



renew
europe.



Sucho na Slovensku

*od dnešného stavu k dvom budúcnostiam podľa
scenárov klimatickej zmeny*

Skrátená verzia

Authors: Mgr. Jozef Pecho / Ing. Viera Rattayová, PhD.

Research Authors

Mgr. Jozef Pecho, klimatológ — scenáre zmeny klímy, downscaling CMIP6, hodnotenie klimatických rizík

Ing. Viera Rattayová, PhD., hydrologička — hydroklimatológia a analýza prietokov

Spracovateľ

O spracovateľovi — Regionálny klimatický inštitút (RCI / Regioclim)

Štúdiu vypracoval Regionálny klimatický inštitút (RCI / Regioclim) — nezávislé klimatologicko-hydrologické pracovisko (Regioclim s.r.o. a rovnomenná nezisková organizácia), ktoré spája akademickú expertízu s aplikovaným hodnotením klimatických rizík. RCI sa venuje regionálnej klimatológii a hydroklimatológii, štatistickému spresňovaniu (downscalingu) globálnych klimatických modelov CMIP6 a tvorbe územne konkrétnych, policy-relevantných podkladov pre samosprávy, štátnu správu i súkromný sektor — od scenárových projekcií teploty, zrážok a sucha cez hodnotenie zraniteľnosti až po návrhy adaptačných opatrení. Cieľom inštitútu je sprístupniť kvalitné klimatické dáta a ich interpretáciu tým, ktorí na ich základe rozhodujú. Viac na www.regioclim.eu.

Hlavnými autormi štúdie sú Mgr. Jozef Pecho (klimatológ — scenáre zmeny klímy, downscaling CMIP6, hodnotenie klimatických rizík) a Ing. Viera Rattayová, PhD. (hydrologička — hydroklimatológia a analýza prietokov), s odbornou podporou výskumného tímu RCI.

Contributors

Odborný tím Regionálneho klimatického inštitútu (RCI / Regioclim)

Publication date

jún 2026

Table of Contents

Úvod.....	04
Introduction.....	05
1 Stručné zhrnutie.....	06
2 Úvod: čo je sucho a prečo práve Slovensko.....	07
3 Sucho na Slovensku dnes (pozorované trendy 1961 – 2025).....	08
4 Klimatické scenáre = scenáre emisií skleníkových plynov.....	10
5 Budúce sucho na Slovensku — kde, kedy a koľko.....	11
6 Dopady na poľnohospodárstvo a lesníctvo.....	13
7 Dostupnosť vody pre obyvateľov.....	14
8 Adaptácia — čo robiť a čo sa stane, ak nekonáme.....	15
9 Dve Slovenská v roku 2080.....	16
10 Záver — kľúčové posolstvá.....	17
English summary.....	18
Kľúčové zdroje.....	19
Obrázky.....	20

Úvod

Ako vlastne dopadne klimatická zmena na naše životy? Ako si predstaviť rozdiel medzi oteplením svetovej klímy o menej ako 2 stupne Celzia, alebo viac ako 3? Ved' to nevyzerá ako veľký rozdiel. Práve preto je klimatická zmena, ktorú spôsobujeme hlavne spaľovaním fosílnych palív, pre mnohých ľudí ťažko uchopiteľná. Je ťažké predstaviť si súvislosť medzi extrémnymi prejavmi počasia ako sú intenzívnejšie obdobia sucha a zmenou klímy. Povedomie verejnosti je v súčasnosti navyše negatívne zasahované rôznymi dezinformačnými internetovými stránkami, trollými farmami, a ideologicky motivovanými popieračmi vedeckých poznatkov o zmene klímy.

Tento problém sa prejavil aj počas výrazného obdobia sucha na jar tohto roku na Slovensku. Mnoho ľudí sa obrátilo na mňa s otázkou, či, ako a v akej miere súvisí súčasná zmena klímy so závažným suchom na Slovensku, ako ho môže zmena klímy do budúcnosti ovplyvniť. Tieto otázky rezonovali aj vo verejnej diskusii a neboli dostatočne zodpovedané.

Situáciu na Slovensku zhoršuje v posledných rokoch aj spochybňovanie klimatickej vedy zo strany ministra životného prostredia a ďalších predstaviteľov vládnej koalície. To prispelo aj k zníženiu financovania odborných inštitúcií verejnej správy, ktoré sú zodpovedné za monitoring, hodnotenia a komunikáciu súvisiacu s podnebí, zmenou klímy a extrémnymi prejavmi počasia, ako aj prepustenie skúsených odborníkov, odborníčok a následne oslabenie odborných kapacít inštitúcií verejnej správy, ktoré sa odborne zaoberajú klímou a klimatickou zmenou.

Dlhodobu sa venujem osvete a komunikácii vedeckých poznatkov o zmene klímy a otázkam súvisiacim s posilňovaním odolnosti spoločnosti voči jej dôsledkom. Ako podpredseda Európskeho parlamentu, člen skupiny Renew Europe a člen Výboru pre životné prostredie, verejné zdravie a bezpečnosť potravín (ENVI) považujem problematiku zmeny klímy, ochrany životného prostredia a adaptácie na meniace sa klimatické podmienky za jednu zo svojich hlavných priorít. Aj preto dlhodobo presadzujem, aby boli rozhodnutia prijímané na európskej a národnej úrovni založené na najlepších dostupných vedeckých poznatkoch a aby Slovenská republika disponovala kvalitnými odbornými podkladmi o tom, ako sa meniaci klíma prejavuje na našom území a aké opatrenia sú potrebné na zmiernenie jej negatívnych dôsledkov a zvýšenie odolnosti spoločnosti, hospodárstva a krajiny.

Ďalším dôvodom pre zadanie vypracovania tejto analýzy bol Európskou komisiou pripravovaný balík opatrení pre zvýšenie odolnosti na vplyvy zmeny klímy a riadenia rizík (Climate Resilience and Risk Management Package), ktorého zverejnenie je naplánované na koniec roka 2026. Predmetný rámec má zosúladiť posudzovanie klimatických rizík, prispôbenie sa na nich vo všetkých členských štátoch EÚ a zavádza opatrenia pre zmiernenie vplyvov zmeny klímy na zdravie, infraštruktúru a hospodárstvo. Zmena klímy však bude mať v rôznych častiach Európy a rôznych krajinách rôzne vplyvy a dôsledky, preto je dôležité, aby decízia v každej krajine získavala čo najpresnejšie informácie o vplyve zmeny klímy na jej územie, vrátane jej vplyvu na zvyšovanie častosti a intenzity extrémnych prejavov počasia, vrátane období sucha. V optimálnom prípade je potrebné tieto informácie konkretizovať aj na úroveň regiónov v jednotlivých štátoch. Pre Slovensko a jeho regióny je dôležité poznať aká je súčasná prepojenosť zmeny klímy s obdobiami sucha a aké bude mať zmena klímy vplyvy na intenzitu a dĺžku období sucha v budúcnosti v závislosti podľa množstva skleníkových plynov, ktoré ľudstvo ešte vypustí. Táto analýza mi umožní pracovať na pripomienkovaní tohto balíka Komisie tak, aby čo najviac zohľadňoval problémy, ktorým čelí Slovensko. Taktiež verím, že pomôže ovplyvniť postoje k budúcnému viacročnému rozpočtu EÚ a pomôže tak presadiť lepšie financovanie adaptačných opatrení.

Preto som zabezpečil vypracovanie tejto analýzy slovenskými klimatológmi, klimatologičkami a hydrologičkami z Regionálneho klimatického inštitútu – Regioclim s. r. o. Cieľom tejto štúdie je poskytnúť decíznej sfére na Slovensku, a laickej verejnosti, zrozumiteľný dokument o súčasnom stave a budúcich projekciách sucha na Slovensku v súvislosti so zmenou klímy, vrátane regionálne rozpísaných vplyvov zmeny klímy na intenzitu, častosť a trvanie období sucha a o potrebných opatreniach adaptácie sa na tieto negatívne vplyvy.

Táto analýza tiež pomôže mne a mojim kolegom poslancom a poslankyniam Európskeho parlamentu za Slovensko predniesť pozmeňujúce návrhy k návrhom Európskej komisie v rámci balíka Klimatická odolnosť a manažment rizík (Climate Resilience and Risk Management Package) a Viacročný finančný rámec (Multiannual Financial Framework) 2028 – 2034 tak, aby čo najlepšie odrážali potreby a podmienky Slovenskej republiky a predmetný balík opatrení bol šitý na mieru aj potrebám Slovenska.

Mgr. Martin Hojsík
podpredseda Európskeho parlamentu
člen skupiny Renew Europe

Introduction

How will climate change actually affect our lives? How can we visualize the difference between global warming of less than 2 degrees Celsius and more than 3? After all, it doesn't seem like much. That is precisely why climate change—which we are causing mainly by burning fossil fuels—is difficult for many people to grasp. It's hard to imagine the connection between extreme weather events—such as more intense droughts—and climate change. Moreover, public awareness is currently being negatively influenced by various disinformation websites, troll farms, and ideologically motivated deniers of scientific findings on climate change.

This problem was also evident during the severe drought in Slovakia this past spring. Many people have asked me whether, how, and to what extent current climate change is linked to the severe drought in Slovakia, and how climate change might affect it in the future. These questions have also been raised in public discourse but have not been adequately addressed.

In recent years, the situation in Slovakia has also been exacerbated by the Environment Minister and other representatives of the governing coalition casting doubt on climate science. This has also contributed to a reduction in funding for specialized public administration institutions responsible for monitoring, assessment, and communication related to the climate, climate change, and extreme weather events, as well as the dismissal of experienced experts and the resulting weakening of the technical capacity of public administration institutions that specialize in climate and climate change.

For many years, I have been engaged in raising awareness and communicating scientific knowledge about climate change, as well as issues related to strengthening society's resilience to its impacts. As a Vice-President of the European Parliament, a member of the Renew Europe Group and a member of the Committee on the Environment, Public Health and Food Safety (ENVI), I regard climate change, environmental protection, and adaptation to changing climatic conditions as among my main priorities. This is why I have consistently advocated for decisions at both the European and national levels to be based on the best available scientific evidence and for the Slovak Republic to have access to high-quality expert assessments on how the changing climate is affecting our territory and what measures are needed to mitigate its adverse impacts and enhance the resilience of society, the economy, and the environment.

Another reason for commissioning this analysis was the Climate Resilience and Risk Management Package being prepared by the European Commission, which is scheduled for publication at the end of 2026. This framework aims to harmonize the assessment of and adaptation to climate risks across all EU member states and introduces measures to mitigate the impacts of climate change on health, infrastructure, and the economy. However, climate change will have varying impacts and consequences in different parts of Europe and in different countries; therefore, it is important for decision-makers in each country to obtain the most accurate information possible about the impact of climate change on their territory, including its impact on the increasing frequency and intensity of extreme weather events, such as droughts. Ideally, this information should also be broken down to the regional level within individual countries. For Slovakia and its regions, it is important to understand the current link between climate change and droughts, as well as how climate change will affect the intensity and duration of future droughts depending on the amount of greenhouse gases humanity will still emit. This analysis will enable me to provide feedback on the Commission's package in a way that takes the challenges facing Slovakia into account as much as possible. I also believe it will help shape attitudes toward the future EU multiannual budget and thus help secure better funding for adaptation measures.

