

# Scénáře budoucích změn nebezpečných sdružených událostí ve střední Evropě

## Climate change scenarios of hazardous compound events in Central Europe

### Ondřej Lhotka

Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i.  
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;  
Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i.  
Bělidla 986/4a, 603 00 Brno  
✉ [ondrej.lhotka@ufa.cas.cz](mailto:ondrej.lhotka@ufa.cas.cz)

### Eva Plavcová

Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i.  
Boční II/1401, 141 00 Praha 4

### Jan Stryhal

Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i.  
Boční II/1401, 141 00 Praha 4

### Jan Kyselý

Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i.  
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;  
Česká zemědělská univerzita  
Fakulta životního prostředí  
Kamýcká 129, 165 00 Praha–Suchbát

**Many recent high-impact weather and climate events developed due to several concurrent climatic drivers amplifying their negative impacts on society and environment. In this paper, we analyse scenarios of future changes in cold-windy and dry-hot compound events in Central Europe, using an ensemble of CORDEX regional climate models forced by two possible greenhouse gas concentration pathways (low-emission RCP4.5 and high-emission RCP8.5). A distinct decrease of compound cold-windy days was found. At the end of the 21<sup>st</sup> century, the frequency of these days is projected to decrease by 64% (86%) under the RCP4.5 (8.5) pathway (against the 1970–2000 period). By contrast, climate models simulate longer of dry-hot seasons over Central Europe. In mid-21<sup>st</sup> century, their median length is projected to increase by 5–20 days regardless of the concentration pathway. At the end of the 21<sup>st</sup> century, dry-hot seasons are projected to become longer by as much as a whole month under RCP8.5. Although model simulations are to some extent uncertain, scenarios of possible future changes in compound events can be useful in adaptation to ongoing climate change.**

**KLÍČOVÁ SLOVA:** modely klimatické – dny mrazové – události sdružené – sucho – vítr – vlny veder – změna klimatu

**KEYWORDS:** climate change – climate models – compound events – drought – frost days – heat waves – wind

## 1. Úvod

Globální změna klimatu je spjata se stále čtenějším výskytem extrémních povětrnostních událostí (Stott et al. 2016). Tyto změny, které jsou nejnápadnější v případě vln veder či období abnormálně vysokých teplot obecně (Philip et al. 2022), můžeme pozorovat i ve střední Evropě. Nedávné rekordně vysoké teploty ze začátku ledna 2023, ničivý požár v národním parku České Švýcarsko v létě 2022 (Možný et al. 2022) či velmi suché období mezi lety 2015 a 2018 (Büntgen et al. 2021) umocněné výraznými letními vlnami veder (Lhotka, Kyselý 2022a) jsou pouze částí z celkového výčtu příkladů posledních let.

Rizika určitých extrémních situací mohou být umocněna působením dalších meteorologických jevů. Příkladem je období velmi vysokých teplot v kombinaci se srážkovým deficitem a vysokou rychlostí větru, což zvyšuje riziko požárů. V některých případech nemusí být jednotlivé jevy ze statistického hlediska nutně extrémní, jelikož klíčové je jejich společné působení. To ukázal Možný et al. (2022) na rozboru meteorologických podmínek během již zmíněného požáru v Českém Švýcarsku, během kterého byly tropické dny zaznamenány pouze výjimečně, ovšem kvůli spolupůsobení přetrvávajícího sucha a čerstvého větru se lesní požár mohl několik dní nekontrolovaně šířit. Z tohoto důvodu nese tato událost znaky tzv. sdružené události.

Sdružená událost (v angličtině compound event) je definována na základě společného působení několika přírodních faktorů, které pak negativně ovlivňují společnost a ekosystémy. Zscheischler et al. (2020) rozdělili tyto události do čtyř základních kategorií: i) předem podmíněné – jeden činitel předchází druhému (typickým příkladem jsou povodně způsobené deštěm padajícím na sněhovou pokrývku, která začne následně odtávat a umocňovat povodňovou vlnu), ii) vícerozměrné – společné působení více faktorů (například tvorba nebezpečných sněhových jazyků a závějů kvůli kombinaci nízkých teplot, vydatného sněžení a silného větru), iii) po sobě následující (příkladem mohou být dvě či více srážkově intenzivní události v krátkém intervalu, což způsobí záplavy) a iv) prostorově sdružené – kdy velkoprostorový modulátor (například El Niño – Jižní oscilace) může zapříčinit současný výskyt sucha v několika světových regionech s vážnými dopady na globální potravinovou bezpečnost.

V březnu roku 2023 skončila jedna z akcí evropské spolupráce ve vědeckém a technickém výzkumu (COST), zabývající se mechanizmy a modelováním sdružených událostí (CA17109 DAMOCLES; 2018–2023; <https://www.cost.eu/actions/CA17109/>). Akce COST slouží především ke koordinování evropského výzkumu a prohloubení vědecké spolupráce mezi jednotlivými členskými státy. Náš tým přispíval do tohoto projektu především v rámci páté pracovní skupiny zaměřené na modelování sdružených událostí, a navíc se podílel i na jeho vedení.

Cílem tohoto článku je informovat českou odbornou komunitu o možných scénářích změn vybraných sdružených událostí v budoucím klimatu, které vycházejí z výstupů navázaných na COST akci DAMOCLES a další projekty od národních poskytovatelů. Článek se zaměřuje na scénáře změn studených–větrných dnů a suchých–horkých sezon ve střední Evropě, tedy na dva příklady událostí s vážnými dopady na společnost i ekosystémy.

