

BLIŽŇÁK, V., ZACHAROV, P., 2023. Hodnocení úhrnů srážek simulovaných atmosférickou reanalýzou ALADIN/PERUN ve vysokém prostorovém rozlišení. In: TOLASZ, R., POLCAROVÁ, E. (Eds.), 2023. Sborník příspěvků z První konference projektu PERUN (TA ČR, SS02030040). Praha: ČHMÚ, 15–25, ISBN 978-80-7653-063-8.

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

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)

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.

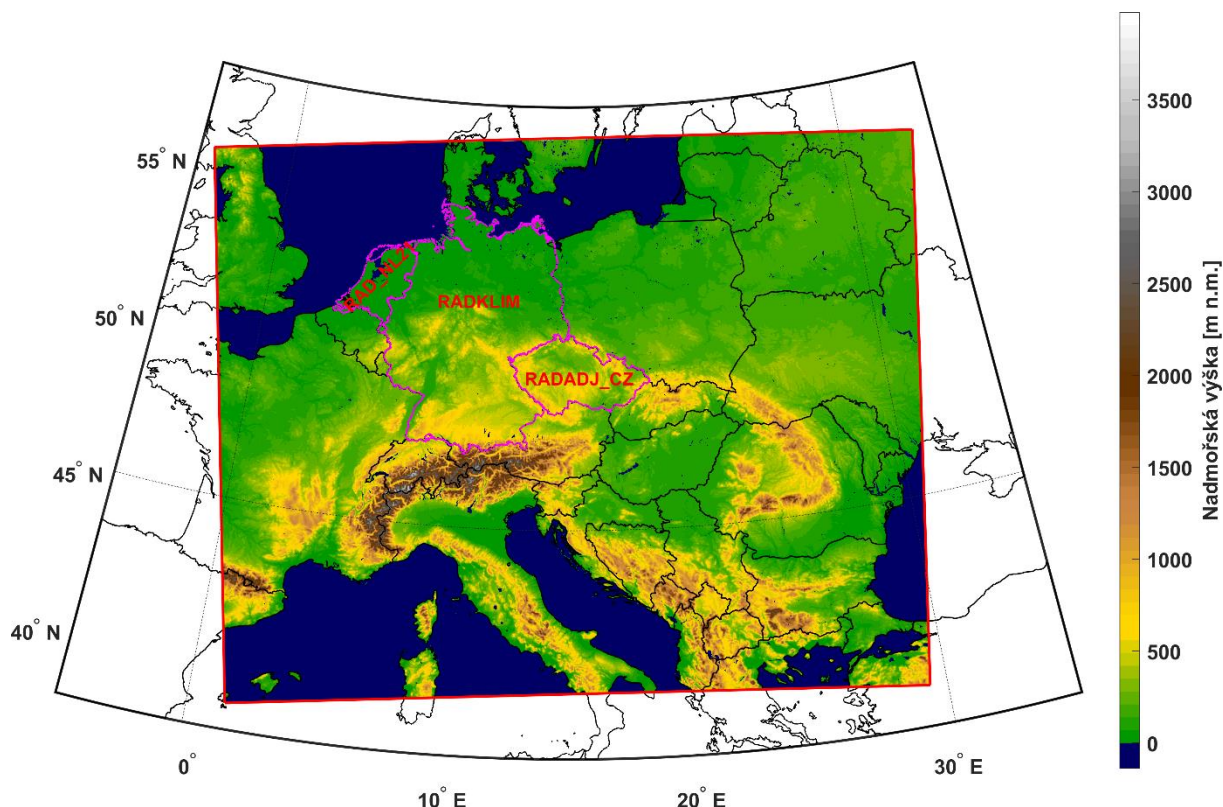
Většina atmosférických reanalýz je počítána pomocí NWP modelů, ve kterých jsou konvektivní procesy parametrizovány, což vede k významnému zdroji chyb a nejistot (Prein et al. 2015). V současné době jsou však již ke tvorbě reanalýz využívány i nehydrostatické NWP modely umožňující explicitní modelování 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 teplejších 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 reanalýzami 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 překročení 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.

