Správa z výskumného testu týkajúceho sa povodňového ohrozenia prostredníctvom modelovania pre okres Spišská Nová Ves

Odborný dohľad:

Dr hab. Michał Habel

1. *Výskumný plán obsahujúci priebeh výskumu s rozdelením na terénne a laboratórne práce spolu s uvedením jednotlivých krokov výskumných prác*

Terénne práce

- identifikácia údolných oblastí v teréne,
- identifikácia zón depresií antropogénneho pôvodu v teréne,
- identifikácia zón a bodov, ktoré boli v minulosti zaplavované počas povodní,
- vymedzenie hraníc, v ktorých sa vykoná analýza povodňového ohrozenia.

Laboratórne práce

- načítanie a usporiadanie dendrochronologického časového radu indexu odozvy (response index, RI), vypočítaného ako (počet signálov / počet vzoriek) × 100 %, ktorý predstavuje proxy relatívnej magnitúdy povodňových prietokov.
- štatistická charakteristika historických údajov vrátane výpočtu priemeru, mediánu, rozsahu, smerodajnej odchýlky, kvantilov a frekvencie prekročenia vybraných prahov RI.
- preskúmanie dlhodobých zmien radu pomocou analýzy lineárneho trendu a neparametrického Mannovho–Kendallovho testu, ako aj posúdenie autokorelácie údajov.

- analýza výskytu rokov s vysokými hodnotami RI ako potenciálnych rokov silných povodňových prietokov a variability frekvencie takýchto udalostí v období zahrnutom do rekonštrukcie.
- na základe publikovaných klimatických projekcií pre Slovensko, Karpaty a strednú Európu prijatie scenárov zmien intenzity extrémnych zrážok v jednotlivých častiach 21. storočia.
- vytvorenie stochastického modelu Monte Carlo, v ktorom sa historické rozdelenie RI opakovane náhodne vzorkovalo a modifikovalo podľa prijatých scenárov budúceho klimatického pôsobenia.
- pre obdobia 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 a 2081–2100 výpočet prognózovaných hodnôt RI, intervalov neistoty a frekvencie prekročenia prahov reprezentujúcich silnejšie povodňové udalosti.
- porovnanie výsledkov scenárov s historickými podmienkami, posúdenie smeru a rozsahu možných zmien výskytu povodní a prezentácia výsledkov v tabuľkách a grafoch spolu s interpretáciou ich neistoty.

2. *Opis priebehu výskumných prác so zohľadnením teoretických východísk, opisu metódy, prípadného odberu vzoriek v teréne a jednotlivých krokov laboratórnych prác.*

Teoretické východiská

Cieľom analýzy je kvantitatívne odhadnúť možný priebeh zmien výskytu vysokých povodňových prietokov a povodní v 21. storočí v malom horskom povodí v oblasti Spišskej Novej Vsi. Východiskom je ročný dendrochronologický záznam, nie prístrojový rad prietokov alebo vodných stavov. Z tohto dôvodu sa prognóza týka zmien relatívnej magnitúdy a frekvencie rokov s vysokým povodňovým signálom, a nie priamych hodnôt Qmax v m^3/s alebo Hmax v cm. Toto rozlíšenie je zásadné: RI opisuje podiel stromov vykazujúcich reakciu pripísanú hydrologickej udalosti a je obmedzený okrem iného veľkosťou vzorky, citlivosťou stromov a tafonomickými procesmi. Model by preto nemal proxy ukazovateľu prisudzovať falošnú hydrometrickú presnosť.

Analýza zahŕňa charakteristiku rozdelenia a variability radu 1978–2025, testy trendu a zmeny režimu, posúdenie autokorelácie, definovanie prahov vysokého RI a následne stochastické projekcie pre obdobia 2026–2040, 2041–2060, 2061–2080 a 2081–2100. Tri modelové dráhy sa považujú za analógie nízkeho, stredného a vysokého klimatického pôsobenia. Nejde o priamy downscaling jedného gridu CMIP6 pre skúmaný bod, ale o pravdepodobnostný prevod rozsahu zmien extrémnych zrážok uvádzaných pre Karpaty a strednú Európu.