## 2. Použitá data – klimatické modely

Pro studium změn vlastností atmosféry při nárůstu koncentrací skleníkových plynů se používají klimatické modely, které simulují procesy probíhající v klimatickém systému. Jelikož nelze z principu zjistit, který z modelů poskytuje nejvěrohodnější projekce změny klimatu (skutečné budoucí klima nemůžeme znát), používá se soubor (ansámbl) několika modelů, který může naznačit rozsah a pravděpodobnost možných změn. Pro studium sdružených událostí bylo zpracováno 18 simulací regionálních klimatických modelů, vytvořených předními světovými modelovými centry pro iniciativu EURO-CORDEX (Jacob et al. 2020). Jelikož regionální klimatický model pracuje pouze na omezené oblasti (v našem případě Evropy a přilehlého Atlantiku), je řízen daty z globálního klimatického modelu přes okrajové podmínky. Výhodou tohoto přístupu je detailnější prostorové rozlišení v zájmové oblasti, než by mohl poskytnout samotný globální klimatický model.

Modelové simulace byly vybrány tak, aby každý ze tří regionálních klimatických modelů byl postupně spárován se třemi modely globálními (tab. 1). Další dostupné regionální klimatické modely nebyly využity, jelikož nejsou řízeny danou trojicí globálních klimatických modelů, a došlo by tak k porušení vyváženosti ansámbly modelových simulací. Vytvořený soubor celkem devíti párů klimatických modelů byl využit pro projekce budoucího klimatu podle dvou scénářů vývoje koncentrací skleníkových plynů (Representative Concentration Pathways – RCP; van Vuuren et al. 2011). Zatímco scénář RCP4.5 předpokládá od poloviny 21. století pokles antropogenních emisí skleníkových plynů, RCP8.5 uvažuje rozsáhlé využívání fosilních paliv během celého století.

Použitá modelové simulace mají prostorové rozlišení přibližně 12,5 km a jsou dostupné až do roku 2100. Tato a další data lze pro výzkumné účely bezplatně získat z portálu ESGF (Earth System Grid Federation; <https://cordex.org/data-access/esgf/>). Míra schopnosti klimatických modelů simulovat sdružené události je diskutována v kapitole 5.

**Tab. 1 Použité kombinace regionálních a globálních klimatických modelů.**

Table 1. Combinations of regional and global climate models used.

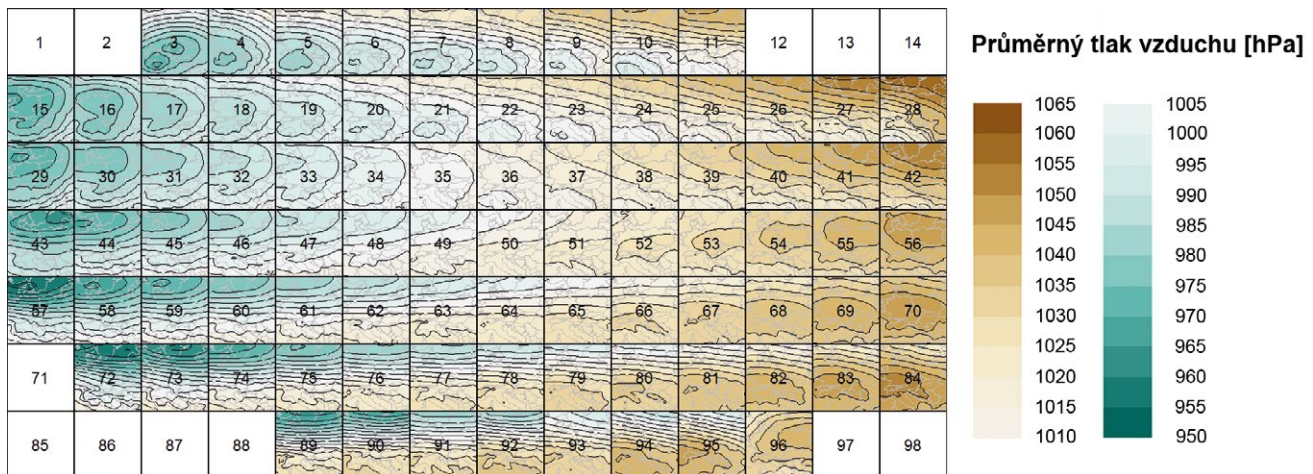
Institut	Regionální klimatický model	Globální klimatický model	#
Climate Limited-area Modelling Community (CLMcom)	COSMO-CCLM4-8-17	CNRM-CM5(r1i1p1)	1
		ICHEC-EC-EARTH (r12i1p1)	2
		MOHC-HadGEM2-ES (r1i1p1)	3
The Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)	RACMO22E	CNRM-CM5(r1i1p1)	4
		ICHEC-EC-EARTH (r12i1p1)	5
		MOHC-HadGEM2-ES (r1i1p1)	6
Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)	RCA4	CNRM-CM5(r1i1p1)	7
		ICHEC-EC-EARTH (r12i1p1)	8
		MOHC-HadGEM2-ES (r1i1p1)	9

## 3. Studené–větrné dny

Společné působení nízkých teplot vzduchu a vysoké rychlosti větru negativně ovlivňuje tepelný komfort člověka (wind chill factor) a působí problémy v dopravě (tvorba sněhových jazyků a závějí), energetice (poškození vedení vysokého napětí) i dalších sektorech.

