



renew
europe.



Sucho na Slovensku

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

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 rovnomená 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 samosprávu, 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 Sucho na Slovensku — stručné zhrnutie.....	06
2 Úvod: čo je sucho a prečo sa s ním stretávame na Slovensku	08
3 Sucho na Slovensku dnes: pozorované trendy 1961 – 2025.....	10
4 Klimatické modely a emisné scenáre SSP	13
5 Budúce sucho na Slovensku — kvantitatívne projekcie.....	16
6 Dopady sucha na poľnohospodárstvo a lesníctvo.....	21
7 Dostupnosť vody pre obyvateľov.....	26
8 Adaptácia na sucho.....	30
9 Dve Slovenská v roku 2080 — príbehy.....	33
10 Záver	37
English Summary	39
11 Bibliografia	41
Príloha — obrazová príloha.....	45
Zoznam použitých indexov a skratiek.....	55

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 oslabené odborné kapacity inštitúcií verejnej správy, ktoré sa odborne zaoberajú klímou a klimatickou zmenou.

Dlhodobo 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 meniace 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, prispôsobenie 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 Sucho na Slovensku — stručné zhrnutie

Historické trendy a ich faktory, budúce očakávané tendencie a dopady v regiónoch SR

1.1 Historické trendy sucha a ich príčiny

Sucho na Slovensku sa za posledné desaťročia zreteľne zhoršuje, a to predovšetkým v nížinných poľnohospodárskych oblastiach. Rozhodujúcou príčinou nie je pokles ročných zrážok — tie sa na celoslovenskej úrovni výrazne nezmenili — ale otepľovanie a s ním spojený rast výparu a evapotranspiračného dopytu atmosféry (zvyšujúci sa sýtosťný deficit vodných pár). Priemerná ročná teplota vzduchu vzrástla od konca 19. storočia približne o 2 °C, pričom väčšina oteplenia pripadá na obdobie po roku 1990. Teplejší vzduch odčerpáva z pôdy a rastlín viac vody, takže krajina vysychá aj pri nezmenenom množstve zrážok. Prejavuje sa to klesajúcimi hodnotami zrážkovo-evaporačného indexu (SPEI) a prehlbujúcim sa deficitom pôdnej vlhky, najmä počas vegetačnej sezóny.

Druhým výrazným trendom je sezónny a priestorový posun sucha. Ťažisko suchých epizód sa presúva z jesene a zimy do jari a leta — teda do obdobia, keď polia a lesy vodu najviac potrebujú — a najsilnejšie zasahuje juh krajiny. K tomu prispieva aj zmena atmosférickej cirkulácie, vrátane opakovaného jarného (aprílového) zrážkového deficitu v strednej Európe (Ionita et al., 2020). Posledné dve desaťročia priniesli neobvykle hustú sériu výrazných suchých rokov — 2003, 2012, 2015, 2017, 2018 – 2019, 2022 a 2024 — pričom spojené suché letá 2018 a 2019 boli v strednej Európe najvýraznejšie za približne 250 rokov (v hydrologickej a pôdnej zložke toto viacročné sucho pretrvávalo až do roku 2020; Rakovec et al., 2022; Hari et al., 2020) a obdobie 1991 – 2020 patrí k najteplejším a — z hľadiska klimateckej vodnej bilancie — aj najsuchším tridsaťročiam za niekoľko posledných storočí (paleoklimatické rekonštrukcie však dokladajú porovnateľné, miestami i výraznejšie suchá aj v 15.–17. storočí; Brázdil et al., 2022; Cook et al., 2015).

1.2 Budúce očakávané tendencie

Klimatické projekcie (20-členný ansámbl modelov CMIP6 bias-korigovaný na slovenské podmienky) sa zhodujú, že riziko sucha sa bude systematicky zvyšovať — a to aj tam, kde sa ročné úhrny zrážok prakticky nemenia. Hlavným motorom ostáva rast teploty a evapotranspiračného dopytu: stúpajúci potenciálny výpar a sýtosťný deficit vodných pár prehlbujú pôdne aj hydrologické sucho. Očakávajú sa častejšie a dlhšie suché epizódy, predovšetkým v letnej polovici roka a v južných nížinách, predlžovanie najdlhšieho súvislého obdobia bez zrážok a posun vegetačnej sezóny. Sezónny kontrast sa zostruje — vlhšie zimy a suchšie letá — a klesajúci podiel snehu na zrážkach oslabuje prirodzené nadlepšovanie letných prietokov z horských oblastí.

Rozsah budúceho sucha však nie je predurčený a silno závisí od emisnej cesty. V scenári úspešnej mitigácie (oteplenie sveta o ~1,5 °C) sa riziko zvyšuje len mierne, kým vo scenári vysokých emisií (~4 °C) výrazne — a práve pre stredoeurópsky priestor patria projekcie sucha k tým s vyššou mierou neistoty než napríklad pre Stredomorie, preto ich uvádzame vždy spolu s rozpätím neistoty, nie ako jediné číslo. Pre tri sledované horizonty (orientačne okolo rokov 2030, 2050 a 2080) z toho vyplýva jasné posolstvo: krátkodobé sucho je do veľkej miery už „zabudované“ minulým otepľovaním, no to, či bude ku koncu storočia mierne alebo extrémne, sa rozhoduje dnešnými emisnými rozhodnutiami.

1.3 Dopady na Slovensko a jeho regióny

Dopady sucha nie sú na Slovensku rovnomerné. Platí pritom jednoduché pravidlo: čím nižšie a teplejšie je územie, tým výraznejšie sucho. Najťažšie zasiahnuté sú preto nížiny a kotliny, kde sa stretáva najvyššia teplota, najintenzívnejšie poľnohospodárstvo a strategické zásoby podzemných vôd; horské oblasti sú zraniteľné inak — cez úbytok snehu, pokles letných prietokov a chradnutie lesov.

Štúdia preto budúce sucho kvantifikuje v piatich referenčných nížinných a kotlinových regiónoch (zoradené približne od najviac po menej ohrozené): (Obr. 1)

- Podunajská nížina — najteplejšia a poľnohospodársky najintenzívnejšia oblasť a zároveň najohrozenejší región krajiny: index dlhodobého sucha SPEI-12 sa pri vysokých emisiách posúva z dnešných mierne vlhkých hodnôt (+0,4) hlboko do záporu (−1,2) a aridita tu rastie najviac zo všetkých okresov (Komárno, Dunajská Streda, Šaľa). Súčasťou je Žitný ostrov — najväčšia zásobáreň pitnej vody v strednej Európe — kde sa k poklesu množstva vody pridáva riziko zhoršenia jej kvality.
- Záhorská nížina — piesočnaté podložie s nízkou retenčnou schopnosťou pôdy spôsobuje rýchly nástup sucha aj pri miernom deficite zrážok; epizódy bývajú intenzívne, hoci spravidla kratšie než v Podunajskej nížine.
- 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). Do budúcnosti hrozí nedostatok aj zhoršenie kvality pitnej vody.
- Juhoslovenská kotlina — v dlhodobom priemere zatiaľ najmenej suchá z nížin, no extrémne roky 2012 a 2022 ukázali, že dokáže dosiahnuť intenzitu sucha porovnateľnú s najexponovanejšími oblasťami; sú varovaním pred budúcou frekvenciou takýchto epizód.
- Košická kotlina — ťažšie, vlhkosť lepšie zadržiavajúce pôdy ju robia o niečo odolnejšou, no aj tu tlak sucha rastie, výrazne najmä v mestskom prostredí (mestské okresy Košíc patria k najviac suchom zasiahnutým na Slovensku).

Mimo nížin sa ťažisko dopadov presúva do lesov a hôr. V Karpatoch pokračuje chradnutie smrekových porastov — sucho oslabuje obranyschopnosť stromov a podporuje premnoženie podkôrneho hmyzu — a postupne sa pridávajú aj buky na suchších južných svahoch; zároveň rastie index požiarneho nebezpečenstva.

Naprieč regiónmi sa dopady prejavujú v tých istých sektoroch: v poľnohospodárstve (nižšie a kolísavejšie úrody, rastúca potreba závlah), v zásobovaní obyvateľstva vodou (klesajúce letné a minimálne prietoky, tlak na množstvo aj kvalitu pitnej vody), v lesníctve a ekosystémoch (chradnutie porastov, vyššie riziko požiarov), ako aj v energetike a ochrane zdravia, kde sa sucho čoraz častejšie spája s vlnami horúčav. Nejde pritom o okrajový problém: priame straty zo sucha v EÚ sa dnes odhadujú rádo vo 9 miliárd eur ročne a bez výraznej klimateckej akcie môžu do konca storočia vzrásť na desiatky miliárd eur ročne (Naumann et al., 2021; Feyen et al., 2020) — a Slovensko patrí k najexponovanejším oblastiam tohto rizika v Európe.

2 Úvod: čo je sucho a prečo sa s ním stretávame na Slovensko

Krátka taxonómia sucha, postavenie Slovenska v európskej rizikovej zóne a ciele štúdie

V skratke

- Sucho je dočasný nedostatok vody (odchýlka od normálu), nie trvalá aridita — Slovensko nie je aridná krajina, ale čoraz častejšie a dlhšie upadá do sucha.
- Vzniká reťazou štyroch prepojených typov: meteorologické → pôdne → hydrologické → socioekonomické sucho (plus ekologické a rýchle „bleskové“ sucho).
- Hlavným motorom u nás nie je pokles zrážok, ale rastúci výpar — Slovensko leží v prechodovej zóne medzi vlhúcim severom a vysychajúcim juhom Európy.
- Cieľom štúdie je opísať súčasný stav, preložiť emisné scenáre do „scenárov sucha“ a premietnuť ich do regiónov a sektorov.

2.1 Čo je sucho — dočasný nedostatok vody, ktorý sa plazi

Sucho je dočasný nedostatok vody oproti podmienkam, na ktoré je dané územie, jeho príroda aj spoločnosť dlhodobo prispôbené (dočasné vychýlenie od normálu). Práve táto relatívnosť je dôležitá: sucho nie je to isté ako aridita (Wilhite & Glantz, 1985). Aridita je trvalý znak suchej klímy, púšte a polopúšte sú aridné stále, nie preto, že im práve chýba voda, ale preto, že ju 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. Tento rozdiel medzi trvalým stavom a dočasnou anomáliou je kľúčom k správne mu čítaniu celej štúdie.

Sucho má aj druhú črtu, ktorá ho odlišuje od ostatných prírodných ohrození: je to „plíživý“ jav. Povodeň, víchrica či krupobitie udrú v priebehu hodín a ich začiatok aj koniec sú zreteľné. Sucho sa naproti tomu rozvíja týždne až mesiace, nemá ostrú hranicu a často si ho všimneme až vtedy, keď už spôsobuje škody, keď vyschnú polia, klesnú hladiny studní a riek alebo sa obmedzí zásobovanie vodou. Vzniká súhrou dvoch faktorov: dlhšieho obdobia s podnormálnymi zrážkami a vysokých teplôt, ktoré zrýchľujú výpar z pôdy aj z rastlín. Teplo tu pôsobí ako zosilňovač, aj pri rovnakom množstve zrážok je v teplejšej klíme pôda suchšia, pretože sa z nej vyparí viac vody. Tento mechanizmus je pre Slovensko zásadný a vraciam sa k nemu nižšie.

2.2 Krátka taxonómia sucha: štyri prepojené podoby jedného javu

Sucho nie je jeden jav, ale reťazec javov, ktoré na seba nadväzujú s časovým oneskorením. Odborná literatúra (a operačné systémy monitorovania ako Európske observatórium sucha) ho preto delia na štyri navzájom prepojené typy (WMO & GWP, 2016). Na začiatku stojí meteorologické sucho, teda nedostatok zrážok, spravidla v kombinácii s vyššou teplotou a výparom. Ak deficit zrážok pretrváva, prechádza do pôdneho (poľnohospodárskeho) sucha, keď v koreňovej zóne pôdy nezostáva dosť vlhky pre rastliny. Ďalej v poradí nasleduje hydrologické sucho, prejavujúce sa nízkymi prietokmi riek, klesajúcou hladinou podzemných vôd a klesajúcou zásobou vody v nádržiach. A napokon, ak nedostatok vody zasiahne hospodárstvo a obyvateľstvo, hovoríme o socioekonomickom suchu. Túto postupnosť možno zhrnúť do jednoduchej reťaze príčin a následkov:

menej zrážok → teplo a zvýšený výpar → vyschnutá pôda → nízke prietoky a klesajúce zásoby povrchových a podzemných vôd → dopady na hospodárstvo a ľudí (Obr. 2)

Časové oneskorenie medzi článkami tejto reťaze je v praxi veľmi dôležité: kým meteorologické sucho môže odznieť po niekoľkých výdatnejších zrážkach, hydrologické sucho a najmä deficit podzemných vôd môžu trvať ešte mesiace po tom, ako sa počasie vráti k normálu. K štyrom základným typom sa v poslednom čase pridávajú dva pojmy, ktoré sú pre Slovensko čoraz relevantnejšie: ekologické sucho, zasahujúce lesy a vodné i suchozemské ekosystémy, a takzvané rýchle, bleskové sucho (flash drought)

(Mo & Lettenmaier, 2015; Ford & Labosier, 2017), prudký nástup pôdneho sucha počas vln horúčav, keď extrémny výpar dokáže vysušiť pôdu v priebehu dvoch až troch týždňov.

2.3 Prečo sa sucho vyskytuje na Slovensku

Slovensko leží v strednej Európe, v pásme, ktoré klimatológia označuje za prechodovú zónu medzi vlhnutím severom kontinentu a vysychajúcim Stredomorím. Toto postavenie je dôvodom, prečo je sucho v našej lokalite veľmi komplexný a zložito definovateľný fenomén. Pri pohľade na samotné ročné úhrny zrážok totiž signál zmeny nemusí byť dramatický; rozhodujúcim faktorom je rastúca „odparovacia“ požiadavka atmosféry. Teplejší vzduch dokáže pojať viac vodnej pary, a preto z krajiny odčerpáva viac vody, pôda, rastliny a vodné toky vysychajú aj vtedy, keď spadne podobné množstvo zrážok ako kedysi. Najnovšie európske hodnotenia (Európsky atlas rizika sucha Spoločného výskumného centra EÚ z roku 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, a že hlavným motorom je práve zvýšený výpar v dôsledku nárastu teploty.

2.4 Ciele a zameranie štúdie

Cieľom tejto štúdie je poskytnúť vecný, zrozumiteľný a zároveň vedecky obhájitelný podklad o suchu na Slovensku, taký, ktorý dokáže poslúžiť rozhodovacej praxi aj ako nástroj vzdelávania verejnosti. Štúdia sleduje štyri prepojené ciele. Po prvé, opísať súčasný stav sucha na Slovensku na základe pozorovaní z obdobia 1991 – 2025 v porovnaní s referenčným normálom 1991 – 2020, ako sa menia teplota, zrážky, výpar, vlhkosť pôdy a prietoky. Po druhé, preložiť emisné scenáre budúceho vývoja do reči „scenárov sucha“: namiesto abstraktných kriviek pracujeme s predstavou sveta, ktorý sa oteplí o približne +1,5, +2,7 alebo +4 °C, a ukazujeme, čo každá z týchto ciest znamená pre suchu u nás. Po tretie, premietnuť budúce sucho do konkrétneho územia, nielen ako celoslovenský priemer, ale v členení na kraje a okresy a v rámci regiónov pre tri časové horizonty zhruba okolo rokov 2030, 2050 a 2080. A po štvrté, posúdiť dopady sucha na poľnohospodárstvo a na dostupnosť vody pre obyvateľstvo a načrtnúť, ako veľmi sa budúce riziko líši v scenári „s adaptačnými opatreniami“ oproti scenáru „bez nich“.

Metodickou kostrou štúdie je súbor (ansámbel) približne 20 globálnych klimatických modelov generácie CMIP6, štatisticky upravených (bias-korigovaných) voči pozorovaniam a interpolovaných na podrobnú mriežku s rozlíšením 1 km, ktorá zohľadňuje členitý reliéf Slovenska. Výsledky sa dôsledne uvádzajú ako stredná hodnota (medián) súboru spolu s rozpätím neistoty, pretože práve transparentné priznanie neistoty je znakom dôveryhodnosti, najmä pri suchu, ktoré je citlivé na voľbu referenčného obdobia aj na spôsob výpočtu výparu. Text hlavných kapitol je písaný opisným jazykom zrozumiteľným bez špecializovaného vzdelania; presné technické definície ukazovateľov sucha, prahové hodnoty a metodické detaily sú sústredené do záverečnej odbornej prílohy. Zámerom nie je predpovedať konkrétne číslo pre daný rok a obec, ale poskytnúť spoľahlivý a územne konkrétny rámec pre dlhodobé rozhodovanie o tom, ako sa Slovensko na čoraz suchšiu budúcnosť pripraví.

3 Sucho na Slovensku dnes: pozorované trendy 1961 – 2025

Teplota, zrážky, vyparovanie, deficit pôdnej vlahy a prietoky – a recentné suché epizódy

V skratke

- Priemerná ročná teplota vzrástla v období 1961 – 2025 približne o $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, najviac po roku 1990 – to je hlavný motor zhoršovania sucha.
- Ročné zrážky sa celoslovensky takmer nezmenili, ale prerozdělili sa: suchšie letá na juhu a intenzívnejšie príválové dažde.
- Rastúci výpar posúva vodnú bilanciú do deficitu → prehlbuje sa pôdne sucho a klesajú letné a minimálne prietoky riek.
- Posledné dve desaťročia priniesli neobvykle hustú sériu suchých rokov (2003, 2012, 2015, 2017, 2018 – 2019, 2022, 2024).

Priemerná ročná teplota vzduchu na Slovensku vzrástla rýchlejšie než globálny priemer – od konca 19. storočia približne o $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, kým globálne otepľovanie dosiahlo zhruba $+1,2 - 1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (pevninské vnútrozemie sa otepluje rýchlejšie než oceány). Zrážky na juhu krajiny mierne klesli a, čo je dôležitejšie, sezónne sa prerozdělili, ťažisko sucha sa posúva z jesene a zimy do jari a leta, teda práve do obdobia, keď poľia a lesy vodu najviac potrebujú. Priemerná ročná teplota v Hurbanove sa dnes približuje hodnotám, aké boli ešte pred storočím typické pre teplejšie oblasti južnej Európy (napr. Pádsku nížinu). Pribúdajú roky s výrazným suchom (2003, 2012, 2015, 2017, 2018 – 2019, 2022 a 2024), pričom spojené suché letá 2018 a 2019 boli v strednej Európe najvýraznejšie za posledných približne 250 rokov a obdobie 1991 – 2020 patrí k najteplejším a – z hľadiska vodnej bilancie – aj najsuchším tridsaťročiam za niekoľko posledných storočí (porovnateľné suchá sú doložené aj v 15.–17. storočí; Brázdil et al., 2022). Najviac zasiahnuté sú nížiny s intenzívnym poľnohospodárstvom.

3.1 Teplota vzduchu

Priemerná ročná teplota vzduchu na Slovensku v období 1961 – 2025 rástla rýchlosťou približne $+0,23\text{ }^{\circ}\text{C}$ za desaťročie, pričom celkový nárast za toto obdobie dosahuje približne $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; v dlhšom pohľade od konca 19. storočia ide o oteplenie okolo $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Otepľovanie nie je rovnomerné, najvýraznejšie je v letnom a jarnom polroku a väčšina nárastu sa koncentruje do obdobia po roku 1990. Posledné dve desaťročia jednoznačne dominujú rebríčku najteplejších rokov; rok 2024 bol s odchýlkou približne $+2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ nad normálom 1991–2020 najteplejším v histórii meraní a zima 2023/2024 patrila s celoslovenským priemerom okolo $+3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ k extrémne teplým. Rast teploty je najrobustnejším a najlepšie doloženým prejavom zmeny klímy a zároveň hlavným motorom zhoršovania sucha, pretože priamo zvyšuje výpar a evapotranspiračný dopyt.

3.2 Zrážky

Na rozdiel od teploty nemajú zrážky jednoznačný celoslovenský trend, ročné úhrny sa za obdobie 1961 – 2025 na národnej úrovni zmenili len málo (rádovo o jednotky percent). Podstatná je však zmena v ich priestorovej a sezónnej distribúcii. V južných nížinách (Podunajská a Východoslovenská nížina, Žitný ostrov) letné a celoročné úhrny skôr stagnujú alebo mierne klesajú, zatiaľ čo na severe a vo vyšších polohách mierne pribúdajú. Súčasne sa mení charakter zrážok: rastie intenzita krátkodobých príválových (konvektívnych) zrážok, kým počet zrážkových dní v teplej časti roka v nížinách skôr klesá a predlžujú sa suché periódy medzi dažďami. Zrážky sa teda koncentrujú do menej, ale výdatnejších udalostí. Tento dvojaký charakter, viac suchých dní a zároveň intenzívnejšie extrémy, je z hľadiska sucha aj povodní zásadný a pre poľnohospodárstvo nepriaznivý, pretože prudké lejaky odtekajú rýchlejšie a horšie sa vsakujú, najmä keď vyschnutá pôda po prvotnom rýchlom nasiaknutí povrch zaceľuje a ďalšiu vodu už neprijíma.

3.3 Vyparovanie a klimatická vodná bilancia

Rast teploty sa premieta do rastu potenciálnej evapotranspirácie (PET) a referenčného výparu, ktoré v nížinách za sledované obdobie citelne stúpili. Príčinou je nielen vyššia teplota, ale aj rastúci sýtosťný deficit vodných pár (rozdiel medzi nasýtenosťou a skutočnou vlhkosťou vzduchu), teplejší vzduch dokáže „vytiahnuť“ z pôdy a rastlín viac vody. Kľúčovým ukazovateľom je preto klimatická vodná bilancia, teda rozdiel medzi zrážkami a potenciálnym výparom ($P - PET$). Kým ročné úhrny zrážok ostávajú približne nezmenené, rastúci výpar posúva túto bilanciu, najmä počas vegetačnej sezóny (apríl – september) a najmä v južných nížinách, do čoraz zápornejších hodnôt. To znamená, že aj pri rovnakom množstve zrážok je dnes k dispozícii menej využiteľnej vody než pred desaťročiami, čo je jadrom rastúceho rizika sucha na Slovensku. (Obr. 21) Tento vysušný účinok teplejšieho vzduchu možno jednoducho pomenovať ako „vysušný efekt atmosféry“.

3.4 Deficit pôdnej vlhky a sucho

Záporná klimatická vodná bilancia sa prejavuje prehlbovaním deficitu pôdnej vlhky. Monitoring sucha (SHMÚ) a indexy ako SPEI (zrážkovo-evaporačný index zohľadňujúci aj výpar) a SMA (anomália pôdnej vlhky) 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 zahŕňajúce teplotu a výpar (SPEI, deficit pôdnej vlhky) klesajú smerom k suchším podmienkam, čo opäť potvrdzuje, že hnacím motorom je rastúci atmosférický dopyt, nie pokles zrážok. Predlžuje sa aj maximálny počet po sebe nasledujúcich suchých dní (CDD) v teplej časti roka, predovšetkým na juhu. Najzraniteľnejšie sú Podunajská a Východoslovenská nížina a Žitný ostrov, kde sa kombinuje vysoký výpar, intenzívne poľnohospodárstvo. (Obr. 3)

3.5 Prietoky riek a hydrologické sucho

Vo finálnom článku reťaze, v odtoku, sa pozorované zmeny prejavujú dvojako. Po prvé, mení sa sezónne rozdelenie odtoku: 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 mnohých povodiach, predovšetkým v nížinných a južných oblastiach, sa pozoruje klesajúci trend nízkych a minimálnych prietokov (napr. Q95 a 7-dňové minimálne prietoky) v letnej a jesennej časti roka, sprevádzaný poklesom hladín podzemných vôd počas suchých rokov. Hydrologické sucho tak nastupuje skôr, trvá dlhšie a zasahuje väčšie plochy než v minulosti, s priamym dopadom na zásobovanie vodou, závlahy, kvalitu vody a ekologické toky.

Analýza priemerných a minimálnych mesačných prietokov za posledných 14 rokov, založená na priemerných denných prietokoch z hydrologických ročeniek, ukázala zhodný obraz: z 29 staníc priemerný mesačný prietok vo februári rastie v piatich staniaciach, no v júli klesá v 13 staniaciach (signifikantný klesajúci trend). Podobne sa správajú minimálne mesačné prietoky – v jarných mesiacoch (február – apríl) v niektorých podhorských staniaciach stúpajú, no od mája do júla vo väčšine staníc klesajú; signifikantný klesajúci trend bol zaznamenaný v piatich staniaciach v júni a v šiestich v júli. Signifikantnosť týchto trendov je však vzhľadom na krátky časový rad (14 rokov) diskutabilná.

3.6 Recentné suchá ako súčasť aktuálnej dynamiky

Trendy opísané vyššie sa v posledných dvoch desaťročiach materializovali v sérii výrazných suchých epizód, ktoré už nie sú ojedinelými výkyvmi, ale prejavom novej dynamiky. Nasledujúci prehľad zhŕňa najvýznamnejšie z nich: (Obr. 5)

Obdobie	Charakter a dopady
2003	Európska vlna horúčav a sucha; tepelný a vlhkový stres poľnohospodárstva a lesov, nízke letné prietoky.
2011 – 2012	Suché epizódy s horúcim letom 2012; deficit pôdnej vlhky na juhu.
2015	Rozsiahle stredoeurópske sucho a horúce leto; rekordne nízke prietoky a poklesy podzemných vôd.
2017	Jarné a vegetačné sucho s dopadom na poľné plodiny.
2018 – 2019	Dlhotrvajúce viacročné sucho; hlboký deficit pôdnej vlhky a podzemných vôd, straty v poľnohospodárstve, chradnutie smrekových porastov; rok 2018 jeden z najteplejších.

Obdobie	Charakter a dopady
2022	Silné letné sucho naprieč Európou; veľmi nízke prietoky (vrátane Dunaja), straty na úrode v južných nížinách.
2024	Najteplejší rok v histórii meraní SR (odchýlka ~ +2,1 °C); teplotne podmienené suché epizódy a vodný stres.

2024 Najteplejší rok v histórii meraní SR (odchýlka ~ +2,1 °C); teplotne podmienené suché epizódy a vodný stres. Charakteristickým znakom posledných epizód je ich teplotný podpis: aj pri zrážkach blízkych priemeru viedol vysoký výpar k rýchlemu nástupu a prehĺbeniu sucha. Suchá rokov 2015, 2018 – 2019 a 2022 navyše zasiahli väčšie územie a viacero sektorov súčasne (poľnohospodárstvo, lesníctvo, vodné hospodárstvo, splavnosť), čo zodpovedá predpokladu, že sa zvyšuje pravdepodobnosť zložených a kaskádových udalostí typu horúčava, sucho, požiarne nebezpečenstvo (Zscheischler et al., 2018; Sutanto et al., 2025).