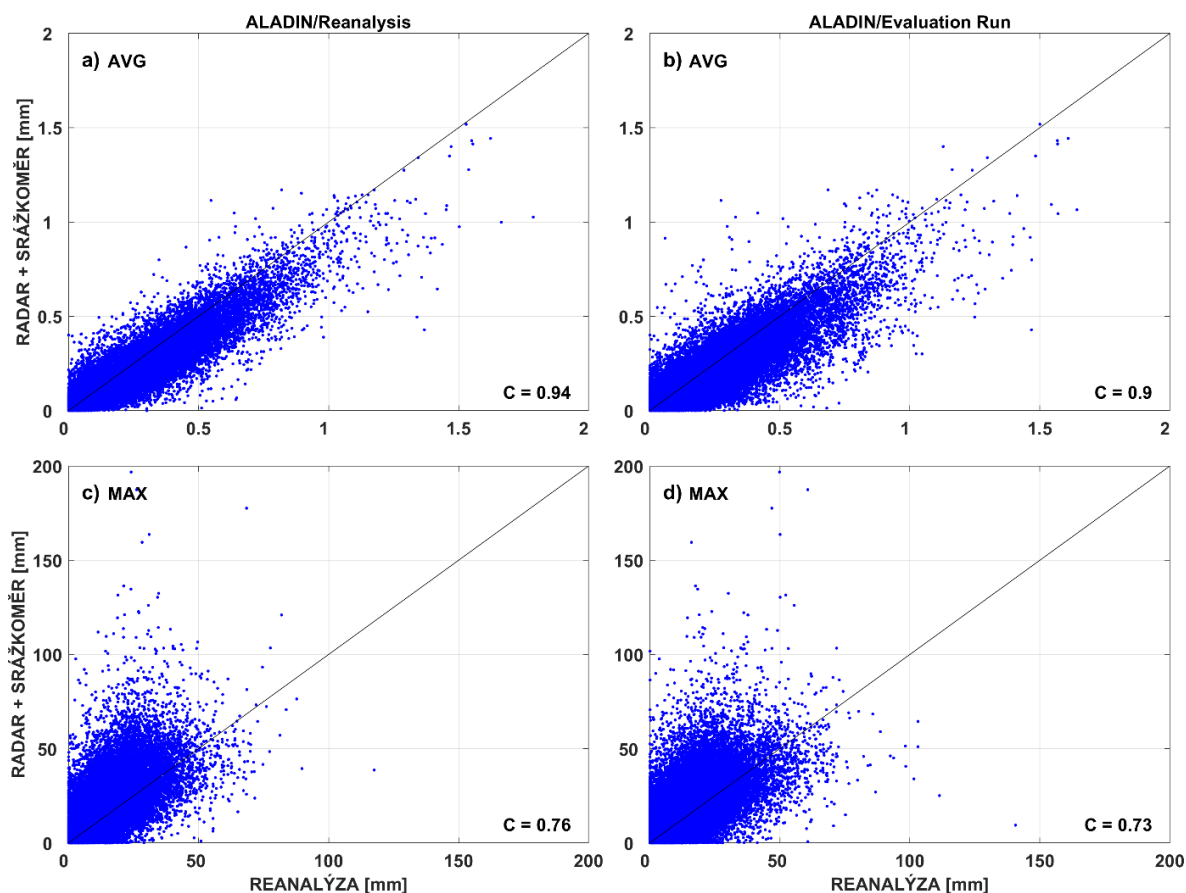
		Předpověď události	
		Ano	Ne
Výskyt události	Ano	a	c
	Ne	b	d