### 3.1 Metodika

Pro analýzu byla vybrána kombinace výskytu mrazových dnů (minimální denní teplota nižší než 0 °C) s výskytem silného větru (nejvyšší denní náraz větru ve výšce 10 m větší než 12 m·s<sup>-1</sup>). Změny četnosti výskytu tohoto typu sdružených událostí mezi historickým klimatem (1970–2000) a klimatem konce 21. století (2070–2100) byly porovnány pro simulace s použitím obou výše uvedených scénářů vývoje koncentrací skleníkových plynů. Pro zjištění vazeb mezi studenými–větrnými dny a atmosférickou cirkulací byla denní pole přízemního tlaku vzduchu redukováného na hladinu moře (v období listopad až březen) klasifikována do 98 typů. Klasifikace je založena na metodě Sammonova mapování, umožňující nelineární projekci denních polí do dvoudimenzionální mapy. V Sammonově mapě jsou dny s podobnou cirkulací umístěny v těsném sousedství. Rozdělením mapy do regionů a vypočítáním průměrných polí pro každý region tedy získáváme kontinuum typů atmosférické cirkulace, což je ilustrováno na obrázku 1. Velikost regionů a hranice mezi nimi jsou cíleně zvoleny tak, aby odlišovaly vzácně se vyskytující dny s výjimečnou cirkulací vedoucí k extrémním meteorologickým jevům (okrajové regiony mapy) od tlakových polí blízkých sezonnímu průměru (velmi početné typy ve střední části mapy). Postup je detailně popsán ve studii Stryhala a Plavcové (2023).



**Obr. 1 Průměrný tlak vzduchu redukovaný na hladinu moře ve střední Evropě v jednotlivých cirkulačních typech. Každý čtverec vymezuje území 41–59° SŠ a 6–25° VD.**

Fig. 1. Mean sea level pressure over Central Europe in circulation types. Each map shows the region 41–59° N and 6–25° E.

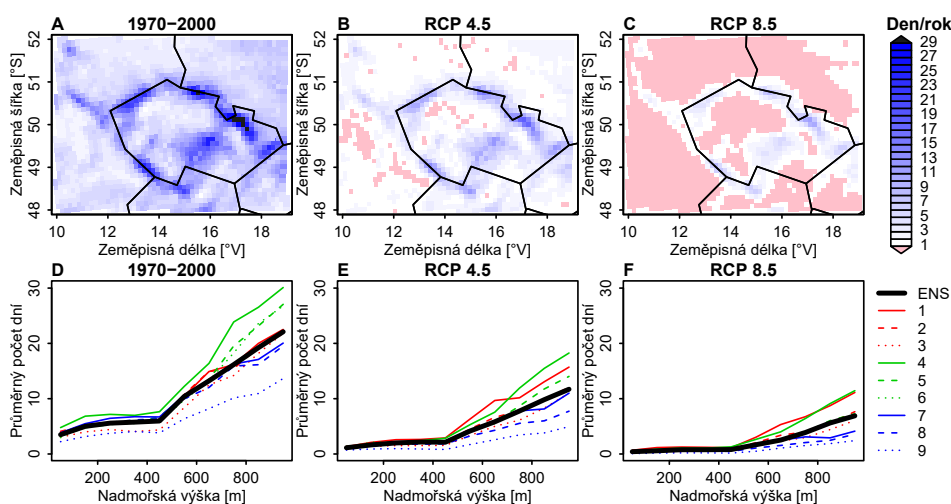
### 3.2 Četnost studených a větrných dní a její možné změny

Výskyt sdružených studených–větrných dní je silně závislý na nadmořské výšce (obr. 2A). Klimatické modely v období 1970–2000 simulují průměrně 5 takových dní za rok v nižších polohách (pod 400 m n. m.) a 18,5 dne v nadmořských výškách nad 700 m. Největší četnost studených–větrných dní je v nejvyšších oblastech Krkonoše a Jeseníků, až 37 dní za rok. V žádné oblasti neklesá v historickém období průměrná četnost pod 2 dny za rok. Nicméně rozdíly mezi jednotlivými simulacemi existují a závisí jak na konkrétním regionálním modelu, tak na řídicím modelu globálním (obr. 2D). Počet studených–větrných dní je téměř poloviční v běhu RCA4 řízeném HadGEM vůči běhu RACMO22E řízeném CNRM-CM5. Rozdíly mezi jednotlivými simulacemi se zvětšují s narůstající nadmo-

skou výškou (obr. 2D), což souvisí s obecně obtížnější simulací atmosférických procesů v horském terénu.

Na konci 21. století (2070–2100) klimatické modely udávají výrazné snížení četnosti výskytu studených–větrných dní, přičemž míra tohoto poklesu závisí především na uvažovaném scénáři vývoje koncentrací skleníkových plynů. V rámci scénáře RCP4.5 je medián změny mezi historickým a budoucím klimatem roven –64 % (5,9 vs. 2,1 dny za rok) a v případě scénáře RCP8.5 je tento pokles ještě výraznější (–86 %, 5,9 vs. 0,8 dny za rok). V modelových simulacích vychází větší relativní úbytek studených–větrných dní v nižších polohách než ve vyšších nadmořských výškách (–66 % vs. –52 % při použití RCP4.5). Tyto události se v nížinách střední Evropy tak stanou poměrně vzácnými – růžová barva na obrázku 2B–C vyznačuje oblasti, kde k těmto jevům může docházet v průměru méně než jedenkrát za rok. Nicméně je třeba zdůraznit, že rozsah budoucích průměrných hodnot v oblastech pod 400 m n. m. je poměrně velký (0,2–2,2 dny za rok) a závisí na zvoleném modelu a scénáři.

