a jednotlivé roky byly zjišťovány maximální plošné 1denní úhrny srážek za sezónu od 15. dubna do 15. října. Vznikly řady 60 hodnot sezónních maxim, které byly následně statisticky zpracovány. Výsledky byly analyzovány v prostředí GIS. Kromě očekávaných rozdílů mezi nížinnými oblastmi, pahorkatinami a horskými oblastmi obecně jsou patrné i regionální rozdíly, např. větší variabilita 1denních srážkových maxim v Čechách oproti Moravě. Byly zjišťovány i závislosti statistických charakteristik 1denních maximálních srážek na velikosti plochy.

Klíčová slova: 1denní maximální srážky – statistické charakteristiky – plošná analýza

Abstract: Data from interpolated daily rainfall totals for the period 1961–2020 were used for the area analysis of 1-day annual rainfall maxima. The analysis was performed in a regular grid of square areas ranging from 16 to 324 km². For each area and individual year, maximum areal 1-day rainfall totals were derived for the period between 15 April and 15 October. Datasets of 60 seasonal maximum values were created and further statistically processed. The results were analysed in the GIS environment. As expected, there are noticeable differences between lowlands, uplands and mountain areas in general. In addition, regional differences are visible, e.g. greater variability of 1-day rainfall maxima in Bohemia compared to Moravia. Furthermore, the dependence of statistical characteristics of 1-day rainfall maxima on the considered size of the area was investigated.

Keywords: daily rainfall maxima – statistical characteristics – regional analysis

1. Úvod

Odvození věrohodných hodnot *N*-letých srážkových úhrnů je velmi důležité nejen z hlediska hydrologického modelování, proto právě odvození *N*-letých srážek v různých časových a prostorových rozlišeních je součástí řešení projektu PERUN. Cílem tohoto příspěvku bylo využití zpracovaných rastrových dat interpolovaných denních úhrnů srážek za období 1961–2020 pro prostorovou analýzu statistických charakteristik sezónních maximálních 1denních srážek. Poznatky z hromadného zpracování v několika různých prostorových rozlišeních mohou být dále využity při řešení projektu.

2. Data

Základním vstupem pro analýzu 1denních srážkových maxim byly interpolované denní úhrny srážek za období 1961–2020 ve formě rastrových dat. Jelikož metodika zpracování těchto dat nebyla v době psaní tohoto příspěvku oficiálně publikována, jsou uvedeny pouze základní informace z písemného vyjádření autora Petra Štěpánka (CzechGlobe), který data poskytl.

Interpolovány byly denní srážkové úhrny ve srážkoměrných stanicích zpracovaných do formy tzv. technických (homogenizovaných) řad a uložených do databáze CLIDATA. Metoda interpolace byla regresní kriging, kde jako prediktory byly zvoleny nadmořská výška,

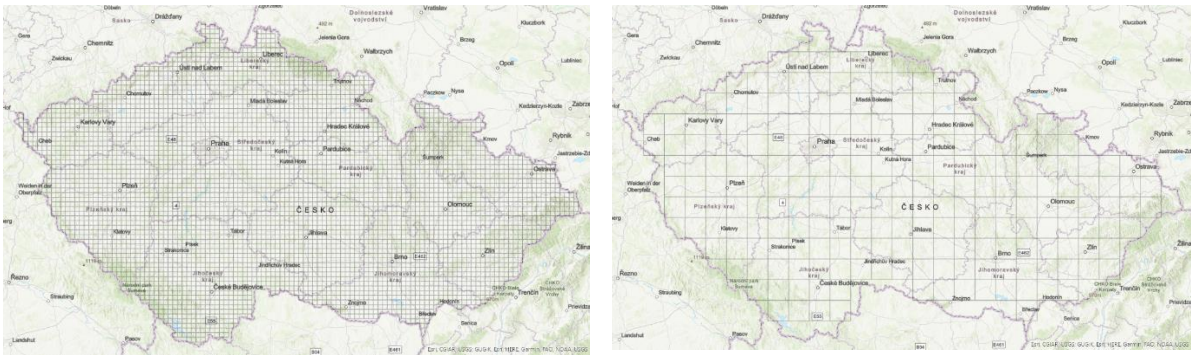
zeměpisná délka a šířka a expozice vůči světovým stranám, přičemž v místech srážkoměrných stanic hodnoty v rastru odpovídají vstupní hodnotě z bodového měření.

Vzhledem k tomu, že nejvyšší denní úhrny srážek v roce se na území ČR vyskytují zpravidla ve vegetační sezóně, bylo pro další zpracování zvoleno období od 15. dubna do 15. října. Celkem tedy do dalšího zpracování vstupovalo 10980 rastrů (183 dní × 60 let) ve formátu GeoTIFF.

3. Zpracování dat

Pro snazší zpracování rastrových dat denních úhrnů srážek byl v prostředí ArcGIS Pro vytvořen tzv. mozaikový dataset, což je databázová tabulka, která obsahuje odkazy na umístění rastrů v počítačové síti, dalšími údaji jsou sloupec s časovou informací vztahující se rastrovému snímku a sloupec obsahující název veličiny, kterou rastrová data představují. Celkový počet řádků této tabulky odpovídá počtu použitých rastrových snímků, více o mozaikovém datasetu viz oficiální webové stránky ArcGIS Pro: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/mosaic-datasets.htm.

Pro účely zpracování dat v GIS bylo území ČR rozděleno do pravidelné sítě čtvercových ploch s variabilním rozlišením od 4×4 km do 18×18 km (tj. 15 různých rozlišení s plochou 16 až 324 km²). Mřížky o velikosti 16, resp. 324 km^2, jsou pro ilustraci znázorněny na obr. 1.



Obr. 1 Rozsah prostorového rozlišení pro analýzy, od 16 km^2 (vlevo) do 324 km^2 (vpravo).
Fig. 1 Range of spatial resolution for the performed analyses, from 16 km^2 (left) to 324 km^2 (right).

Pro všechny mřížky daných rozlišení byly metodou zonální statistiky v GIS spočteny průměrné hodnoty srážek v jednotlivých čtvercích. Výsledkem bylo 15 tabulek, kde každý řádek v tabulce odpovídá jednotlivému čtverci s hodnotou výšky srážek pro daný den.

Další zpracování proběhlo za pomocí skriptů v Pythonu. Pro každý čtverec bylo vybráno denní maximum za období 15. dubna až 15. října pro každý rok z let 1961–2020. Těchto 60 maxim bylo následně vyexportováno do samostatného textového souboru, kdy každý soubor obsahoval celkem tři sloupce: identifikátor čtverce, datum výskytu maxima a hodnotu maxima. Všechny řady sezónních maxim byly následně statisticky zpracovány.

V řadách byly nejprve detekovány horní odlehlé hodnoty pomocí procedur implementovaných v knihovně extremevalues (van der Loo 2020) určené pro prostředí statistického jazyka R. Konkrétně byly využity algoritmy, hledající odlehlé hodnoty ve vzorku dat vycházejícího z logaritmicko-normálního rozdělení na základě očekávaného výskytu hodnoty pozorování. Metoda je podrobněji popsána v publikaci van der Loo (2010). Pro každý polygon byl tímto postupem odhadnut počet odlehlých hodnot (0 až 5).

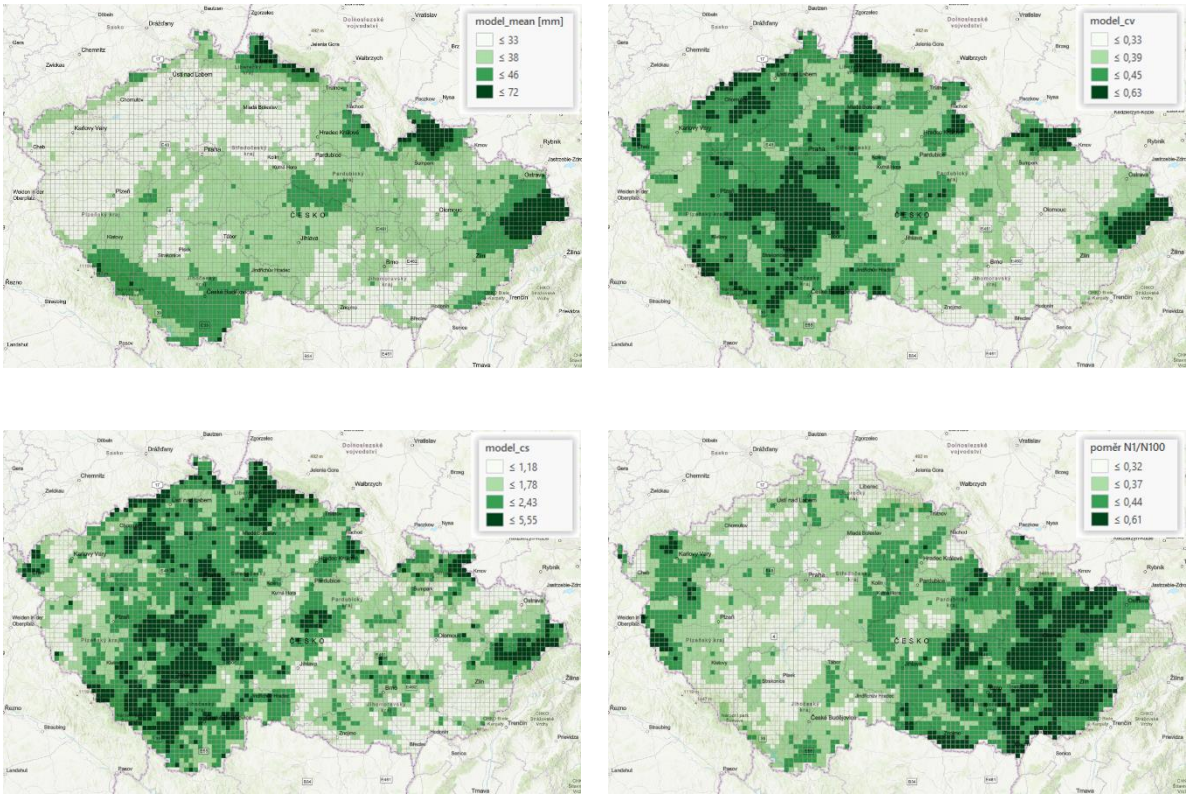
Pro každý čtverec byl vytvořen model čáry opakování odvozující *N*-leté hodnoty sezónních 1denních srážkových úhrnů. Pro výpočet čáry opakování bylo využito tříparametrické

logaritmicko-normální teoretické statistické rozdělení extrémních hodnot (LN3) a pro odhad parametrů zvoleny metody maximální věrohodnosti (MLE) a *L*-momentů (LMO), přičemž byla vždy využita metoda dávající lepší odhad na základě Akaikeho informačního kritéria (AIC; Akaike 1974). Z celkového počtu 18123 polygonů, byla ve zhruba 75 % případů na základě tohoto kritéria preferována metoda LMO a v 25 % pak metoda MLE.

Charakteristiky modelových čar opakování: průměr (*model_mean*), koeficient variace (*model_cv*), koeficient asymetrie (*model_cs*) a poměr 1leté a 100leté hodnoty (*poměr N1/N100*), vstupovaly poté do plošných analýz v prostředí GIS.

4. Analýza výsledků

Plošné rozložení hodnot statistických charakteristik *model_mean*, *model_cv*, *model_cs* a poměrů *N1/N100* pro mřížku o velikosti 4×4 km je znázorněno v kartodiagramech na obr. 2.



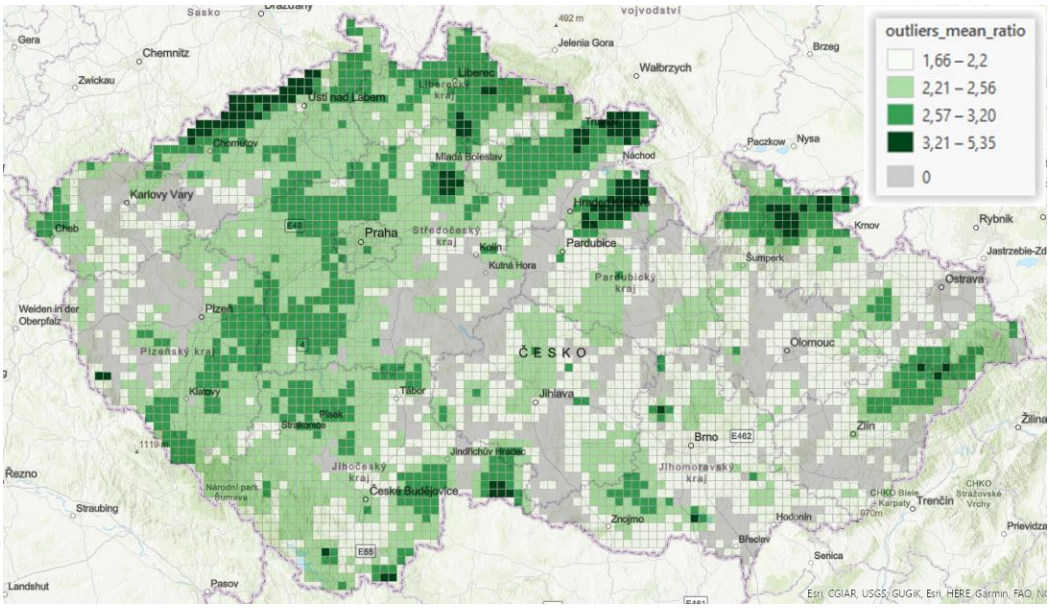
Obr. 2 Plošné rozložení hodnot statistických charakteristik modelových čar opakování pro 1denní srážkové úhrny, průměr (model_mean; vlevo nahoře), koeficient variace (model_cv; vpravo nahoře), koeficient asymetrie (model_cs; vlevo dole) a poměr 1leté a 100leté hodnoty (poměr N1/N100; vpravo dole).

Fig. 2 Spatial distribution of the statistical characteristics for theoretical return period curves from daily rainfall totals, mean (model_mean; top left), variation coefficient (model_cv; top right), skewness coefficient (model_cs; bottom left) and 1-year to 100-year ratio (poměr N1/N100; bottom right).

Nejvyšší hodnoty průměru sezónních maxim (*model_mean*), se dle očekávání vyskytují v horských oblastech, kde svojí hlavní roli hraje orografie a návětrné efekty s ní spojené (obr. 2 vlevo nahoře). Za pozornost stojí oblast Šumavy a Novohradských hor, kde jsou průměrné hodnoty maxim na jižněji položené části hlavního hřebene Šumavy nižší než v jeho severní části a rovněž i v podhůří Šumavy a v Novohradských horách. Svou roli zde rovněž hraje orografie vedoucí nejen k zesilování srážek vlivem návětří, ale přispívající rovněž ke vzniku silných bouřek. Naopak nejmenší hodnoty sezónnních maxim se vyskytují v poměrně širokém

oblouku sahajícím od západních Čech a vedoucím přes celou oblast ovlivněnou závětřím Krušných hor až do Polabí.

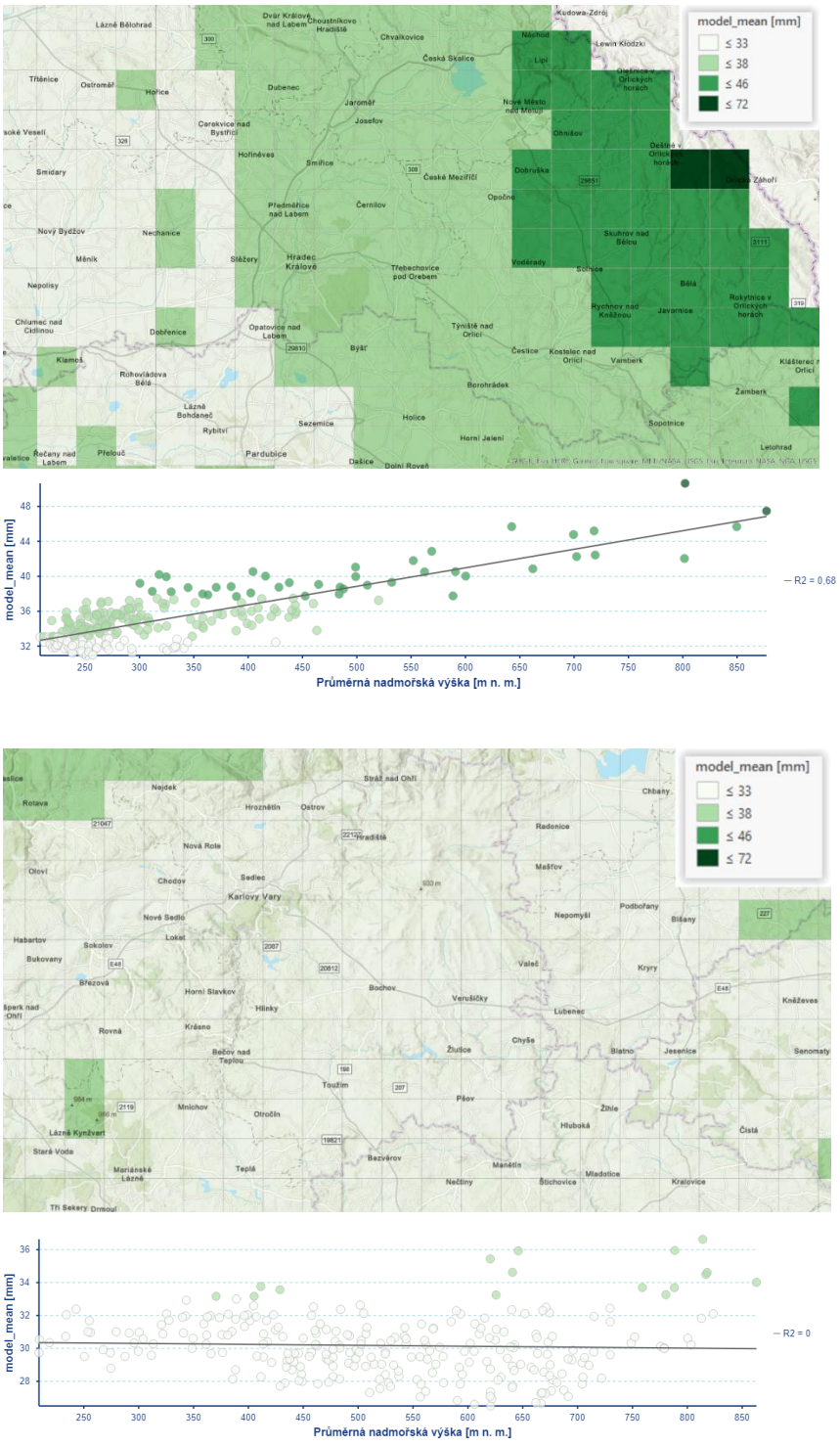
Plošné rozložení koeficientu variace (*model_cv*), který vyjadřuje svojí hodnotou proměnlivost hodnot sezónních maxim, je patrné z pravé horní části obr. 2. Na první pohled je zcela zjevný rozdíl mezi územím Čech a územím Moravy a Slezska. Zatímco v Čechách se větší variabilita vyskytuje jak v nížinných oblastech, pahorkatinách a horách, na území Moravy a Slezska mají vysokou variabilitu pouze oblasti Beskyd a severní návětří Jeseníků. Zatímco vysoká variabilita v horských oblastech je poměrně snadno vysvětlitelná častým výskytem srážkových extrémů vlivem orografie, rozdíly mezi variabilitou maxim v nížinách a pahorkatinách v Čechách a na Moravě tak jednoduše vysvětlitelné nejsou, nicméně jednoznačně souvisí s četností výskytu extrémních hodnot a jejich odlehlostí od průměru. Oblasti s nejmenšími hodnotami koeficientu asymetrie (*model_cs*), viz obr. 2 vlevo dole, se takřka kryjí s místy, kde nebyla modelem detekována žádná odlehlá hodnota (šedě zbarvené čtverce na obr. 3).



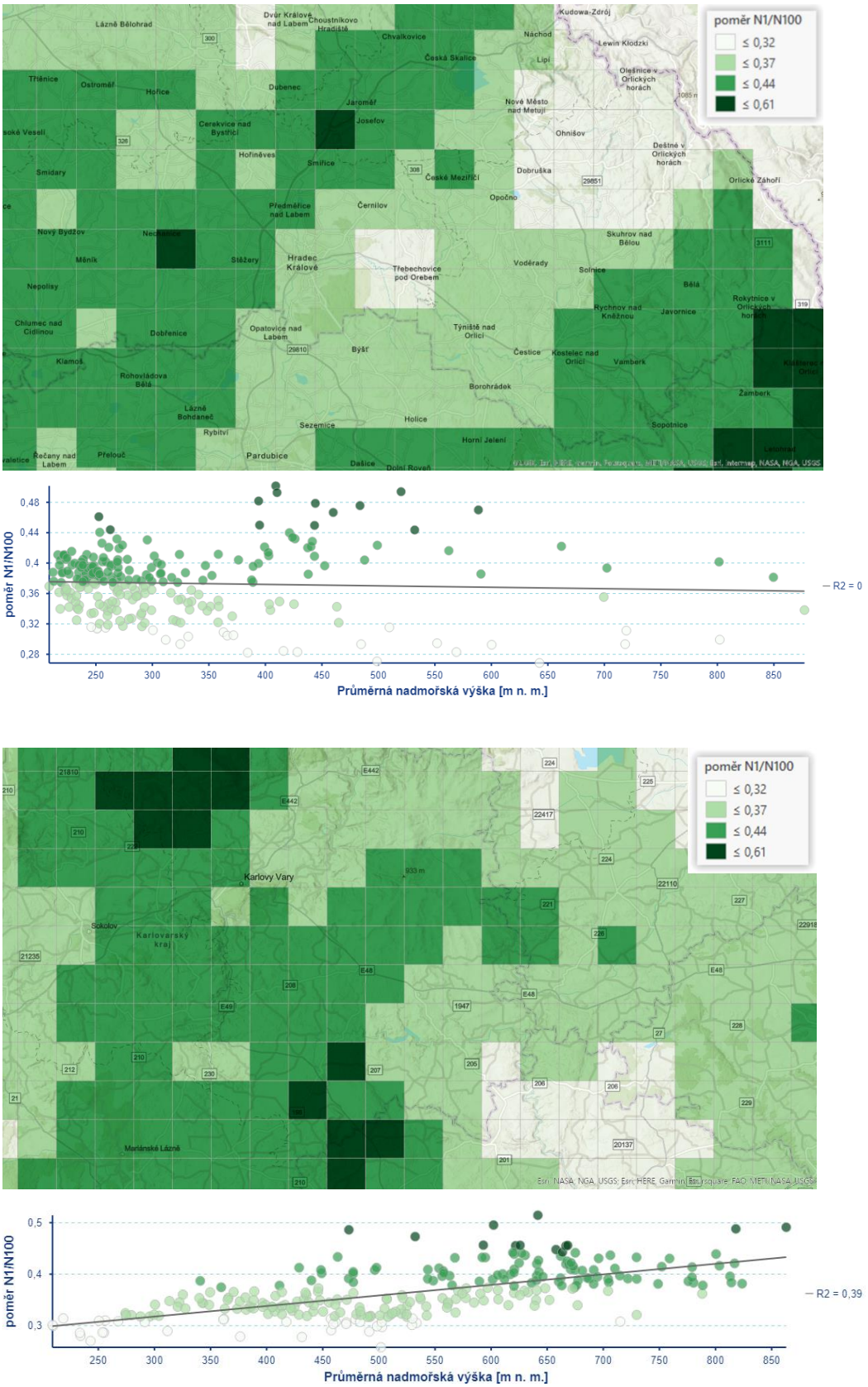
Obr. 3 Poměr mezi průměrem odlehlých hodnot sezónních maxim a průměrem sezónních maxim daných řad.
Fig. 3 The ratio between the mean of the outliers of the seasonal rainfall maxima and the mean of the seasonal rainfall maxima of the given data series.

Obrázek 3 znázorňuje poměr mezi průměrem odlehlých hodnot sezónních 1denních maxim a průměrem sezónních 1denních maxim (*outliers_mean_ratio*). Nejtmavěji zbarvená pole korespondují s nejvíce odlehlými hodnotami, a tedy s konkrétními extrémními srážkovými událostmi. Z rozsáhlejších oblastí lze zmínit pohraniční severovýchodní část Krušných hor, která byla zasažena orograficky zesílenými srážkami 12. 8. 2002, dále území pod Orlickými horami s výskytem přívalových srážek dne 22. 7. 1998, příp. Adršpašsko, kde byly zaznamenány přívalové srážky dne 17. 6. 1979. Nutno podotknout, že všechny zmíněné srážkové události vyvolaly extrémní rozvodnění vodních toků.

Hodnoty poměrů 1letých a 100letých odhadů (obr. 2 vpravo dole) korespondují s velikostí hodnot koeficientu variace, resp. asymetrie. Kromě obecně výrazného rozdílu mezi územím Čech a Moravy je zřetelný i pás vysokých poměrů těchto hodnot v části západních Čech, kde nízké hodnoty průměrů a malá variabilita vede k nejmenším hodnotám odhadů 100letých 1denních srážek na území Čech.

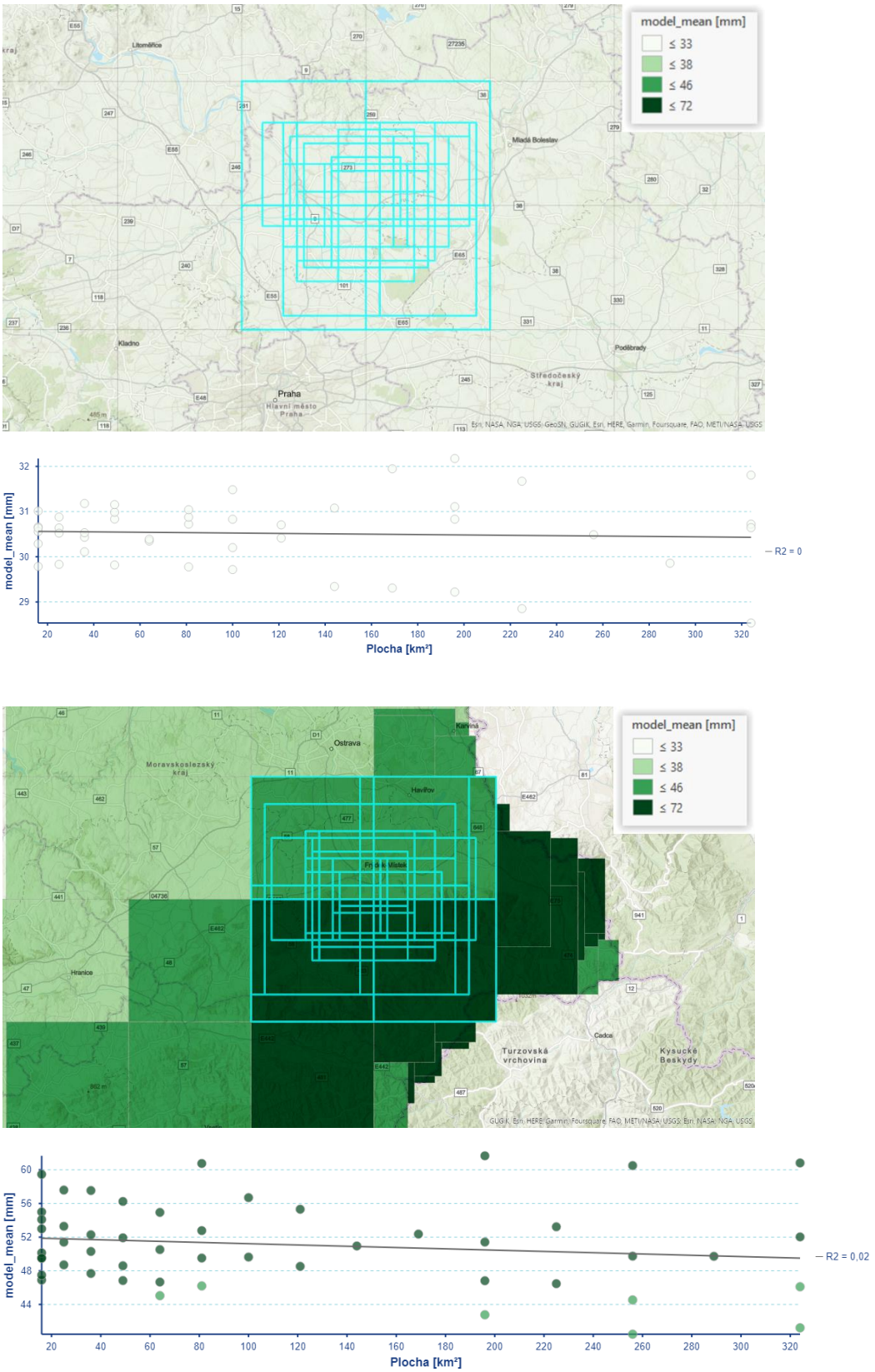


Obr. 4 Závislost modelových průměrných 1denních maxim (model_mean) na nadmořské výšce pro oblast Orlických hor (nahoře) a Karlovarska (dole).
Fig. 4 Dependence of the model mean of daily maxima (model_mean) on altitude for the area of Orlické hory (top) and Karlovarsko (bottom).



Obr. 5 Závislost modelových poměrů N1/N100 na nadmořské výšce pro oblast Orlických hor (nahoře) a Karlovarska (dole).

Fig. 5 Dependence of the model 1-year to 100-year ratio (poměr N1/N100) on altitude for the area of Orlické hory (top) and Karlovarsko (bottom).



Obr. 6 Závislost modelových průměrných 1denních maxim (model_mean) na velikosti uvažované plochy pro oblast Polabí (nahoře) a severozápadní návětří Beskyd (dole).
Fig. 6 Dependence of the model mean of daily maxima (model_mean) on the extent of the considered area for the Polabí region (above) and the north-west windward of the Beskydy mountains (bottom).

Zkoumána byla také závislost modelových průměrných 1denních maxim a poměrů *N1/N100* na nadmořské výšce. Významný vliv na velikost 1denních průměrných maxim má nadmořská výška v oblastech s výrazným návětrným efektem, viz obr. 4 nahoře (Orlické hory). Naopak na závětrné straně je závislost na nadmořské výšce prakticky zanedbatelná, viz obr. 4 dole (Karlovarsko). U poměrů *N1/N100* je v těchto dvou regionech situace opačná. Zatímco na návětrné straně Orlických hor lze nějakou závislost vysledovat jen stěží (obr. 5 nahoře), na Karlovarsku s převažujícím závětřím pravděpodobně nadmořská výška jistý vliv má (obr. 5 dole).

U závislosti průměrných sezónních maxim na velikosti plochy byl předpokládán pokles jejich hodnot s rostoucí plochou. Vybrána byla dvě území, jedno v nížinné oblasti (Polabí) a druhé na severozápadním návětří Beskyd (obr. 6). Ani v jedné oblasti však nebyl prokázán u průměrných 1denních maxim významnější vztah. Totéž lze tvrdit pro poměrné hodnoty *N1/N100*.

5. Závěr

V příspěvku byla provedena plošná analýza statistických charakteristik 1denních sezónních maximálních srážek (od 15. dubna do 15. října) získaných z interpolovaných denních úhrnů srážek za období 1961–2020. Data byla hromadně zpracována v prostředí GIS a pomocí Python skriptů v pravidelné gridové síti o ploše polygonu 4×4 km až 18×18 km. Pro každý polygon bylo získáno celkem 60 hodnot maximálních sezónních 1denních maxim, pro které byla za využití logaritmicko-normálního teoretického statistického rozdělení extrémních hodnot (LN3) odvozena čára opakování pro odvození teoretických sezónních *N*-letých hodnot 1denních srážek. Polygony byly hromadně analyzovány se zaměřením na modelové hodnoty charakteristik průměru, koeficientu variace a asymetrie a poměru teoretické 1leté a 100leté hodnoty.

V charakteristikách byla pozorována velká regionální proměnlivost související s vlivem orografie a návětrných efektů s ní spojených. V nížinách a pahorkatinách se pak projevuje významný vliv četnosti výskytu extrémních hodnot a jejich odlehlosti od průměru. Nadmořská výška má na průměrná 1denní maxima srážek velký vliv v oblastech s výrazným návětrným efektem, naopak na závětrné straně je závislost na nadmořské výšce prakticky zanedbatelná. Také významnější vztah mezi průměrnými 1denními maximy a velikostí uvažované plochy z analyzovaných dat prokázán nebyl.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

AKAIKE, H., 1974. A new look at the statistical model identification, IEEE. *Transactions on Automatic Control*, **19**, 6, 716–723. https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705

van der LOO, M. P. J., 2020. Extremevalues, an R package for outlier detection in univariate data. R package version 2.3.3. Dostupné z: http://www.github.com/markvanderloo/extremevalues

van der LOO, M. P. J., 2010. Distribution based outlier detection for univariate data. Discussion paper 10003, Statistics Netherlands, The Hague/Heerlen. Dostupné z: https://cran.r-project.org/web/packages/extremevalues/vignettes/SN201003.pdf

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.28

Long-term changes and future of snow in the Czech Republic
(Dlouhodobé změny a budoucnost sněhové pokrývky v České republice)

Veronika Šustková, Český hydrometeorologický ústav, veronika.sustkova@chmi.cz
Šimon Bercha, Český hydrometeorologický ústav, simon.bercha@chmi.cz
Jan Jirák, Český hydrometeorologický ústav, jan.jirak@chmi.cz

Abstrakt: Příspěvek se zaměřuje na tři oblasti související s monitoringem parametrů sněhové pokrývky v České republice: automatické sněhoměrné stanice, vyhodnocování zásob vody ve sněhu a na změny ve sněhové pokrývce v České republice od roku 1961 do současnosti a její budoucí vývoj do roku 2100. Automatická sněhoměrná stanice je měřící zařízení schopné v reálném čase měřit a zaznamenávat vodní hodnotu celkové sněhové pokrývky (*SVH*) a v reálném čase celkovou výšku sněhové pokrývky (*SCE*). V současnosti se síť těchto stanic skládá ze 17 stanic schopných měřit výšku i vodní hodnotu a 50 automatických stanic měřících pouze výšku sněhové pokrývky. Do roku 2025 by se měla síť rozrůst o dalších 23 automatických sněhoměrných stanic. Data ze sněhoměrných polštářů poskytují důležitá data pro vyhodnocování zásob vody ve sněhu, které probíhá v týdenním kroku. Sněhová pokrývka a zejména zásoby sněhové vody jsou důležitou součástí hydrologické bilance množství vody v České republice. Vyhodnocování zásob vody ve sněhové pokrývce je také důležitou službou pro podniky povodí, pro které jsou tyto informace zásadní pro manipulace na vodních dílech. V Českém hydrometeorologickém ústavu (CHMI) vypočítáváme zásoby sněhové vody jednou týdně, ale zvyšující se počet automatických stanic v kombinaci s modelovými výpočty nám umožní odhadovat zásoby vody v denním kroku. Ve střední Evropě se vlivem klimatické změny spojené především s růstem teploty vzduchu mění i parametry týkající se sněhové pokrývky. Sníh je pro toto území důležitou součástí srážek a odtoku a má poměrně unikátní postavení i jako zdroj pitné vody pro obyvatelstvo.

Klíčová slova: klimatická změna – sněhová pokrývka – vodní hodnota sněhu – zásoby vody ve sněhu – automatická sněhoměrná stanice

Abstract: The paper focuses on three topics related to the monitoring of snow cover in the Czech Republic: automatic snow stations, evaluation of water reserves in snow and changes and evolution of snow cover in the Czech Republic from 1961 to 2100. Automatic snow station is a measuring mechanism, which can measure and record the snow water equivalent (*SWE*) and the total snow depth (*SD*) in real time. Nowadays there is a network of 17 complete stations (*SWE* and *SD*) and 50 snow depth automatic stations and a plan to build 23 more by 2025. Data from snow pillows are an important input for every week evaluation of water reserves in snow. Snow cover and especially the snow water supplies are an important part of the hydrological balance of water quantity in the Czech Republic. The evaluation of water reserves in a snow cover is also an important service for the state-owned water supply companies, for which this information is essential for the handling of waterworks. In the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI) we calculate snow water reserves once a week, but the increasing number of automatic stations in combination with model calculations will allow us to estimate water reserves in daily steps in the future. In Central Europe, due to climate change, the parameters related to snow cover are changing. Snow is an important component of precipitation and runoff for this area and has a rather unique position as a source of drinking water.

Keywords: climate change – snow cover – snow water equivalent – snow water supplies – automatic snow station

1. Introduction

Capturing data in the field is important for both research (climate change) and determination of water reserves in the snow. In addition to modelling and remote sensing, measured values are among the basic input data for assessment of snow characteristics. The evaluation of snow cover parameters, in particular snow water equivalent (*SWE*), is an important part of the hydrological balance of water quantity in the Czech Republic. There are unequivocal evidences that the air temperature is rising and the proportion of precipitation in the form of snow is decreasing in winter, thus reducing the ability of snow cover to form. Potential water resources are shrinking. Moreover, trends have been accelerating in recent years. In the future, we expect further deterioration of snow cover parameters in the Czech Republic. The intensity of these changes will mainly depend on the future development of the climate. The PERUN project focuses on the research of climatic extremes, drought and the consequences of climate change in the Czech Republic. Climate research is focused on this region with high horizontal resolution (PERUN 2023).

2. CHMI Snow station network

Stations measuring snow are distributed throughout the Czech Republic in lowland and mountainous areas. These include simple rain gauge stations with volunteer observers, as well as professional stations and observatories. Reliable and dense network of stations is due to demographic change mainly in mountain areas supplemented by automatic measurement of snow water equivalent (*SWE*) and snow depth (*SD*).

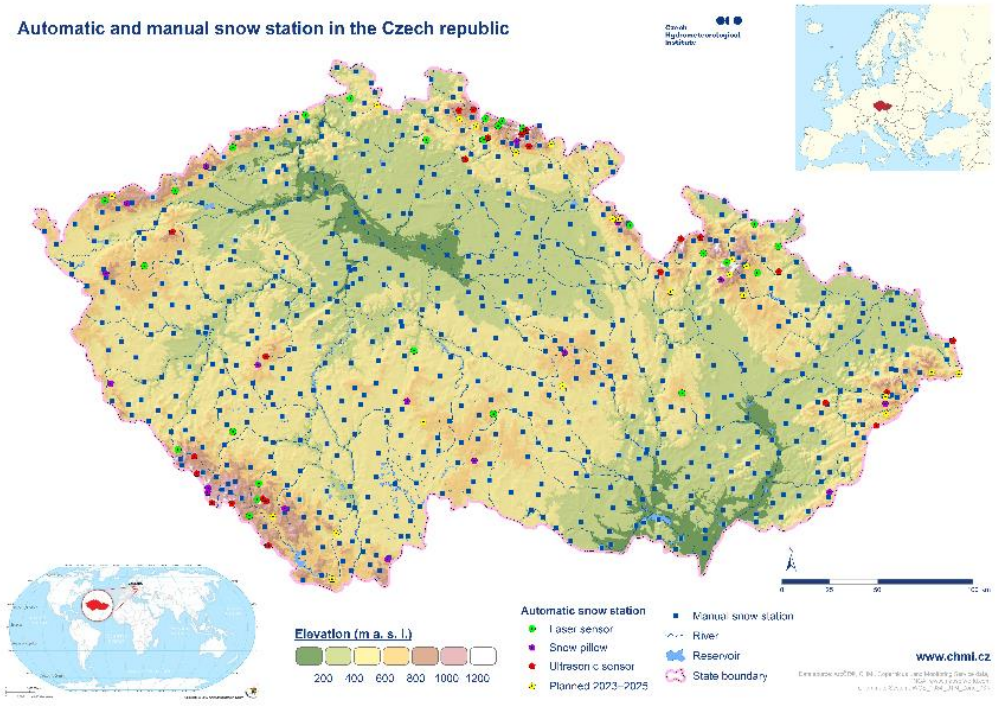


Fig. 1 Automatic and manual snow station in the Czech Republic 2023 with plan by 2025.
Obr. 1 Automatické a manuální sněhoměrné stanice v České republice 2023, plánované do roku 2025.

An automatic snow station is a measuring device capable of measuring and recording the water value of the total snow cover (*SWE*) and the total snow cover depth (*SD*) in real time. The weight of the snow on the measuring device is the equivalent of the water contained in the snow cover, i.e. *SWE*. It is obtained by measuring the hydrostatic pressure inside the antifreeze-filled bag (snow pillow) on which the snow cover lies. The total snow cover depth is measured above the weighed area of the station. Ultrasonic sensors are used to obtain the value of the total snow depth, i.e. *SD*. Simple type of station only measures snow depth using ultrasonic or laser sensor. As part of the snow cover monitoring, the station is supplemented by the measurement of other meteorological elements.