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

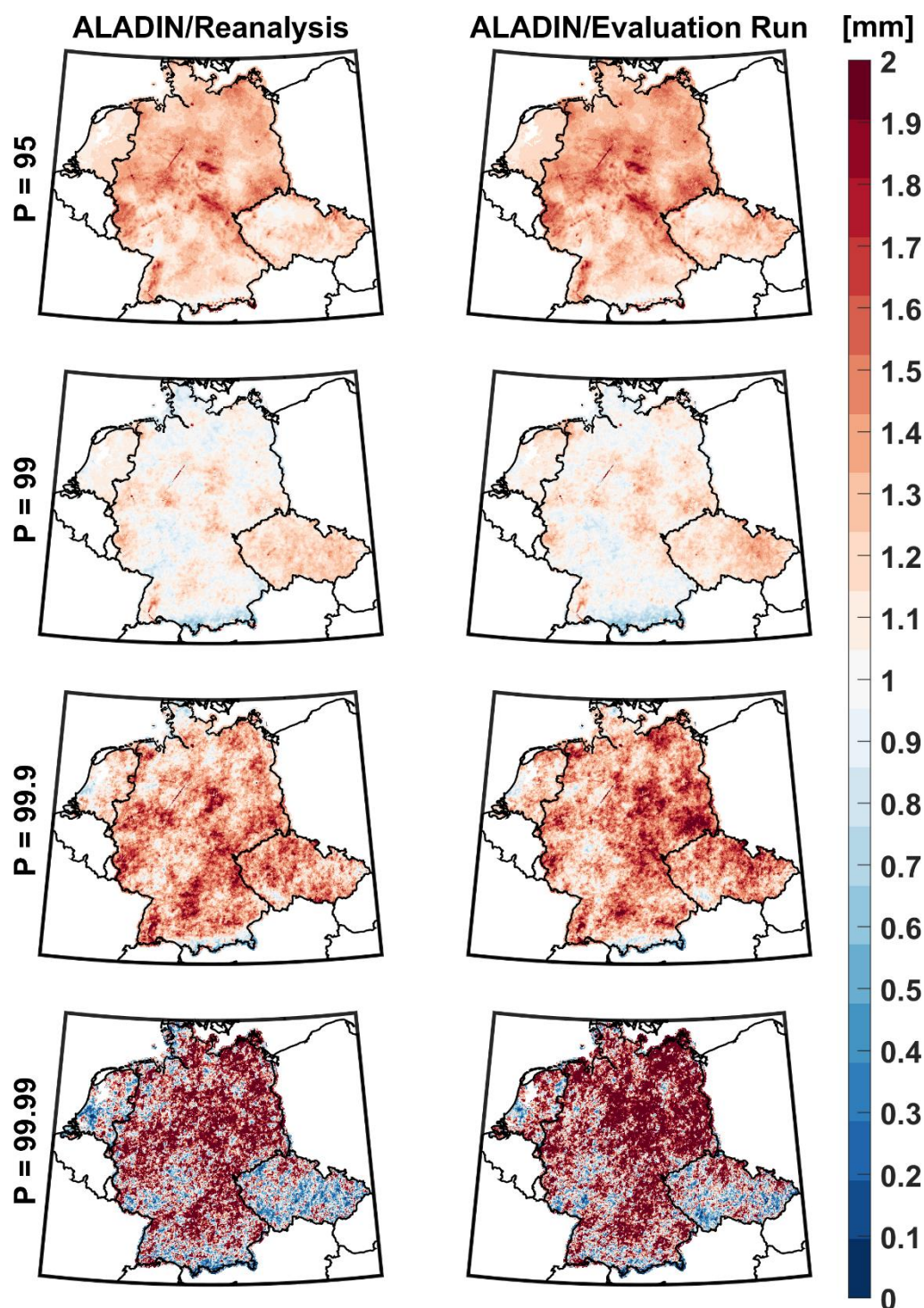
Hodinové úhrny srážek zprůměrované přes celou verifikační oblast naznačují, že verze ALADIN/Reanalysis lépe koresponduje s naměřenými hodnotami srážek než verze ALADIN/Evaluation Run (obr. 2). Pearsonův korelační koeficient (C) mezi měřením a reanalýzami dosahuje hodnot 0,94 (ALADIN/Reanalysis), resp. 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/Reanalysis (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 Scatterplots 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