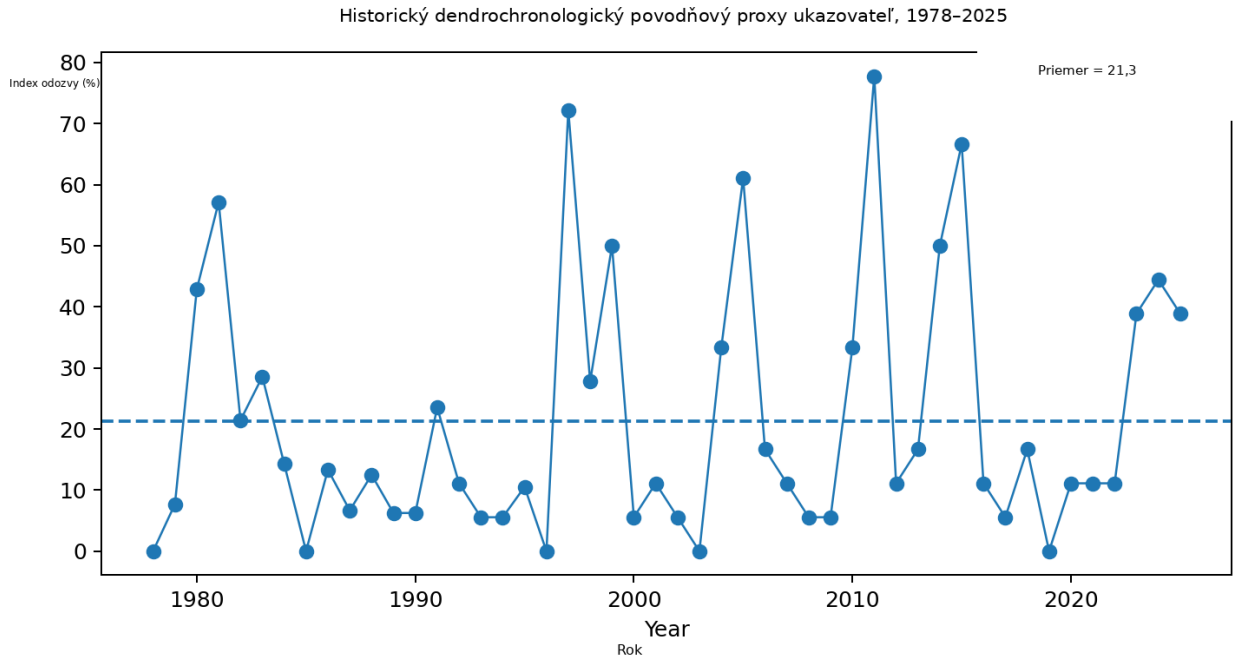
Východiskovým materiálom pre rekonštrukciu boli korene živých ihličnatých stromov odkryté v dôsledku erózie pôdneho krytu a sedimentov v zóne pôsobenia povodňových prietokov. V dendrogeomorfológii sa okamih prvého odkrytia koreňa datuje na základe zmien v po sebe nasledujúcich ročných prírastkoch, pretože prechod koreňa z pôdneho prostredia do povrchových podmienok mení mechanické, teplotné a vlhkostné podmienky. Rozvoj anatomických analýz umožnil určovať rok prvej expozície s vysokou presnosťou (Gärtner, 2007; Bodoque et al., 2005). Pri koreňoch borovice lesnej sa po odkrytí pozorovala okrem iného zmena šírky prírastku a počtu buniek, zvýšenie podielu neskorého dreva, zmena priemeru lúmenu tracheíd skorého dreva a častejší výskyt živicových kanálikov (Rubiales et al., 2008).

V teréne sa vyberajú korene, ktorých geomorfologická poloha umožňuje spájať expozíciu s eróziou vyvolanou prúdením vody. Samotné odkrytie koreňa nie je automaticky dôkazom povodne, pretože môže byť výsledkom postupnej denudácie, svahovej erózie alebo sekundárneho rastu; interpretácia povodňovej udalosti preto vyžaduje súlad s eróznymi formami, sedimentmi a synchronizáciou reakcií viacerých koreňov. Z koreňov sa odoberajú priečne rezy alebo iné vzorky umožňujúce sledovať sekvenciu prírastkov. Po vysušení a vybrúsení sa vzorky datujú a podľa možnosti krížovo datujú s referenčnou chronológiou. Za

signálny rok sa považuje rok diagnostickej rastovej alebo anatomickej zmeny poukazujúcej na expozíciu alebo poškodenie koreňa eróznym procesom. Pritom treba kontrolovať možnosť chýbajúcich a falošných letokruhov a neistotu vyplývajúcu zo sezóny vzniku poškodenia (Gärtner, 2007; Rubiales et al., 2008).

Výsledky jednotlivých dátovaní boli prepočítané na ročný index odozvy (response index, RI), ktorý tvorí základ ďalšej štatistickej analýzy. Pre každý rok sa RI vypočíta podľa vzorca: RI = (počet signálov / počet vzoriek) × 100 %. Menovateľ zahŕňa vzorky dostupné na hodnotenie v danom roku a čitateľ tie, v ktorých bol identifikovaný erózny signál. RI = 0 % znamená absenciu zaznamenaných reakcií, zatiaľ čo rast RI poukazuje na väčšiu synchronizáciu odozvy koreňov. V tejto práci sa RI považuje za relatívny proxy ukazovateľ sily alebo priestorového rozsahu ročnej erózno-povodňovej udalosti, nie za priame meranie Hmax alebo Qmax. Testy trendu, analýza prahov a simulácie Monte Carlo sa preto týkajú variability a pravdepodobnosti vysokých hodnôt RI. Takýto postup umožňuje zachovať ročné rozlíšenie rekonštrukcie bez neopodstatneného prepočtu dendrochronologického proxy ukazovateľa na hydrometrické jednotky.