3.7 Zhrnutie pozorovaných trendov 1961 – 2025

Veličina	Pozorovaný trend	Najvýraznejšie
Teplota vzduchu	rast ~ +0,3 °C/dekádu (spolu ~ +1,5 °C)	leto a jar; nížiny a mestá
Zrážky (ročné)	bez výrazného národného trendu	—
Zrážky (priestor./sezóna)	pokles na juhu, rast intenzity prívlov	Podunajská a Vých. nížina, leto
Vyparovanie / PET	rast (vyšší teplotný a vlhkostný dopyt)	vegetačná sezóna, nížiny
Klímat. vodná bilancia (P–PET)	zápornejšia	leto, juh
Deficit pôdnej vlahy / SPEI	smer k suchším podmienkam	po roku 2000, nížiny
Prietoky riek (nízke, Q95)	pokles; skorší jarný odtok	letno-jesenné minimá, juh

Súhrnne: pozorované obdobie ukazuje jasný a vnútorne konzistentný obraz — výrazné otepľovanie a rast výparu pri približne nezmenených ročných zrážkach posúvajú vodnú bilanciu do deficitu, prehlbujú pôdne sucho a znižujú letné prietoky, najmä v južných nížinách. Recentné suché epizódy nie sú náhodné výkyvy, ale prejav tejto dynamiky a zároveň predzvesť podmienok, ktoré budú podľa klimatických scenárov v 21. storočí čoraz častejšie.

4 Klimatické modely a emisné scenáre SSP: prečo ich využívame a ako sa interpretujú

Odborné východiská pre projekcie teploty a zrážok na Slovensku do roku 2100

V skratke

- Klíma sa neprognozuje ako počasie — pracuje sa so scenármi SSP, čo sú podmienené projekcie „ak – tak“, nie predpovede.
- Projekcie stoja na 20-členom ansámblí modelov CMIP6, štatisticky upravenom (QDM) a prepočítanom na 1 km mriežku pre SR.
- Rozsah medzi scenármi vyjadruje slobodu rozhodnutia (emisie), nie chybu výpočtu: do ~2040 sú scenáre podobné, ku koncu storočia sa dramaticky rozchádzajú.
- Robustný je smer oteplenia a tepelných extrémov; zrážky, búrky a sneh ostávajú neistejšie.

4.1 Prečo pracujeme so scenármi, a nie s predpoveďou

Budúci vývoj klímy nie je možné predpovedať rovnakým spôsobom ako počasie na niekoľko dní dopredu. Zatiaľ čo predpoveď počasia je úloha s počiatočnými podmienkami, z dnešného stavu atmosféry sa integruje fyzika na krátky čas, dlhodobá projekcia klímy je úloha s okrajovými podmienkami, v ktorej je rozhodujúce, ako sa bude vyvíjať vonkajšie pôsobenie na klimatický systém, predovšetkým koncentrácie skleníkových plynov a aerosólov. Toto pôsobenie však nie je dané fyzikou; závisí od ľudských rozhodnutí, od demografie, ekonomického rastu, technológií, energetiky a klimatickej politiky. Práve preto klimatológia nepracuje s jedinou „predpoveďou“, ale so súborom scenárov: vnútorne konzistentných, ale vedome alternatívnych obrazov budúcnosti. Scenár nie je predpoveď ani pravdepodobnostné tvrdenie o tom, čo nastane; je to podmienená projekcia typu „ak sa svet bude vyvíjať takto, klíma odpovie takto“. Rozsah medzi scenármi preto nevyjadruje chybu výpočtu, ale skutočnú slobodu rozhodnutia, ktorú ľudstvo ešte má.

4.2 Klimatické modely: od globálnej cirkulácie k modelom zemského systému

Fyzikálnym jadrom projekcií sú globálne klimatické modely (GCM) a ich rozšírené verzie — modely zemského systému (ESM). Sú to numerické reprezentácie klimatického systému, ktoré na trojrozmernej sieti pokrývajúcej atmosféru a oceán riešia základné rovnice zachovania hybnosti, hmoty a energie spolu s prenosom žiarenia a fázovými premenami vody. Rozdiely v parametrizáciách, najmä oblačnosti a spätných väzieb, sú hlavným zdrojom rozdielov medzi modelmi. Žiadny jednotlivý model nie je „ten správny“; každý je jednou fyzikálne podloženou realizáciou klímy, a preto sa pracuje s ansámblom modelov.

Aby boli výstupy z desiatok modelových centier porovnateľné, koordinuje ich Svetový program výskumu klímy v rámci projektu CMIP (Coupled Model Intercomparison Project). Jeho šiesta fáza, CMIP6, tvorí fyzikálny základ Šiestej hodnotiacej správy IPCC (AR6, 2021). Historická simulácia (1850 – 2014) poháňaná rekonštruovaným pôsobením slúži na validáciu voči pozorovaniam. Na historický beh potom nadväzujú scenárové projekcie do roku 2100 (resp. 2300), ktoré dodáva projekt ScenarioMIP — a práve tu vstupujú do hry scenáre SSP. Scenárov SSP (Shared Socioeconomic Pathways) spájajú socio-ekonomický naratív s emisnou a koncentračnou trajektóriou do jedného konzistentného rámca (O'Neill et al., 2016, 2017; Riahi et al., 2017; Gidden et al., 2019).

4.3 Štruktúra SSP: päť naratívov a matica SSP × pôsobenie

Základom rámca je päť spoločných socio-ekonomických ciest (SSP1 – SSP5), z ktorých každá opisuje vnútorne konzistentný príbeh vývoja sveta — populáciu, ekonomiku, urbanizáciu, technológie, využitie krajiny a energetiku. Tieto naratívy sú usporiadané podľa dvoch osí: náročnosti mitigácie (ako ťažké

bude znižovať emisie) a náročnosti adaptácie (ako ťažké bude vyrovnať sa s dopadmi). SSP teda na rozdiel od RCP 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.

IPCC AR6 a projekt ScenarioMIP definujú päť prioritných (Tier-1) scenárov, ktoré pokrývajú spektrum od ambiciózneho mitigačného po veľmi vysoké emisie a tvoria spoločnú kostru väčšiny regionálnych analýz:

Scenár	Charakter	Pôsobenie 2100	Globálne oteplenie 2081–2100 *
SSP1-1.9	veľmi nízke emisie, cieľ ~1,5 °C	1,9 W/m ²	1,4 °C (1,0 – 1,8)
SSP1-2.6	nízke emisie, cieľ „výrazne pod 2 °C“	2,6 W/m ²	1,8 °C (1,3 – 2,4)
SSP2-4.5	stredné emisie, stredná cesta	4,5 W/m ²	2,7 °C (2,1 – 3,5)
SSP3-7.0	vysoké emisie, slabá spolupráca	7,0 W/m ²	3,6 °C (2,8 – 4,6)
SSP5-8.5	veľmi vysoké emisie, horný odhad	8,5 W/m ²	4,4 °C (3,3 – 5,7)

4.4 Prečo tieto scenáre využívame v regionálnej praxi

Pre regionálne rozhodovanie nie je účelné zobrazovať na každom grafe všetkých päť scenárov súčasne; oveľa použiteľnejšia je trojica až štvorica, ktorá transparentne pokrýva nízku, strednú a vysokú vetvu budúcnosti. V praxi sa preto ako jadro používajú SSP1-2.6 (svet, v ktorom mitigačia uspela), SSP2-4.5 (pokračovanie súčasných trendov bez výraznej zmeny) a SSP3-7.0 (svet s vysokými emisiami a slabou medzinárodnou spoluprácou), pričom SSP5-8.5 slúži ako horný stresový test pre posúdenie odolnosti dlhovekej infraštruktúry voči najnepriaznivejšiemu vývoju. Toto rozvrstvenie má dvojakú logiku. Po prvé, v blízkom horizonte (do ~2040) sú rozdiely medzi scenármi malé, klíma najbližších dvoch desaťročí je do veľkej miery už „zabudovaná“ minulými emisiami a zotrvačnosťou systému, takže pre krátkodobé plánovanie postačí jedna stredná vetva. Po druhé, ku koncu storočia sa scenáre dramaticky rozchádzajú, a práve tu sa rozhoduje, či bude oteplenie mierne alebo extrémne, preto má zmysel mať pokrytú aj nízku, aj vysokú vetvu. SSP5-8.5 sa pritom dnes považuje skôr za málo pravdepodobný horný okraj než za referenčný „business-as-usual“, no ako stresový test si svoju hodnotu zachováva.

4.5 Od globálneho modelu k regionálnej projekcii: downscaling a korekcia biasu

Globálne modely s rozlíšením 50 – 150 km nedokážu zachytiť členitý reliéf Slovenska ani lokálne extrémne, preto sa ich výstup regionalizuje. Regionalizácia prebieha v reťazi krokov, v ktorej sa po celej ceste sleduje a komunikuje neistota: referenčné dáta → korekcia biasu → priestorová interpolácia (regrid) na 1 km s výškovou korekciou → výpočet klimatických a suchových indexov. Korekcia systematickej chyby (bias correction). Toto je kľúčový krok celého spracovania: každý model nesie systematickú odchýlku od pozorovaní (napríklad trvalo chladnejšie leto alebo nadhodnotený počet zrážkových dní), ktorú treba odstrániť, inak by boli absolútne hodnoty indexov neplatné. Použili sme metódu kvantilového delta- mapovania (QDM, Quantile Delta Mapping). Do výpočtov ďalej vstupuje 20 modelov výhradne v bias- korigovanej podobe. Priestorová interpolácia (regrid) a výšková korekcia. Bias-korigované polia sa interpolujú na jednotnú mriežku s rozlíšením 1 km v Lambertovej konformnej projekcii pre územie Slovenska. (Obr. 6)

Z bias-korigovaných 1 km polí sa počíta sada klimatických indikátorov a indexov sucha (teplotné extrémne ako horúce dni, tropické noci, mrazové dni; zrážkové extrémne Rx1day, Rx3day, R20mm; suché obdobia CDD; indexy sucha SPI a SPEI v 3-, 6- a 12-mesačnom okne; deficit pôdnej vlhky; index požiarneho nebezpečenstva FWI). Spoľahlivosť reťaze sa overuje na nezávislom období porovnaním s pozorovaniami SHMÚ a E-OBS pomocou metrík ako odchýlka (bias), RMSE a korelácia. Validácia potvrdzuje, že po korekcii QDM ansámbl veľmi dobre reprodukuje klimatické vlastnosti — priemerný ročný chod aj ročné úhrny teploty a zrážok (zhoda ročných zrážkových úhrnov s normálom SHMÚ je rádovo do 5 %, korelácia dennej teploty 0,84 – 0,89). (Obr. 7)

4.6 Projekcie teploty a zrážok pre Slovensko podľa scenárov

Pre územie Slovenska, reprezentované ansámblovým mediánom CMIP6 (nížinné a stredné polohy, voči normálu 1991 – 2020), vychádza nasledujúci obraz oteplenia priemernej ročnej teploty vzduchu: (Obr. 8)

Horizont	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
2021 – 2050 (blízky)	+1,3 °C	+1,4 °C	+1,4 °C	+1,6 °C
2041 – 2070 (stredný)	+1,7 °C	+2,0 °C	+2,3 °C	+2,7 °C
2071 – 2100 (vzdialený)	+1,6 °C	+2,5 °C	+3,7 °C	+4,6 °C

2071 – 2100 (vzdialený) +1,6 °C +2,5 °C +3,7 °C +4,6 °C Charakteristické je, že v blízkom horizonte sú rozdiely medzi scenármi malé (rádovo desatiny stupňa), zatiaľ čo ku koncu storočia narastá rozdiel medzi mitigačnou a vysokoemisnou vetvou na viac než tri stupne — to je čisto dôsledok scenárovej, nie modelovej neistoty (k dekompozícii neistoty pozri Hawkins & Sutton, 2009). Oteplenie sa navyše nepremiata len do priemerov, ale predovšetkým do extrémov: počet horúcich dní ($T_{\max} \geq 30\text{ °C}$) sa v nížinách viac než zdvojnásobuje až zoštvornásobuje, prudko pribúdajú tropické noci ($T_{\min} \geq 20\text{ °C}$), ktoré sú dnes zriedkavé, a výrazne klesá počet mrazových dní a rozsah snehovej pokrývky. (Obr. 9)

Poznámka k referenčným obdobiam: uvádzané zmeny sa vzťahujú na dve rôzne referenčné obdobia. Pozorované (historické) zmeny klímy sú v tejto správe porovnávané s referenčným obdobím 1961 – 1990, kým klimatické scenáre (projekcie) sú vzťahované k novšiemu normálu 1991 – 2020. Uvádzané hodnoty si preto neprotirečia: údaj o oteplení o približne +2 °C vyjadruje dlhodobú zmenu za viac než storočie, zatiaľ čo projektované hodnoty (napr. +1,3 – 1,6 °C do roku 2030 a +1,6 až +4,6 °C do roku 2080) sa počítajú od teplejšej základne 1991 – 2020 a pripočítavajú sa k už zrealizovanému otepleniu.

Pri zrážkach je signál slabší a neistejší, no konzistentný. Ročné úhrny sa pre Slovensko menia len mierne (rádovo o jednotky percent, s prevahou mierneho rastu), zásadná je však sezónna a priestorová prestavba: zimy budú vlhšie a s vyšším podielom dažďa na úkor snehu, letá v južných nížinách (Podunajská a Východoslovenská nížina, Žitný ostrov) skôr suchšie. Najrobustnejším zrážkovým signálom je zosilnenie krátkodobých extrémov — maximálny jednoduchový úhrn ($Rx1day$) rastie rádovo o 5 – 20 % v súlade s vyššou kapacitou teplejšej atmosféry zadržať vodnú paru (~7 % na °C) — pri súčasnom predlžovaní suchých období medzi zrážkami. Kombinácia týchto dvoch trendov znamená, že Slovensko bude čeliť súčasne rastúcemu riziku prívalových povodní aj sucha, čo sú pre vodné hospodárstvo a poľnohospodárstvo dva najdôležitejšie praktické dôsledky scenárov. (Obr. 10)

4.7 Limity a správna interpretácia scenárov

Pri používaní scenárov je nevyhnutné rešpektovať niekoľko zásad. Scenáre nie sú predpovede ani pravdepodobnosti — žiadnemu SSP nemožno bez ďalších predpokladov priradiť konkrétnu pravdepodobnosť výskytu; opisujú „čo by nastalo, ak“. Číslo v názve je nameplate pôsobenie, nie presná hodnota pre každý model. Surové modelové pole nie je „pravda“, ale jedna realizácia; relevantná je ansámblová štatistika a jej neistota. Korekcia biasu zlepšuje súlad s pozorovaniami, no neopravuje chýbajúcu fyziku. A napokon, vierohodnosť projekcií je rôzna pre rôzne veličiny: smerový signál oteplenia a nárastu tepelných extrémov je vysoko robustný, kým lokálne sezónne úhrny zrážok, správanie konvektívnych búrok a snehové pomery ostávajú citlivé na neistotu. Hodnota scenárov nespočíva v tom, že povedia presné číslo pre konkrétny rok a obec, ale v tom, že poskytujú vedecky obhájitelný a vnútorne konzistentný rámec pre dlhodobé rozhodovanie — a zároveň jasne ukazujú, že podstatná časť budúceho rozsahu zmeny stále závisí od dnešných emisných rozhodnutí.

5 Budúce sucho na Slovensku

Kde, kedy a koľko: meteorologické, pôdne, hydrologické a zložené sucho podľa scenárov SSP

V skratke

- Hlavným hnacím motorom budúceho sucha je rast teploty a atmosférického dopytu po vode (VPD), nie pokles zrážok. Ide o tzv. výsušný efekt atmosféry.
- Riziko sucha rastie vo všetkých scenároch; pri SSP5-8.5 klesá SPEI-12 v Podunajskej nížine z +0,4 na -1,2 a aridita celoštátne stúpa o vyše 50 %.
- Najvýraznejšie zmeny sú v južných nížinách a kotlinách a v letnej polovici roka; predlžujú sa suché obdobia bez zrážok.
- O tom, či bude sucho mierne alebo chronické, rozhodujú emisie — najväčšia akcelerácia nastáva v druhej polovici storočia.

Spoločným menovateľom všetkých typov sucha je, že hlavným hnacím motorom budúceho zhoršovania nie je ani tak pokles zrážok, ako rast teploty a atmosférického dopytu po vode (sýtosťný deficit vodných pár, VPD), ktorý v Bratislave podľa ansámblu rastie z približne 0,4 kPa na 0,7 – 0,8 kPa pri vysokých scenároch ku koncu storočia — teda zhruba o 75 až 100 % (pri hornej hranici takmer na dvojnásobok).

Jednoducho povedané, ide o výsušný efekt atmosféry: čím je vzduch teplejší a suchší, tým viac vlhky odčerpáva z pôdy, rastlín a vodných plôch, aj keď zrážok spadne rovnako.

5.1 Teplota vzduchu — ročná a sezónna

Priemerná ročná teplota vzduchu rastie vo všetkých scenároch; rozsah zmeny je v blízkom horizonte malý a ku koncu storočia silne scenárovo podmienený. Pre nížinné a stredné polohy Slovenska (ansámblový medián voči 1991 – 2020) platí: (Obr. 11)

Horizont	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
2021 – 2050 (~2030)	+1,3 °C	+1,4 °C	+1,4 °C	+1,6 °C
2041 – 2070 (~2050)	+1,7 °C	+2,0 °C	+2,3 °C	+2,7 °C
2071 – 2100 (~2080)	+1,6 °C	+2,5 °C	+3,7 °C	+4,6 °C

2071 – 2100 (~2080) +1,6 °C +2,5 °C +3,7 °C +4,6 °C Tab. 5.1. Zmena priemernej ročnej teploty vzduchu (ansámblový medián, voči 1991 – 2020), reprezentatívne pre nížinné a stredné polohy. Zdroj: CMIP6 ansámbel (risk_workflow).

Sezónne nie je oteplenie rovnomerné: najsilnejšie sa prejavuje v lete a v zime, slabšie na jeseň. Súčasne rastú denné minimá teploty rýchlejšie než maximá, čo znižuje dennú teplotnú amplitúdu — v našom ansámblu sa to prejavuje najmä strmým nárastom tropických nocí (5.2). Porovnanie so SHMÚ: scenáre SHMÚ (EURO-CORDEX/RCP) uvádzajú pre južné Slovensko oteplenie ročnej teploty približne +0,7 – 0,9 °C do 2030, +2,0 – 3,0 °C do 2050 a +3,5 – 6,0 °C do 2100 (podľa scenára), s rýchlejším rastom denných mínim (+6 – 10 °C) než maxim (+2 – 5 °C) a najsilnejším otepľovaním v zime a v lete. Naše hodnoty ležia v dolnej až strednej časti tohto rozsahu (napr. +4,6 °C pre SSP5-8.5 do 2080 vs. horný okraj SHMÚ +6,0 °C pre RCP8.5), čo je očakávané: ide o ansámblový medián, kým horný okraj SHMÚ zodpovedá najteplejším členom a čiastočne odlišnému referenčnému obdobiu. Smer, sezónnosť aj rýchlejší rast mínim sú v zhode.

5.2 Počty charakteristických dní

Oteplenie sa najvýraznejšie prejavuje na počtoch teplotne definovaných dní. Tabuľka 5.2 ukazuje transformáciu kľúčových indexov medzi referenciou a koncom storočia (scenár SSP3-7.0) — pribúdajú

horúce a letné dni, prudko tropické noci a najdlhšia vlna horúčav, kým mrazové dni výrazne ubúdajú: (Obr. 12)

Stanica	Horúce dni HD30	Letné dni SU25	Trop. noci TR20	Mrazové dni FD	Vlna horúčav HWDI
Bratislava	16 → 61	65 → 117	1 → 33	92 → 49	6 → 22
Košice	13 → 58	62 → 113	0 → 33	110 → 62	5 → 17
Žilina	7 → 42	45 → 91	0 → 12	120 → 69	3 → 12
B. Bystrica	6 → 38	41 → 87	0 → 13	129 → 72	2 → 11
Poprad	1 → 22	20 → 65	0 → 5	150 → 91	0 → 7

Poprad 1 → 22 20 → 65 0 → 5 150 → 91 0 → 7 Tab. 5.2. Počty charakteristických dní za rok: referencia (1981 – 2010) → koniec storočia 2071 – 2100, scenár SSP3-7.0, ansámblový medián. HD30 = $T_{max} \geq 30$ °C; SU25 = $T_{max} \geq 25$ °C; TR20 = $T_{min} \geq 20$ °C; FD = $T_{min} < 0$ °C; HWDI = najdlhšia vlna horúčav (dni).

Scenárová podmienenosť je silná: pri SSP1-2.6 sú prírastky výrazne miernejšie, pri SSP5-8.5 naopak extrémne — napr. horúce dni v Bratislave dosahujú ~71 a tropické noci ~46 za rok. Porovnanie so SHMÚ: scenáre SHMÚ rovnako uvádzajú rast letných a tropických dní a pokles mrazových a ľadových dní a očakávajú 3- až 5-násobne častejšie vlny horúčav (typu 2003/2015) okolo roku 2050 — čo zodpovedá nášmu nárastu HWDI (rádovo 2- až 5-násobok podľa scenára).

5.3 Zrážkové úhrny — ročné a sezónne

Ročné úhrny zrážok sa menia podstatne menej než teplota a signál je neistejší. Z fyziky aj z porovnávacích scenárov vyplýva mierny rast ročných úhrnov s výraznou sezónnou prestavbou: zimné a jesenné zrážky skôr pribúdajú, jarné a letné — najmä v južnej polovici — skôr ubúdajú. Práve táto kombinácia (suchšie a

teplejšie letá) zvyšuje riziko sucha v nížinách aj pri stabilnom ročnom úhrne. Porovnanie so SHMÚ: scenáre SHMÚ predpokladajú na prevažnej časti územia rast ročných úhrnov, na južnom a juhozápadnom Slovensku do roku 2100 približne +10 % (RCP4.5) až +15 % (RCP8.5), čo v absolútnych číslach predstavuje +50 – 70, resp. +100 – 120 mm; sezónne rast v zime a na jeseň a pokles na jar a v lete. Smer a sezónna štruktúra sú v zhode s našim ansámblom. Mierne vyššia hodnota rastu úhrnov u SHMÚ (+10 – 15 %) oproti nášmu ansámblovému mediánu (rádovo jednotky percent) vyplýva z odlišného scenárového rámca (RCP vs. SSP), iného referenčného obdobia a z toho, že uvádzame medián súboru, nie jeho horný okraj. (Obr. 13)

Suché a bezzrážkové obdobia

Súčasne s intenzívnejšími extrémami sa predlžujú obdobia bez zrážok. Maximálny počet po sebe idúcich suchých dní (CDD, zrážky < 1 mm) podľa ansámblu narastá, najvýraznejšie v nížinách a pri vysokých scenároch:

Stanica	Referencia	SSP3-7.0 (~2080)	SSP5-8.5 (~2080)
Bratislava	25,5	27,4	28,9
Košice	24,2	26,5	29,1
Žilina	19,2	22,6	24,2
B. Bystrica	20,1	23,6	24,6
Poprad	19,0	20,9	23,4

Poprad 19,0 20,9 23,4 Tab. 5.3. Maximálny počet po sebe idúcich suchých dní (CDD, dni), ansámblový medián, 2071 – 2100; referencia 1981 – 2010.

Kombinácia menšieho počtu zrážkových dní a intenzívnejších jednotlivých udalostí znamená, že tá istá ročná suma zrážok padá v menej, ale výdatnejších epizódach, oddelených dlhšími suchými obdobiami

— čo je pre vsakovanie a doplnenie pôdnej vlhky nepriaznivé. Porovnanie so SHMÚ: SHMÚ rovnako očakáva častejšie epizódy extrémneho sucha v dôsledku zvýšeného výparu a nedostatku dlhotrvajúcich zrážok, pričom modelová neistota označuje za značnú — čo platí aj pre náš ansámbl.

5.4 Trendy a scenáre budúceho sucha

Analýza dát založených na satelitných pozorovaniach z SMAP ukazuje, že najsuchšou nížinou je Záhorská nížina ($\bar{S}M = 0.174 \text{ m}^3/\text{m}^3$), čo je konzistentné s jej geologickým podložím tvoreným prevažne piesočnatými sedimentmi s vysokou hydraulickou vodivosťou a nízkou retenčnou kapacitou (Mítková et al. 2005). Najvyššia priemerná vlhkosť pôdy bola zaznamenaná v Juhoslovenskej kotline ($0.232 \text{ m}^3/\text{m}^3$) a Košickej kotline ($0.231 \text{ m}^3/\text{m}^3$), kde prevládajú ťažšie ílovito-hlinité pôdy s vyššou retenčnou kapacitou. Napriek absencii štatistickej významnosti sú identifikovateľné konzistentné mesačné vzory naprieč všetkými nížinami, júl a október ukazujú negatívne trendy zmeny vlhkosti pôdy vo všetkých piatich nížinách.

5.5 Zmena aridity klímy a krátkodobé a dlhodobé sucho

Aridity index patrí medzi najčastejšie používané ukazovatele pri hodnotení sucha a dlhodobých zmien klimatických podmienok. Vyjadruje vzťah medzi množstvom dostupnej vody vo forme zrážok a atmosférickým dopytom po vode, ktorý je reprezentovaný evapotranspiráciou. Na rozdiel od samotných zrážkových charakteristík poskytuje komplexnejší pohľad na vodnú bilanciu územia, pretože zohľadňuje aj vplyv rastúcej teploty vzduchu, slnečného žiarenia, vetra a ďalších faktorov ovplyvňujúcich výpar. Pokles hodnôt aridity indexu signalizuje zvyšujúci sa nedostatok vody v krajine a rastúce riziko výskytu poľnohospodárskeho, hydrologického a ekologického sucha. Z tohto dôvodu je aridity index vhodným nástrojom na monitorovanie dopadov klimatickej zmeny, identifikáciu zraniteľných regiónov a hodnotenie trendov sucha v dlhodobých časových radoch.

Výsledky analýz najnovších scenárov zmeny klímy ukazujú na výrazné zvyšovanie suchosti klímy (aridity) v letných mesiacoch, pričom nížinné regióny juhozápadu Slovenska sú ohrozené najvýraznejšie. Mediánová hodnota aridity indexu pre celé Slovensko v historickom období dosahovala 0.548, čo zodpovedá semi- aridnému (poposuchému) klimatickému režimu. Podľa pesimistického emisného scenára (SSP5-8.5) sa do konca 21. storočia predpokladá nárast aridity slovenskej klímy (aridity indexu) o 53.4%, pričom v nížinných okresoch Podunajskej nížiny môže tento nárast dosiahnuť až 66 %. Sezónna analýza odhaľuje silné sezónne kontrasty. Letné hodnoty aridity klímy (aridity indexu) sú rádovo 10-krát vyššie než zimné, čo odráža intenzívnu evapotranspiráciu pri vysokých teplotách. Jar a jeseň vykazujú stredné hodnoty. Táto sezónna asymetria je kľúčová, klimatická zmena bude najpravdepodobnejšie amplifikovať práve letné hodnoty aridity indexu, čím sa predĺži a zosilní vegetačné sucho.