That is why I commissioned this analysis from Slovak climatologists and hydrologists at the Regional Climate Institute—Regioclim s. r. o. The aim of this study is to provide decision-makers in Slovakia, and the general public, with a clear and accessible document on the current state and future projections of drought in Slovakia in the context of climate change, including regionally detailed impacts of climate change on the intensity, frequency, and duration of drought periods, as well as the necessary adaptation measures to address these negative impacts.

This analysis will also help me and my fellow Members of the European Parliament representing Slovakia to table amendments to the European Commission's proposals within the Climate Resilience and Risk Management Package and the Multiannual Financial Framework (Multiannual Financial Framework) 2028–2034 so that they best reflect the needs and conditions of the Slovak Republic and so that the package of measures in question is tailored to Slovakia's needs as well.

Mgr. Martin Hojsík
Vice-President of the European Parliament
Member of Renew Europe Group

1 Stručné zhrnutie

Sucho sa na Slovensku za posledné desaťročia zreteľne zhoršuje, predovšetkým v nížinách. Rozhodujúcou príčinou nie je pokles zrážok, ale otepľovanie a s ním spojený rast výparu. Táto štúdia zhŕňa súčasný stav, premieta emisné scenáre do „scenárov sucha“ a opisuje dopady aj možnosti adaptácie po regiónoch Slovenska. Kľúčové zistenia:

- Hlavnou príčinou sucha je rastúca teplota vzduchu, nie nedostatok zrážok. Priemerná ročná teplota vzrástla od roku 1961 približne o 1,5 °C; teplejší vzduch odčerpáva z pôdy a rastlín viac vody, takže krajina vysychá aj pri nezmenených zrážkach.
- Rozsah budúceho sucha závisí od emisií. Pri ambicióznej mitigácii (~+1,6 °C) ostávajú zmeny adaptovateľné; pri vysokých emisiách (~+4,6 °C) sa nížiny dostávajú do chronického sucha. Riziko sucha pritom porastie vo všetkých scenároch.
- Najohrozenejšie sú južné nížiny a letná polovica roka. Index dlhodobého sucha (SPEI-12) v Podunajskej nížine klesá z dnešných mierne vlhkých hodnôt hlboko do záporu; index aridity sa pri vysokých emisiách zvyšuje o vyše 50 %.
- Dopady sú prierezové. Dopady zasiahnu poľnohospodárstvo (nižšie a kolísavejšie úrody, rastúca potreba závlah), lesy (rozpad smrečín, vyššie riziko požiarov) aj zásobovanie vodou (klesajúce letné prietoky, tlak na Žitný ostrov).
- Sucho sa strieda s privalovými povodňami. Teplejšia atmosféra medzi dažďami krajinu rýchlejšie vysušuje, no keď zaprší, uvoľní naraz viac vody.
- Adaptácia má zmysel vo všetkých scenároch, ale čas je rozhodujúci. Opatrenia s dlhým horizontom (premena lesov, rekonštrukcia závlah, ochrana podzemných vôd) musia začať dnes; každý rok odkladu zvyšuje budúce náklady.

2 Úvod: čo je sucho a prečo práve Slovensko

Sucho je dočasný nedostatok vody oproti podmienkam, na ktoré je dané územie, jeho príroda aj spoločnosť dlhodobo prispôbené — teda dočasná odchýlka od normálu. Práve táto relatívnosť je dôležitá: sucho nie je to isté ako aridita, ktorá je trvalým znakom suchej klímy (púšte sú aridné stále, nie preto, že im práve chýba voda, ale preto, že jej nikdy nemajú dosť). Slovensko nie je a v dohľadnom horizonte ani nebude aridnou krajinou; je však krajinou, ktorá čoraz častejšie a na dlhšie upadá do stavu sucha. Sucho má aj druhú črtu, ktorá ho odlišuje od iných prírodných ohrození: je to „plíživý“ jav, ktorý sa rozvíja týždne až mesiace a často si ho všimneme až vtedy, keď už spôsobuje škody — keď vyschnú polia, klesnú hladiny studní a riek alebo sa obmedzí zásobovanie vodou.

Sucho nie je jeden jav, ale reťazec javov, ktoré na seba nadväzujú s časovým oneskorením. Na začiatku stojí meteorologické sucho (nedostatok zrážok, spravidla v kombinácii s vyššou teplotou a výparom). Ak deficit pretrváva, prechádza do pôdneho (poľnohospodárskeho) sucha, keď v koreňovej zóne nezostáva dosť vlhky pre rastliny. Ďalej nasleduje hydrologické sucho (nízke prietoky riek a klesajúce zásoby povrchových aj podzemných vôd) a napokon socioekonomické sucho, keď nedostatok vody zasiahne hospodárstvo a obyvateľstvo. K týmto štyrom typom pribúdajú dva čoraz relevantnejšie pojmy: ekologické sucho (lesy a ekosystémy) a rýchle „bleskové“ sucho, prudký nástup pôdneho sucha počas vln horúčav. Časové oneskorenie je dôležité — kým meteorologické sucho môže odznieť po pár výdatnejších zrážkach, hydrologické sucho a deficit podzemných vôd môžu trvať ešte mesiace.

Slovensko leží v strednej Európe, v prechodovej zóne medzi vlhúcim severom kontinentu a vysychajúcim Stredomorím. Práve preto je sucho u nás komplexný a zložito definovateľný jav: pri pohľade na samotné ročné úhrny zrážok nemusí byť signál dramatický, rozhodujúcim faktorom je rastúca „odparovacia“ požiadavka atmosféry. Teplejší vzduch dokáže pojať viac vodnej pary, a preto z krajiny odčerpáva viac vody — pôda, rastliny aj toky vysychajú aj vtedy, keď spadne podobné množstvo zrážok ako kedysi. Najnovšie európske hodnotenia (Európsky atlas rizika sucha JRC 2023, Šiesta hodnotiaca správa IPCC) sa zhodujú, že práve v tejto zóne narastá premenlivosť a frekvencia extrémneho sucha bez ohľadu na to, či sa priemerné zrážky menia.

Cieľom štúdie je poskytnúť vecný, zrozumiteľný a vedecky obhájitelný podklad pre rozhodovaciu prax aj verejnosť. Po prvé opisuje súčasný stav sucha (pozorovania 1961 – 2025), po druhé prekladá emisné scenáre do reči „scenárov sucha“, po tretie premieta budúce sucho do konkrétnych regiónov a horizontov (orientačne 2030, 2050 a 2080) a po štvrté posudzuje dopady a možnosti adaptácie. Štúdia rozpisuje dopady pre päť referenčných nížinných a kotlinových regiónov a samostatne sleduje lesy a horské oblasti. Text je písaný opisným jazykom; presné definície indexov a metodické detaily sú v plnej verzii štúdie.

3 Sucho na Slovensku dnes

(pozorované trendy 1961 – 2025)

Teplota a zrážky

Priemerná ročná teplota vzduchu rástla v období 1961 – 2025 rýchlosťou rádovo $+0,2 - 0,3$ °C za desaťročie; celkový nárast dosahuje približne $+1,5$ °C a od konca 19. storočia ide o oteplenie okolo $+2$ °C, pričom väčšina pripadá na obdobie po roku 1990. Otepľovanie nie je rovnomerné — najvýraznejšie je v letnom a jarnom polroku. Posledné dve desaťročia dominujú rebríčku najteplejších rokov; rok 2024 bol s odchýlkou okolo $+2,1$ °C nad normálom 1991 – 2020 najteplejším v histórii meraní a zima 2023/2024 patrila s celoslovenským priemerom okolo $+3,9$ °C k extrémne teplým. Rast teploty je najrobustnejším prejavom zmeny klímy a zároveň hlavným motorom zhoršovania sucha, lebo priamo zvyšuje výpar a evapotranspiračný dopyt.

Zrážky nemajú jednoznačný celoslovenský trend — ročné úhrny sa za sledované obdobie zmenili len málo (rádovo o jednotky percent). Podstatná je však zmena ich priestorovej a sezónnej distribúcie: v južných nížinách letné a celoročné úhrny skôr stagnujú alebo mierne klesajú, na severe a vo vyšších polohách mierne pribúdajú. Súčasne sa mení charakter zrážok — rastie intenzita krátkodobých prívalových (konvektívnych) zrážok, kým počet zrážkových dní v teplej časti roka v nížinách skôr klesá a predlžujú sa suché periódy medzi dažďami. Tento dvojaký charakter (viac suchých dní a zároveň intenzívnejšie extrémy) je z hľadiska sucha aj povodní zásadný a pre poľnohospodárstvo nepriaznivý, lebo prudké lejaky odtekajú rýchlejšie a horšie sa vsakujú.

Vyparovanie, vodná bilancia a pôdne sucho

Rast teploty sa premieta do rastu potenciálnej evapotranspirácie a referenčného výparu, ktoré v nížinách citelne stúpili. Príčinou je nielen vyššia teplota, ale aj rastúci sýtosťný deficit vodných pár (VPD) — teplejší vzduch dokáže „vytiahnuť“ z pôdy a rastlín viac vody; obrazne ide o tzv. vysušný efekt atmosféry. Kľúčovým ukazovateľom je klimatická vodná bilancia (rozdiel medzi zrážkami a výparom): pri približne nezmenených zrážkach ju rastúci výpar posúva do čoraz zápornejších hodnôt, najmä počas vegetačnej sezóny (apríl – september) a v južných nížinách. Aj pri rovnakom množstve zrážok je tak dnes k dispozícii menej využiteľnej vody než pred desaťročiami — a to je jadrom rastúceho rizika sucha.

Záporná vodná bilancia prehlbuje deficit pôdnej vlhky. Monitoring sucha a indexy zohľadňujúce teplotu a výpar (SPEI, anomália pôdnej vlhkosti) ukazujú za posledné desaťročia rastúcu frekvenciu, intenzitu a plošný rozsah poľnohospodárskeho sucha, zreteľne výraznejšie po roku 2000. Zatiaľ čo čisto zrážkový index (SPI) nemá jednoznačný trend, indexy zahrňujúce výpar klesajú smerom k suchším podmienkam. To naznačuje, že hlavnou príčinou nie je úbytok zrážok, ale rastúca vysušujúca sila vzduchu, teda schopnosť teplejšieho vzduchu odoberať viac vody z pôdy a rastlín. Predlžuje sa aj maximálny počet po sebe nasledujúcich suchých dní, predovšetkým na juhu. Satelitné dáta to spresňujú: najnižšiu pôdnu vlhkosť vykazuje Záhorská nížina (piesočnaté, málo retenčné podložie), zatiaľ čo ťažšie pôdy Juhoslovenskej a Košickej kotliny vodu zadržiavajú lepšie; najzraniteľnejšie sú Podunajská a Východoslovenská nížina a Žitný ostrov.

Prietoky a recentné suchá

V odtoku sa zmeny prejavujú dvojako. Po prvé sa mení sezónne rozdelenie: vyššie zimné teploty a skoršie topenie snehu posúvajú jarné kulminácie skôr do roka a oslabujú letné dopĺňanie tokov zo snehových zásob, čo je citlivé najmä v povodiach napájaných z Tatier a stredných pohorí. Po druhé, v nížinných a južných oblastiach klesajú nízke a minimálne prietoky v letnej a jesennej časti roka, sprevádzané poklesom hladín podzemných vôd. Analýza za posledných 14 rokov to potvrdzuje: priemerný mesačný prietok vo februári mierne rastie (5 z 29 staníc), no v júli klesá v 13 staniaciach; minimálne prietoky v jarných mesiacoch v podhorských staniaciach stúpajú, no od mája do júla vo väčšine staníc klesajú (signifikantne v júni a júli). Hydrologické sucho tak nastupuje skôr, trvá dlhšie a zasahuje väčšie plochy než v minulosti.