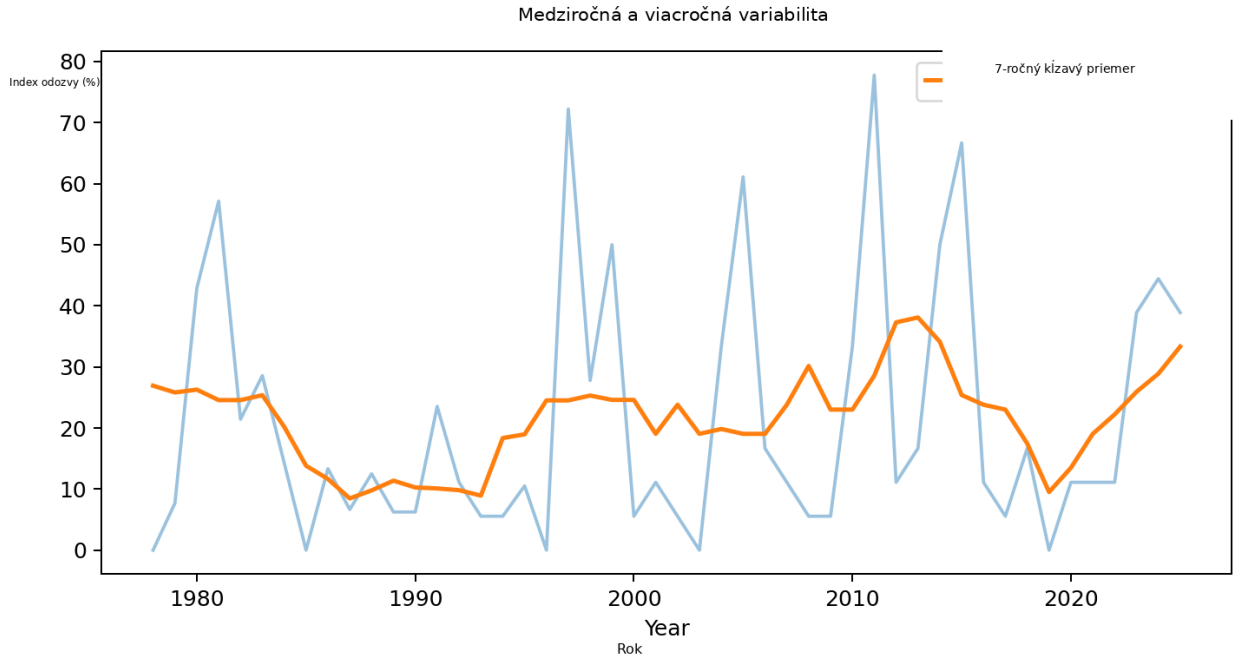
Vstupná tabuľka s hydrologickými údajmi obsahuje 48 ročných pozorovaní z rokov 1978 až 2025. Hodnoty RI sa pohybujú v rozsahu 0–77,78 %. Priemer (21,32 %) je takmer dvojnásobný oproti mediánu (11,11 %) a smerodajná odchýlka dosahuje 20,85 percentuálneho bodu. Dolný kvartil je 6,08 %, horný kvartil 33,33 %, 90. percentil 52,14 % a 95. percentil 64,72 %. Znamená to, že väčšina rokov sa vyznačuje nízkym alebo stredným signálom, zatiaľ čo malý počet rokov vytvára veľmi vysoké hodnoty. Takéto rozdelenie je typické pre extrémne procesy a odôvodňuje použitie metód odolných voči nenormalite a simulácií založených na empirickom rozdelení.



Obr. 1. Historický priebeh dendrochronologického ukazovateľa RI v rokoch 1978–2025.

Hodnoty RI≥30 % sa vyskytli v 13 zo 48 rokov (27,1 %), RI≥40 % v 9 rokoch (18,8 %), RI≥50 % v 7 rokoch (14,6 %) a RI≥60 % v 4 rokoch (8,3 %). Z hľadiska frekvencie to v priemere zodpovedá približne 2,71; 1,88; 1,46 a 0,83 roka za desaťročie. Ide o operačné prahy slúžiace na porovnanie budúcich simulácií s historickým záznamom; nemožno ich automaticky stotožňovať s formálnymi triedami hydrologických povodní.