2.1 Snow pillow station network

Construction of the network began in 2006 by testing two types of stations, focusing on the technical functionality of the stations and the factors influencing the measurement accuracy.

Fig. 2 Automatic snow station – snow pillow type
Obr. 2 Automatická sněhoměrná stanice typu sněhoměrný polštář

The installed stations differed in the principle of *SWE* measurement, construction and size of the measured area. The obtained data were compared with manual control measurements using weight snow gauges according to the valid methodology of the CHMI. Better results and maintenance have led to network expansion used snow pillows since 2009. Snow pillow is the PVC bag filled with a mixture of antifreeze and water, where the change in hydrostatic pressure caused by the weight of the snow cover is sensed. Pressure sensors are installed outside the bag in the shaft. Older types have one pressure sensor, new types have two pressure sensors to check the possible failure. The temperature of the bag, to check the frost, is measured in contact above and below the bag itself. The bag has a square shape with an area of 9 m^2, or a circular one with an area of 7.065 m^2. It is placed on a sand and embedded at ground level. The bag is covered with geotextile, silage UV stable foil and a 3–5 cm thick layer of gravel. It is separated from the surrounding soil by a plastic curb. The measured area of the station is not defined in any way and the snow cover passes from/to the measured area of the station without interruption. A simple fencing is installed around the station. The station includes a mast structure in the shape of an inverted letter L. It houses a recording unit, an ultrasonic sensor, an air temperature sensor, alternatively a sensor to measure wind speed and direction, alternatively a sensor to measure relative humidity. The height of the mast structure is variable according to the installation location and the assumed maximum snow height (min. height is

2.3 m). The ultrasonic sensor measures the height of the snow cover, which is located above the measuring area of the station. The ultrasonic sensor is protected by a radiation cover to eliminate the error due to sunlight and is equipped with an automatic temperature correction, which eliminates the dependence of the propagation speed of sound in the air on the air temperature. For newer types of stations, the air temperature measured in the body of the ultrasonic sensor is recorded in the registration unit to verify the temperature independence of the sensor. Nowadays there is a network of 17 complete stations (*SWE* and *SD*) and a plan to build 3 more by 2025. They are deployed regularly especially in highlands and mountainous areas as seen on Fig. 1.

2.2 Factors influencing measurement accuracy (SWE)

During the testing of the automatic stations the factors that fundamentally influence the accuracy of the measurement were described. They can be divided into two groups: (a) factors influencing the accuracy of the measurement of the water value at the point and its explanatory value for the wider surroundings (natural, technical) (b) specific factors influencing the accuracy of the measurement. The most important natural factor influencing the accuracy of the water value measurement at a point is the right choice of the location. It must be selected well in advance and the distribution of snow cover must be regularly monitored during the various phases of the winter season (accumulation, melting). The climatic conditions of the location (prevailing wind directions, length of sunshine) and their possible change in the environment must be taken into account. Technical factors influencing the accuracy of measurements include, in particular, poor installation, insufficient instrument care, lack of calibration, and the quality of measuring sensors. In Central Europe with regular temperature fluctuations in the winter season, the most important specific factor affecting the accuracy of the measurement is the formation of snow bridges. During the regular melting and freezing periods of the snow cover, firn and ice layers are formed, causing the distribution of pressure over a wider area than the defined area of the measuring station. Another important factor is the side friction in the snow layer at the boundary of the measuring station's edge and the surrounding area. This is due to the different melting rates on the measuring area and the surrounding soil, where there is a difference in the speed of snow layer settling and side friction at the boundary. These two phenomena causes a change in the pressure on the snow pillow and thus a measurement error. In recent years, the melting, freezing and accumulation periods has become more frequent and more data control is needed.

2.3 Snow depth station network

The network of snow pillows was followed by other projects in 2015–2021. Extension of the network automatic snow stations measuring the depth of snow suitably complemented this existing network. Part of the project was installation of 40 new stations for measuring the depth of snow cover, which are distributed within the scope of all CHMI branches. Thirty snow stations are a part of already existing climatological or rain gauge stations, here it was mostly the installation of a laser sensor (see Fig. 3) and 10 stations with ultrasonic sensors were erected in the most problematic mountains regions (see Fig. 4).

Fig. 3 and 4 Automatic snow station – laser type (SHM31, left) and ultrasonic type (right).
Obr. 3 a 4 Automatická sněhoměrná stanice – laserová (vlevo) a ultrazvuková (vpravo).

CHMI has also long worked with professional organizations that operate snow stations and meet measurement standards. Data obtained from 10 stations are available in the database and further utilized. In 2023, a new project was launched, which will improve the snow pillow network and further expand the network of automatic snow stations (Fig. 1).

3. Evaluation of snow cover, snow depth and snow water equivalent

There are several reasons why there is an effort to continuously refine the calculation of snow water storage throughout the winter season. Due to the risk of long-term droughts and in general due to climate change in Central Europe, there is a growing demand for more accurate water storage calculations for the state water companies. Due to the increased frequency of melting periods in all altitudinal zones during the whole winter season, the staff of the state-owned water supply companies need to have the most accurate information available and also as soon as possible. The Flood Warning and Forecaster Service of the CHMI has similar requirements for more accurate water supply calculations as well as shorter calculation intervals.

3.1 Methodology for obtaining input data to improve interpolation

The snow water storage is calculated in a weekly step on Monday during the whole winter season from the beginning of November until the end of April. The weekly calculation step is due to the fact that the snow water equivalent is measured at manual weather stations only every Monday.

The calculation of water storage is performed using a special interpolation method in the GIS and among the most important and the most numerous input data belong measured values from manual weather stations. In recent years, the number of stations entering the calculation has stabilized at a total of 600. This number consists of 435 selected verified manual stations, 67 automatic snow stations and about 100 auxiliary stations. An auxiliary station in this case is a station where the snow cover parameters are measured only a few times per winter season and the remaining Monday values are calculated according to an established empirical relationship with the nearest surrounding regularly measured stations. Auxiliary stations are mainly located in places with insufficient density of regular measuring stations or in areas where interpolation of snow water value is problematic due to specific relief. The measurement of snow water equivalent can sometimes be difficult due to the specific density and structure of the snow layer and the accuracy of manual measurements may be affected. Similarly, the

accuracy of automatic snow station measurements is in some cases affected by natural, technical and physical factors. For these reasons, data from all mentioned stations are checked in detail before starting the interpolation. The data from the automatic stations are checked continuously every day at 7 a. m. and measured values are checked by manual onsite measurements during problematic periods in the winter season. An important control for the manual measurements is the expert estimates of snow density intervals (the ratio of snow water equivalent to snow depth), which are determined each week for three different altitude areas (100–600 m a. s. l., 601–900 m a. s. l. and 901–1600 m a. s. l.). In problematic situations, snow density intervals are also determined for specific regions of the country or for individual mountain ranges. Another important element of the data control is the calculated snow water equivalent (*SWEC*). Theoretical values of *SWEC* are calculated using an empirical formula for all meteorological and climatological stations in a daily step. The last control element is data from selected profile measurements. These are detailed measurements in long transects in the Jizerske hory Mountains and Giant Mountains and at CHMI professional stations, whose values are taken as representative for the region.

3.2 Using satellite imagery and ground observations to define the extent of snow cover

For a good interpolation of *SWE* data it is also necessary to determine the zero isochion (snow line with zero value) for individual regions of the Czech Republic as accurately as possible. For the calculation of snow water reserves the territory of the Czech Republic is divided into 9 regions, in case of problematic situations 27 regions are used. For each region, a zero snow line value is determined to avoid erroneous interpolations where the water value was calculated even in areas where snow cover did not occur. Several sources are used to determine the zero isochion. Firstly, data are obtained from the NSIDC (*National Snow and Ice Data Center, University of Colorado*) portal, where images from daily MODIS satellite flybys over central Europe are archived. The selection of satellite images for snowline position analysis is based mainly on the date of acquisition and the amount of cloud cover. One representative image is selected for each week of the observation period. Suitable images are selected due to the Monday ground measurements of the CHMI either on the same day or at the earliest possible previous date. The transformed image is then imported into the ArcGIS as a classified raster, from which the classes "snow cover", "area without snow cover" and "cloud cover" are essential for the purpose of zero isochion. Unfortunately, the accuracy of images depends on the level of cloud cover. Other important sources for determining zero isochion are webcams (cameras of the CHMI, commercial cameras, cameras of amateur meteorologists, etc.) and, of course, records of snow cover measurements at meteorological stations and, last but not least, observations of amateur meteorologists.

3.3 Main outputs of the water storage in the snow cover evaluation

The checked data from manual, automatic and auxiliary stations and the zero isochion data in each region are the input database of weekly GIS calculation whose main purpose is to evaluate the water storage in snow cover as efficiently as possible, especially for flood protection, modelling flow forecasts and water management purposes. The current water storage is evaluated in the GIS for the whole country (see Fig. 5), individual 14 administrative regions and 6 main altitude zones, but also for nearly 80 selected catchments and waterworks. Another output is an assessment report of the weather trend in the week preceding the calculation of the water storage and a forecast of the meteorological situation in the coming week. Among important outputs belong naturally also maps of snow water equivalent and snow depth.

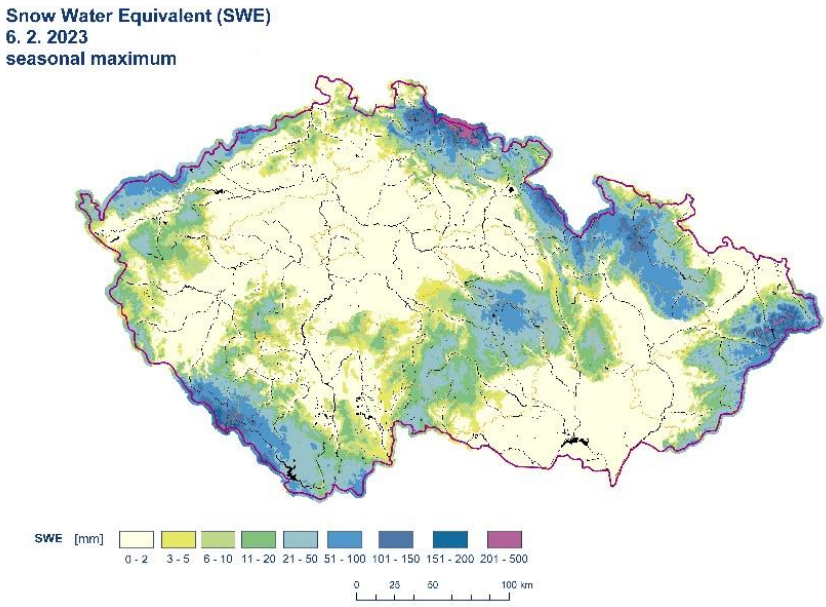


Fig. 5 Snow water equivalent February 6 2023.
Obr. 5 Vodní hodnota sněhu dne 6. února 2023.

The last output is a comparison of the current water storage with other winter seasons since 1970, or with the maximum, average and minimum storage volumes in a particular week of the season in selected basins of the country.

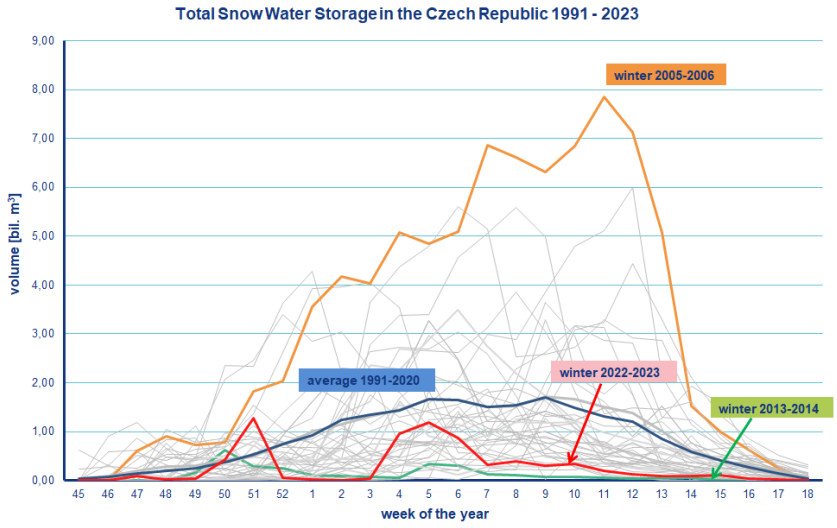


Fig. 6 Total snow water storage in the Czech Republic 1991–2023.
Obr. 6 Zásoby vody ve sněhu v České republice za období 1991–2023.

Other efforts of the snow water equivalent calculation are moving toward daily-step of evaluation. With more frequent floods or mid-week precipitation episodes, it is important for water management to have accurate information at the day step. Research in this area focuses on model calculations based on measurements of meteorological elements (air temperature and humidity, precipitation, speed and direction of wind). The model calculations can be checked by automatic snow stations. There is an assumption that the number of automatic snow stations will increase constantly in the future.

4. Climate change in Czechia

Europe's climate is characterized by significant regional variability due to the continent's location in the northern hemisphere and the influence of the surrounding seas and oceans, respectively the adjacent Asian continent and the Arctic. The main influence on Europe's climate has atmospheric circulation and its temporal and spatial changes. Climate change is already affecting Europe in various forms, depending on the region (European Parliament, 2023). As there is a sufficiently dense network of long-term measuring meteorological stations in the Czech Republic, supplemented by a number of remote sensing measurements, the analyses of change trends are significantly more accurate than similar global analyses (Ministry of the Environment of the Czech Republic 2015). Long series of meteorological measurements and observations, which are the result of many years of daily work of professional or even voluntary observers, are extremely valuable not only for evaluation, analysis or creation of homogeneous series of selected characteristics, but also especially for knowledge of climate variability and estimation of its development in the future.

4.1 Air temperature

The average annual air temperature in the Czech Republic has an upward trend of 0.3 °C in 10 years, increasing by an average of 2.1 °C over the measurement period 1961–2022 (see Fig. 7). The long-term temperature average (normal) for the period 1961–1990 is 7.5 °C, for the period 1981–2010 7.9 °C and for the period 1991–2020 8.3 °C (see Fig. 8). The warmest year was recorded in 2018, when the average air temperature reached 9.6 °C. In addition to the years 2013 and 2021, the eight previous years (2013–2022) are in the top ten warmest years recorded in the Czech Republic.

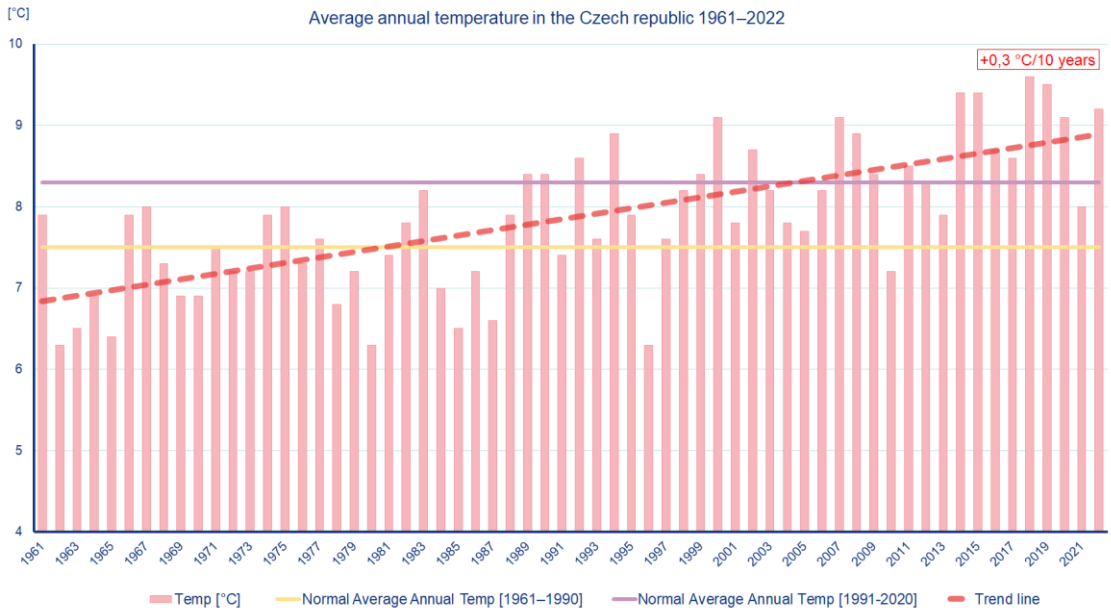


Fig. 7 Average annual temperature in the Czech Republic 1961–2022.
Obr. 7 Průměrná roční teplota vzduchu v České republice za období 1961–2022.

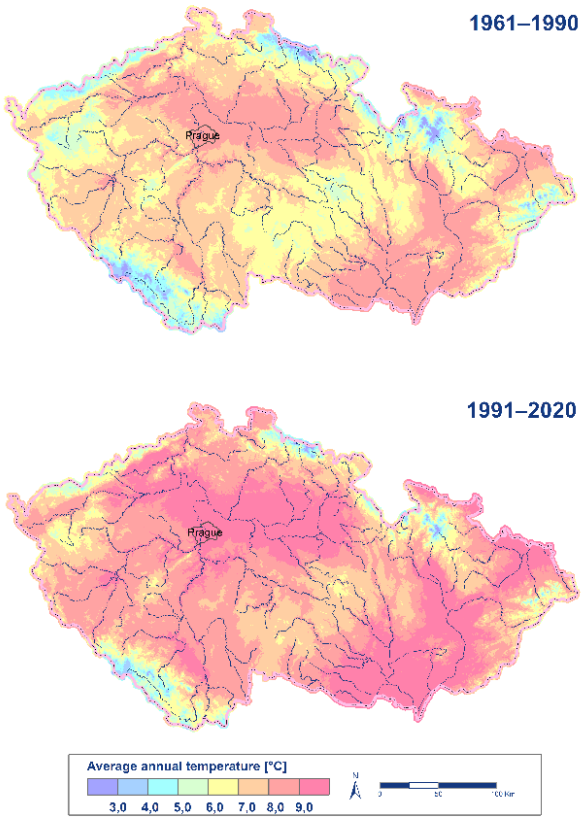


Fig. 8 Average annual temperature normal 1961–1990 and 1991–2020.
Obr. 8 Normály průměrné roční teploty vzduchu v České republice za období 1961–1990 a 1991–2020.

4.2 Precipitation and Snow

The average annual precipitation in the Czech Republic for the period 1961–1990 is 674 mm, for the period 1981–2010 686 mm and for the period 1991–2020 684 mm. Annual precipitation totals show no significant trend. But increasing air temperature indicates a change in the type of precipitation in winter from snow to rain and thus a smaller water supply in snow cover, which will be available at the beginning of spring. In order to express the respective status and changes, the ratio of the seasonal amount of new snow (measured in cm) and the total precipitation in mm, *S/P*, was used in this contribution. The ratio of new snowfall to total precipitation (*S/P* ratio) is an important metric that is widely used to detect and monitor hydrologic responses to climate change over mountainous areas. Changes in the S/P ratio over time have proved to be reliable indicators of climatic warming (Dong a Yi 2022). Data from the cold part of the year in the Czech Republic (November–April) were evaluated. The results showed that the *S/P* ratio recorded a noticeable decrease in the period 1991–2020 compared to the period 1961–1990 (see Fig. 9, Tab. 1). On average, this was from 0.40 to 0.31, i.e. by 21% (Prochazka et al. 2022).

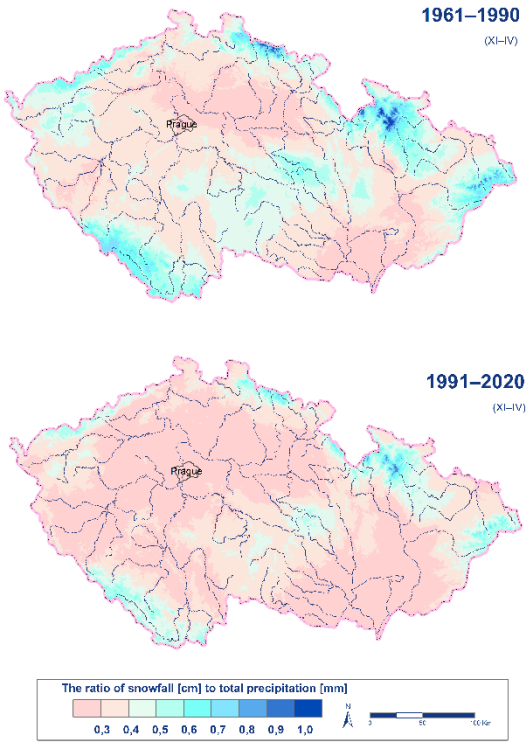


Fig. 9 The ratio of snowfall to total precipitation during the period 1961–1990 and 1991–2020.
Obr. 9 Poměr úhrnu nového sněhu a srážek v České republice za období 1961–1990 a 1991–2020.

Tab. 1 The ratio of new snowfall [cm] to total precipitation [mm] during the period 1961–1990 and 1991–2020.
Tab. 1 Poměr úhrnu nového sněhu [cm] a srážek [mm] v České republice za období 1961–1990 a 1991–2020.

		The ratio of new snowfall [cm] to total precip. [mm]	
Elevation (m a. s. l.)	**Area of Czechia (%)**	**1961–1990**	**1991–2020**
≤ 250	14	0.27	0.20
251–500	52	0.36	0.28
501–750	28	0.47	0.39
751–1000	5	0.63	0.52
≥ 1001	1	0.79	0.65

The increase in air temperature and the decrease in the *S/P* ratio make it likely that there will be a gradual decrease in the total amount of new snow. On Fig. 10 is the apparent decrease in the average annual total of new snow for each normal period. The year-round decrease between the periods 1961–1990 and 1991–2020 is 40 cm.

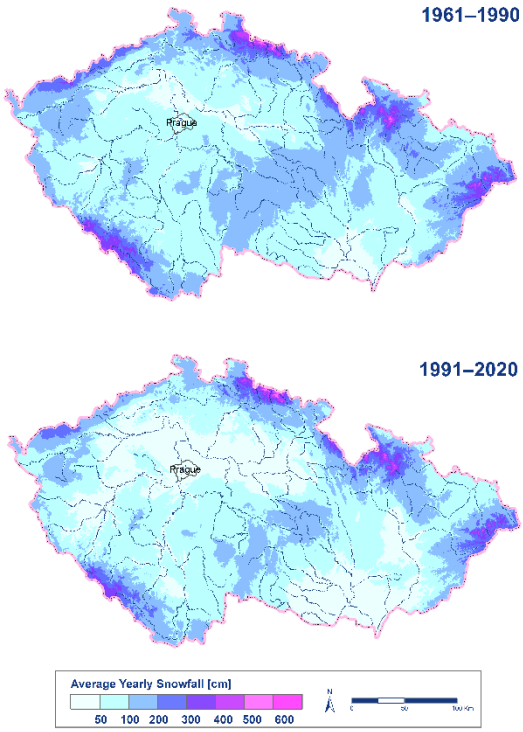


Fig. 10 30-Year Snowfall Normals in the Czech Republic 1961–1990 and 1991–2020.
Obr. 10 Normály úhrnu nového sněhu v České republice za období 1961–1990 a 1991–2020.

The following graph (see Fig. 11) shows the course of the maximum annual depth of snow at four selected mountain stations in the Czech Republic for the period 1961–2022. Linear trends show decreases in snow depth for all stations in Czechia.

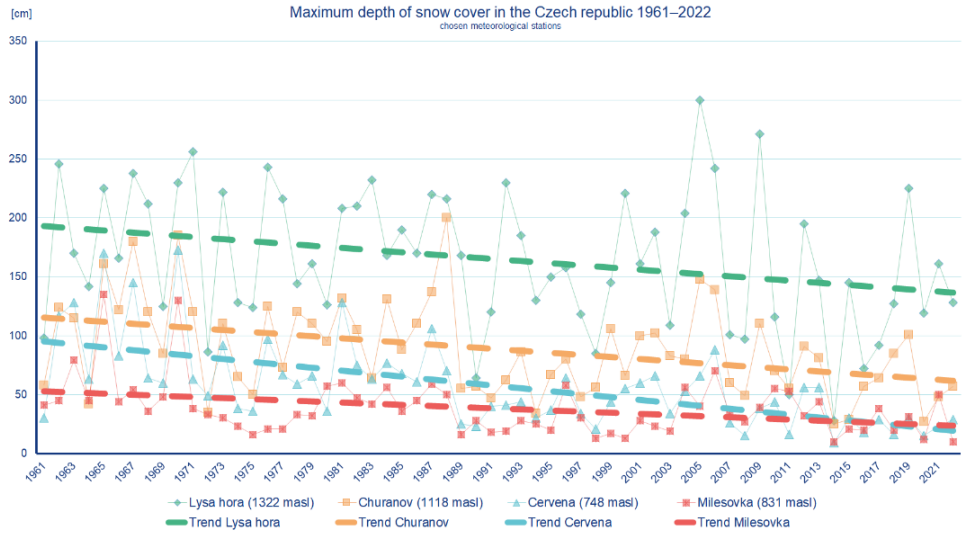


Fig. 11 Maximum depth of snow cover in the Czech Republic 1961–2022 (4 chosen stations).
Obr. 11 Maximální výška sněhové pokrývky na 4 vybraných stanicích v ČR (1961–2022).

The number of days with snow cover, i.e. days in which snow cover of at least 1 cm was recorded, has also been demonstrably decreasing. In the period 1961–1990, an average of 70 days with snow cover were recorded on the territory of the Czech Republic, during the period of years it was only 54 days on average per year (Fig. 12).

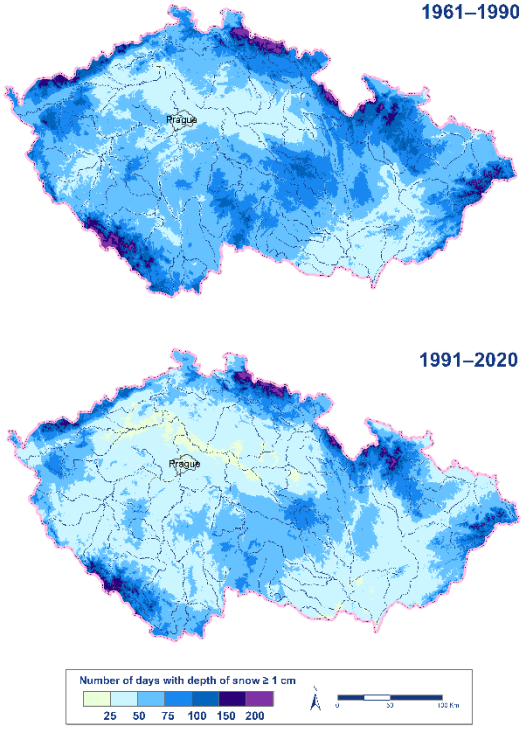


Fig. 12 Number of days with depth of snow ≥ 1 cm during the period 1961–1990 and 1991–2020.
Obr. 12 Počet dnů s celkovou výškou sněhové pokrývky ≥ za období 1961–1990 a 1991–2020.

5. Future - climate projection

5.1 Climate change scenario

The base of the climate change scenario in the Czech Republic is formed by the outputs of the regional climate model ALADIN-CLIMATE/CZ at a resolution of 2.3 km (Brozkova et al. 2019; ALADIN 2023). The climate scenario estimates were prepared on the basis of the calculation of the model ALADIN-CLIMATE/CZ by the Bias correction method (Räty et al. 2014). The model calculation is prepared for the period 1990–2014 (25 years) in the historical calculation mode and for the period 2021–2100 under the scenario SSP5-8.5 (IPCC 2021). The data for the following GIS analyses are outputs from the Project SS02030040 PERUN - Prediction, evaluation and research of the sensitivity of selected systems, impact of drought and climate change in the Czech Republic (PERUN 2023). Scenario SSP5-8.5 was chosen as the primary within the project solution and data are already available for it.

5.2 Results

Table 2, Figures 13 and 14 show that according to the scenario of very high greenhouse gas emissions SSP5-8.5, the trend of rising air temperatures will continue in the Czech Republic. Compared to the current climate, by 2040 it will warm by 1.3 °C in the winter months. The annual average air temperature will increase by 1.1 °C. By 2100 the average annual air temperature will increase by 4.6 °C compared to the current climate. Minimal annual temperature will increase by 4.6 °C, in winter season by 4.8 °C.

Tab. 2 Average annual, maximal and minimal temperature 1991–2100 (2021–2100 according to the scenario of very high greenhouse gas emissions SSP5-8.5)
Tab. 2 Průměrná roční, maximální a minimální teplota vzduchu za období 1991–2100 (2021–2100 dle scénáře SSP5-8.5)

	Annual			Winter season		
Period	**Tavg (°C)**	**Tmax (°C)**	**Tmin (°C)**	**Tavg (°C)**	**Tmax (°C)**	**Tmin (°C)**
1991–2020	8,3	12,9	3,8	−1,0	2,2	−3,9
2021–2040	9,4	14,2	4,9	0,3	3,5	−2,7
2041–2060	9,7	14,5	5,3	0,1	3,1	−2,8
2061–2080	11,1	15,9	6,6	1,7	4,9	−1,2
2081–2100	12,9	17,8	8,4	3,9	7,2	0,9

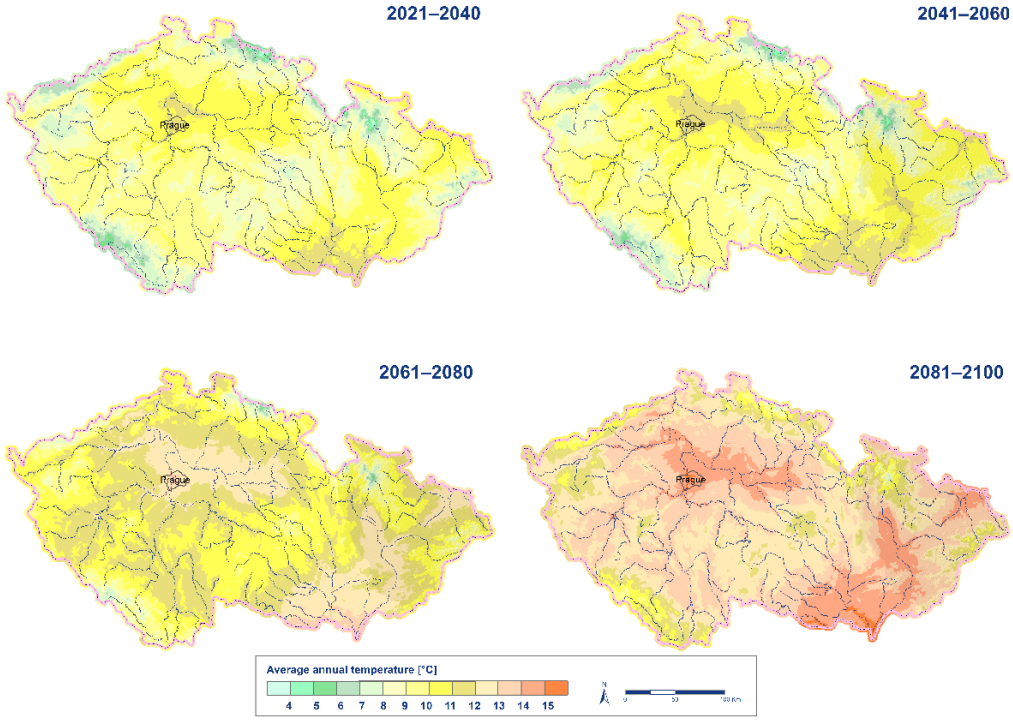


Fig. 13 Average annual temperature in the Czech Republic 2021–2100 (BIAS correction).
Obr. 13 Průměrná roční teplota vzduchu v České republice za období 2021–2100 (BIAS korekce).

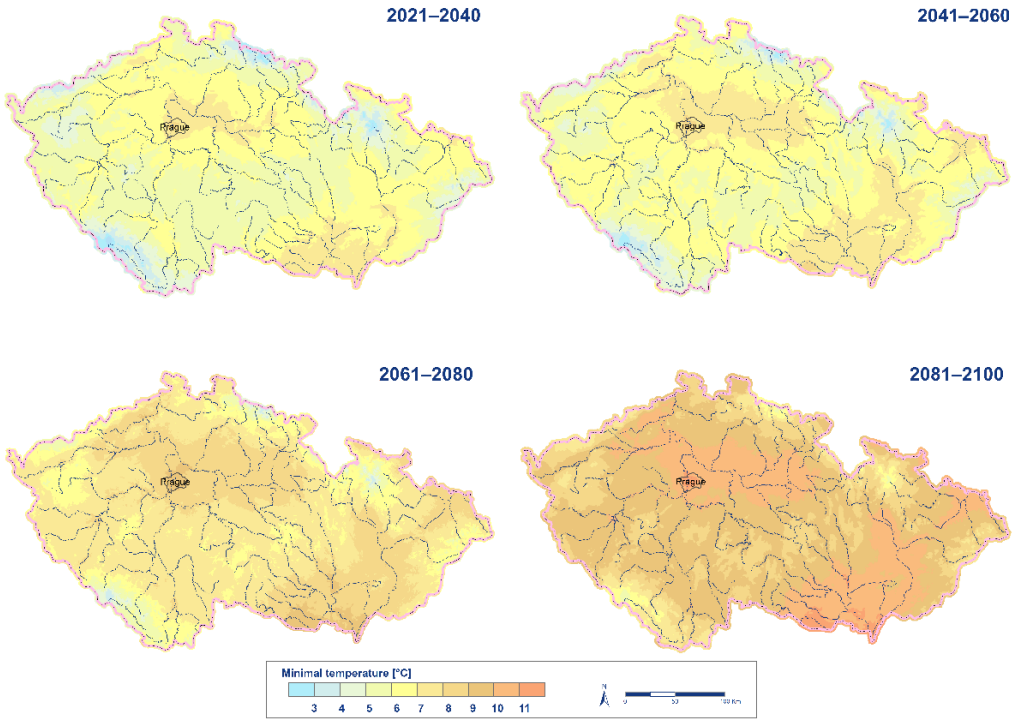


Fig. 14 Minimal temperature in the Czech Republic 2021–2100 (BIAS correction).
Obr. 14 Minimální teplota vzduchu v České republice za období 2021–2100 (BIAS korekce).

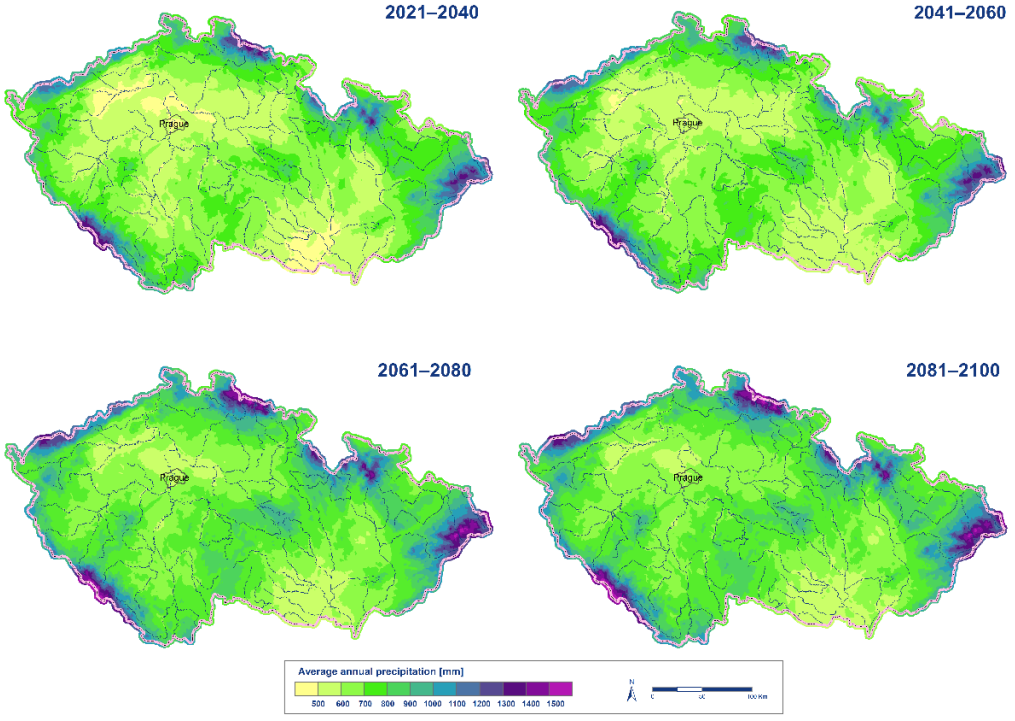


Fig. 15 Average annual precipitation in the Czech Republic 2021–2100 (BIAS correction).
Obr. 15 Průměrný roční úhrn srážek v České republice za období 2021–2100 (BIAS korekce).

6. Conclusion

Extension of the network contribute to better quality data interpolation, which is used in the hydrological forecasting service and, of course, for the calculation of snow cover water reserves for selected basins and water reservoirs. In general, especially in the last twenty years, the total volume of water storage in snow cover has been decreasing. Since 1980, four of the five worst winter seasons have been recorded in the last 20 years (2013–2014, 2019–2020, 2015–2016 and 2006–2007). On the other hand, three snowrich winters have also occurred in this period (2005–2006, 2009–2010 and 2004–2005). Moreover, the 2005–2006 winter season, with its 84 bil. m^3 of total volume, was the richest volume ever since 1980. Nevertheless, the trend is clear - fewer days with snow cover, decreasing snow depth maximum and increasing thaws during the whole winter season, even in the highest parts of the mountains (see Fig. 6). Among the main manifestations of climate change in the Czech Republic by 2100 based on scenario SSP5-8.5 is increasing air temperature in all seasons. The above mentioned outcomes of the climate change scenario also outline that precipitation totals will not decrease, rather they will increase slightly. However, what will change in relation to the rising air temperature is the change in the state and further the seasonal and temporal distribution of precipitation. It can be assumed that despite the fact that the amount of precipitation will be equal or higher, the share of precipitation in the form of snow will be lower and thus the ability to create and store snow cover will be decreased. This can negatively affect the water reserves in the snow, the soil moisture at the beginning of the growing season, as well as the amount of surface and subsurface water at the beginning of spring. Thanks to higher air temperatures, faster and greater evaporation of water from the landscape can also be assumed. According to the very high greenhouse gas emission scenario SSP5-8.5, the trend of rising air temperature will continue. By the end of the century, the average annual air temperature will increase by 4.6 °C compared to the current climate. Annual precipitation totals in the Czech Republic have a statistically insignificant trend. According to the scenario SSP5-8.5, we observe an increase by 2100 in precipitation totals in all seasons and an increase of 14% in the annual average (see Fig. 15). Given the above mentioned trend of air temperature, it can be assumed that the nature of precipitation will change.

Acknowledgement

This contribution was supported by the state support from the Technology Agency of the Czech Republic (Project SS02030040 PERUN - Prediction, Evaluation and Research for Understanding National sensitivity and impacts of drought and climate change for Czechia).

References

BROZKOVA, R., BUCANEK, A., MASEK, J. SMOLIKOVA, P. TROJAKOVA, A., 2019. New high-resolution operational configuration of the ALADIN model. *Meteorological Bulletin*, **72**, 5, 129–139, ISSN 0026-1173.