Pri scenároch s vysokými emisiami skleníkových plynov (SSP3-7.0 a SSP5-8.5) bol identifikovaný významný trend nárastu suchosti (hodnoty aridity indexu) na celom území Slovenska. Zmeny sa prejavujú vo všetkých regiónoch a budú súvisieť najmä s rastúcou teplotou vzduchu a vyšším výparom vody z krajiny. Najvýraznejšie zmeny predpokladá scenár SSP5-8.5, pri ktorom sa do roku 2100 aridita zvýši približne o 0,39 bodu. Znamená to, že klimatické podmienky budú postupne suchšie a dostupnosť vody v krajine sa pravdepodobne bude znižovať. Naopak, pri optimistickom emisnom scenári SSP1-2.6, ktorý predpokladá výrazné obmedzenie emisií skleníkových plynov, sú očakávané zmeny podstatne menšie a vo väčšine územia sa neprejavujú ako jednoznačný dlhodobý trend. Analýza 79 okresov Slovenska ukazuje výraznú priestorovú diferenciáciu budúcich zmien aridity indexu (podľa SSP5-8.5, 2071–2100). Okresy s najvyššou zmenou aridity klímy (aridity indexu), ako sú Komárno, Dunajská Streda, Šaľa, Nové Zámky, Galanta, ležia v Podunajskej nížine- najnižšie položenej a najteplejšej časti Slovenska. Naopak, okresy severozápadného Slovenska (Bytča, Martin, Dolný Kubín, Turčianske Teplice, Čadca) v Žilinskom kraji zaznamenávajú relatívne najnižší nárast aridifikácie klímy (aridity indexu), čo súvisí s ich vyššou nadmorskou výškou a vyšším úhrnom zrážok.

Porovnanie očakávaných priemerných hodnôt indexu suchosti klímy medzi periódami ukazuje, že najvýraznejší skok nastane medzi obdobiami 2051–2070 a 2071–2100, pre scenáre SSP3-7.0 a SSP5-8.5, zatiaľ čo pre optimistický emisný scenár SSP1-2.6 je zmena medzi periódami pomerne rovnomerná a len mierna. To naznačuje, že v prípade neúspešnej mitigácie druhá polovica 21. storočia prinesie výraznú akceleráciu aridifikácie.

Hoci aridity index poskytuje dôležitú informáciu o dlhodobej dostupnosti vody v krajine, neumožňuje zachytiť krátkodobé a sezónne výkyvy sucha. Z tohto dôvodu sa pri hodnotení sucha často využívajú aj

indexy SPI (Standardized Precipitation Index; McKee et al., 1993) a SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; Vicente-Serrano et al., 2010). Index SPEI rozširuje SPI o vplyv potenciálnej evapotranspirácie, teda o množstvo vody, ktoré sa môže z povrchu a vegetácie vypariť v dôsledku meteorologických podmienok. Zohľadňuje tak nielen zmeny zrážok, ale aj rastúce teploty vzduchu a s nimi súvisiaci zvýšený výpar. SPEI preto lepšie zachytáva dopady klimatickej zmeny na vývoj sucha, najmä v regiónoch, kde sa zrážkové úhrny výrazne nemenia, ale rastúca teplota spôsobuje zvyšovanie vodného deficitu.

Kľúčovým mechanizmom aridifikácie v strednej Európe nie je primárne pokles zrážok, ale nárast PET vplyvom otepľovania. Preto SPEI vykazuje výraznejší pokles ako SPI pri rovnakom emisnom scenári, pričom rozdiel narastá s časovou škálou (12-mesačná škála je citlivejšia ako 3-mesačná) a s intenzitou otepľovania (Vicente-Serrano et al., 2022; Bakke et al., 2023). V historickom referenčnom období vykazuje Slovensko značnú medziročnú variabilitu SPI a SPEI bez štatisticky významného trendu na celoslovenskej úrovni. Priestorové rozloženie hodnôt SPI-12 a SPEI-12 v historickom období odráža topografický gradient Slovenska – nížiny juhozápadu vykazujú nižšie (suchšie) hodnoty oproti horským oblastiam severu a severovýchodu. Scenáre zmeny klímy tiež ukazujú systematický pokles hodnôt SPEI-12 a SPI-12 v priebehu 21. storočia. Na rozdiel od SPI, SPEI reaguje výraznejšie na zvyšovanie teplôt vplyvom zvýšenej evapotranspirácie. Nárast dlhodobého sucha (SPEI-12) pri analýze scenáru SSP5-8.5 pre periodu 2071–2100 je výrazný, priemerná hodnota pre Slovensko klesne na -3.007 a celkovo hodnoty v nížinných oblastiach signalizujú prechod k chronickým suchým podmienkam. Pri miernom scenári SSP1-2.6 zostáva priemer SPEI-12 v perióde P3 na úrovni -0.766, a odhadovaná zmena je len mierna oproti historickému obdobiu. Výšková klasifikácia okresov odhaľuje systematický kontrast v hydroklimatickej zraniteľnosti. Nížinné okresy vykazujú systematicky nižšie hodnoty SPEI-12 a SPI-12 ako horské oblasti naprieč všetkými scenármi a periódami. Pozn.: Index SPEI-12 bol štandardizovaný na referenčnom období, voči ktorému sa odvíjajú uvádzané historické aj projektované priemery; kladné historické hodnoty regiónov odrážajú ich polohu nad celoslovenským priemerom a extrémne záporné projekcie (napr. -3,0) treba interpretovať ako posun celého rozdelenia, nie ako mesačný extrém.

Z hľadiska scenárov zmeny klímy je Podunajská nížina jednou z najohrozenejších oblastí SR. Priemerná hodnota SPEI-12 projektovaná pre tento región klesá z historickej kladnej hodnoty (+0,39) na záporné hodnoty v budúcnosti: SSP1-2.6 na -0,32; SSP5-8.5 na -1,22. Index aridnosti (AI) vykazuje v tejto oblasti najvyšší absolútny nárast v SR, okresy Komárno (+0,59), Dunajská Streda (+0,56) a Šaľa (+0,56) patria k najvyšším zmenám AI zo všetkých 79 sledovaných okresov pri scenári SSP5-8.5. Záhorská nížina (okresy Malacky, Senica, Skalica) vykazuje priemerný CDI 0,547 za 2012 – 2026. Projekcie SPEI-12 pre Záhorskú nížinu predpovedajú pokles z historických +0,38 na -1,27 (SSP5-8.5 P3). Záhorská nížina je tak citlivá na krátkodobé cirkulačné zmeny: sucho nastupuje rýchlo a môže byť intenzívne, ale nie je tak trvalé ako v Podunajskej nížine. Juhoslovenská kotlina (okresy Rimavská Sobota, Lučenec, Veľký Krτίš, Revúca, Rožňava, Poltár) dosahuje priemerný CDI 0,492 najnižší spomedzi sledovaných regiónov, avšak počas suchostných rokov 2012 a 2022 zaznamenala intenzívne suchostné podmienky porovnateľné s nížinnými oblasťami. Východoslovenská nížina (okresy Trebišov, Michalovce, Sobrance) vykazuje spomedzi nížinných regiónov najvyšší priemerný CDI (0,685). Výraznou črtou je odlišná suchostná chronológia oproti západným nížinám, zatiaľ čo na Podunajskej a Záhorskej nížine bol rok 2012 najsuchší, na Východoslovenskej nížine dominoval rok 2022. Tento vzor odráža odlišné cirkulačné podmienky a väčšiu závislosť Východoslovenskej nížiny od zrážok z juhovýchodu a blokačných anticyklonálnych situácií v letnom období. Okres Trebišov má priemerný CDI 0,784 a Michalovce 0,729. Projekcie SPEI-12 predpovedajú pokles z historického +0,50 na -1,14 (SSP5-8.5 P3). Zdanlivé rozdiely medzi indexmi (napr. najnižšia pôdna vlhkosť podľa SMAP na Záhori, ale stredne vysoký CDI) vyplývajú z toho, že každý index meria iný parameter a inú časovú škálu: SMAP odráža okamžitú vlhkosť pôdy, CDI kombinovaný stav vegetácie a pôdy a SPEI-12 dlhodobú vlahovú bilanciu.

Stanica (oblasť) Referencia SSP2-4.5 (2080) SSP3-7.0 (2080) SSP5-8.5 (2080) Bratislava (Podunaj. níž.) -1,2 -1,3 -1,5 -1,5 Košice (Vých. níž.) -1,3 -1,4 -1,4 -1,6 Žilina (severozápad) -1,3 -1,3 -1,4 -1,6 B. Bystrica (stred) -1,3 -1,4 -1,4 -1,6 Poprad (sever) -1,3 -1,4 -1,4 -1,6

5.6 Regionálna diferenciácia: ktoré nížiny sú najzraniteľnejšie?

Analýza indexu suchosti klímy (aridity index, AI) pre slovenské nížiny, ktoré sú aktívne poľnohospodársky využívané, ukazuje výrazný regionálny gradient zraniteľnosti. Pri scenári SSP5-8.5 bude nárast aridity indexu v nížinných okresoch o 9,1 percentuálneho bodu vyšší než v horských

oblastiach (+59,9 % vs. +50,8 %). Tento vzorec sa prejavuje vo všetkých emisných scenároch, hoci pri SSP1-2.6 je rozdiel minimálny (cca 0,5 percentuálneho bodu).

Zvýšená zraniteľnosť nížin je dôsledkom kombinácie nízkeho zrážkového úhrnu, vysokých teplôt a intenzívnej potenciálnej evapotranspirácie, ktorú klimatická zmena ďalej zosilňuje. Krátkodobé indexy sucha (SPEI-1 a SPEI-3) ukazujú, že práve letné mesačné hodnoty (júl-september) zaznamenajú najsilnejší pokles, čo je konzistentné s výsledkami analýzy aridity indexu. Tieto výsledky potvrdzujú výrazné zhoršenie podmienok počas vegetačného obdobia s priamym dopadom na poľnohospodárstvo.

Satelitné dáta zo Sentinel-2 tieto trendy potvrdzujú a zároveň ich priestorovo konkretizujú. Dlhodobý pokles indexu vlhkosti vegetácie (NDMI) bol zaznamenaný v Podunajskej nížine (okresy Galanta, Komárno, Bratislava, Nitra) a v Juhoslovenskej kotline (Veľký Krtíš). Rastúci podiel odhalenej pôdy (BSI index) bol zachytený v Podunajskej nížine (Galanta, Levice, Nové Zámky, Šaľa) a vo Východoslovenskej nížine (Michalovce, Trebišov). Dlhodobý nárast plochy odhalenej pôdy odráža zmeny v osevných postupoch (dlhší úhor, skôr zozbierané plodiny) alebo degradáciu pôdy suchom (praskanie, odlupovanie povrchového horizontu), čo znižuje zachytávanie zrážkovej vody a urýchljuje prienik sucha do hlbších pôdných horizontov.

Pozitívnym zistením je zlepšenie pôdnej vlhkosti v Košiciach a v niektorých častiach Podunajskej nížiny, čo môže byť dôsledkom zmien vo výbere plodín — prechodu na oziminy a pestovanie zmesí zachovávajúcich vlhkosť, alebo lokálnych vplyvov zavlažovania. Tento príklad ukazuje, že adaptačné opatrenia sú realizovateľné a merateľné.

Na úrovni jednotlivých staníc je nárast maximálneho suchého obdobia mierny (rádovo o 3 – 5 dní), pretože južné nížiny už dnes vykazujú dlhé suché periódy; priestorové mapy však ukazujú výraznejšie zosilnenie v súvislých nížinných celkoch. Tieto výsledky sú v súlade s globálnym kontextom: hodnotenie Lindenlaub et al. (2026) zaraďuje strednú Európu medzi oblasti, kde sa pri pokračujúcom otepľovaní zvyšuje intenzita, plošný rozsah a perzistencia pôdneho sucha, pričom rastúci evaporačný dopyt prevažuje nad zmenami zrážok — presne ten mechanizmus, ktorý vidíme aj v slovenskom ansámblí.

6 Dopady sucha na poľnohospodárstvo a lesníctvo

V skratke

- Úrodám škodia vysoké teploty viac než samotný nedostatok zrážok (nelineárny efekt deficitu vodnej pary).
- Najohrozenejšie sú jarný jačmeň a kukurica v nížinách; pestovanie zemiakov sa presúva do vyšších polôh.
- Smrek je v nížinách a kotlinách dlhodobo neudržateľný (VPD stres a lykožrút), jedľa je najohrozenejšia a limity má aj buk; rastie požiarne riziko.
- Kľúčovým opatrením je druhová prestavba lesov a ochrana horských porastov.

Sucho nepôsobí na poľnohospodárstvo a lesy rovnomerne, jeho dôsledky sa výrazne líšia podľa regiónu, druhu plodiny či drevinového zloženia porastu. Táto kapitola hodnotí, ako sa meniace podmienky prejavujú v jednotlivých nížinách Slovenska, čo to znamená pre konkrétne plodiny — kukuricu, pšenicu, jačmeň a repku — a aké výzvy čakajú lesné ekosystémy, predovšetkým smrekové a bukové porasty. Pôdne sucho nie je možné priamo mapovať pomocou výstupov klimatických scenárov, avšak jeho vývoj môže byť odhadnutý nepriamo, pomocou modelovania, na základe trendov v historických dátach meraných satelitmi, reanalýzach v spojení s predpokladaným vývojom klimatologických premenných, ktoré toto pôdne sucho ovplyvňujú.

Pôdne sucho, rozhodujúce pre poľnohospodárstvo a lesy, sa prejavuje predlžovaním súvislých suchých období. Maximálny počet po sebe idúcich suchých dní (CDD — dni so zrážkami < 1 mm) podľa ansámblu narastá, najvýraznejšie pri vysokých scenároch a ku koncu storočia:

Stanica (oblasť) Referencia SSP2-4.5 (2080) SSP3-7.0 (2080) SSP5-8.5 (2080) Bratislava (Podunaj. níž.) 25,5 25,3 27,4 28,9 Košice (Vých. níž.) 24,2 25,1 26,5 29,1 Žilina (severozápad) 19,2 22,3 22,6 24,2 B. Bystrica (stred) 20,1 22,1 23,6 24,6 Poprad (sever) 19,0 20,9 20,9 23,4

Tab. 6.1. Maximálny počet po sebe idúcich suchých dní (CDD, dni), ansámblový medián, 2071 – 2100; referencia 1981 – 2010.

6.1 Hodnotenie sucha cez kombinovaný index sucha

Sucho na Slovensku systematicky sledujeme od roku 2012 cez tzv. kombinovaný index sucha (CDI; Cammalleri et al., 2021), ktorý zachytáva stav pôdnej vlhkosti a vegetácie naprieč všetkými regiónmi. Čím vyššia hodnota indexu, tým rozsiahlejšie a intenzívnejšie sucho. Najsuchším rokom v sledovanom období bol rok 2022, keď index dosiahol hodnotu 1,22, krajina bola vyschnutá naprieč väčšinou územia a poľnohospodárske škody boli citelné vo väčšine regiónov. Rok 2025 bol tretím najsuchším rokom v histórii merania. Naopak, rok 2023 bol výrazne vlhkejší než zvyčajne, čo zodpovedá nadpriemerným zrážkam v celej strednej Európe. (Obr. 4)

Sucho nie je rovnomerne rozložené počas roka. Najhoršie bývajú august a september, nie preto, že by vtedy zrážky klesali najrýchlejšie, ale preto, že sa v tom čase kumulujú dôsledky celého suchého leta. Pôda je vyčerpaná, vegetácia v strese a zásoby podzemnej a pôdnej vody na najnižšej úrovni. Február je dlhodobo najmenej suchým mesiacom.

6.2 Požiarne riziko v súvislosti so suchom

Sucho a teplo priamo ovplyvňujú požiarne riziko v lesoch a na poliach. Sledujeme ho cez tzv. požiarno-meteorologický index (FWI), ktorý meria, ako suchá je atmosféra a pôda z pohľadu náchylnosti na vznik a šírenie požiarov. Historický letný priemer pre Slovensko bol okolo 11 bodov, pri takejto hodnote sú požiare zriedkavé a zvládnuteľné.

Klimatické projekcie ukazujú jednoznačný nárast tohto rizika. Ak sa podarí obmedziť emisie (scenár SSP1- 2.6), letný priemer FWI vzrastie do konca storočia na úroveň okolo 15 bodov, teda o tretinu oproti histórii. Pri scenári vysokých emisií bez zásadnej zmeny (SSP5-8.5) by priemerná letná hodnota dosiahla 21 bodov a dni s extrémnym požiarovým rizikom by sa pohybovali okolo 29 bodov. To je úroveň, pri

ktorej nie sú požiare výnimočnou udalosťou, ale pravidelnou súčasťou leta, a ich rozsah presahuje kapacity bežného hasenia.

6.3 Suchá pôda spôsobuje horúcejšiu krajinu

Existuje priama fyzikálna väzba medzi suchom a teplotou, ktorú v bežnom živote ľahko prehliadneme. Mokrú pôdu sa ochladzuje vyparovaním vody. Keď pôda vyschne, toto chladenie prestáva fungovať a povrch sa výrazne prehreje. Priemerná letná teplota povrchu pôdy na Slovensku dosahuje na základe merania satelitu Landsat dlhodobo okolo 30 °C, ale v suchých rokoch táto hodnota výrazne stúpa. V roku 2003, ktorý bol jedným z najteplejších a najsuchších v európskej histórii, dosiahla priemerná letná teplota povrchu 34 °C. Rok 2022, tretí najsuchší v našej meracej rade, mal letnú teplotu povrchu 32,5 °C, teda výrazne nad bežným priemerom.

Táto väzba má praktické dôsledky, sucho nezvyšuje len nedostatok vody, ale priamo zosilňuje tepelnú záťaž krajiny, miest aj poľnohospodárskych plôch. Sucho a horúčava sa vzájomne posilňujú, a práve táto kombinácia je pre budúcnosť Slovenska najvážnejšou hrozbou.

6.4 Posun sezónnosti sucha a jeho ekosystémové dôsledky

Klimatologická analýza dvoch referenčných období 1961–1990 a 1991–2020 pre Slovensko poukazuje na posun výskytu sucha z jesenných a zimných mesiacov smerom k jari a letu. Tento posun má priame dôsledky pre vegetačné sezóny poľnohospodárskych plodín aj lesných porastov, sucho zasiahne práve vtedy, keď rastliny intenzívne rastú a sú na vodný deficit najcitlivejšie. Najvýraznejší trend bol zaznamenaný v západnej časti Slovenska, kde dominuje intenzívne poľnohospodárske využitie krajiny (Labudová et al., 2024).

Poľnohospodárske (pôdne) sucho nastáva, keď deficit pôdnej vlahy obmedzuje rast plodín alebo lesných porastov. Je úzko zviazané s evapotranspiráciou, a preto sa charakterizuje Štandardizovaným indexom zrážok a evapotranspirácie (SPEI; Vicente-Serrano et al., 2010), ktorý zohľadňuje aj teplotne podmienený dopyt atmosféry po vode. Za obdobie 1961–2014 prišlo v strednej Európe k preukázateľnému nárastu počtu a intenzity suchých epizód, najmä severne od Dunaja, v severozápadnom Česku a v juhovýchodnom Slovensku (Trnka et al., 2016). Suché epizódy trvajú dlhšie a vykazujú vyšší akumulovaný deficit vlahy (Labudová et al., 2024).

Dlhodobé suchá vedú k zmenám pôdotvorných procesov, v podmienkach chronického výparného deficitu dochádza k stepizácii spraší a ústupu organickej hmoty z povrchových horizontov. Pôdne sucho zároveň vytvára priaznivé podmienky pre vznik a šírenie lesných požiarov, čo má ekologické aj ekonomické dôsledky vrátane dopadov na cestovný ruch. Klimatické scenáre predpovedajú nárast požiarneho rizika v oblastiach, kde sa historicky nevyskytovalo.

Oteplenie klímy urýchľuje tiež fenológiu poľnohospodárskych plodín, rastliny prechádzajú jednotlivými vývojovými fázami skôr. Jarná fenológia sa môže posunúť dopredu o 1–3 týždne v porovnaní s historickým obdobím, čo ovplyvňuje načasovanie agrotechnických operácií, zber a riziko jarných mrazov. Paradoxom je, že skorší nástup vegetačnej sezóny zároveň zvyšuje expozíciu plodín voči letnému suchu a horúčavam, keďže kritické fenologické fázy (odnožovanie, kvitnutie, plnenie zrna) sa posúvajú do teplejšieho a suchšieho obdobia.

6.5 Dopady tepla a sucha na jednotlivé plodiny

Pochopenie toho, ako zmena klímy ovplyvní variabilitu výnosov v poľnohospodárstve, je kľúčové pre potravinovú bezpečnosť krajiny. Výskum ukazuje, že vysoké teploty škodia úrode viac ako samotný nedostatok zrážok (Hochman et al., 2017) a že pokles výnosov nie je lineárny — pri určitej teplotnej hranici sa škody náhle prudko zvyšujú (Lobell et al., 2011). Za týmto skokovým efektom stojí nelineárny rast deficitu vodnej pary (VPD): horúčava spôsobuje, že vzduch intenzívne „vysáva“ vodu z rastlín, zvyšuje dopyt po výpare a vysušuje pôdu (Lobell et al., 2013).

Kľúčovým nástrojom na hodnotenie budúcich podmienok pre plodiny sú stupňodne rastu (Growing Degree Days, GDD) — miera tepla, ktorú plodina prijme počas sezóny. Každá plodina má optimálne rozmedzie GDD: pri nižšej hodnote nestihne dozrieť, pri príliš vysokej trpí tepelným stresom a skracuje sa

čas plnenia zrna alebo tvorby cukrov. Rozdiel medzi scenármi SSP1-2.6 a SSP5-8.5 do konca storočia predstavuje zmenu GDD v rozsahu 400–700 GDD — to je rozdiel, ktorý rozhoduje o tom, či plodina zostane v optimálnom pásme alebo ho presiahne.

6.5.1 Kukurica je plodinou, ktorá bude klimatickou zmenou ovplyvnená najkomplexnejšie — na jednej strane jej viac tepla (vyššie GDD) v chladnejších polohách prospieva, na druhej strane kombinovaný stres horúčavy a sucha v nížinách výnosy prudko znižuje. Európske štúdie ukazujú, že kombinácia vysokých teplôt a sucha vysvetľuje až 46 % variability výnosov kukurice (Webber et al., 2018). Slovenské projekcie naznačujú posun plne rentabilného pestovania kukurice do nadmorskej výšky 500 m n. m. a rentabilného pestovania do 800 m n. m. (Šiška a Takáč, 2002), čo zodpovedá rozšíreniu teplých a suchých podmienok do vyšších polôh. Zvýšená potreba závlah v tradičných pestovateľských oblastiach Podunajskej a Záhorskej nížiny, kde sa vodná bilancia pôdy výrazne zhoršuje, je nevyhnutným dôsledkom tohto vývoja.

V kritických fenologických fázach kukurice, formovanie klasu a plnenie zrna (júl–august), zaznamenávajú práve okresy Galanta a Komárno rastúci vodný deficit (NDMI) podľa satelitných meraní. To priamo ohrozuje výšku a kvalitu úrody v rokoch s podpriemerným úhrnom zrážok.

6.5.2 Pšenica je zo sledovaných obilnín najodolnejšia voči premenlivému počasiu — kombinácia vysokých teplôt a sucha vysvetľuje len nepatrnú časť variability jej výnosov (Webber et al., 2018). Ozimná pšenica využíva zimnú a jarnú vlahu a dokončuje plnenie zrna skôr, než nastanú letné horúčavy. Napriek tomu aj pšenica nie je bez rizika: zrýchľovanie fenológie vplyvom oteplenia skracuje fázu plnenia zrna, čo môže znižovať hmotnosť tisíc zŕn a obsah bielkovín. V kontexte Slovenska je pšenica v strednodobom horizonte relatívne stabilnou plodinou, no v dlhodobom výhľade (po roku 2060, scenár SSP5-8.5) možno očakávať tlak aj na ňu, najmä v najhorúcejších nížinných oblastiach.

6.5.3 Jarný jačmeň je zo všetkých analyzovaných plodín najohrozenejší. Sladovnícka kvalita zrna závisí od dlhého a pomalého plnenia zrna — práve tento proces je ničený skrátením vegetácie vplyvom tepla. Analýza GDD ukazuje, že jarný jačmeň je tepelne preťažený už dnes vo všetkých štyroch slovenských nížinách, a situácia sa bude ďalej zhoršovať vo všetkých emisných scenároch. Rimavská kotlina si najdlhšie zachová relatívne prijateľné podmienky a môže byť poslednou oblasťou nížinného pestovania sladovníckeho jačmeňa. (Obr. 15)

6.5.4 Zemiaky sú plodinou chladnejšieho a vlhkejšieho podnebia — nížiny pre ich optimálny rast nie sú ideálne už dnes a situácia sa bude ďalej zhoršovať. Bude nevyhnutné presunúť pestovanie konzumných aj sadivových zemiakov do podhorských oblastí (400–700 m n. m.), kde sú podmienky stále optimálne. Tento posun si vyžiada úpravu dopravnej a skladovej logistiky, ako aj nové agrotechnické postupy pre tieto polohy. (Obr. 16)

6.5.5 Repka olejnatá je v slovenských podmienkach pestovaná predovšetkým ako ozimina a zasieva sa v auguste–septembri. Oteplenie predlžuje jej vegetačnú dobu, čo môže pozitívne vplyvať na výnosy v strednom výhľade. Riziko však predstavuje suchý august a september, ktorý komplikuje vzhádzanie a zapájanie porastov. Zvýšené letné teploty zároveň zosilňujú stres počas dozrievania strukových, čo môže negatívne ovplyvniť obsah oleja. Repka zostane v slovenských nížinách perspektívnou plodinou, avšak s rastúcimi požiadavkami na termín a techniku sejby v suchých rokoch.

6.6 Dopad sucha na lesné ekosystémy

Klimatická zmena mení teplotné a zrážkové podmienky v strednej Európe rýchlejšie, ako sú schopné reagovať dlhovekové lesné ekosystémy (Seidl et al., 2017). Lesy pokrývajú takmer 41 % územia Slovenska a plnia kľúčové funkcie, od ochrany vodných zdrojov a zadržiavania vody v krajine až po sekvestráciu uhlíka a reguláciu mikroklimy. Klimatická zmena a sucho tieto funkcie zásadne narušajú. Slovenské lesy sú obzvlášť zraniteľné: smrek dominuje na 24 % lesnej plochy, pričom už v súčasnosti prekračuje altitudinálnu a teplotnú toleranciu svojho ekologického optima na mnohých lokalitách (Fleischer et al., 2017).