Lineárna regresia ukazuje kladný sklon +0,232 percentuálneho bodu RI za rok, efekt však nie je štatisticky významný ($p=0,291$; $R^2=0,024$). Neparametrická Kendallova poradová korelácia dáva $\tau=0,091$, $p=0,372$ a Spearmanova korelácia $\rho=0,157$, $p=0,286$. Nevýznamnosť znamená, že na základe samotného radu 1978–2025 nemožno preukázať trvalý rast alebo pokles magnitúdy proxy ukazovateľa. Zároveň absencia historického trendu nie je dôkazom absencie budúcej zmeny: budúce klimatické pôsobenie môže presiahnuť rozsah pozorovaný počas krátkeho prístrojovo-dendrochronologického obdobia.



Obr. 2. Medziročná variabilita RI a 7-ročný kĺzavý priemer.

Autokorelácia prvého rádu je 0,225. Je kladná, ale mierna, pričom ďalšie oneskorenia sú malé a menia znamienko. Nie je teda dôvod modelovať silnú viacročnú pamäť procesu. Pettittov test označil najsilnejšieho kandidáta na bod zmeny okolo roku 2003, výsledok však nie je významný ($p=0,471$). Desaťročné priemery kolíšu od približne 15,6 % v rokoch 2000–2009 do 28,9 % v rokoch 2010–2019. Tieto fluktuácie ukazujú, že prirodzená viacdekádová variabilita je v porovnaní s lineárnym trendom veľká. Regionálne projekcie pre Karpaty nepoukazujú na jednoduchú zmenu spočívajúcu v rovnomernom raste všetkých úhrnov zrážok. Dôležitejšia je zmena rozdelenia: možné je súčasné vysušovanie časti teplého obdobia a rast intenzity najzriedkavejších zrážok. Gaál et al. (2014), ktorí analyzovali 12 regionálnych

klimatických modelov pre karpatský región, preukázali nárast 50-ročných hodnôt extrémnych zrážok na konci 21. storočia; v zime bol priemerný nárast extrémnych kvantilov približne 22–25 %, zatiaľ čo v lete prevládal rast vysokých kvantilov napriek poklesu sezónnych úhrnov zrážok. Bartholy a Pongrácz (2010) takisto poukázali na rast intenzity a frekvencie niektorých ukazovateľov extrémnych zrážok v karpatskom regióne, s tendenciou k suchšiemu letu a vlhšej zime. Projekcie EURO-CORDEX pre širší karpatský región potvrdzujú výrazné otepľovanie, zatiaľ čo signál priemerných zrážok je priestorovo zložitejší (Skarbit et al., 2022).

Z hľadiska malého horského povodia sú mimoriadne dôležité krátkodobé aj viacdenné extrémy, pretože odtoková odozva môže byť rýchla a nelineárna. V modeli sa preto použili tri dráhy škálovania extrémneho pôsobenia. Nízky variant zvyšuje mierku RI o 2 %, 5 %, 7 % a 9 % v jednotlivých horizontoch; stredný o 3 %, 7 %, 12 % a 17 %; vysoký o 4 %, 10 %, 18 % a 25 %. Horná hodnota 25 % priamo zodpovedá rádu veľkosti uvádzanému pre extrémne zrážky na konci storočia v karpatskom regióne. Tieto koeficienty neznamenajú, že RI musí fyzicky vzrásť presne o rovnakú hodnotu ako zrážky; predstavujú kontrolovaný scenárový experiment na propagáciu klimatického signálu cez pozorovanú variabilitu proxy ukazovateľa.

Simulácia bola vytvorená semi-parametrickým prístupom. V každej iterácii sa náhodne vyberá hodnota RI z empirického rozdelenia 48 historických rokov, čím sa zachováva pozorovaná šikmosť, frekvencia núl a ťažší pravý chvost bez vnucovania normálneho rozdelenia. Hodnota sa následne násobí scenárovým klimatickým koeficientom. Na zohľadnenie modelovej neistoty sa samotný násobiteľ náhodne vyberá z normálneho rozdelenia okolo scenárovej hodnoty so smerodajnou odchýlkou 0,04. Výsledok bol obmedzený na fyzický rozsah RI 0–100 %. Pre každú kombináciu scenára a obdobia bolo vygenerovaných 200 000 syntetických ročných hodnôt. Osobitne sa vykonalo 20 000 realizácií celých viacročných období na určenie 95 % predikčných intervalov priemerného RI a frekvencie prekročenia prahu 50 %. Bootstrapový prístup má významnú výhodu: nevyžaduje extrapoláciu parametrov rozdelenia ďaleko za rozsah krátkeho radu. Má však aj obmedzenie: budúce bezprecedentné udalosti môžu byť podhodnotené, pretože ich tvar vychádza z historických údajov. Klimatické škálovanie tento problém čiastočne zmierňuje, ale neodstraňuje. Skúšalo sa aj parametrické prispôsobenie rozdelenia extrémnych hodnôt GEV; vzhľadom na iba 48 pozorovaní a skutočnosť, že RI je proxy ukazovateľ obmedzený na 0–100 %, treba výsledky GEV považovať za diagnostické, nie za hlavný základ prognózy.