DONG, W., YI, M., 2022. Seasonality and variability of snowfall to total precipitation ratio over high mountain Asia simulated by the GFDL high-resolution AM4. *Journal of Climate*, **35**(17), 5573–5589. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0026.1

EU measures against climate change | News | European Parliament, 2023. Dostupné z: https://www.europarl.europa.eu/news/en/head-lines/society/20180703STO07129/eu-measures-against-climate-change

Flood warning and forecaster service of the CHMI – information about water storage in snow cover, 2023. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/snih/aktual.htm

HAMR – a systematic tool to resolve the impacts of drought in the Czech Republic (including snow monitoring), 2023. Dostupné z: https://hamr.chmi.cz/hamr-JS/zasoba_snih.html

IPCC, 2021. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 3−32. https://doi.org/10.1017/9781009157896.001

IPCC, 2022. Climate Change 2022 - Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., https://doi.org/10.1017/9781009325844

NOLIN, A. W., SPROLES, E. A., RUPP, D. E., CRUMLEY, R. L., WEBB, M. J., PALOMAKI, R. T., MAR, E., 2021. New snow metrics for a warming world. *Hydrological Processes*, **35**(6), 1–13. https://doi.org/10.1002/hyp.14262

Ministry of the Environment of the Czech Republic, 2023.Strategy for Adaptation to Climate Change in the Czech Republic. Dostupné z: http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zmena_klimatu_adaptacni_strategie/$FILE/OEOK-Adaptacni_strategie-20151029.pdf

PERUN - Prediction, evaluation and research of the sensitivity of selected systems, impact of drought and climate change in the Czech Republic, 2023. https://www.perun-klima.cz/

PROCHAZKA, J., LIPINA, P., SUSTKOVA, V., TESAR, M., 2022. Changes in the ratio of new snow and seasonal precipitation in mountain and foothill regions of the Czech Republic. Water Management in the Landscape 2022. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/nakladatelstvi/assets/sbornik-abstraktu-trebon_2022.pdf

RÄTY, O., RÄISÄNEN, J., YLHÄISI, J. S., 2014. Evaluation of delta change and bias correction methods for future daily precipitation: intermodel cross-validation using ENSEMBLES simulations. *Clim Dyn*, **42**, 2287—2303. https://doi.org/10.1007/s00382-014-2130-8

ALADIN, 2023. Dostupné z: https://www.umr-cnrm.fr/aladin/

Výstražné informace a místní směrodatné limity v systému HAMR
(Warning information and local threshold limits in the HAMR system)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.29

Adam Vizina, VÚV TGM, v. v. i., FŽP ČZU, adam.vizina@vuv.cz
Petr Pavlík, VÚV TGM, v. v. i., FŽP ČZU, petr.pavlik@vuv.cz
Irina Georgievová, VÚV TGM, v. v. i., FŽP ČZU, irina.georgievova@vuv.cz
Martin Hanel, VÚV TGM, v. v. i., FŽP ČZU, hanel@vuv.cz
Martina Peláková, VÚV TGM, v. v. i., martina.peláková@vuv.cz
Eva Melišová, VÚV TGM, v. v. i., eva.melisova@vuv.cz

Abstrakt: Sucho a povodně jsou extrémní hydrologické jevy s rostoucími dopady klimatických změn. Projekt PERUN se zaměřuje na hodnocení sucha v České republice a inovaci výstražného systému ČHMÚ. Novela Vodního zákona zavádí povinnost informování o suchu a předpovědní služby. Vyvíjí se nástroje pro predikci stavu vodních zdrojů a plány pro řešení sucha a nedostatku vody. Orgánem s pravomocí je komise pro sucho na úrovni krajů nebo České republiky. Výstražné informace jsou dostupné na portálu HAMR spolu s místními směrodatnými limity (MSL) vodních zdrojů.

Klíčová slova: sucho – hydrologické sucho – povrchové vody – podzemní vody – výstraha – predikce – změna klimatu – nedostatek vody – informační systém HAMR (IS HAMR) – projekt PERUN

Abstract: Droughts and floods are extreme hydrological events with increasing impacts due to climate change. The PERUN project focuses on drought assessment in the Czech Republic and the innovation of the warning system by ČHMÚ. The Water Act amendment introduces the obligation to inform about drought and forecasting services. Tools are being developed for predicting the state of water resources and creating plans to address drought and water scarcity. The competent body is the Drought Commission at the regional or national level. Warning information is available on the HAMR portal along with the local threshold limits (MSL) of water sources.

Keywords: Drought – hydrological drought – surface waters – groundwater – warning – prediction – climate change – water scarcity – HAMR Information System (HAMR IS) – PERUN project

1. Úvod

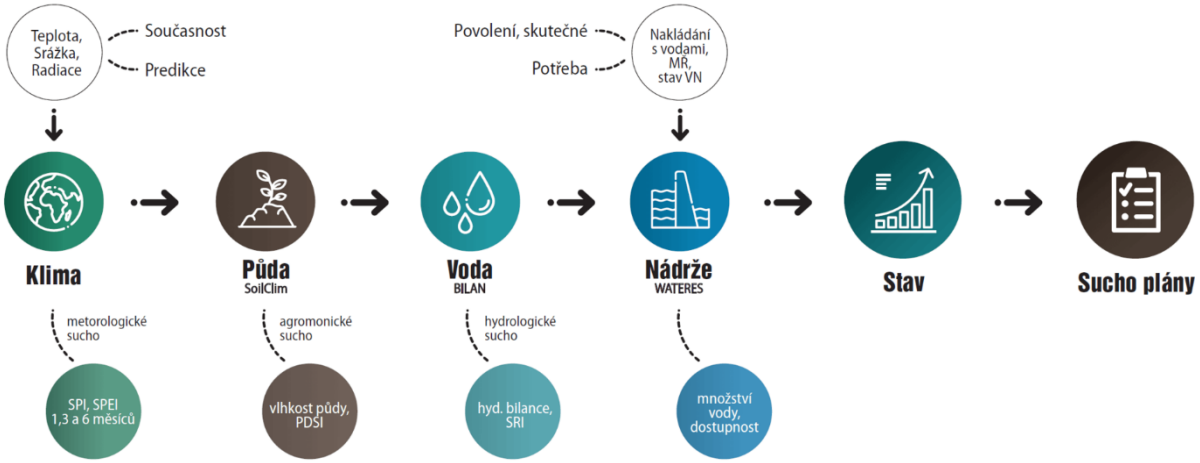
Sucho a povodně jsou extrémní hydrologické jevy, běžná součást životního prostředí. S narůstajícími dopady klimatických změn jejich četnost roste, což může významně ovlivnit naše životy. Je důležité být připraven na častější a intenzivnější hydrologické události, abychom minimalizovali negativní dopady (Fischer et al. 2023; Potopová et al. 2022; Trnka et al. 2017; Melišová et al. 2021). Sucho je přirozený jev charakterizovaný postupným poklesem dostupnosti vody, dlouhodobým trváním a malou dynamikou. Přestože okamžitá nebezpečnost sucha je minimální ve srovnání s jinými hydrometeorologickými jevy, informace o jeho stavu a vývoji vyžaduje průběžný specifický přístup. V rámci projektu PERUN je dílčím cílem inovovat výstražný systém ČHMÚ na hodnocení a predikci sucha, aby byly splněny požadavky novely Vodního zákona (zákonem č. 544/2020 Sb.). Novela Vodního zákona stanovuje povinnost pravidelného informování o suchu a zavedení předpovědní služby. ČHMÚ má za úkol jasně informovat o riziku vzniku a vývoje sucha kraje a obce s rozšířenou působností, což usnadní efektivní rozhodování o opatřeních. Přizpůsobení této informace běžným uživatelům však vyžaduje specifický přístup (Pecha et al. 2022).

Důležitou částí novely vodního zákona je vytváření nástrojů pro dlouhodobou predikci stavu vodních zdrojů a interpretace těchto informací při plánování opatření proti suchu a nedostatku vody. Ministerstvo zemědělství a Ministerstvo životního prostředí společně vypracovaly metodiku (MŽP a MZe 2021) za podpory řešitelského týmu VÚV TGM, která poskytuje postupy pro tvorbu těchto plánů. Cílem je zajištění dostatečného množství vody pro základní potřeby, ochranu životního prostředí a minimalizaci ekonomických dopadů. Plány obsahují identifikaci vodních zdrojů, rizika sucha a jejich možné dopady, stejně jako postupy pro zvládání sucha a nedostatku vody. Orgánem s rozhodovací pravomocí vydávat opatření podle plánů pro sucho při nedostatku vody je komise pro sucho, která již aktivně jedná na úrovni krajů. Výstražné informace jsou dostupné prostřednictvím portálu informačního systému HAMR (hamr.chmi.cz), kde jsou také zobrazeny místní směrodatné limity pro vybrané vodní zdroje, které zásobují například kritickou infrastruktura v ČR. Jednání komisí pro sucho již na úrovni krajů probíhají a účastní se jich i zástupci ČHMÚ (Pecha et al. 2022). Výstražné informace jsou dostupné na portálu informačního systému HAMR, kde jsou také zobrazeny místní směrodatné limity (Vizina et al. 2023).

2. Metodika

2.1 HAMR

Vývoj systémového nástroje HAMR (Vizina et al., 2018) financuje Ministerstvo životního prostředí České republiky spolu s dalšími aktivitami zabývajících se dopadem sucha, adaptačními opatřeními, monitoringem a klimatickými změnami (více na www.suchovkrajine.cz). Sucho se dělí na meteorologické, agronomické, hydrologické a socioekonomické. Z toho vychází samotný název systému HAMR (Hydrologické, Agronomické, Meteorologické a Retence), který je znázorněn na obr. 1. Každá komponenta je reprezentována fyzikálně založeným matematickým modelem SoilClim (Hlavinka et al. 2011), Bilan (Melišová et al. 2020; Vizina et al. 2015) a Wateres (Georgievová 2023) a následně je hodnocena dle vypočtených indikátorů.



Obr. 1 Schéma systému HAMR.
Fig. 1 Scheme of HAMR system.

Pro hodnocení aktuálního stavu a zejména predikci vývoje sucha na území České republiky byla v průběhu roku 2022 na ČHMÚ vytvořena metodika (Pecha et al. 2022). Tato metodika zahrnuje predikce pro tři typy sucha: sucho v povrchových vodách, sucho v podzemních vodách a sucho hydrologické (sucho v podzemních i povrchových vodách). Jednotlivé typy sucha jsou identifikovány pro územní jednotky ORP (Vizina et al., 2023). Výsledná informace o nebezpečí sucha v nadcházejícím týdnu na povrchových vodách pro příslušné ORP je

pravidelně vytvářena v úterý odpoledne na základě syntézy výpočtů a očekávané hydrometeorologické situace. Tato predikce je následně zveřejněna na webových stránkách systému HAMR v sekci Výstražné informace v samostatné mapě s názvem "Povrchové vody". Hodnocení podzemních vod probíhá každé pondělí a výsledky jsou zveřejněny ve středu v mapě "Podzemní vody" v systému HAMR.

2.1 Místní směrodatné limity (MSL)

Místní směrodatné limity (MSL) pro vodní zdroje, určené k přípravě plánů pro zvládání sucha a nedostatku vody (Nesládková a Peláková 2021), jsou klíčovým prvkem v řízení a plánování vodních zdrojů v daném kraji. Tyto limity doplňují Metodiku pro suché plány, kterou vydaly Ministerstvo zemědělství a Ministerstvo životního prostředí v roce 2021 (MŽP a MZe 2021). Plánování reakcí na sucha a nedostatek vody je povinností krajských úřadů podle § 87c vodního zákona. To probíhá ve spolupráci s příslušnými správci povodí a Českým hydrometeorologickým ústavem.

Místní směrodatné limity jsou stanoveny pro klíčové vodní zdroje v daném kraji. Jejich dosažení znamená vysokou pravděpodobnost nedostatečné vydatnosti nebo snížené dostupnosti/jakosti vody v daném zdroji v souvislosti se suchem, které je spojeno s dostatečně dlouhým časovým obdobím, kdy zdroj nebude schopen uspokojit potřeby uživatelů vody. MSL jsou analogií povodňových stupňů a slouží k operativnímu řízení v období sucha. Během roku může mít MSL více hodnot v souladu s hydrologickým cyklem a proměnlivými požadavky na vodní zdroje. Tyto hodnoty jsou odvozeny od okamžiku, kdy zdroj nedokáže plnit svou funkci v souvislosti se suchem, buď kvůli nedostatku vody, nebo nevyhovující jakosti.

MSL doplňuje informaci o nebezpečí sucha poskytovanou Českým hydrometeorologickým ústavem. Představuje místní informaci o reakci konkrétního vodního zdroje na nepříznivou hydrologickou situaci. Metodika pro suché plány popisuje základní přístup k stanovení MSL a pracovní pomůcka (Nesládková a Peláková 2021) poskytuje příklady pro různé typy vodních zdrojů s různou úrovní podrobnosti vstupních dat. Cílem pracovní pomůcky bylo poskytnout možné přístupy a inspiraci pro tvůrce plánů pro sucho při stanovení MSL pro strategické vodní zdroje kraje. Nemůže zohlednit všechny skutečnosti v reálném prostředí a jednotliví zpracovatelé krajských plánů volili při stanovení MSL různé strategie, které jsou popsány v samotných plánech. Stanovení MSL vodního zdroje mělo proběhnout ve spolupráci s konzultačním týmem, který zahrnuje provozovatele, uživatele vody, správce povodí, krajské úřady, zpracovatele plánů pro sucho a další relevantní subjekty. Stanovení MSL mělo proběhnout ve 4 krocích (Nesládková a Peláková 2021):

1. Výběr klíčových veličin se systematickým monitorováním pro fungování vodního zdroje během dlouhodobého sucha.
2. Stanovení mezní úrovně této veličiny, která označuje vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji nebo limit pro upravitelnost vody v souvislosti se suchem, při kterém nelze zajistit všechny požadavky na vodu včetně environmentálních požadavků.
3. Návrh časového předstihu pro dosažení místního směrodatného limitu (MSL), což je období mezi vyčerpáním disponibilního množství vody ve zdroji nebo limitem pro upravitelnost vody a dosažením MSL.
4. Odvození úrovně vybrané veličiny, která předchází vyčerpání disponibilního množství vody ve zdroji nebo limitu pro upravitelnost vody s přiměřeným časovým předstihem.

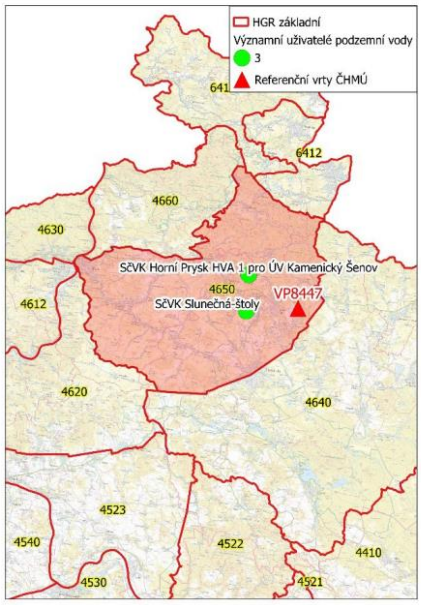
Data pro místní směrodatné limity většinou poskytuje Český hydrometeorologický ústav nebo samotní provozovatelé. Data jsou podkladem pro zobrazení MSL v systému HAMR. Ukázka

karty MSL je zobrazena na obr. 2, jedná se o limit v HG rajonu 4650 a je vázán na vrt podzemní vody VP8447.

5. Karta místního směrodatného limitu (MSL): HG rajon 4650

Název vodního zdroje:

HG rajon: 4650 - Křída Dolní Ploučnice a Horní Kamenice
Kolektor: D (coniak)



Místo monitoringu MSL

Popis místa: VP8447 – Radvanec LO 4, hluboký vrt
Hloubka: 110 m

Zeměpisné souřadnice :
X: -720424
Y: -970529
Obec: Radvanec
Obec s rozšířenou působností: Nový Bor
Kraj: Liberecký

Provozovatel monitoringu, který podává informace o dosažení MSL:
ČHMÚ

Informace o dosažení MSL:
Portál HPPS ČHMÚ, informační systém HAMR (bude dostupné během roku 2023)

Limitní hodnota: není známa

Hodnota MSL:
VP8447 = **295.669 m n. m**

Data a metody použité pro stanovení MSL: metodika CHMU**. Průměrná týdenní výška hladiny ve vrtu**. V případě, že se tato hodnota nachází pod úrovní **95 % kvantilu** na křivce překročení za referenční období 1991–2020 je indikován stav nebezpečí vzniku sucha na podzemních vodách **= MSL**

Nahraditelnost zdroje (z hlediska zásobování) **:**
SčVK Slunečná-štoly : částečná zastupitelnost jen pro Nový Bor, pro obec Skalice nezastupitelný
SčVK Horní Prysk HVA 1 pro ÚV Kamenický Šenov : NE

Uživatelé vody z tohoto vodního zdroje:

IČ odběru	Oprávněný k odběru vody	Provozovatel
330446	*SčVK Slunečná-štoly*	*Severočeské vodovody a kanalizace, a.s.*
330479	*SčVK Horní Prysk HVA 1 pro ÚV Kamenický Šenov*	*Severočeské vodovody a kanalizace, a.s*
Zpracoval: Vodohospodářský rozvoj a výstavba a.s.		Datum: 25.9.2022

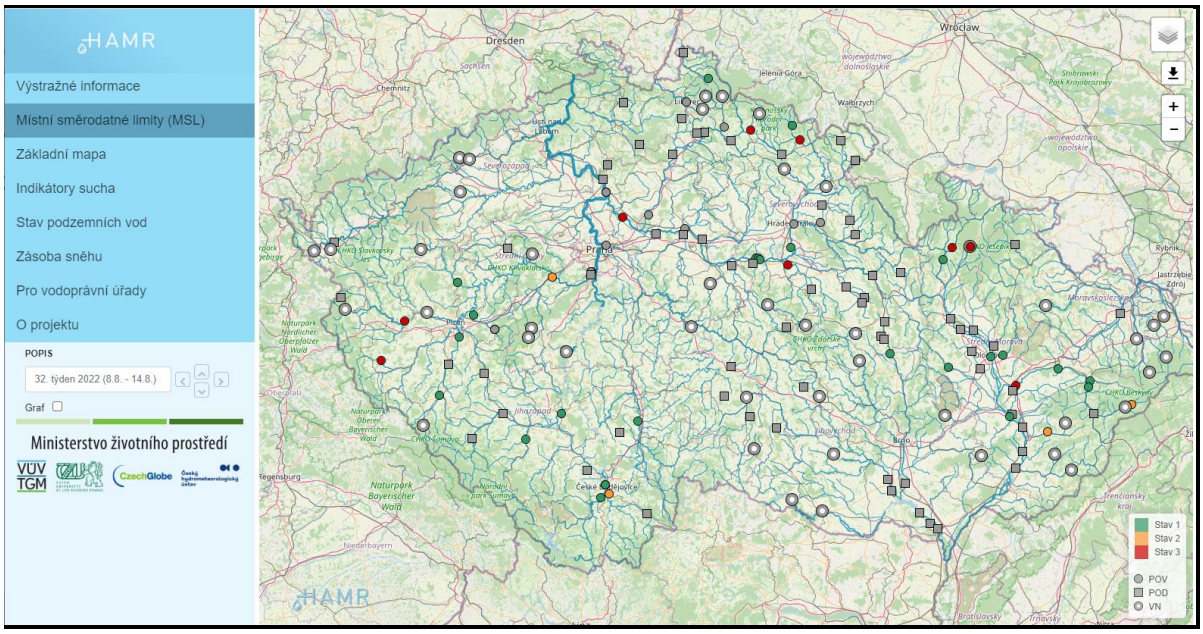
Obr. 2 Karta místního směrodatného limitu (https://ng-sucho.kraj-lbc.cz/docs/5/5_MSL_HG_4650_krida_hlukoke.pdf).
Fig. 2 Card of local treshold limit (https://ng-sucho.kraj-lbc.cz/docs/5/5_MSL_HG_4650_krida_hlukoke.pdf).

3. Výsledky

Výsledná informace (výstraha) o stavu a vývoji hydrologického sucha vzniká pravidelně v úterý odpoledne kombinací obou typů sucha pro jednotlivá ORP a je vizualizována ve středu dopoledne v samostatné mapě v systému HAMR v sekci Výstražné informace.

Stanovené místní směrodatné limity jsou zobrazeny v aplikaci HAMR v mapovém okně, kde je indikován aktuální stav, zda je MSL podkročen či ne. Aplikace zobrazuje MSL pro povrchové vody, podzemní vody a vodní nádrže, na kterých je MSL často stanoven. V rámci systému je

možné zobrazit také časové řady zvolených veličin, pokud jsou k dispozici. Aplikace pro MSL bude zprovozněna v říjnu 2023 a je zobrazena na obr. 3.



Obr. 3 Mapová aplikace pro zobrazení místních směrodatných limitů.
Fig. 3 Mapping application for displaying local threshold limits.

4. Závěr

Od září 2022 Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) pravidelně každý týden hodnotí a předpovídá stav hydrologického sucha v České republice. Výsledky hodnocení jsou od přelomu září a října plně přístupné na webových stránkách Informačního systému hydrometeorologického a agrometeorologického monitoringu (IS HAMR) v sekci "Výstražné informace". Během zimní sezony 2022/2023 proběhlo testování provozu a ověření referenčních vodoměrných profilů povrchových a podzemních vodních objektů pro obce s rozšířenou působností (ORP). Na základě tohoto testování byly provedeny drobné úpravy ve výběru reprezentativních objektů před nástupem nové vegetační sezony v roce 2023.

Informační systém sledující stav a vývoj sucha v České republice byl od počátku vegetační sezony v roce 2023 plně integrován do operativního provozu ČHMÚ. Během září 2023 byla v rámci systému HAMR spuštěna aplikace umožňující zobrazování a hodnocení stanovených místních směrodatných limitů pro vodní zdroje, které vycházejí z jednotlivých krajských plánů, jež byly připraveny převážně v roce 2022.

Poděkování

Tento výzkum byl částečně financován Technologickou Agenturou ČR v rámci programu „Prostředí pro život“ (Program aplikovaného výzkumu, experimentálního vývoje a inovací v oblasti životního prostředí) a projektu „PERUN (SS02030040) – Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (https://www.perun-klima.cz/).

Literatura

FISCHER, M., PAVLÍK, P., VIZINA, A., BERNSTEINOVÁ, J., PARAJKA, J., ANDERSON, M., TRNKA, M., 2023. Attributing the drivers of runoff decline in the Thaya river basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **48**, 101436. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101436

GEORGIEVOVÁ, I., HANEL, M., PAVLÍK, P., VIZINA, A., 2023. Streamflow simulation in poorly gauged basins with regionalised assimilation using Kalman filter. *Journal of Hydrology*, **620**, 129373. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129373

HLAVINKA, P., TRNKA, M., BALEK, J., SEMERÁDOVÁ, D., HAYES, M., SVOBODA, M., ŽALUD, Z., 2011. Development and evaluation of the SoilClim model for water balance and soil climate estimates. *Agricultural Water Management*, **98**(8), 1249–1261. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.03.011

MELIŠOVÁ, E., VIZINA, A., STAPONITES, L. R., HANEL, M., 2020. The role of hydrological signatures in calibration of conceptual hydrological model. *Water*, **12**(12), 3401. https://doi.org/10.3390/w12123401

MELIŠOVÁ, E., VIZINA, A., HANEL, M., PAVLÍK, P., ŠUHÁJKOVÁ, P., 2021. Evaluation of evaporation from water reservoirs in local conditions at Czech Republic. *Hydrology*, **8**(4), 153. https://doi.org/10.3390/hydrology8040153

MŽP, MZe, 2021. Metodika k přípravě plánů pro zvládání sucha a stavu nedostatku vody, dostupná: https://eagri.cz/public/web/file/679559/metodika_plan_sucho.pdf

NESLÁDKOVÁ, M., PELÁKOVÁ, M., 2021. Stanovení místních směrodatných limitů pro vodní zdroje k přípravě plánů pro zvládání sucha a stavu nedostatku vody: Pracovní pomůcka pro zpracovatele plánů pro zvládání sucha a stavu nedostatku vody podle § 87b až § 87d zákona č. 254/2001 Sb.

PECHA, M., ČEKAL. R., LEDVINKA, O., LAMAČOVÁ, A., VLNAS, R., VIZINA, A., GEORGIEVOVÁ, I., PAVLÍK, P., et al., 2022. Informační systém o stavu a vývoji sucha na území České republiky. *Meteorologické zprávy* **75**, 6, 165–169.

POTOPOVÁ, V., TRNKA, M., VIZINA, A., SEMERÁDOVÁ, D., BALEK, J., CHAWDHERY, M. R. A., CLOTHIER, B., 2022. Projection of 21st century irrigation water requirements for sensitive agricultural crop commodities across the Czech Republic. *Agricultural Water Management*, **262**, 107337. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107337

TRNKA, M., BRÁZDIL, R., VIZINA, A., DOBROVOLNÝ, P., MIKŠOVSKÝ, J., ŠTĚPÁNEK, P., ŽALUD, Z., 2017. Droughts and drought management in the Czech Republic in a changing climate. Drought and Water Crises: Integrating Science, Management, and Policy, 461–480.

VIZINA, A., PAVLÍK, P., GEORGIEVOVÁ, I., PECHA, M., HANEL, M., PELÁKOVÁ, M., TRNKA, M., ČEKAL, R., MELIŠOVÁ, E., VLNAS, R., 2023. Výstražný systém na sucho a místní směrodatné limity (2023). *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, **65**, 5, ISSN 0322-8916. https://doi.org/10.46555/VTEI.2023.07.004

VIZINA, A., HANEL, M., TRNKA, M., DAŇHELKA, J., GREGORIEOVÁ, I., PAVLÍK, P., HEŘMANOVSKÝ, M., 2018. HAMR: Online drought management system–operational management during a dry episode. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, **60**(5), 22–28. https://doi.org/10.46555/VTEI.2018.07.002

VIZINA, A., HORÁČEK, S., HANEL, M., 2015. Nové možnosti modelu Bilan. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, **57**(4–5), 7–10. https://doi.org/10.46555/VTEI.2015.06.001

Blok 4 – kvalita povrchových vod, rizika v krajině, uhlíkový cyklus a emise

Water quality trends and concentration-discharge changes during different rainfall-runoff conditions in headwaters – Blanice River case study

(Trendy kvality vody a změny koncentrace a odtoku během různých srážko-odtokových podmínek v pramenných oblastech - případová studie řeky Blanice)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.30

Kateřina Fraindová, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, fraindok@natur.cuni.cz
Milada Matoušková, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, milada.matouskova@natur.cuni.cz
Zdeněk Kliment, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, zdenek.kliment@natur.cuni.cz

Abstrakt: Ekosystémy pramenných oblastí jsou mimořádně citlivé na jakékoli přírodní nebo antropogenní vlivy, jako jsou změna klimatu, půdního pokryvu a využití půdy nebo změny chemismu srážek. Pramenná oblast řeky Blanice je dobrým příkladem horské pramenné oblasti mírného pásma, které je částečně pod ochranou přírody. Tento ekosystém je unikátní také tím, že se zde nachází nejpočetnější populace kriticky ohrožené perlorodky říční (*Margaritifera margaritifera*) ve střední Evropě. Se zaměřením na změny fyzikálně-chemických koncentrací v závěrovém profilu byl u $N\text{-}NO_3^-$ pozorován výrazný klesající trend ve většině části roku a také v roční datové řadě od roku 2003. Průměrná roční koncentrace $N\text{-}NO_3^-$ klesla z 1 175 $\mu g \cdot l^{-1}$ v roce 2004 na 587 $\mu g \cdot l^{-1}$ v roce 2018. Také ostatní sloučeniny dusíku a fosforu vykazovaly v průběhu roku některé významné klesající trendy. V povodí malého zalesněného přítoku byly zjištěny mírně odlišné výsledky. Hodnoty *pH* se zvýšily, což koresponduje s celkovým trendem a zotavením z acidifikace ve střední Evropě. Spolu s touto změnou byl zjištěn pokles koncentrací SO_4^{2-}. Zvýšily se však koncentrace některých kovů (Fe, Al, Mg) a $N\text{-}NO_3^-$. Během srážko-odtokových událostí byly pozorovány zvýšené koncentrace vybraných ukazatelů kvality vody (Al, Fe, TP, organické sloučeniny), které mohou negativně ovlivnit populaci perlorodky říční.

Klíčová slova: Blanice – biogeochemismus – perlorodka říční

Abstract: Headwater ecosystems are extremely sensitive to any natural or anthropogenic influences, such as climate change, land cover and land use or changes in the precipitation chemistry. Blanice River headwaters is a good example of temperate mountain spring areas, which is partially under nature land protection. This ecosystem is also unique because of the most abundant population of the critically endangered freshwater pearl mussel (*Margaritifera margaritifera*) in Central Europe. With focus on changes in physical-chemical concentrations in outlet profile, a significant decreasing trend was observed for $N\text{-}NO_3^-$ during most of the months and also in the annual data series since 2003. Mean annual $N\text{-}NO_3^-$ concentration decreased from 1 175 $\mu g \cdot l^{-1}$ in 2004 to 587 $\mu g \cdot l^{-1}$ in 2018. The other nitrogen and phosphorous compounds also showed some significant decreasing trends during the year. In small forested tributary catchment was detected slightly different results. Values of *pH* increased, which corresponds with the overall trend and recovery from acidification in Central Europe. Together with this change, decreases in SO_4^{2-} concentrations were detected. However, some of the

metals (Fe, Al, Mg) and N-NO_3^- concentrations increased. During rainfall-runoff events have been observed increased concentrations of selected water quality parameters (Al, Fe, TP, organic compounds) which negatively affect freshwater pearl mussel populations.

Keywords: Blanice River – biogeochemistry – freshwater pearl mussel

1. Introduction

Headwater ecosystems are extremely sensitive to any natural or anthropogenic influences, such as climate change, land cover and land use or changes in the precipitation chemistry (Oulehle a Hruška 2009). They are, though, an indispensable part of the ecosystem and important drinking water sources, both actual and potential. Knowledge of their status and dynamics is therefore crucial. Blanice River headwaters is a good example of temperate mountain headwater areas, which is partially under nature land protection with implemented measures improving water quality. This ecosystem is also unique because of the most abundant population of the critically endangered freshwater pearl mussel (Margaritifera margaritifera) in Central Europe (Simon et al. 2015).

2 Data

There were several sources of data. For analysing the seasonality and trend analyses, monthly data of biogeochemistry from Povodí, s.p. for Blanický mlýn (BLM; 2003–2019) together with daily data of discharge from Czech hydrometeorological institute for BLM (2004–2019) and monthly data of biogeochemistry and discharge from the Czech Geological Survey for Spálenec (SPA; 1994–2006) was used. Additionally, field data of *pH*, conductivity, dissolved O2 and own data of seasonal biogeochemistry in 9 sites (2018–2019) were used. For detailed analyses of electric conductivity changes for Zbytinský brook in Zbytiny village during Wastewater treatment construction between 11/2007−11/2009 10-minute data of electric conductivity (*EC*) and discharge from data of the Department of Physical Geography and Geoecology, Charles University (CUNI 2023) were used.

3 Methods

Seasonality was analysed using seasonal indexes. Significant trends in long term monthly and annual data series (2003−2019) for the BLM site were identified using the Mann-Kendall (MK) trend test (Mann 1945, Kendall 1975). Significance of the trend was tested at the level *alpha* = 0.05. Additional analyses of continual (10-minutes data) *EC* changes during WWTP construction in Zbytiny (before and after) was done for sites above and under WWTP.

4 Results and conclusion

If we look at seasonal changes of individual physicochemical parameters (an example is shown in Fig. 1) we can observe *pH* minimum in March, which is probably influence of highest Q_d during sampling. Values of electric conductivity was maximal in February and minimal in March at site Spálenec and in April at site Blanický mlýn, which seems to be influence of discharge as well. Maximal discharge was observed in April, as it was an influence of snow melting. Concentration of base cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}) was minimal in March at site Spálenec, which correlates with low electric conductivity. SO_4 was maximal from November to April and lower during summer. Al max. January–March at Spálenecký site. CODCr max. in June and July, min. in January (BLM) influenced by temperature and the amount of organic matter in water.

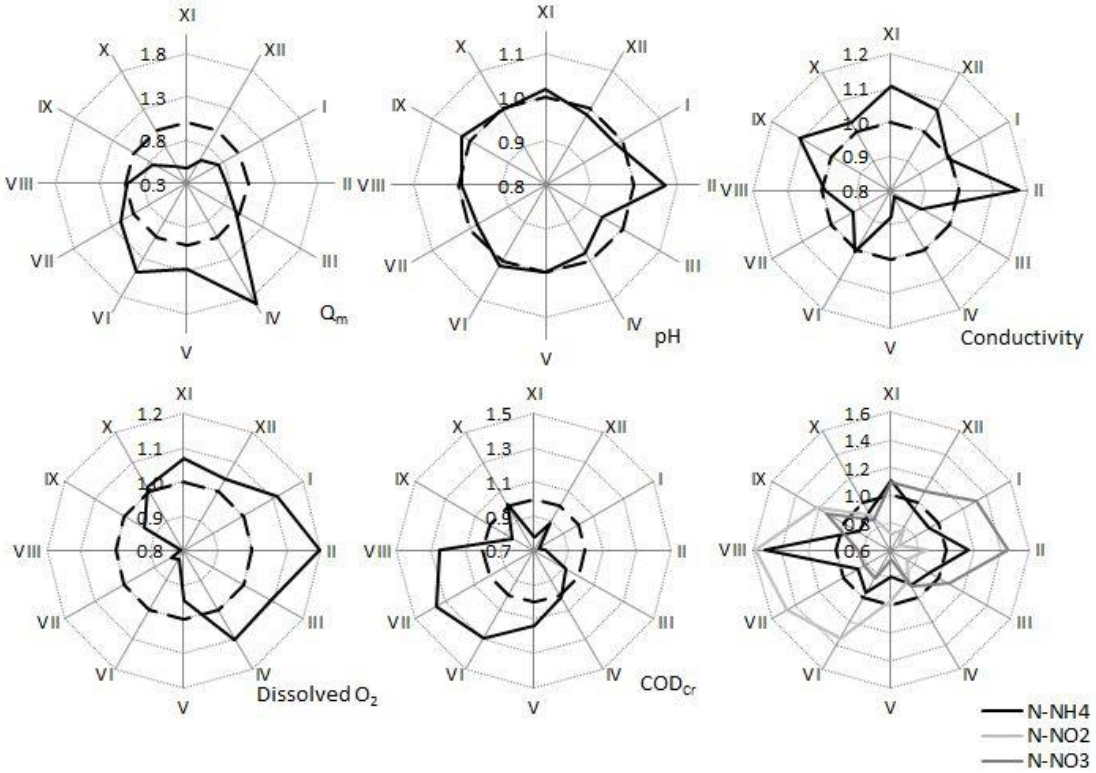


Fig. 1 Seasonality of selected physicochemical parameters. Data source: Povodí Vltavy (2023).

With focus on changes in physical-chemical concentrations in outlet profile Blanický mlýn, a significant decreasing trend was observed for $N\text{-}NO_3^-$ during most of the months and also in the annual data series since 2003 according to data from Povodí Vltavy, State Enterprise. Mean annual $N\text{-}NO_3^-$ concentration decreased from 1 175 $\mu g \cdot l^{-1}$ in 2004 to 587 $\mu g \cdot l^{-1}$ in 2018. The other nitrogen and phosphorous compounds also showed some significant decreasing trends during the year. In small forested tributary catchment was detected slightly different results according to the comparison of data from CGS in 1994–2006 and our data in 2018–2019. Values of pH increased, which corresponds with the overall trend and recovery from acidification in Central Europe. Together with this change, decreases in SO_4^{2-} concentrations were detected. However, some of the metals (Fe, Al, Mg) and $N\text{-}NO_3^-$ concentrations increased.

Analyses of conductivity changes during Wastewater treatment plant (WWTP) Zbytiny construction in 2009 shows strong decrease of mean *EC* under the WWTP (Fig. 2). While above Zbytiny village was *EC* values before and after WWTP construction almost the same (around 70 $\mu S \cdot cm^{-1}$), under the Zbytiny village and also under WWTP *EC* values have changed from 175 $\mu S \cdot cm^{-1}$ before WWTP construction to 71 $\mu S \cdot cm^{-1}$ after WWTP construction.

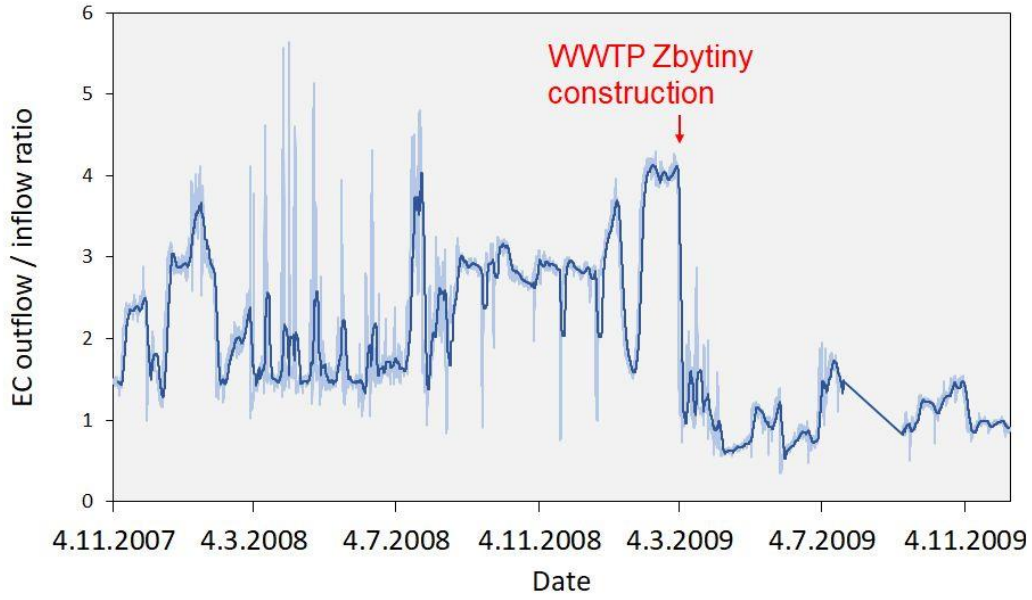


Fig. 2 Electric conductivity (EC) outflow/inflow ratio for Zbytinský brook in Zbytiny village between 11/2007−11/2009. WWTP Zbytiny was built in the beginning of 2009. Hourly EC outflow/inflow ratio is represented as light blue line and ten hours moving average as dark blue line. Data source: CUNI (2023).

With regard to runoff conditions, there was an obvious increase in Al, CODMn, DOC and TP in all studied sites during a rainfall-runoff event. The largest increases were registered for Al concentrations, where the Al concentrations were more than three times higher during the rainfall-runoff event than under normal conditions in all sites.

In four sites the Al concentrations were more than five times higher and in two sites were ten times higher than under normal conditions. The concentrations of Al reached almost 1000 $\mu g \cdot l^{-1}$ during the increased discharge in these two catchments, which could affect freshwater pearl mussel population negatively (Taskien et al. 2011). Apart from one site, the concentrations of CODMn were more than three times higher in all sites. Higher concentrations were also observed for DOC, but this parameter was measured only at four sites. A significant increase in *TP* concentrations was also registered. The highest increase more than five times higher was detected in one site, and in four sites was more than three times higher.

Acknowledgements

This research was supported by Technology Agency Czech Republic under the project No. SS02030040 PERUN.

References

CGS, 2016. GEOMON network data, Czech geological Survey, Prague.

CUNI, 2023. Hydro-Meteorological Monitoring Network, Charles University, Prague.

Czech hydrometeorological institute, 2023. Data průtoků pro vybraný profil Blanický mlýn, Český hydrometeorologický ústav.

KENDALL, M., G., 1975. Rank Correlation Methods. Griffin, London.

MANN, H., B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, **13**, 3, 245−259.

OULEHLE, F., HRUŠKA, J., 2009. Rising trends of dissolved organic matter in drinkingwater reservoirs as a result of recovery from acidification in the Ore Mts., Czech Republic. *Environmental Pollution*, **157**, 12, 3433−3439. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.06.020

Povodí Vltavy, State Enterprise, 2023.

SIMON, O.P., VANÍČKOVÁ, I., BÍLÝ, M., DOUDA, K., PATZENHAUEROVÁ, H., HRUŠKA, J., PELTÁNOVÁ, A., 2015. The status of freshwater pearl mussel in the Czech Republic: Several successfully rejuvenated populations but the absence of natural reproduction. *Limnologica*, **50**, 11−20. https://doi.org/10.1016/j.limno.2014.11.004

TASKINEN, J., BERG, P., SAARINEN-VALTA, M., VÄLILÄ, S., MÄENPÄÄ, E., MYLLYNEN, K., PAKKALA, J., 2011. Effect of pH, iron and aluminum on survival of early life history stages of the endangered freshwater pearl mussel. *Margaritifera margaritifera*. *Toxicological & Environmental Chemistry*, **93**, 9, 1764−1777. https://doi.org/10.1080/02772248.2011.610798

Vliv změn srážko-odtokového režimu na kvalitu vody vybraných toků v povodí řeky Sázavy

(Impact of rainfall-runoff regime on water quality of chosen streams in the Sázava River catchment)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.31

Petra Havlíková, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, petra.havlikova@natur.cuni.cz
Anna Pavlíková, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova

Abstrakt: Cílem příspěvku je vyhodnotit, jak se vlivem postupující klimatické změny mění hydroklimatické proměnné a zda se jejich změna odráží ve změně kvality vody povrchových toků. Pro vyhodnocení vlivu klimatické změny byly vybrány čtyři toky v povodí řeky Sázavy – Šlapanka, Sázavka, Jankovský potok a Chotýšanka. Jedná se o povodí typicky venkovského charakteru, kde dominantní zdroj znečištění představuje zemědělství. K dispozici byly datové řady hydroklimatických parametrů a parametrů kvality vody poskytnuté ČHMÚ a podnikem Povodí Vltavy s. p. Vybrány byly parametry: teplota vzduchu, úhrn srážek, výška sněhové pokrývky v povodí a teplota vody, konduktivita, amoniakální dusík, dusitanový dusík, dusičnanový dusík, fosforečnanový fosfor a celkový fosfor v tocích. Data byla analyzována pomocí regresní analýzy, korelačních koeficientů a Mann-Kendallova testu trendů. Analýza dat ukázala, že hydroklimatické parametry se ve sledovaném období měnily. Teplota vzduchu rostla, její nárůst byl prokázán Mann-Kendallovým testem trendů (povodí Sázavky, Šlapanky). Dále rostl počet tropických dnů, poklesla výška a délka trvání sněhové pokrývky. V datech srážkových úhrnů nebyl nalezen žádný trend. Mírně narůstala teplota vody v tocích, ale její nárůst nebyl potvrzen Mann-Kendallovým testem trendů. Ve všech vybraných tocích byly vysoké koncentrace dusičnanů a jejich koncentrace stagnovaly nebo mírně klesaly. Rovněž koncentrace fosforečnanového fosforu klesaly. Závislostní analýzy ukázaly, že ve vybraných povodích pocházejí dusičnany z plošných zdrojů znečištění, zatímco fosforečnany spíše z rozptýlených bodových zdrojů znečištění. Tomu je třeba přizpůsobit i plánovaný management aktivit v povodí cílený na snížení koncentrací znečišťujících látek v tocích.