Zatímco všechny simulace v budoucím klimatu udávají oteplování a úbytek studených dní, větrných dní v zimním období v některých modelových běžích přibývá. Bylo zjištěno, že poklesy četnosti sdružených studených–větrných dnů nicméně nejdu jednoduše vysvětlit jen změnami četností studených dní a větrných dní. To znamená, že v klimatických modelech vychází nižší míra výskytu studeného a větrného počasí zároveň, než by vyplývalo pouze ze změn samostatně uvažovaných studených a větrných dnů. To vysvětlujeme na základě budoucích změn vlastností cirkulačních typů (kap. 3.3).



**Obr. 2 Průměrná roční četnost sdružených studených–větrných dní ve střední Evropě v historickém období (1970–2000) a dvou scénářích budoucího klimatu (2070–2100) a jejich vztah k nadmořské výšce v souboru modelových simulací. ENS značí medián souboru simulací, číslice odpovídají pořadí simulací v tab. 1.**

Fig. 2. Mean annual frequencies of compound cold-windy days over Central Europe in the historical run (1970–2000) and two future climate scenarios (2070–2100) and their links to altitude. ENS denotes the model ensemble median; the numbers refer to the model ranking shown in Table 1.

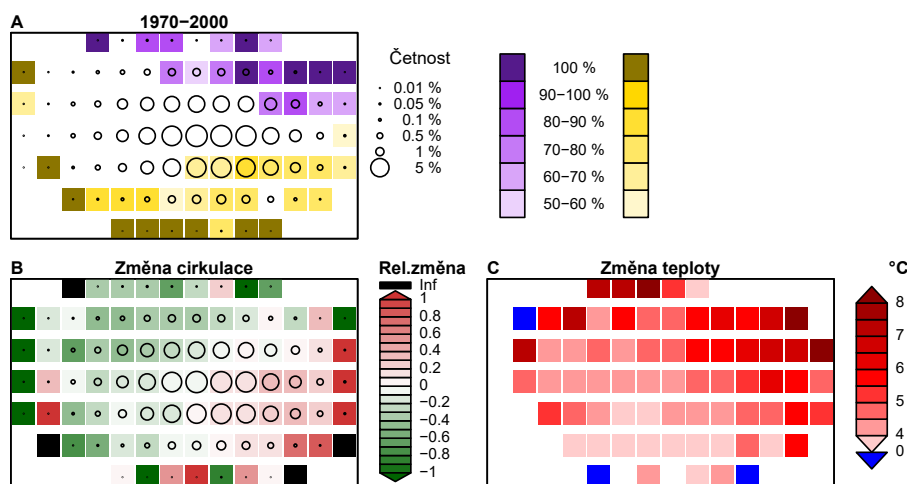


### 3.3 Vazby studených a větrných dní na atmosférickou cirkulaci

Sdružené studené–větrné dny jsou spjaty s cirkulačními typy charakterizovanými východním až jihovýchodním prouděním. Pro tyto typy je určující přítomnost anticyklony nad Skandinávským poloostrovem a/nebo cyklony v oblasti západního Středomoří (porovnání obrázků 1 a 3A). Přítomnost anticyklony s centrem nad střední Evropou, která přináší nízká denní teplotní minima, k výskytu studených a větrných dnů nevede z důvodu malých rychlostí větru. Rovněž větrné západní až se-

verozápadní proudění vznik sdružených studených a větrných dnů nepodporuje kvůli nedostatečně nízkým teplotám.

Klimatické modely udávají, že se v budoucnu změní zastoupení atmosférické cirkulace, která ke studeným a větrným sdruženým situacím vede (na obrázku 3A se jedná o cirkulační typy vyznačené fialovou barvou), ve prospěch té, která naopak s těmito situacemi spojena není (na obrázku 3A typy vyznačené žlutě). Zatímco četnost typů vedoucích ke studeným–větrným dnům (podle scénáře RCP8.5) v budoucím klimatu v průměru klesne z 6,6 % na 5,7 %, typů nepříznivých pro tyto situace v průměru přibude (z 26 % na 29 %, obr. 3B).



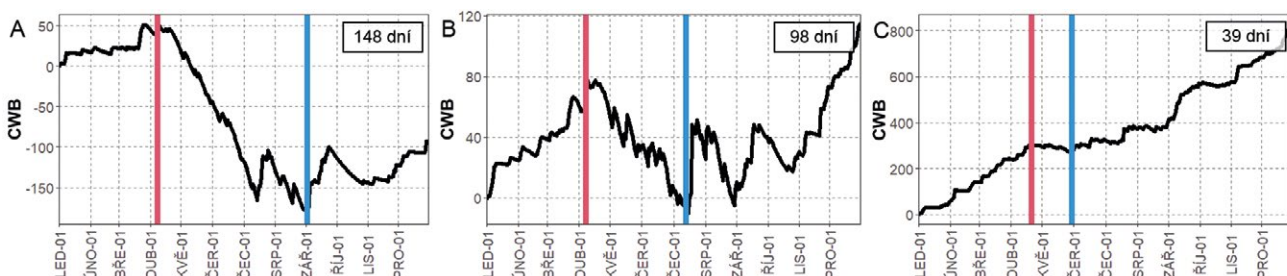
**Obr. 3 (A)** Cirkulační typy ve vztahu ke sdruženým studeným–větrným dnům v historickém klimatu. Fialové jsou znázorněny typy vedoucí k těmto dnům, žlutě typy nepříznivé. Barevná škála značí, jaké procento modelů se shoduje na statisticky významném vztahu, velikost kruhu udává průměrnou sezonní četnost cirkulačního typu. **(B)** Relativní změna četnosti typu mezi budoucím (RCP8.5, 2070–2100) a historickým klimatem. Černá barva značí typy zastoupené pouze v budoucím klimatu. Hodnota 1 odpovídá 100% změně (zdvojnásobení četnosti) vůči historickému klimatu. **(C)** Jako **(B)**, ale pro změnu průměrné denní minimální teploty. Řazení typů odpovídá obr. 1.