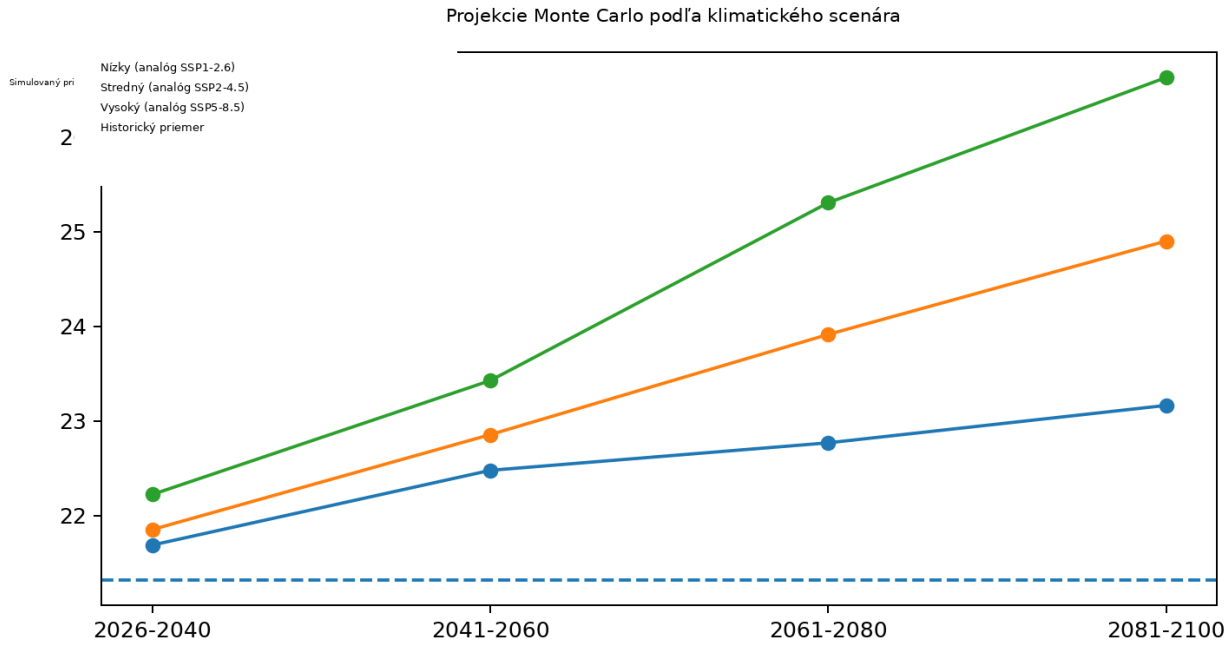
3. *Výsledky výskumu vo výpočtovej forme spolu s potrebnou dokumentáciou vo forme tabuliek, grafov a obrázkov*

Nižšie sú uvedené výsledky vykonanej prognózy.

Scenár	Obdobie	Priemerný RI	95 % PI priemeru	P(RI≥50 %)	Roky RI≥50 / desaťročie
Nízky (SSP1-2.6)	2026-2040	21.7	12.0–33.4	13.2%	1.32
Nízky (SSP1-2.6)	2041-2060	22.5	13.7–32.5	14.3%	1.43
Nízky (SSP1-2.6)	2061-2080	22.8	13.7–33.2	14.6%	1.46
Nízky (SSP1-2.6)	2081-2100	23.2	14.1–33.8	14.8%	1.48
Stredný (SSP2-4.5)	2026-2040	21.9	12.1–33.4	13.5%	1.35
Stredný (SSP2-4.5)	2041-2060	22.9	13.7–33.2	14.7%	1.47
Stredný (SSP2-4.5)	2061-2080	23.9	14.5–34.6	15.8%	1.58
Stredný (SSP2-4.5)	2081-2100	24.9	15.1–36.0	17.5%	1.75
Vysoký (SSP5-8.5)	2026-2040	22.2	12.2–33.7	14.0%	1.40