6.6.1 Smrek obyčajný: najzraniteľnejšia drevina Smrek obyčajný (*Picea abies*) je osobitne zraniteľný, pretože má plytký koreňový systém a bol po desaťročia vysádzaný mimo svojho prirodzeného klimatického výskytu (Hlásny et al., 2021). Smrtnosť stromov v stredoeurópskych miernych lesoch sa za posledných 30 rokov zdvojnásobila, pričom hlavnými príčinami sú zosilnené suchá, veterné kalamity a premnoženie podkôrneho hmyzu (Senf et al., 2018). Prahať hodnota deficit vodnej pary kedy nastáva stres pre Smrek obyčajný je 1,0 kPa (Grossiord et al., 2020), táto hodnota bude pri emisnom scenári SSP5-8.5 v horizonte po roku 2051 prekročená na viac ako 94 % plochy v priemere viac ako 12 rokov z

30. Počet udalostí kombinujúcich suchu a vysoké teploty v tomto období bude predstavovať 11 udalostí (VPD nad prahom pre porast a SPEI $\geq$ -1.5) za 30 rokov, čo jednoznačne indikuje, že smrečiny na nižších polohách a južne exponovaných svahoch budú fyziologicky dlhodobo neudržateľné.

Klimatická zmena zásadne ovplyvnila dynamiku lykožrúta smrekového. Vyššie teploty urýchľujú vývoj chrobákov a zvyšujú počet generácií za vegetačnú sezónu — pri nižších polohách až na tri generácie ročne. Súčasne suchu oslabuje obranné mechanizmy smreka: pri vodnom strese smrek nie je schopný produkovať dostatočné množstvo živice na zastavenie napadnutia (Wermelinger, 2004; Hlásny et al., 2021). Pre Slovensko klimatické projekcie predpovedajú zdvojnásobenie ročných škôd spôsobených lykožrútom smrekovým — z 2,2 m³/ha na 4,5 m³/ha — v dôsledku zmeny klímy (Seidl et al., 2020).

Klimatické zmeny, dlhotrvajúce suchu, pokles vegetáciou využiteľných zrážok, zvyšujúci sa výskyt vetrovej kalamity, budú naďalej znižovať prírastkové schopnosti smrekových porastov, ich vitalitu a zvyšovať riziko požiarov, hmyzích škodcov a hubových ochorení.

6.6.2 Buk: alternatíva s vlastnými limitmi Buk lesný (*Fagus sylvatica*) je v súčasnosti považovaný za hlavnú náhradnú drevinu za smrek v podmienkach klimatickej zmeny na Slovensku. Vyšší prah stresu 1,2 kPa, (Grossiord et.al., 2020) a kritický prah 1,8 kPa, ktorý podľa analýz nebude prekročený ani v priemere vegetačného obdobia pri scenári SSP5- 8.5 po roku 2051 (jednotlivé denné maximá VPD počas vín horúčav ho však krátkodobo prekračujú už dnes), poskytuje bukovým porastom relatívnu ochranu voči stresu z deficit vodnej pary. Má hlbší koreňový systém, lepšie toleruje teplo a pri primeranom zásobení vodou vykazuje dobrú vitalitu. Výskum však ukazuje, že aj buk má klimatické limity, pri dlhodobom letnom suchu a teplotách presahujúcich 30 °C zaznamenáva stres a zvýšenú smrtnosť, najmä v suchých rokoch ako 2018 a 2019. V nížinách a teplejších polohách bude postupne aj buk vystavený podmienkam, pre ktoré nie je optimálne prispôsobený. Zmena v počte a trvaní epizód sucha naznačujú, že ani buk nie je na celom území Slovenska dostatočne odolný pri najhoršom emisnom scenári.

Prestavba lesov smerom k vyššej druhovej diverzite, kombinácii buka, dubu, jedle, javora a ďalších drevín — je preto kľúčovým adaptačným opatrením, ktoré zvyšuje odolnosť lesných ekosystémov voči klimatickým extrémom. Empirický argument pre ochranu horských lesov ako vodohospodárskeho adaptačného opatrenia prinášajú aj hydrologické dáta: stanice v dobre zalesnených vysokohorských povodi (napr. Podbanské) vykazujú stabilné prietoky napriek celonárodným trendom poklesu (Leščešen et al., 2026).

6.6.3 Jedľa Nízka: prah stresu VPD 0,8 kPa (Vitali et. al.,2017), kombinovaný so skutočnosťou, že jedľové porasty sa už pri analýze podmienok v historickom období nachádzajú blízko tohto prahu, znamená, že práve jedľa podlieha najskoršiemu a najrozsiahlejšiemu stresu vplyvom nárastu teploty a sucha. Výsledky analýz na základe klimatického scenára SSP5-8.5 v období po roku 2050 bude hranica stresu prekročená na 100 % plochy územia Slovenska priemere v 77 % rokov. Toto je v súlade s pozorovaným trendom poklesu jedľových populácií v Karpatoch (Vitali et al., 2017).

Priestorové analýzy deficit vodnej pary, ktorý silno ovplyvňuje vitalitu stromov, odhaľujú výraznú priestorovú heterogenitu naprieč Slovenskom. Nížiny a kotliny (Podunajská, Záhorská, Juhoslovenská nížina) vykazujú najvyššie hodnoty parametrov, ktoré ohrozujú stromy, jedľa a smrek sú tu pri emisnom scenári SSP5-8.5 prakticky odsúdené na zánik. Karpatský oblúk a stredné hory (500–1000 m n.m.) vykazujú strednú úroveň stresu, ešte únosnú pri strednom emisnom scenári SSP2-4.5 v blízkom horizonte, ale dramatickú pri emisnom scenári SSP5-8.5. Tatry a Nízke Tatry nad 1200 m n.m. zostávajú najmenej stresovanou zónou aj vo vzdialenom horizonte. (Obr. 17)

7 Dostupnosť vody pre obyvateľov

V skratke

- Zásobovanie vodou je regionálne nerovnomerné: juhozápad závisí od podzemných vôd, severovýchod od povrchových nádrží citlivejších na klímu.
- Žitný ostrov čelí dvojitému tlaku — klesajúcemu dopĺňaniu zásob a znečisteniu z poľnohospodárstva.
- Klesajú nízke a minimálne prietoky (v nížinách až o štvrtinu) a rastie teplota vody v nádržiach → sinice a vyššie náklady na úpravu.
- Závlahová infraštruktúra je v najhoršom stave za desaťročia (zavlažuje sa len ~60 000 z pôvodných 360 000 ha) práve vtedy, keď potreba rastie.

Voda nie je len prírodný zdroj — je to základná podmienka zdravia, potravinovej bezpečnosti a hospodárskeho rozvoja. Sucho, ktoré sa v predchádzajúcich kapitolách opisuje ako meteorologický a hydrologický jav, sa tu stáva každodennou realitou pre tisíce domácností, farmárov i samospráv. Táto kapitola hodnotí, ako klimatická zmena ovplyvňuje dostupnosť a kvalitu pitnej vody v jednotlivých regiónoch Slovenska, aké sú vyhliadky pre poľnohospodárske závlahy a kde sú najväčšie zraniteľnosti vodohospodárskej infraštruktúry.

7.1 Regionálna dostupnosť pitnej vody

Slovensko disponuje relatívne bohatými zásobami podzemných a povrchových vôd, no ich rozloženie v rámci krajiny je výrazne nerovnomerné. Zásobovanie obyvateľstva pitnou vodou preto nie je jednotné — líši sa podľa regiónu a dostupnosti konkrétneho typu vodného zdroja.

V Bratislavskom, Trnavskom a Nitrianskom kraji sa na zásobovanie využívajú predovšetkým podzemné vodárenské zdroje. Bratislava a jej okolie ťaží z výdatných zdrojov v okolí Dunaja, avšak chýbajúca prepojovacia infraštruktúra predstavuje systémové riziko: ak výdatnosť jedného zdroja klesne, zásobovanie z iného zdroja nie je automaticky zaručené. Tento nedostatok redundancie sa stáva citlivým miestom najmä v obdobiach dlhotrvajúceho sucha.

Problémy s dostupnosťou pitnej vody pravidelne pociťujú obyvatelia Záhoria a oblasti v okolí Malých Karpát, kde sú vodovody napájané z lokálnych prameňov s obmedzenou výdatnosťou. V suchých rokoch sú tieto zdroje prvé, ktoré vykazujú pokles hladín a prietokov.

Prešovský a Košický kraj sú zásobované predovšetkým z povrchových zdrojov- vodárenských nádrží. Dôvodom je charakter hydrogeologického podlažia, na východnom Slovensku chýbajú rozsiahle štrkovité štruktúry, v ktorých by sa mohla akumulovať podzemná voda, preto sa historicky pristúpilo k výstavbe vodárenských nádrží. Táto závislosť od povrchových vôd má priamy dosah na zraniteľnosť voči klimatickej zmene, kvalita a množstvo povrchovej vody sú oveľa citlivejšie na výkyvy počasia než dobre chránené podzemné zásoby.

7.2 Žitný ostrov: strategická zásobáreň pod dvojitém tlakom

Žitný ostrov je najväčšou zásobárňou pitnej vody v strednej Európe. Na ploche zhruba 1 800 km² sa nachádzajú rozsiahle zásoby podzemnej vody viazané na štrkovité sedimenty Dunaja, ktoré sú priebežne dopĺňané brehovou infiltráciou z rieky. Ich výdatnosť je preto priamo prepojená s hydrologickým režimom Dunaja a dynamikou infiltračného procesu — faktormi, ktoré sú citlivé na klimatickú zmenu.

Žitný ostrov zároveň čelí závažným problémom kvality vody. Na ploche 1 400 km² chráneného vodohospodárskeho územia (CHVO) je registrovaných 76 potenciálnych bodových zdrojov znečistenia a až 88 % plochy čelí hrozbám z difúzných zdrojov, najmä z poľnohospodárskych hnojív a pesticídov (Waterdiplomát). Napriek tomuto stavu modelovanie budúceho vývoja kvality podzemnej vody pod scenármi klimatickej zmeny na Žitnom ostrove doposiaľ chýba, čo je závažná medzera v znalostnej základni pre plánovanie ochrany vodných zdrojov.

Európska štúdia hodnotenia zraniteľnosti podzemnej vody zaradila severozápadnú časť Panónskej panvy, teda aj oblasť Žitného ostrova, medzi územia s vysokou až veľmi vysokou zraniteľnosťou voči

klimatickej zmene vo všetkých sledovaných časových horizontoch vrátane výhľadu do roku 2070 (Nistor, 2019).

Kombinujú sa tu dva navzájom sa zosilňujúce faktory: po prvé, v tejto časti panvy zostáva po odpočítaní výparu krajine menej ako 200 mm zrážok ročne, jedna z najnižších hodnôt klimatickej bilancie v celom regióne, čo klimatická zmena ďalej prehĺbuje; po druhé, prevažná časť územia je intenzívne poľnohospodársky využívaná, čo zvyšuje riziko kontaminácie podzemnej vody. Štúdia odhaduje, že do polovice 21. storočia sa plocha s veľmi vysokou zraniteľnosťou v celom regióne ďalej zväčší.

Žitný ostrov teda čelí dvojitému tlaku: klesajúcej dostupnosti vody vplyvom klimatickej zmeny a dlhodobu pretrvávajúcemu znečisteniu z poľnohospodárstva a priemyslu. Kombinácia oboch faktorov jeho zraniteľnosť do budúcnosti zvyšuje a vyžaduje koordinovaný prístup ochrany vodných zdrojov aj adaptácie na zmenu klímy.

7.3 Klimatická zmena a zásoby pitnej vody: kvalita a množstvo

Dostupnosť pitnej vody nie je ohrozená len poklesom jej množstva, ale aj zhoršením kvality. V prípade vodárenských nádrží, ktoré zásobujú najmä severovýchodné Slovensko, sa tieto dve dimenzie vzájomne prelínajú.

7.3.1 Povrchové vodárenské nádrže a riziká klimatickej zmeny

Na Slovensku doposiaľ nebola realizovaná komplexná štúdia hodnotenia dopadu klimatickej zmeny na zabezpečenosť odberov pitnej vody z vodárenských nádrží. Porovnateľnú situáciu však hodnotila rozsiahla analýza realizovaná v Českej republike, z ktorej výsledkov je možné odvodiť relevantné indície aj pre slovenský kontext. Výsledky ukázali, že riziko nedostatočného zabezpečenia aktuálnych odberov pitnej vody v podmienkach klimatickej zmeny bolo identifikované v 17 zo 45 hodnotených vodárenských nádrží — teda takmer v 38 % z hodnoteného súboru (Trnka et al., 2022).

Zásoby povrchových vodných zdrojov pritom nie sú v stredoeurópskom priestore primárne ohrozené poklesom ročného úhrnu zrážok, ale zmenou sezónneho rozloženia odtoku: menej zrážok padá v lete, viac v zimných mesiacoch, keď je retencia vody v povodí nižšia. Táto zmena sa kombinuje s rastúcou evapotranspiráciou, čo v konečnom dôsledku znižuje objem vody dostupnej v nádrži práve v teplom období najvyšších odberov.

Klimatická zmena ovplyvňuje nielen množstvo vody v nádržiach, ale aj jej kvalitu. Zvyšovanie teploty vody, zosilnená vertikálna tepelná stratifikácia a dlhšie suchá periódy znižujú prietok vody cez nádrže a narúšajú prirodzený proces samočistenia. Pravdepodobnosť výskytu škodlivých masových rozvojov siníc (cyanobaktérii) sa bude zvyšovať.

Povrchová teplota vody v českých vodárenských nádržiach sa za obdobie 1991–2021 zvyšovala priemerne o 0,59 °C za dekádu — za 31 rokov ide o nárast takmer o 1,8 °C (Znachor et al., 2025). Ak extrapolujeme tento trend na slovenské podmienky, ktoré sú klimaticky veľmi podobné, dôsledky pre kvalitu vody sú závažné: teplejšia a pomaly sa miešajúca voda je výrazne náchylnejšia na rozvoj siníc a zmenu bakteriálneho zloženia.

Ekonomický dosah ilustruje príklad vodárenskej nádrže Turček. Pred rokom 2015 mala táto nádrž najnižšie prevádzkové náklady na úpravu vody spomedzi všetkých analyzovaných nádrží. Po tom, čo sa v nádrži začali opakovane vyskytovať sinice, priemerné náklady vzrástli na 14,98 € a maximálne až na 23,70 € za 1 000 m³ upravenej vody (Trenčiansky et al., 2025). Štúdia zároveň ukazuje, že náklady na úpravu sú ovplyvnené veľkosťou nádrže, pomerom ročného odberu k celkovému objemu, technologickou úrovňou čistiare, ako aj zalesnením povodia a ekologickými parametrami — teda faktormi, ktoré sú priamo ovplyvnené klimatickou zmenou.

Vodárenské nádrže Málinec a Hriňová sú situované v nízkych nadmorských výškach, čo autori explicitne identifikujú ako faktor zvyšujúci riziko sucha v letných mesiacoch. V prípade nádrže Málinec navyše sucho podporuje kalamitné odumieranie smrekových porastov v prvom ochrannom pásme, čo následne zhoršuje kvalitu surovej vody a ďalej zvyšuje náklady na jej úpravu.

Z dlhodobého hľadiska je teda možné predpokladať rast nákladov na úpravu vody pre väčšinu slovenských vodárenských nádrží — a teda aj rast cien pitnej vody pre domácnosti, ktoré sú na tieto nádrže odkázané.

7.4 Poľnohospodárstvo a závlahy: rastúca potreba pri klesajúcich zdrojoch

Poľnohospodárstvo patrí k odvetviam, ktoré sú klimatickou zmenou postihnuté najvýraznejšie — a zároveň k tým, ktoré na vodu kladú najvyšší dopyt práve vtedy, keď je jej dostatok najmenší.

V nedávnej minulosti sa na Slovensku realizovali závlahy na viac ako 360 000 hektároch poľnohospodárskej pôdy. Dnes sa zavlažuje len na 60 000 hektároch — pokles na šestinu pôvodnej plochy. Štátny podnik Hydromeliorácie spravuje 461 závlahových čerpacích staníc, z ktorých je funkčných len asi 156. Vo vlastníctve štátu je 5 258 km odvodňovacích a 254 km závlahových kanálov, pričom veľká časť tejto infraštruktúry je zastaraná alebo nefunkčná (UNIAG, 2023).

Paradoxom je, že práve v čase, keď klimatická zmena zvyšuje potrebu závlah — suché roky sa opakujú častejšie a intenzívnejšie —, je závlahová infraštruktúra v najhoršom stave za posledné desaťročia. Bez systematickej obnovy závlahových systémov a prepojenia ich prevádzky s prognózami sucha nie je možné adaptáciu slovenského poľnohospodárstva na klimatickú zmenu zabezpečiť.

7.5 Scenáre budúceho vývoja: ako často bude Slovensko suché?

Na pochopenie rozsahu budúcich rizík slúži ukazovateľ frekvencie mesiacov s dlhotrvajúcim predchádzajúcim suchom, meraný pomocou indexu SPEI-12 (štandardizovaný index zrážkovo-odparového deficitu za 12 mesiacov). Hodnota $\text{SPEI-12} < -1$ označuje mesiac, v ktorom krajina vstupuje do stavu dlhodobého sucha. (Obr. 14)

Analýzy klimatických scenárov ukazujú, že frekvencia suchých mesiacov rastie monotónne s intenzitou emisného scenára. V období 2071–2100 pri scenári SSP5-8.5 (vysoké emisie) sa bude sucho na Slovensku vyskytovať takmer vo všetkých analyzovaných mesiacoch — to je viac ako trojnásobok prirodzenej frekvencie výskytu sucha v historickom období. Najzraniteľnejšie nížinné okresy — Komárno, Dunajská Streda, Šaľa — môžu dosiahnuť frekvenciu až 100 % mesiacov so suchom.

Priestorová distribúcia trendov poklesu SPEI-12 ukazuje, že najvýraznejší pokles nastáva v nížinných oblastiach, kde sa kombinujú nižšie zrážky s vyšším výparom. Horské oblasti vykazujú menší pokles alebo dokonca mierny pozitívny trend pri niektorých scenároch, čo súvisí s redistribúciou zrážok v dôsledku orografického efektu.

Tieto čísla nie sú abstraktné štatistiky — v praxi znamenajú, že regióny, ktoré dnes zápasia s príležitostným letným suchom, budú v druhej polovici tohto storočia čeliť suchu ako trvalej podmienke hospodárenia.

7.6 Hydrologické sucho a jeho dôsledky pre vodné toky

Zmeny v dostupnosti vody sa neobmedzujú len na podzemné zásoby a nádrže — prejavujú sa aj v prietokoch riek a potokov, od ktorých závisí zásobovanie vodou, poľnohospodárstvo i ekosystémy. Hydrologické sucho — stav, keď prietok rieky klesá pod kritické hodnoty — je na Slovensku čoraz bežnejším javom; v európskom kontexte ho dokumentujú aj Cammalleri et al. (2020) a Sonny et al. (2025). (Obr. 18)

Prvá celonárodná analýza denných prietokov na 27 slovenských riekach za 90 rokov (1931–2020) 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 7-dňových minimálnych prietokov až o 23 % (Pekárová et al., 2025). Pozoruhodný je pritom zdanlivý paradox: hoci sa ročné úhrny zrážok na národnej úrovni dlhodobo menia len málo, lokálny nárast zrážok po roku 1996 sa do odtoku nepremietol — rastúca teplota a evapotranspirácia pohltili celý zrážkový prírastok. (Obr. 19)

Blaškovičová a kol. (2022) porovnali zmeny minimálnych prietokov v období 2001–2015 oproti referenčnému obdobiu 1961–2000. Kým v horských oblastiach (horný Váh, Hornád, Poprad) sa situácia mierne zlepšila, na západe, juhozápade a východe krajiny prevládajú záporné zmeny. Najohrozenejšími oblasťami z hľadiska dlhodobého letného sucha sú povodia Iľľa, Slanej a Malého Dunaja — teda práve regióny s intenzívnym poľnohospodárstvom. Vysoká citlivosť sa prejavuje aj v povodí Nitry, Bodvy, Moravy a Slanej. Dôležité je aj načasovanie: najdlhšie suchá nastávajú prevažne v letnom a jesennom

období (jún– november), čo sa časovo kryje s vegetačnou sezónou a najvyššou spotrebou vody v poľnohospodárstve. (Obr. 20)

Výskum Leščešena a kol. (2026) prináša pre správu vodných zdrojov znepokojujúce zistenie: hydrologické sucho na juhu a juhozápade Slovenska nie je krátka epizóda, ale dlhotrvajúci jav so silnou tendenciou opakovať sa. Analýza 120-ročných záznamov na 17 slovenských riekach ukázala, že v priebehu akéhokoľvek desaťročia je pravdepodobnosť aspoň jedného dvojročného hydrologického sucha na nížinných staniciach vyššia ako 60 %, a pravdepodobnosť trojročného sucha sa pohybuje na úrovni 35–45 %. Tieto hodnoty výrazne prevyšujú bežné predpoklady, na ktoré je dimenzovaná vodohospodárska infraštruktúra. Na 71 % sledovaných staníc bol zaznamenaný štatisticky významný pokles prietokov.

Výnimku tvorí niekoľko vysokohorských staníc — napríklad Podbanské vo Vysokých Tatrách —, kde hustý lesný porast a orografické zrážky pôsobia ako prírodný tlmič voči klimatickej zmene. Toto zistenie je empirickým argumentom pre ochranu horských lesov ako adaptačného opatrenia s priamym dosahom na vodohospodársku bezpečnosť.

7.7 Plavba na Dunaji

Plavba veľkých plavidiel sa na Slovensku realizuje výlučne na rieke Dunaj. Parametre plavebnej dráhy sú dosahované približne 245 dní v roku (v období 2003–2013). Obmedzenia sa vyskytujú len výnimočne, v dôsledku povodní, zamrznutia hladiny alebo opráv plavebných komôr (MŽP, 2021)

Veľký súbor simulácií regionálnych klimatických modelov podľa rôznych scenárov ukazuje, že zimný prietok sa na hornom Dunaji pri Viedni zvyšuje, jarný vrchol odtoku nastáva skôr a letný prietok (Stanzel & Kling, 2018). Je to dôsledok rastúcich zimných zrážok, skoršieho topenia snehu a vyššieho výparu v lete. Očakávaný pokles priemerného ročného prietoku Dunaja pri Viedni je v mediáne všetkých analyzovaných scenárov pre obdobie 2071–2100 relatívne malý (–3,3 %) (Stanzel & Kling, 2018). Možno preto predpokladať, že klimatická zmena nepovedie k závažnému ohrozeniu splavnosti Dunaja, aj keď riziko letného poklesu prietoku si vyžaduje ďalšie monitorovanie.

8 Adaptácia na suchu

V skratke

- Adaptácia má zmysel vo všetkých scenároch, ale čas je rozhodujúci — opatrenia s dlhým horizontom musia začať dnes.
- Poľnohospodárstvo: modernizácia závlah, vodozádržné opatrenia, suchoodolné plodiny a obnova organickej hmoty pôdy.
- Krajina a lesy: zadržiavanie vody (revitalizácia tokov, mokrade, malé nádrže) a druhová prestavba lesov.
- Voda a mestá: regulácia odberov podzemných vôd, ochrana zdrojov a modro-zelená infraštruktúra v mestách.

8.1 Poľnohospodárstvo a závlahy

Poľnohospodársky sektor bude čeliť nielen rastúcemu deficitu vody, ale aj predlžovaniu suchých epizód, nestálosťou sezónneho rozloženia zrážok a teplotným stresom plodín. V Podunajskej a Záhorskej nížine, ktoré sú centrami rastlinnej produkcie SR, sa v súčasnosti zavlažuje zlomok plochy. Pri scenároch SSP3-7.0 a SSP5-8.5 sa konvenčné pestovanie pšenice, kukurice a cukrovej repy v slovenských nížinách bez závlahy dostane do pásma trvalého extrémneho sucha, v ktorom výnosy dlhodobo zlyhávajú. Extrémne suchá z minulosti, keď SPEI-12 klesol v nížinách pod $-1,5$ ukázali, čo takéto podmienky spôsobujú; straty výnosov rádovo desiatky percent na rozsiahlych plochách.

Bez adaptačných opatrení bude stav rokov 2012 a 2022 normou, nie výnimkou. Ak naopak dôjde k systematickej výstavbe a modernizácii závlahových sústav, prechodu na vodou úsporné technológie (kvapkové závlahy, systémy riadenia závlahy viazané na aktuálnu evapotranspiráciu), diverzifikácii plodín smerom k suchoodolným druhom a odrodám a budovaniu retenčných kapacít v poľnohospodárskej krajine (polder, malé vodné nádrže, vhodne nadimenzované vodozádržné opatrenia v krajine, revitalizácie tokov a kanálov), môže región zvládnuť aj výrazne suchší klimatický rámec ako je v súčasnosti. Adaptácia tu nie je o záchrane súčasného systému, ale o premene produkčného modelu tak, aby fungoval v podmienkach, ktoré sú dnes len výnimkou, no čoskoro budú pravidlom.

Dôležitou súčasťou adaptácie je tiež obnovenie organickej zložky pôdy (SOC). Intenzívne hospodárenie posledných desaťročí znížilo obsah humusu v mnohých nížinných pôdach, čím klesla aj ich schopnosť pôdneho horizontu zadržiavať vodu. Zavádzanie agroekologických systémov ako sú oševné postupy s medziplodinami a strukovinami, minimalizácia mechanizačného zhutnenia a organické hnojenie, postupne zvyšuje retenčnú kapacitu pôdy a znižujú tak jej citlivosť na krátkodobé nedostatky vody.

8.2 Retencia vody v krajine

Jedným z najdôležitejších, a pritom dlhodobo opomínaných opatrení je zvýšenie schopnosti krajiny zadržiavať vodu. Melioračné úpravy v nížinách v 20. Storočí, ako sú odvodnenie mokradí, regulácia tokov a budovanie kanálov pre rýchly odtok, dramaticky znížili retenčný potenciál krajiny. V situácii, kde sa výrazne mení distribúcia zrážok v roku, príválové zrážky rýchlo odtekajú a obdobia sucha sa predlžujú, je táto strata retenčnej kapacity krajiny kľúčová.

Revitalizácia tokov (obnova mŕtvych ramien, meandrujúcich korýt a brehových porastov), spomaľuje odtok vody z krajiny a zvyšuje vsak vody a jej interakciu z podpovrchovou a podzemou vodou, čo tiež vedie k dopĺňaniu zásob podzemnej vody. Malé vodné nádrže a poldrové systémy, strategicky situované v povodí, zachytávajú vrcholové prietoky z príválových dažďov a uvoľňujú vodu postupne, zároveň tiež ovplyvňujú zásoby podzemnej vody. Obnova mokradí, osobitne v nive Dunaja, Váhu, Moravy a Nitry, predstavuje prírodný regulátor vodného režimu poľnohospodárskej krajiny s mimoriadne vysokou efektívnosťou. Tieto opatrenia navyše prinášajú synergické benefity: znižujú povodňové riziko, zvyšujú biodiverzitu a spomaľujú úbytok zásob podzemných vôd.

