

BERANOVÁ, R., RULFOVÁ, Z., SOKOL, Z., 2023. Validace reanalýzy pro střední Evropu PERUN/Reanalysis. In: TOLASZ, R., POLCAROVÁ, E. (Eds.), 2023. Sborník příspěvků z První konference projektu PERUN (TA ČR, SS02030040). Praha: ČHMÚ, 7–14, ISBN 978-80-7653-063-8.
<https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.01>

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

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

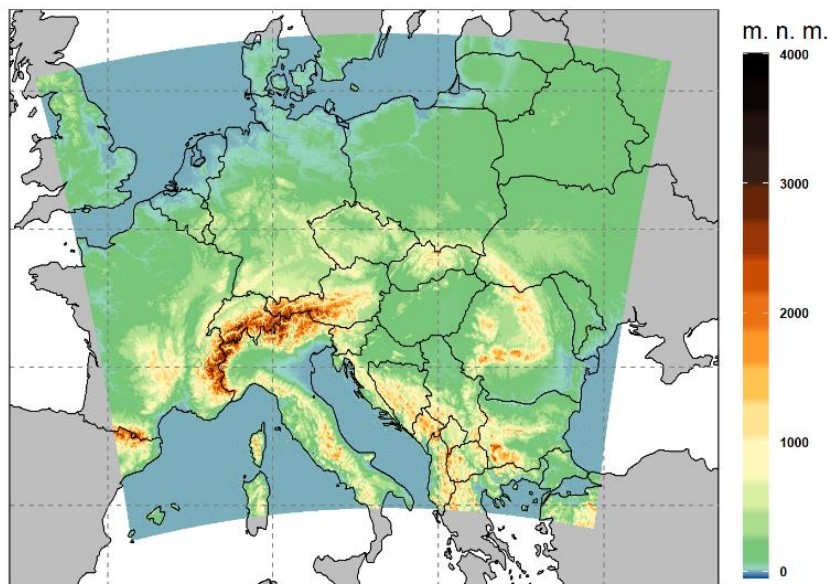
Reanalýzy jsou v současnosti běžným nástrojem pro sledování stavu atmosféry a vývoje klimatu. Reanalýzy jsou vytvářeny prostřednictvím numerického předpovědního modelu, do kterého v pravidelných intervalech (6 až 12 hodin) vstupují všechna dostupná pozorovaná data v procesu tzv. asimilace. Tímto způsobem 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 extrémní 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 teplotu 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.

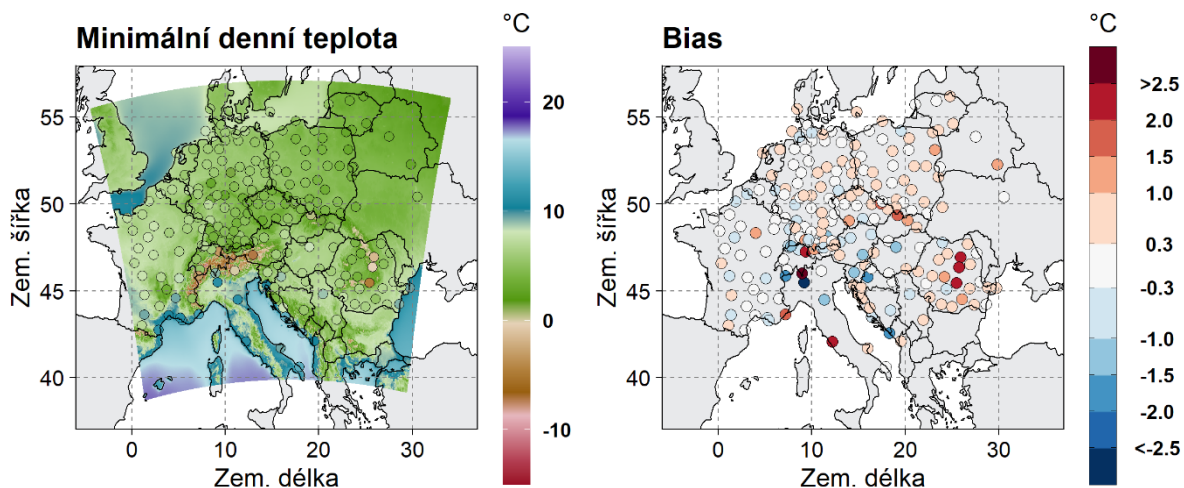
Data z PERUN/Reanalysis jsme porovnávali s globální reanalýzou ERA5 (Hersbach et al. 2020), regionální reanalýzou CERRA (Schimanke et al. 2021) a s denními pozorovanými daty v pravidelné síti tzv. Eobs (Cornes et al. 2018). Avšak hlavní důraz jsme kladli na porovnání s naměřenými hodnotami na evropských 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 ($X_{rea} - X_{st}$). V případě srážek používáme relativní chybu vypočtenou jako poměr X_{rea}/X_{st} . 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 rovinném 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.