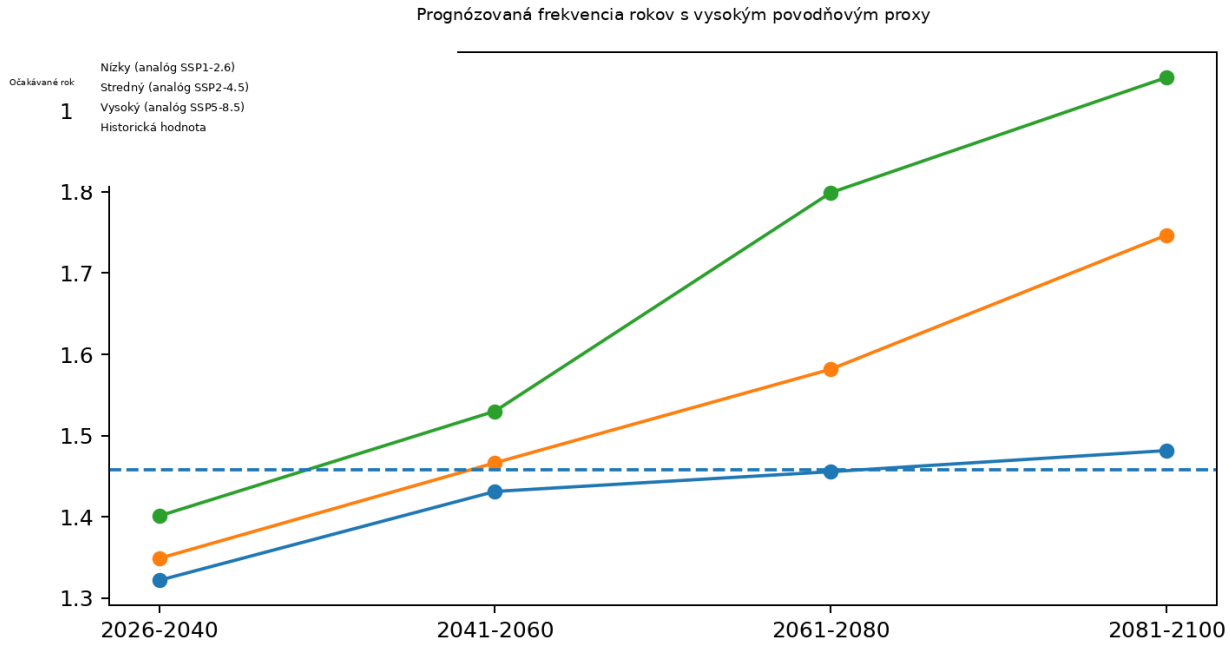
Vysoký (SSP5-8.5)	2041-2060	23.4	14.2–34.1	15.3%	1.53
Vysoký (SSP5-8.5)	2061-2080	25.3	15.2–36.5	18.0%	1.80
Vysoký (SSP5-8.5)	2081-2100	26.6	16.2–38.6	19.4%	1.94

Tabuľka 1. Výsledky simulácie Monte Carlo. Predikčné intervaly sa vzťahujú na priemery za celé obdobia; pravdepodobnosti prekročenia sa vzťahujú na náhodný rok v danom období.



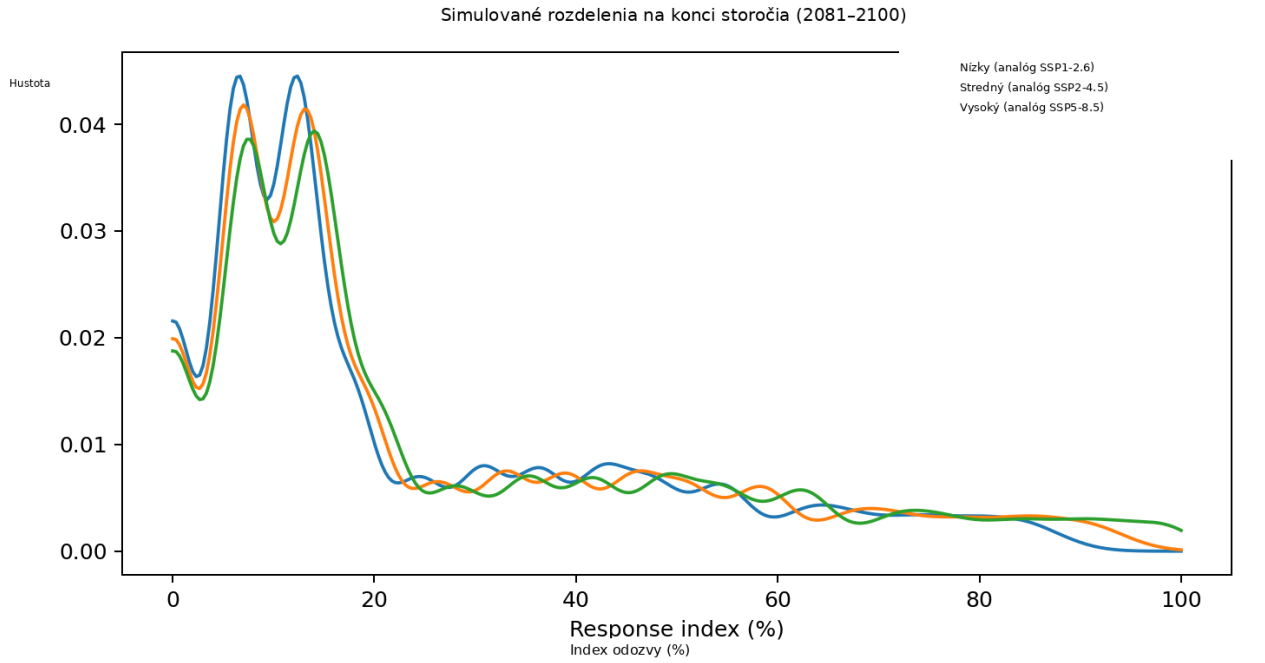
Obr. 3. Prognózovaná priemerná hodnota RI v jednotlivých obdobiach.