8.3 Adaptačný manažment lesov

Lesnícky sektor stojí pred transformáciou, ktorá nemá v modernej histórii Slovenska obdobu. Smrek, ktorý bol dlhodobo preferovaný pre rýchly rast a ľahké hospodárenie, je plytkokoreniaci druh

vyžadujúci rovnomerne vlhké podmienky. Pri SPEI-12 dlhodobu pod $-1,5$ až $-2,0$ (čo pri emisných scenároch SSP3-7.0 a SSP5-8.5 môže byť v horských oblastiach v druhej polovici 21. storočia normou) strácajú smrečiny fyziologickú odolnosť a stávajú sa náchylnými na podkôrne škodce.

Ak nedôjde k riadenej premene, pokračujúci rozpad smrekových porastov bude mať kaskádovitý efekt: holinami odkrytá pôda sa vysuší a eroduje, naruší sa ekologická stabilita krajiny, horské potoky stratia jeden z najdôležitejších vplyvov reguláciu odtoku v horskej krajine, vodohodpodárska funkcia lesov sa oslabí a zároveň to budú mať tieto dopady výrazný vplyv aj na ekonomiku a turizmus na Slovensku.

Cieľom lesnej adaptácie je vytvoriť porasty schopné fungovať v klimatickej obálke 21. storočia. To znamená uprednostňovanie druhov s hlbším koreňovým systémom a vyššou odolnosťou voči suchu. Premena musí byť realizovaná postupne, musí rešpektovať miestne podmienky pôdy, expozície a nadmorskej výšky. Pre oblasti s vysokým hodnotením požiarneho rizikom (Záhorie, Slovenský kras, Vihorlat) je nevyhnutné budovanie protipožiarnych pásov a zásobníkov lesnej vody.

8.4 Zásobovanie vodou a ochrana podzemných vôd

Zásobovanie pitnou vodou na juhozápadnom Slovensku je závislé od kvartérnych akviférov Podunajskej a Záhorskej nížiny. Tieto akvifery sa prirodzene doplňujú počas jarných záplav a dlhotrvajúcich zrážkových epizód. Pri dlhodobom suchu, aké projekcie naznačujú pri emisných scenároch SSP3-7.0 a SSP5-8.5, môže doplňovanie klesnúť pod úroveň odberu, čo vedie k dlhodobému poklesu hladín podzemnej vody.

Koreňom problému nie je len meniaci sa klíma, ale aj štruktúra odberu: poľnohospodárstvo, priemysel a komunálna sféra čerpajú vodu bez systémovej väzby na aktuálny stav zásob. Udržateľné hospodárenie s podzemnými vodami preto nevyhnutne vyžaduje redukciu odberov, a to legislatívnymi nástrojmi, nie len dobrovoľnými opatreniami. Platné právne rámce regulujú priemyselné odbery nedostatočne a pre samosprávy a individuálnych odberateľov prakticky absentujú. Zavedenie systému povoleného odberu viazaného na stav hladín podzemnej vody, analogicky s prístupmi aplikovanými napríklad v Španielsku či Francúzsku, by umožnilo automaticky obmedzovať odbery pri nízkych stavoch a chrániť zásoby pre prioritné účely zásobovania obyvateľstva.

Dôležitou podmienkou funkčnej ochrany podzemných vôd je aj zvyšovanie informovanosti verejnosti a samospráv. Diskusia o zásobách podzemnej vody je na Slovensku často vedená na základe zaužívaných predstáv, napríklad o nevyčerpatelnosti Žitného ostrova, ktoré nezodpovedajú faktickému stavu ani vedeckým projekciám. Komunikácia o skutočnom stave a zraniteľnosti zdrojov, podložená dátami z monitorovacích sietí, je predpokladom spoločenskej podpory pre nevyhnutné regulačné kroky.

Ochrana existujúcich ochranných pásiem zdrojov pitnej vody, posilnenie monitorovacej siete podzemných vôd a dôsledná kontrola dodržiavania povolených odberov sú opatrenia, ktoré je možné realizovať v krátkodobom horizonte a ktorých účinnosť závisí predovšetkým od politickej vôle, nie od technologických inovácií.

8.5 Mestá: modro-zelená infraštruktúra a suchový stres

Mestá čelia kombinovanému tlaku, tepelnému ostrovu, znižovaniu vlhky dostupnej pre mestskú zeleň a strate retenčných schopností nepriepustných povrchov. Analýzy kombinovaného indexu sucha CDI ukazujú, že mestské okresy nie sú chránené pred suchom, naopak, Košice III (22,7 % mesiacov s extrémnym suchom) a Košice IV (21,5 % mesiacov s extrémnym suchom) patria k okresom Slovenska ktoré zažívajú najvyšší stress suchom. Aj bratislavské okresy vykazujú nezanedbateľné hodnoty (Bratislava III 8,7 %, Bratislava I 7,0 % mesiacov s extrémnym suchom).

Bez adaptácie budú mestá pri scenároch s vysokými emisiami čeliť postupnému odumieraniu mestskej zelene (stromy bez zavlažovania neprežijú predlžujúce sa letné suchá), rastúcemu tepelnému diskomfortu v zastavených oblastiach a zvýšenej spotrebe pitnej vody na chladenie a zavlažovanie. Navyše, nepriepustné povrchy, ktoré dnes tvoria väčšinu mestskej plochy, odvádzajú dažďovú vodu do kanalizácie namiesto toho, aby ju zadržali pre letné suché obdobie.

Modro-zelená infraštruktúra, sieť zelene, vodných prvkov a priepustných povrchov, je adaptačnou odpoveďou na všetky tieto výzvy súčasne. Výsadba sucho-odolných stromov (dub, lípa, jasan), zelené strechy a steny, retenčné záhrady a priepustné dlažby znižujú tepelný ostrov, zadržujú vodu a vytvárajú mikroklimu priaznivejšiu pre obyvateľov aj ekosystémy. Systémy zberu dažďovej vody, od rodinných

domov po veľkokapacitné mestské vsakovacie a retenčné nádrže, umožňujú využiť vodu z privalových zrážok práve vtedy, keď je neskôr nedostatok.

9 Dve Slovenská v roku 2080 — príbehy

PRÍBEH B — Keby sme konali skôr, bolo by to ľahšie

Anna má osemdesiatdeväť rokov. Sedí na verande, chrbát opretý o stenu, pri nej na schodoch sedia vnúčatá, desaťročný Matej a malá, šesťročná Hanka. Zabudli na tablet, keď môžu počúvať babičkine príbehy. Babičkin hlas je tichý, Matej vie, že keď začne rozprávať takto, pomaličky, s dlhými pauzami, má zmysel počúvať.

“Váš dedo poznal každý strom v Tribeči menom.” “Naozaj?” spýtala sa malá Hanka.

“Nie doslova, samozrejme. Ale on tomu veril.” Chodil do lesa od pondelka do piatku v zelenej uniforme so žltó-zeleným znakom lesníckeho podniku, a v sobotu chodil sám, bez uniformy, s psíkom. „Je to rozdiel,” hovoril. „V týždni je to práca, v sobotu je to láska.” Babka Anna si ho pamätá, ako si sadal na pažiť pod smrekmi a počúval les.

Tých smrekov dnes na Tribeči niet.

Keď sem prišla ako nevesta v roku 2018, Tribeč bol zmiešaný — dub, hrab, borovica, a na severných svahoch kúsok smreka. Dedko Vladimír pracoval na oddelení lesnej ochrany a večer pri stole čoraz častejšie rozprával o lykožrútovi. „Pribúda,” hovoril. „A ja neviem, čo s tým. Nie sú peniaze na zásah, nie sú robotníci, a štát píše vyhlášky, akoby les nevideli ani cez okno.” V roku 2023 nahlásil päťpercentný výskyt na severnom svahu. Čakal. Nič neprišlo. Na jeseň bolo pätnásť percent. O tri roky zostala len holina. “Dedka to veľmi trápilo, ale sám s tým nevedel nič urobiť,” povedala babka Anna.

“A ty si mu nepomáhala, babka?” spýtal sa Matej. “Ja som mala svoju prácu, učila som deti, ako ste vy dvaja nezbedníci.”

Vlak do Nitry mal odchod o šiestej ráno. Anna naň chodila štyridsať rokov. Na základnej škole blízko starého centra učila deti matematiku a sledovala, ako sa mení mesto aj samotná škola. Nie osnovy, nie deti, ktoré učila, ale režim dňa kvôli teplu. Spočiatku im riaditeľka kúpila do tried ventilátory, pretože v júni a septembri bývalo vo triedach cez tridsaťpäť stupňov. V roku 2038 dostali klimatizáciu, deti z mesta sa však aj tak počas teplých mesiacov nedokázali sústrediť na učenie, pretože boli neodpočínuté po horúcej noci. Riaditeľka zaviedla „prestávky na chladenie”, prvé septembrové dni bez vyučovania, formálne zdôvodnené, boli v skutočnosti ústupok pred horúčavou. Povrchová teplota na chodníku pred školou bola v taký deň o osem stupňov vyššia ako tu v Jelenci. Merali to. Anna to cítila na podrážkach topánok. “Keď som bola malá, moja stará mama mi rozprávala o snehových kalamitách, počas ktorých sa nechodilo do školy. Naše kalamity vyzerali inak. Začali sme zavádzať kalamitné prázdniny kvôli horúčavám a kvôli nedostatku vody. Keď začalo zlyhávať zásobovanie vodou, v škole sme nedokázali vytvoriť podmienky pre deti.” Matej ticho sedel a premýšľal. “Babi, ale veď aj pri mori bolo ľuďom teplo a do školy deti aj tak chodili.” “To je iné, Matko, oni mali teplo vždy a adaptovali sa. V takom Španielsku boli aj historické štvrte stavané tak, aby využívali vietor prúdiaci od mora na chladenie a aby s tým domy neprehrievali. Vnímali, že globálne otepľovanie je problém, pretože to cítili ako prví, a robili opatrenia, ktoré im pomáhali zmierňovať dopady klimatickej zmeny na mestá. My sme to podcenili, pretože sme s tým nemali historickú skúsenosť, vraveli sme si, že máme dosť iných problémov. Až do momentu, keď začali byť dopady zmeny klímy takým vážnym problémom, že zatienili všetky ostatné.”

Nitra je teraz pre Annu mestom, do ktorého nejde. Nie preto, že nemôže. Preto, že nechce. Staré lipy a javory na Štefánikovi odišli väčšinou v rokoch 2058 až 2065. Mestská záhradná správa mala troch ľudí na celé mesto, tri osoby a päťdesiat tisíc stromov. Potom prišiel jeden horúci august a štvrtina stromov odišla naraz, ako kapitulácia. Nezvládli tepelný stres a dlhodobý nedostatok vody. Nové tiež treba zavlažovať, sú menšie, iné, bez pamäte. “Keby sme nad vecami uvažovali skôr, nemuseli sme teraz riešiť dôsledky. Je to oveľa náročnejšie a drahšie. Aj mojím deťom by sa ľahšie chodilo do školy, keby mesto nebolo také rozpálené, keby si mohli z tej horúčavy niekedy odpočinúť.”

Na verande bolo ticho, zo zatiahnutej oblohy začal padať dážď, ktorý deti milovali. Sledovali, ako kvapky vody stekajú z odkvapu strechy po kovovej reťazi do trávy. Už niekoľko mesiacov dostatočne nenapršalo a výdatný dážď bol jedinou záchranou pre suchú trávu na dvore. “Ale u teba na dvore tak teplo nebolo, však babka?” spýtala sa malá Hanka.

“Bolo teplo, ale menej. Čo nás viac trápilo, bolo sucho, ktoré prišlo nenápadne a neboli sme naň pripravení.”

Studňa na záhrade vyschla po prvý raz v auguste v roku 2045. Keď sa však nedostatok vody začal opakovať, pochopili, že to nie je výnimka. „Nebolo vody, nebolo čím polievať. Postupne som prestala sadiť úplne, pretože teplo a sucho aj tak väčšinu úrody v mojej záhrade zničilo.” Anna mala šestnásť druhov zeleniny, paradajky, papriku, cibuľu, a najmä zemiaky: veľké, múčnaté, zo starých odrôd, čo dostala od svokry. V roku 2044 zemiaky vyschli v pôde ešte skôr, ako ich stihla vykopáť. „Prsty zapichujem po lakeť a je tam teplo, nie chlad,” hovorila. „Zemiaky chcú chlad. Zemiaky majú rady noc.” Celkový tepelný súčet sezóny, odborníci tomu hovoria GDD, pre Podunajskú nížinu v roku 2080 dosahuje takmer dvetisícpäťsto tepelných jednotiek. Zemiaky optimálne rastú pri polovici z toho. Anna to nevie v číslach, ale vidí to v záhrade. „Keď nám vyschla studňa, hovorili sme si, aspoň na Žitnom ostrove majú vody dosť. Celá Európa závidela tú zásobu vody pod Dunajom, je to najväčšia zásoba podzemnej vody v strednej Európe, aspoň tak hovorili odborníci. Myslela som si, že take veľké množstvo vody pod zemou nemôže ohroziť nič, ale moja sesternica z Dunajskej Stredy mi volala čoraz častejšie. Najprv o poliach, ktoré praskajú. Potom o studniach u susedov. A nakoniec o tom, že obec zaviedla obmedzenia odberu. Aj tam to začalo. Pomaly, nenápadne, ale začalo.”

Pozrie sa na kopec za dedinou. Je hnedo-zelený, dub a hrab sa drží, ale les je akosi riedky, akosi priesvitný, bez tej hustoty, ktorú pamätá z prvých rokov s Vladimírom.

„Dedo bol v tom lese šťastný,” hovorí. „Robil, čo mohol. Ale musel robiť sám, bez pomoci, bez peňazí, bez rozhodnutí zhora. Keby bol niekto počúval jeho správy. Keby boli konvertovali les o desať rokov skôr. Keby boli urobili tie malé nádrže v povodí, aby voda neodtekala.” Zastaví sa. Zasmeje sa, takmer s horkosťou. „Keby je slabé slovo. Dedo to vedel. Aj ja to viem. Ale hovorím vám to, lebo vy žijete v tomto svete a budete ho meniť.”

Hanka zdvihne hlavu. „Ale babka, ako my?”

Anna sa narovná. „No ako, deti. Tým, že nebudete hovoriť keby. Budete hovoriť teraz.”

PRÍBEH A — Nová tvár miesta, ktoré milujem

Jozef má osemdesiat rokov a chodí do hôr stále. Pomalšie, s palicami, hodinový výstup mu trvá niekedy aj dve hodiny, ale ide. Sedí teraz v drevenom kresle pred horskou chatou a drží v rukách hrnček čaju, a Tereza, mladá ekologička z Liptovského Mikuláša, sedí vedľa neho a pozerá na sever, kde lesy idú hore svahom ako vlna.

„Vy si pamätáte, aké to bolo?” pýta sa Tereza.

„Pamätám,” hovorí Jozef. „Ale pamätám inak, ako si myslíš.”

Narodil sa v roku 2000 v Ružomberku. Vyrastal v čase, keď lykožrút bral smrečiny po hektároch, keď sa o klimatickej zmene hovorilo ešte ako o budúcnosti, a pritom sa diala práve vtedy, pred očami. Pamätá si, ako ho otec vzal na kalamitné holiny, mal sedem rokov, a videl tú škaredú zem, vyvrátené korene, sivé torzá stromov trčiace ako varovné prsty. „Bál som sa,” hovorí. „Myslel som, že takto bude vyzeráť svet, keď vyrastiem.”

Ale pamätá aj niečo iné, teplo. Nie také teplo, aké poznal z nížin, keď raz zašiel k strykcom do Nitry. Horské teplo, iné, neprirodzené, ťažké. V lete okolo roku 2035 až 2045 bývalo pod Tatrami cez tridsaťpäť stupňov aj týždeň v kuse. Pre chlapca, ktorý vyrastal v Ružomberku zvyknutého na to, že horský vzduch je vždy o päť stupňov chladnejší, to bolo vyčeraávajúce. „Akoby niekto presunul Slovensko na juh Európy,” hovorí. „Horské potoky, na ktorých sme ako deti chytali pstruhy, v auguste vyschli. Nie úplne všetky, ale niektoré vyschli úplne. Zostali kamene, biele a horúce, a žiadna voda.” Pamätá, ako v roku 2044 štyri obce na Liptove museli obmedzovať odber pitnej vody a dve brali vodu z cisterien. Studne pod úpäťami kopcov klesali, lesy nad nimi boli rozbité kalamitami a holiny nezadržiavali dážď, len ho poslali dolu.

„To bol moment, keď som pochopil, že to nie je o lese,” hovorí Jozef. „Les som videl umierať od detstva. Ale keď vyschne potok, to cítiš inak. To je voda, ktorú piješ.”

Tereza kýva; pozná to z archívnych dát. „A teraz?” pýta sa a ukáže prstom na svah naproti.

Jozef sa pozerá. Svah je hustý, ale inak hustý, ako ho poznal v detstve. Nižšie, do výšky asi osemsto metrov, prevláda buk: bohatý, rôznoveký, s podrástom lieskových kríkov a mladých jedlí. Vyššie, zmiešaná zóna buka s jedľou a sem-tam smrekom. A až vo výšinách nad tisícpäťsto metrov, smrek sám, tmavý a zdravý. Potok pod chatou tečie. Je august. Tečie.

„Krajší,” hovorí Jozef. Nie je to nostalgia. Je to konštatovanie.

Keď mal tridsať, pracoval na ministerstve životného prostredia v odbore lesnej politiky, a pamätá prvé vážne diskusie o premene lesa, ako to nebolo populárne, ako hovorili „smrek bol vždy tu.“ On odpovedal číslami a vedeckými faktami: tlakový deficit pár, kavitácia xylému, percentá lesnej plochy vystavené kritickému stresu. Analýzy z klimatických modelov ukazovali jasne, bez zmeny emisií zostane smrek v stresovej záťaži na takmer celej lesnej ploche Slovenska. Pamätá rokovania s lesnými podnikmi, niektorí pochopili skoro, iní museli byť do zmien dotlačený zákonmi, dotáciami, a nakoniec aj kalamitami samými.

„Otočný bod bol okolo roku 2035,“ hovorí. „Vtedy začali výsadby buka naberať na zmysle. Predtým bolo veľa slov, málo stromov.“ Európska smernica o diverzifikácii lesa, minimálne päť druhov v porastovej zmesi, ktorá mala byť záväzná od roku 2050, zastala Slovensko čiastočne nepripravené, ale aspoň zrýchlovala tempo zmien. Cieľový podiel buka bol stanovený na štyri až päťdesiat percent v pásme štyri až tisíc metrov nadmorskej výšky. Implementácia trvala generáciu lesníkov a generáciu stromov, ale dnes je výsledok viditeľný.

„A voda sa vrátila,“ dodáva Jozef. „Nie rovnaká, je menej snehu takže na jar už nie je toľko vody ako v minulosti, ale lesy opäť fungujú ako špongia. Osemtisíc malých retenčných nádrží v karpatských pohoriach, budovaných od roku 2038. Každá vyzerá nenápadne, kúsok vody v húšťave, ale spolu zachytávajú aprílovú vodu a uvoľňujú ju v júli. Liptovské potoky tečú znova.“

Tereza si zapisuje. Tu je pre Terezu výskum, sleduje pohyb hranice lesa nahor: štyri až šesť výškových metrov za dekádu. Pomalšie, ako sa niektorí báli, lebo aktívna výsadba spomalila chaos divokej migrácie.

Jozef sa zasmieje, keď príde reč na záhradu. „Viš čo teraz pestujeme v Ružomberku? Levanduľu. A viničné záhony sú v Liptovskom Mikuláši po záhradách.“ Tereza sa usmieje, vie to. „Prvý krát som videl tu levanduľu asi v roku 2045,“ hovorí Jozef, „a bolo mi ľúto. Vtedy som si myslel, že je to nejaká pohroma v záhrade, že si Slovensko stráca seba. Že kopce pod Tatrami budú vyzeráť ako Provensalsko a nie ako Orava.“ Pokrčí plecami. „Trvalo mi roky, kým som pochopil, že to nie je strata. Je to zmena. A keď mi sused v roku 2055 doniesol prvú fľašu vína z jeho záhradky, Liptovský Müller Thurgau, ako to s humorom volal, bol som vďačný. Nie za víno, hoci bolo dobré. Za to, že sme sa prispôbili a máme stále všetko, čo potrebujeme.“

Ale toto, hovorí Jozef, by nebolo možné bez nížin. A to ľudia z hôr často zabúdali povedať.

„Keď som bol malý, stará mama mi rozprávala o slovenskom poľnohospodárstve s nostalgiou,“ hovorí. „O tom, ako krajina vedela uživiť sama seba. O obilí v Podunajskej nížine, o repách a slnečniciach, o tom, že každý kraj mal svoju plodinu a svoju chuť. Keď som bol mladý dospelý, okolo roku 2030, zdalo sa mi to ako mýtus. Nížiny trpeli suchom, výnosy klesali, polia praskali v lete ako keramika v peci. Myslel som si, že naše poľnohospodárstvo je mŕtve. Že budeme dovážať väčšinu jedla, že slovenská krajina je príliš horúca na to, čím vždy bola.“

Zastaví sa. Potok dole šumí.

„A potom sa niečo stalo,“ hovorí. „Nie rýchlo. Nie dramaticky. Pomaly, po kúskoch, závlahové sústavy z päťdesiatych rokov sa rekonštruovali a rozširovali. Mokrade v nive Váhu a Dunaja, vysušené v dvadsiatom storočí, sa revitalizovali- prirodzená retencia, hovorili odborníci, a mali pravdu. Voda, ktorá by inak odtiekla do mora, zostala v krajine a dopĺňala podzemné zásoby. Plodiny sa menili, sorgo, cicer, sucho- odolné odrody pšenice, mliečna kukurica. Nie z večera do rána, ale generácia agronomov postupne prepísala oševné postupy celej nížiny.“ Usmieje sa. „A slovenské poľnohospodárstvo nezomrelo. Je iné, ale živé. Dnes pokrýva väčšinu našej spotreby. Nie tak, ako ho pamätala stará mama. Ale pokrýva.“

„To zachránilo ekonomiku krajiny,“ hovorí Tereza ticho, skoro pre seba.

„Zachránilo,“ kýve Jozef. „A to je dôvod, prečo sa tu, pod Tatrami, máme dobre. Pretože Slovensko zostalo ekonomicky funkčnou krajinou, aj keď to vôbec nebolo isté. Peniaze, ktoré nemuseli ísť na masívny dovoz potravín a sanáciu strát po dlhých obdobiach sucha, mohli ísť na premenu lesov, na retenčné nádrže, na monitoring, na asistovanú migráciu genotypov smreka a buka do vyšších polôh. Jedno záviselo od druhého. Ak by nížiny zlyhali, hory by nedostali podporu. Ak by hory zlyhali, zdroje vody pre nížiny by sa oslabili.“

Mlčia chvíľu. Hore, nad treťou zónou lesa, letí orol. Tereza ho sleduje ďalekohľadom.

„Čo ste si mysleli, keď ste boli malý? Fakt?“ pýta sa nakoniec.

Jozef sa zamyslí. Hrnček je prázdny, ale drží ho v rukách ešte. „Myslel som, že svet bude skoro bez lesa. Že to ide príliš rýchlo a ľudia sú príliš pomalí.“ Usmieje sa. „Mýlil som sa. Nie úplne, tempo bolo rýchle, a niektoré veci sme urobili o desaťročie neskôr, ako sme mali. Ale urobili sme ich. Zachránili sme vodu v horách, zachránili sme les, taký, aký je dnes, iný, ale živý, a zachránili sme krajinu, ktorá vie uživiť svojich ľudí. Nie tak, ako ju pamätali naše staré mamy. Ale uživiť.“

Tereza zatvorí zápisník. „Ďakujem.“

„Nie,“ hovorí Jozef. „Tí, čo teraz stromy sadíte a meriete potoky, vy budete ďakovať neskôr. Alebo vôbec nebudete, lebo to bude normálne. A to je najlepšie, čo sa môže stať.“

Poznámka: Príbehy vychádzajú z analýz CMIP6 klimatických projekcií pre územie Slovenska.

Kvantitatívne hodnoty (GDD, SPEI-12, VPD-stres, AI) pochádzajú z výstupov spracovaných v rámci projektu analýzy klimateckej zraniteľnosti SR (2026). Scenár SSP5-8.5 = vysoké emisie bez mitigácie; SSP1-2.6 = ambiciózna klimatecká politika.

10 Záver

Projekcie CMIP6 sú jednoznačné: sucha bude pre Slovensko narastajúcim a pri vysokých emisiách aj dominantným klimatickým javom 21. storočia. Rozdiel medzi scenármi nespočíva v tom, či bude suchšie, ale v tom, do akej miery. Pri nízkych emisiách (SSP1-2.6) sú zmeny reálne a výrazné, avšak adaptovateľné bežnými prostriedkami. Pri scenároch SSP3-7.0 a SSP5-8.5 dosahujú projektované hodnoty SPEI-12 v nížinách úrovně, pri ktorých konvenčné poľnohospodárstvo, existujúca zásobovacia infraštruktúra a lesné hospodárstvo bez zásadnej transformácie jednoducho nefungujú.

Adaptácia má zmysel a potenciál vo všetkých scenároch. Avšak čas zohráva kľúčovú úlohu. Opatrenia, ktoré dnes stoja desiatky miliónov eur a vybudujú sa v priebehu niekoľkých rokov (závlahová infraštruktúra, revitalizácia mokradí, konverzia lesov), by bolo potrebné pri inertnom prístupe v budúcnosti nahradiť núdzovými riešeniami (dovoz vody, nákup potravín, hasenie rozsiahlych lesných požiarov) za rádovo vyššie náklady a bez istoty výsledku. Každý rok odkladu zužuje priestor pre proaktívne a lacné riešenia a zvyšuje pravdepodobnosť, že čelíme dopadom, pred ktorými sme sa mohli chrániť.

Najvyššia priorita patrí opatreniam s dlhým realizačným horizontom: lesnej konverzii (výsledky viditeľné za desaťročia), rekonštrukcii závlahových sústav (investične náročné, dlhodobé) a ochrane podzemných vôd (preventívna, lebo po poklese hladín je obnova extrémne pomalá). Paralelne musia postupovať opatrenia v krajinskej retencii, mestskej modrozelenej infraštruktúre a agroekológii. Integrovaný prístup, naprieč sektormi a regiónmi, je jediným, ktorý dokáže zvládnuť komplexnosť klimatickej zmeny, ktorú dáta naznačujú.