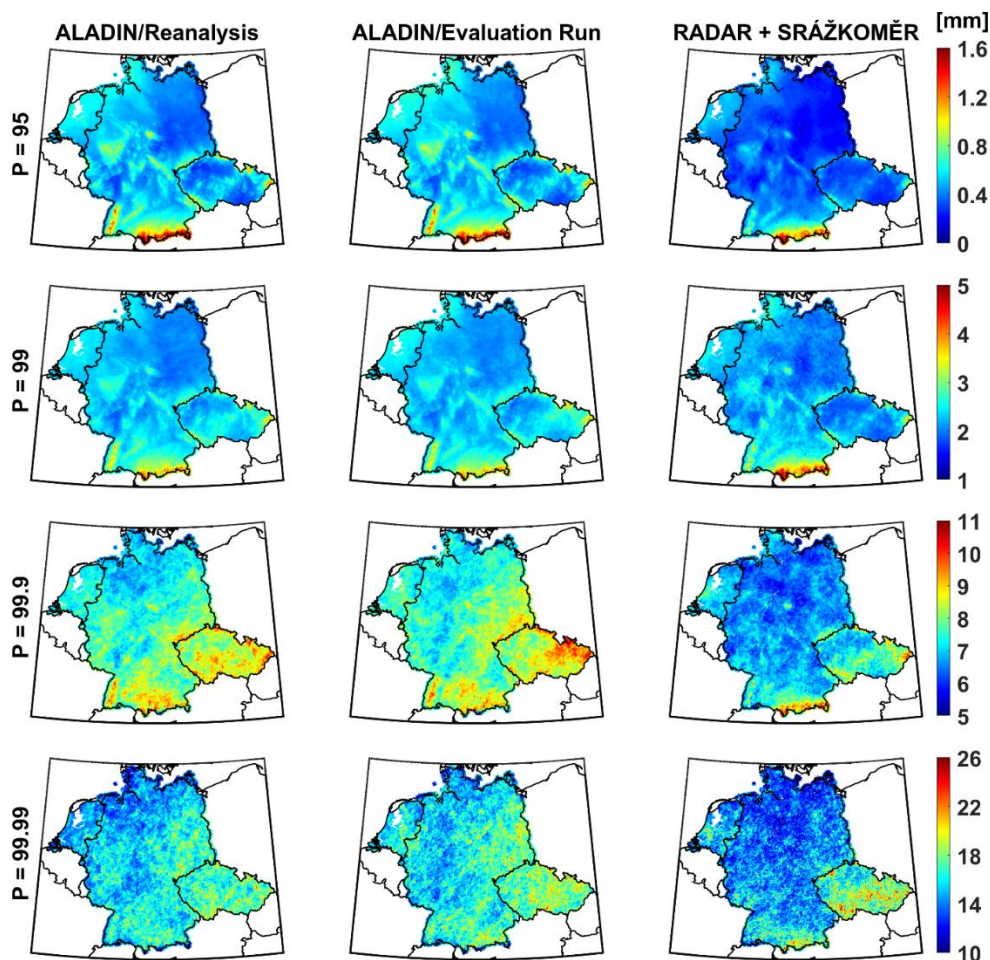
úhrny (rovné nebo převyšující 99,99. percentil) jsou střídavě nadhodnocené (především ve východní polovině Německa) i podhodnocené (oblast jižních Čech a západního Nizozemska). Dle měření se nejvyšší hodnoty těchto úhrnů vyskytují v oblasti německých Alp, Krušných hor a jižní a východní části ČR, což 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. Doby 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.