V nízkom variante je rast priemerného RI malý: z historických 21,32 % na približne 23,16 % v rokoch 2081–2100. V strednom variante je konečná hodnota približne 24,90 % a vo vysokom 26,63 %. Znamená to rast priemeru približne o 8,6 %, 16,8 % a 24,9 % oproti historickému priemeru. Rozdiely medzi scenármi sú v prvých desaťročiach malé a po polovici storočia sa zväčšujú. Je to v súlade so všeobecnou vlastnosťou klimatických projekcií: v blízkom horizonte sú prirodzená variabilita a neistota modelov porovnateľné so signálom pôsobenia, zatiaľ čo ku koncu storočia sa rozdiely medzi scenármi zväčšujú.



Obr. 4. Očakávaný počet rokov za desaťročie s RI≥50 %.

Historická pravdepodobnosť RI≥50 % je 14,6 %, teda približne 1,46 roka za desaťročie. Pre roky 2081–2100 model dáva približne 1,48 roka za desaťročie v nízkom variante, 1,75 v strednom a 1,94 vo vysokom. Zmena je teda výraznejšia pri strednom a vysokom scenári než pri nízkom. Pre prah RI≥60 % je historická frekvencia 8,3 %; ku koncu storočia simulácia dáva približne 9,9 %, 11,3 % a 14,1 % v jednotlivých troch variantoch. Najsilnejší signál sa teda týka pravého chvosta rozdelenia, čo je v súlade s projekciami naznačujúcimi, že extrémne zrážky môžu rásť aj vtedy, keď sa priemerné alebo sezónne úhrny zrážok menia menej.



Obr. 5. Rozdelenia simulovaného RI pre roky 2081–2100.

V malých horských povodiach sa zmena extrémnych zrážok môže premietať do povodňových prietokov výrazne nelineárnym spôsobom. Odozva závisí od predchádzajúceho nasýtenia, intenzity zrážok, ich trvania, podielu konvekčných zrážok, snehovej pokrývky, zamrznutia pôdy, svahovej a údolnej retencie a zmien využívania krajiny. Preto je škálovanie RI zrážkovým koeficientom zjednodušením. Jeho výhodou je transparentnosť a možnosť kontroly neistoty; nevýhodou absencia explicitného modelu zrážka–odtok. Výsledok treba interpretovať ako zmenu štatistického tlaku na výskyt vysokých povodňových prietokov, nie ako deterministickú prognózu konkrétneho povodňového roka.

Otepľovanie môže meniť aj sezónnosť. V nižších a stredných polohách Karpát môže väčší podiel kvapalných zrážok v zime, častejšie epizódy dažďa na sneh a skoršie topenie snehu meniť typ povodňových prietokov, zatiaľ čo v teplej polovici roka rastúca vlhkostná kapacita atmosféry podporuje intenzifikáciu najsilnejších zrážok. Zároveň môžu dlhšie suché obdobia znižovať počiatočnú vlhkosť a obmedzovať odtok pri časti epizód. Budúcnosť sa preto môže vyznačovať väčším kontrastom: dlhšími obdobiami nízkeho odtoku oddelenými zriedkavejšími, ale intenzívnejšími epizódami. Najdôležitejším obmedzením je dĺžka radu: 48 rokov je málo na stabilný odhad zmien udalostí s periódou opakovania niekoľko desiatok rokov. Bootstrapové 95 % intervaly priemerného RI sú široké; napríklad pre vysoký scenár 2081–2100 má priemer za obdobie interval približne 16,2–38,6 %. Neznamená to, že trend je nepoužiteľný, ale že prirodzená

variabilita môže počas niekoľkých desaťročí maskovať klimatický signál. Druhým obmedzením je dendrochronologická povaha údajov. Index odozvy závisí od počtu dostupných stromov a pravdepodobnosti ich reakcie, nielen od energie povodňového prietoku. Ak sa veľkosť vzorky alebo citlivosť stromov v čase menila, môže vzniknúť pozorovacia heterogenita.