Klíčová slova: srážko-odtokový režim – kvalita vody – povodí Sázavy – venkovské oblasti

Abstract: The aim of the contribution is to evaluate how hydroclimatic variables change due to the influence of advancing climate change and whether their change is reflected in the change in the water quality of surface streams. To evaluate the impact of climate change, four streams in the Sázava River basin were selected – Šlapanka, Sázavka, Jankovský potok and Chotýšanka. This is a watershed of a typically rural character, where the dominant source of pollution is agriculture. Data series of hydroclimatic parameters and water quality parameters provided by the ČHMÚ and Povodí Vltava s.p. were available. The selected parameters were: air temperature, total precipitation, height of snow cover in the basin and water temperature, conductivity, ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen, phosphate phosphorus and total phosphorus in streams. Data were analysed using regression analysis, correlation coefficients, and the Mann-Kendall trend test. Data analysis showed that hydroclimatic parameters changed in the observed period. The air temperature increased, its increase was proven by the Mann-Kendall trend test (Sázavka and Šlapanka River basin). Furthermore, the number of tropical days increased, the height and duration of the snow cover decreased. No trend was found in the rainfall totals data. There was a slight increase in stream water temperature, but this increase was not confirmed by the Mann-Kendall trend test. Nitrate concentrations were high in all selected streams and their concentrations stagnated or slightly decreased. Phosphate phosphorus concentrations also decreased. Dependency analyses

showed that in selected river basins nitrates come from areal sources of pollution, while phosphates rather come from diffuse point sources of pollution. The planned management of activities in the river basin is therefore necessary to adapt to the character of pollution sources.

Keywords: rainfall-runoff regime – water quality – Sázava River – rural areas

1. Úvod

Klima Země není konstantní, ale neustále se proměňuje. Vlivem člověka postupuje klimatická změna v posledních desetiletích čím dál rychleji. Měnící se klimatické veličiny jako zvyšující se teplota vzduchu a měnící se intenzita a rozložení srážek ovlivňují jak hydrologický režim toků, tak teplotu vodních toků a nádrží (Bates et al. 2008; Diamantini et al. 2018; Orr et al. 2015). Tyto měnící se veličiny následně ovlivňují parametry chemismu vody v tocích (Hrdinka et al. 2012; Zwolsman a van Bokhoven 2007; Diamantini et al. 2018; Bouraoui et al. 2004). Podle dosavadních studií je však zatím těžké tyto změny generalizovat, a měly by být posuzovány případ od případu (Senhorst a Zwolsman 2005).

Cílem příspěvku je vyhodnotit změny hydroklimatických parametrů a vybraných parametrů kvality vody ve čtyřech povodích nacházejících se v povodí řeky Sázavy.

2. Studované území a použité metody

2.1 Studované území

Pro hodnocení vlivu klimatické změny na kvalitu vody byla vybrána čtyři povodí v povodí řeky Sázavy (tab. 1).

Tab. 1 Základní charakteristiky vybraných povodí.
Tab. 1 Basic characteristics of the selected river basins.

Tok	**Plocha povodí (km^2)**	**Délka toku (km)**	**Průměrný průtok ($m^3 \cdot s^{-1}$) období 1981–2010**
Chotýšanka	125,1	37,1	0,592
Jankovský potok	129,5	22,8	0,888
Sázavka	132,9	32,2	0,876
Šlapanka	265,3	34,0	1,280

Zdroj dat: ČHMÚ

Všechna povodí mají venkovský charakter. Orná půda v povodí tvoří více jak 55% podíl. Obyvatelstvo je soustředěno do menších obcí. Velké zdroje znečištění (města, průmyslové podniky) v povodích chybí.

2.2 Použité metody

K dispozici byly datové řady hydroklimatických parametrů a parametrů kvality vody poskytnuté ČHMÚ a podnikem Povodí Vltavy s. p. Přehled meteorologických stanic, vodoměrných stanic a stanic pro sledování kvality vody je zobrazen v tab. 2.

Vybrány byly parametry: teplota vzduchu, počet tropických dnů, úhrn srážek, výška sněhové pokrývky a počet dnů se sněhem v povodí a teplota vody, konduktivita, amoniakální dusík, dusitanový dusík, dusičnanový dusík, fosforečnanový fosfor a celkový fosfor v tocích. Data byla analyzována pomocí korelačních koeficientů a Mann-Kendallova testu trendů.

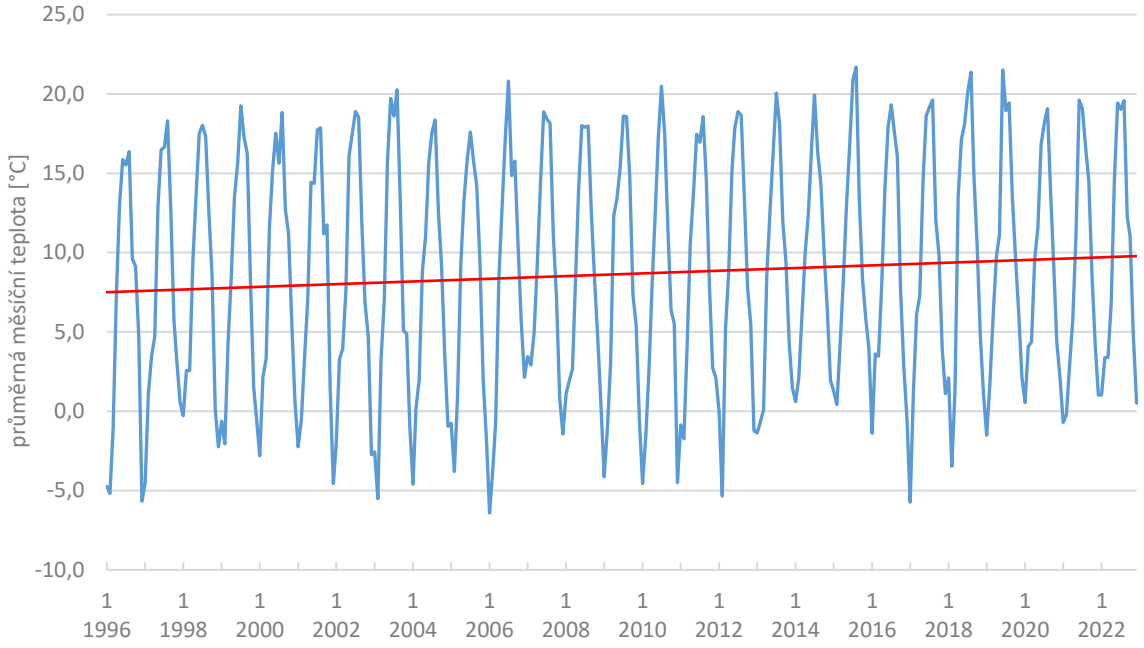
Tab. 2 Seznam měrných stanic.
Tab. 2 List of measuring stations.

Něřená veličina	Stanice	ID	Správa	Souřadnice	Povodí/tok
průměrná denní teplota, maximální teplota, minimální teplota	Havlíčkův Brod	P3HAVL01	ČHMÚ	49.6119N, 15.5797E	Šlapanka, Sázavka
	Nový Rychnov	P3NRYC01	ČHMÚ	49.3859N, 15.3650E	Jankovský p.
	Ondřejov	P3ONDR01	ČHMÚ	49.9067N 14.7849E	Chotýšanka
průměrný denní úhrn srážek, výška sněhové pokrývky	Polná	P3POLN01	ČHMÚ	49.4864N, 15.7061E	Šlapanka
	Světlá n. Sázavou	P3SVET01	ČHMÚ	49.6728N, 15.4075E	Sázavka
	Nový Rychnov	P3NRYC01	ČHMÚ	49.3859N, 15.3650E	Jankovský p.
	Ondřejov	P3ONDR01	ČHMÚ	49.9067N 14.7849E	Chotýšanka
průtok	Mírovka	156000	ČHMÚ	49.5810N, 15.6174E	Šlapanka
	Josefodol	158500	ČHMÚ	49.6831N, 15.4194E	Sázavka
	Milotice	161900	ČHMÚ	49.5001N, 15.2793E	Jankovský p.
	Slověnice	165800	ČHMÚ	49.7515N, 14.8886E	Chotýšanka
chemismus	Havlíčkův Brod	PVL_3329	Povodí Vltavy s.p.	49.6003N, 15.5943E	Šlapanka
	Světlá n. Sázavou	PVL_5018	Povodí Vltavy s.p.	49.6712N, 15.4113E	Sázavka
	Kletečná Milotice	PVL_5600	Povodí Vltavy s.p.	49.4998N, 15.2819E	Jankovský potok
	Libež	PVL_5021	Povodí Vltavy s.p.	49.7585N, 14.9132E	Chotýšanka

3. Výsledky a diskuze

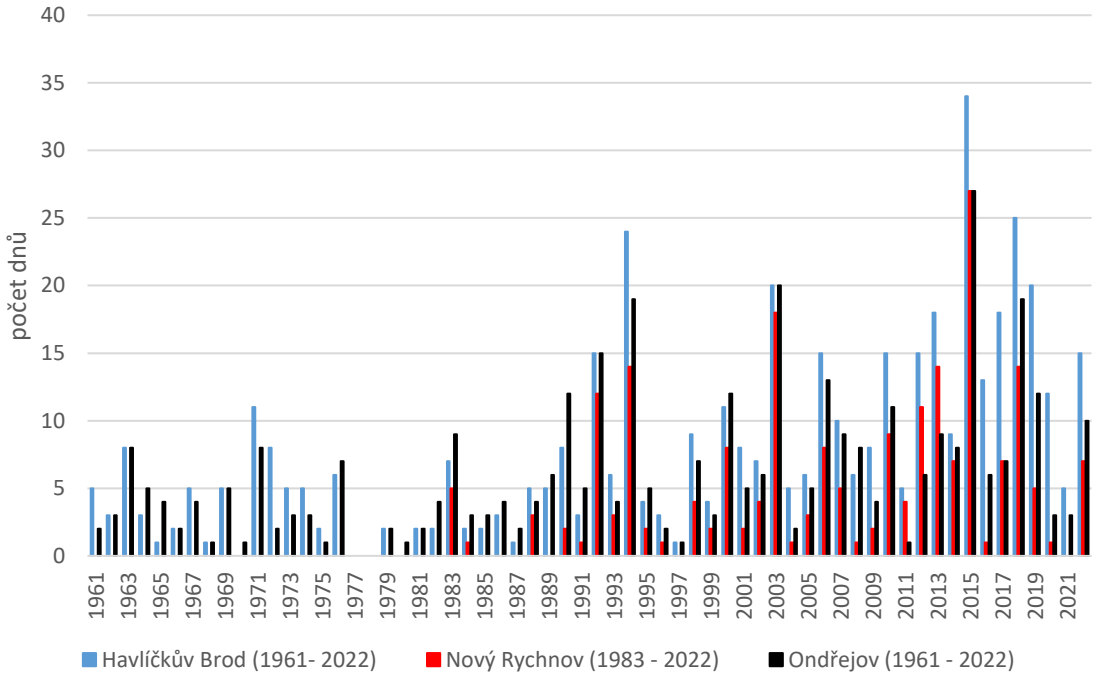
3.1 Základní klimatické parametry

Analýza dat ukázala, že hydroklimatické parametry se postupně mění. Průměrná teplota vzduchu ve vybraných povodích narůstala. Tento nárůst byl v povodí Šlapanky a Sázavky (obr. 1) potvrzen i Mann-Kendallovým testem trendů. Ve všech povodích byl zaznamenán nárůst počtu tropických dnů (obr. 2). Mezi lety 1960–1990 se počet tropických dnů pohyboval kolem 5 max 10 dnů za rok, mezi lety 1990 až 2020 se počty tropických dnů zvyšovaly na 10 a více.



Zdroj dat (Source of date): ČHMÚ

Obr. 1 Průměrné měsíční teploty vzduchu na stanici Havlíčkův Brod pro povodí Sázavky a Šlapanky.
Fig. 1 Average monthly temperatures on Havlíčkův Brod station for Sázavka and Šlapanka River catchments.

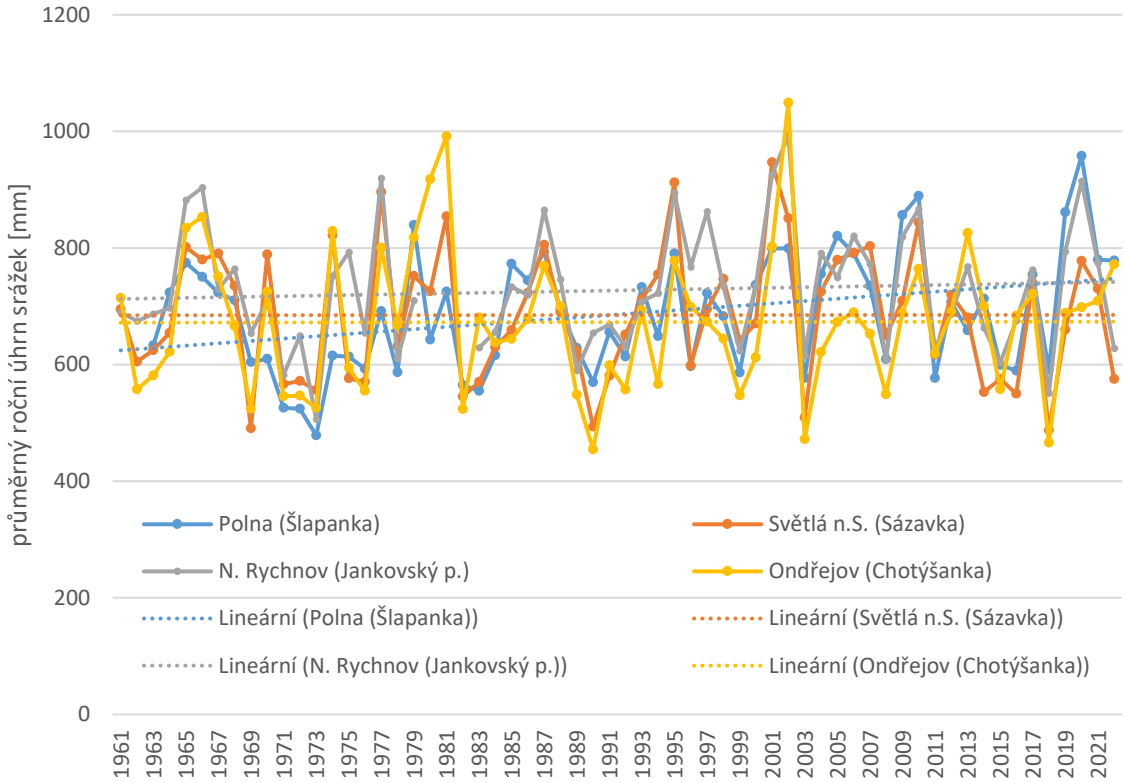


Zdroj dat (Source of date): ČHMÚ

Obr. 2 Počty tropických dnů na vybraných meteorologických stanicích.
Fig. 2 Number of tropical days on chosen meteorological stations.

Největšího počtu tropických dnů bylo na všech vybraných stanicích dosaženo v roce 2015 (na stanici Havlíčkův Brod 34 tropických dnů). V tropických dnech se významně zvyšuje evapotranspirace.

Celkový úhrn srážek se v povodích příliš nemění. Z grafu nelze vyčíst jednoznačný směr vývoje, což potvrzuje i nesignifikantní Mann-Kendallův test. Pouhé proložení lineární spojnice trendu ukazuje, že na stanici Polná (Šlapanka) a Nový Rychnov (Jankovský p.) úhrn srážek ve sledovaném období mírně vzrůstá a na zbylých stanicích stagnuje. Nejnižší úhrn srážek na všech stanicích byl zaznamenán v roce 2018 (obr. 3). Nejvyšší úhrn srážek byl na většině stanic zaznamenán v povodňovém roce 2002. Na stanici Ondřejov byl změřen roční úhrn srážek 1049 mm. V zimním období poklesá výška sněhové pokrývky a počet dnů se sněhovou pokrývkou.

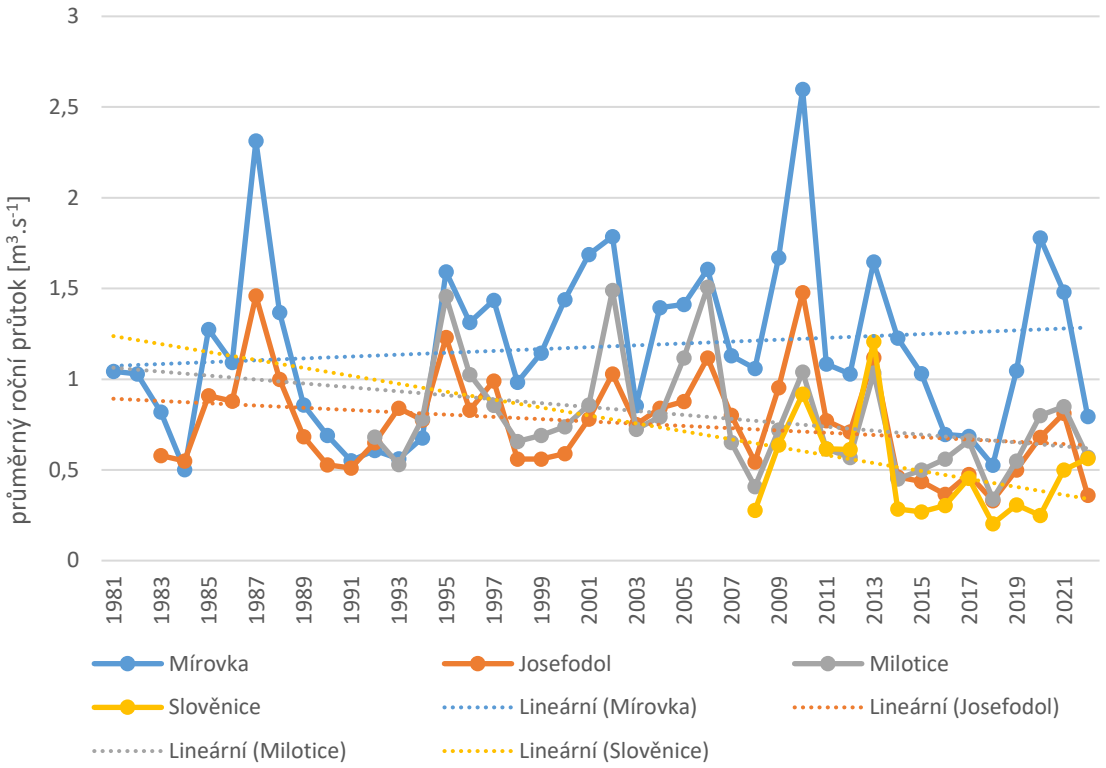


Zdroj dat (Source of date): ČHMÚ

Obr. 3 Roční úhrny srážek na vybraných stanicích mezi lety 1961 až 2022.
Fig. 3 Annual precipitation at chosen stations between 1961 and 2022.

3.2 Průtoky vody

Vývoj průměrných ročních průtoků pro všechny závěrové měrné profily je zachycen na obr. 4. Na třech ze čtyř sledovaných profilů průtoky mírně poklesají, tento trend však nebyl potvrzen Mann-Kendallovým testem. Nejnižší průtoky se v tocích objevily shodně v letech 2015 až 2018, jako reakce na poměrně nízké srážkové úhrny mezi roky 2011 až 2018 (obr. 3) a vysoké letní teploty v posledním období (obr. 2). Nejvyšší průměrný roční průtok byl na Šlapance a Sázavce zaznamenán v roce 2009, což koresponduje s vysokým úhrnem srážek v tomtéž roce (obr. 3).



Zdroj dat (Source of date): ČHMÚ

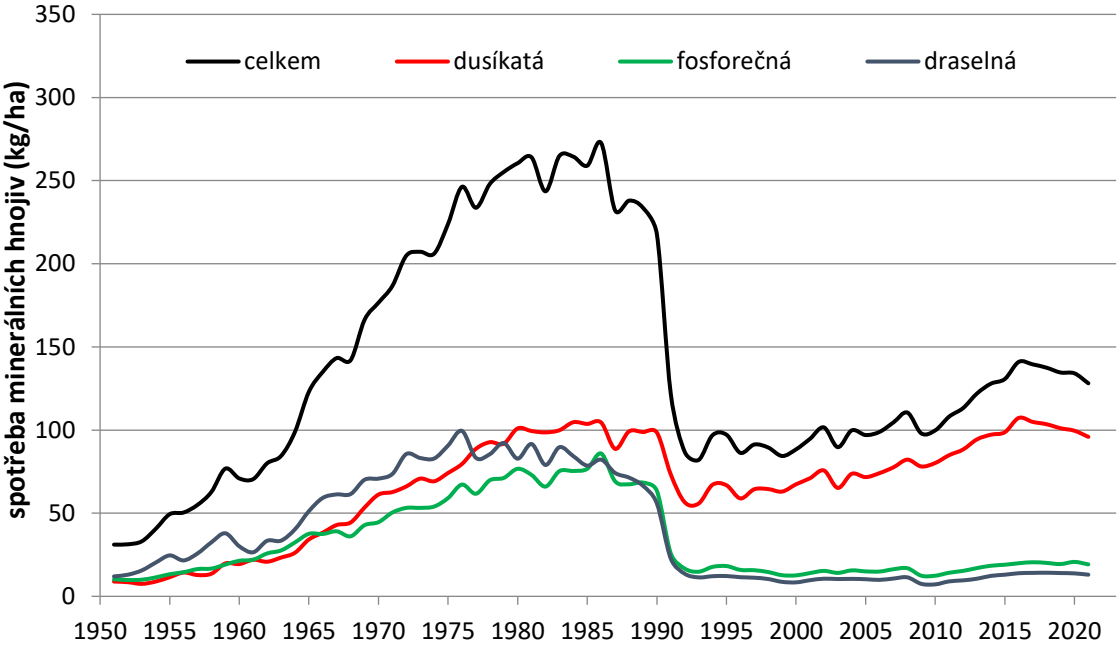
Obr. 4 Průměrné roční průtoky na závěrových profilech vybraných toků mezi lety 1981 až 2022.
Fig. 4 Average annual discharges at closing profiles between 1981 and 2022.

3.3 Kvalita vody

Říční síť na Českomoravské vrchovině, kde se nachází povodí Šlapanky, Sázavky a Jankovského potoka, tvoří prameniště a drobné vodní toky, které jsou z velké části meliorované (Kulhavý et al. 2007). Prameniště a horní toky jsou často obklopené ornou půdou. Takové oblasti jsou velmi citlivé na znečištění (Weber et al. 2020;Goeller et al. 2019) a kvalita vody je již v horních částech toků velmi nízká. Hodnocení kvality vody v takto antropogenně ovlivněných oblastech je však poměrně komplikované. Není snadné odlišit vliv změny hydroklimatických parametrů a změny ve zdrojích znečištění. Venkovské oblasti mají kvůli převážně zemědělskému charakteru problémy především s živinami. Analyzovány tak byly prioritně vybrané formy dusíku a fosforu. Na řece Šlapance je vývoj kvality vody sledován od konce 70. let 20. století. Je zde tedy zaznamenán i rok 1989, kdy došlo k nejvýznamnějším změnám jak v sektoru zemědělství, tak v průmyslu. Na Sázavce a Jankovském potoce je kvalita vody sledována od poloviny 90. let 20. století, takže situace před ani těsně po restrukturalizaci zemědělství a průmyslu není v kvalitě vody zaznamenaná. Chotýšanka se sleduje od roku 2006.

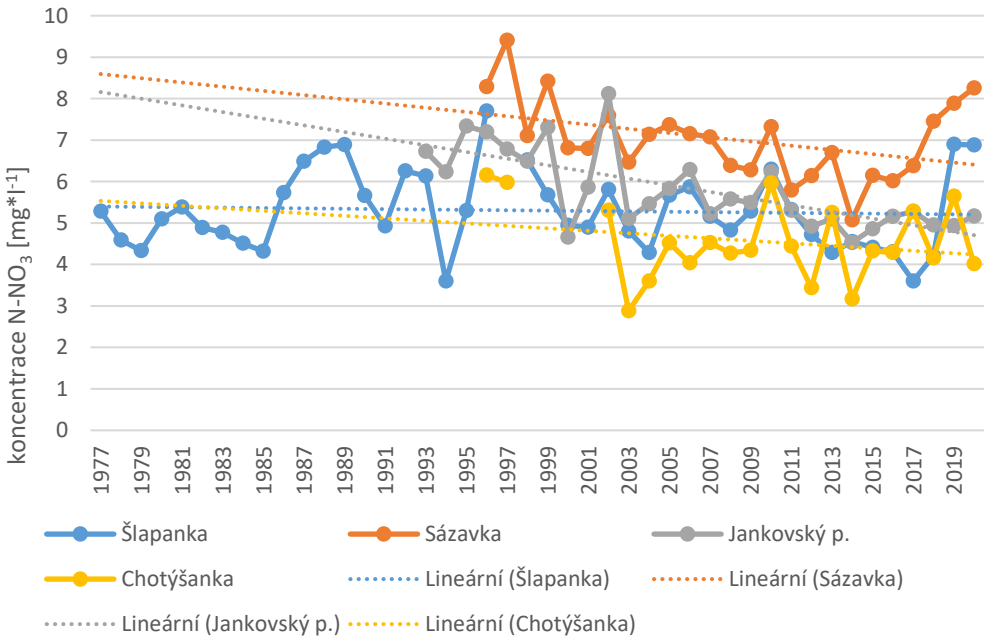
Na vývoj koncentrací forem anorganického dusíku má v zemědělské krajině velký vliv množství dávek dusíkatých minerálních hnojiv do orné půdy (obr. 5). Po roce 1989 se celková spotřeba hnojiv radikálně snížila (z 250 kg čistých živin·ha^{-1} na 100 kg čistých živin·ha^{-1}). Spotřeba dusíkatých hnojiv se po roce 1989 snížila ze 100 kg čistých živin·ha^{-1} na 55 kg čistých živin/ha a v posledních 10 letech dosahuje stejných hodnot jako v době před sametovou revolucí. Tyto změny se v tocích výrazně neprojevují. Koncentrace dusičnanů na všech vybraných tocích v dlouhodobém vývoji stagnují nebo mírně klesají (obr. 6). Na řece Šlapance byl pokles dusičnanů potvrzen Mann-Kendallovým testem. K nejvyššímu poklesu

koncentrací dusičnanového dusíku došlo na Jankovském potoce. Nevyšší koncentrace se dlouhodobě drží v řece Sázavce. Zde byly v letech 2017 až 2020 naměřeny takové koncentrace, které po výpočtu charakteristické hodnoty řadí tok do V. jakostní třídy (velmi silně znečištěná voda) podle ČSN 75 7221 (Pavlíková 2023).



Zdroj dat (Source of date): Statistická ročenka ČR (2002–2022)

Obr. 5 Spotřeba minerálních hnojiv v ČR (v kg čistých živin·ha^{-1}) v letech 1950 až 2021.
Fig. 5 Consumption of mineral fertilizers in Czechia (in kg of pure nutrients) between years 1950 and 2021.



Zdroj dat (Source of date): ČHMÚ, Povodí Vltavy s.p.

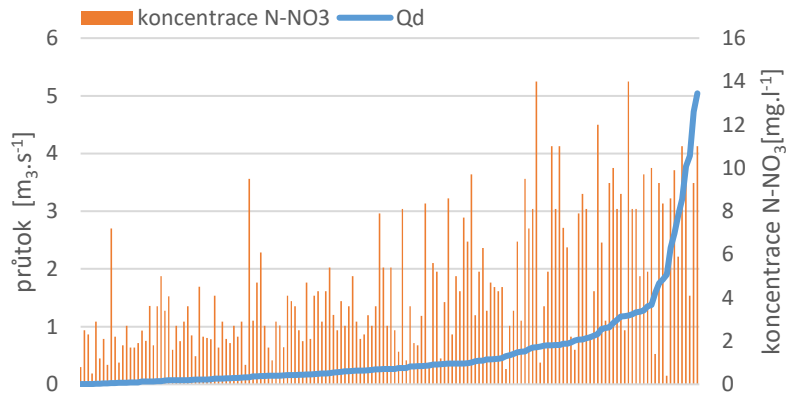
Obr. 6 Dlouhodobý vývoj koncentrací N-NO_3 na vybraných profilech v letech 1977 až 2020.
Fig. 6 Long-term development of NO_3-N concentrations on selected profiles between 1977 and 2020.

Na třech ze čtyř profilů byla Personovým korelačním koeficientem potvrzena přímá závislost dusičnanového dusíku na velikosti průtoku (tab. 3). Tuto skutečnost ukazuje i graf na obr. 7, kde jsou koncentrace dusičnanů seřazeny podle průtoků (Bartůšek 2022). Vysoké koncentrace dusičnanů se podle grafu vyskytují při vyšších průtocích. Rovněž krabicový graf koncentrací N-NO_3 na Sázavce (obr. 9) ukazuje na vyšší koncentrace během vysokých průtoků. Podle přímé závislosti lze usuzovat, že původ dusičnanů je převážně v plošných zdrojích znečištění, v tomto případě splach z orné půdy. Nejvyšší koncentrace dusičnanů jsou dlouhodobě dosahovány v zimních a brzkých jarních měsících (obr. 8). Korespondují s výškou odtoku, která je v tomto období rovněž nejvyšší. Dochází k jarnímu tání a z půdy bez vegetačního krytu jsou dusičnany, velmi slabě navázané na sorpční komplex půdy, lehce vymývány do vodních toků (Scheffer a Schachtschabel 2002). Stejné jarní peaky koncentrací dusičnanů popisují i Kvítek et al. (2009), Kvítek and Doležal (2003), Dinnel a Bratkovich (1993) a Patel et al. (2020). Jako kritické podmínky pro koncentrace dusičnanů se tedy jeví orná půda bez vegetačního krytu v kombinaci s vysokými průtoky způsobenými táním či deštěm. Z toho vyplývají i návrhy, které by mohly koncentrace dusičnanů pomoci snížit: neponechávat půdu bez vegetačního krytu, na svazích s vyšším sklonem nepěstovat širokořádkové plodiny apod. V případě Jankovského potoka není závislost N-NO_3 na průtocích tak těsná, důvodem může být vyšší podíl bodových zdrojů znečištění.

Tab. 3 Pearsonův korelační koeficient popisující závislost vybraných parametrů kvality vody na průtoku.
Tab. 3 Pearson correlation coefficient describing the dependence of selected water quality parameters on flow rate.

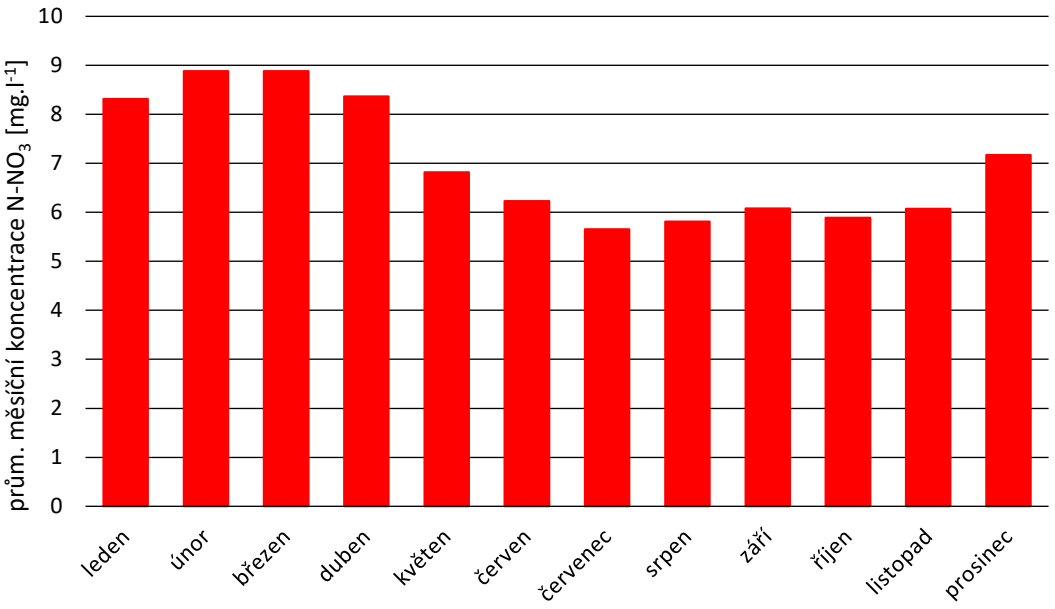
	Šlapanka	Sázavka	Jankovský p.	Chotýšanka
N-NO_3	0,600	0,390	0,183	0,496
N-NH_4	0,130	0,204	0,196	0,042
P-PO_4	−0,200	−0,210	−0,131	−0,228

Zdroj dat (Source of date): ČHMÚ



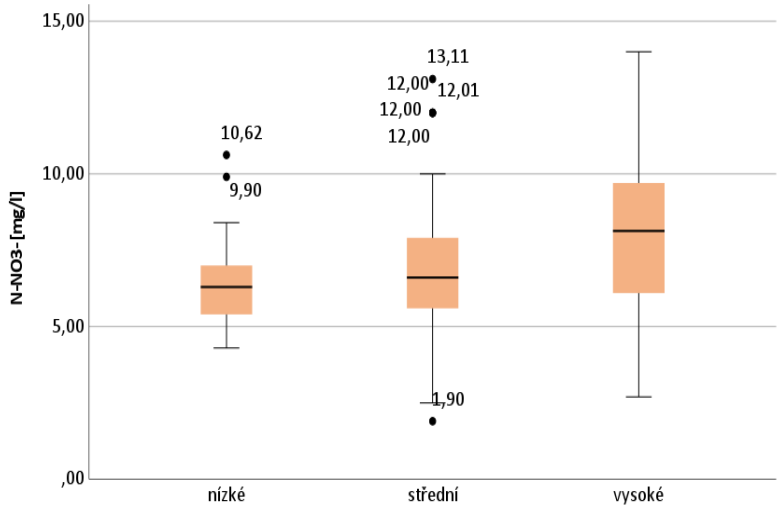
Zdroj dat (Source of date): ČHMÚ, Povodí Vltavy s.p.

Obr. 7 Koncentrace N-NO_3 podle seřazených průtoků na profilu Libež (Chotýšanka).
Fig. 7 Concentration of NO_3-N according to ordered flows on the profile Libež (Chotýšanka).



Zdroj dat (Source of date): ČHMÚ, Povodí Vltavy, s. p.

Obr. 8 Průměrné měsíční koncentrace dusičnanů v řece Sázavce.
Fig. 8 Average monthly concentrations of NO_3-N in Sázavka River.

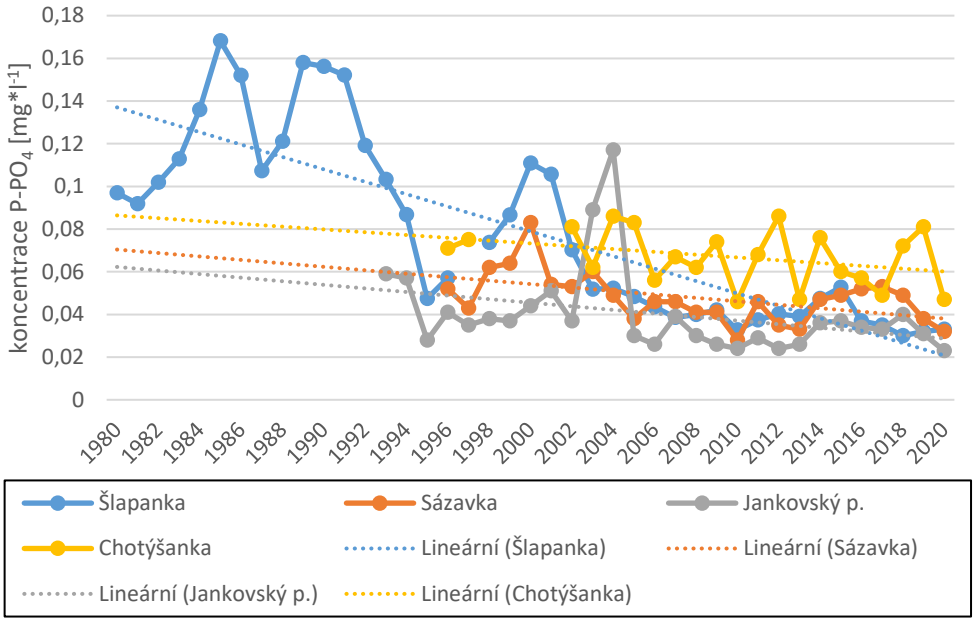


Zdroj dat (Source of date): ČHMÚ, Povodí Vltavy s.p.

Obr. 9 Krabicové diagramy koncentrací dusičnanů v řece Sázavce v případě nízkých, středních a vysokých průtoků.
Fig. 9 Boxplots of NO_3-N concentrations in Sázavka River for low, medium, and high discharges.

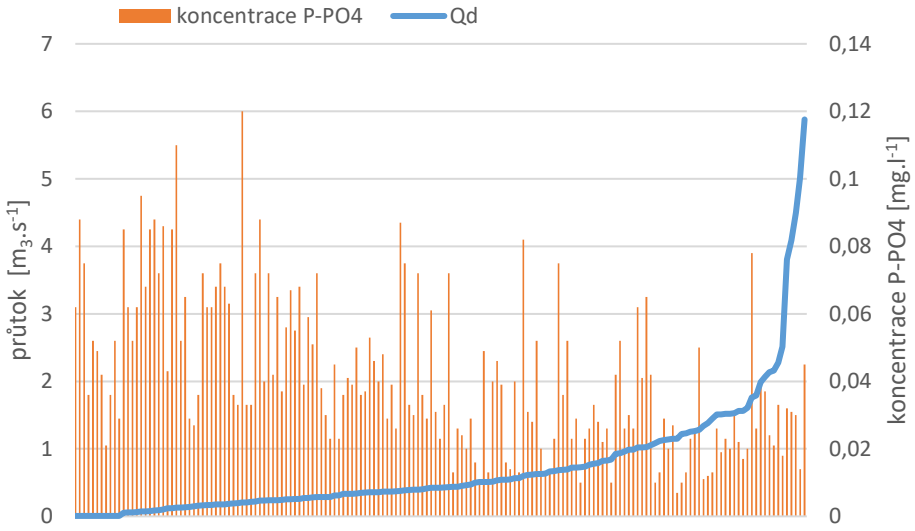
Zdrojem fosforečnanového fosforu ve venkovských povodích jsou jednak splachy z orné půdy, jednak komunální odpadní vody z malých obcí. Na horních tocích převažuje plošný zdroj fosforečnanů, směrem k ústí se k němu připojují rozptýlené bodové zdroje znečištění (Havlíková et al. 2023). Koncentrace fosforečnanového fosforu na všech vybraných tocích v dlouhodobém vývoji klesají (obr. 10). Na řece Šlapance se průměrné roční koncentrace v 80. letech 20. století pohybovaly mezi 0,12 až 0,16 $mg \cdot l^{-1}$. Po roce 2000 se koncentrace ustálily mezi 0,03 a 0,05 $mg \cdot l^{-1}$. Signifikantní klesající trend zde byl potvrzen Mann-Kendallovým testem trendů. Vývoj koncentrací fosforečnanového fosforu kopíruje vývoj dávek

fosforečnanových hnojiv do půdy (obr. 5). V 80. letech 20. století se do půdy aplikovalo 75 kg fosforu v čistých živinách na hektar, po roce 1989 hodnota radikálně poklesla na 15 kg·ha^{-1} a posledních 10 let se pohybuje kolem 20 kg·ha^{-1}. Vyšší hodnoty fosforečnanů vykazuje v posledních 20 letech tok Chotýšanky (0,05 až 0,08 mg·l^{-1}). Koncentrace jsou zde rozkolísanější než na jiných tocích.