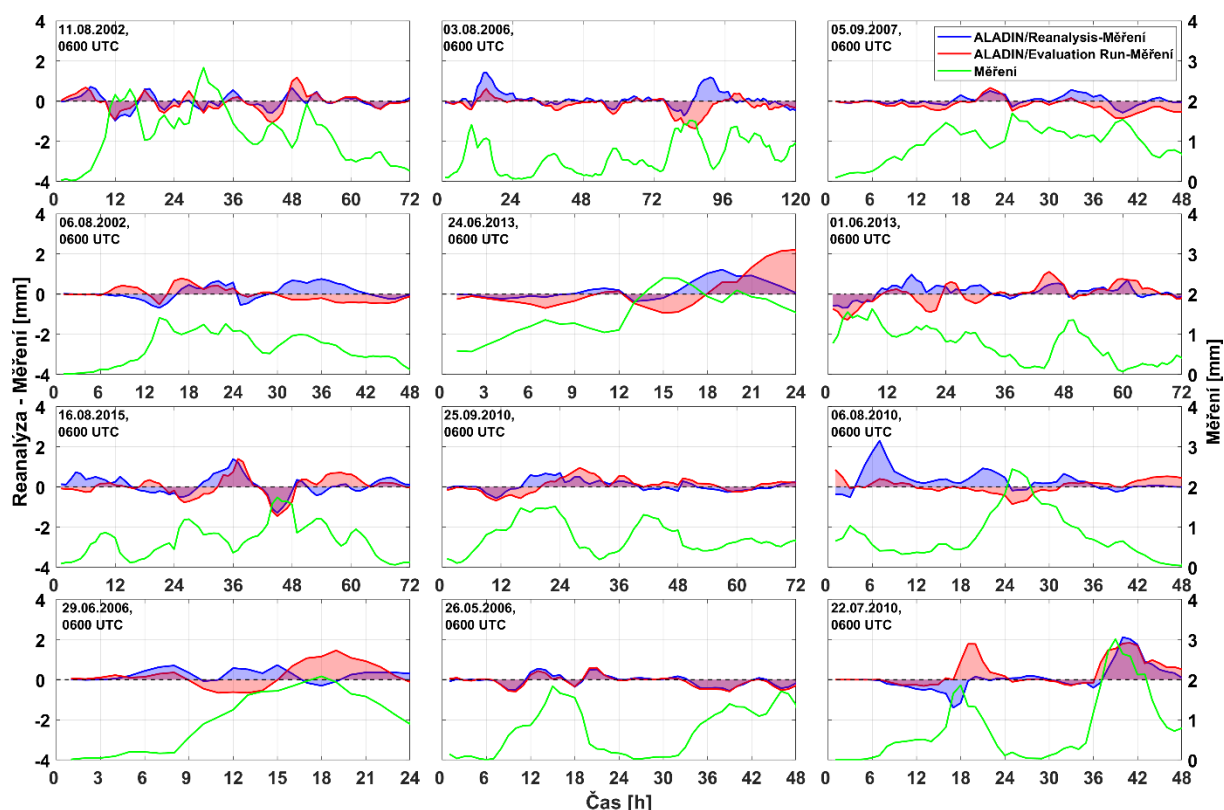
Přesnost simulací průběhu vrstevnatých srážek není jednoznačná, přičemž může docházet střídavě jak k jejich podhodnocení, tak nadhodnocení. Z plošné distribuce srážkových úhrnů pocházejících z vrstevnaté oblačnosti (bez obrázku) také vyplývá, že NWP model obvykle správně lokalizuje oblast významných 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-BOUSSIÈRES, 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., FRIEDERICH, P., HENSE, A., KELLER, J.D., OHLWEIN, C., 2017. A novel convective-scale regional reanalysis 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., BRENDL, 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.