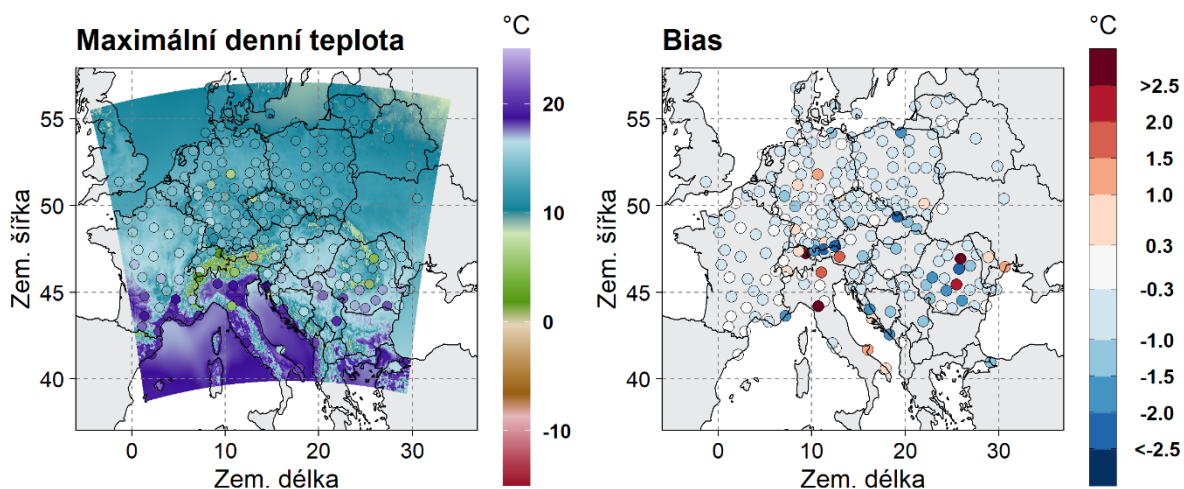
4. Výsledky

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 °C. Naopak denní maximální teplota je v reanalýze podhodnocena a to v průměru o 0,41 °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.

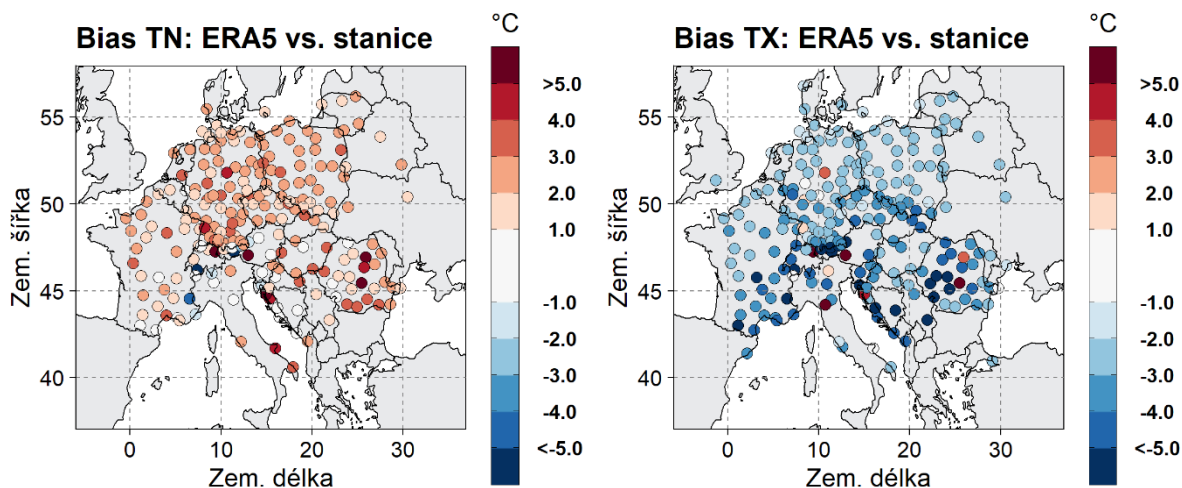


Obr. 3 Jako obr. 2, ale pro roční průměr denní maximální teploty.