Fig. 3. (A) Circulation types conducive (magenta) and non-conductive (yellow) to compound cold-windy days in historical climate simulations. The colour scale shows the percentage of models that agree on a statistically significant relationship; the size of the symbol shows the mean seasonal circulation type frequency. (B) Relative change in circulation type frequency between future (RCP8.5, 2070–2100) and historical climates. Black colour denotes types that occur only in the future climate. The value of 1 corresponds to the 100% change (doubling the frequency) with respect to the historical climate. (C) As in (B), except for change in mean daily minimum temperature. Ordering of types as in Figure 1.

## 4. Suché–horké sezony

### 4.1 Metodika

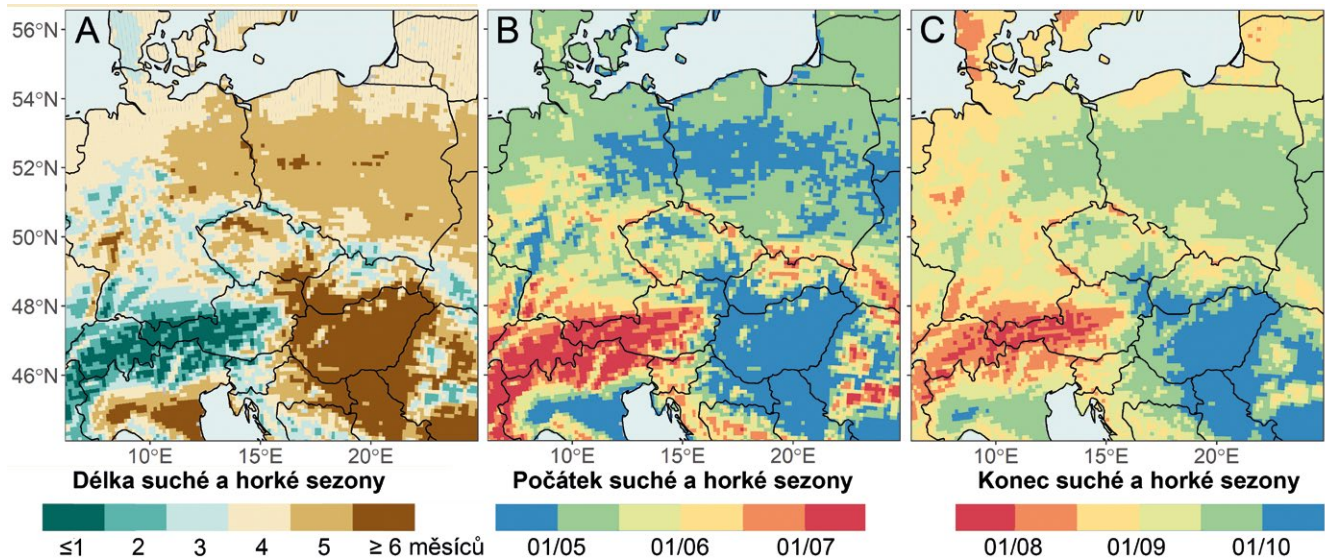
Na rozdíl od předchozího typu sdružených událostí je obtížné analyzovat kombinaci sucha a horka v denním kroku. Sucho je totiž na rozdíl od meziden- ních změn teploty vzduchu typické svým pozvolným nástu-



**Obr. 4** Ukázka vymezení suchých–horkých sezon v součtových řadách denních rozdílů mezi srážkami a potenciální evapotranspirací (Climatic Water Balance; CWB). Příklad dat E-OBS (Cornes et al. 2018) z roku 2001 pro **(A)** jižní Moravu (~49° SŠ, 17° VD), **(B)** Českomoravskou vrchovinu (~50° SŠ, 16° VD), a **(C)** podhůří Krkonoš (~50,5° SŠ, 16° VD). Červená (modrá) svislá čára označuje počátek (konec) suché–horké sezony. Číslo v pravém horním rohu jednotlivých panelů značí její délku.