Tieto trendy sa v posledných dvoch desaťročiach materializovali v neobvykle hustej sérii suchých rokov — 2003, 2012, 2015, 2017, 2018 – 2019, 2022 a 2024. Charakteristický je ich teplotný podpis: aj pri zrážkach blízkych priemeru viedol vysoký výpar k rýchlemu nástupu a prehĺbeniu sucha. Spojené suché letá 2018 a 2019 boli v strednej Európe najvýraznejšie za približne 250 rokov a obdobie 1991 – 2020 patrí

k najteplejším a najsuchším tridsaťročiam za posledné storočia. Suchá rokov 2015, 2018 – 2019 a 2022 zasiahli väčšie územie a viacero sektorov súčasne (poľnohospodárstvo, lesníctvo, vodné hospodárstvo), čo zodpovedá predpokladu rastúcej pravdepodobnosti zložených a kaskádových udalostí typu horúčava – sucho – požiar.

4 Klimatické scenáre = scenáre emisií skleníkových plynov

Budúci vývoj klímy nemožno predpovedať ako počasie na niekoľko dní. Zatiaľ čo predpoveď počasia vychádza z dnešného stavu atmosféry, dlhodobá projekcia klímy závisí najmä od toho, ako sa bude vyvíjať vonkajšie pôsobenie na klimatický systém — predovšetkým koncentrácie skleníkových plynov, ktoré nie sú dané fyzikou, ale ľudskými rozhodnutiami. Klimatológia preto nepracuje s jedinou predpoveďou, ale so súborom scenárov: vnútorne konzistentných, ale vedome alternatívnych obrazov budúcnosti typu „ak sa svet bude vyvíjať takto, klíma odpovie takto“. Rozsah medzi scenármi nevyjadruje chybu výpočtu, ale skutočnú slobodu rozhodnutia, ktorú ľudstvo má.

V praxi pracujeme so štyrmi emisnými cestami (SSP) preloženými do laického jazyka: SSP1-2.6 — svet, v ktorom mitigácia uspela; SSP2-4.5 — pokračovanie súčasných trendov bez výraznej zmeny; SSP3-7.0 — svet s vysokými emisiami a slabou medzinárodnou spoluprácou; a SSP5-8.5 — veľmi vysoké emisie, ktorý dnes slúži skôr ako horný stresový test pre odolnosť dlhovekej infraštruktúry než ako pravdepodobný „business-as-usual“. Do roku ~2040 sú rozdiely medzi scenármi malé — klíma najbližších dvoch desaťročí je do veľkej miery už „zabudovaná“ minulými emisiami —, ku koncu storočia sa však scenáre dramaticky rozchádzajú a práve tam sa rozhoduje, či bude oteplenie mierne alebo extrémne.

Päť spoločných socio-ekonomických ciest (SSP1 – SSP5) opisuje vnútorne konzistentné príbehy vývoja sveta — populáciu, ekonomiku, technológie, využitie krajiny a energetiku. SSP teda na rozdiel od starších scenárov odpovedá nielen na otázku „aké bude pôsobenie“, ale aj „aký svet a aké emisie k nemu vedú“, čo umožňuje logicky prepojiť klímu, socio-ekonomický vývoj a hodnotenie rizík. Treba pritom rešpektovať, že scenáre nie sú predpovede ani pravdepodobnosti — opisujú, „čo by nastalo, ak“. Ich hodnota nespočíva v presnom čísle pre konkrétny rok a obec, ale v tom, že poskytujú vedecky obhájiteľný rámec pre dlhodobé rozhodovanie a jasne ukazujú, že podstatná časť budúcej zmeny stále závisí od dnešných rozhodnutí.

Metodika v skratke

Fyzikálnym jadrom projekcií je súbor (ansámbel) približne 20 globálnych klimatických modelov generácie CMIP6, ktoré tvoria základ Šiestej hodnotiacej správy IPCC. Globálne modely s rozlíšením 50 – 150 km nedokážu zachytiť členitý reliéf Slovenska, preto sa ich výstup regionalizuje v niekoľkých krokoch: každý model sa najprv zbaví systematickej chyby (korekcia biasu metódou kvantilového delta-mapovania, ktorá zachováva modelovaný trend) a potom sa interpoluje na podrobnú mriežku 1 km s výškovou korekciou. Z výsledných polí sa počítajú klimatické indikátory a indexy sucha (SPI a SPEI v 3-, 6- a 12-mesačnom okne, anomália pôdnej vlhky, index aridity, počty horúcich a tropických dní, suché obdobia, index požiarneho nebezpečenstva). Spoľahlivosť reťaze sa overuje porovnaním s pozorovaniami SHMÚ a reanalýzou — po korekcii ansámbel veľmi dobre reprodukuje priemerný ročný chod aj úhrny teploty a zrážok. Výsledky uvádzame ako strednú hodnotu (medián) súboru spolu s rozpätím neistoty.

Pre Slovensko vychádza oteplenie priemernej ročnej teploty rádovo +1,3 – 1,6 °C do roku 2030 (vo všetkých scenároch podobne) a +1,6 až +4,6 °C do roku 2080 podľa scenára. Smerový signál oteplenia a nárastu tepelných extrémov je vysoko robustný; lokálne úhrny zrážok, správanie búrok a snehové pomery ostávajú citlivejšie na neistotu, preto ich uvádzame vždy s rozpätím, nie ako jediné číslo. Pozorované (historické) zmeny sú pritom vzťahované k referenčnému obdobiu 1961 – 1990, kým klimatické scenáre k novšiemu normálu 1991 – 2020; uvádzané projekcie (napr. +1,3 – 1,6 °C do roku 2030) sa preto pripočítavajú k už zrealizovanému otepleniu (približne +2 °C od konca 19. storočia) a neprotirečia si s ním.

5 Budúce sucho na Slovensku — kde, kedy a koľko

Spoločným menovateľom všetkých typov budúceho sucha je, že hlavným hnacím motorom nie je pokles zrážok, ale rast teploty a atmosférického dopytu po vode (VPD, tzv. výsušný efekt atmosféry), ktorý v nížinách ku koncu storočia výrazne stúpa (v Bratislave podľa ansámbly zhruba o 75 až 100 %). Riziko sucha preto porastie vo všetkých scenároch — aj tam, kde sa ročné úhrny prakticky nemenia. Očakávajú sa častejšie a dlhšie suché epizódy, predovšetkým v letnej polovici roka a v južných nížinách, predĺžovanie najdlhšieho súvislého obdobia bez zrážok a posun vegetačnej sezóny. Sezónny kontrast sa zosťhuje — vlhšie zimy a suchšie letá — a klesajúci podiel snehu oslabuje prirodzené nadlepšovanie letných prietokov z hôr.

Teplota, charakteristické dni a zrážky

Priemerná ročná teplota rastie vo všetkých scenároch; ku koncu storočia je rozdiel medzi mitigačnou a vysokoemisnou vetvou viac než tri stupne — čo je dôsledok scenárovej, nie modelovej neistoty. Oteplenie sa najvýraznejšie prejavuje na počtoch teplotne definovaných dní: prudko pribúdajú horúce dni ($T_{\max} \geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) a tropické noci ($T_{\min} \geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), ktoré sú dnes zriedkavé, predlžuje sa najdlhšia vlna horúčav a výrazne ubúdajú mrazové dni. Pri scenári SSP5-8.5 môžu horúce dni v nížinách dosiahnuť niekoľko desiatok za rok. Rast denných mínim je pritom rýchlejší než maxim, čo znižuje nočné ochladzovanie a zvyšuje tepelnú záťaž pre obyvateľov aj poľnohospodárstvo.

Ročné úhrny zrážok sa menia podstatne menej než teplota a signál je neistejší — z fyziky aj porovnávacích scenárov vyplýva mierny rast s výraznou sezónnou prestavbou (zimné a jesenné zrážky skôr pribúdajú, jarné a letné na juhu ubúdajú). Najrobustnejším zrážkovým signálom je zosilnenie krátkodobých extrémov — maximálny jednoduchý úhrn rastie rádovo o 5 – 20 % v súlade s vyššou kapacitou teplejšej atmosféry zadržať vodnú paru. Súčasne sa predlžuje najdlhšie súvislé obdobie bez zrážok, najvýraznejšie v nížinách a pri vysokých scenároch: tá istá ročná suma tak padá v menej, ale výdatnejších epizódach oddelených dlhšími suchými obdobiami, čo je pre vsakovanie a doplnenie pôdnej vlhky nepriaznivé. Porovnanie s projekciami SHMÚ (regionálne modely EURO- CORDEX) ukazuje rovnaký smer aj sezónnu štruktúru zmien.

Aridita a dlhodobé sucho (SPEI)

Mediánová hodnota indexu aridity (suchosti klímy) pre celé Slovensko sa v historickom období blíži semi-aridnému režimu; podľa scenára SSP5-8.5 sa do konca storočia aridita zvyšuje približne o 53 %, v okresoch Podunajskej nížiny (Komárno, Dunajská Streda, Šaľa) až o 59 – 66 %. Najvýraznejšia akcelerácia nastáva medzi obdobiami 2051 – 2070 a 2071 – 2100 pri scenároch s vysokými emisiami; pri miernom scenári SSP1-2.6 sú zmeny podstatne menšie a vo väčšine územia sa neprejavujú ako jednoznačný dlhodobý trend. Sezónne sú letné hodnoty aridity rádovo desaťnásobné oproti zimným — klimatická zmena bude amplifikovať práve letné sucho.

Index dlhodobého sucha SPEI-12 reaguje na otepľovanie výraznejšie než čisto zrážkový SPI a v priebehu storočia systematicky klesá. V Podunajskej nížine sa posúva z dnešnej mierne vlhkej hodnoty (+0,4) na -0,3 pri SSP1-2.6 a až na -1,2 pri SSP5-8.5; podobný pokles vykazujú aj ostatné nížiny (napr. Záhorská z +0,38 na -1,27 a Východoslovenská z +0,50 na -1,14 pri vysokých emisiách). Nížinné okresy vykazujú naprieč všetkými scenármi systematicky nižšie (suchšie) hodnoty než horské oblasti, čo naznačuje postupný prechod nížin k chronickým suchým podmienkam.

Regionálna diferenciácia

Zraniteľnosť nie je rovnomerná — rozhoduje nadmorská výška, využitie krajiny a vodné pomery. Najťažšie zasiahnuté sú južné nížiny a kotliny:

- Podunajská nížina — najteplejšia a poľnohospodársky najintenzívnejšia oblasť a zároveň najohrozenejší región: najväčší pokles SPEI-12 aj najvyšší nárast aridity zo všetkých okresov. Súčasťou je Žitný ostrov, najväčšia zásobáreň pitnej vody v strednej Európe, kde sa k poklesu množstva vody pridáva riziko zhoršenia kvality.