Priestorová zraniteľnosť voči suchu nie je na Slovensku rovnomerná. Na základe analýz CMIP6 ansámbly, aridity indexu a SPEI-12 projekcií patria k najohrozenejším:

- Podunajská nížina (okresy Komárno, Dunajská Streda, Šaľa, Nové Zámky, Galanta) — najvyšší predpokladaný nárast aridity indexu (+59–66 %), najväčší pokles SPEI-12 z historického +0,39 na –1,22 pri SSP5-8.5. Priamy dosah na potravinovú bezpečnosť a zásoby podzemnej vody (Žitný ostrov).
- Záhorská nížina — geologické podložie (piesočnaté sedimenty) znižuje retenčnú kapacitu pôdy; rýchly nástup sucha aj pri miernom deficite zrážok.
- Juhoslovenská kotlina — najnižší CDI index, ale extrémne epizódy v rokoch 2012 a 2022 sú varovaním pred budúcou frekvenciou takýchto udalostí.
- Horské a podhorské lesy nad 500 m n. m. — kritická zraniteľnosť smrekových porastov (VPD stres na >94 % plochy pri SSP5-8.5 po roku 2051) s kaskádovitými dôsledkami pre vodohospodársku funkciu lesa.

Sektorovo sú najohrozenejšie:

- Poľnohospodárstvo: pokles výnosov kukurice a jarného jačmeňa v nížinách, nutnosť závlah na plochách, kde dnes nie sú, presun pestovania zemiakov do podhorských polôh.
- Zásobovanie pitnou vodou: vodárenské nádrže na severovýchodnom Slovensku ohrozené znížením odtoku a rastúcim výskytom síní; kvartérne akvifery Žitného ostrova čelia poklesu hladín aj znečisteniu z poľnohospodárstva.
- Lesné hospodárstvo: kolaps smrekových monokultúr pod synergickým tlakom sucha a podkôrneho hmyzu, potreba urýchlenej druhovej diverzifikácie.

10.1 Tri hlavné posolstvá

- Sucha na Slovensku sa prehľbuje — a hlavnou príčinou nie sú zrážky, ale teplo. Priemerné ročné zrážky sa na celonárodnej úrovni výrazne nezmenili, no rastúca teplota zvyšuje výpar a vysušuje pôdu, lesy aj vodné toky. Tento mechanizmus, nie pokles zrážok, ale rast atmosférického dopytu po vode, je jadrom problému a bude sa prehľbovať vo všetkých scenároch zmeny klímy.
- Rozsah budúceho sucha závisí od dnešných emisných rozhodnutí. Pri ambicióznejšej klimatickej politike (SSP1-2.6, oteplenie ~+1,6 °C do 2100) zostávajú zmeny adaptovateľné. Pri vysokých emisiách (SSP5-8.5, ~+4,6 °C) sa nížinné regióny dostanú do chronického sucha, pri ktorom konvenčné poľnohospodárstvo, existujúca vodohospodárska infraštruktúra a smrekové lesné hospodárstvo bez zásadnej transformácie jednoducho nefungujú. Rozdiel medzi scenármi nie je v tom, či bude suchšie, ale ako veľmi.
- Adaptácia má zmysel a výsledky, ale čas je rozhodujúci. Opatrenia s dlhým realizačným horizontom, lesná konverzia (výsledky za desaťročia), rekonštrukcia závlahových sústav, ochrana podzemných vôd, musia

začať dnes. Každý rok odkladu zužuje priestor pre lacné a proaktívne riešenia a zvyšuje pravdepodobnosť, že čelíme dopadom, pred ktorými sme sa mohli chrániť.

10.2 Väzba na strategické dokumenty

Zistenia tejto štúdie sú v súlade s dvoma kľúčovými referenčnými rámcami:

Stratégia adaptácie SR na zmenu klímy (NAS SR 2018, MŽP SR) identifikuje suchu a nedostatok vody ako prioritné riziko a odporúča opatrenia v poľnohospodárstve, lesnom hospodárstve a vodnom hospodárstve. Táto štúdia kvantifikuje rozsah budúceho rizika a územne konkretizuje, kde sú zásahy najpálčivejšie — čím naplňa analytickú medzeru, na ktorú NAS SR 2018 poukazuje.

Európske hodnotenie klimatického rizika (EUCRA 2024, EEA) zaraduje strednú Európu medzi oblasti s vysokým a narastajúcim rizikom sucha, zdôrazňuje kaskádové efekty medzi sektormi a vyzýva k urýchlenej implementácii adaptačných plánov na národnej aj regionálnej úrovni. Výsledky slovenského CMIP6 ansámbľu prezentované v tejto štúdii dopĺňajú európsky kontext o územne konkrétne projekcie pre podmienky Slovenska. (Obr. 22)

Prioritné odporúčanie: aktualizácia NAS SR by mala reflektovať nové kvantitatívne projekcie sucha (vrátane SPEI-12 a aridity indexu pre jednotlivé okresy) a zaviesť záväzné medzirezortné mechanizmy pre scenáre chronického sucha pri vysokých emisných trajektóriách.

English Summary

Drought in Slovakia: From the Present to Two Climate Futures

Executive Summary

Context

Slovakia is experiencing a measurable deterioration in drought conditions driven primarily by rising temperatures and increasing atmospheric water demand — not by declining precipitation. Average annual precipitation has changed little since 1961, but growing evapotranspiration is pushing the water balance into increasing deficit, especially in the southern lowlands during the growing season. The consecutive dry summers of 2018 and 2019 were unprecedented in Central Europe over at least 250 years; the years 2003, 2015, 2017, 2022 and 2024 confirm that severe droughts are no longer isolated outliers but a defining feature of Slovakia's emerging climate.

Methods

This assessment is based on an ensemble of approximately 20 CMIP6 global climate models, statistically bias-corrected against Slovak observations and downscaled to a 1 km grid using quantile delta mapping (QDM). Three emission pathways are evaluated — SSP1-2.6 (ambitious mitigation), SSP2-4.5 (intermediate), and SSP5-8.5 (high emissions) — across three time horizons centred on 2030, 2050, and 2080 (relative to the 1991–2020 baseline). Key indicators include the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI-12), the aridity index (AI), vapour pressure deficit (VPD), consecutive dry days (CDD), and the Fire Weather Index (FWI).

Key Findings

- **Temperature:** Mean annual temperature in Slovakia will rise by +1.3–1.6 °C by 2030 (all scenarios) and by +1.6–4.6 °C by 2080, depending on emissions. Hot days ($T_{\max} \geq 30$ °C) are projected to increase 3–5-fold in the lowlands; tropical nights to become a regular summer feature.
- **Drought intensity:** SPEI-12 in the Danubian Lowland is projected to decline from a historical average of +0.39 to –0.32 (SSP1-2.6) and –1.22 (SSP5-8.5) by 2071–2100, indicating a transition from mildly wet conditions to persistent drought.
- **Aridity:** The national aridity index is projected to increase by up to 53.4 % under SSP5-8.5; districts of Komárno, Dunajská Streda and Šaľa face the largest increases (+59–66 %).
- **Agriculture:** Heat-drought stress will substantially reduce maize and spring barley yields in the lowlands; irrigated area must expand significantly from its current 60,000 ha (down from 360,000 ha in previous decades) to maintain production.
- **Forests:** Norway spruce (*Picea abies*) will be physiologically unsustainable on most lowland and mid-elevation sites under SSP5-8.5 after 2051; silver fir (*Abies alba*) will face the earliest and most widespread stress. Species diversification towards beech, oak and maple is the primary adaptation pathway.
- **Water supply:** Slovak drinking water reservoirs face increasing cyanobacterial blooms and rising treatment costs; the Žitný ostrov (Danubian) aquifer — Central Europe's largest groundwater reserve — is subject to compound pressure from reduced recharge and agricultural contamination.

Policy Implications

Three overarching messages emerge from this assessment:

- The driver is temperature, not precipitation. Drought risk management in Slovakia must be framed as a temperature-driven challenge, not primarily a rainfall deficit problem.
- Emission choices made today determine the magnitude of future drought. The difference between SSP1-2.6 and SSP5-8.5 by 2100 is the difference between manageable stress and chronic aridification incompatible with current land use systems.
- Adaptation is feasible and cost-effective, but time-sensitive. Long-lead-time measures — forest species conversion, irrigation infrastructure reconstruction, groundwater protection — must begin now. Delay converts preventable impacts into emergency responses at orders-of-magnitude higher cost.

This study is consistent with the Slovak National Adaptation Strategy (NAS SR 2018) and the European Climate Risk Assessment (EUCRA 2024, EEA), which both identify drought and water scarcity as priority risks for Central Europe requiring urgent, cross-sectoral adaptation action. The district-level SPEI-12 and aridity index projections presented here provide the quantitative spatial basis needed to translate these strategic frameworks into concrete regional planning decisions.

Authors: Mgr. Jozef Pecho · Ing. Viera Rattayová PhD.

Regioclim s.r.o. · June 2026

11 Bibliografia

Citované práce

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rim. (referenčná ET₀, Penman-Monteith)
- Blaškovičová, L., Jeneiová, K., Melová, K., et al. (2022). Changes in Selected Low-Flow Characteristics in the 2001–2015 Period Compared to the 1961–2000 Reference Period in Slovakia. *Climate* 10(6), 81. doi:10.3390/cli10060081.
- Brázdil, R., Dobrovolný, P., Mikšovský, J., et al. (2022). Documentary-based climate reconstructions in the Czech Lands 1501–2020 CE and their European context. *Clim. Past* 18, 935–959. doi:10.5194/cp-18-935-2022.
- Cammalleri, C., et al. (2021). A revision of the Combined Drought Indicator (CDI) used in the European Drought Observatory (EDO). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 21, 481–495. doi:10.5194/nhess-21-481-2021.
- Cammalleri, C., Naumann, G., Mentaschi, L., et al. (2020). Diverging hydrological drought traits over Europe with global warming. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 24, 5919–5935. doi:10.5194/hess-24-5919-2020.
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *J. Climate* 28, 6938–6959. doi:10.1175/JCLI-D-14-00754.1. (QDM)
- Cook, E. R., Seager, R., Kushnir, Y., Briffa, K. R., Büntgen, U. et al. (2015). Old World megadroughts and pluvials during the Common Era. *Science Advances* 1(10), e1500561. doi:10.1126/sciadv.1500561.
- EEA (2024). European Climate Risk Assessment (EUCRA). EEA Report 01/2024, European Environment Agency. doi:10.2800/8671471.
- Feyen, L., Ciscar, J. C., Gosling, S., et al. (2020). Climate change impacts and adaptation in Europe – JRC PESETA IV final report. EUR 30180 EN, Publications Office of the EU. doi:10.2760/171121.
- Fleischer, P., Pichler, V., Fleischer, P. Jr., et al. (2017). Forest ecosystem services affected by natural disturbances, climate and land-use changes in the Tatra Mountains. *Climate Research* 73(1–2), 57–71. doi:10.3354/cr01461.
- GADM (2022). Database of Global Administrative Areas, verzia 4.1. <https://gadm.org>. (hranice štátu, krajov a okresov SR)
- Gidden, M. J., Riahi, K., Smith, S. J., et al. (2019). Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6. *Geosci. Model Dev.* 12, 1443–1475. doi:10.5194/gmd-12-1443-2019. (harmonizované emisné trajektórie SSP)
- Grossiord, C. et al. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(5), 1260–1272. doi:10.1111/nph.16485.
- Hari, V., Rakovec, O., Markonis, Y., Hanel, M., Kumar, R. (2020). Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Sci. Rep.* 10, 12207. doi:10.1038/s41598-020-68872-9.
- Hawkins, E., Sutton, R. (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 90, 1095–1107. doi:10.1175/2009BAMS2607.1. (dekompozícia neistoty)
- Hlásny, T., König, L., Krokene, P., et al. (2021). Bark beetle outbreaks in Europe: state of knowledge and ways forward for management. *Current Forestry Reports* 7, 138–165. doi:10.1007/s40725-021-00142-x.
- Hochman, Z., Gobbett, D. L., Horan, H. (2017). Climate trends account for stalled wheat yields in Australia since 1990. *Global Change Biology* 23(5), 2071–2081. doi:10.1111/gcb.13604.
- Ionita, M., Nagavciuc, V., Kumar, R., Rakovec, O. (2020). On the curious case of the recent decade, mid-spring precipitation deficit in central Europe. *npj Clim. Atmos. Sci.* 3, 49. doi:10.1038/s41612-020-00153-8.
- IPCC (2021). Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC [Masson-Delmotte, V., et al. (eds.)]. Cambridge University Press.

(najmä kap. 11: Seneviratne, S. I., et al., Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate). doi:10.1017/9781009157896.

IPCC (2022). Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC [Pörtner, H.-O., et al. (eds.)]. Cambridge University Press. (kap. 13 Europe: Bednar-Fiedl, B., et al.). doi:10.1017/9781009325844.

Labudová, L., Ivanáková, G., Faško, P., Kajaba, P., Labuda, M. (2024). Changes in drought occurrence and intensity in the context of climate change in Slovakia. *Theoretical and Applied Climatology* 155(5), 4009– 4022. doi:10.1007/s00704-024-04864-3.

Leščešen, I., Bajtek, Z., Pekárová, P., Zhou, Q. (2026). Persistence of hydrological droughts in Slovakia: a Markov-chain analysis of multi-season river flow variability. *Frontiers in Water* 8, 1821327. doi:10.3389/frwa.2026.1821327.

Lindenlaub, L., Weigel, K., Hassler, B., Jones, C., Eyring, V. (2026). Characteristics of agricultural droughts in CMIP6 historical simulations and future projections. *Earth Syst. Dynam.* 17, 81–105. doi:10.5194/esd- 17-81-2026.

Lobell, D. B., Hammer, G. L., McLean, G., et al. (2013). The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nature Climate Change* 3, 497–501. doi:10.1038/nclimate1832.

Lobell, D. B., Schlenker, W., Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science* 333(6042), 616–620. doi:10.1126/science.1204531.

McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proc. 8th Conf. on Applied Climatology*, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., 179–184. (definícia SPI)

Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky. (2021). Vstupná správa: Dokument pre tvorbu Koncepcie vodnej politiky na roky 2021–2030 s výhľadom do roku 2050. MŽP SR.

Ministerstvo životného prostredia SR (2018). Stratégia adaptácie Slovenskej republiky na zmenu klímy – aktualizácia. MŽP SR, Bratislava.

Naumann, G., Cammalleri, C., Mentaschi, L., Feyen, L. (2021). Increased economic drought impacts in Europe with anthropogenic warming. *Nat. Clim. Change* 11, 485–491. doi:10.1038/s41558-021-01044-3.

Nistor, M.-M. (2019). Vulnerability of groundwater resources under climate change in the Pannonian basin. *Geo-spatial Information Science* 22(4), 345–358. doi:10.1080/10095020.2019.1613776.

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., et al. (2017). The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Glob. Environ. Change* 42, 169–180. doi:10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004. (naratívy SSP1–SSP5)

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., et al. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.* 9, 3461–3482. doi:10.5194/gmd-9-3461-2016. (definícia SSP scenárov)

Pekárová, P., a kol. (2025). Temporal variability of average and low flows in Slovak rivers: a 90-year perspective. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 60, 102560. doi:10.1016/j.ejrh.2025.102560.

Rakovec, O., Samaniego, L., Hari, V., et al. (2022). The 2018–2020 multi-year drought sets a new benchmark in Europe. *Earth's Future* 10(3), e2021EF002394. doi:10.1029/2021EF002394.

Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., et al. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications. *Glob. Environ. Change* 42, 153–168. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009. (naratívy SSP)

Rossi, L., Wens, M., De Moel, H., et al. (2023). European Drought Risk Atlas. JRC135215, Publications Office of the European Union, Luxembourg. doi:10.2760/608737.

Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., et al. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change* 7, 395–402. doi:10.1038/nclimate3303.

Seidl, R. et al. (2020). [úplnú citáciu doplniť – projekcia škôd lykožrútom smrekovým; odkaz v kap. 6.6.1].

Senf, C., Pflugmacher, D., Zhiqiang, Y., et al. (2018). Canopy mortality has doubled in Europe's temperate forests over the last three decades. *Nature Communications* 9, 4978. doi:10.1038/s41467-018-07539-6.

Šiška, B., Takáč, J. (2002). [agroklimatické podmienky a pestovateľské pásma SR — úplnú citáciu doplniť].

Sonny, F. Z., Moradian, S., Olbert, A. I. (2025). Hydrological drought projections across Europe under climate change. *npj Natural Hazards*. doi:10.1038/s44304-025-00152-w.

Stanzel, P., Kling, H. (2018). From ENSEMBLES to Euro-CORDEX: evolving climate change projections for Upper Danube River flow. *Journal of Hydrology* 563, 987–999. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.06.057.

Sutanto, S. J., Duku, C., Güllveren, M., Dankers, R., Paparrizos, S. (2025). Future intensification of compound and consecutive drought and heatwave risks in Europe. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 25, 3879– 3895. doi:10.5194/nhess-25-3879-2025.

Trenčiansky, M., Bálíková, K., Štěrbová, M., Šálka, J. (2025). Current Issues and Challenges in Slovak Water Reservoir Management. *Water* 17(17), 2521. doi:10.3390/w17172521.

Trnka, M., a kol. (2022). [zabezpečenosť odberov pitnej vody z vodárenských nádrží v ČR — úplnú citáciu doplniť].

UNIAG (2023). Stav závlhovej a odvodňovacej infraštruktúry SR (Hydromeliorácie, š. p.). [sivá literatúra].

Van Wagner, C. E. (1987). Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. *Forestry Technical Report 35*, Canadian Forestry Service, Ottawa. (FWI / požiarné počasie)

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *J. Climate* 23, 1696–1718. doi:10.1175/2009JCLI2909.1.

Vitali, V., Büntgen, U., Bauhus, J. (2017). Silver fir and Douglas fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in south-western Germany. *Global Change Biology* 23(12), 5108–5119. doi:10.1111/gcb.13774.

WaterDiplomat (2025). Water over gold: preserving the future of Central Europe's largest groundwater reserve (Žitný ostrov). waterdiplomat.org.

Webber, H., Ewert, F., Olesen, J. E., et al. (2018). Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe. *Nature Communications* 9, 4249. doi:10.1038/s41467-018-06525-2.

Wermelinger, B. (2004). Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* — a review. *Forest Ecology and Management* 202(1–3), 67–82. doi:10.1016/j.foreco.2004.07.018.

Wilhite, D. A., Glantz, M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International* 10(3), 111–120. doi:10.1080/02508068508686328. (taxonómia a definícia sucha)

WMO & GWP (2016). Handbook of Drought Indicators and Indices [Svoboda, M., Fuchs, B. A.]. Integrated Drought Management Programme, Tools and Guidelines Series 2, WMO-No. 1173, Ženeva.

Znachor, P., Kosour, D., Rederer, L., et al. (2025). Tracking reservoir warming in a changing climate: a 31- year study from Czechia. *Ecohydrology & Hydrobiology*. doi:10.1016/j.ecohyd.2025.100097.

Zscheischler, J., Westra, S., van den Hurk, B. J. J. M., et al. (2018). Future climate risk from compound events. *Nat. Clim. Change* 8, 469–477. doi:10.1038/s41558-018-0156-3. (rámec zložených udalostí)

Dátové a metodické podklady

Copernicus Climate Change Service (C3S) & WMO (2025). European State of the Climate 2024. ECMWF/Copernicus. <https://climate.copernicus.eu/esotc/2024>.

Copernicus European Drought Observatory (EDO) / Global Drought Observatory, JRC: indikátory SPI, Soil Moisture Anomaly (SMA), Combined Drought Indicator (CDI), fAPAR anomaly. European Commission, Joint Research Centre. <https://edo.jrc.ec.europa.eu>.

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. *J. Geophys. Res. Atmos.* 123, 9391–9409. doi:10.1029/2017JD028200. (E-OBS, ECA&D/Copernicus)

European Space Agency, Sinergise (2021). Copernicus Global Digital Elevation Model (Copernicus DEM, GLO-30). Distribúcia OpenTopography / Copernicus. (reliéf, hillshade)

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., et al. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* 9, 1937–1958. doi:10.5194/gmd-9-1937-2016.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049. doi:10.1002/qj.3803.

Hersbach, H., et al. (2023). ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi:10.24381/cds.adbb2d47. (dátová citácia ERA5)

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., et al. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Change* 14, 563–578. doi:10.1007/s10113-013-0499-2.

Maraun, D. (2016). Bias correcting climate change simulations – a critical review. *Curr. Clim. Change Rep.* 2, 211–220. doi:10.1007/s40641-016-0050-x.

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., et al. (2021). ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data* 13, 4349–4383. doi:10.5194/essd-13-4349-2021. (dátová citácia: CDS doi:10.24381/cds.e2161bac)

Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ): Klimatické scenáre pre Slovensko (regionálne modely EURO-CORDEX, scenáre RCP). <https://www.shmu.sk/sk/?page=1069>. (porovnávací zdroj, kap. 4b)

Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ): operatívne staničné meteorologické a hydrologické dáta (KMIS; vodomerné stanice). Bratislava.

Thiemig, V., Gomes, G. N., Skøien, J. O., et al. (2022). EMO-5/EMO-1arcmin: high-resolution gridded meteorological dataset for Europe. *Earth Syst. Sci. Data* 14, 3249–3272. [JRC/CEMS-EFAS forcingy; verziu a presnú citáciu overiť]

Tilloy, A., Paprotny, D., Grimaldi, S., et al. (2025). HERA: a high-resolution pan-European hydrological reanalysis (1950–2020). *Earth Syst. Sci. Data*. [JRC; presné údaje vydania overiť pri finalizácii]

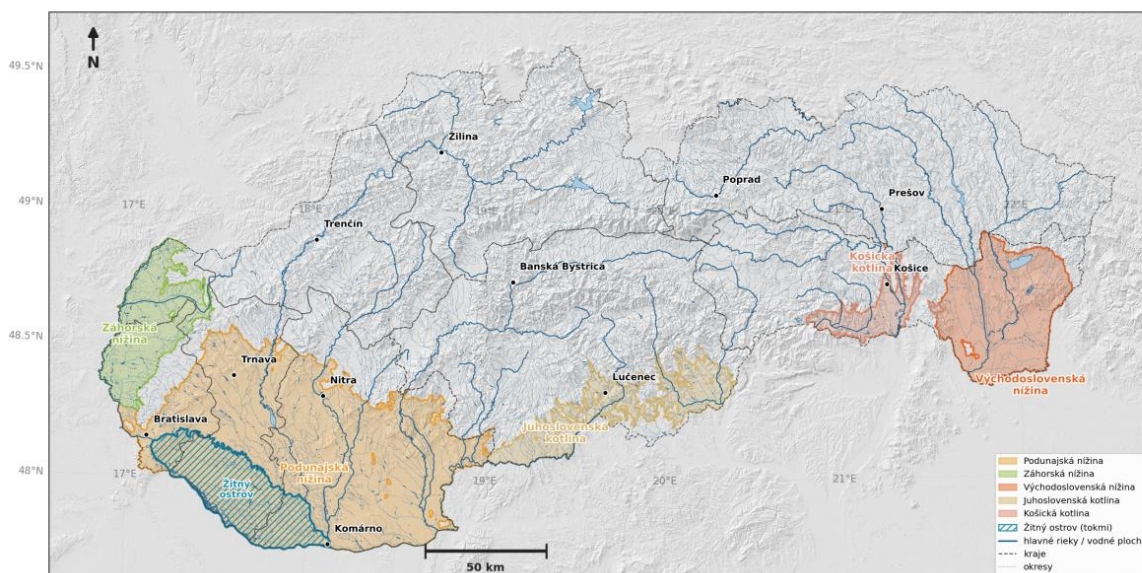
Príloha — Obrazová príloha

Súbor kľúčových obrázkov a máp k jednotlivým kapitolám štúdie. Priestorové výstupy: 20-členný CMIP6 ansámbl bias- korigovaný a downscalovaný na 1 km, baseline 1991–2020; regionálne projekcie z 0,1° per-model ansámblu (model- spread). Spracovanie: J. Pecho, V. Rattayová.

Ku kapitole 1 — Stručné zhrnutie

Slovensko — nížinné regióny vymedzené reliéfom (≤ 250 m n. m.)

Fyzickogeografický rámec štúdie o suchu · Žitný ostrov vymedzený tokmi (Malý Dunaj, Váh, Dunaj)



Obr. 1 Fyzickogeografický rámec štúdie — nížinné regióny SR a Žitný ostrov (reliéf, rieky, okresy).