Tretím obmedzením je prenos zrážkovej projekcie na proxy ukazovateľ povodňových prietokov. V tejto verzii sa nepoužili lokálne denné rady zrážok, teploty, snehu ani prietoku, takže model nemôže kalibrovať lokálnu funkciu zrážka–povodňový prietok. Najväčšie zvýšenie spoľahlivosti by prinieslo prepojenie RI s prístrojovými ročnými Qmax/Hmax, lokálnymi extrémami Rx1day/Rx5day a predchádzajúcou vlhkosťou. Následne možno použiť hierarchický alebo nestacionárny model GEV, v ktorom parametre polohy a mierky závisia od teploty a extrémnych zrážok z ansámblu CMIP6/EURO-CORDEX.

4. *Závery z vykonaného výskumu vo forme spracovania obsahujúceho podrobné analýzy spolu s odhadom ohrozenia v testovanom území (zosuvného, povodňového alebo súvisiaceho so znečistením ovzdušia podľa typu výskumného testu)*

Historický rad RI je výrazne premenlivý a epizodický, ale v rokoch 1978–2025 nevykazuje štatisticky významný monotónny trend. Vysoké hodnoty sú pomerne zriedkavé: RI≥50 % sa vyskytol v 14,6 % rokov. Regionálna klimatologická literatúra poukazuje na rast intenzity vysokých kvantilov zrážok v Karpatoch v 21. storočí, najmä pri vysokom pôsobení. Monte Carlo naznačuje postupný rast priemernej magnitúdy proxy ukazovateľa a frekvencie rokov s vysokým RI, pričom signál je do polovice storočia slabý a po roku 2060 výraznejší. Vo vysokom scenári dosahuje priemerný RI v rokoch 2081–2100 približne 26,6 % oproti historickým 21,3 %. Frekvencia RI≥50 % v tomto variante rastie z približne 1,46 na 1,94 roka za desaťročie a RI≥60 % z 0,83 na približne 1,41 roka za desaťročie. Výsledky podporujú hypotézu miernej intenzifikácie najvýznamnejších povodňových prietokov, nie jednoduchého rastu každého ročného maxima. Neistota zostáva veľká, preto by sa výsledky mali prezentovať ako scenárové rozsahy pravdepodobnosti. Kalibrácia voči lokálnym Qmax/Hmax a zrážkovým údajom by bola ďalším krokom umožňujúcim previesť dendrochronologický proxy ukazovateľ na hydrologické jednotky. Napriek obmedzeniam analýza poskytuje kvantitatívny, reprodukovateľný základ na hodnotenie budúcej zmeny povodňového rizika v skúmanom území.

LITERATÚRA

Bartholy, J., & Pongrácz, R. (2010). Analysis of precipitation conditions for the Carpathian Basin based on extreme indices in the 20th century and climate simulations for 2050 and 2100. Physics and Chemistry of the Earth, 35(1–2), 43–51. https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.03.011

Gaál, L., Beranová, R., Hlavčová, K., & Kyselý, J. (2014). Climate change scenarios of precipitation extremes in the Carpathian region based on an ensemble of regional climate models. Advances in Meteorology, 2014, 943487. https://doi.org/10.1155/2014/943487

Skarbit, N., Unger, J., & Gál, T. (2022). Projected values of thermal and precipitation climate indices for the broader Carpathian region based on EURO-CORDEX simulations. Hungarian Geographical Bulletin, 71(4). https://doi.org/10.15201/hungeobull.71.4.2

Szabó, P., et al. (2022). Projected changes in Feddema climate characteristics in the Larger Carpathian Region by the end of the 21st century. International Journal of Climatology. https://doi.org/10.1002/joc.7558

Torma, C. Z., Kis, A., & Pongrácz, R. (2020). Evaluation of EURO-CORDEX and Med-CORDEX precipitation simulations for the Carpathian Region: Bias corrected data and projected changes. Időjárás, 124(1), 25–46. https://doi.org/10.28974/idojaras.2020.1.2

EURO-CORDEX. Regionálne simulácie klimatických modelov pre Európu, doména EUR-11 (~0,11°); historické a scenárové simulácie do roku 2100.

Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Martín-Duque, J. F., Rubiales, J. M., Godfrey, A., Pedraza, J., Carrasco, R. M., & Sanz, M. A. (2005). Sheet erosion rates determined by using dendrogeomorphological analysis of exposed tree roots: Two examples from Central Spain. Catena, 64(1), 81–102. https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.002

Gärtner, H. (2007). Tree roots—Methodological review and new development in dating and quantifying erosive processes. Geomorphology, 86(3–4), 243–251. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.001

Rubiales, J. M., Bodoque, J. M., Ballesteros, J. A., & Díez-Herrero, A. (2008). Response of Pinus sylvestris roots to sheet-erosion exposure: An anatomical approach. Natural Hazards and Earth System Sciences, 8, 223–231. https://doi.org/10.5194/nhess-8-223-2008

Katowice, 31.08.2026

PREZES ZARZĄDU
Oddział Górnośląski, Polskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi
Dr hab. Jerzy Cabała

dr hab. Jerzy Cabała