- Východoslovenská nížina — poľnohospodársky rovnako exponovaná, s najvyššou doterajšou frekvenciou sucha a typickým striedaním letného sucha a privalových povodní (napr. mimoriadne zrážky v októbri 2023, miestami nad 300 % normálu).
- Záhorská nížina — piesočnaté podložie s nízkou retenčnou schopnosťou pôdy spôsobuje rýchly nástup sucha aj pri miernom deficite zrážok; epizódy bývajú intenzívne, no spravidla kratšie než v Podunajskej nížine.
- Juhoslovenská a Košická kotlina — v dlhodobom priemere menej suché (ťažšie, vlhkosť lepšie zadržiavajúce pôdy), no extrémne roky 2012 a 2022 ukázali, že dokážu dosiahnuť intenzitu sucha porovnateľnú s najexponovanejšími nížinami; v Košiciach rastie tlak sucha aj v mestskom prostredí.
- Lesy stredných pohorí a Tatry — ťažisko dopadov sa tu presúva do lesov (rozpad smrečín, požiarne riziko) a do úbytku a skoršieho topenia snehu, ktorý dnes nadlepšuje letné a minimálne prietoky riek.

6 Dopady na poľnohospodárstvo a lesníctvo

Výskum ukazuje, že úrodám škodia vysoké teploty viac než samotný nedostatok zrážok a že pokles výnosov nie je lineárny — pri prekročení teplotnej hranice sa škody náhle prudko zvyšujú, lebo horúčava intenzívne „vysáva“ vodu z rastlín. Sucho na Slovensku systematicky sledujeme od roku 2012 kombinovaným indexom sucha (CDI); najsuchším rokom bol 2022, rok 2025 tretím najsuchším. Najhoršie bývajú august a september, keď sa kumulujú dôsledky celého suchého leta. Sucho a teplo sa pritom vzájomne posilňujú: keď pôda vyschne, prestáva sa ochladzovať vyparovaním a povrch sa výrazne prehrieva (priemerná letná teplota povrchu pôdy stúpila v roku 2003 až na 34 °C oproti dlhodobým ~30 °C), čím sucho priamo zosilňuje tepelnú záťaž krajiny aj miest.

Plodiny

Klimatická zmena posúva sezónnosť a fenológiu — jarná fenológia sa môže posunúť o 1 – 3 týždne, čím sa kritické fázy plodín (kvitnutie, plnenie zrna) dostávajú do teplejšieho a suchšieho obdobia. Najohrozenejšou plodinou je jarný jačmeň, ktorý je v nížinách tepelne preťažený už dnes a jeho sladovnícka kvalita trpí skrátením vegetácie. Kukurica bude ovplyvnená najkomplexnejšie: vo vyšších polohách jej viac tepla prospieva, no v nížinách ju kombinovaný stres horúčavy a sucha tlačí dole a výrazne zvyšuje potrebu závlah, najmä v okresoch Podunajskej a Záhorskej nížiny.

Pestovanie zemiakov, ktoré sú plodinou chladnejšieho a vlhkejšieho podnebia, sa bude presúvať do podhorských polôh (400 – 700 m n. m.), čo si vyžiada úpravu dopravnej a skladovej logistiky. Pšenica ostáva v strednodobom horizonte relatívne stabilnou plodinou, lebo ozimina dokončuje plnenie zrna skôr, než nastanú letné horúčavy, no v dlhodobom výhľade a pri vysokých emisiách možno očakávať tlak aj na ňu. Repka olejnatá zostane perspektívnou plodinou, no s rastúcimi nárokmi na termín a techniku sejby v suchých rokoch, keď suchý august a september komplikuje vzchádzanie porastov.

Lesy a požiarne riziko

Lesy pokrývajú takmer 41 % územia Slovenska a klimatická zmena ich funkcie zásadne narúša. Najzraniteľnejší je smrek obyčajný (dominuje na 24 % lesnej plochy), ktorý má plytký koreňový systém a už dnes na mnohých miestach prekračuje svoju ekologickú toleranciu. Sucho oslabuje jeho obranu proti podkôrnemu hmyzu a urýchľuje vývoj lykožrúta (vyššie teploty zvyšujú počet generácií za sezónu); pri scenári SSP5-8.5 bude prah stresu z deficitu vodnej pary po roku 2051 prekročený na viac než 94 % plochy — smrečiny v nižších polohách sú tak dlhodobo fyziologicky neudržateľné a projekcie predpovedajú zdvojnásobenie ročných škôd spôsobených lykožrútom. Ešte skôr a rozsiahlejšie je ohrozená jedľa. Buk lesný je hlavnou náhradnou drevinou (hlbší koreňový systém, lepšia tolerancia tepla), no aj on má pri dlhodobom letnom suchu a teplotách nad 30 °C svoje limity, najmä na suchších južných svahoch.

Sucho a teplo zároveň zvyšujú index požiarneho nebezpečenstva — z historického letného priemeru okolo 11 bodov na úroveň okolo 15 (mitigácia) až 21 bodov (vysoké emisie), pričom v dňoch s extrémnym rizikom ešte vyššie. Pri takýchto hodnotách už požiare nie sú výnimočnou udalosťou, ale pravidelnou súčasťou leta. Kľúčovým adaptačným opatrením je preto riadená druhová prestavba lesov smerom k vyššej diverzite (buk, dub, jedľa, javor) a ochrana horských porastov, pretože zdravé a funkčné lesy optimálne plnia komplex hydrických funkcií; prestavba je však behom na dlhú trať — výsledky sú viditeľné až za desaťročia, o to skôr treba začať.

7 Dostupnosť vody pre obyvateľov

Slovensko disponuje relatívne bohatými zásobami podzemných aj povrchových vôd, no ich rozloženie je nerovnomerné. Juhozápad (Bratislavský, Trnavský a Nitriansky kraj) sa zásobuje prevažne z podzemných zdrojov; chýbajúca prepojovacia infraštruktúra je tu systémovým rizikom v období dlhotrvajúceho sucha, lebo pokles výdatnosti jedného zdroja nemusí byť automaticky nahradený iným. Prešovský a Košický kraj sú zásobované najmä z povrchových vodárenských nádrží, keďže v hydrogeologickom podloží východu chýbajú rozsiahle štrkovité štruktúry; kvalita aj množstvo povrchovej vody sú však citlivejšie na výkyvy počasia než dobre chránené podzemné zásoby. Problémy s dostupnosťou pravidelne pociťujú obyvatelia Záhoria a okolia Malých Karpát, kde sú vodovody napájané z lokálnych prameňov s obmedzenou výdatnosťou.

Žitný ostrov a vodárenské nádrže

Osobitnú pozornosť si zasluhuje Žitný ostrov — najväčšia zásobáreň pitnej vody v strednej Európe, ktorej výdatnosť je priamo prepojená s hydrologickým režimom Dunaja a brehovou infiltráciou. Čelí dvojitému tlaku: klesajúcemu dopĺňaniu zásob vplyvom klimatickej zmeny a dlhodobému znečisteniu z poľnohospodárstva a priemyslu (prevažná časť územia je intenzívne poľnohospodársky využívaná a eviduje sa tu množstvo bodových aj difúzných zdrojov znečistenia). Európske hodnotenie zaraďuje túto časť Panónskej panvy medzi územia s vysokou až veľmi vysokou zraniteľnosťou podzemných vôd vo všetkých sledovaných horizontoch.

Pri povrchových nádržiach klimatická zmena ohrozuje nielen množstvo, ale aj kvalitu vody. Zásoby nie sú primárne ohrozené poklesom ročného úhrnu zrážok, ale zmenou sezónneho rozloženia odtoku — menej vody v lete, keď je dopyt najvyšší. Teplejšia a pomalšie sa miešajúca voda je náchylnejšia na premnoženie siníc, čo narúša samočistenie a zvyšuje náklady na úpravu. Ekonomický dosah ilustruje nádrž Turček, ktorá mala pred rokom 2015 najnižšie prevádzkové náklady spomedzi analyzovaných nádrží; po opakovanom výskyte siníc náklady niekoľkonásobne vzrástli. Skúsenosť z Českej republiky, klimaticky veľmi podobnej, naznačuje, že riziko nedostatočného zabezpečenia odberov sa môže týkať takmer 40 % vodárenských nádrží — z dlhodobého hľadiska teda možno očakávať rast cien pitnej vody pre domácnosti odkázané na tieto nádrže.

Závlahy a hydrologické sucho

Paradoxom je, že práve keď klimatická zmena zvyšuje potrebu závlah, je závlahová infraštruktúra v najhoršom stave za desaťročia: kým v minulosti sa zavlažovalo viac než 360 000 hektárov, dnes je to len okolo 60 000 ha a funkčná je len asi tretina čerpacích staníc, pričom veľká časť kanálovej siete je zastaraná. Bez systematickej obnovy závlah a prepojenia ich prevádzky s prognózami sucha nie je možné adaptáciu poľnohospodárstva zabezpečiť.

Hydrologické sucho sa stáva čoraz bežnejším javom. Prvá celonárodná analýza denných prietokov na 27 slovenských riekach za 90 rokov odhalila výrazný priestorový gradient: kým horské oblasti vykazujú stabilné alebo mierne rastúce prietoky, nížinné regióny zaznamenali pokles priemerného ročného prietoku až o 27 % a pokles minimálnych prietokov až o 23 %. Pozoruhodné je, že hoci po roku 1996 zrážky mierne vzrástli, odtok ďalej klesal — rastúca teplota a výpar pohltili celý zrážkový prírastok. Analýza 120-ročných záznamov navyše ukázala, že na nížinných staniciach je pravdepodobnosť aspoň jedného dvojročného hydrologického sucha v ktoromkoľvek desaťročí vyššia ako 60 %; najdlhšie suchá nastávajú v letnom a jesennom období, ktoré sa kryje s vegetačnou sezónou a najvyššou spotrebou vody. Plavbu na Dunaji klimatická zmena pravdepodobne zásadne neohrozí (medián poklesu ročného prietoku do konca storočia je malý), no riziko letného poklesu si vyžaduje monitorovanie.

8 Adaptácia — čo robiť a čo sa stane, ak nekonáme

Adaptácia má zmysel a potenciál vo všetkých scenároch, no čas zohráva kľúčovú úlohu. Opatrenia, ktoré dnes stoja desiatky miliónov eur a vybudujú sa v priebehu niekoľkých rokov, by bolo pri nečinnosti potrebné neskôr nahradiť núdzovými riešeniami (núdzové zabezpečovanie dodávok pitnej vody, dovoz potravín, hasenie rozsiahlych požiarov) za rádovo vyššie náklady a s negatívnym dopadom na ekonomiku. Najvyššia priorita patrí účinným, dátovo a analýzami podloženým opatreniam s dlhým realizačným horizontom. Patria sem tak prírode blízke, ako aj technické riešenia: napríklad lesná konverzia, rekonštrukcia závlah a ochrana podzemných vôd, kde je obnova po poklese hladín extrémne pomalá. Každý rok odkladu zužuje priestor pre proaktívne a lacné riešenia. Súčasne platí, že ak je možné dosiahnuť rovnakú účinnosť adaptácie na nepriaznivé vplyvy zmeny klímy prírode blízkym aj tzv. sivým technickým opatrením, má byť uprednostnené prírode blízke riešenie.