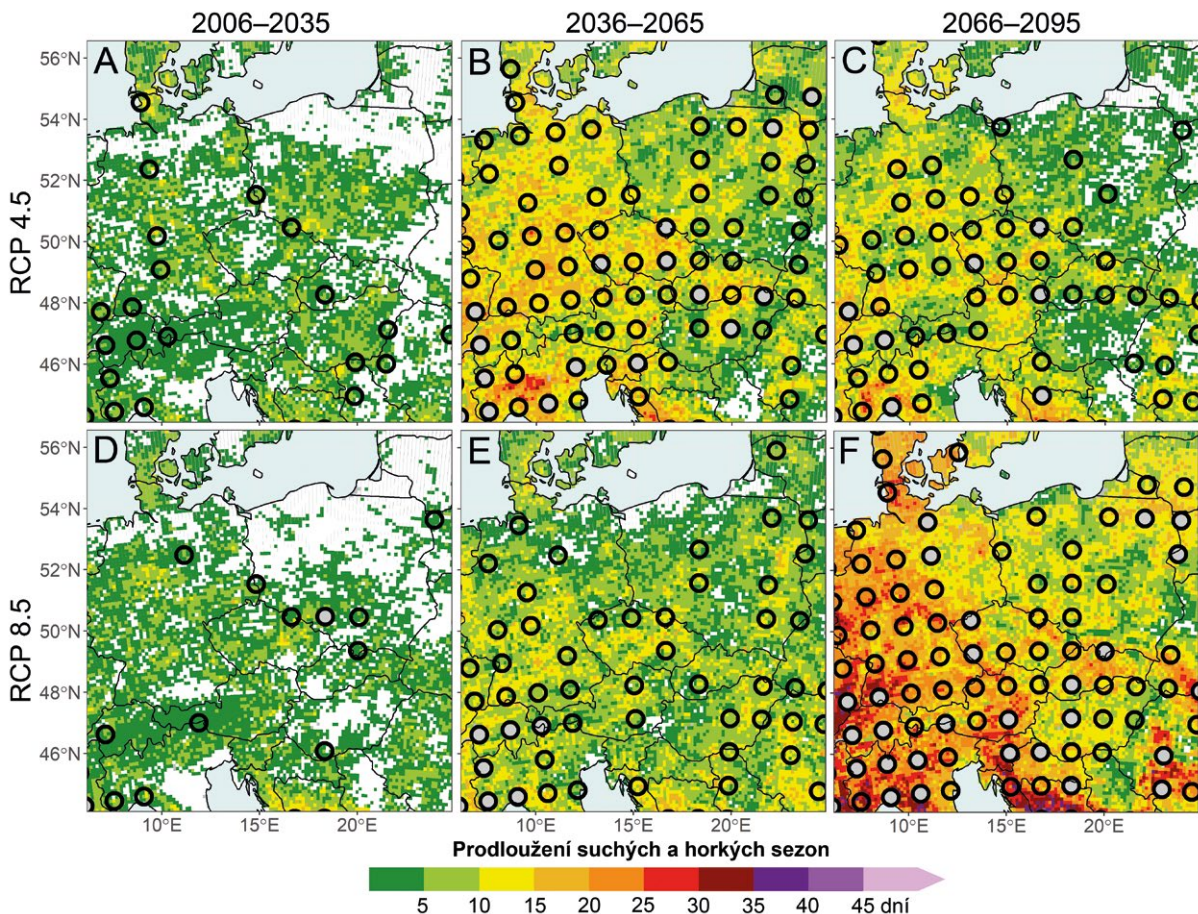
Fig. 4. Definition of dry-hot seasons using cumulative sum series of daily differences between precipitation and potential evapotranspiration (Climatic Water Balance, CWB). Examples from the E-OBS data (Cornes et al. 2018) for year 2001 for (A) South Moravia (~49° N, 17° E), (B) Bohemian-Moravian Highlands (~50° N, 16° E), and (C) foothills of the Krkonoše Mountains (~50,5° N, 16° E). Red (blue) vertical line indicates an onset (termination) of dry-hot season. Number in the upper-right edge of the panel represents its length.





**Obr. 5** Sdružené suché–horké sezony v modelových simulacích pro historické období (1976–2005). Medián jejich (A) délek, (B) data počátku a (C) data konce.

Fig. 5. Compound dry–hot seasons in model simulations for the historical period (1976–2005). (A) median length, (B) median date of the beginning, (C) median date of the end.



**Obr. 6** Simulované změny délky sdružených suchých–horkých sezon mezi historickým obdobím 1976–2005 a budoucími obdobími 2006–2035, 2036–2065 a 2066–2095 na základě scénářů vývoje koncentrací skleníkových plynů RCP4.5 (A–C) a 8.5 (D–F). Bílá barva znázorňuje místa, kde nedochází k prodloužení. Plná (prázdná) kolečka označují regiony, kde všechny (alespoň 7 z 9) modelové simulace předpokládají prodloužení suchých–horkých sezon (pro lepší přehlednost byl vyhodnocován každý desátý uzlový bod v poledníkovém i rovnoběžkovém směru).

Fig. 6. Changes in the length of compound hot–dry seasons in 2006–2035, 2036–2065 and 2066–2095, relative to the historical period (1976–2005), based on RCP4.5 (A–C) and RCP8.5 (D–F). White areas show no extensions. Filled (empty) circles denote regions in which all (at least 7 out of 9) model simulations project extensions of the seasons (for better clarity, every tenth grid point was evaluated in the meridian and parallel direction).



pem i odezněním (Singh et al. 2021). Z tohoto důvodu byly místo jednotlivých dní zkoumány vlastnosti tzv. sdružených suchých–horkých sezon, které byly definovány jako období prohlubujícího se vláhového deficitu. Tyto sezony bývají ve střední Evropě několik týdnů až měsíců dlouhé a určují období náchylné k výskytu sucha a horka. Vláhová bilance byla stanovována na denní škále na základě rozdílu mezi množstvím srážek a potencionální evapotranspirací odhadovanou na základě Oudinovy metody (Oudin et al. 2005). Z těchto denních rozdílů byly vytvořeny roční součtové řady pro určení počátku a konce suché a horké sezony na základě největšího rozdílu mezi lokálním maximem a následným minimem v součtové řadě (obr. 4).

## 4.2 Délka suchých–horkých sezon a jejich možné změny

Medián délek sdružených suchých–horkých sezon v historickém období (1976–2005), simulovaný souborem klimatických modelů (tab. 1), je znázorněn na obr. 5A. Ve střední Evropě se pohybuje v rozmezí od několika týdnů ve vrcholových částech hor po více než půl roku v nížinách. S tím souvisí rozdílné počátky (obr. 5B) a konce (obr. 5C) suchých–horkých sezon. Zatímco ve středoevropských nížinách trvají od dubna do září až listopadu (třicetiletý medián), na horách jsou omezeny pouze na letní měsíce.