Zdroj dat (Source of date): ČHMÚ, Povodí Vltavy s.p.

Obr. 10 Dlouhodobý vývoj koncentrací P-PO$_4$ na vybraných profilech v letech 1980 až 2020.
Fig. 10 Long-term development of PO$_4$-P concentrations on selected profiles between 1980 and 2020.

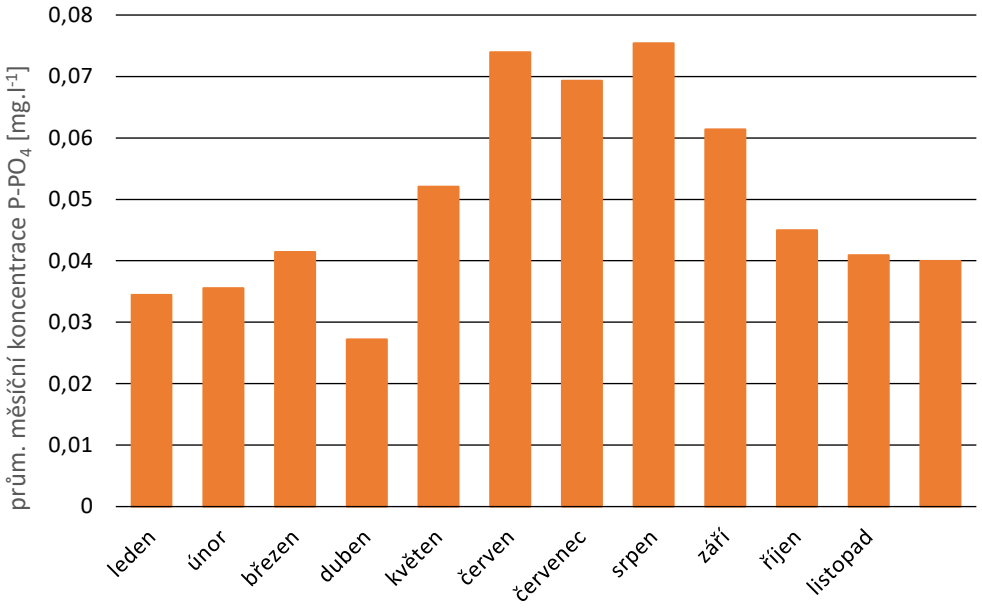


Zdroj dat (Source of date): ČHMÚ, Povodí Vltavy s.p.

Obr. 11 Koncentrace P-PO$_4$ podle seřazených průtoků na profilu Světlá nad Sázavou (Sázavka).
Fig. 11 Concentration of P-PO$_4$ according to ordered flows on the profile Světlá nad Sázavou (Sázavka).

Záporné hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu (tab. 3) ukazují spíše na nepřímou závislost koncentrací fosforečnanů na průtocích. Tu potvrzuje rovněž graf koncentrací

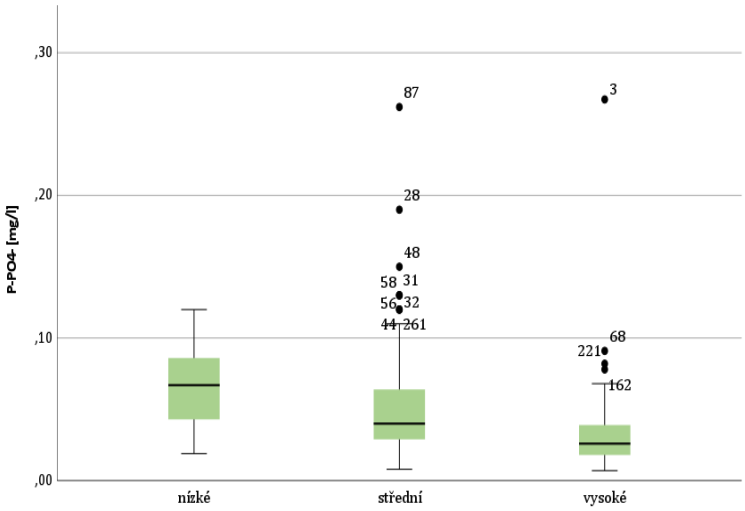
fosforečnanů podle seřazených průtoků v závěrovém profilu Sázavky, kdy nejvyšších hodnot fosforečnanů je dosahováno při nejnižších průtocích (obr. 11) a krabicový graf (obr. 13). Hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu jsou nízké, takže vazba mezi fosforečnany a průtokem je slabá. To může být důsledkem kombinace plošných a bodových zdrojů znečištění. Protože závěrové profily sledování kvality vody jsou na dolních tocích, tak zde mírně převažují zdroje bodové, v tomto případě odpadní vody z malých obcí. Z grafu průměrných měsíčních průtoků vyplývá, že nejvyšší koncentrace se vyskytují v letních měsících (obr. 12), kdy jsou v tocích nejnižší průtoky. Produkce odpadních vod je během roku poměrně stálá, proto koncentrace fosforečnanů výrazněji kolísají v závislosti na množství protékající vody (Hrdinka et al. 2015; Whitehead et al. 2009). Vzhledem k tomu, že zdroje fosforu jsou ve venkovských povodích jak plošné, tak bodové, přidává se k metodám správné zemědělské praxe ještě důsledné čištění odpadních vod ideálně s terciárním stupněm, tj. odstraňováním fosforu.



Zdroj dat (Source of date): ČHMÚ, Povodí Vltavy s.p.

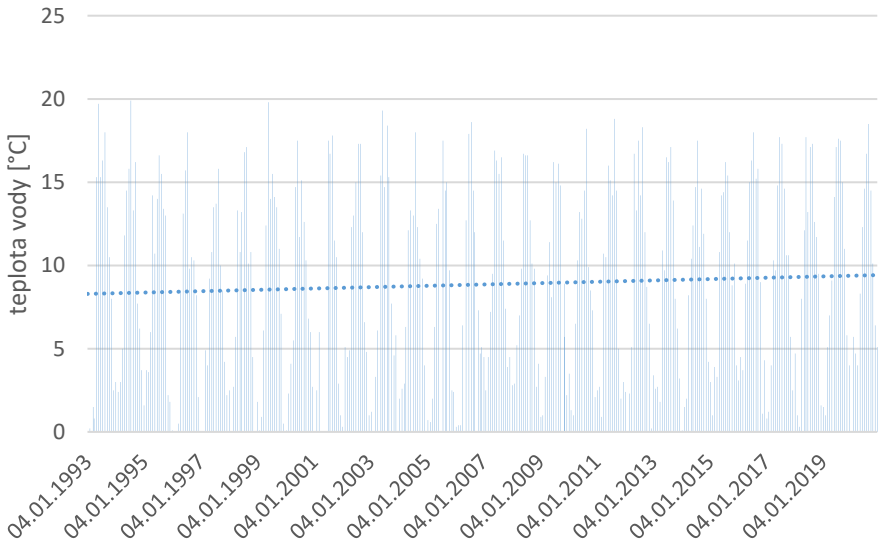
Obr. 12 Průměrné měsíční koncentrace fosforečnanového fosforu v řece Sázavce.
Fig. 12 Average monthly concentrations of PO_4-P and total phosphorus in Sázavka River.

Teplota vody na všech sledovaných tocích mírně narůstala. Tento trend však nebyl potvrzen Mann-Kendallovým testem. Příkladem je Jankovský potok, kde na postupný nárůst teploty ukazuje daty proložený lineární trend (obr. 14).



Zdroj dat (Source of date): ČHMÚ, Povodí Vltavy s.p.

Obr. 13 Krabicové diagramy koncentrací fosforečnanového fosforu na Sázavce v případě nízkých, středních a vysokých průtoků.
Fig. 13 Boxplots of PO_4-P concentrations in Sázavka River for low, medium, and high discharges.



Zdroj dat (Source of date): ČHMÚ, Povodí Vltavy s.p.

Obr. 14 Teplota vody na profilu Kletečná (Jankovský p.).
Fig. 14 Water temperature on profile Kletečná (Janovský p.).

4. Závěr

Cílem příspěvku bylo vyhodnotit změny hydroklimatických parametrů a vybraných parametrů kvality vody v povodích s venkovským charakterem, které se nacházejí v povodí řeky Sázavy.

Analýza dat ukázala, že hydroklimatické ukazatele se během sledovaného období změnily. Teplota vzduchu rostla, její nárůst byl prokázán Mann-Kendallovým testem trendů (povodí Sázavky, Šlapanky). Dále rostl počet tropických dnů, poklesla výška a délka trvání sněhové pokrývky. V datech srážkových úhrnů nebyl nalezen žádný trend. Mírně narůstala teplota vody v tocích, ale její nárůst nebyl potvrzen Mann-Kendallovým testem trendů.

Ve všech vybraných tocích byly vysoké koncentrace dusičnanů a jejich koncentrace stagnovaly nebo mírně klesaly. Rovněž koncentrace fosforečnanového fosforu klesaly. Závislostní analýzy ukázaly, že ve vybraných povodích pocházejí dusičnany z plošných zdrojů znečištění, zatímco fosforečnany spíše z rozptýlených bodových zdrojů znečištění nebo jsou kombinací obou zdrojů.

V antropogenně ovlivněných oblastech je složité určit, zda se jedná o vývoj kvality vody vyvolaný změnou zdrojů znečištění nebo změnou hydroklimatických parametrů. Pro návrh managementu v jednotlivých povodích je třeba podrobněji analyzovat veškeré zdroje znečištění a vyhodnotit kritická období zvýšených koncentrací pro jednotlivé parametry. Na základě těchto informací můžeme lépe navrhnout opatření, která by mohla kvalitu vody pozitivně ovlivnit.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

BARTŮŠEK, A., 2022. Změny vybraných parametrů geochemismu povrchových vod ve vazbě na srážko-odtokový režim. Bakalářská práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie. PřF UK, Praha. 90 s.

BATES, B. C., KUNDZEWICZ, Z. W., WU, S., PALUTIKOF, J. P. (eds.), 2008. Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Secretariat, Geneva.

BOURAOUI, F., GRIZZETTI, B., GRANLUND, K., REKOLAINEN, S., BIDOGLIO, G., 2004. Impact of Climate Change on the Water Cycle and Nutrient Losses in a Finnish Catchment. *Clim Change*, **66**: 109–126. https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000043147.09365.e3

DIAMANTINI, E., LUTZ, S. R., MALLUCCI, S., MAJONE, B., MERZ, R., BELLIN, A., 2018. Driver detection of water quality trends in three large European river basins. *Sci Total Environ*, **612**:49–62. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.172

DINNEL, S. P., BRATKOVICH, A., 1993. Water discharge, nitrate concentration and nitrate flux in the lower Mississippi River. *J Mar Syst*, **4**(4):315–326. https://doi.org/10.1016/0924-7963(93)90027-J

GOELLER, B. C., FEBRIA, C. M., WARBURTON, H. J., HOGSDEN, K. L., COLLINS, K. E., DEVLIN, H. S., HARDING, J. S., MCINTOSH, A. R., 2019. Springs drive downstream nitrate export from artificially-drained agricultural headwater catchments. *Sci Tot Env*, **671**:119–128. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.308

HAVLÍKOVÁ, P., MRKVA, L., CHUMAN, T., JANSKÝ, B., 2023. Surface water quality in the rural catchment of the Šlapanka River, Czechia: change over time. *Environ Earth Sci*, **82**:379. https://doi.org/10.1007/s12665-023-11067-y

HRDINKA, T., NOVICKÝ, O., HANSLÍK, E., RIEDER, M., 2012. Possible impacts of floods and droughts on water quality. *J Hydro-environ Res*, **6**(2): 145–150. https://doi.org/10.1016/j.jher.2012.01.008

HRDINKA, T., VLASÁK, P., HAVEL, L., MLEJNSKÁ, E., 2015. Possible impacts of climate change on water quality in streams of the Czech Republic. *Hydrol Sci J*, **60**(2):192–201. https://doi.org/10.1080/02626667.2014.889830

KULHAVÝ, Z., DOLEŽAL, F., FUČÍK, P., KULHAVÝ, F., KVÍTEK, T., MUZIKÁŘ, R., SOUKUP, M., ŠVIHLA, V., 2007. Management of agricultural drainage systems in the Czech Republic. *Irrig Drain*, **56**:141–149. https://doi.org/10.1002/ird.339

KVÍTEK, T., DOLEŽAL, F., 2003. Water and nutrient regime of the Kopaniský tok catchment in the Bohemo-moravian highland. *Acta Hydrol Slovaca*, **4**(2):255–264.

KVÍTEK, T., ŽLÁBEK, P., BYSTŘICKÝ, V., FUČÍK, P., LEXA, M., GERGEL, J., NOVÁK, P., ONDR, P., 2009. Changes of nitrate concentrations in surface waters influenced by land use in the crystalline complex of the Czech Republic. *Phys Chem Earth*, **34**:541–551. https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.07.003

ORR, H. G., SIMPSON, G. L., DES CLERS, S., WATTS, G., HUGHES, M., HANNAFORD, J., DUNBAR, M. J., LAIZÉ, C. L. R., WILBY, R. L., BATTARBEE, R. B., EVANS, R., 2015. Detecting changing river temperatures in England and Wales. *Hydrol Process*, **29**:752–766. https://doi.org/10.1002/hyp.10181

PATEL, K. F., TATARIW, C., MACRAE, J. D., OHNO, T., NELSON, S. J., FERNANDE, I. J., 2020. Snowmelt periods as hot moments for soil N dynamics: a case study in Maine, USA. *Environ Monit Assess*, **192**:777. https://doi.org/10.1007/s10661-020-08733-0

PAVLÍKOVÁ, A., 2023. Vývoj koncentrací vybraných živin a pesticidů v řece Sázavce a jejich změny ve vazbě na srážko-odtokový režim. Bakalářská práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie. PřF UK, Praha. 87 s.

SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P., 2002. Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

SENHORST, H. A. J., ZWOLSMAN, J. J. G., 2005. Climate change and effects on water quality: a first impression. *Water Sci Technol*, **51**(5):53–59. https://doi.org/10.2166/wst.2005.0107

WEBE, G., HONECKER, U., KUBINIOK, J., 2020. Nitrate dynamics in springs and headwater streams with agricultural catchments in southwestern Germany. *Sci Tot Env*, **722**:137858. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137858

WHITEHEAD, P. G., WILBY, R. L., BATTARBEE, R. W., KERNAN, M., WADE, A. J., 2009. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrol Sci J*, **54**(1):101–123. https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.101

ZWOLSMAN, J. J. G., van BOKHOVEN, A. J., 2007. Impact of summer droughts on water quality of the Rhine River – a preview of climate change? *Water Sci Technol*, **56**(4):45–55. https://doi.org/10.2166/wst.2007.535

Výsledky pasivního vzorkování vod, organické mikropolutanty
(Results of surface water passive sampling, polar organic micropollutants)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.32

Vít Kodeš, Český hydrometeorologický ústav, vit.kodes@chmi.cz
Markéta Ackermanová, Český hydrometeorologický ústav, marketa.ackermanova@chmi.cz

Abstrakt: V rámci cíleného screeningu organických mikropolutantů v povrchových vodách České republiky byla využita technika pasivního vzorkování určená pro polární organické látky. Do zpracování byly zahrnuty výsledky ze dvou vzorkovacích kampaní realizovaných v letech 2021–2022 a i výsledky pořízené v předchozích letech (2012–2020). Sledování pasivními vzorkovači bylo realizováno ve 43 profilech povrchových vod. Sledovány byly látky ze skupin pesticidů, léčiv, bisfenolů, benzotriazolů, perfluorovaných látek, nelegálních drog, látek personální péče včetně UV filtrů, zpomalovačů hoření apod. Pomocí cíleného screeningu 412 polárních mikropolutantů v období 2012–2020 byl prokázán výskyt 342 látek (83 % sledovaných látek). V letech 2021–2022 bylo sledováno 252 látek, z nichž byl pokázán výskyt u 205 látek (81 % sledovaných látek).

Klíčová slova: povrchová voda – pasivní vzorkování – cílený screening – polární organické mikropolutanty

Abstract: For a targeted screening of organic micropollutants in the surface waters of the Czech Republic, a passive sampling technique designed for polar organic substances was used. The results from two sampling campaigns in 2021–2022 as well as the results obtained in previous years (2012–2020) in 43 surface water profiles were included in the assessment. Various substances from the groups of pesticides, pharmaceuticals, bisphenols, benzotriazoles, perfluorinated substances, illicit drugs, personal care products including UV filters, flame retardants, etc. were monitored. Using the targeted screening of 412 polar micropollutants in 2012–2020, the occurrence of 342 substances (83% of the monitored substances) was proven. 205 substances of 252 monitored ones (81%) were found in years 2021–2022.

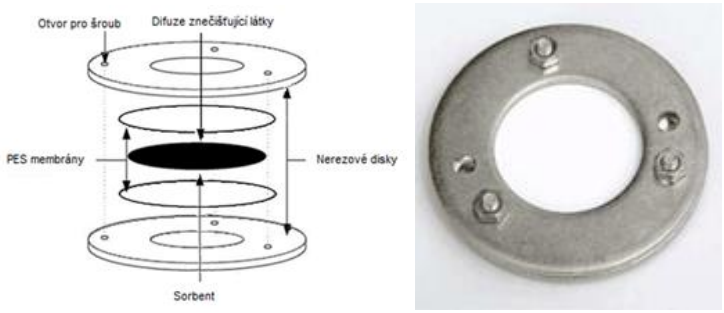
Keywords: surface water – passive sampling – targeted screening – polar organic micropollutants

1. Úvod

Pro screening organických mikrokontaminantů lze s výhodou využít techniky pasivního vzorkování, která na rozdíl od konvenčního vzorkování pomocí bodových vzorků poskytuje výsledky za další časové období a je schopna zachytit řadu událostí v toku, které mohou nastat po celou dobu expozice pasivního vzorkovače v toku. Navíc dochází k zakoncentrování a stabilizaci cílových analytů v pasivním vzorkovači, tudíž lze touto technikou nalézt více látek než v prostých vzorcích vody (Miège et al. 2015).

2. Materiál a metody

Pro screenig byly použity pasivní vzorkovače typy POCIS (*Polar Organic Chemical Integrative Sampler*) v konfiguraci pro sledování velmi polárních organických látek (obr. 1).



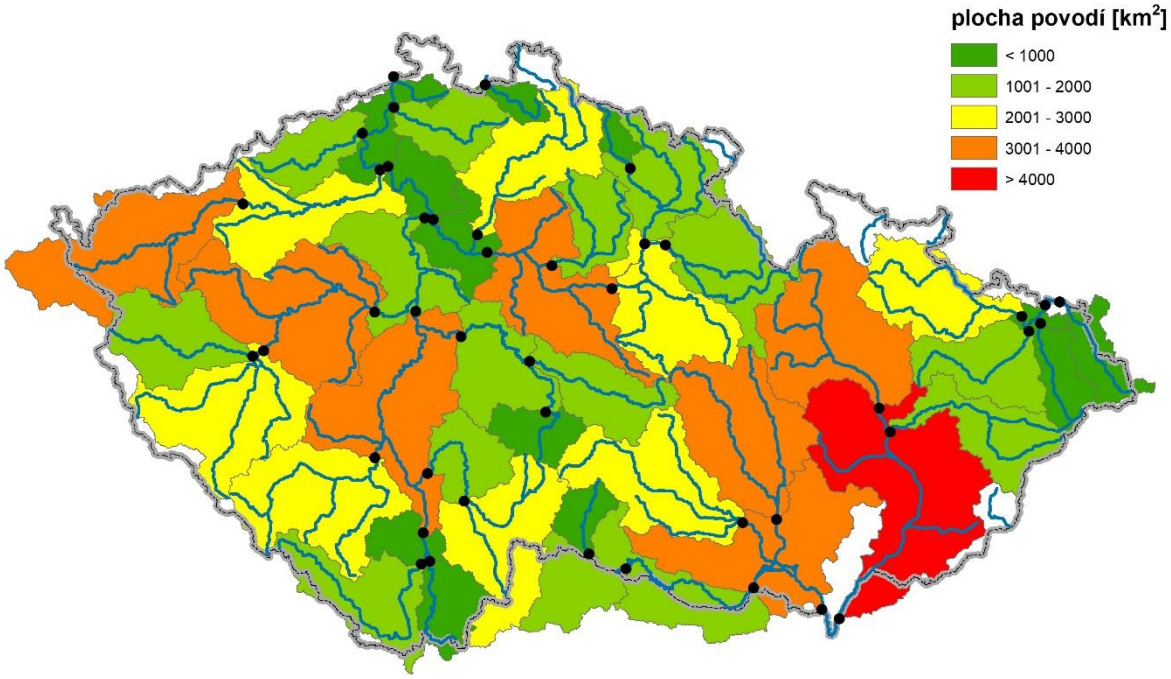
Obr. 1 Pasivní vzorkovač POCIS a jeho konstrukce.
Fig. 1 POCIS passive sampler and its design.

Do zpracování byly zahrnuty jak výsledky ze dvou vzorkovacích kampaní realizovaných v letech 2021–2022, tak i výsledky pořízené v těchto profilech v předchozích letech. Sledování pasivními vzorkovači bylo realizováno ve 43 profilech povrchových vod (tab. 1).

Tab. 1 Sledované lokality.
Tab. 1 Monitored sites.

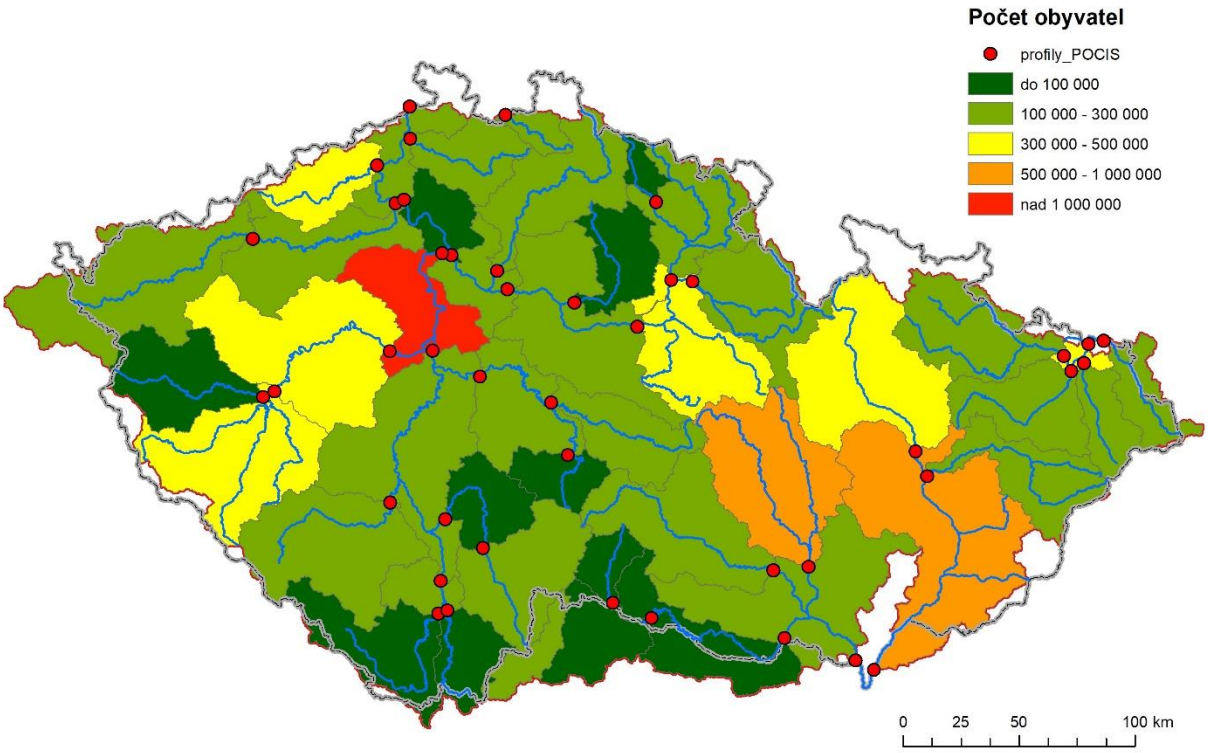
Profil	**Tok**	**Profil**	**Tok**	**Profil**	**Tok**
Troubky	Bečva	Litoměřice	Labe	Děhylov	Opava
Bukovec	Berounka	Schmilka	Labe	Nepasice	Orlice
Srbsko	Berounka	Hrádek n. N.	Luž. Nisa	Ostrava	Ostravice
Ústí n. L.	Bílina	Veselí n. L.	Lužnice	Topělec	Otava
Sány	Cidlina	Bechyně	Lužnice	Březiny	Ploučnice
Pohansko	Dyje	Roudné	Malše	Zruč n. S.	Sázava
Podhradí	Dyje	Písečné	Mor. Dyje	Nespeky	Sázava
Jevišovka	Dyje	Blatec	Morava	Židlochovice	Svratka
Ivančice	Jihlava	Lanžhot	Morava	Březí	Vltava
Předměřice	Jizera	Plzeň Roudná	Mže	Hluboká n.V.	Vltava
Vestřev	Labe	Svinov	Odra	Vrané n.V.	Vltava
Hradec Králové	Labe	Bohumín	Odra	Zelčín	Vltava
Valy	Labe	Želina	Ohře	Poříčí	Želivka
Lysá nad Labem	Labe	Terezín	Ohře		
Obříství	Labe	Věřňovice	Olše		

Tato síť profilů reprezentuje 94,5 % plochy území ČR, pouze 4363 km^2 území ČR není touto sítí pokryto, zejména jsou to povodí Kyjovky, Vláry, Stěnavy, Mandavy a oblasti Šluknovského výběžku, Jesenicka a Osoblažska (obr. 2). Příslušná povodí sledovaných profilů se liší jak využitím území, tak počtem obyvatel, kde v některých povodích a mezipovodích žije pouze do 100 000 obyvatel, v jiných je to 500 000 obyvatel a více (obr. 3). Sledované lokality se liší i průtokovými poměry, které mají vliv na ředění odpadních vod a tím i na nálezy látek (obr. 4). Významným faktorem se ukazuje i počet obyvatel v povodí profilu na 1 m^3 průtoku, kde se tento poměr může lišit řádově, z tohoto pohledu je nejvyšší podíl obyvatelstva na jednotku průtoku v profilu Lužická Nisa-Hrádek nad Nisou, v jehož povodí je aglomerace Liberce a Jablonce nad Nisou a profil Svratka-Židlochovice, který je ovlivněn brněnskou aglomerací, oba tyto profily jsou na tocích s menšími hodnotami průměrných ročních průtoků (obr. 5), takovéto lokality s vyšším počtem obyvatel na jednotku průtoku obvykle vykazují nejvyšší zatížení sledovanými látkami.

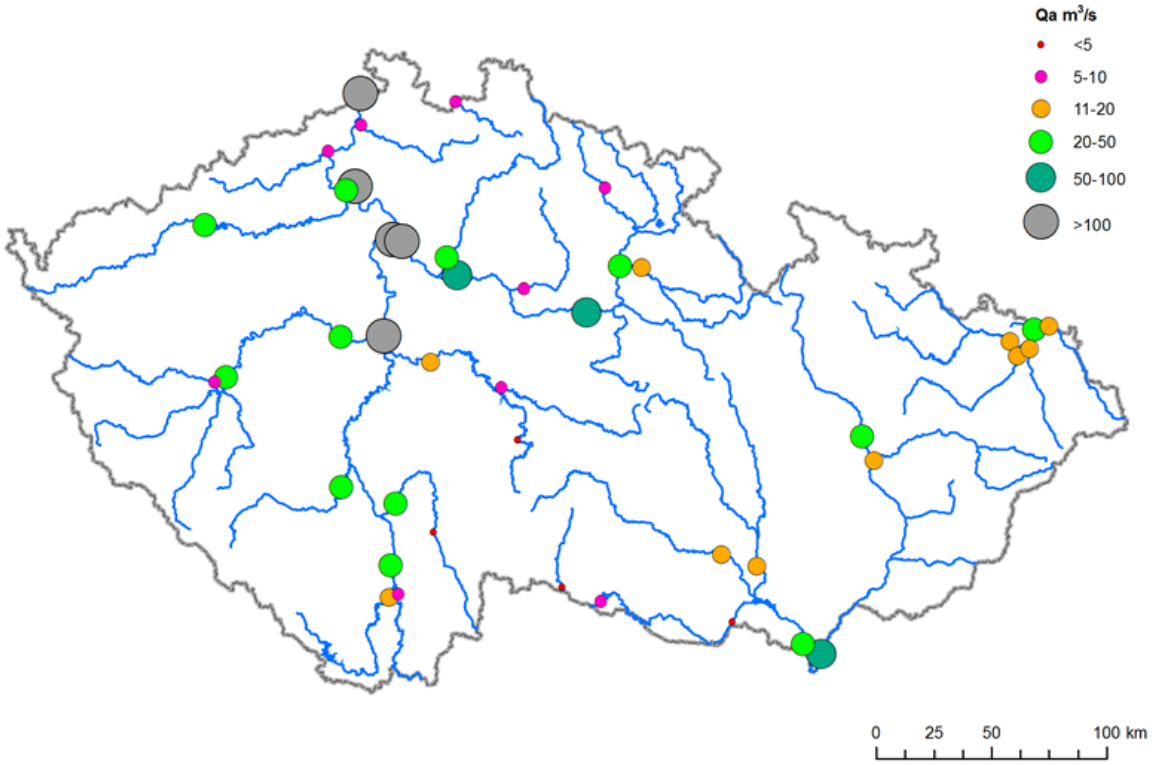


Obr. 2 Lokalizace profilů a příslušné plochy povodí/mezipovodí.
Fig. 2 Locations of profiles and relevant catchment/inter-basin areas.

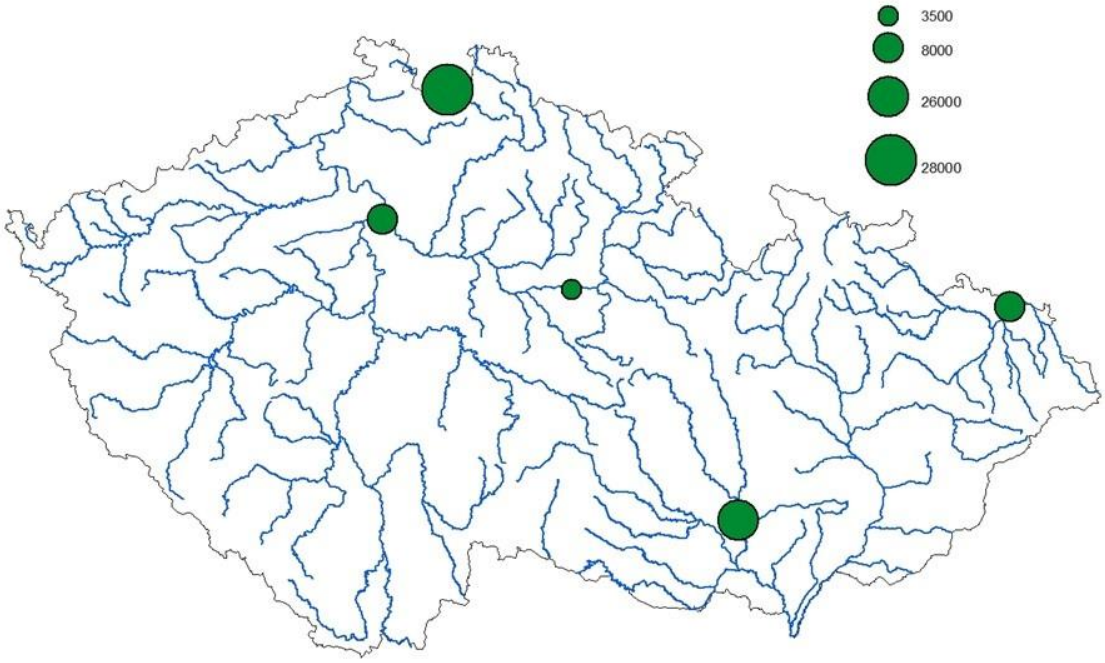
Po třitýdenní expozici v toku byly pasivní vzorkovače deinstalovány a zakonzervovány mražením při teplotě −18 °C až do doby zpracování v laboratoři. Celkem bylo historicky na území ČR v pasivních vzorkovačích analyzováno 412 organických mikropolutantů z různých skupin jako jsou pesticidy (163 látek), léčiva (155 látek), bisfenoly používané jako aditiva do plastů a termopapíru (15 látek), benzotriazoly používané jako antikoroziva (3 látky), perfluorované a polyfluorované látky (29), které pro svou teplotní stabilitu a schopnost měnit povrchové vlastnosti materiálů mají široké využití v produktech jako Teflon, Goretex, mazadla, hasicí pěny apod., nelegální drogy (22), přípravky osobní péče včetně UV filtrů používaných v opalovacích krémech (12), zpomalovače hoření (8 látek) atd. V letech 2021 a 2022 bylo sledováno 252 polárních organických mikropolutantů ze skupin zmíněných výše, z toho 105 pesticidů, 74 léčiv, 3 benzotriazoly, 13 bisfenolů, 7 zpomalovačů hoření, 14 nelegálních drog, 28 perfluorovaných látek a 8 látek ze skupiny přípravků osobní péče a UV filtrů.



Obr. 3 Počet obyvatel v povodích a mezipovodích profilů sledování.
Fig. 3 Population in the catchment and inter-catchment areas of the monitoring profiles.



Obr. 4 Průměrné roční průtoky ve sledovaných profilech.
Fig. 4 Average annual flows in the monitored profiles.



Obr. 5 Počet obyvatel na 1 $m^3 \cdot s^{-1}$ průměrného ročního průtoku v povodí vybraných profilů (Lužická Nisa-Hrádek nad Nisou, Svratka-Židlochovice, Odra-Bohumín, Vltava-Zelčín a Labe-Valy).
Fig. 5 Population per 1 $m^3 \cdot s^{-1}$ of average annual flow in the basin of selected profiles (Lužická Nisa-Hrádek nad Nisou, Svratka-Židlochovice, Odra-Bohumín, Vltava-Zelčín and Elbe-Valy).

3. Výsledky

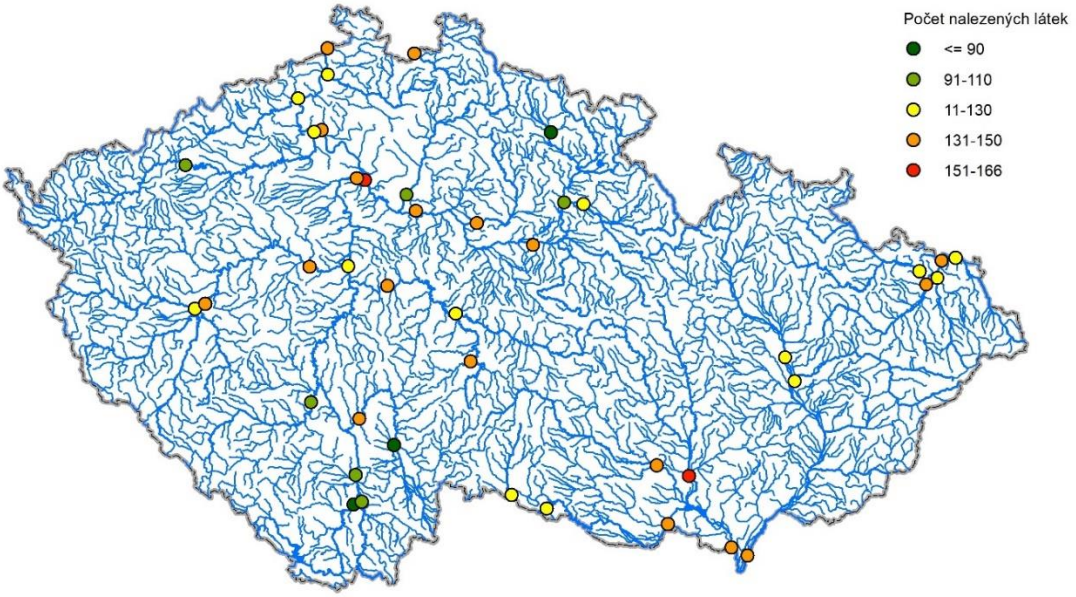
3.1 Období 2012–2020

Ve více jak 50 % sledovaných profilů bylo nalezeno 129 látek, z toho 67 pesticidů, 36 léčiv, 3 benzotriazoly, 4 bisfenoly, 1 zpomalovač hoření, 2 nelegálních drogy, 5 perfluorovaný látek a 5 látek ze skupiny přípravků osobní péče a UV filtrů. U 35 látek byl prokázán výskyt ve všech sledovaných profilech, z toho 12 pesticidů, 18 léčiv, 1 zpomalovač hoření, 1 nelegální droga, a 3 látky ze skupiny přípravků osobní péče a UV filtrů. U 70 sledovaných látek nebyl prokázán výskyt na území ČR. Mezi nejčastěji nalézané látky patřily: karbamazepin (léčivo pro léčbu epilepsie), fosforové zhášeče hoření (tributylfosfát, tris(2-chloretyl)fosfát a tris(2-butoxyetyl)fosfát), telmisartan (léčivo na vysoký tlak), tramadol (léčivo na bolest), venlafaxin (léčivo na léčbu depresí), UV filtry ensulizol a sulisobenzon používané v opalovacích prostředcích, clyndamycin (antibiotikum), lamotrigin (léčivo pro léčbu epilepsie), clarithromycin (antibiotikum), metoprolol (léčivo pro léčbu srdce), oxazepam (léčivo pro zmírnění nervozity, napětí, úzkosti a neklidu), sotalol (léčivo na léčbu srdeční arytmie), sulfamethoxazol (antibiotikum), valsartan (léčivo na vysoký krevní tlak), DEET (repelent proti hmyzu), atenolol (léčivo na vysoký krevního tlak a bolesti na hrudi spojené se srdcem), fexofenadin (léčivo na alergie), diklofenak (léčivo na zmírnění bolesti a zánětu zejména kloubů), atrazin 2-hydroxy (metabolit pesticidu atrazin používaného jako herbicid pro ošetření kukuřice), sulfapyridin (antibiotikum), trimethoprim (antibiotikum), terbuthylazin 2-hydroxy a terbuthylazin desethyl (metabolity herbicidu terbuthylazin používaného jako herbicid pro ošetření kukuřice), hexazinon (pesticid používaný v lesnictví), irbesartan (léčivo na vysoký krevní tlak), 1H-benzotriazol (antikorozivní látka), chloridazon methyl-desphenyl (matbolit herbicidu chloridazon používaného na ošetření cukrové řepy), propikonazol (pesticid s fungicidním účinkem) a metazachor ESA (metabolit herbicidu metazachlor používaného pro ošetření řepky).