V poľnohospodárstve je to modernizácia a rozšírenie závlahových sústav, prechod na vodou úsporné technológie (kvapkové závlahy riadené na základe merania aktuálnej evapotranspirácie a vlhkosti pôdy), diverzifikácia k suchoodolným plodinám a odrodám a obnova organickej zložky pôdy, ktorá zvyšuje jej schopnosť zadržiavať vodu. Mimoriadne dôležité je zvýšenie retenčnej schopnosti krajiny — revitalizácia tokov (obnova mŕtvych ramien a meandrov), obnova mokradí, najmä v nížach Dunaja, Váhu, Moravy a Nitry, a malé vodné nádrže a poldre, ktoré zachytávajú vrcholové prietoky z prívalov a uvoľňujú vodu postupne, pričom dopĺňajú podzemné zásoby a zároveň znižujú povodňové riziko a zvyšujú biodiverzitu.

V lesoch je nevyhnutná riadená druhová prestavba k vyššej diverzite, aby sa zachovali lesy zdravé, funkčné v prírode blízkej štruktúre, optimálne plniace svoje funkcie, a ochrana horských lesov ako vodohospodárskeho opatrenia. Zatiaľ sa javí najperspektívnejšia cesta nie radikálnych zmien celých spoločenstiev, ale cesta zvyšovania biodiverzity, najmä základnej, určujúcej zložky lesného ekosystému — lesných drevín. Pritom máme na mysli najmä druhovú, vekovú a priestorovú diverzitu drevín. Rovnako významná je však aj genetická diverzita, celková biodiverzita spoločenstiev, ako aj diverzita na úrovni ekosystémov, ktorú je potrebné riešiť v budúcnosti s cieľom zvyšovania ekologickej stability krajiny. Ekologická amplitúda vysádzaných drevín musí byť taká široká, aby vyhovovala súčasným aj budúcim stanovištným podmienkam. Dôležitým doplnkovým opatrením je aj zvyšovanie výmery lesov. Pre zabezpečenie plynulého zásobovania vodou je nevyhnutné sprísnenie ochrany vodných zdrojov; ako jedno z možných opatrení sa javí aj pasportizácia odstavených vodných zdrojov z hľadiska možnosti ich revitalizácie a uvedenia do opätovnej prevádzky, čo umožní zvýšené využívanie lokálnych vodných zdrojov a minimalizáciu strát vody v rozvodných sieťach. K rozhodovacím (tzv. mäkkým) nástrojom patrí aj kompenzácia obciam, ktoré vodu „produkujú“ a znášajú s tým spojené obmedzenia, a vodohospodárske plánovanie umiestňovania stavieb zohľadňujúce rastúci dopyt po zmenšujúcich sa vodných zdrojoch. Na zmiernenie dopadov sucha na mestá je nevyhnutný dátami podložený návrh modro-zelenej infraštruktúry. Významným opatrením pri návrhu mestskej zelene je zaradenie druhov drevín s výraznou toleranciou letných suchých období a ochrana brehových porastov v intraviláne aj extraviláne sídiel. Medzi vhodné technické opatrenia patrí podpora zelených stavebných a architektonických riešení (vegetačné strechy a fasádne systémy, ekologické nakladanie s dažďovou a odpadovou vodou, podpora využívania odpadovej „sivej“ a dažďovej vody), ale aj výmena nepriepustných povrchov v sídlach za moderné priepustné materiály a zachytávanie dažďovej vody v mestách. Tieto opatrenia sú účinné nielen z pohľadu zníženia stresu suchom, ale aj ako nástroj na zmiernenie mestského tepelného ostrova. Mnohé z nich je možné realizovať v krátkom horizonte a závisia predovšetkým od politickej vôle, nie od technologických inovácií. Treba však mať na pamäti, že žiadne z týchto opatrení nefunguje izolovane; adaptácia nie je o záchrane súčasného systému, ale o premene produkčného a vodohospodárskeho modelu tak, aby fungoval v podmienkach, ktoré sú dnes výnimkou, no čoskoro budú pravidlom. Integrovaný prístup naprieč sektormi a regiónmi je jediný, ktorý dokáže zvládnuť komplexnosť klimatickej zmeny, akú dáta naznačujú.

9 Dve Slovenská v roku 2080

To, ku ktorej budúcnosti sa krajina priblíži, závisí od dnešných rozhodnutí o emisiách aj o adaptácii:

Príbeh A — Slovensko, ktoré konalo včas (mitigácia, $\sim +1,6$ °C). Lesy sú pestrejšie, buk a jedľa nahradili rozpadnuté smrečiny a tisícky malých retenčných nádrží vrátili vodu do horských potokov, ktoré tečú aj v lete. Nížiny sa zmenili — suchoodolné plodiny, obnovené závlahy a revitalizované mokrade udržali poľnohospodárstvo živé. Krajina vyzerá inak, no uživí svojich ľudí.

Príbeh B — Slovensko, ktoré váhalo (vysoké emisie, $\sim +4,6$ °C). Smrečiny zmizli, holiny sa vysušili, mestá sa prehrievajú a v lete sa zavádzajú „kalamitné prázdniny“ pre horúčavy a nedostatok vody. Aj Žitný ostrov, kedysi považovaný za nevyčerpatelný, čelí obmedzeniam odberu. Náklady na zmierňovanie dopadov mnohonásobne prevýšili to, čo mohla stáť včasná adaptácia.

10 Záver — klúčové posolstvá

Projekcie sú jednoznačné: sucho bude pre Slovensko narastajúcim a pri vysokých emisiách aj dominantným klimatickým javom 21. storočia. Rozdiel medzi scenármi nie je v tom, či bude suchšie, ale do akej miery. Z analýz vyplývajú tri hlavné posolstvá:

- Sucho sa prehľbuje — hlavnou príčinou nie sú zrážky, ale teplo. Rastúca teplota zvyšuje výpar a vysušuje pôdu, lesy aj vodné toky aj pri nezmenených zrážkach.
- Rozsah budúceho sucha závisí od dnešných emisných rozhodnutí. Pri ambicióznej politike ostávajú zmeny adaptovateľné; pri vysokých emisiách sa nížiny dostávajú do chronického sucha, pri ktorom konvenčné poľnohospodárstvo, existujúca vodohospodárska infraštruktúra a smrekové lesy bez zásadnej transformácie nefungujú.
- Adaptácia má zmysel a výsledky, ale čas je rozhodujúci. Opatrenia s dlhým realizačným horizontom musia začať dnes.

Priestorovo sú najohrozenejšie Podunajská a Východoslovenská nížina a Žitný ostrov (poľnohospodárstvo a zásoby pitnej vody), Juhoslovenská a Záhorská nížina (intenzívne epizódy) a horské smrekové lesy (rozpad porastov s kaskádovými dôsledkami pre vodný režim). Sektorovo sú to poľnohospodárstvo, zásobovanie pitnou vodou a lesné hospodárstvo. Zistenia sú v súlade s Národnou adaptačnou stratégiou SR (NAS SR 2018) aj Európskym hodnotením klimatického rizika (EUCRA 2024) a územne konkretizujú, kde sú zásahy najpálčivejšie; aktualizácia NAS by mala reflektovať nové kvantitatívne projekcie sucha pre jednotlivé okresy a zaviesť záväzné medzirezortné mechanizmy pre scenáre chronického sucha. V európskom meradle nejde o okrajový problém — priame straty zo sucha v EÚ sa dnes odhadujú rádovo na 9 miliárd eur ročne a bez výraznej klimatickej akcie môžu do konca storočia vzrásť na desiatky miliárd eur ročne, pričom Slovensko patrí k najexponovanejším oblastiam tohto rizika v Európe.

English summary

Drought in Slovakia is deteriorating measurably, driven primarily by rising temperatures and increasing atmospheric water demand — not by declining precipitation. Mean annual temperature has risen by about 1.5 °C since 1961 (about 2 °C since the late 19th century), pushing the climatic water balance into deficit, especially in the southern lowlands during the growing season. The consecutive dry summers of 2018 and 2019 were unprecedented in Central Europe in about 250 years. Drought risk increases under all emission scenarios, but its magnitude depends on emissions: under ambitious mitigation (~+1.6 °C) changes remain manageable, while under high emissions (~+4.6 °C) the lowlands shift towards chronic drought (SPEI-12 in the Danubian Lowland falling from +0.4 to -1.2; aridity rising by ~53 % nationally). Impacts concentrate in agriculture (lower yields, growing irrigation needs), forestry (collapse of Norway spruce, rising fire risk) and water supply (declining summer flows, compound pressure on the Žitný ostrov aquifer — Central Europe's largest groundwater reserve). Adaptation is feasible and cost-effective but time-sensitive — long-lead measures (forest species conversion, irrigation reconstruction, groundwater protection) must begin now. The findings are consistent with the Slovak National Adaptation Strategy (2018) and the European Climate Risk Assessment (EUCRA 2024).

Kľúčové zdroje

IPCC (2021, 2022). Sixth Assessment Report (WG I a WG II). Cambridge University Press.

Rossi, L. et al. (2023). European Drought Risk Atlas. JRC, Publications Office of the EU.
doi:10.2760/608737.

EEA (2024). European Climate Risk Assessment (EUCRA). EEA Report 01/2024.

Rakovec, O. et al. (2022). The 2018–2020 multi-year drought sets a new benchmark in Europe. *Earth's Future* 10(3).

Vicente-Serrano, S. M. et al. (2010). A multiscalar drought index (SPEI). *J. Climate* 23, 1696–1718.

Cammalleri, C. et al. (2021). A revision of the Combined Drought Indicator (CDI). *NHESS* 21, 481–495.

Pekárová, P. et al. (2025). Temporal variability of average and low flows in Slovak rivers. *J. Hydrol.: Reg. Studies* 60.

Leščešen, I. et al. (2026). Persistence of hydrological droughts in Slovakia. *Frontiers in Water* 8.

Hlásny, T. et al. (2021). Bark beetle outbreaks in Europe. *Current Forestry Reports* 7, 138–165.

Grossiord, C. et al. (2020). Plant responses to rising vapour pressure deficit. *New Phytologist* 226.
doi:10.1111/nph.16485.

Naumann, G. et al. (2021). Increased economic drought impacts in Europe with anthropogenic warming. *Nat. Clim. Change* 11.

Labudová, L. et al. (2024). Changes in drought occurrence and intensity in Slovakia. *Theor. Appl. Climatol.* 155, 4009– 4022.

Ministerstvo životného prostredia SR (2018). Stratégia adaptácie SR na zmenu klímy.