Ku kapitole 2 — Úvod

Kaskáda sucha — od deficitu zrážok po dopady

Sucho sa šíri systémom s rastúcim časovým oneskorením

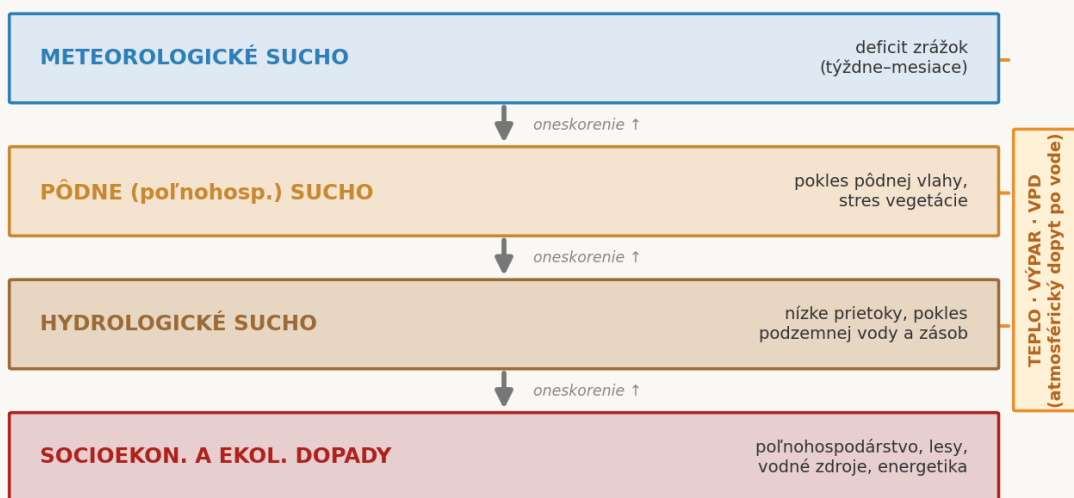
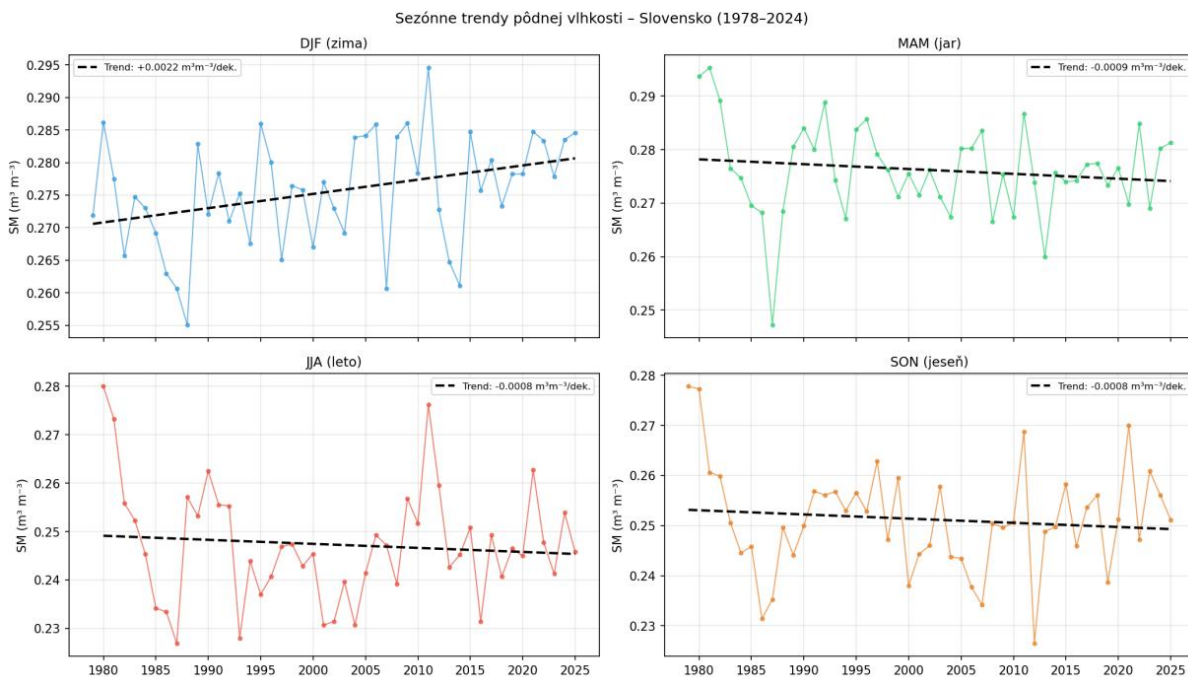


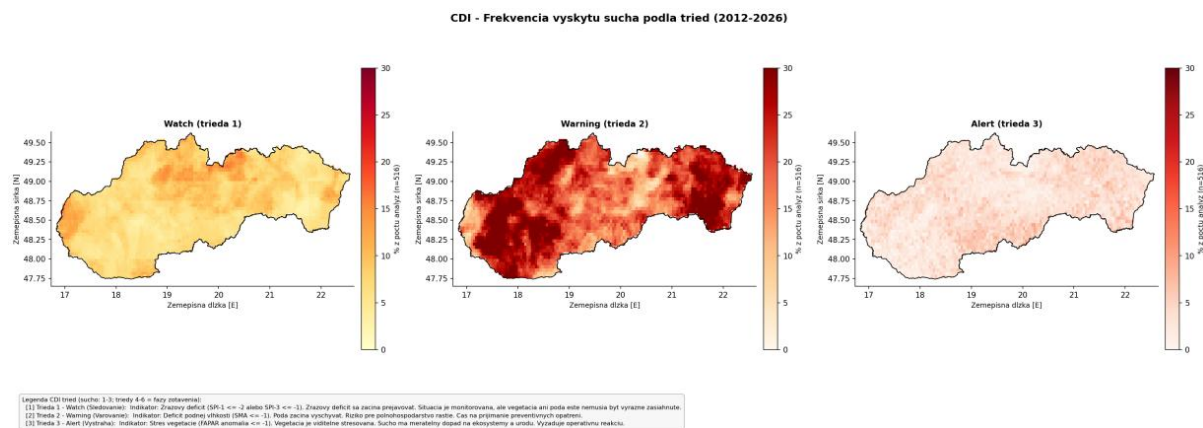
Schéma: J. Pecho · klasifikácia sucha podľa Wilhite & Glantz (1985), rozšírená o atmosférický dopyt (VPD)

Obr. 2 Kaskáda sucha — od deficitu zrážok cez pôdu a prietoky po dopady.

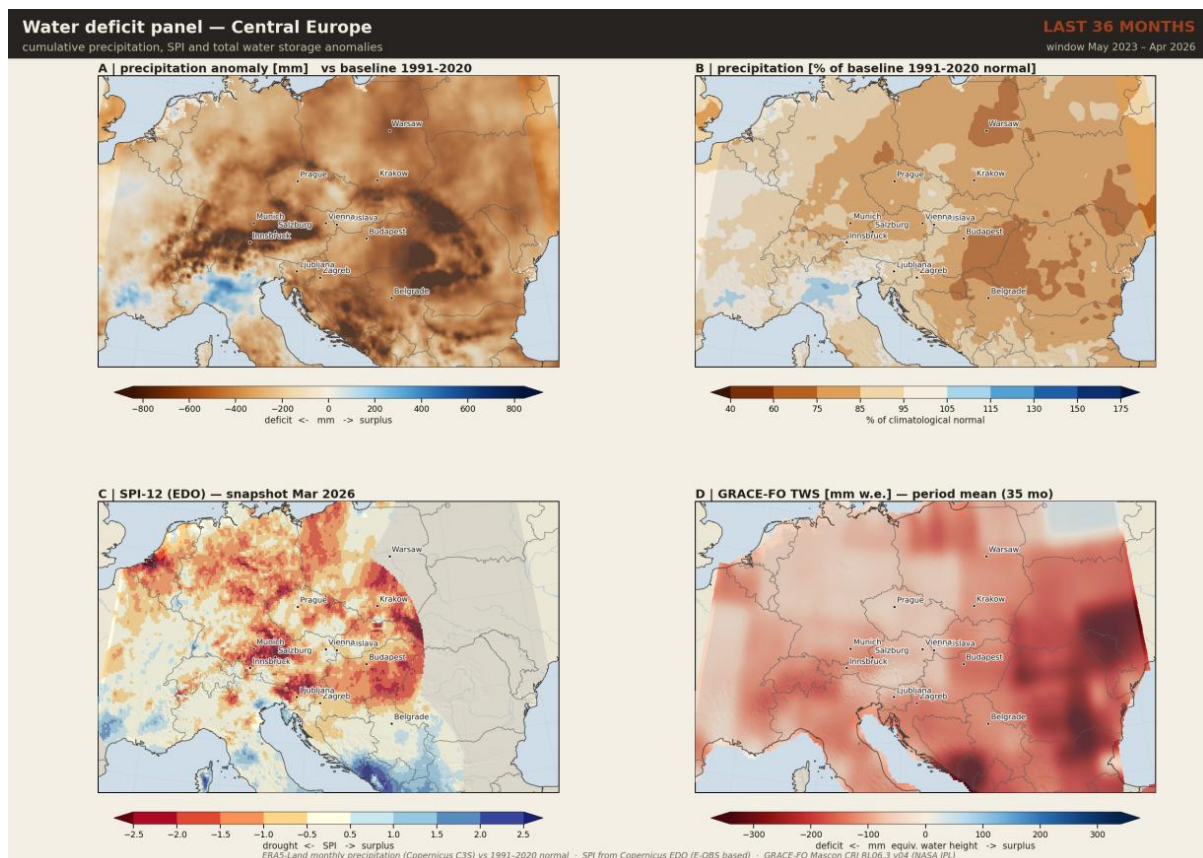
Ku kapitole 3 — Sucho na Slovensku dnes



Obr. 3 Sezónne trendy pôdnej vlhkosti, Slovensko 1978–2024 (ESA CCI).

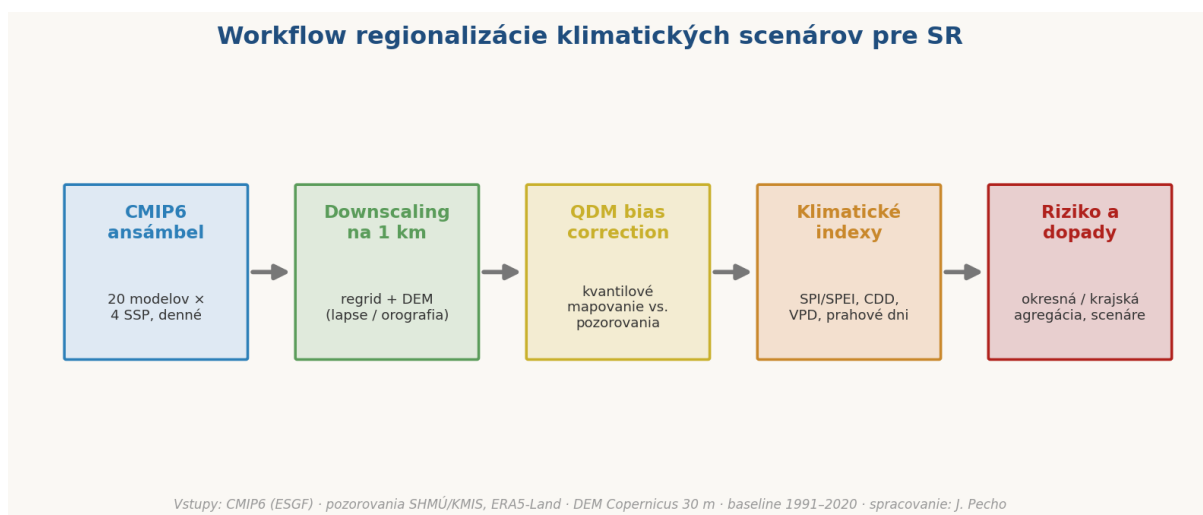


Obr. 4 Frekvencia výskytu sucha podľa kombinovaného indexu (CDI), 2012-2024.

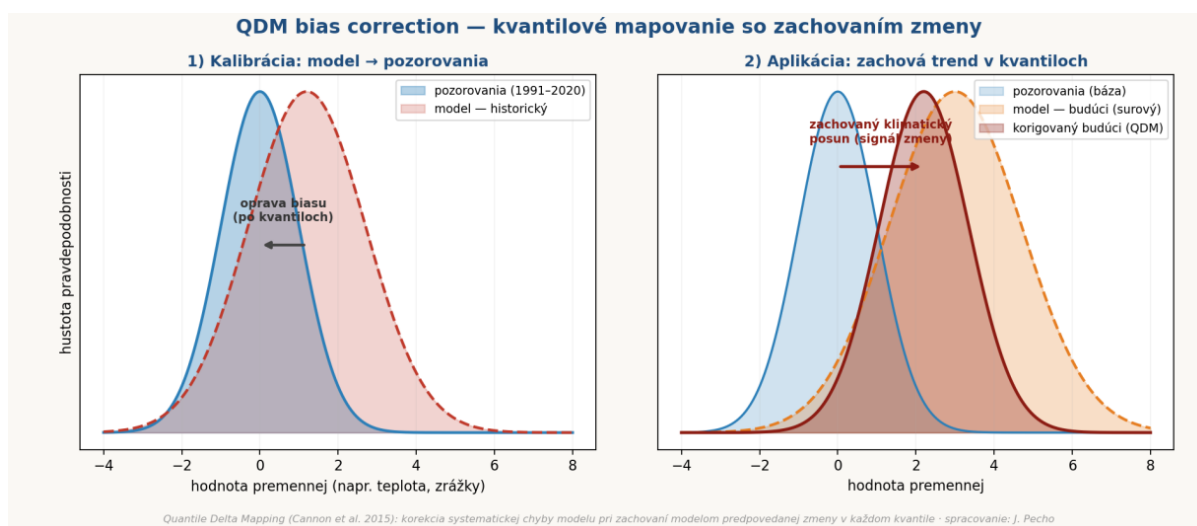


Obr. 5 Vodný deficit strednej Európy za posledných 36 mesiacov.

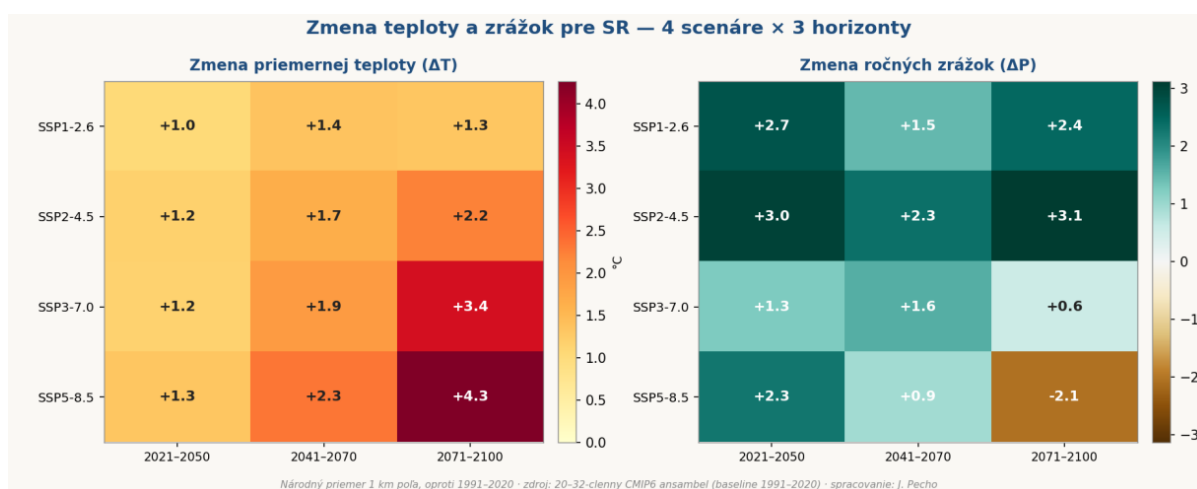
Ku kapitole 4 — Klimatické modely a scenáre SSP



Obr. 6 Workflow regionalizácie: CMIP6 → downscaling 1 km → QDM korekcia → indexy → riziko.



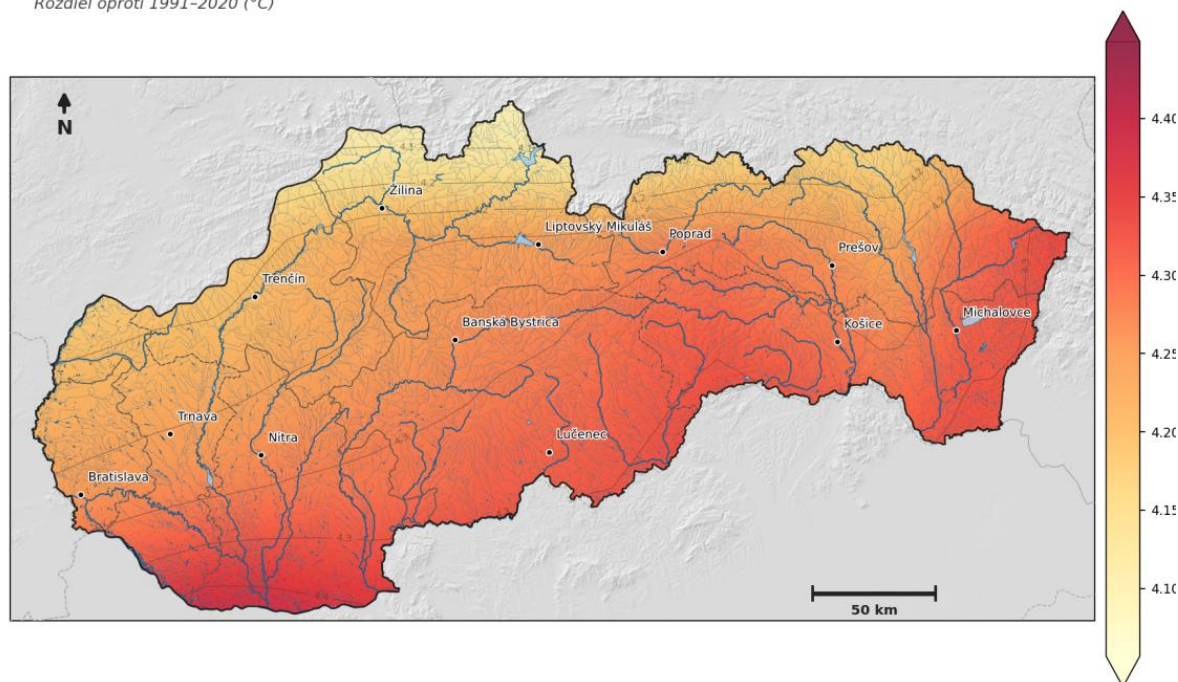
Obr. 7 Korekcia systematickej chyby modelov metódou Quantile Delta Mapping (QDM).



Obr. 8 Zmena teploty a zrážok pre SR — matica 4 scenáre × 3 horizonty.

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

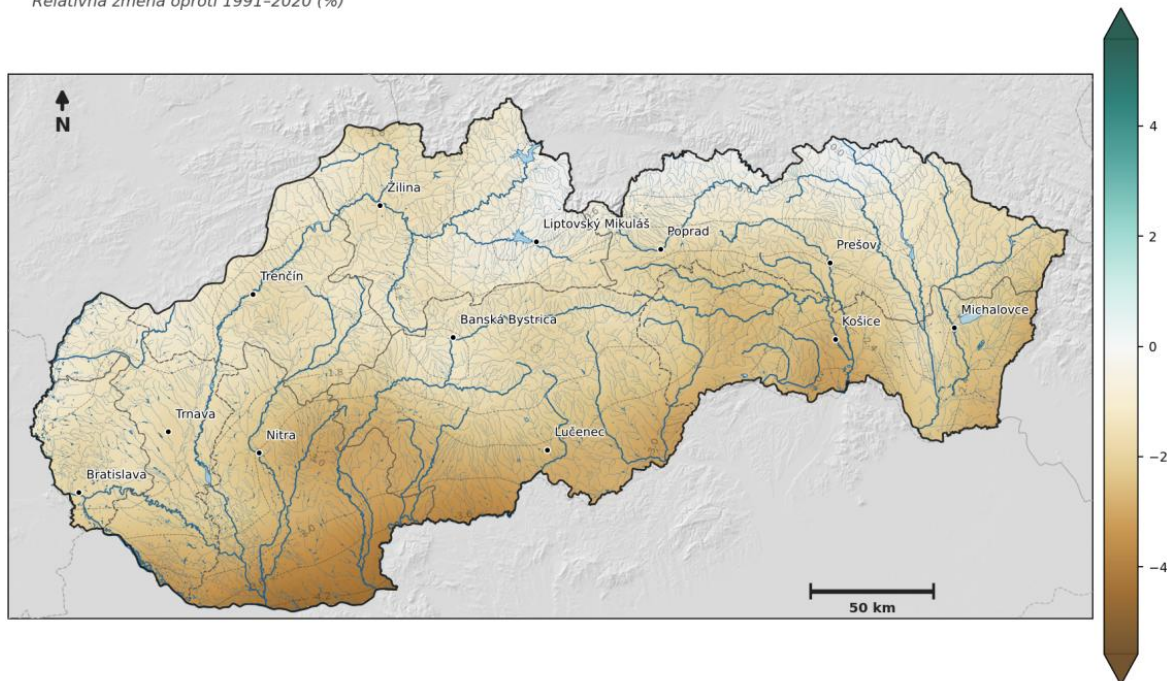
Rozdiel oproti 1991-2020 ($^{\circ}\text{C}$)



Obr. 9 Priestorová zmena priemernej ročnej teploty — SSP5-8.5, 2071-2100.

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

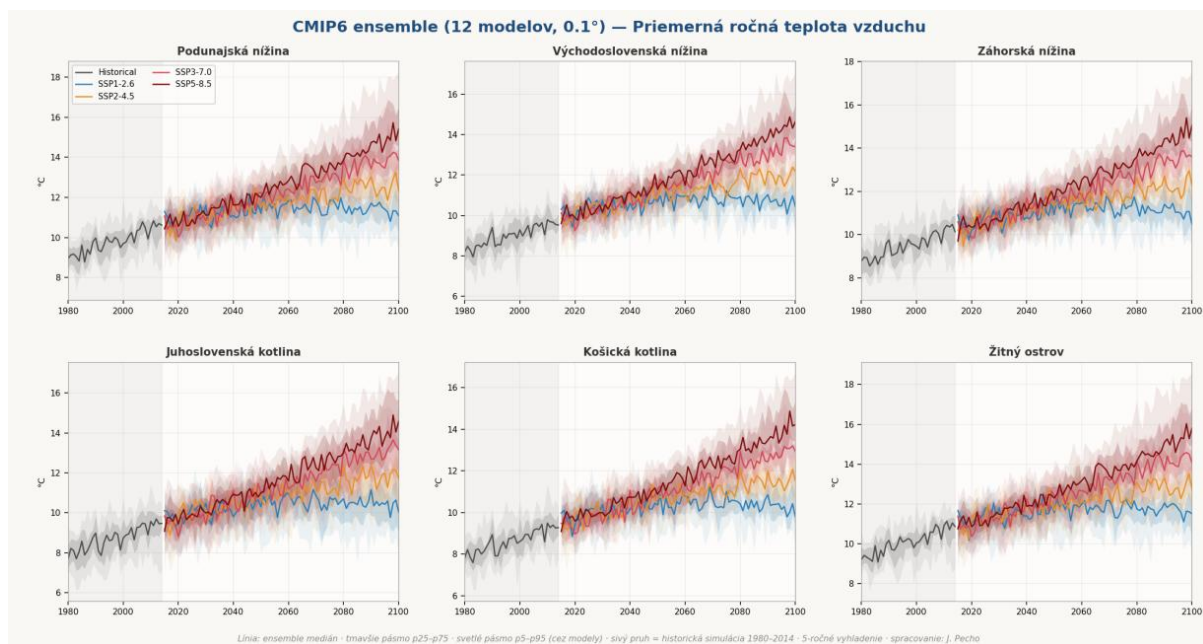
Relatívna zmena oproti 1991-2020 (%)



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

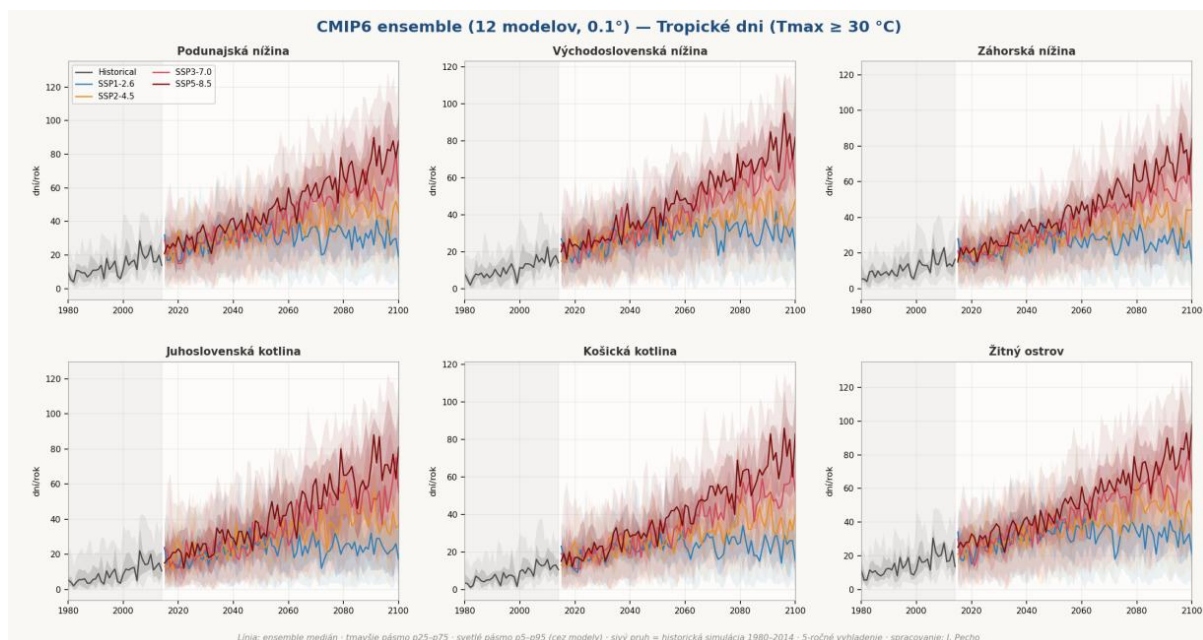
Obr. 10 Relatívna zmena ročného úhrnu zrážok — SSP5-8.5, 2071-2100.

Ku kapitole 5 — Budúce sucho na Slovensku

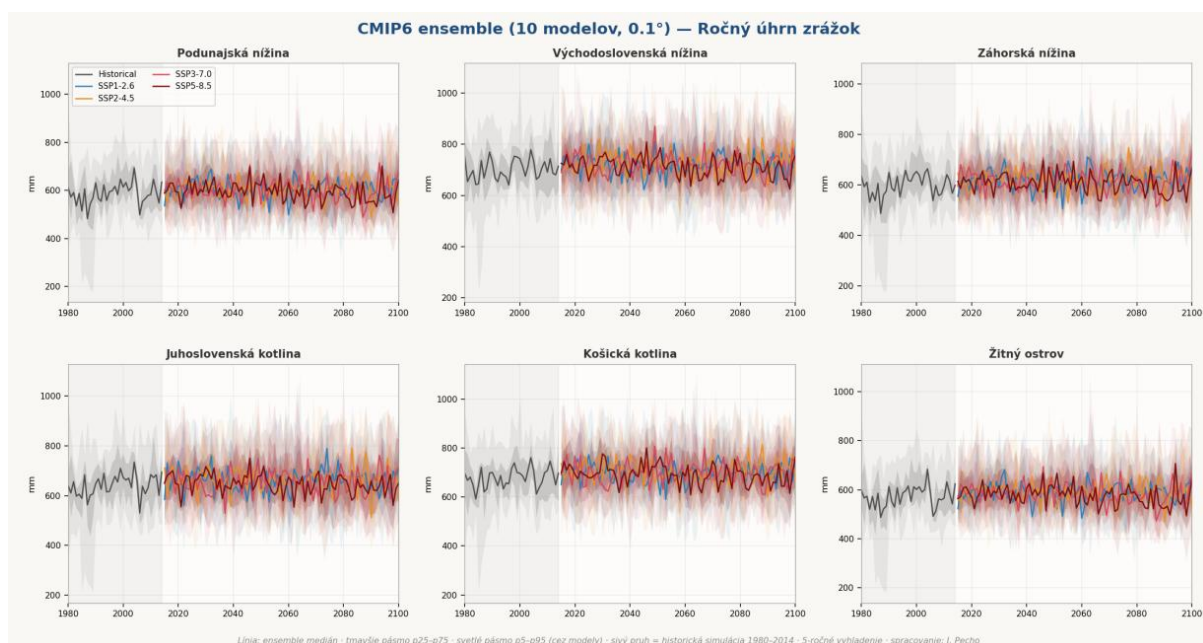


Linia: ensemble medián · tmavšie pásmo p25-p75 · svetlé pásmo p5-p95 (cez modely) · sivý pruh = historická simulácia 1980-2014 · 5-ročné vyhladenie · spracovanie: J. Pecho

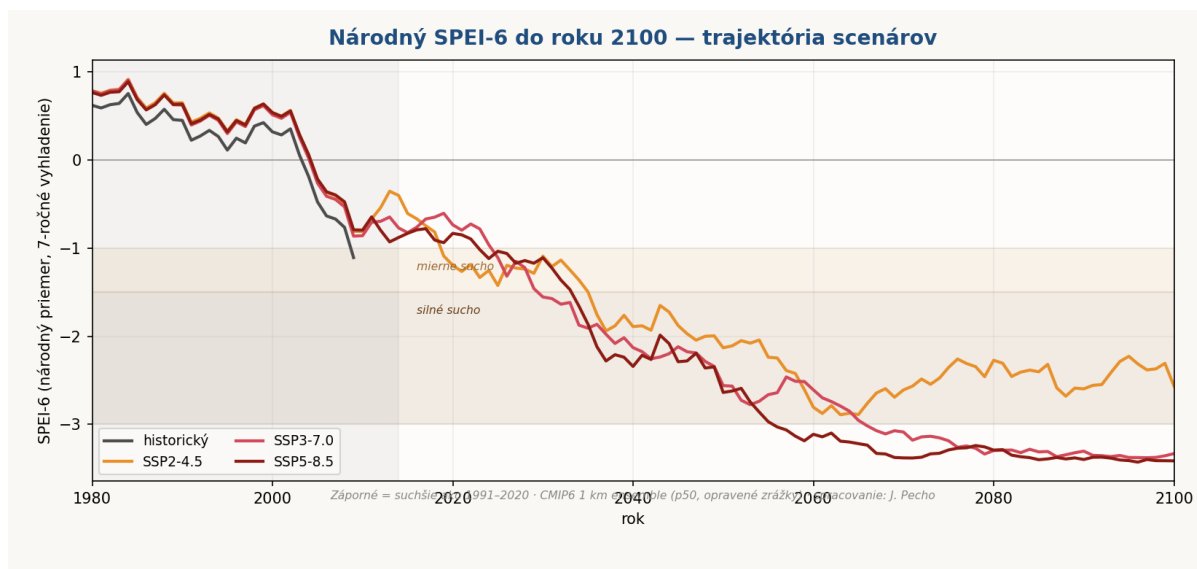
Obr. 11 Priemerná ročná teplota — 6 referenčných regiónov (CMIP6 ensemble, model-spread).