3.2 Období 2021–2022

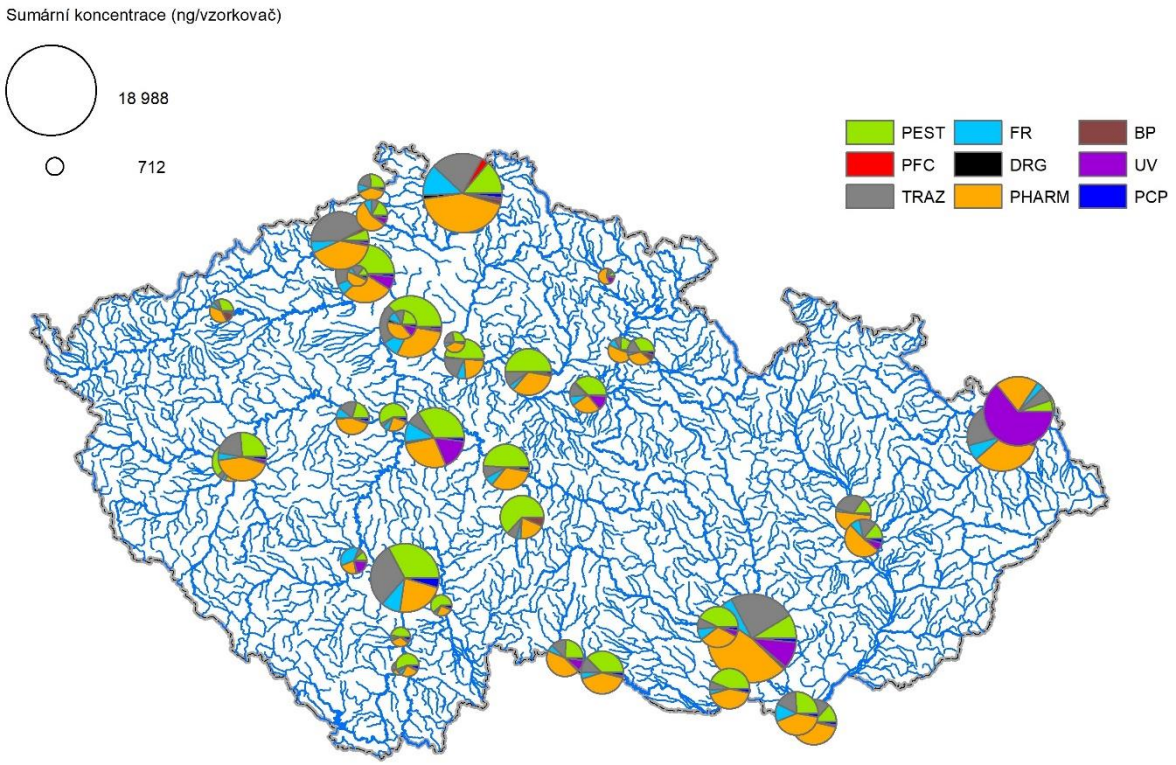
Ve více jak 50 % sledovaných profilů bylo nalezeno 116 látek, z toho 59 pesticidů, 34 léčiv, 3 benzotriazoly, 2 bisfenoly, 6 zpomalovačů hoření, 6 nelegálních drog, 3 perfluorované látky a 3 látky ze skupiny přípravků osobní péče a UV filtrů. U 49 sledovaných látek byl prokázán ve všech sledovaných profilech, z toho 17 pesticidů, 24 léčiv, 2 benzotriazoly, 1 bisfenol, 2 zpomalovače hoření, 1 nelegální droga, a 2 látky ze skupiny přípravků osobní péče a UV filtrů. Alespoň v jednom ze sledovaných profilů bylo nalezeno 205 látek, z toho 94 pesticidů, 63 léčiv, 3 benzotriazoly, 6 bisfenolů, 7 zpomalovačů hoření, 13 nelegálních drog, 14 perfluorovaných látek a 5 látek ze skupiny přípravků osobní péče a UV filtrů. U 47 sledovaných látek nebyl prokázán výskyt na území ČR. Mezi nejčastěji nalézané látky patřily: 1-H-benzotriazol, 4-methyl-1H-benzotriazol a 5-methyl-1H-benzotriazol (antikorozivní látky), z léčiv to byly karbamazepin, clarithromycin, dikofenak, flukonazol (léčivo na infekce vyvolané houbami), lamotrigin, metoprolol, sotalol, sulfamethoxazol, sulfapyridin, temisartan, tramadol, valsartan a venlafaxin, z pesticidů acetochlor ESA (metabolit herbicidu acetochlor používaného na ošetření řepky a kukuřice), chloridazon desphenyl (metabolit herbicidu chloridazon na ošetření cukrové řepy), chlorotoluron (herbicid pro ošetření obilovin), metazachlor (herbicid pro ošetření řepky) a jeho metabolity metazachlor ESA a metazachlor OA, metabolity terbuthylazinu tebuthylazin desethyl a terbuthylazin 2-hydroxy, z UV filtrů pak ensulizol, ze zpomalovačů hoření tributylfosfát a tris(2-butoxyetyl)fosfát) a z přípravků perzonální péče látka DEET. Výsledky screeningu v letech 2021–2022 víceméně s drobnými odchylkami odpovídaly výsledkům z předchozích let.

Nejméně zatíženými byly profily Labe-Vestřev, kde bylo nalezeno „pouze“ 73 látek v sumární koncentraci 938 ng/vzorkovač a Vltava-Březí (82 látek, 713 ng/vzorkovač), naopak nejvíce zatížené byly profily Svratka v Židlochovicích (166 látek, 18 988 ng/vzorkovač), Lužická Nisa v Hrádku nad Nisou (133 látek, 15 550 ng/vzorkovač), Odra v Bohumíně (138 látek, 12 197 ng/vzorkovač), Odra ve Svinově (134 látek, 12 223 ng/vzorkovač), Lužnice v Bechyni (139 látek, 12 177 ng/vzorkovač) a Labe v Obříství (156 látek, 100 002 ng/vzorkovač). Počty nalezených látek v jednotlivých profilech jsou uvedeny na obr. 6.



Obr. 6 Počty nalezených látek v jednotlivých profilech v období 2021–2022.
Fig. 6 Numbers of detections in each profile for the period 2021–2022.

V jednotlivých profilech se látky vyskytovaly v různých směsích v závislosti na charakteru využití území a hustotě obyvatelstva v jejich povodích. V některých profilech dominovaly pesticidy (polabí, posázaví, Cidlina), jinde léčiva (Berounka, Svratka, Morava, Odra v Děhylově) a jinde spíše průmyslové kontaminanty, typickým příkladem je Bílina v Ústí nad Labem. Zajímavý ve velký podíl UV filtrů na celkových koncentracích v profilu Odra-Bohumín a vcelku vysoký podíl benzotriazolů na celkových koncentracích ve většině profilů, ačkoliv se sledovaly pouze 3 látky ze skupiny benzotriazolů. Z pohledu celkových koncentrací byly nejméně významné látky ze skupin drog, perfluorovaných látek (kromě vcelku vysokých koncentrací látky 62FTS (6:2 fluorotelomer sulfonic acid) v profilu Lužická Nisa-Hrádek nad Nisou) a přípravků perzonální péče (bez zahrnutí UV filtrů), kde nejvyšší koncentrace byla zjištěna u látky DEET (diethyltoluamid) v profilu Lužnice-Bechyně. Ve všech profilech byli nalezeni zástupci všech skupin látek, a to včetně drogy metamfetamin, spíše známé jako pervitin. Z drog byla (jako druhá nejčastěji nalézaná) ve 35 profilech nalezena látka MDMA (známá jako taneční droga Extáze). Z perfluorovaných látek byla na 38 profilech nalezena látka PFOA (perfluorooctanoic acid) následovaná látkou 62FTS (nalezena ve 35 profilech). Podíl jednotlivých skupin sledovaných látek na celkových koncentracích je uveden na obr. 7, kde je zřejmý i vliv malého naředění látek v toku díky vysokému počtu obyvatel v povodí daného profilu a malého průtoku v profilech Lužická Nisa-Hrádek nad Nisou a Svratka-Židlochovice.



Obr. 7 Sumární koncentrace nalezených látek a jejich poměr v jednotlivých profilech v období 2021–2022 (PEST = pesticidy, FR = zhášeče hoření, BP = bisfenoly, PFC = per- a polyfluorované látky, DRG = drogy, UV = UV filtry, TRAZ = benzotriazoly, PHARM = léčiva, PCP = přípravky perzonální péče).

Fig. 7 Total concentrations of detected substances and their proportion in each profile for the period 2021–2022 (PEST = pesticides, FR = flame retardants, BP = bisphenols, PFC = per- and polyfluorinated substances, DRG = drugs, UV = UV filters, TRAZ = benzotriazoles, PHARM = pharmaceuticals, PCP = personal care products).

4. Závěr

Byl prokázán výskyt vysokého počtu polárních organických mikropolutantů jejichž zdrojem jsou průmyslové podniky, komunální sféra i zemědělství. Tyto látky se vyskytují ve všech monitorovaných profilech, nejčastěji byly zachyceny látky ze skupin léčiv, pesticidů, benzotriazolů a UV filtrů. Mezi nejzatíženější lokality patří Svratka v Židlochovicích, Lužická Nisa v Hrádku nad Nisou, Odra v Bohumíně a ve Svinově, Lužnice v Bechyni a Labe v Obříství. Většina zachycených látek není dosud nijak regulována, v legislativě pro ně neexistují limitní hodnoty ani v EU ani v ČR. Připravuje se návrh Evropské komise na zařazení některých látek do legislativy týkající se kvality vody, zejména se jedná o perfluorované látky a vybraná léčiva. Je třeba si uvědomit, že významným faktorem, ovlivňujícím záchyty těchto látek i jejich výsledné koncentrace, je ředění protékající vodou v toku. V periodách sucha může být tento faktor ředění minimalizován, podíl znečištěných vod na celkovém průtoku může dramaticky vzrůst (toto platí pro látky, jejichž zdrojem je vypouštění odpadních vod do recipientu) a dochází ke zhoršení kvality vody. Stávající technologie čištění odpadních vod používané běžně v ČR neumí odstranit řadu těchto látek, pro jejich účinné odstranění je nutné využít technologie kvartérního čištění založené na sorpčních a oxidačních procesech, což je v případě odpadních vod prozatím ekonomicky neúnosné. U látek, jejichž zdrojem je zemědělství (typicky pesticidy) naopak dochází k významným vnosům do toků během významných srážkových událostí, v období sucha je vnos těchto látek do toku realizován pouze případnou dotací z vod podzemních. Celková směs organických mikropolutantů ve vodních tocích se tedy může měnit v závislosti na změně klimatických a hydrologických podmínek v povodí.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura:

MIÈGE, C., MAZZELLA, N., ALLAN, I., DULIO, V., SMEDES, F., TIXIER, C., VERMEIRSSEN, E., BRANT, J., O'TOOLE, S., BUDZINSKI, H., GHESTEM, J., STAUB, P., LARDY-FONTAN, S., GONZALEZ, J., COQUERY, M., VRANA, B., 2015. Position paper on passive sampling techniques for the monitoring of contaminants in the aquatic environment – Achievements to date and perspectives. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, **8**, ISSN 2214-1588. https://doi.org/10.1016/j.teac.2015.07.001

Dynamics of surface water quality changes in model headwater areas of the Czech Republic

(Dynamika změn kvality povrchových vod v modelových povodích České republiky)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.33

Kateřina Fraindová, Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University, katerina.fraindova@natur.cuni.cz
Milada Matoušková, Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University
Zdeněk Kliment, Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University
Lukáš Vlček, Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University, Czech Academy of Science, Institute of Hydrodynamics
Vojtěch Vlach, Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University
Lucie Šajnarová, Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University

Abstrakt: Prameny řek mají vysokou ekologickou hodnotu. Bohužel biogeochemické procesy v pramenných oblastech v kontextu různých srážko-odtokových podmínek a specifického půdního pokryvu nebyly dosud plně prozkoumány. Tato studie se zaměřuje na změny korelací 16 biogeochemických parametrů souvisejících s různými typy srážko-odtokových událostí a podmínkami půdního pokryvu pro osm pramenných povodí ve střední Evropě. Vícenásobné metody jako lineární regrese, Spearmanova pořadová korelace, analýza hlavních komponent a hysterezní smyčky C/Q odhalily hlavní vztahy. Přítomnost rašelinišť a podmáčených smrčin měla rozhodující vliv na biogeochemii (především pro $CHSK_{Mn}$, huminy, Fe, $P\text{-}PO_4^{3-}$ TP a $N\text{-}NO_3^-$). Nejsilnější pozitivní korelace organických látek ($CHSK_{Mn}$) a Fe byla zastoupena v povodí s největší plochou poškozeného lesa (70 %), ale s menším podílem mokřadů (8 %). Vysoké průtoky ovlivňují uvolňování většího množství organických látek a $N\text{-}NO_3^-$.

Klíčová slova: pramenné oblasti – organické látky – podmáčené oblasti – rašeliniště – srážko-odtokové události – kvalita vody – měrná elektrická vodivost

Abstract: River headwaters have a high environmental value. Unfortunately, the biogeochemical processes in headwaters in context of different rainfall-runoff conditions and specific land cover have not been fully examined. This study focuses on changes in correlations of 16 biogeochemical parameters related to different types of rainfall-runoff events and land cover condition for eight headwater catchments in Central Europe. Multiple methods as linear regression, Spearman rank correlation, Principal Components Analysis and C/Q hysteresis loops revealed main relationships. Presence of peatlands and waterlogged spruce forests had decisive influence on the biogeochemistry (mainly for COD_{Mn}, humins, Fe, $P\text{-}PO_4^{3-}$ TP, and $N\text{-}NO_3^-$). The strongest positive correlation of organic matter (CODMn) and Fe is represented in a catchment with the largest area of damaged forest (70%), but with a smaller proportion of wetlands (8%). High flow rates influence the release of greater amounts of organic matter and $N\text{-}NO_3^-$.

Keywords: headwater areas – organic matter – waterlogged areas – peatbogs – rainfall-runoff events – water quality – electric conductivity

1. Introduction

Headwater streams are important both for the local aquatic ecosystem and for ecosystem goods and services. They are also very sensitive to any pollutant inputs or climate change and can therefore be assumed to be an early indicator of such changes. Currently, increasing temperatures and increased risk of extreme rainfall-runoff events are leading to changes in surface water biogeochemistry. In particular, the increased risk of elevated concentrations of organic matter, which could have negative effects on human health due to the possible formation of disinfection by-products after water treatment. The study of changes in water quality in relation to different conditions in the catchment is necessary to develop appropriate strategies for maintaining water quality.

2. Study areas and data sources

The study was carried out in two headwater localities of the Elbe River basin in south and west part of Czechia – Šumava Mts.(Fig. 1) and Krušné hory Mts. (Fig. 2). The area of study catchments ranged from 0.14 km^2 (ROK2) to 22.4 km^2 (SLA). Long-term specific discharges (2008–2013) ranges from 29.3 l·s^{-1}.km^{-2} (BRE) to 41.2 l·s^{-1}.km^{-2} (ROK2) in Šumava Mts. (Vlček et al. 2016) and about 14–15 l·s^{-1}.km^{-2} (ROL, SLA) in Krušné hory Mts. Large parts of catchments occupy wetland areas with ratio from 83% (ROK2) to 3% (SLA) of catchment area according to Base map of the Czech Republic 1:10 000, Czech Office for Surveying and Cadastre. Five land cover categories (as possible drivers of water quality changes) were derived for the study catchments – healthy spruce forest (HSF), damaged forest (DF), decayed forest with partly regeneration (DFR), meadow (M) and peatbog (PB), Fig.3.

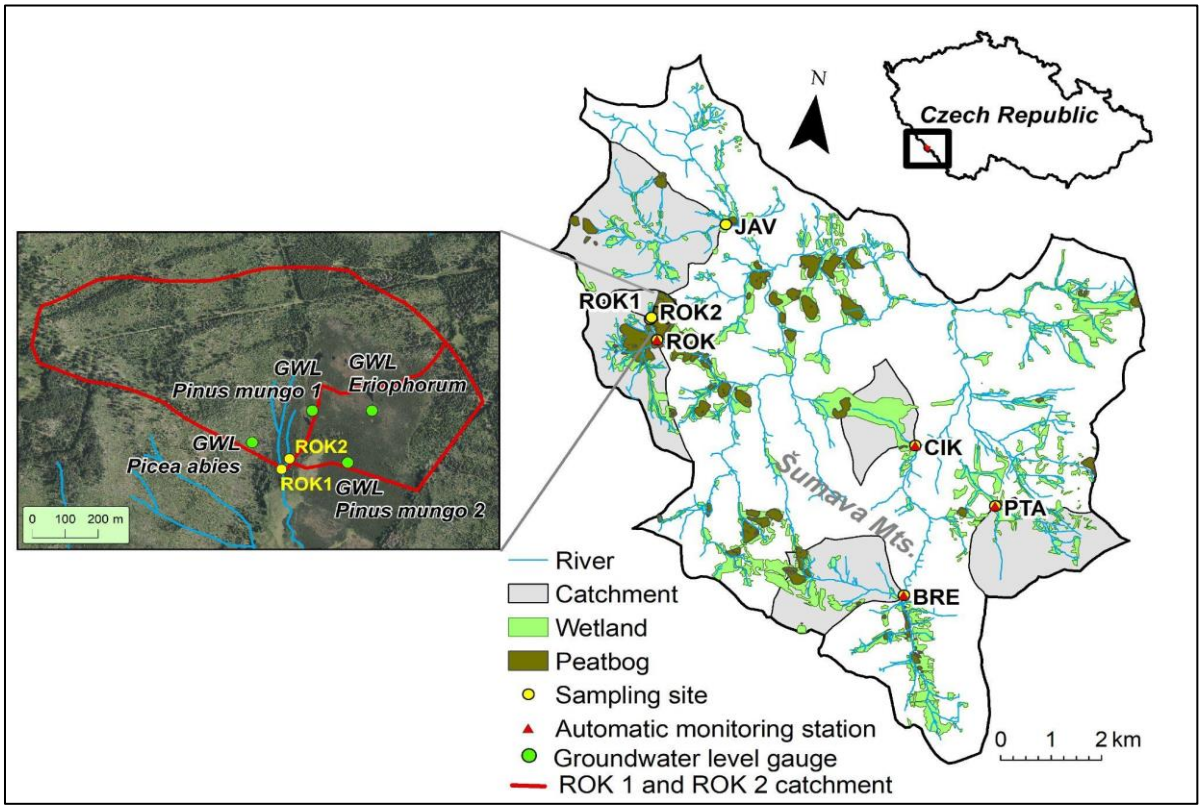


Fig. 1 Locations of the studied catchments in the Šumava Mts. Ptačí Brook (PTA), Javoří Brook (JAV), Cikánský Brook (CIK), Březnický Brook (BRE), Rokytka Brook (ROK), ROK1, Rokytka Brook left tributary (ROK2). Source: ARCČR 500, DIBAVOD, KVES, © AOPK ČR, WMS – Orthophoto.

Two main data sources were used to analyse changes in surface water quality in headwater areas. The first data source included seasonal field measurements and water samples for laboratory analyses at selected sites in headwater areas collected between October 2013 and November 2019. The second data source was collected between 2013 and 2022 using a network of automatic water quality and gauging monitoring stations of the Department of Physical Geography and Geoecology, Charles University.

3. Methodology

The dependency of 15 physico-chemical parameters and specific discharge in 6 catchments in the headwater area of the Šumava and in 2 catchments in the headwater area of the Krušné hory Mts. was analysed by correlation analysis using Spearman's r coefficients (Spearman 1904). Missing data were deleted pairwise. Principal component analysis (PCA) was performed in Excel using XLSTAT software (Addinsoft 2018) for 16 physicochemical parameters, 8 catchment characteristics and discharge. Simple C/Q hysteresis loops for electric conductivity (*EC*) and *pH* were examined to assess changes in water chemistry during different rainfall-runoff events.

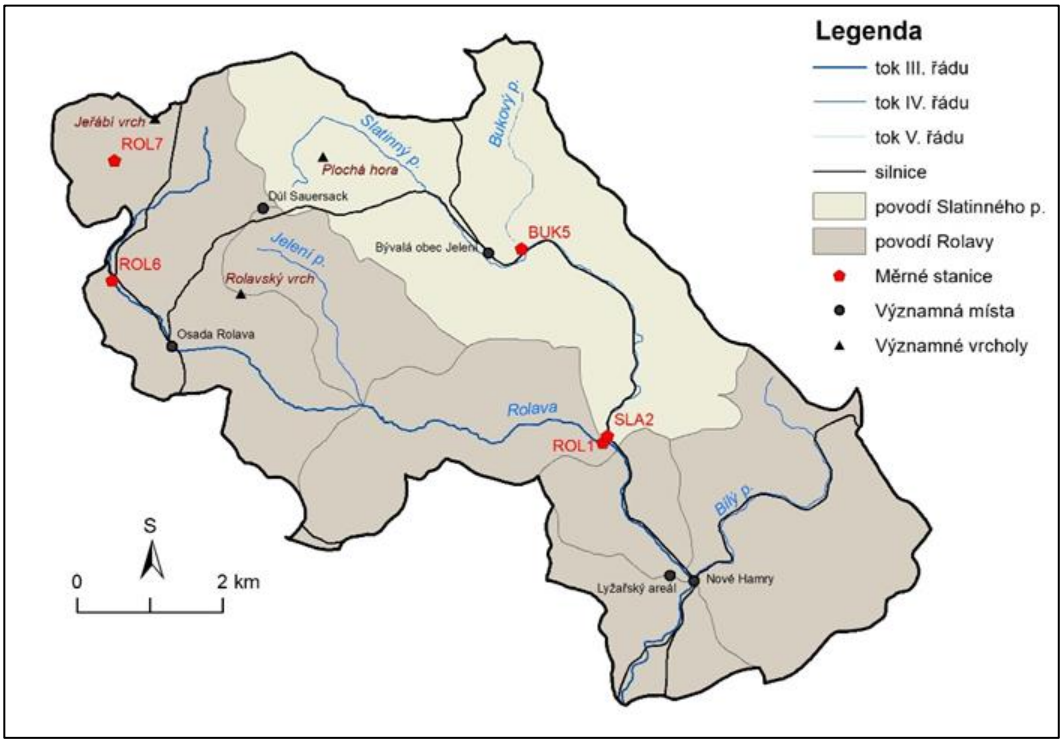


Fig. 2 Locations of the studied catchments in the Ore Mts. – Rolava River (ROL1), upper Rolava R. (ROL6, ROL7), Slatinný Brook (SLA2), Source: ARCČR 500, DIBAVOD, VÚV T.G.M., ČÚZAK.

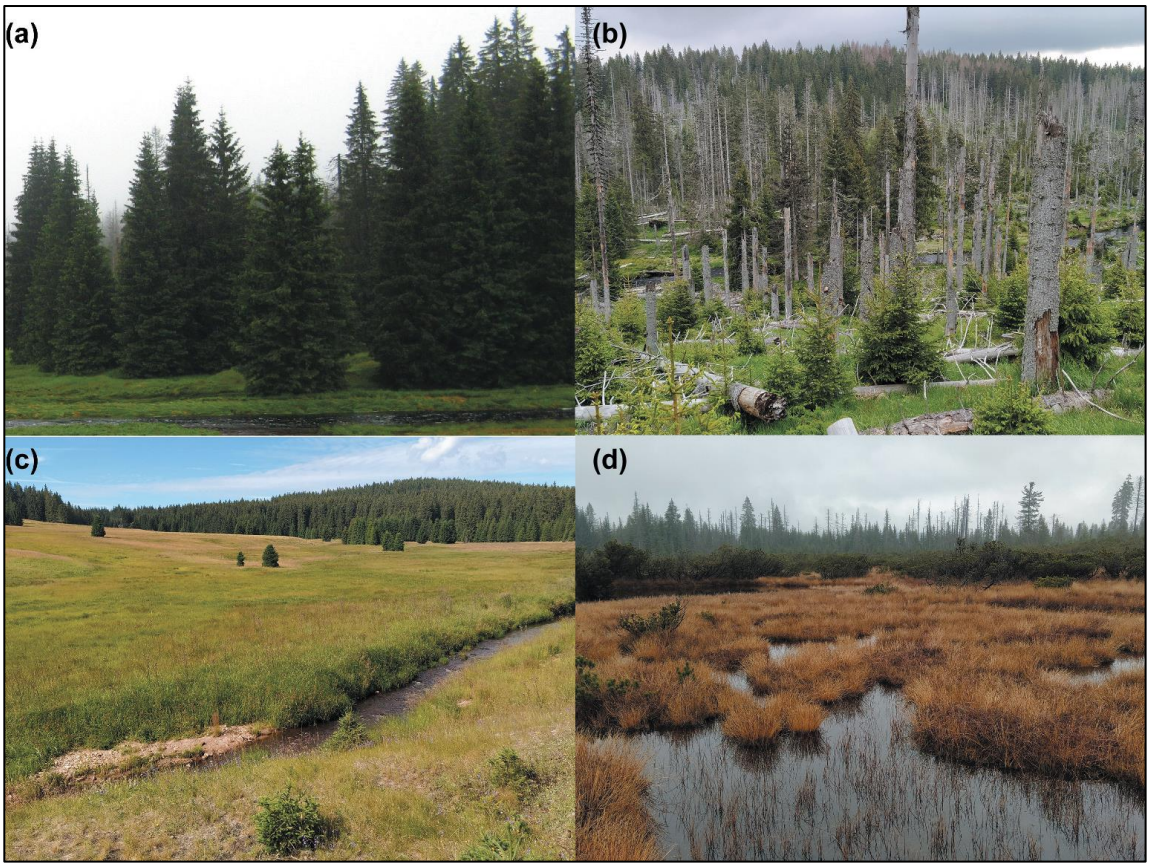


Fig. 3 Land-cover categories as possible drivers of water quality changes in the study catchments. (a) Healthy spruce forest (HSF). (b) Decayed forest with partial regeneration (DFR). (c) Meadow (M). (d) Peatbog (PB).

4. Results

Using PCA, it is possible to see the main relationships between each profile, individual parameters and catchment characteristics (Fig. 4). The first two factors explain together 66.02% of the variance among the 16 physicochemical parameters, 8 catchment characteristics and discharge. The 21 variables are well represented on the plane under consideration, either by the first component (EC, DO, Ca^{2+}, COD_{Mn}, $N\text{-}NO_2^-$, $N\text{-}NO_3^-$, $P\text{-}PO_4^{3-}$, Fe, TP, humins, TH, WL, M, Area, Slope, Discharge) or by the second (water temperature, *pH*, ANC4.5, BNC8.3, DF). The sampling sites can be roughly divided into two groups. Group A includes sampling sites with < 20% wetland cover and comprises two subgroups. The first subgroup - the upper Rolava catchment (ROL and SLA) is defined mainly by higher concentrations of DO and slightly higher values of EC, but lower values of other parameters, that corresponds with the box-plots and is related to lower mean temperatures and larger catchment area, steeper slopes and larger area of meadows and healthy spruce forest. The second subgroup comprises profiles in upper Vydra catchment (PTA, JAV, BRE), which exhibit higher pH possibly due to less wetland cover (< 15%) than other profiles in upper Vydra. Group B includes sampling sites with > 20% wetland cover and higher concentration of organic compounds. Profiles ROK2 and CIK are represented by the slightest catchment slope with lowest *pH*, higher CODMn, humins, Fe and $P\text{-}PO_4^{3-}$, which corresponds with the results that mean slope has been considered as the strongest (negative) determinant of organic matter (Parry et al. 2015).

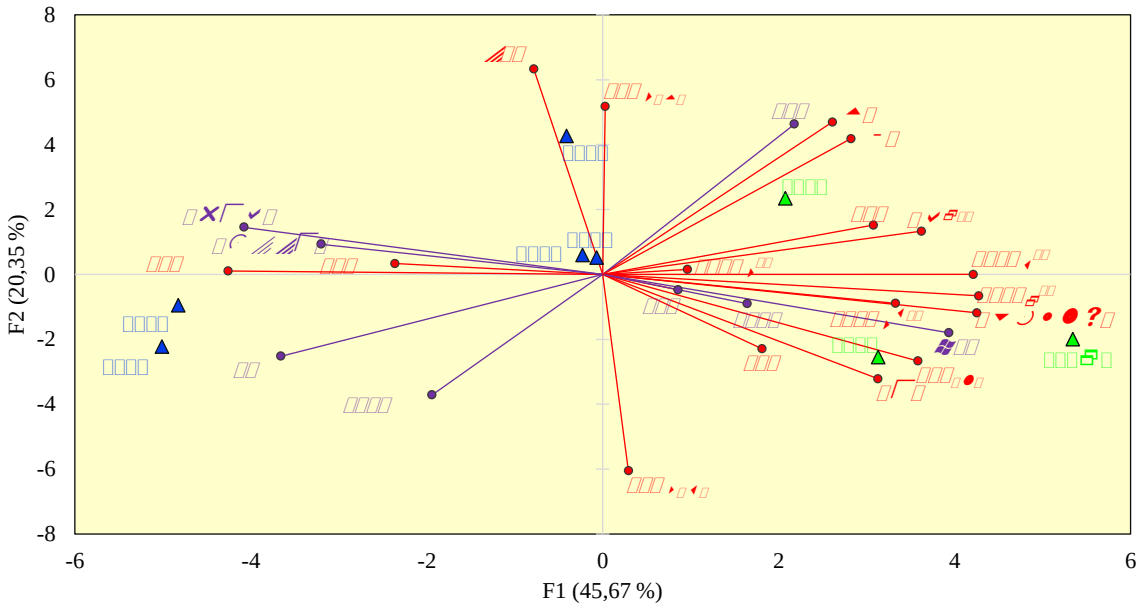


Fig. 4 Principal component analyses (PCA) of measured parameters, catchment characteristics and discharge in 8 catchments (2013–2019). Individual profiles: Filled blue triangles (< 20% wetlands), filled green triangles (>20% wetlands). EC = electric conductivity, t = water temperature, DO = dissolved O2, TH = total hardness, TP = total phosphorus, Fe, CODMn = chemical oxygen demand, ANC4.5 = acid neutralization capacity, BNC8.5 = base neutralization capacity, HSF = healthy spruce forest, DF = damaged forest, DFR = decayed forest with partly regeneration, M = meadow, WL = wetlands, PB = peatbog, q = discharge.

Discharge and catchment conditions before rainfall-runoff events have a fundamental impact on the behaviour of water quality parameters (Erlandsson et al. 2008; Köhler et al. 2008; Fučík et al. 2017). Even the rainwater is relatively low in dissolved minerals (Holko et al. 2006; Cano-Paoli et al.2019), decrease of *EC* with increasing discharge was registered only at SLA profile in upper Rolava (Fig. 5) and JAV in upper Vydra in our study. Both catchments have ≤ 10% wetland cover. Positive linear correlation was observed at other profiles (CIK, ROK2) or there was no relationship. Positive relationship of discharge and *EC* may be related to revitalization measures at the CIK monitoring site in the Šumava Mts. Increased *EC* values have been recorded in the outflow in revitalized water-logged forests in the Šumava Mts. which is consistent with the study Bufková et al. (2010). The most marked negative impact of discharge on *pH* can be observed in catchments with greatest wetland cover at CIK and ROK2 sites ($p < 0.05$; Figs. 6, 7), corresponding to Kocum et al. (2016).

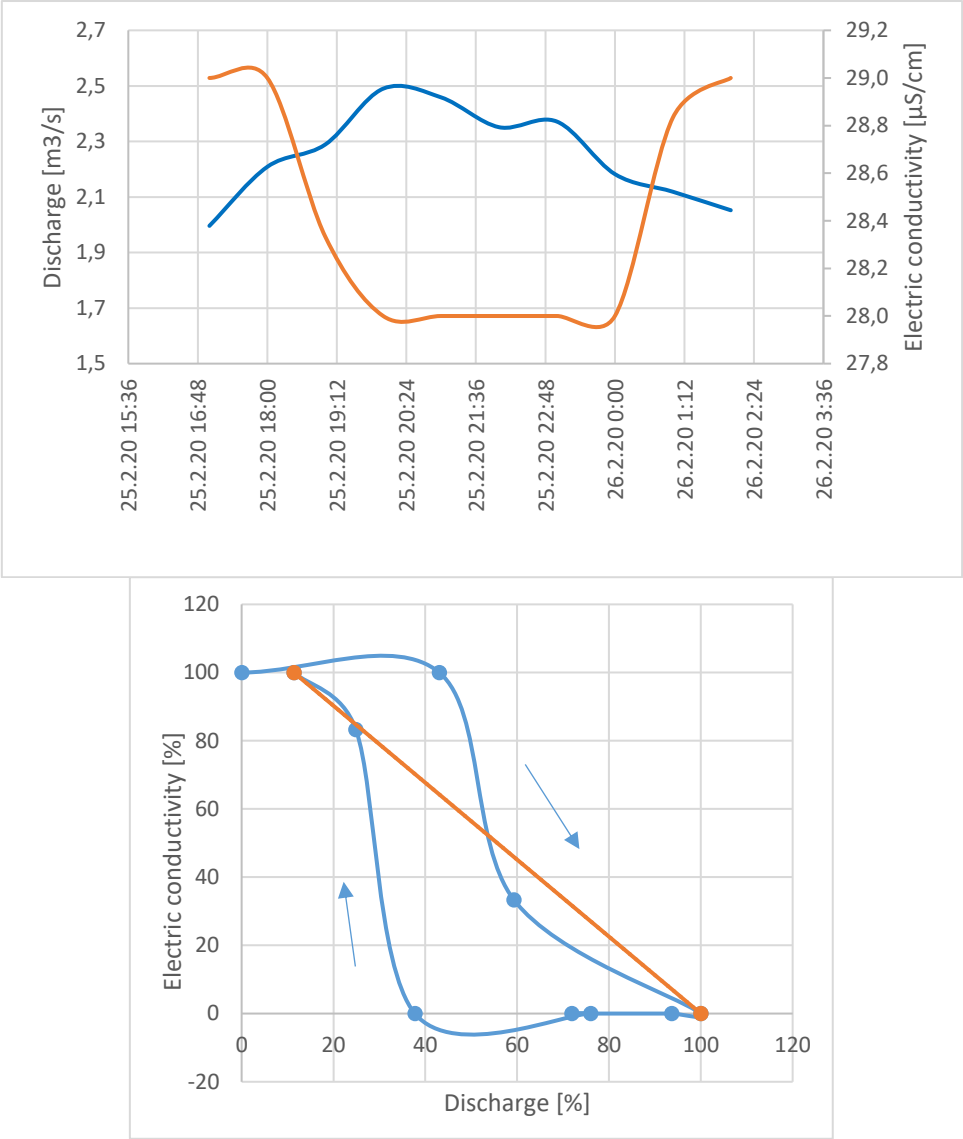


Fig. 5 Trend of electrical conductivity and discharge, event 25. 2. 2020 for SLA2 profile and hysteresis loop for electrical conductivity-discharge relationship.

Discharge is considered as one of the most important factors contributing to changes in organic matter concentrations. For example, Erlandsson et al. (2008) note a strong positive correlation between CODMn and changes in discharge. Our results show that CODMn increases with increasing discharge. The changes of humins concentration with increasing discharge are similarly to CODMn (Fig. 6). The greatest linear increase in humins was observed at the BRE and CIK sampling sites (*slope* > 0.9), the coefficient of determination indicates a medium relationship (*R2* > 0.5). Using Spearman's rank correlation coefficient, a significant relationship ($p < 0.05$) between humins and discharge was determined at JAV, CIK, BRE, ROK, ROK2 sites with the strongest relationship ($p < 0.01$) at CIK and ROK2 sites with the greatest wetland cover. The greatest release of organic matter is also related to iron reduction/oxidation cycles (Grybos et al. 2009; Knorr 2013). Coefficient of determination indicated positive correlation between CODMn and Fe in all catchments with the strongest correlation at JAV (*R2* > 0.7). This was also confirmed by Spearman's correlation coefficient ($p < 0.05$) at all sites with the exception of CIK and ROK2 (Fig. 6).

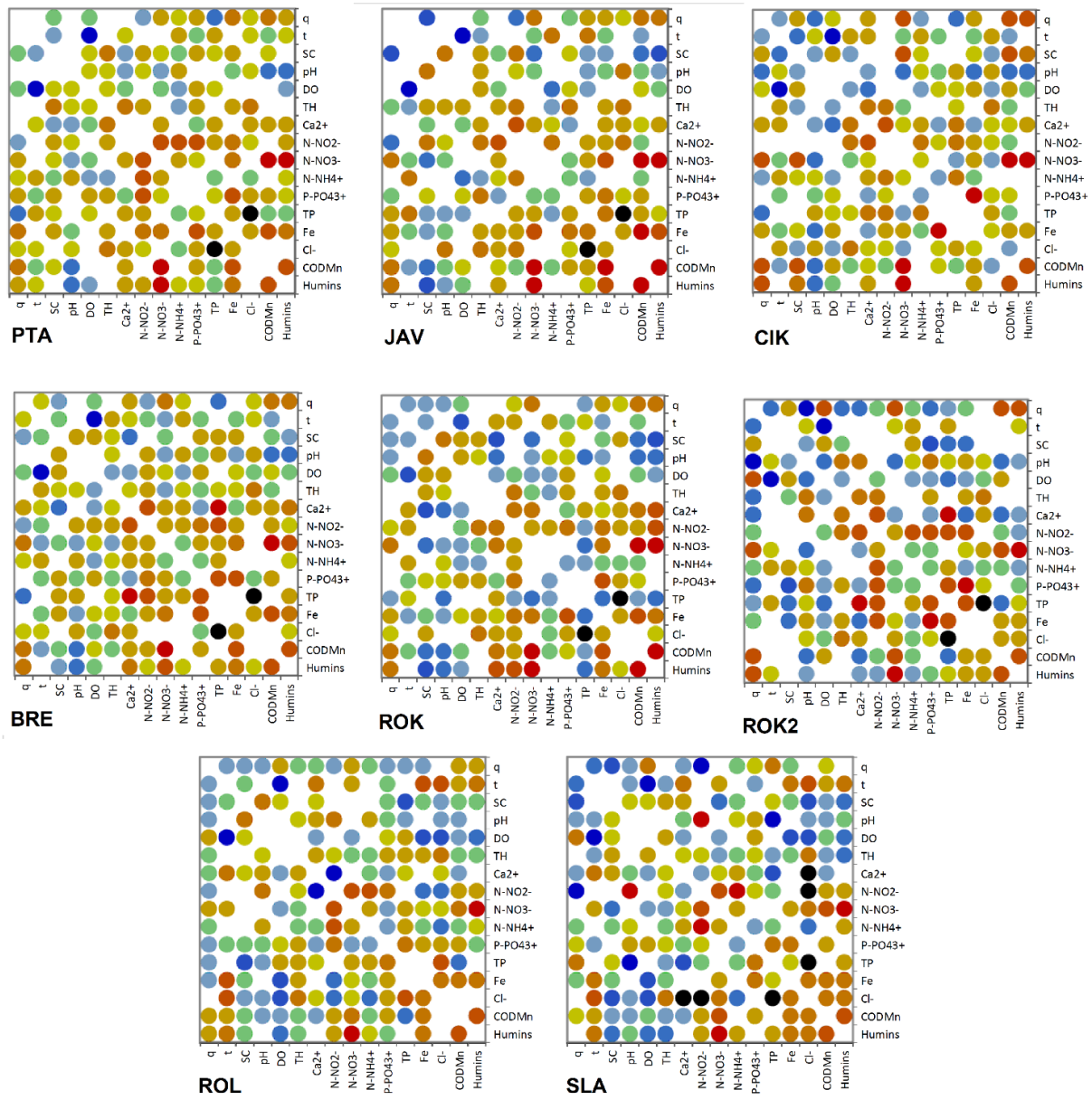


Fig. 6 Correlation maps of Spearman's rank correlation; The blue colour corresponds to a correlation close to −1 and the red colour corresponds to a correlation close to 1. Green corresponds to a correlation close to 0. Individual sites: Upper Vydra: Ptačí Brook (PTA), Javoří Brook (JAV), Cikánský Brook (CIK), Březnický Brook (BRE), Rokytka Brook (ROK), Rokytka Brook left tributary (ROK2); upper Rolava: Rolava (ROL), Slatinný Brook (SLA). q = specific discharge, t = water temperature, EC = electric conductivity, DO = dissolved O2, TH = total hardness, TP = total phosphorus, CODMn = chemical oxygen demand measured using the permanganate method.

At most of the monitoring sites, there was also an increase in $N\text{-}NO_3^-$ during higher rate of discharges. This relationship was observed at sites in the upper Vydra catchment (Fig. 6) with significant correlation ($p < 0.05$) at JAV, CIK, BRE, ROK, ROK2 sites. In the upper Rolava catchment and the JAV profile, the increase of $N\text{-}NO_3^-$ was not significant ($p > 0.05$). Increased concentrations of $N\text{-}NO_3^-$ in small montane streams after rainfall events may also be caused by increased organic matter in study areas or atmospheric deposition and soil microbial response to N deposition, resulting in greater export of humic material (Peterson et al. 2001; Findlay 2005). A strong positive correlation between the concentration of $N\text{-}NO_3^-$ and humins was found at all monitoring sites ($p < 0.01$).

Linear regression or Spearman's rank correlation coefficient did not confirm any relationship between $N\text{-}NH_4^+$ and discharge. In case of $N\text{-}NO_2^-$, the change is not clear as well, because it is a highly reactive compound; under aerobic conditions it oxidizes quite easily into nitrates (Pitter 2009).

Slight positive correlations ($p < 0.1$) of iron concentrations and discharge have been observed only at PTA and JAV sampling sites (Fig. 3). At SLA and ROL sites, higher concentrations of Fe were not positively correlated with higher discharge, but rather with higher temperatures, corresponding to Sarkkola et al. (2013).