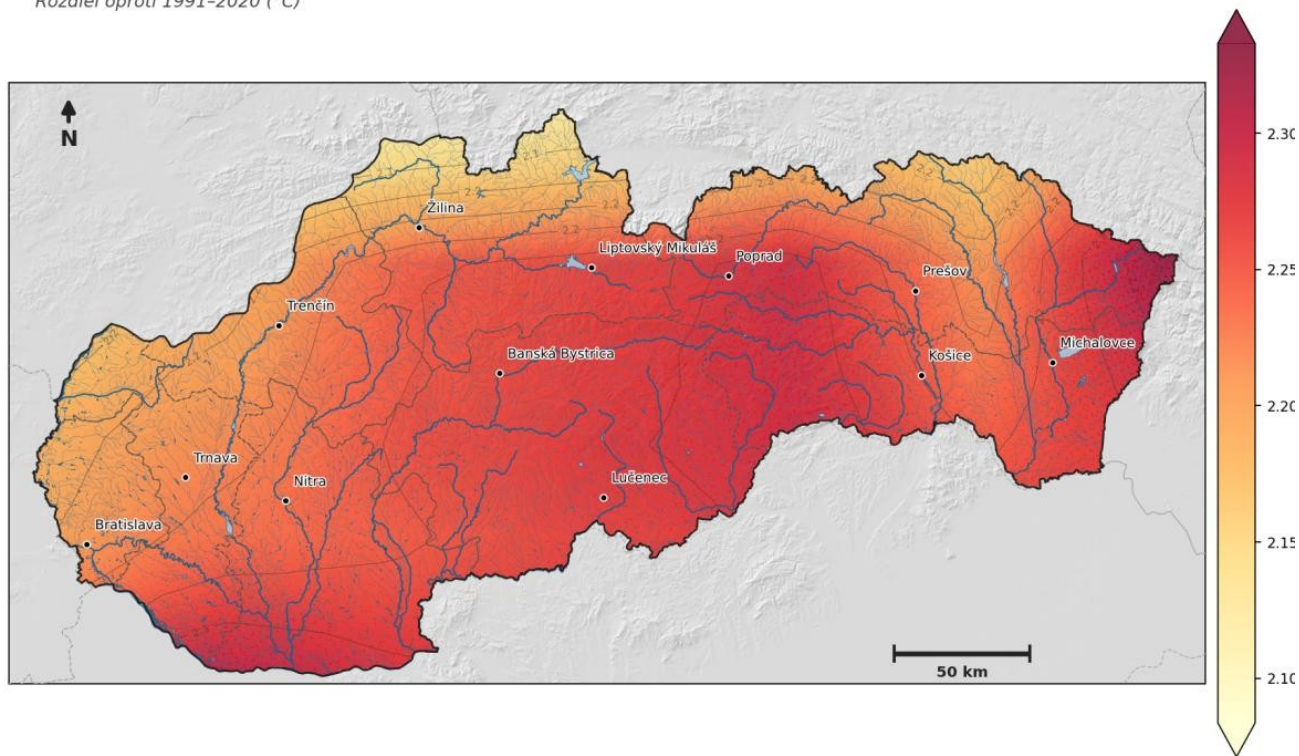
Úplný zoznam ~70 referencií v jednotnom citačnom štýle, definície indexov a podrobná metodika sú v plnej verzii štúdie.

Obrázky

Zmenové mapy teploty a zrážok (koniec storočia 2071 – 2100, oproti 1991 – 2020)

Zmena priemernej ročnej teploty — SSP2-4.5, 2071-2100

Rozdiel oproti 1991-2020 (°C)

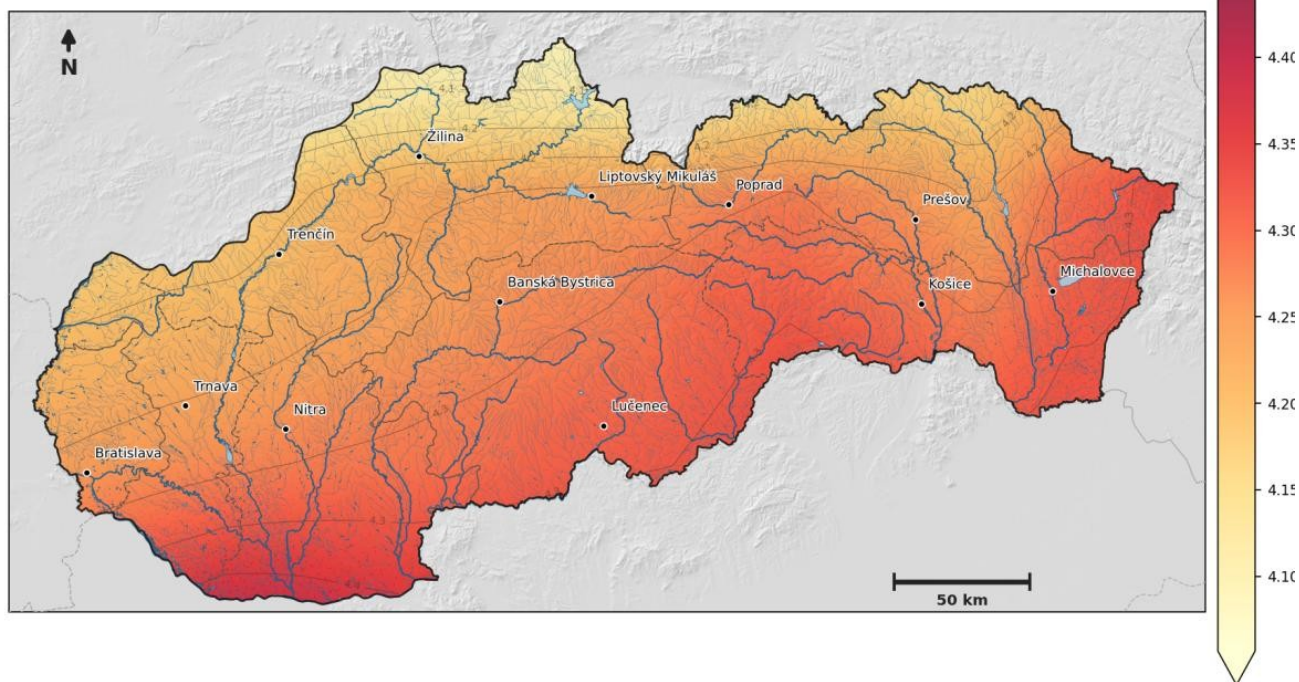


CMIP6 1 km ensemble (20 modelov, p50) · DEM-aware downscaling · spracovanie: J. Pecho

Obr. 1 Zmena priemernej ročnej teploty (°C) — scenár SSP2-4.5 (stredná cesta). Zdroj: CMIP6 ansámbl (medián), 1 km.

Zmena priemernej ročnej teploty — SSP5-8.5, 2071-2100

Rozdiel oproti 1991-2020 (°C)

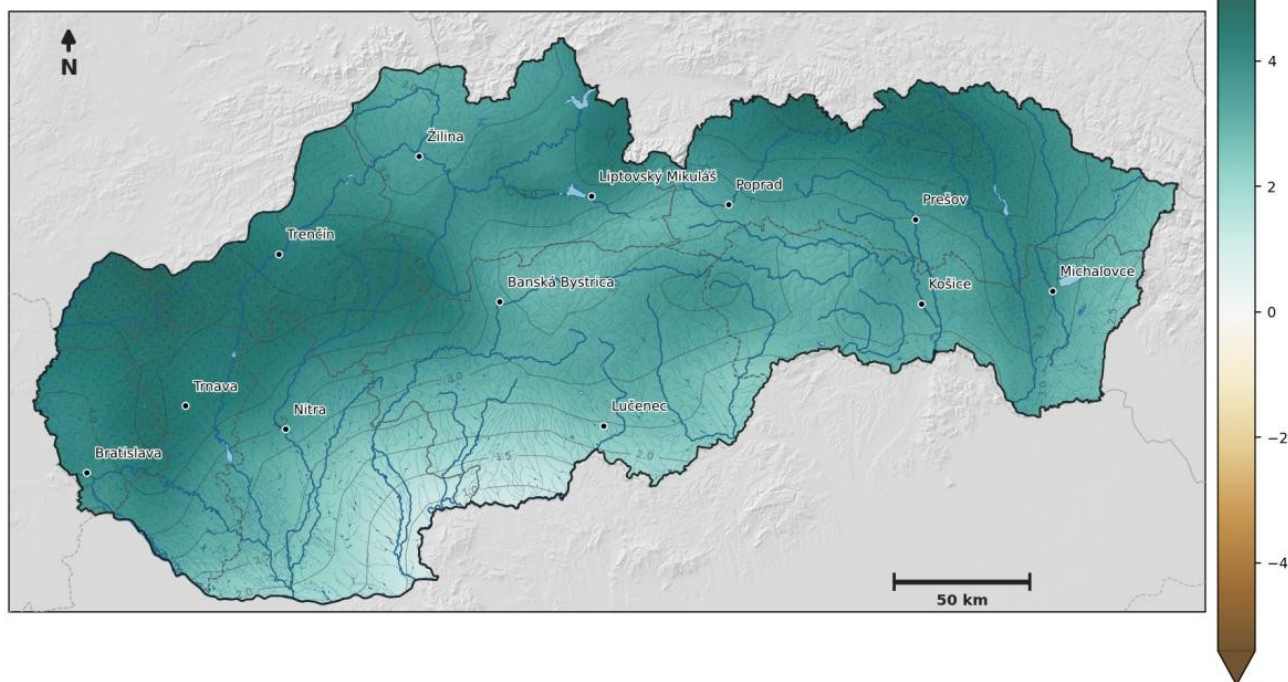


CMIP6 1 km ensemble (20 modelov, p50) · DEM-aware downscaling · spracovanie: J. Pecho

Obr. 2 Zmena priemernej ročnej teploty (°C) — scenár SSP5-8.5 (vysoké emisie); najvýraznejšie otepľovanie v južných nížinách. Zdroj: CMIP6 ansámbl (medián), 1 km.

Zmena ročného úhrnu zrážok — SSP2-4.5, 2071-2100

Relatívna zmena oproti 1991-2020 (%)

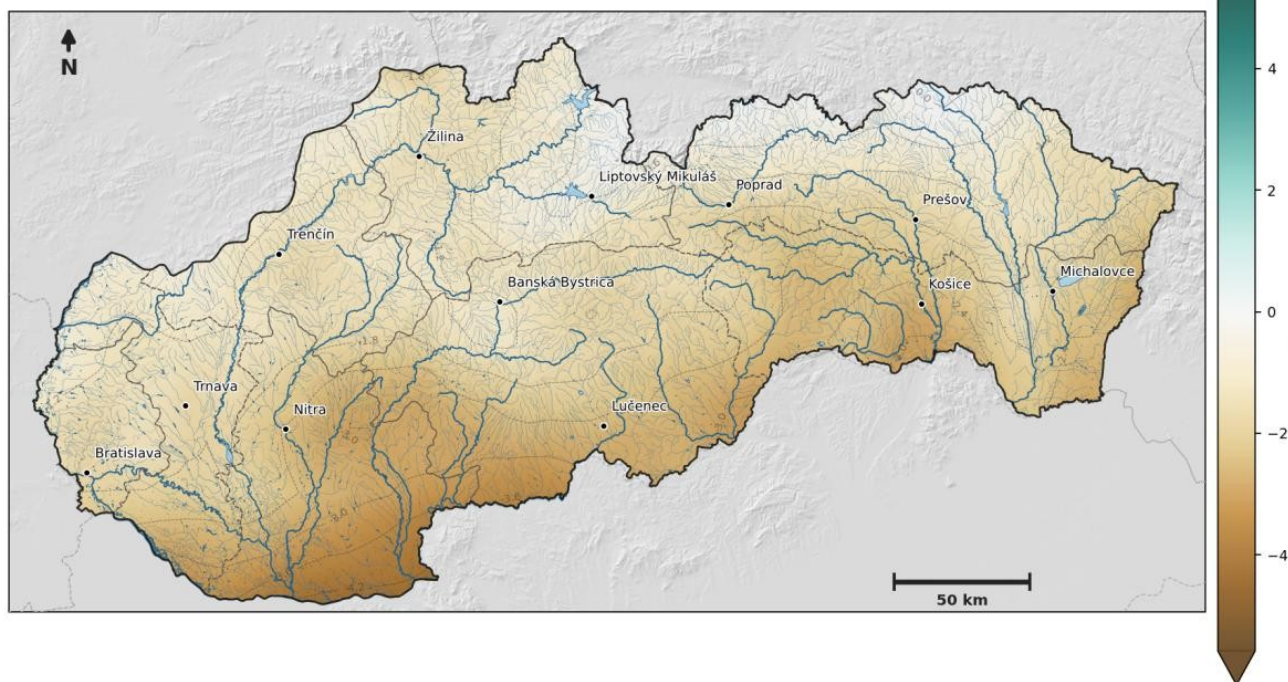


CMIP6 1 km ensemble (20 modelov, p50) · DEM-aware downscaling · spracovanie: J. Pecho

Obr. 3 Relatívna zmena ročného úhrnu zrážok (%) — SSP2-4.5. Zdroj: CMIP6 ansámbl (medián), 1 km.