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

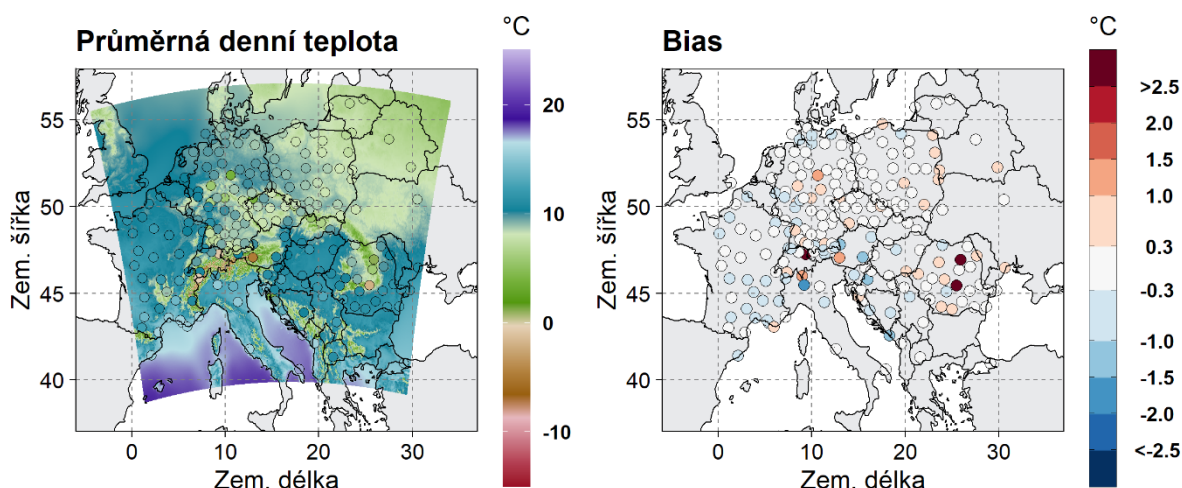
Na obr. 4 jsou pro zajímavost znázorněny rozdíly mezi teplotami v reanalýze ERA5 a teplotami na stanicích. Opět bereme nejbližší uzlový bod k dané stanici. Vzhledem k hrubému rozlišení reanalýzy ERA5 (0.25°) si musíme uvědomit, že hodnoty v jednotlivých uzlových bodech v ERA5 reprezentují plošný průměr 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 $2,1^\circ\text{C}$) a podhodnocení denní maximální teploty (v průměru o $2,7^\circ\text{C}$).

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).

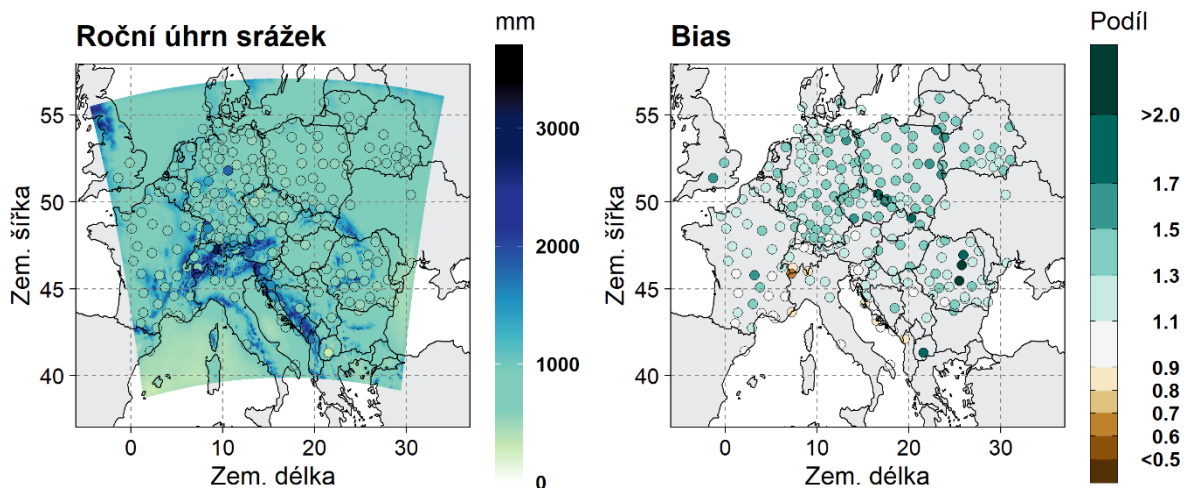
Fig. 4 The difference between the annual average daily minimum temperature (TN) in the ERA5 reanalysis and at the stations (left) and the difference in the average daily maximum temperature (TX, right).



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.