Increased phosphorous concentrations have been associated with higher discharge, although in summer after long dry periods, significant increases in phosphorous concentrations in streams have also been observed as in studies of Jennings et al. (2009), Ockenden et al. (2016). At our study sites, the $P\text{-}PO_4^{3-}$ concentrations are generally very low, especially during spring and autumn. At the ROK2 site, the highest concentrations of this compound were found during the lowest discharge (0.06 $mg \cdot l^{-1}$). Values of *TP* are the highest mainly in winter and during low discharge (PTA, CIK, ROL).

Even though the release of iron from peat soils could be related to acidic conditions, only a slight negative correlation between pH values and iron concentrations ($R2 > 0.25$) were observed at PTA, CIK, BRE and JAV using linear regression. This correlation was confirmed by the Spearman's correlation coefficient only at CIK profile. Sarkkola et al. (2013) also found that water pH was not a significant factor explaining Fe concentrations, but rather the water temperature. A significant positive correlation of temperature and Fe was confirmed only at upper Rolava (Fig. 6).

EC behaviour and the shape of hysteresis loops during rainfall-runoff events often differ greatly (Evans and Davies 1998), while pH hysteresis loops are more often similar. However, many factors influence the final shape of hysteresis loops (Whitfield and Schreier 1981). Based on an analysis of events at each sampling site, six different C/Q hysteresis loop types were identified. These types can be classified as belonging to one of four basic loop shapes (clockwise, counter-clockwise, eight-shaped, and mixed).

The dominant type of hysteresis loop of *EC* in the upper Vydra catchment was type 2 (counterclockwise); in the upper Rolava catchment, the dominant type was type 1 (clockwise) which also corresponds with the results of linear regression. Similar types of hysteresis loop of *EC* were identified at sampling sites in the upper Vydra catchment especially during consecutive summer rainfall-runoff events (particularly type 2 counter-clockwise loops). These findings correspond with those of an earlier study (Su et al. 2017) investigating rainfall-runoff events at PTAms, BREms, and ROKms in 2011–2014. During individual events, dissolved ionic compounds were released from the soil into streams; once baseflow conditions returned, *EC* values decreased to their initial values. This behaviour was primarily caused by the effect of peatbogs. The situation was slightly different in BRE catchment, where 80% of forest cover has been decayed with only small part of regenerated area. During the onset of each rainfall-runoff event, an initial decrease in *EC* values occurred (resulting in an eight-shaped loop), but then *EC* values developed following the same pattern observed at other sampling sites. The same behaviour was also observed in study Su et al. (2017). The study site in the upper Rolava catchment (SLAms) behaved differently during consecutive summer rainfall-runoff events (resulting in type 1 clockwise loops for *EC*). During these events, stream water was diluted with water poor in dissolved ionic compounds. Catchment in the upper Rolava behaved similarly during snowmelt (resulting in type 1 clockwise loops), when water poor in dissolved

ionic compounds diluted stream water. In the upper Vydra catchment, *EC* also decreased at the onset of events; hysteresis loop shape was type 3 – counter-clockwise. The CIKms sampling site demonstrated completely different behaviour during a snowmelt event (type 2), during which ion-rich water was released from the soil. After long dry periods, the findings from the upper Vydra catchment were like those made during other rainfall-runoff events (ROKms and BREms, eight-shaped; CIKms and PTAms counter-clockwise), whereas findings from the upper Rolava catchment differed. The first rainfall event after a long dry period led to increased *EC* with increased discharge and decreased *EC* after the end of the event (type 2). During the subsequent rainfall event, *EC* figures remained constant at first, but as the event subsided and discharge decreased, *EC* values began to increase and remained higher (type 6 – mixed).

Very interesting are also events where it was possible to perform analyses simultaneously on multiple profiles and follow their different reaction to increased flow, which most likely came from the same sources. As example it is a short event in the Rolava catchment that started in the morning 8. 9. 2022 and stretched to 9. 9. 2022. The discharge and electrical conductivity during the event are shown in Fig. 7. On both profiles, there was an increase in discharges at the same time, around 7:00 a.m., followed by an increase in flow. The increase was lower on the ROL1 than on SLA2 profile. The peak of the flow occurred at a very similar time, namely around 1 p.m. on the same day. The drop-in flow rates to the original values were again faster for the SLA2 profile, while it was slower for the ROL1 profile. Electrical conductivity reacted similarly on both profiles, with a reduction that corresponded to the rate of increase in flow. For the ROL1 profile, the decrease in electrical conductivity was relatively steep, and the lowest conductivity occurred long before the peak flow rate. The SLA2 profile also had the lowest electrical conductivity values before the peak flow rate, but significantly later than the ROL1 profile.

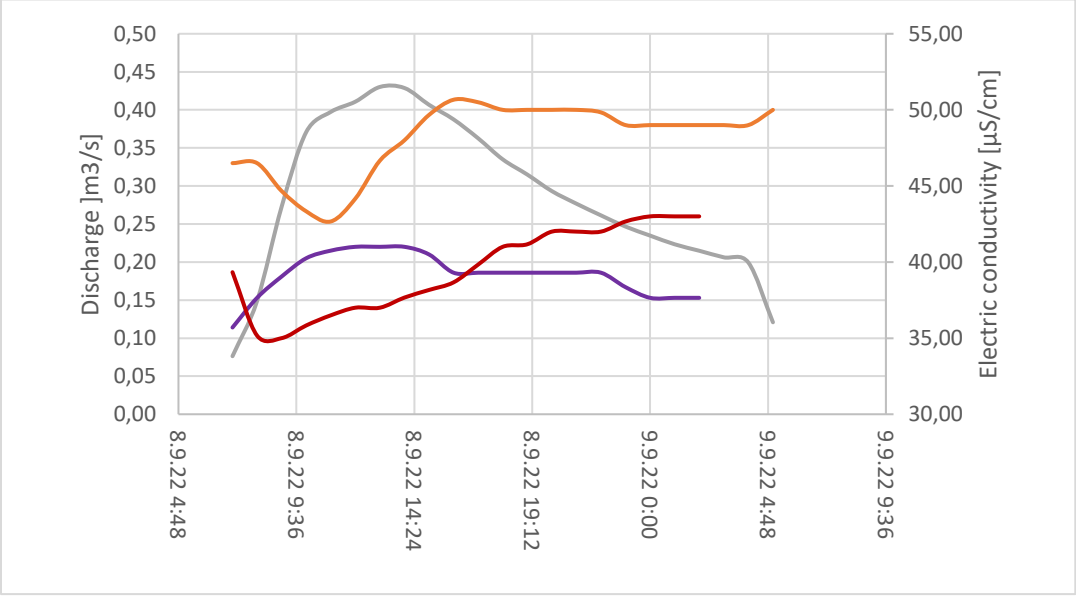


Fig. 7 Running Q and EC during the event in the Rolava catchment from 8th to 9th September 2022 for SLA2 and ROL1 profiles. EC – red colour, discharge SLA2 – green colour, discharge ROL1 – violet.

In contrast, *EC* mainly increased during rainfall events after long dry periods at most of the sampling sites, which is primarily related to greater mineralization when groundwater levels drop, as well as the subsequent washing out of these materials after rain. Considering the ongoing effects of climate change, increasing air and water temperatures, and increased occurrence of extreme meteorological events (longer dry periods, flash flooding), this

behaviour may have a fundamental impact on ecosystems (Worrall et al. 2004; Jennings et al. 2009; Broder et al. 2017).

The *pH* changes during rainfall-runoff events were represented mainly by type 1 (clockwise) C/Q hysteresis loop with its highest concentration on the rising limb. This was an expected outcome, because the *pH* of groundwater is more neutral than the event water components (Carrol et al. 2007), but the velocity of decreasing of *pH* were different. The decrease of *pH* was much more rapid during consecutive summer rainfall-runoff events than during a snowmelt event and after a long dry period.

5. Conclusions

This study shows results of an analysis of 16 physicochemical parameters in 8 headwater catchments with presence of wetlands and peatbogs. Increased concentrations of organic matter (represented mainly by CODMn and humins) and their higher release during greater discharges were observed in catchments with > 20% of wetlands dominated by peat. Catchments with higher wetland cover were represented by higher TP, $N\text{-}NO_3^-$ and a significant decrease in *pH* during high streamflow rates. Higher mean concentrations of Fe were also detected, but discharge was not the main driver of higher release of Fe in catchments with > 20% of wetlands.

Concentration of Fe was correlated with CODMn concentration more than with *pH* or discharge. Iron and organic matter (more CODMn, less humic substances) mobilization in catchments was influenced by wetland area, but the strongest correlation of Fe and CODMn was noticed in the catchment with a relatively small proportion of wetlands (8%) and peatbogs (2.3%), but with 70% of damaged forest cover in the catchment.

The analysis of *EC* and *pH* changes during rainfall-runoff events showed that the type of rainfall-runoff event affects the velocity of pH changes. The decrease of pH was much more rapid during consecutive summer rainfall-runoff events than during a snowmelt event and after a long dry period. The changes of EC were controlled not only by the type of rainfall-runoff event, but also by the hydrological preconditions of the catchment.

Overall, considered as a drinking water source, higher concentration of natural organic matter is the main issue in Šumava and Krušné hory headwaters, because of the possible formation of disinfection by-products after water treatment. Not only wetlands and peatbog areas affect the concentration of organic substances, but also the total area, mean slope, and hydrological precondition of the catchment. In contrast, values of *pH*, BNC8.3 or ANC4.5 did not have any connection to natural organic matter in our study. Restoration of drained peatland in one catchment appeared considerably problematic from the geochemical point of view, especially when associated with extreme rainfall-runoff events.

Acknowledgements

The research was funded by the GAČR Project No. 22-12837S “Hydrological and hydrochemical response of montane peat bogs to climate change”, by the TAČR project PERUN No. SS02030040 and by the Charles University Project GAUK 1168820 “Hydrological extremes and their influence on surface water quality in headwaters of Czechia”.

References

ADDINSOFT, 2018. XLStat reference manual. Paris, Addinsoft.

BRODER, T., KNORR, K., H. BIESTER, H., 2017. Changes in dissolved organic matter quality in a peatland and forest headwater stream as a function of seasonality and hydrologic

conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, **21** (4), 2035–2051. https://doi.org/10.5194/hess-21-2035-2017

BUFKOVÁ, I., STÍBAL, F. AND MIKULÁŠKOVÁ, E., 2010. Restoration of Drained Mires in the Šumava National Park, Czech Republic. In: M. Eiseltová, ed. Restoration of Lakes, Streams, Floodplains, and Bogs in Europe, Wetlands: Ecology, Conservation and Management, Dordrecht: Springer, 331–354.

CANO-PAOLI, K., CHIOGNA, G., BELLIN, A., 2019. Convenient use of electrical conductivity measurements to investigate hydrological processes in Alpine headwaters. *Science of the Total Environment*, **685**, 37–49. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.166

CARROLL, K. P., ROSE, S., PETERS, N. E. 2007. Concentration/discharge hysteresis analysis of storm events at the Panola mountain research watershed, Georgia, USA. Proceedings of the Georgia Water Resources Conference, March 27–29, 2007. University of Georgia, Athens, GA, USA.

ERLANDSSON, M., et al., 2008. Thirty-five years of synchrony in the organic matter concentrations of Swedish rivers explained by variation in flow and sulphate. *Global Change Biology*, **14** (5), 1191–1198. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01551.x

EVANS, C., DAVIES, T. D., 1998. Causes of concentration/discharge hysteresis and its potential as a tool for analysis of episode hydrochemistry. *Water Resources Research*, **34,** 1, 129–137. https://doi.org/10.1029/97WR01881

FINDLAY, S. E. 2005. Increased Carbon Transport in the Hudson River: Unexpected Consequence of Nitrogen Deposition? *Frontiers in Ecology and the Environment*, **3**(3), 133–137. https://doi.org/10.2307/3868540

FUČÍK, P., et al., 2017. Incorporating rainfall-runoff events into nitrate-nitrogen and phosphorus load assessments for small tile-drained catchments. *Water*, **9** (9), 712. https://doi.org/10.3390/w9090712

GRYBOS, M., et al., 2007. Is trace metal release in wetland soils controlled by organic matter mobility mobility or Fe-oxyhydroxides reduction? *Journal of Colloid and Interface Science*, **314**, 490–501. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.04.062

HOLKO, L., et al., 2006. Variation of nitrates in runoff from mountain and rural areas. *Biologia*, **61** (19), S270–S274.

JENNINGS, E., et al., 2009. Impacts of climate change on phosphorus loading from a grassland catchment: Implications for future management. *Water Research*, **43** (17), 4316–4326. https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.06.032

KNORR, K. H., 2013. DOC-dynamics in a small headwater catchment as driven by redox fluctuations and hydrological flow paths – are DOC exports mediated by iron reduction/oxidation cycles? *Biogeosciences*, **10** (2), 891–904. https://doi.org/10.5194/bg-10-891-2013

KOCUM, J., et al., 2016. Geochemical evidence for peat bog contribution to the streamflow generation process: case study of the Vltava River headwaters. Czech Republic. *Hydrological Sciences Journal*, **61** (14), 2579–2589. https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1140173

KÖHLER, S. J., et al., 2008. Climate's control of intra-annual and interannual variability of total organic carbon concentration and flux in two contrasting boreal landscape elements. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **113** (3), G03012. https://doi.org/10.1029/2007JG000629

OCKENDEN, M. C., et al., 2016. Changing climate and nutrient transfers: Evidence from high temporal resolution concentration-flow dynamics in headwater catchments. *Science of the Total Environment*, **548–549**, 325–339. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.086

PARRY, L. E., et al., 2015. The influence of slope and peatland vegetation type on riverine dissolved organic carbon and water colour at different scales. *Science of the Total Environment*, **527–528**, 530–539. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.036

PETERSON, B. J., et al., 2001. Control of nitrogen export from watersheds by headwater streams. *Science*, **292** (5514), 86–90.

PITTER, P., 2009. Hydrochemie, Prague: Publishing VŠCHT.

SARKKOLA, S., et al., 2013. Iron concentrations are increasing in surface waters from forested headwater catchments in eastern Finland. *Science of the Total Environment*, **463–464**, 683–689. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.072

SPEARMAN, C., 1904. The proof and measurement of association between two things. *American journal of psychology*, **15**(1), 72–101.

SU, Y., LANGHAMMER, J., JARSJÖ, J., 2017. Geochemical responses of forested catchments to bark beetle infestation: Evidence from high frequency in-stream electrical conductivity monitoring. *Journal of Hydrology*, **550**, 635–649. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.035

VLČEK, L., et al., 2016. Influence of peat soils on runoff process: case study of Vydra River headwaters, Czechia. *Geografie*, **121**(2), 235–253. https://doi.org/10.37040/geografie2016121020235

WHITFIELD, P., H., SCHREIER, H., 1981. Hysteresis in relationships between discharge and water chemistry in the Fraser River basin, British Columbia. *Limnology and Oceanography*, **26**(6), 1179–1182. https://doi.org/10.4319/lo.1981.26.6.1179

WORRALL, F., BURT, T., ADAMSON, J., 2004. Can climate change explain increases in DOC flux from upland peat catchments? *Science of the Total Environment*, **326**(1–3), 95–112. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.11.022

Dynamics of dissolved organic carbon in surface water during extreme rainfall-runoff events

(Dynamika rozpuštěného organického uhlíku v povrchových vodách během extrémních srážko-odtokových událostí)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.34

Milada Matoušková, Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University, milada.matouskova@natur.cuni.cz
Kateřina Fraindová, Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University
Marie Bejčková, Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University
Zdeněk Kliment, Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University
Vojtěch Vlach, Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University
Lukáš Vlček, Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University, Czech Academy of Science, Institute of Hydrodynamics

Abstrakt: Uvolňování většího množství přírodní organické hmoty (NOM) v rámci klimatických změn je registrováno v mnoha povodích s rašeliništi. Cílem našeho výzkumu je studium dynamiky uvolňování rozpuštěného organického uhlíku (*DOC*) do povrchových vod v pramenných oblastech s rašeliništi. Koncentrace *DOC* jsou analyzovány ve vztahu k extrémním srážko-odtokovým událostem (R-R) a podle hydrologických předpokladů povodí. Tyto předpoklady jsou popsány pomocí vybraných hydroklimatických proměnných (14 dní před událostí R-R). Zdrojová data pocházejí ze stanic Přírodovědecké fakulty UK a Českého hydrometeorologického ústavu. Pro vyhodnocení vztahů a procesů byla použita analýza hlavních komponent (PCA), hysterezní smyčky nebo Pearsonův korelační koeficient. Byla studována doba zpoždění DOC_{max} za Q_{max}, závislost DOC_{max} a hladiny podzemní vody. Byl analyzován vliv rychlosti proudění na fáze poklesu a vzestupu koncentrací *DOC* pomocí hysterezních smyček a vliv počtu dílčích maxim průtoku na množství transportovaného *DOC* během události R-R. Vliv rychlosti proudění na fázi poklesu a vzestupu koncentrací *DOC* byl analyzován pomocí hysterezních smyček. Naše první výsledky ukazují, že velký vliv na dynamiku koncentrace *DOC* v povrchové vodě má změna hladiny podzemní vody v rašeliništi a množství odtoku během události R-R. Vliv na dynamiku koncentrace *DOC* v povrchové vodě má také změna hladiny podzemní vody v rašeliništi a množství odtoku. Významný vliv na uvolňování *DOC* mají také hydroklimatické předpoklady povodí. Ke změnám koncentrací během událostí R-R docházelo také u dalších sloučenin, které byly studovány dodatečně. Zvláště významný byl nárůst kovů (především Fe, Al, Mn) a bazických kationtů (K) a pokles dusičnanového dusíku.

Klíčová slova: organická hmota – organický uhlík

Abstract: The release of a greater amount of natural organic matter (NOM) within climate change is registered in many catchments with peatbog areas. The aim of our research is to study the dynamics of releasing dissolved organic carbon (*DOC*) into surface water in headwater areas with peatbogs. *DOC* concentrations are analysed in relation to extreme rainfall-runoff (R-R) events and according to the hydrological preconditions of the basin. These preconditions are described using selected hydroclimatic variables (14 days before the R-R event). The source data comes from stations of the Faculty of Science, Charles University, and the Czech Hydrometeorological Institute. For the evaluation of relations and processes, the

Principal component analysis (PCA), hysteresis loops or Pearson correlation coefficient was used. The lag time of DOC_{max} for Q_{max}, the dependence of DOC_{max} and groundwater levels were studied. The influence of flow rate on the decline and ascent phases of *DOC* concentrations by hysteresis loops and the influence of the number of partial flow maximums on the amount of transported *DOC* during the R-R event was analysed. Our first results show that great influence on the dynamic of *DOC* concentration in surface water has the change in groundwater-levels in the peatbog and the outflow amount during the R-R event. The hydroclimatic preconditions of the basin have also a significant influence on the *DOC* release. Changes in concentrations during R-R events also occurred for other compounds that were studied additionally. Particularly significant was the increase in metals (mainly Fe, Al, Mn) and base cation (K) and decrease in nitrate nitrogen.

Keywords: organic matter - organic carbon

1. Introduction

The release of a greater amount of natural organic matter (NOM) within climate change is registered in many catchments with peatbog areas. Increases in organic matter concentrations have been recorded in recent years in places such as Europe and North America (Lepistö et al. 2014; Ritson et al. 2014). Main reasons of increased levels of Dissolved organic carbon (*DOC*) in inland waters are connected to rising temperatures, changes of atmospheric depositions and the increased *pH* of surface water. Storms and snowmelt have great effect on releasing *DOC* into surface waters while more than 80% of the annual *DOC* flux could be exported during these events (Raymond and Saiers 2010). Nevertheless, there is still a lack of understanding of the process of releasing *DOC* into the surface water during rainfall-runoff events. The aim of our research is to study the dynamics of releasing dissolved organic carbon (*DOC*) into surface water in headwater areas with peatbogs. *DOC* concentrations are analysed in relation to extreme rainfall-runoff (R-R) events, with emphasis on the relationship between *DOC* concentration, discharge, ground water level and hydroclimate preconditions of the catchment. These preconditions are described using selected hydroclimatic variables within 14/5 days period before the R-R event.

2. Study area

This study was carried out in 7 small headwater catchments located in the upper Vydra Basin, the central Šumava Mts. (Bohemian Forest), the southwest part of the Czech Republic. All catchments – Ptačí brook (PTA), Javoří brook (JAV), Cikánský brook (CIK), Březnický brook (BRE), Rokytka Brook (ROK), Rokytka brook subcatchment ROK1 and its left tributary (ROK2) are in Šumava National Park with limited or completely negligible human activity. Our experimental catchment is the Rokytka Brook, the ROK1 site was selected for detailed analyses of *DOC* dynamics during different types of R-R events according to highest representation of peat bogs and wetlands. The altitude ranges between 1100 and 1260 m a.s.l. The soil cover consists mainly of podzols and organic soils, while more than 60% is covered by peat (Vlček et al. 2021).

3. Data sources and applied methods and data sources

Besides the field measurements, the study sites were equipped with automatic monitoring devices providing data in 10-minute steps. Tipping bucket gauges for precipitation, and air temperature probes (all Fiedler AMS comp.) were placed at the Rokytka catchment (ROK) and in the Modrava village. Groundwater levels at four peat bog sites (water-logged spruce stand - *Picea abies*; 2 pine stands - *Pinus mugo*; and open bog area with cotton grass - *Eriophorum*)

at the Rokytka catchment and stream water levels monitoring (converted by rating curves to discharges) at all experimental catchments were measured by water level probes (also Fiedler AMS comp.). The ROK 1 site (Rokytka catchment - ROK) is also equipped with the automatic water sampler ISCO 6700 (TELEDYNE, Fig. 1). Further data source are data from meteorological stations of the CHMI Prague.

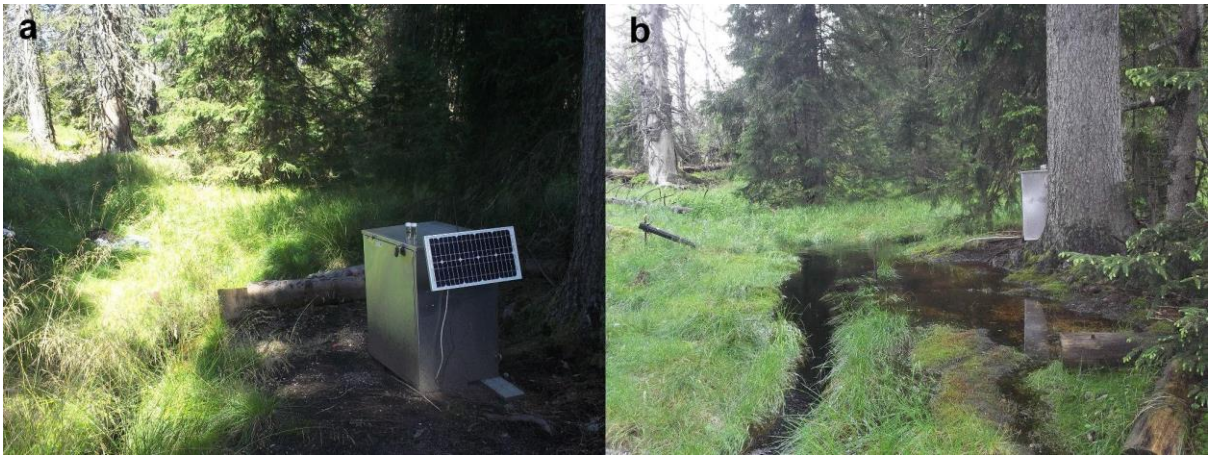


Fig. 1 Automatic water sampler ISCO 6700 Rokytka brook (R1 site). a) baseflow, b) R-R event.

Water samples were collected from 7 sites of selected catchments (PTA, JAV, CIK, BRE, ROK, ROK1, ROK2) seasonally from May 2018 to August 2021 (101 samples). Samples from R-R events were collected using an automatic sampler ISCO. This device sampled stream water during R-R after every 1500 m^3 of water left the outlet – that means a sample of water between 1.5 and 6 hours. Water sampling took place between August 2019 and October 2021, when 231 samples were taken from 18 events. These events were divided into two main groups according to previous conditions: 1 – events with no increase of rainfall and runoff 5 days before these events, so called unaffected events, 2 – events, which were influenced by rainfall and increase of runoff 5 days before these events, labelled affected events.

The basic evaluated variables are discharge (*Q*), maximum discharge during event (Q_{max}), maximum concentration of dissolved organic carbon during event (DOC_{max}), mean concentration of dissolved organic carbon during event (DOC_{mean}), water temperature (*Tw*), air temperature (*Ta*), groundwater level Picea abies (*GWLpa*).

The *DOC* water samples were analysed using the differential method on the Shimadzu TOC analyser (TOC-L CSH) at the Institute of Hydrodynamics of the CAS. Other chemical parameters were analysed in the Geochemical laboratory, Geological Institute, Faculty of Science, Charles University.

For the evaluation of relations and processes, the Principal Component Analysis (PCA), hysteresis loops, Pearson and Spearman correlation coefficients were used. The lag time of DOC_{max} for Q_{max}, the dependence of DOC_{max} and groundwater levels were studied. The influence of flow rate on the decline and ascent phases of *DOC* concentrations by hysteresis loops and the influence of the number of partial flow maximums on the amount of transported *DOC* during the R-R event was analysed.

4. Results

From a total of 18 events evaluated, 11 of them were unaffected and 7 were affected by a previous event 5 days before (examples are given in Fig. 2). If the focus is on the relationship between *DOC*, *Q* and *GWL Picea abies* during these events, it is possible to observe positive

correlation between these variables. Higher positive correlation is present between *DOC* and *GWL Picea abies* (both event types *p-value* < 0.0001) than between *DOC* and *Q*, where there is a different lag time of the *DOC* maxima after the peak flow and therefore direct correlation is not so obvious. The difference between affected events is evident, because the groundwater levels are not as low as in unaffected events (mean value of *GWL* in unaffected *events* = −0.087 m and in affected *events* = −0.018 m). Although the affected events had higher discharges (Q_{mean} in unaffected *events* = 92 l·s^{-1}and in affected *events* = 193 l·s^{-1}) in some cases than the unaffected ones, *DOC* concentrations were still higher in the unaffected events (DOC_{mean} = 38 mg·l^{-1}; DOC_{max} = 55 mg·l^{-1}; vs affected events DOC_{mean} = 36 mg·l^{-1} DOC_{max} = 50 mg·l^{-1}), representation was especially for values higher than 40 mg·l^{-1}, while in the affected events lower than 40 mg·l^{-1} (Fig. 2).

Focusing on the *DOC* seasonality across all sites (Fig. 3), some changes can be observed. However, these changes are significantly influenced by the different discharges at the time of sampling. It is obvious that discharges were lowest in the July–September period, which affected *DOC* concentrations, which are also the lowest *(*< 10 mg·l^{-1}, except for CIK and ROK2 sites). However, during the months of October-December it is possible to observe the influence of catchment preconditions. As this is a period of relatively lower discharges, the *DOC* concentrations are significantly higher at most sites *(*> 20 mg·l^{-1}, except for BRE site). This *DOC* concentration behaviour is likely due to the *DOC* accumulation in the summer and subsequent flushing into the water. Especially in 2018 and 2019 the summer months were very dry; groundwater level was low and significant decomposition and accumulation of organic matter occurred. Subsequently even a lower increase in discharge causes a large increase in *DOC* concentration in the stream. Even during different parts of the year, it is possible to observe increased *DOC* values for the CIK and ROK2 sites compared to the other sites.

5. Discussion

The results showed that the presence and area of wetlands and peatbogs significantly influences DOC concentrations. Catchments with > 20% wetlands have higher mean *DOC* concentrations (> 20 mg·l^{-1}) corresponding to e.g. Ducharme et al. (2021) or Fraindová et al. (2022). Higher *DOC* concentrations were observed in these catchments even during periods of low flows compared to other catchments. However, comparison of *DOC* variability between sites during the whole year showed the highest variability in catchments with the lowest cover of wetlands and peatbogs.

Changes of *DOC* concentrations were mainly influenced by hydroclimatic preconditions of the catchment, with groundwater level and discharge being the main drivers. The significant effect of discharge and groundwater level on the amount of *DOC* concentrations is also confirmed by e.g. Rosset et al. (2020).

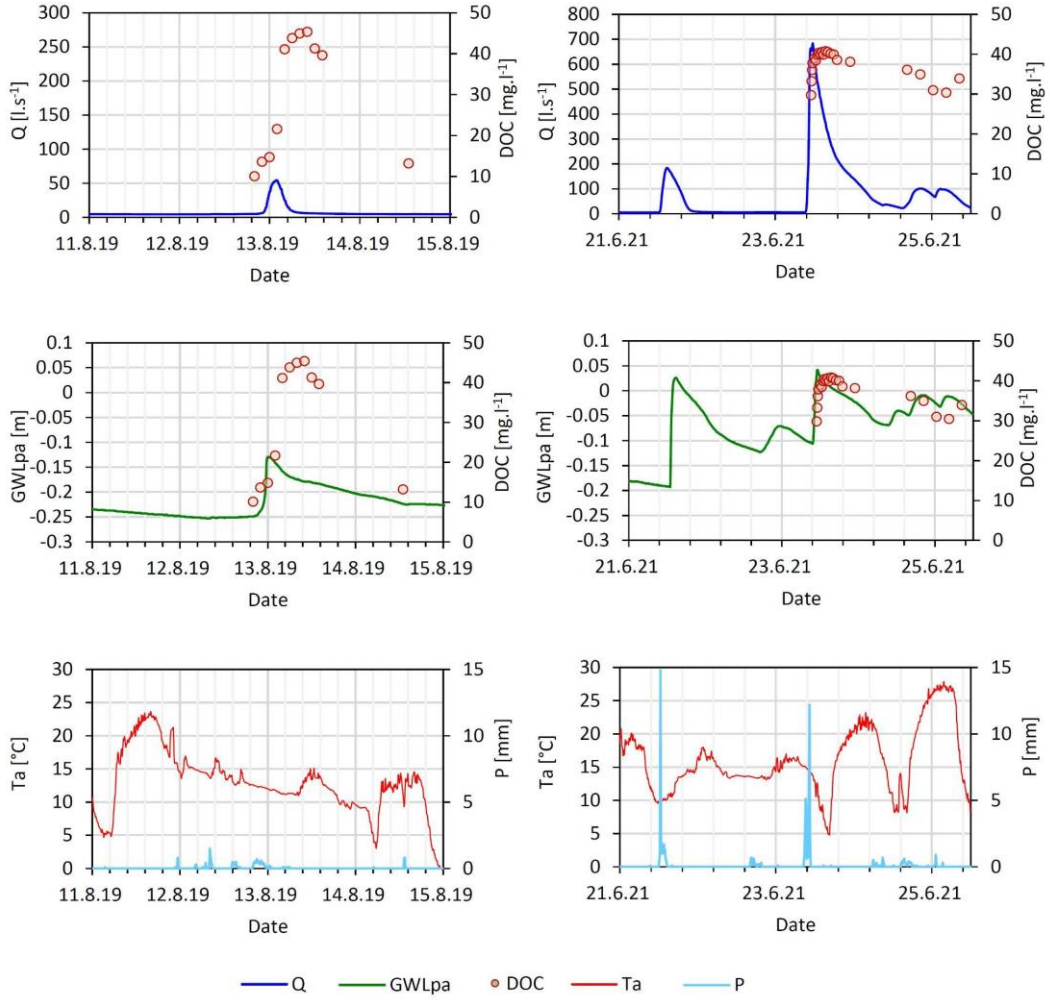


Fig. 2 Example of rainfall-runoff events. Left – unaffected event, Right – affected event. Q = discharge [$l \cdot s^{-1}$], GWLpa = groundwater level Picea abies [m], DOC = dissolved organic carbon [$mg \cdot l^{-1}$], Ta = mean air temperature [°C], P = precipitation amount [mm]; all variables are in 10-minute step.

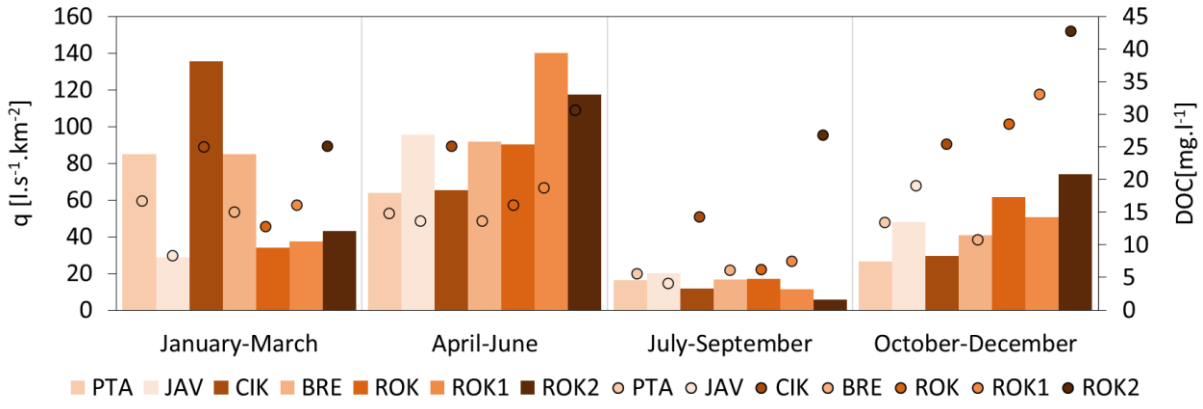


Fig. 3 Mean DOC changes over the year (dots), with mean actual specific discharges shown (columns). Ptačí Brook (PTA), Javoří Brook (JAV), Cikánský Brook (CIK), Březnický Brook (BRE), Rokytka Brook (ROK), ROK1 and Rokytka Brook left tributary (ROK2). 2018–2021. A darker brown colour indicates a higher proportion of wetlands (according to © AOPK ČR).

6. Conclusions

It is clear from several studies dealing with the issue of changes in *DOC* concentrations that in recent decades there have been increases in concentrations of these substances in some natural/near natural river basins. It is therefore important to look at the dynamics of *DOC* changes in relation to hydrological extremes. Increased concentrations of organic substances in watercourses then negatively affect the environment and subsequently water treatment processes when being treated for drinking water.

This study investigates the dissolved organic carbon (*DOC*) changes in variability and concentration amount with respect to hydro-climatic variables. The variables were examined in terms of antecedent conditions and preconditions before the individual event. Air temperature, precipitation, discharge, and groundwater level were considered as hydro-climatic variables. Changes in groundwater level and discharge had the greatest influence on the change and variability of *DOC* concentrations in streams, whereby the response of *DOC* concentration was related to the nature and magnitude of hydrological changes. Greater lag times of DOC_{max} behind Q_{max} and higher mean *DOC* concentrations were registered during the unaffected events. The *DOC* amount and lag time of maximum *DOC* concentrations are also significantly influenced by the dilution process (increased precipitation) and by the leaching of organic matter from individual peat layers by increased groundwater level.

DOC concentrations and *DOC* variability during rainfall-runoff events are influenced by the proportion of wetlands in the catchment. Relationship between *DOC* and discharge is less significant with higher proportion of wetlands. Longer periods of hydrological drought in headwater areas with peat bogs, followed by extreme R-R events, cause increased leaching of DOC concentrations.

Acknowledgements

The research was funded by the GAČR Project No. 22-12837S “Hydrological and hydrochemical response of montane peat bogs to climate change”, by the TAČR project PERUN No. SS02030040 and by the Charles University Project GAUK 1168820: “Hydrological extremes and their influence on surface water quality in headwaters of Czechia”.

References

FRAINDOVÁ, K., MATOUŠKOVÁ, M., KLIMENT, Z., VLČEK, L., VLACH, V., SPRINGEROVA, P., 2022. Headwaters biogeochemistry focused on different rainfall-runoff conditions, and the role of waterlogged areas: a comparative study of Czech mountains. *Hydrological Sciences Journal*, **67**:4, 588–612. https://doi.org/10.1080/02626667.2022.203879

DUCHARME, A. A., CASSON, N. J., HIGGINS, S. N., FRIESEN-HUGHES, K., 2021. Hydrological and catchment controls on event-scale dissolved organic carbon dynamics in boreal headwater streams. *Hydrological Processes*, **35**(7), e14279. https://doi.org/10.1002/hyp.14279

LEPISTÖ, A., FUTTER, M.N., AND KORTELAINEN, P., 2014. Almost 50 years of monitoring shows that climate, not forestry, controls long-term organic carbon fluxes in a large boreal watershed. *Global Change Biology*, **20** (4), 1225–1237. https://doi.org10.1111/gcb.12491

RAYMOND, P. A., SAIERS, J. E., 2010. Event controlled DOC export from forested watersheds. *Biogeochemistry*, **100**(1–3), 197–209.

ROSSET, T., BINET, S., ANTOINE, J. M., LERIGOLEUR, E., RIGAL, F., GANDOIS, L., 2020. Drivers of seasonal- and event-scale DOC dynamics at the outlet of mountainous peatlands revealed by high-frequency monitoring. *Biogeosciences*, **17**, 3705–3722. https://doi.org/10.5194/bg-17-3705-2020

RITSON, J. P., et al., 2014. The impact of climate change on the treatability of dissolved organic matter (DOM) in upland water supplies: a UK perspective. *Science of the Total Environment*, **473–474**, 714–730. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.095

VLČEK, L., ŠÍPEK, V., KOFROŇOVÁ, J., KOCUM, J., DOLEŽAL, T., JANSKÝ, B., 2021. Runoff formation in a catchment with Peat bog and Podzol hillslopes. *Journal of Hydrology*, **593**, 125633. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125633

Změny dílčích parametrů jakosti povrchových vod v kontextu změny klimatu

(Changes in partial parameters of surface water quality in the context of climate changes)

https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.35

Tomáš Mičaník, VÚV T.G.M., v. v. i., tomas.micanik@vuv.cz
Silvie Semerádová, VÚV T.G.M., v. v. i.,silvie.semeradova@vuv.cz
František Sýkora, VÚV T.G.M., v. v. i., frantisek.sykora@vuv.cz

Abstrakt: Změna klimatu je příčinou vyšší četnosti hydrologických extrémů, které ovlivňují jakost povrchových vod. V naší práci jsme se zaměřili na změny jakosti vody vlivem hydrologického sucha. Bylo zjištěno, že průtoky pod Q_{355}, které hydrologické sucho definují, jsou ve většině toků v posledních dvou dekádách četnější než v předchozích desetiletích. Ve vytipovaných profilech říční sítě, ve kterých je prováděno sledování jakosti povrchových vod, a které jsou zároveň situovány v blízkosti vodoměrných stanic, je prováděna statistická analýza změn jakosti vody. Z prvních předběžných výsledků vyplývá, že hydrologická situace má na výskyt řady polutantů v povrchových vodách významný vliv. Před formulováním konkrétních závěrů bude potřeba postupy dále rozpracovat a ověřit.

Souběžně s tím byly v roce 2023 vytipovány lokality, ve kterých probíhá terénní výzkum odbourávání nutrientů a organického znečištění v podélném profilu toku v rastru cca 1 až 2 km. Z prvních výsledků vyplývá, že pro tento výzkum jsou vhodné lokality Rakovnický potok pod Rakovníkem, Metuje pod Náchodem a Bílovka pod Bílovcem. Průběžné výsledky ze vzorkování v době hydrologického sucha v letním období potvrdily významný úbytek celkového dusíku, amoniakálního dusíku a organického znečištění. Naopak úbytek fosforu byl po prvním mísení povrchové a odpadní vody dále po proudu minimální.

Klíčová slova: hydrologické sucho – jakost vod – statistická analýza

Abstract: Climate change is causing a higher frequency of hydrological extremes that affect surface water quality. On changes in water quality due to hydrological drought we are focused in this article. Flows below Q_{355}, which define hydrological drought, were found to be more frequent in most streams in the last two decades than in previous decades. Statistical analysis of changes in water quality is carried out in selected profiles of the river network, in which surface water quality is monitored, and where near the gauging profile is situated. The first preliminary results show that the hydrological conditions impact significantly on abundance of many pollutants, the methods need further improvements and verification.