Zmena ročného úhrnu zrážok — SSP5-8.5, 2071-2100

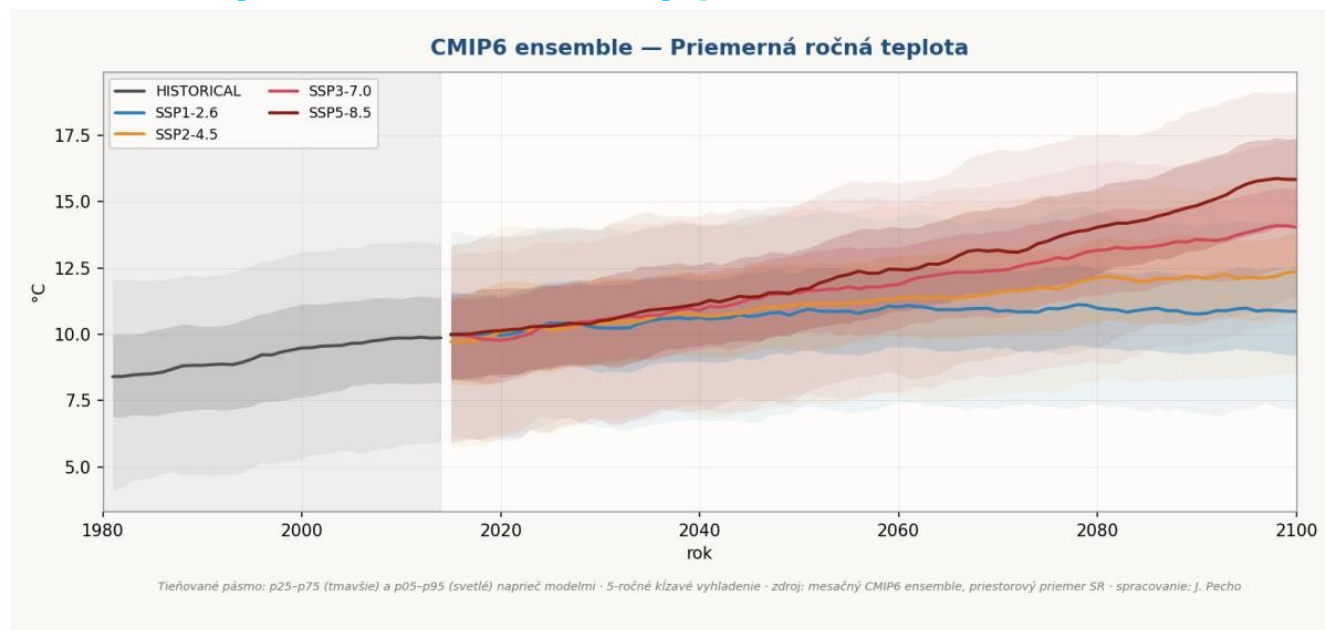
Relatívna zmena oproti 1991-2020 (%)



CMIP6 1 km ensemble (20 modelov, p50) · DEM-aware downscaling · spracovanie: J. Pecho

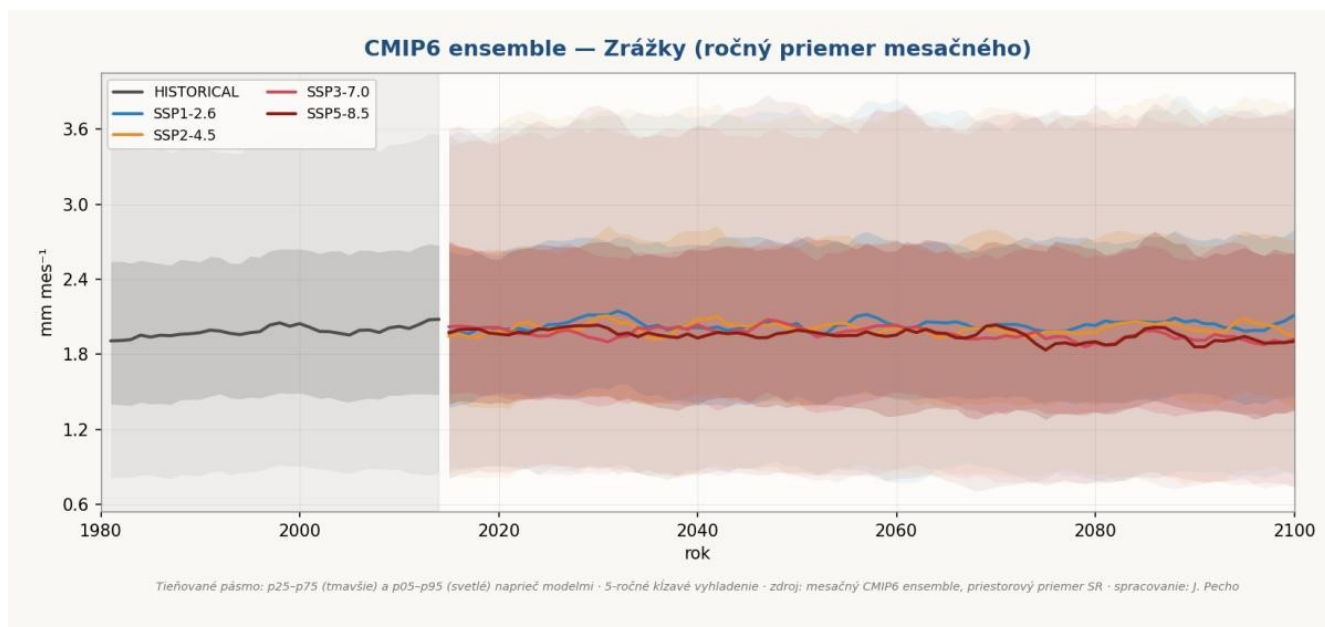
Obr. 4 Relatívna zmena ročného úhrnu zrážok (%) — SSP5-8.5; zrážkový signál je slabší a priestorovo premenlivejší než teplotný. Zdroj: CMIP6 ansámbl (medián), 1 km.

Časové rady scenárov (národný priemer do roku 2100)

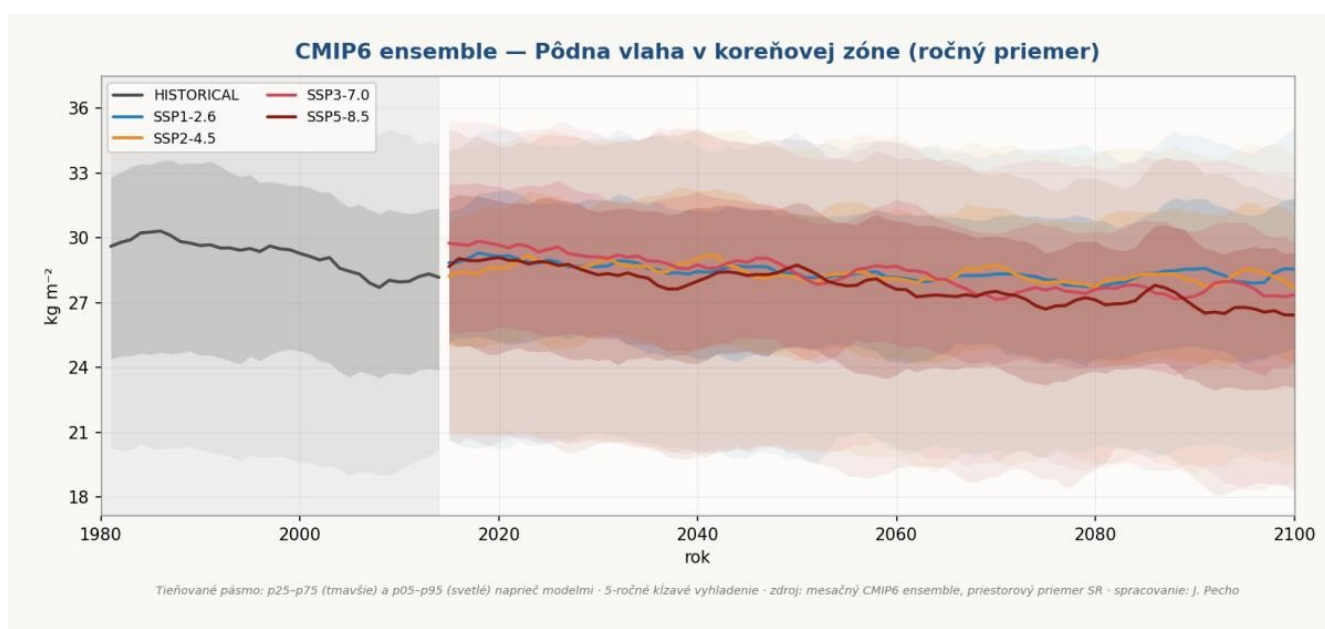


Tieňované pásmo: p25-p75 (tmavšie) a p05-p95 (svetle) naprieč modelmi · 5-ročné klzavé vyhladenie · zdroj: mesačný CMIP6 ensemble, priestorový priemer SR · spracovanie: J. Pecho

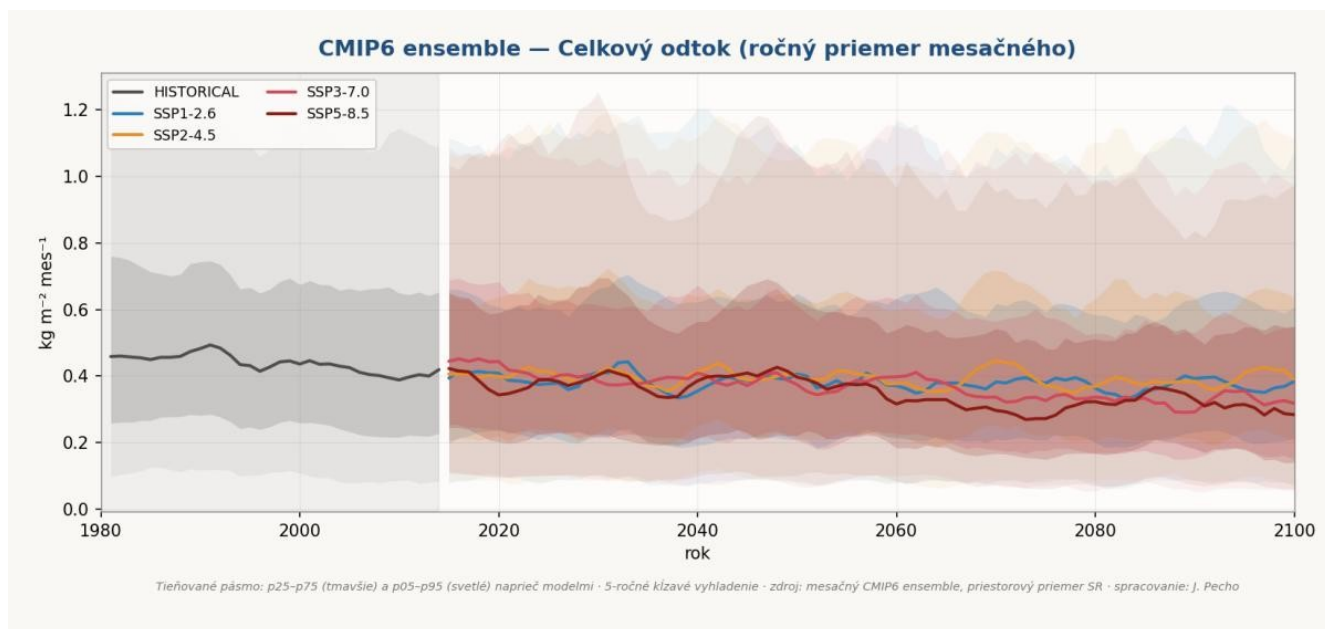
Obr. 5 Vývoj priemernej ročnej teploty pre štyri scenáre SSP; pásmo = rozpätie ansámbly. Zdroj: CMIP6 ansámbl.