V následujícím kroku byly vyhodnoceny rozdíly mediánu délek sdružených suchých–horkých sezon mezi historickým (1976–2005) a třemi budoucími obdobími (2006–2035, 2036–2065 a 2066–2095) pro scénáře vývoje koncentrací skleníkových plynů RCP4.5 a 8.5. Simulované změny mediánu se liší na základě zkoumaného období, scénáře RCP i zájmového regionu (obr. 6). Ve střední Evropě je prodloužení suchých–horkých sezon patrné již v období 2006–2035, které by se dalo označit jako simulované současné klima. Modelové výsledky jsou tak v souladu s pozorovanými trendy nárůstu teploty vzduchu a sucha (Jaagus et al. 2022). Průměrné prodloužení suchých–horkých sezon (na základě průměru z devíti modelových simulací) je však v tomto období relativně malé (5–10 dní, obr. 6A,D).

Klimatické modely předpokládají pokračování trendu vysušování středoevropské krajiny i nadále. V rámci scénáře RCP4.5 je pro období 2036–2065 simulován nárůst mediánu délky suchých–horkých sezon až o 20 dní. Pro scénář RCP8.5 je jejich prodloužení překvapivě méně výrazné (5–15 dní; obr. 6B,E), což je způsobeno simulovaným nárůstem srážek, který kompenzuje zvyšování teploty. Na konci 21. století (2066–2095) jsou změny suchých–horkých sezon velmi odlišné v závislosti na použitém scénáři vývoje koncentrací skleníkových plynů. Zatímco v rámci RCP4.5 k jejich dalšímu prodloužení oproti předchozímu období 2036–2065 nedochází (obr. 6B,C), pro scénář RCP8.5 je změna délky suchých–horkých sezon velmi nápadná (+15–30 dní oproti 1976–2005; obr. 6F), což by v některých lokalitách znamenalo o třetinu delší suché–horké sezony.

## 5. Diskuse a závěr

V článku byly představeny projekce poklesu četnosti sdružených studených–větrných dní v zimě a prodloužení suchých–horkých sezon v teplé části roku. Při interpretaci těchto projekcí je ale třeba přihlídnout k nejistotám, které jsou s nimi

spjaty – míra nárůstu globální teploty je totiž v jednotlivých klimatických modelech různá a navíc úzce souvisí s budoucím vývojem koncentrací skleníkových plynů v atmosféře. Proto byl pro určení středních hodnot budoucích změn studených–větrných dnů a suchých–horkých sezon použit soubor modelových simulací, využívající jak scénář koncentrací skleníkových plynů RCP4.5, tak RCP8.5 (van Vuuren et al. 2011). Je třeba ale zdůraznit, že tyto dva scénáře nepostihují všechny možné směry vývoje skleníkových plynů v atmosféře, jelikož socio-ekonomický vývoj společnosti, zpětné vazby klimatického systému nebo změny v ukládání uhlíku v oceánech jsou velmi obtížně předvídatelné (IPCC 2021). Uvažování velkého množství takovýchto scénářů by navíc neúměrně prodloužilo výpočetní dobu modelových simulací.

Vybraný soubor modelových simulací (tab. 1) byl před výpočtem budoucích projekcí validován na historických datech. Plavcová a Kyselý (2019) zjistili, že simulované vazby mezi atmosférickou cirkulací a studenými dny v regionálních klimatických modelech (včetně těch použitých v tomto článku) relativně dobře odpovídají pozorovaným datům. Použité regionální klimatické modely byly také schopny reprodukovat negativní korelace mezi teplotou vzduchu a srážkami v létě, nicméně tento vztah byl o něco těsnější než v pozorovaných datech (Lhotka, Kyselý 2022b). Simulované suché–horké sezony měly tendenci být v historickém období o něco kratší z důvodu jejich pozdního počátku, nicméně tento nedostatek se projevoval spíše ve Středomoří a západní Evropě.

Věrohodnost modelových simulací potvrzuje i studie od Ridderové et al. (2020), která prokázala relativně dobrou schopnost klimatických modelů reprodukovat sdružené deštivé–větrné a suché–horké události mimo jiné i v Evropě.

Pro budoucí změny obou analyzovaných typů sdružených událostí ve střední Evropě byl důležitější nárůst teploty než změny v charakteristikách větru či srážek. Například prodloužení suchých–horkých sezon v modelových simulacích odpovídá pozorovanému trendu nárůstu tropických dnů ve střední Evropě (Zahradníček et al. 2022). Na druhou stranu jsme ale také ukázali, že vedle změny počtu mrazových dnů mohou mít na počet studených–větrných dní v budoucnosti vliv i změny atmosférické cirkulace a vazeb mezi přízemním klimatem a cirkulačními typy (například jejich rozdílné oteplování). V budoucím klimatu tedy očekáváme pokles výskytu nebezpečných zimních studených–větrných dnů, které mohou na konci 21. století z nížin téměř vymizet, i v důsledku poklesu četnosti cirkulačních typů pro tyto události příznivých. Na druhou stranu klimatické modely předpokládají pokračování trendu vysušování středoevropské krajiny v teplé části roku, a to především z důvodu nárůstu teploty vzduchu (podobně jako v dalších světových regionech, He et al. 2021). Vyšší teplota vzduchu vede k vyššímu výparu, který podle většiny modelových simulací nebude dostatečně kompenzován vyššími úhrny srážek.

Pokračující vysušování krajiny bude znamenat nutnost přijetí adaptačních opatření nejen ve vodohospodářství, ale i v zemědělství, lesnictví a dalších sektorech. Návrhy a zhodnocení konkrétních adaptačních opatření jsou mimo možnosti tohoto krátkého článku, stejně tak jako analýza dalších typů sdružených událostí. Například přímořské oblasti jsou čím dál častěji ohrožovány kombinací rostoucí hladiny moře, bouřlivého přílivu a povodňových vln přicházejících z vnitrozemí. Další podrobné analýzy a budoucí projekce sdružených událostí, spolu s tvorbou varovných systé-

mů a návrhem vhodných adaptačních opatření, představují výzvy do dalších let, které navážou na nedávno skončenou COST akci DAMOCLES.