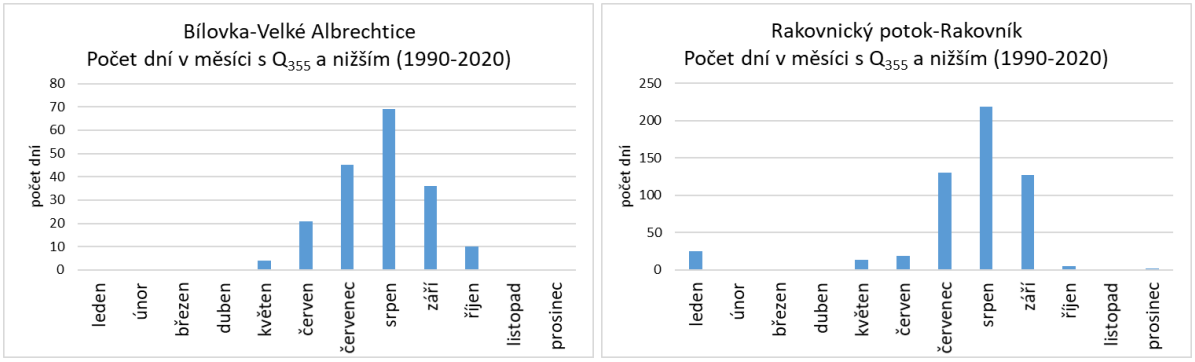
At the same time, in 2023, we selected the localities in which field research is managed to find out attenuation of nutrients and organic pollution in longitudinal profile of the river in a grid of approximately 1 to 2 km downsteam. The first results show that Rakovnický stream under Rakovník, rivers Metuje under Náchodem and Bílovka pod Bílovec are suitable for this research. Interim results from sampling during the hydrological drought in summer confirmed a significant decrease in total nitrogen, ammonia nitrogen and organic pollution. Conversely, the loss of phosphorus after first mixing waste and surface water was downstream minimal.

Keywords: hydrological drought – water quality – statistical analysis

1. Úvod

Měnící se klimatické podmínky ovlivňují nejen celkové množství a sezónní průběh množství povrchových a podzemních vod, ale také jejich kvalitativní charakteristiky. Z analýzy průměrných denních průtoků v profilech sledování hydrologického stavu v českých řekách vyplývá, že v posledních 10 až 20 letech se zvyšuje četnost dní s 355denním průtokem a nižším (Q_{355}). Jedná se o průtok, který je v dlouhodobém průměru dosažen či překročen po 355 dní v roce. Vyšší extremita počasí nevede pouze k vyšší vydatnosti srážek, které způsobují povodňové stavy na drobných i větších tocích, ale také k delším obdobím beze srážek doprovázeným nízkými průtoky v tocích. Ve vybraných vodoměrných stanicích byla provedena analýza průměrných denních průtoků za období 1990 až 2020, která potvrdila, že v poslední dekádě narůstá nejen počet let, ve kterých se stavy hydrologického sucha vyskytly, ale narůstá i počet dní v kalendářním roce s průtokem Q_{355} a nižším (obr. 1). Hydrologické sucho se vyskytuje převážně v letních měsících a počátkem podzimu (obr. 2). Se vzrůstem globální teploty vzduchu se zvyšuje rovněž výpar, který v konečném důsledku prohlubuje stavy hydrologického sucha. Přívalová srážka krátkodobě zvýší průtoky v tocích, ale z povodí rychle odteče a průtoky se v letních měsících vzápětí opět dostávají do stavu hydrologického sucha.

Obr. 1 Počet dní v roce s průtokem Q_{355} a nižším v období 1990–2020.
Fig. 1 Number of days per year with a flow of Q_{355} and lower in the period 1990–2020.



Obr. 2 Počet dní v měsíci s průtokem Q_{355} a nižším v období 1990–2020.
Fig. 2 Number of days per month with a flow of Q_{355} and lower in the period 1990–2020.

Při nízkých průtocích je sice eliminován vliv plošných zdrojů znečištění, ale vlivem nižšího ředícího poměru se zvyšuje vliv bodového znečištění. Je tomu ale skutečně tak? V období významného hydrologického sucha roku 2015 se státní podnik Povodí Vltavy rozhodl zahustit pravidelný monitoring vodních toků (ve vybraných profilech) z měsíčního na 14denní. Ke zhoršení jakosti povrchových vod v antropogenně ovlivněných povodích v některých

případech nedošlo. Je jisté, že eliminace znečištění v tocích je ovlivňována více faktory, z nichž některé mohou působit silněji v době hydrologického sucha než při vyšších hydrologických stavech. Tyto faktory můžeme v zásadě rozdělit na fyzikální, chemické a biologické. Z fyzikálního hlediska je důležitý poměr šířky k hloubce toku, protože souvisí s tím, jak velká část toku je v kontaktu se dnem toku, což je aktivní oblast pro zpracování živin. S poklesem hladiny plocha říčního dna „působí“ na menší objem vodního sloupce a zároveň se zvyšuje dotoková doba vlivem nižší průtokové rychlosti. Např. v profilu Metuje-Krčín bylo pomocí modelu CIT VÚV zjištěno, že při poklesu hladiny o 14 cm (z 34 na 20 cm) připadá na jednotku plochy říčního dna o 41 % menší objem vody a reakční doba se prodlouží o 30 %.

Slunečním zářením se vodní sloupec rychleji prohřeje a urychlují se biologické a fotodegradační procesy. V případě dusíku dochází v toku jak k nitrifikaci v oxických podmínkách, kdy je amoniakální dusík oxidován na dusičnany, tak současně i k denitrifikaci v oxických a anoxických podmínkách za redukce dusičnanů na plynný dusík N_2, který uniká do atmosféry. Rozkladem organické hmoty se organický dusík transformuje na amoniakální dusík, který je pro nitrifikační bakterie snáze dostupný než kyslíkaté formy dusíku. (Sheibley et al. 2016). Přímý vstup dusíku do vody ze srážek je méně významný (Duff and Triska 2000). Významnější může být dotace dusíku do povrchových vod podzemními vodami. Rozpuštěná forma fosforu je snadno dostupná pro fytoplankton, makrofyta a bentické organismy. Snadno se váže na nerozpuštěné částice a ukládá do říčního sedimentu, odkud může být opět remobilizován do vodního sloupce v závislosti na hydrologických podmínkách a geomorfologické charakteristice říčního koryta (Sheibley et al. 2016).

Tento dílčí cíl projektu PERUN si dále klade za cíl zaměřit se na širší spektrum běžně sledovaných parametrů včetně prioritních a zvlášť nebezpečných látek a pomocí jednoduchých a snadno aplikovatelných postupů vybrat parametry, které naznačují korelaci s kvantitativními údaji pro další, podrobnější zpracování a vyhodnocení jejich rizikovosti v podmínkách klimatické změny.

2. Data

Pro statistickou analýzu dat jakosti povrchové vody na průtocích a párově mezi sebou byla použita data o jakosti povrchových vod v profilech sledování za období 2010–2021, v ojedinělých případech i starší poskytnutá státními podniky povodí Labe, Moravy, Odry a Vltavy a data průměrných denních průtoků ve vybraných hydrologických stanicích poskytnutá ČHMÚ situovaných v blízkosti vodoměrných stanic. Prvotní výběr zahrnoval 338 ukazatelů znečištění, jejich počet byl v další fázi řešení redukován s ohledem na nedostatečnou četnost měření nebo významný počet výsledků s hodnotami pod mezí stanovitelnosti. Hydrologická data byla převzata z on-line přístupných údajů Českého hydrometeorologického ústavu.

3. Metoda

Na základě dat z projektů dříve zpracovávaných ve VÚV TGM, v. v. i. a s využitím dostupných informací byl sestaven seznam parametrů pravidelně sledovaných v povrchových vodách. Pro výzkum v projektu PERUN bylo vytipováno 60 profilů pro sledování jakosti povrchových vod. Na základě analýzy říční sítě byly profilům sledování jakosti povrchových vod přiřazeny možné relevantní profily sledování množství vody (průtoky). Pro prvotní analýzy byly vybrány pouze ty jakostní profily, které leží přímo v místech profilů sledování množství vod. V dalším kroku bude potřeba vyřešit jednotný způsob dopočtu chybějících dat o průtocích pro místa sledování jakosti vody, pokud se nenacházejí v blízkosti.

V druhém kroku byly z takto předvybraných dat vyřazeny ty profily a ukazatele, pro které existuje méně než 50 měření nebo je více než 90 % měření pod mezí stanovitelnosti. Pro prvotní analýzu tedy bylo vybráno 7 profilů (tab. 1) a 107 ukazatelů.

Tab. 1 Přehled říčních profilů pro statistické zhodnocení změn jakosti vody.
Tab. 1 Overview of river profiles for statistical evaluation of water quality changes.

HYSTA_ID	ARROW_ID	Název profilu	Název toku	Sledování od	Sledování do
101800	PLA_310	Předměřice	Jizera	31.01.2000	03.12.2019
161700	PVL_6800	Kojčice	Želivka	11.01.2010	09.12.2019
162600	PVL_3000	Senožaty (Jankovský mlýn)	Martinický potok (přítok Želivky)	11.01.2010	09.12.2019
166200	PVL_1066	Radonice	Blanice (př.Sázavy)	20.01.2010	04.12.2019
257000	POD_1161	Svinov	Odra	18.11.1980	27.11.2019
270200	POD_5210	ústí	Kocovský potok	16.01.2007	14.11.2019
271100	POD_3581	ústí-Karlovec	Černý potok	10.11.1980	14.11.2019

K měřeným údajům o koncentraci zájmového ukazatele byl přiřazen údaj o průměrném denním průtoku v době odběru. U vybraných profilů byl vyhodnocen trend průtoku v době odběru pro sledované období, které bylo v letech 2007 resp. 2010–2020, ve dvou případech 1980–2020. Tato jednoduchá analýza ukázala u šesti ze sedmi profilů sestupný trend. Pro každé datum sledování byl také vyhodnocen kvartil průtoku vzhledem k vybraným hodnotám (dnům měření jakosti) ve sledovaném období.

U vybraných látek a profilů byla data rozdělena do dvou skupin: (a) Tam kde bylo 10–90 % hodnot koncentrací pro daný profil pod mezí stanovitelnosti byl proveden „chí kvadrát“ test pro určení významné korelace mezi kvartilem množství a jakosti nabývající jen dvou hodnot: pod mezí/nad mezí stanovitelnosti.

V případě profilů a ukazatelů, kde byly hodnoty koncentrace v 90 a více % nad mezí stanovitelnosti, byla měření pod mezí stanovitelnosti vypuštěna a byla provedena jednofaktorová analýza rozptylu (ANOVA) pro zjištění závislosti koncentrace na kvartilu průtoku.

V další části řešení tohoto dílčího cíle jsme se zaměřili na výzkum odbourávání znečištění v podélném profilu toku v době hydrologického sucha. Zaměřili jsme se na nutrienty: dusík celkový, dusík dusičnanový, dusík amoniakální, fosfor celkový, fosfor celkový filtrovaný, fosfor fosforečnanový, nerozpuštěné látky (při 105 °C) a organické znečištění charakterizované chemickou spotřebou kyslíku chromanovou metodou ($CHSK_{Cr}$). Byly vybrány úseky toků pod významným zdrojem znečištění, kde se v období hydrologického sucha předpokládá nízký faktor ředění. Zároveň se ve sledovaném úseku nevyskytují další významné zdroje bodového znečištění, aby bylo možno sledovat případnou atenuaci zájmových látek. Přehled lokalit je uveden v následující tab. 2. Pro výpočet ředícího faktoru bylo použito průměrné vypouštění odpadních vod vypočtené z celkového ročního objemu uvedeného ve vodohospodářské bilanci zpracované podle § 5 až 9 vyhlášky č. 431/2001 Sb., v platném znění, za rok 2021.

Tab. 2 Přehled a charakteristika lokalit pro studium eliminace znečištění v podélném profilu toku.
Tab. 2 List and characteristics of sites for the study of pollution elimination in the longitudinal profile of the river.

Název lokality	Říční km	Q_{355} $m^3 \cdot s^{-1}$	Zdroj OV	$Q_{OV\ prům}$ $m^3 \cdot s^{-1}$	Faktor ředění
Bílovka	0,3 až 5,3	0,018	ČOV Velké Albrechtice	0,020	0,9
Metuje	22,2 až 31,5	1,070	ČOV Náchod	0,126	8,5
Rakovnický potok	0,2 až 17,9	0,124	ČOV Rakovník	0,058	2,1
Valová	0,1 až 16,0	0,207	ČOV Prostějov	0,200	1,0

Záznamy srážek a průtoků ve výše uvedených lokalitách jsou zaznamenávány denně od 1. 6. 2023, průtoky v hodinovém kroku s výpočtem průměrného denního průtoku.

Řeka Bílovka v závěrečném úseku toku pod obcí Velké Albrechtice protéká zemědělsky obdělávanou rovinatou krajinou, v měřeném úseku převážkou částí v CHKO Poodří s travnatým porostem. Na posledním 2,3 km dlouhém úseku se rozděluje na dva toky, z nichž hlavní tok teče upraveným napřímeným korytem a vedlejší, průtokově slabší teče přirozeným meandrujícím korytem. Průměrná šířka toku činí 4 m, průměrný spád koryta $3 \cdot 10^{-3}$ $m \cdot m^{-1}$. Dno je štěrkové, v březních partiích na posledních 2 km před ústím do Odry s významnějším podílem jílovitého sedimentu.

Řeka Metuje je vzorkována od městské ČOV Náchod (místí část Bražec) po počátek Nového Města nad Metují v délce 9,3 km. Průměrná šířka toku činí 13 m, průměrný spád koryta $3{,}7 \cdot 10^{-3}$ $m \cdot m^{-1}$. V celém úseku se koryto řeky nachází v zářezu 70 až 150 m hlubokém se strmým sklonem po obou březích. Dno je štěrkové, v období vzorkování prakticky v celém úseku se silným rozvojem řas. V polovině vzorkovaného úseku (27,3 ř. km) do Metuje vtéká levostranný přítok Olešenka.

Rakovnický potok pod Rakovníkem po ústí do Berounky protéká CHKO Křivoklátsko nebo po jeho hranici v krajinném zářezu hlubokém 70 až 100 m. Převážná část levobřežní krajiny je pokryta lesním porostem. Šířka toku činí 3 až 7 m, v průměru 5 m. Průměrný spád koryta je $3{,}5 \cdot 10^{-3}$ $m \cdot m^{-1}$. Substrát dna je zpočátku bahnitý s kamennými bloky, postupně se měnící na štěrkový, v samém závěru kamenitý.

Řeka Valová pod Prostějovem protéká rovinatou krajinou zemědělsky intenzívně obhospodařovanou v upraveném korytě o šířce 4 až 6 m, v průměru 5,8 m. Průměrný spád koryta činí $0{,}94 \cdot 10^{-3}$ $m \cdot m^{-1}$.

Profily pro odběry vzorků od zdroje znečištění jsou od sebe vzdáleny s ohledem na přístupnost ve vzdálenosti 1 až 3 km. V období srpen až září 2023 proběhly dvě vzorkovací kampaně na Rakovnickém potoce a po jedné vzorkovací kampani na ostatních lokalitách. Vzorky byly odebírány do skleněných nebo plastových (PP) vzorkovnic a během transportu a skladování před analýzou chlazeny při teplotě +2 až +4 °C.

Vzorkování, které na lokalitách proběhlo během měsíce srpna a září 2023, je shrnuto v tab. 3. Další vzorkovací kampaně budou následovat rovněž za normálního hydrologického režimu při průměrných průtocích v chladné polovině roku a výsledky budou následně vyhodnoceny.

Tab. 3 Datum a hydrologické podmínky vzorkování vod na lokalitách
Tab. 3 Date and hydrological conditions of water sampling at the locations

Název lokality	Datum	Q_{akt} $m^3 \cdot s^{-1}$	Zdroj OV	$Q_{ov\ akt}$ $m^3 \cdot s^{-1}$	Faktor ředění
Bílovka	25. 8. 2023	0,113	ČOV Velké Albrechtice	0,0074	15,2
Metuje	13. 9. 2023	1,600	ČOV Náchod	0,118	13,6
Rakovnický potok	18. 7. 2023	0,116	ČOV Rakovník	0,038	3,1
Rakovnický potok	14. 8. 2023	0,116	ČOV Rakovník	0,059	2,0
Valová	21. 8. 2023	0,327	ČOV Prostějov	0,220	1,5

4. Výsledky

Na základě provedení „chí kvadrát“ testu byly vybrané ukazatele znečištění rozděleny do tří kategorií:

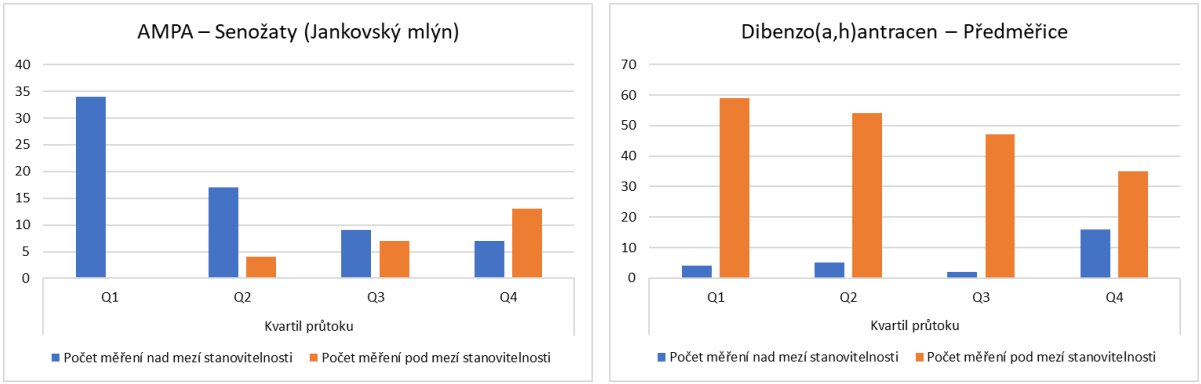
1. tam kde neexistuje korelace mezi kvartilem průtoku a podílem měření pod mezí detekce,
2. tam kde výše uvedená korelace existuje
3. a tam kde je tato korelace patrná jen u některých profilů.

Tabulka 4 uvádí přehled těch ukazatelů, které byly sledovány ve dvou a více profilech.

Tab. 4 Rozdělení ukazatelů podle zjištěné závislosti kvalitativních a kvantitativních charakteristik.
Tab. 4 Distribution of indicators according to the established dependence of qualitative and quantitative characteristics.

Kategorie 1 – nezávislé	Počet profilů	Kategorie 2 – potenciálně závislé	Počet profilů	Kategorie 3	nezávislé	závislé
metolachlor	5	dibenzo(a,h)antracen	4	antracen	1	5
měď po filtraci	4	atrazin desethyl	3	benzo(k)fluoranthen	1	4
olovo	4	fluoren	2	indeno(1,2,3-cd)pyren	1	4
di(2-ethylhexyl)ftalát (DEHP)	3	chrysen	2	benzo(a)antracen	1	3
kadmium	3	vanad	2	benzo(ghi)perylen	2	3
kyanidy celkové	3	metazachlor ESA	2	benzo(a)pyren	3	2
metazachlor	3	metazachlor OA	1	bisfenol A	3	1
benzo(b)fluoranthen	2	karbamazepin	1	metolachlor OA	1	2
chlorofyl (ethanolem)	2	AMPA	1	glyfosát	1	2
nonylfenoly	2					
tonalid	2					

Výsledek testu ukazuje, že u řady ukazatelů, kde vysoký podíl měření pod mezí stanovitelnosti znemožňuje podrobnější vyhodnocení, je při velmi nízkém nebo velmi vysokém průtoku vyšší pravděpodobnost, že sledovaná hodnota bude nad mezí stanovitelnosti tj. vyšší. Příkladem může být metabolit glyfosátu – AMPA v profilu Senožaty (obr. 3), kde při průtoku do úrovně prvního kvartilu (čtvrtina měření při nejnižším průtoku) není žádné z 34 měření pod mezí stanovitelnosti, zatímco ve čtvrtině měření s nejvyššími průtoky je z 20 měření 13 pod mezí stanovitelnosti.



Obr. 3 Výsledek „chí kvadrát“ testu mezi průtokem a koncentrací ukazatelů AMPA a dibenzo(a,h)anthracen.
Fig. 3 Chi-square test result between flow rate and concentration of AMPA and dibenzo(a,h)anthracene.

Naopak látky ze skupiny polycyklických aromatických uhlovodíků vykazují podobně silnou korelaci mezi kvartilem průtoku a podílem měření pod mezí stanovitelnosti, ale s opačným znaménkem. Příkladem může být dibenzo(a,h)antracen v profilu Předměřice: při nejvyšších průtocích (kvartil průtoku Q4) dosahuje měřitelných hodnot 16 měření z 51, při nízkých průtocích (Q_1) jsou to jen 4 měření z 63.

Data s malým podílem hodnot pod mezí stanovitelnosti

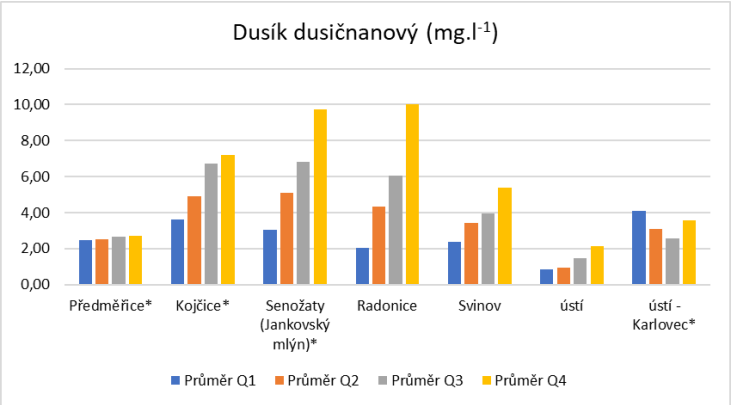
V případě analýzy ANOVA nebyly výsledky jednoznačné, ale lišily v jednotlivých profilech. Následující grafy ilustrují postup u ukazatelů a profilů, kde počet hodnot nad mezí stanovitelnosti přesáhl 90 % měření. Pro každý kvartil průtoku Q_1 až Q_4 je uvedena střední hodnota (průměr) koncentrace a kritérium „p“ podle analýzy ANOVA, kde hodnota menší než 0,05 ukazuje na závislost. Ukazuje se, jak se hodnota mění s narůstajícím průtokem, ne vždy jde ale o souvislost statisticky průkaznou. Zde je ovšem také třeba zvážit vhodnost statistické metody a případně zvolit jinou metodu. Podrobnější analýza by měla zahrnovat odstranění sezónnosti jak v jakostních, tak v množstevních charakteristikách a zohlednit také dlouhodobý trend, jak ho popisuje např. Prchalová (Prchalová et al. 2023).

Následující grafy zobrazují výsledky pro některé z běžných ukazatelů. Zatímco koncentrace dusičnanového dusíku s rostoucím průtokem mírně rostou (obr. 4), koncentrace fosforečnanového fosforu klesají (obr. 5), ne vždy je ale souvislost dostatečně prokázána.

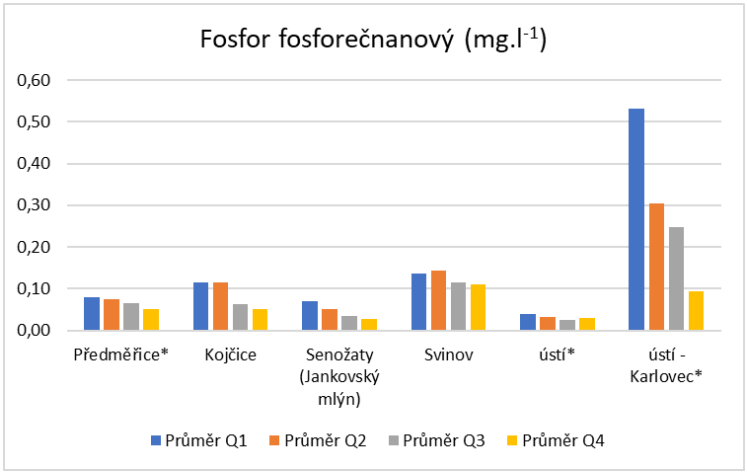
Také v případě polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU) je patrné, že průměrná koncentrace s průtokem téměř vždy roste a většinou jde o statisticky prokázanou závislost (obr. 6).

Na obr. 7 jsou uvedeny příklady dvou metabolitů pesticidů, které vykazují opačné charakteristiky: AMPA, metabolit glyfosátu, se vyznačuje vyššími koncentracemi při nižším průtoku, v jiném profilu pak stejná látka vykazovala větší počet hodnot pod mezí stanovitelnosti při vyšších průtocích. Naopak u metazachloru ESA průměrná koncentrace s rostoucím průtokem stoupá, ačkoli ne vždy je tato souvislost statisticky průkazná.

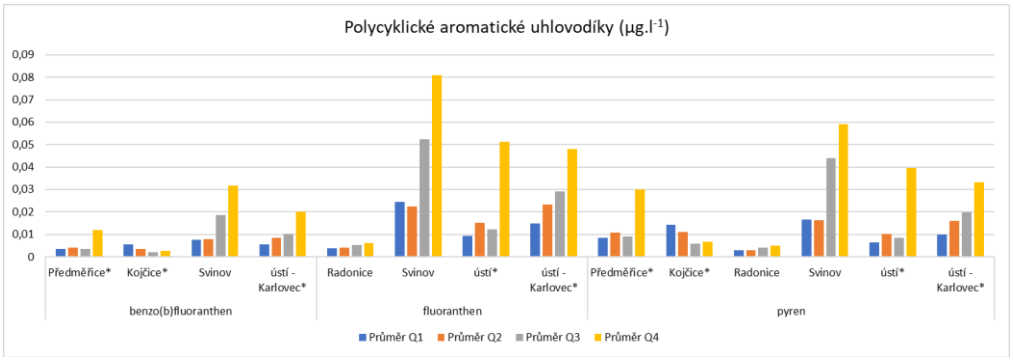
Obr. 8 ukazuje příklady dvou léčiv, jejichž koncentrace se s rostoucím průtokem spíše snižuje, jak odpovídá předpokladu, že tyto látky se do povrchových vod dostávají z komunálních ČOV v relativně konstantním množství a s rostoucím průtokem tedy jejich koncentrace klesá.



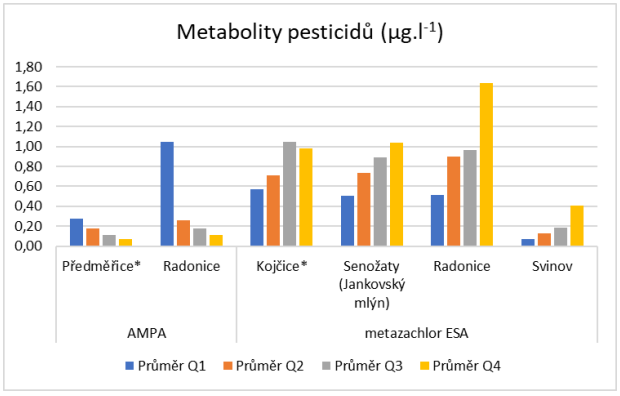
Obr. 4 Průměrná koncentrace za různých průtokových stavů – dusík dusičnanový.
Fig. 4 Average concentration under different flow conditions – nitrate nitrogen.



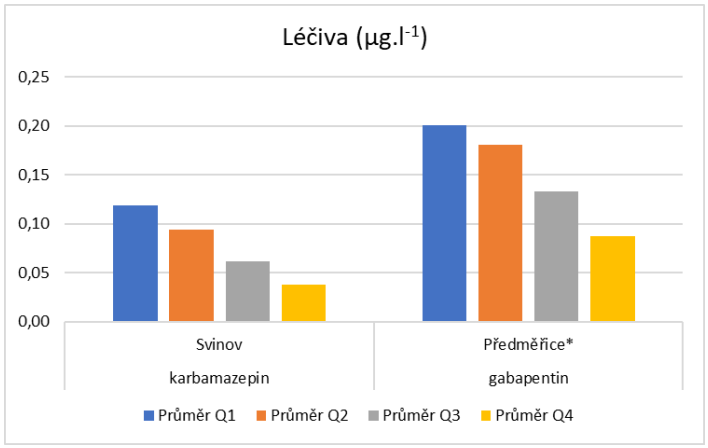
Obr. 5 Průměrná koncentrace za různých průtokových stavů – fosfor fosforečnanový.
Fig. 5 Average concentration under different flow conditions – phosphate phosphorus.



Obr. 6 Průměrná koncentrace za různých průtokových stavů – vybrané polycyklické aromatické uhlovodíky.
Fig. 6 Average concentration under different flow conditions – selected polycyclic aromatic hydrocarbons.



Obr. 7 Průměrná koncentrace za různých průtokových stavů – vybrané metabolity pesticidů.
Fig. 7 Average concentration under different flow conditions – selected metabolites of pesticides.



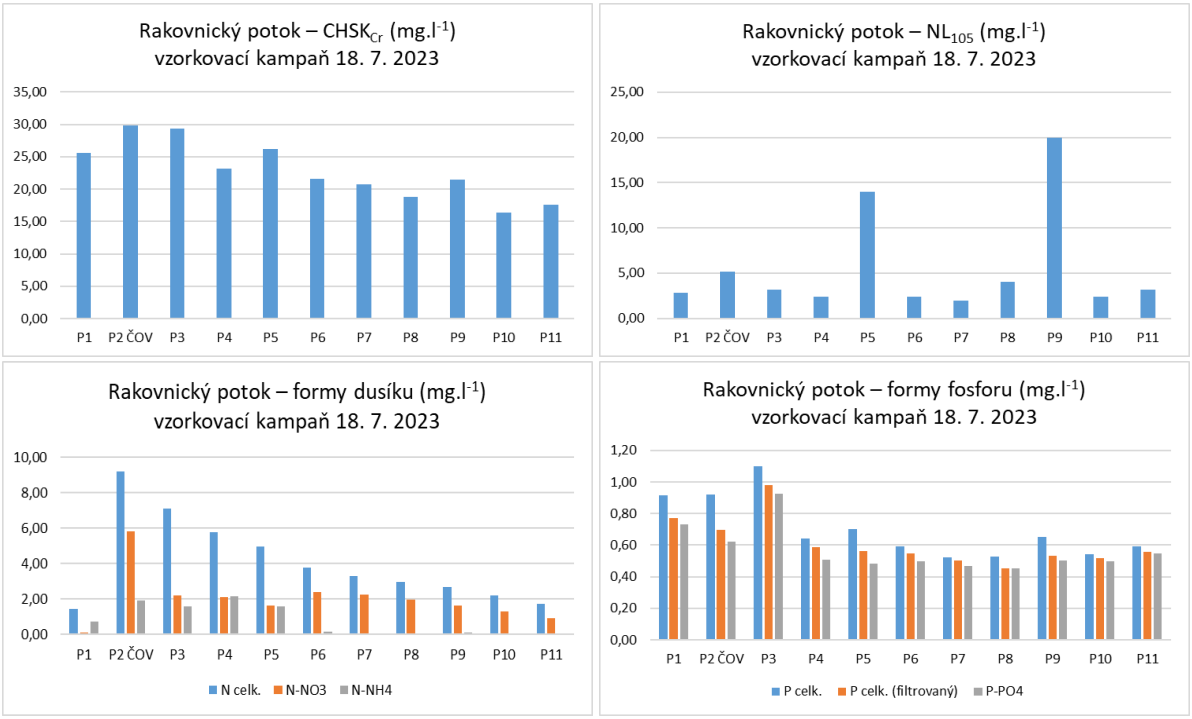
Obr. 8 Průměrná koncentrace za různých průtokových stavů – vybraná léčiva.
Fig. 8 Average concentration under different flow conditions – selected pharmaceuticals.

Přejděme k výsledkům zkoumání možné atenuace znečištění v podélném profilu toku na vybraných lokalitách. Nejprve je potřeba stručně zmínit hydrologickou situaci v období od června do září tohoto roku. Stav hydrologického sucha, který se již udržel po celý den nebo jeho převážnou část, nastal na Rakovnickém potoce (Rakovnický potok-Rakovník) a v Bílovce (Bílovka-V. Albrechtice) na počátku července 2023 a udržel se po dobu dvou týdnů (Bílovka) a tří týdnů (Rakovnický p.). Poté nastoupilo srážkově bohaté období, které přetrvalo až do konce 1. týdne měsíce srpna. Hydrologické sucho se obnovilo nejdříve v povodí Rakovnického potoka 13. 8. a s částečným přerušením na konci srpna pokračovalo až do konce měsíce září 2023. V Bílovce k obnovení hydrologického sucha do konce září 2023 nedošlo.

Hydrologická situace řeky Valová (též nazývané jako Romže) hodnocená podle vodoměrné v profilu Polkovice je ovlivněna vypouštěním z přehrady Plumlov situované nad městem Prostějov. Průměrný denní průtok v období červen až září 2023 neklesl pod hranicí hydrologického sucha, významněji během dne k poklesu pod tuto hranici docházelo v druhé polovině června a července. Metuje si po celé léto udržela dostatečný průtok a ke krátkodobým poklesům pod hranicí Q_{355} docházelo až od druhé dekády září 2023.

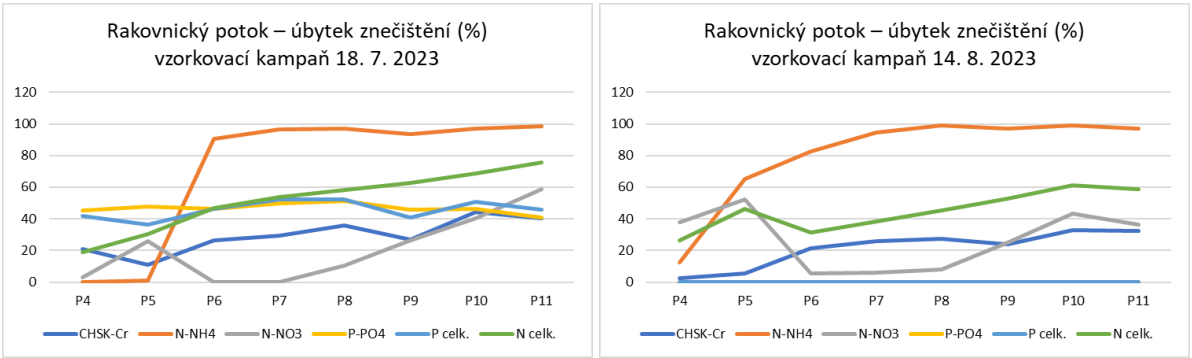
V tomto příspěvku prezentujeme výsledky vzorkování Rakovnického potoka, který se sledovaných lokalit patřil k hydrologicky nejsušším. Rakovnický potok je silně organicky znečištěn už nad ČOV Rakovník (profil P1 graf $CHSK_{Cr}$ na obr. 9). Pod vypouštěním z této čistírny odpadních vod se jakost vody v Rakovnickém potoce dále zhoršila, směrem po proudu až k ústí do Berounky se ale postupně zlepšovala. K mírnému vzestupu koncentrace $CHSK_{Cr}$

došlo v profilech P5 a P9 vlivem vyšší koncentrace nerozpuštěných látek ve vzorku. Potvrdila se rychlá oxidace amoniakálního dusíku již několik kilometrů pod vypouštěním z ČOV Rakovník a významný úbytek celkového dusíku. Fosfor se choval odlišně. Převládal v rozpuštěné formě (koncentrace fosforečnanového fosforu a rozpuštěného fosforu byla velmi podobná). Zatížení Rakovnického potoka fosforem je značné už nad ČOV Rakovník a v profilu pod vypouštěním z této čistírny dále vzrostlo. Po významné atenuaci v profilu P4 se ale jeho koncentrace dále po proudu až k ústí do Berounky prakticky nezměnila, v závěrečném profilu pod obcí Křivoklát dokonce mírně vzrostla. Růst koncentrace fosforu se potvrdil také v profilech se zvýšenou koncentrací nerozpuštěných látek (dochází deponování fosforu v dnovém sedimentu).



Obr. 9 Koncentrace látek v Rakovnickém potoce pod Rakovníkem až k ústí do Berounky.
Fig. 9 Concentration of substances in the Rakovnický stream below Rakovník up to the mouth to Berounka.

Srovnání úbytku znečištění v Rakovnickém potoce obou vzorkovacích kampaní zobrazuje obr. 10.



Obr. 10 Úbytek znečištění v Rakovnickém potoce pod Rakovníkem až k ústí do Berounky.
Fig. 10 Pollution attenuation in the Rakovnický stream below Rakovník up to the mouth to Berounka.

Úbytek znečištění ve sledovaných parametrech byl u obou vzorkovacích kampaní v době hydrologického sucha obdobný, v 1. vzorkovací kampani realizované 18. 7. 2023 byl vyšší než

ve 2. vzorkovací kampani 14. 8. 2023, kdy odpadní voda z ČOV Rakovník vykazovala nižší úroveň znečištění. Celkový úbytek od profilu P3 (pod ČOV Rakovník) k profilu P11 (ústí) dosahoval v obou vzorkovacích kampaních v případě $CHSK_{Cr}$ 40,1 % resp. 36,2 %; N_{celk} 75,7 % resp. 58,8 %; $N\text{-}NH_4^+$ 98,8 % resp. 97,3 %; $N\text{-}NO_3^-$ 58,6 % resp. 36,1 %. Odlišná situace nastala u celkového fosforu, kdy se v 2. vzorkovací kampani úbytek nedal vyhodnotit. To bylo způsobeno tím, že jeho koncentrace v odpadní vodě ČOV Rakovník byla významně nižší než v toku nad tímto zdrojem a díky nízkému faktoru ředění došlo pod čistírnou odpadních vod k nadlepšení, které ale bylo přechodné a v dalším úseku toku po proudu se obdobně jako v 1. vzorkovací kampani koncentrace fosforu zvýšila. Celkový úbytek od profilu P3 (pod ČOV Rakovník) k profilu P11 (ústí) v 1. vzorkovací kampani u P_{celk} činil 46 % a $P\text{-}PO_4^{3-}$ 40,9 % s tím, že tato atenuace byla dosažena v profilu P4 a dále již po proudu nepokračovala.

5. Závěr

Všechny provedené statistické testy mají charakter předběžných vyhodnocení. Pro vyšší hodnověrnost výsledků bude potřeba provést detailnější analýzu datových sad, očistit data od sezónních výkyvů a dlouhodobých trendů jak v kvalitativních, tak v kvantitativních charakteristikách. Při rozšíření datové základny o další profily říční sítě bude potřeba vyřešit postup zpřesnění průtoků v případech, kdy se místa sledování jakosti povrchových vod nekryjí s místy sledování průtoku. Přesto i takto zjednodušený postup poskytuje určité výsledky závislosti koncentrace na průtoku a ukazuje další možné směry výzkumu. U některých skupin látek lze vysledovat podobné vzorce „chování“ s ohledem na hydrologickou situaci. Z praktického hlediska lze výsledky využít k plánování monitorovacích kampaní, případně k vytipování látek a skupin látek, které se vyskytují ojediněle, ale jejich význam by při častějších a déle trvajících epizodách hydrologického sucha mohl vzrůstat.

První průběžné výsledky úbytku znečištění v podélném profilu toku potvrdily vhodnost tří lokalit ze čtyř původně vybraných pro tento výzkum. Významný úbytek byl potvrzen v případě amoniakálního dusíku, celkového dusíku a organického znečištění charakterizovaného ukazatelem $CHSK_{Cr}$. Koncentrace fosforu je v toku po vyrovnání jeho koncentrace pod zdrojem znečištění (na konci mísicí zóny) prakticky stabilní a je velice citlivá na obsah nerozpuštěných látek. Převládá v rozpuštěné formě. V dalším řešení bude výzkum pokračovat srovnáním v chladném období roku a za různých hydrologických podmínek.

Poděkování

Článek vznikl za podpory projektu PERUN – Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku, (reg. č. SS02030040), financovaného Technologickou agenturou ČR v rámci programu Prostředí pro život.

Děkujeme podnikům povodí Labe, Moravy, Odry a Vltavy za poskytnutí dat o sledované jakosti povrchové vody.

Dále děkujeme Českému hydrometeorologickému ústavu za poskytnutí údajů o průtocích ve sledovaném období.

Literatura

DUFF, J. H., AND TRISKA, F. J., 2000. Nitrogen biogeochemistry and surface-subsurface exchange in streams in Jones, J. B., Mulholland, P. J., eds.. Streams and ground waters: San Diego, Academic Press, 197–220.

PRCHALOVÁ, H., RICHTER, P., VYSKOČ, P., PICEK, J., DUBSKÁ, M., KOZLOVÁ, M., 2023. Hodnocení trendů v koncentracích chemických a fyzikálně-chemických ukazatelů

stavu povrchových vod. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, **65**, 3, 4–16, ISSN 0322-8916. https://doi.org/10.46555/VTEI.2023.03.002

SHEIBLEY, W. R., KONRAD, P. K., BLACK, R. W., 2016. US Geological Survay: Nutrient Attenuation in Rivers and Streams, Puget Sound Basin, Washington. *Survey Scientific Investigations Report* 2015–5074, Version 1.1, February 2016, 70 pp.