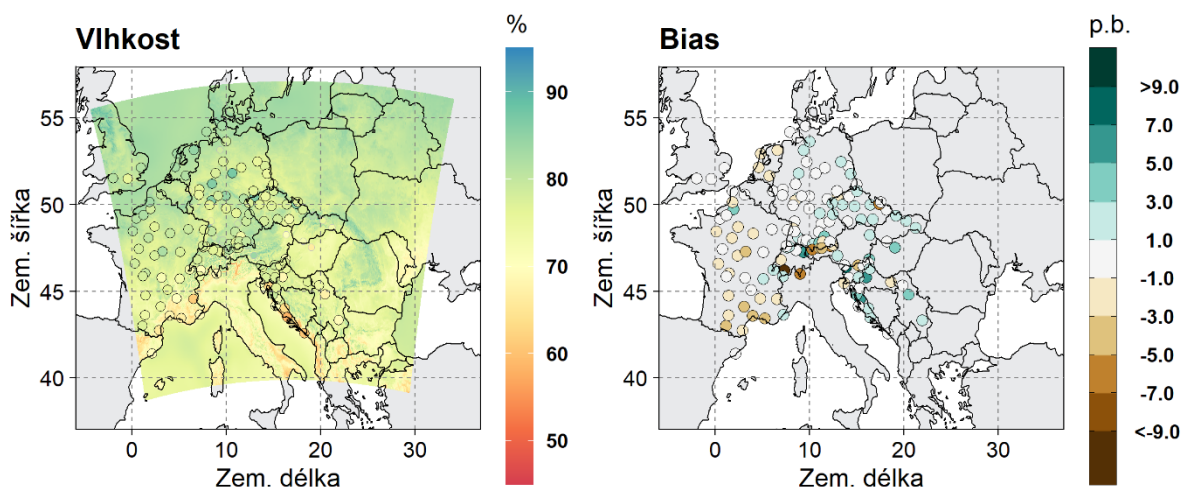
Prostorová variabilita srážek a složité srážkotvorné procesy v oblačnosti často způsobují nepřesnosti v simulaci srážek numerickými předpovědními modely. Obr. 6 ukazuje průměrné roční úhrny srážek v PERUN/Reanalysis a jejich porovnání se stanicemi (levý panel). Celkem bylo použito měření z 252 stanic. 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.

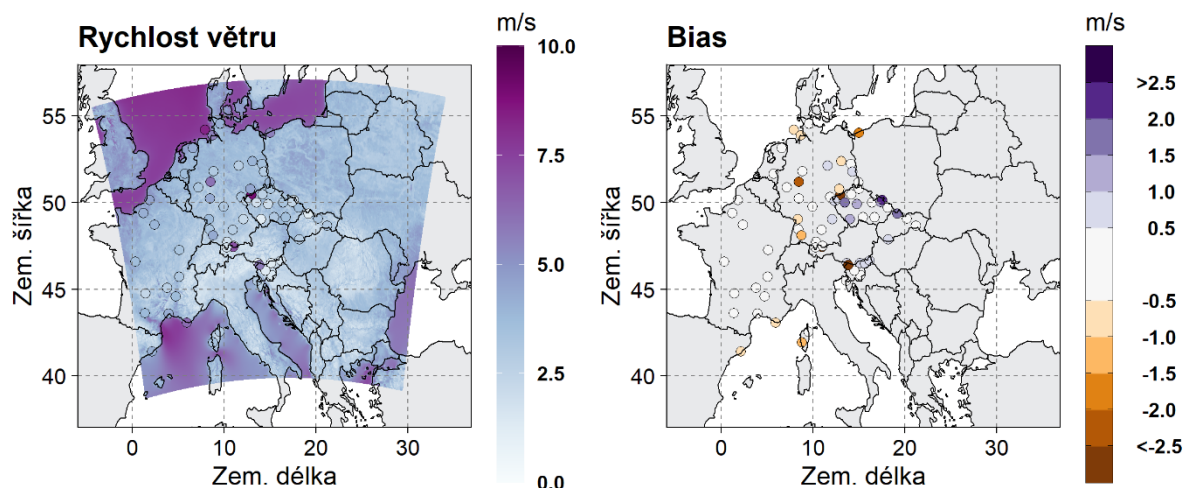
Roční průměrné hodnoty pro relativní vlhkost a příslušné střední chyby jsou zobrazeny na obr. 7. Absolutní hodnota rozdílu mezi reanalýzou a staniční hodnotou na většině stanic nepřevyšuje 5 procentních bodů a průměrná hodnota počítaná přes 144 použitých stanic je 0,1 procentní bod. Je zajímavé, že v 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.



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.

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 ($-0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), ale rozdíly mezi stanicemi jsou výrazné. V České republice je rychlost větru nadhodnocována, ale rozdíl je menší než $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



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., BOUYSSSEL, 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>