Obr. 6 Vývoj ročného úhrnu zrážok pre štyri scenáre SSP; pásmo = rozpätie ansámblu. Zdroj: CMIP6 ansámbl.

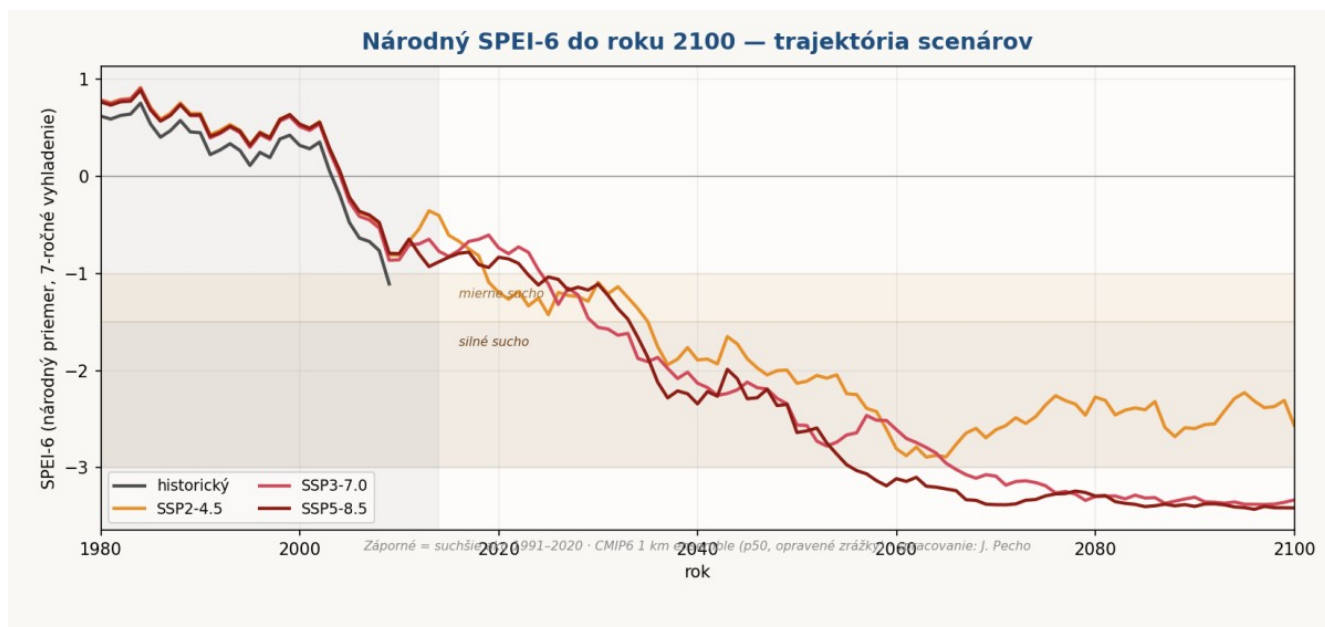


Obr. 7 Vývoj pôdnej vlhkosti pre štyri scenáre SSP — pokles signalizuje pôdne sucho. Zdroj: CMIP6 ansámbl.

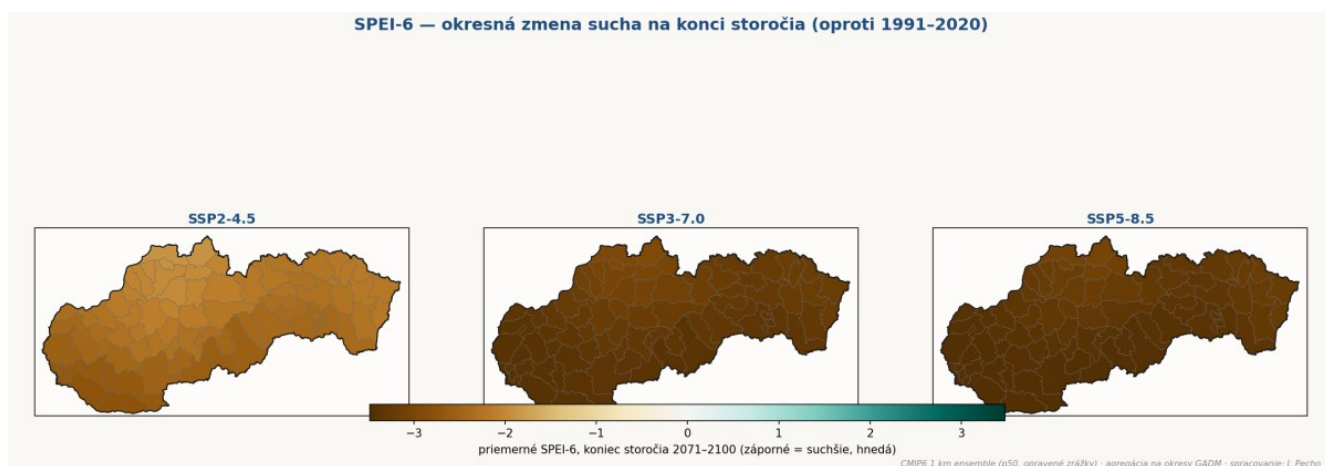


Obr. 8 Vývoj celkového odtoku pre štyri scenáre SSP. Zdroj: CMIP6 ansámbel.

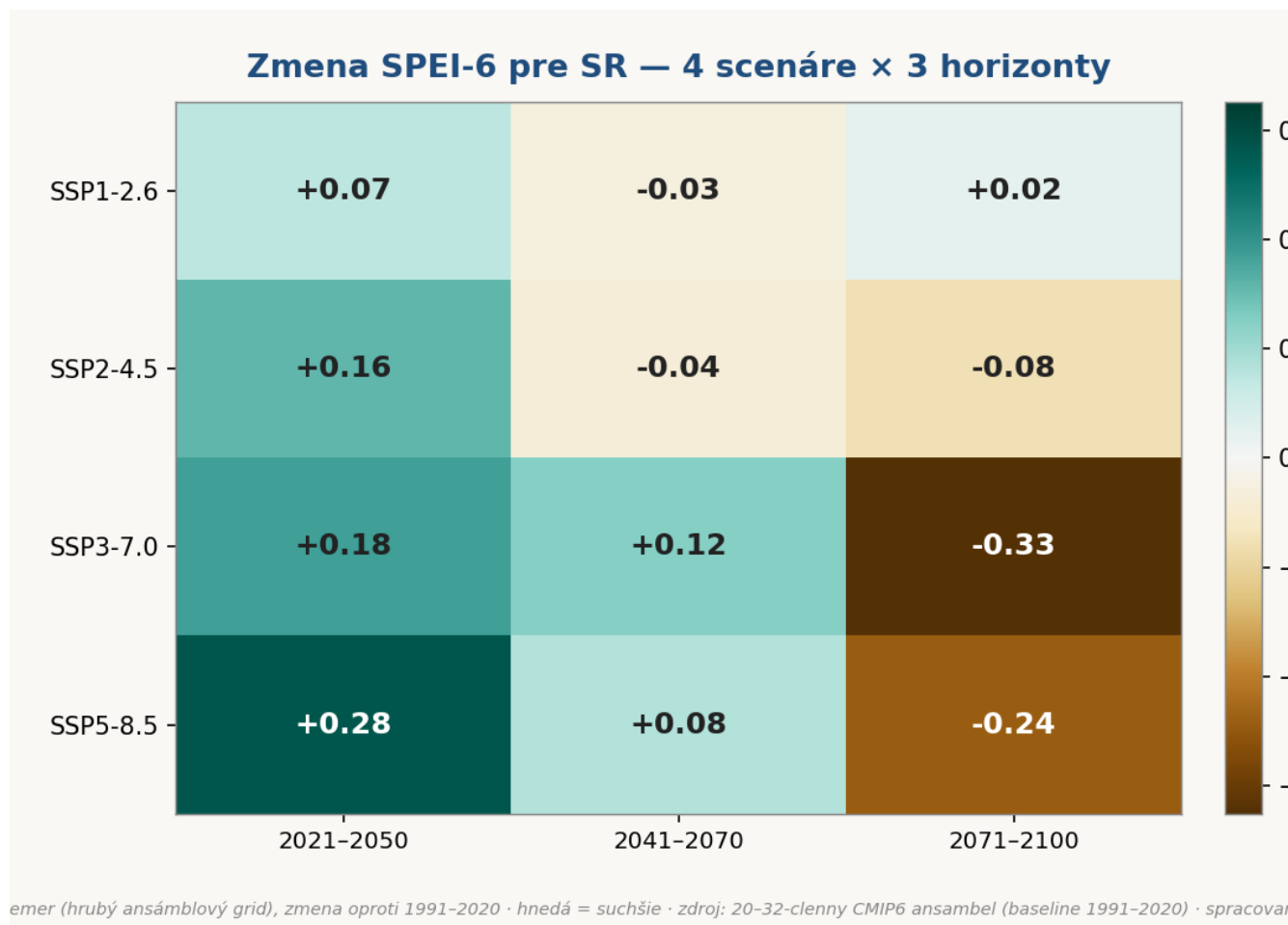
Index sucha SPEI



Obr. 9 Národná trajektória indexu SPEI-6 do roku 2100; vodorovné pásy označujú prahy mierneho a silného sucha, záporné hodnoty = suchšie. Zdroj: CMIP6 1 km ansámbel (medián).



Obr. 10 Okresná zmena sucha (SPEI-6, koniec storočia) pre scenáre SSP2-4.5, SSP3-7.0 a SSP5-8.5 — premietnutie do referenčných regiónov; hnedá = suchšie. Zdroj: CMIP6 ansámbel agregovaný na okresy.



Obr. 11 Matica zmeny SPEI-6 pre SR — 4 scenáre × 3 horizonty; hnedá = posun k suchším podmienkam. Zdroj: CMIP6 ansámbel, národný priemer.

Dve budúcnosti, jedno rozhodnutie



Rozsah budúceho sucha na Slovensku nie je predurčený. To, či sa krajina priblíži k pravej alebo k ľavej strane tohto obrazu, závisí od dnešných rozhodnutí — o emisiách aj o adaptácii.

Regionálny klimatický inštitút (RCI / Regioclim) · www.regioclim.eu · jún 2026