### Poděkování:

Analýza studených a větrných dnů byla provedena za podpory Grantové agentury České republiky (GA ČR; projekt číslo GJ-19-24425Y, řešitelka E. Plavcová). Změny suchých a horkých sezon byly zkoumány v rámci projektu GA20-28560S (řešitel J. Kyselý) od stejného poskytovatele. Rámec studie sdružených událostí byl vytvořen během COST akce CA17109 DAMOCLES a navázaného projektu INTERCOST (LTC19044, řešitel O. Lhotka) financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR. Autoři děkují také iniciativě CORDEX za volně dostupné modelové simulace.

### Literatura:

- BÜNTGEN, U., URBAN, O., KRUSIC, P. J., RYBNÍČEK, M., KOLÁŘ, T. et al., 2021. Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. *Nature Geosciences*, roč. **14**, s. 190–196. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00698-0>.
- CORNES, R., VAN DER SCHRIER, G., VAN DEN BESSELAAR, E. J. M., JONES, P., 2018. An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, roč. **123**, s. 9391–9409. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>.
- HE, Y., FANG, J., XU, W., SHI, P., 2021. Substantial increase of compound droughts and heatwaves in wheat growing seasons worldwide. *International Journal of Climatology*, roč. **42**, s. 5038–5054. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.7518>.
- 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. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- JAAGUS, J., AASA, A., ANISKEVICH, S., BOINCEAN, B., BOJARIU, R. et al., 2022. Long-term changes in drought indices in eastern and central Europe. *International Journal of Climatology*, roč. **42**, s. 225–249. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.7241>.
- JACOB, D., TEICHMANN, C., SOBOLOWSKI, S., KATRAGKOU, E., ANDERS, I. et al., 2020. Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. *Regional Environmental Change*, roč. **20**, č. článku 51. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01606-9>.
- LHOTKA, O., KYSELÝ, J., 2022a. The 2021 European heat wave in the context of past major heat waves. *Earth and Space Science*, roč. **9**, č. článku e2022EA002567. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2022EA002567>.
- LHOTKA, O., KYSELÝ, J., 2022b. Precipitation–temperature relationships over Europe in CORDEX regional climate models. *International Journal of Climatology*, roč. **42**, s. 4868–4880. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.7508>.
- MOŽNÝ, M., OUŠKOVÁ, V., VLACH, V., HÁJKOVÁ, L., 2022. Výjimečný přírodní požár v Národním parku České Švýcarsko v létě 2022. *Meteorologické zprávy*, roč. **75**, č. 5, s. 144–150. ISSN 0026-1173.
- LOUDIN, L., HERVIEU, F., MICHEL, C., PERRIN, C., ANDRÉASSIAN et al., 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? *Journal of Hydrology*, roč. **303**, s. 290–306. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>.
- PHILIP, S. Y., KEW, S. F., VAN OLDENBORGH, G. J., ANSLOW, F. S., SENEVIRATNE, S. I. et al., 2022. Rapid attribution analysis of the extraordinary heat wave on the Pacific coast of the US and Canada in June 2021, *Earth System Dynamics*, roč. **13**, s. 1689–1713. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/esd-13-1689-2022>.
- PLAVCOVÁ, E., KYSELÝ, J., 2019. Temporal Characteristics of Heat Waves and Cold Spells and Their Links to Atmospheric Circulation in EURO-CORDEX RCMs. *Advances in Meteorology*, roč. **2019**, č. článku 2178321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2019/2178321>.
- RIDDER, N. N., PITMAN, A. J., UKKOLA, A. M., 2020. Do CMIP6 Climate Models Simulate Global or Regional Compound Events Skillfully? *Geophysical Research Letters*, roč. **48**, č. článku e2020GL091152. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2020GL091152>.
- STRYHAL, J., PLAVCOVÁ, E., 2023. On using self-organizing maps and discretized Sammon maps to study links between atmospheric circulation and weather extremes. *International Journal of Climatology*, Vol. **43**, s. 2678–2698. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.7996>.
- SINGH, C., JAIN, G., SUKHWANI, V., SHAW, R., 2021. Losses and damages associated with slow-onset events: urban drought and water insecurity in Asia. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, roč. **50**, s. 72–86. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.02.006>.
- STOTT, P. A., CHRISTIDIS, N., OTTO, F. E. L., SUN, Y., VANDERLINDEN, J.-P. et al., 2016. Attribution of extreme weather and climate-related events. *WIREs Climate Change*, roč. **7**, s. 23–41. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/wcc.380>.
- VAN VUUREN, D. P., EDMONDS, J., KAINUMA, M., RIAHI, K., THOMSON, A. et al., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, roč. **109**, č. článku 5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
- ZAHRADNÍČEK, P., BRÁZDIL, R., ŘEHOŘ, J., LHOTKA, O., DOBROVOLNÝ, P. et al., 2022. Temperature extremes and circulation types in the Czech Republic, 1961–2020. *International Journal of Climatology*, roč. **42**, s. 4808–4829. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.7505>.
- ZSCHEISCHLER, J., MARTIUS, O., WESTRA, S., BEVACQUA, E., RAYMOND, C. et al., 2020. A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth & Environment*, roč. **1**, s. 333–347. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z>.

### Lektoři (Reviewers):

RNDr. Radim Tolasz, Ph.D., doc. Mgr. Peter Huszár, Ph.D.