Obr. 12 Tropické dni ($T_{max} \geq 30\text{ °C}$) — 6 referenčných regiónov.

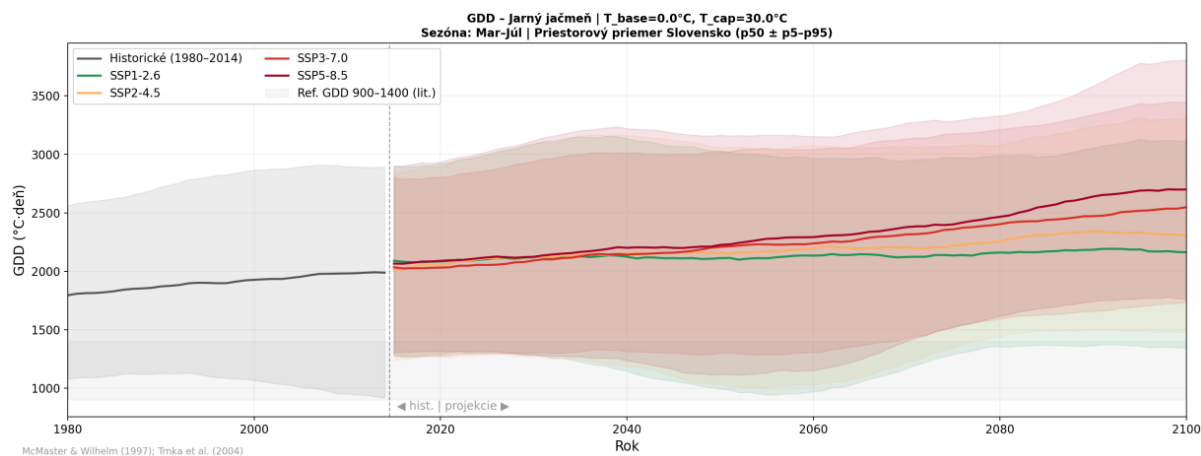


Obr. 13 Ročný úhrn zrážok — 6 referenčných regiónov.



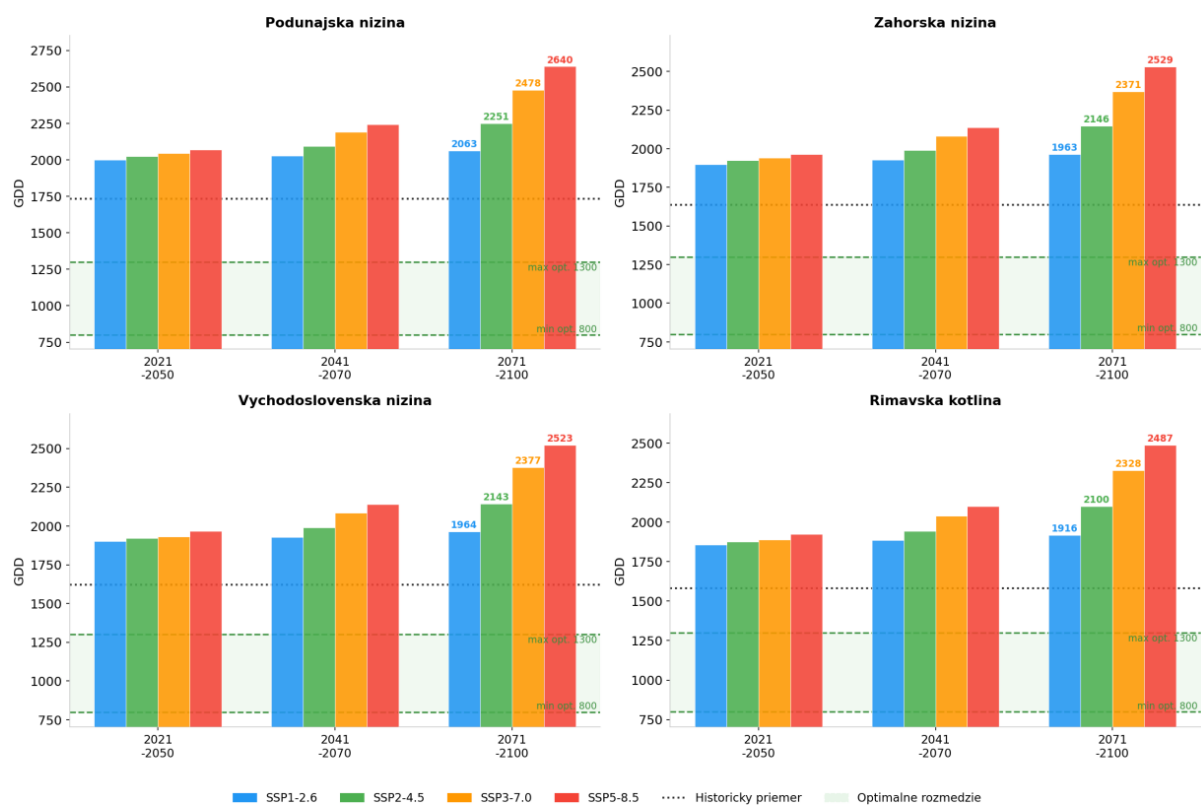
Obr. 14 Národná trajektória SPEI-6 do roku 2100 podľa scenárov.

Ku kapitole 6 — Dopady na poľnohospodárstvo a lesníctvo



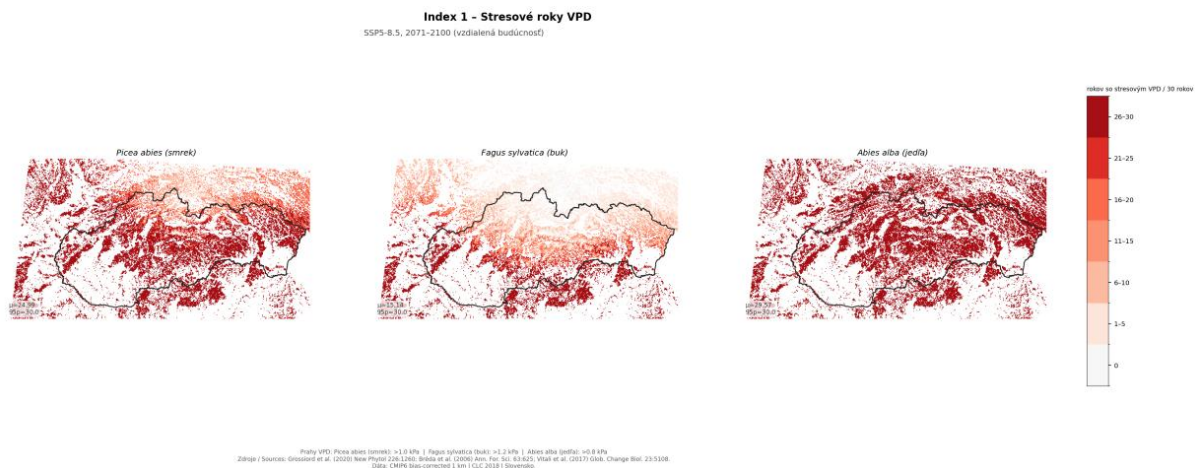
Obr. 15 Tepelná dotácia (GDD) pre jarný jačmeň, 1980-2100.

Zemiaky | GDD podľa klimatických scenárov v nížinách Slovenska



Graf zobrazuje priemerné ročné tepelné jednotky (GDD) pre zemiaky v štyroch nížinách Slovenska pre tri budúce obdobia a štyri klimatické scenáre (SSP1-2.6 = nízke emisie, SSP5-8.5 = vysoké emisie). Čierkována čara = historický priemer 1980-2014. Zelený pas = optimálne rozmedzie pre túto plodinu (800-1300 GDD). Čísla nad prúžmi (obdobie 2071-2100) ukazujú očakávanú hodnotu GDD.

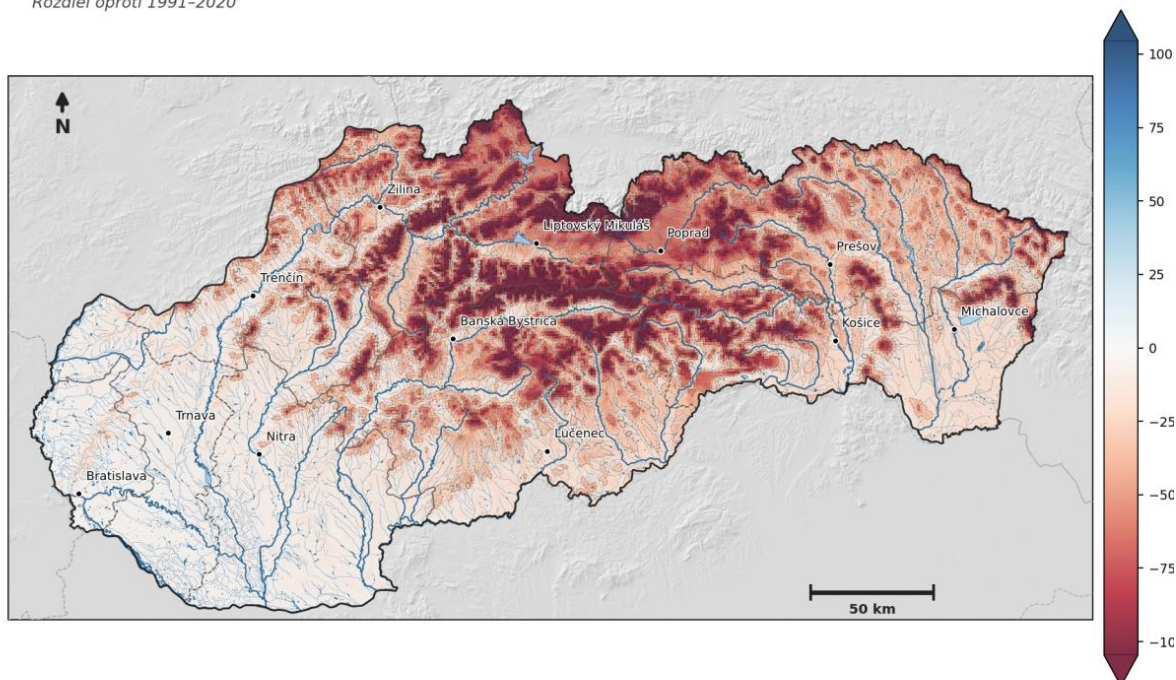
Obr. 16 Vhodnosť pestovania zemiakov (GDD) v nížinách SR podľa scenárov.



Obr. 17 Stresové roky z deficitu vodnej pary (VPD) pre kľúčové dreviny (SSP5-8.5).

Ku kapitole 7 — Dostupnosť vody pre obyvateľov

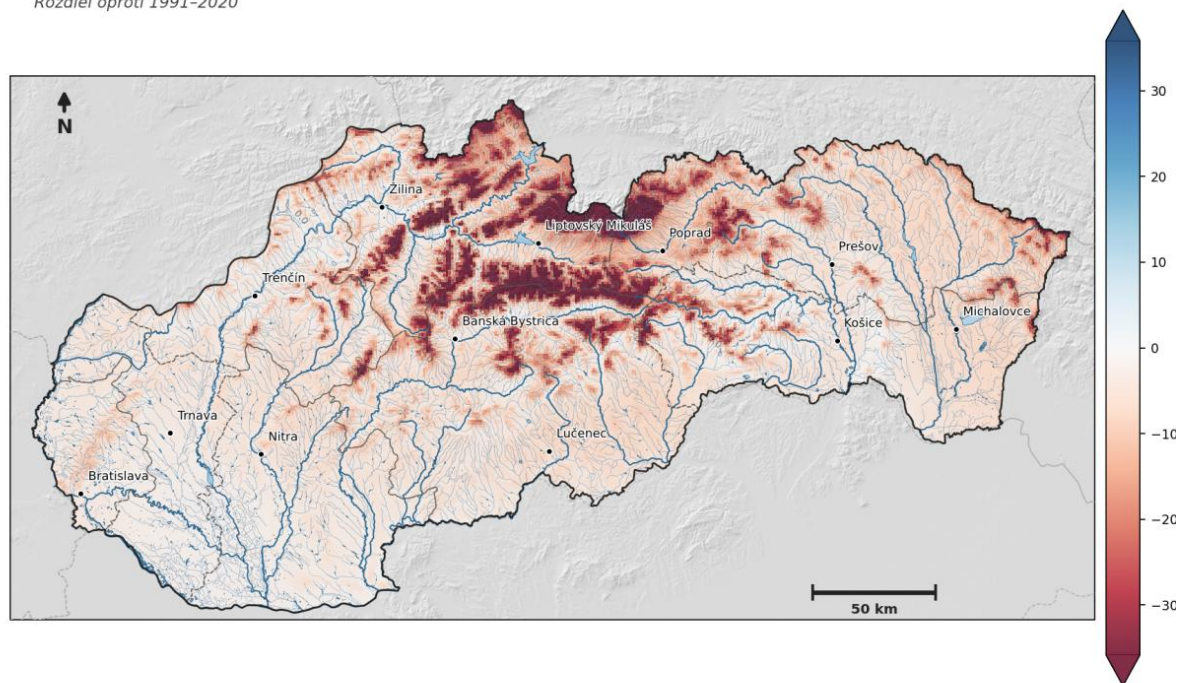
Zmena — Snehová vodná hodnota (zima DJF) · SSP5-8.5, 2071-2100
Rozdiel oproti 1991-2020



Obr. 18 Zmena zimnej snehovej vodnej hodnoty (SWE, SSP5-8.5, 2071-2100).

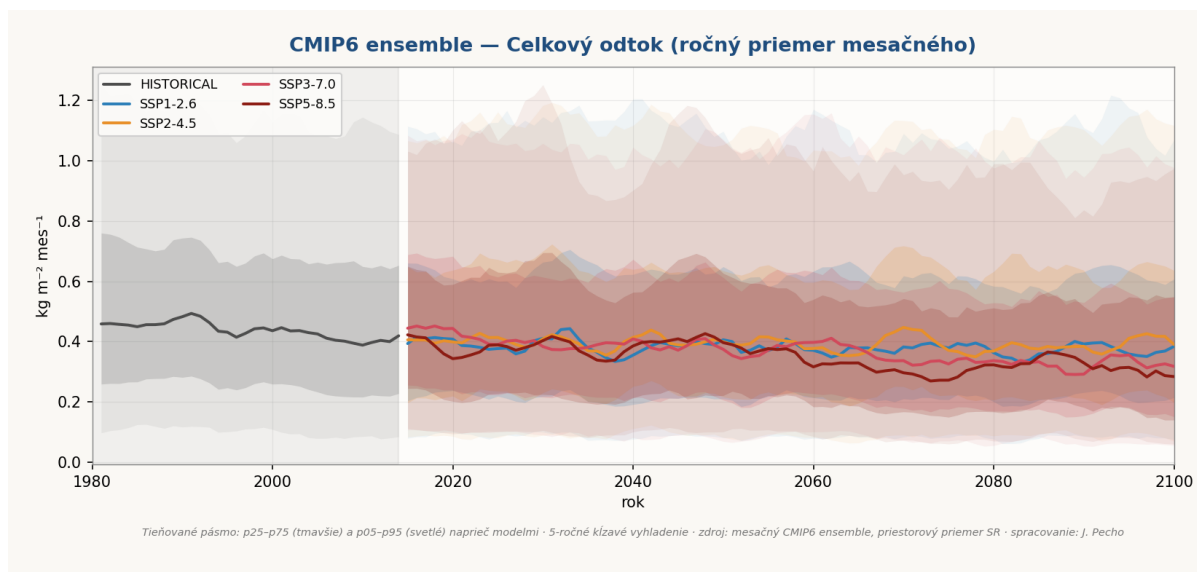
Zmena — Ročný odtok · SSP5-8.5, 2071-2100

Rozdiel oproti 1991-2020



CMIP6 1 km (snow_wb degree-day + bucket; opravené zrážky) - spracovanie: J. Pecho

Obr. 19 Zmena ročného odtoku (SSP5-8.5, 2071-2100).

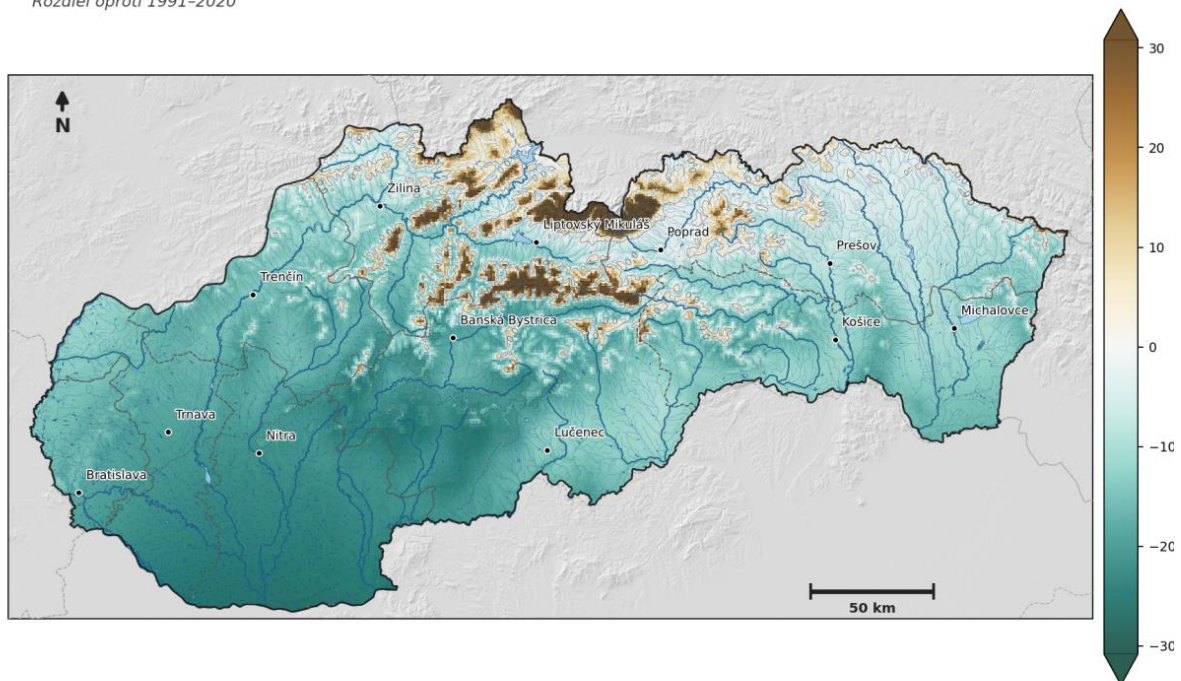


Obr. 20 Celkový odtok — ansámblová projekcia do roku 2100.

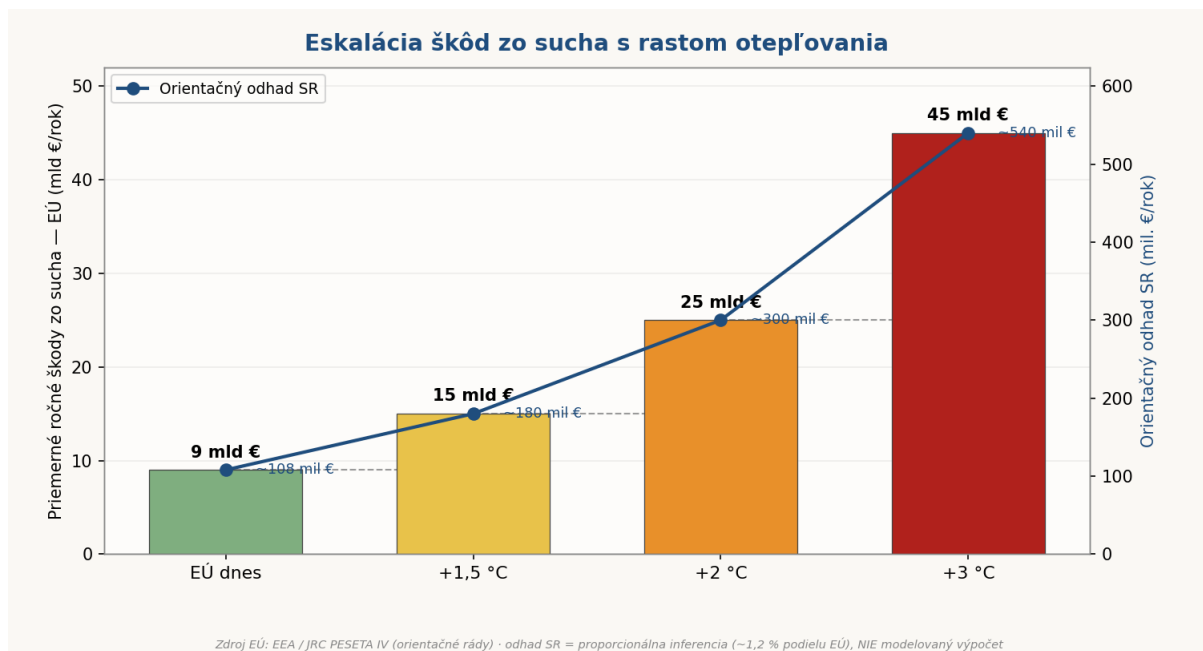
Ku kapitole 8 a Záveru

Zmena — Skutočná evapotranspirácia (AET) · SSP5-8.5, 2071-2100

Rozdiel oproti 1991-2020



Obr. 21 Zmena skutočnej evapotranspirácie (AET, SSP5-8.5, 2071-2100).



Obr. 22 Eskalácia škôd zo sucha s rastom otepľovania (EÚ, orientačný odhad SR).

Zoznam použitých indexov a skratiek

Teplotné indexy

SU25	Letné dni	počet dní s dennou maximálnou teplotou $T_{max} \geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$
HD30	Tropické dni	počet dní s $T_{max} \geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$
TR20	Tropické noci	počet nocí s dennou minimálnou teplotou $T_{min} \geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
FD	Mrazové dni	počet dní s $T_{min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
FTC	Cykly mrznutia/topenia	počet dní s $T_{min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zároveň $T_{max} > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
HWDI	Heat Wave Duration Index	najdlhšia súvislá vlna horúčav za rok (dni)
GDD10	Growing Degree Days	suma aktívnych teplôt nad bázou $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($^{\circ}\text{C-deň}$)
CDD18	Cooling Degree Days	suma stupňodní nad $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (potreba chladenia)
HDD18	Heating Degree Days	suma stupňodní pod $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (potreba vykurovania)

Zrážkové indexy

PRCPTOT	Ročný úhrn zrážok	celkový ročný úhrn zrážok (mm)
Rx1day	Max. 1-denný úhrn	maximálny denný úhrn zrážok za rok (mm)
Rx3day	Max. 3-denný úhrn	maximálny 3-denný úhrn zrážok za rok (mm)
R20mm	Dni s výdatnými zrážkami	počet dní s úhrnom $\geq 20\text{ mm}$
CDD	Suché obdobie (Consecutive Dry Days)	najdlhší súvislý rad dní so zrážkami $< 1\text{ mm}$ (dni)
SDII	Intenzita zrážok	priemerný úhrn na daždivý deň (mm/deň)

Suchové a vodobilančné indexy

SPI	Standardized Precipitation Index	štandardizovaný zrážkový index (sucho z deficitu zrážok)
SPEI	Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index	štandardizovaný index zrážok a výparu; číslo (1/3/6/12) = časové okno v mesiacoch
PET	Potenciálna evapotranspirácia	klimatický dopyt po vode (mm)
AET	Skutočná evapotranspirácia	reálny výpar limitovaný dostupnosťou vody (mm)
AI	Index suchosti klímy (Aridity Index)	pomer zrážok k potenciálnej evapotranspirácii (P/PET)
VPD	Deficit tlaku vodných pár	„smäd atmosféry“ — atmosférický dopyt po vode (kPa)
SWE	Snehová vodná hodnota	vodný ekvivalent snehovej pokrývky (mm)
SMA	Anomália pôdnej vlhky	odchýlka pôdnej vlhkosti od normálu
CDI	Kombinovaný index sucha	operatívny indikátor sucha (SHMÚ, od r. 2012)

Všeobecné skratky

CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project, fáza 6	medzinárodný súbor klimatických modelov
SSP	Shared Socio-economic Pathway	spoločná socio-ekonomická cesta (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)
GCM	Global Climate Model	globálny klimatický model
ESM	Earth System Model	model zemského systému
QDM	Quantile Delta Mapping	kvantilová metóda korekcie systematickej chyby modelov
DEM	Digital Elevation Model	digitálny model reliéfu
ERA5 / ERA5-Land	reanalýza ECMWF	referenčné pozorovania/reanalýzne polia

DJF / MAM / JJA / SON	sezóny	zima / jar / leto / jeseň
IPCC AR6	6. hodnotiaca správa IPCC	vedecký referenčný rámec



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)

Mgr. Jozef Pecho · Ing. Viera Rattayová, PhD.

www.regioclim.eu · jún 2026