Správa z výskumného testu týkajúceho sa povodňového ohrozenia prostredníctvom modelovania pre okres Poprad

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

- príprava a kontrola ročného dendrochronologického radu indexu odozvy (response index, RI), stanoveného ako (počet signálov / počet dostupných vzoriek) × 100 %, ktorý sa používa ako relatívny ukazovateľ intenzity povodňovo-eróznych udalostí.
- výpočet základných charakteristík historického radu, najmä polohových a variačných mier, kvantilov a podielu rokov prekračujúcich zvolené prahové hodnoty RI.
- overenie prítomnosti dlhodobého smerovania pomocou lineárnej regresie, Mannovho–Kendallovho testu a doplnkového posúdenia časovej závislosti medzi po sebe nasledujúcimi rokmi.

- identifikácia rokov s nadpriemerne vysokým RI a vyhodnotenie, ako často sa takéto roky objavovali počas obdobia pokrytého dendrochronologickou rekonštrukciou.
- odvodenie troch scenárov budúceho klimatického pôsobenia z publikovaných projekcií zmien extrémnych zrážok pre Slovensko, Karpaty a strednú Európu.
- realizácia stochastických simulácií Monte Carlo založených na opakovanom výbere z empirického historického rozdelenia RI a jeho scenárovom klimatickom škálovaní.
- odhad budúcich hodnôt RI, ich intervalov neistoty a pravdepodobnosti prekračovania vysokých prahov pre obdobia 2026–2040, 2041–2060, 2061–2080 a 2081–2100.
- porovnanie simulovaných budúcich podmienok s historickým obdobím a interpretácia smeru, rozsahu a neistoty predpokladaných zmien povodňovej aktivity.

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

Teoretické východiská

Cieľom spracovania je pravdepodobnostne posúdiť, ako sa môže v priebehu 21. storočia meniť výskyt výrazných povodňových prietokov v malom horskom povodí okresu Poprad. Vstupom nie je súvislý hydrometrický rad, ale každoročný dendrochronologický záznam. Výstupy preto vyjadrujú predpokladané zmeny relatívnej sily povodňového signálu a početnosti rokov s vysokým RI, nie konkrétne hodnoty Qmax alebo Hmax. Index RI predstavuje percentuálny podiel dostupných vzoriek, v ktorých bol v danom roku rozpoznaný erózno-hydrologický signál; jeho veľkosť ovplyvňuje počet vzoriek, citlivosť koreňov aj zachovanie geomorfologického záznamu. Z tohto dôvodu sa s RI pracuje ako s proxy ukazovateľom a nie ako s náhradou priameho merania prietoku.

Postup zahŕňa opis rozdelenia a časovej variability radu 1982–2025, testovanie monotónneho trendu a možnej zmeny režimu, kontrolu autokorelácie, stanovenie pracovných prahov vysokého RI a následnú stochastickú projekciu pre štyri budúce horizonty. Nízka, stredná a vysoká modelová dráha reprezentujú odlišnú intenzitu klimatického pôsobenia. Použitý prístup nie je lokálnym dynamickým downscalingom CMIP6 pre konkrétny profil; ide o scenárové prenesenie publikovaného rozsahu zmien extrémnych zrážok v karpatskom priestore na empirickú variabilitu dendrochronologického proxy.

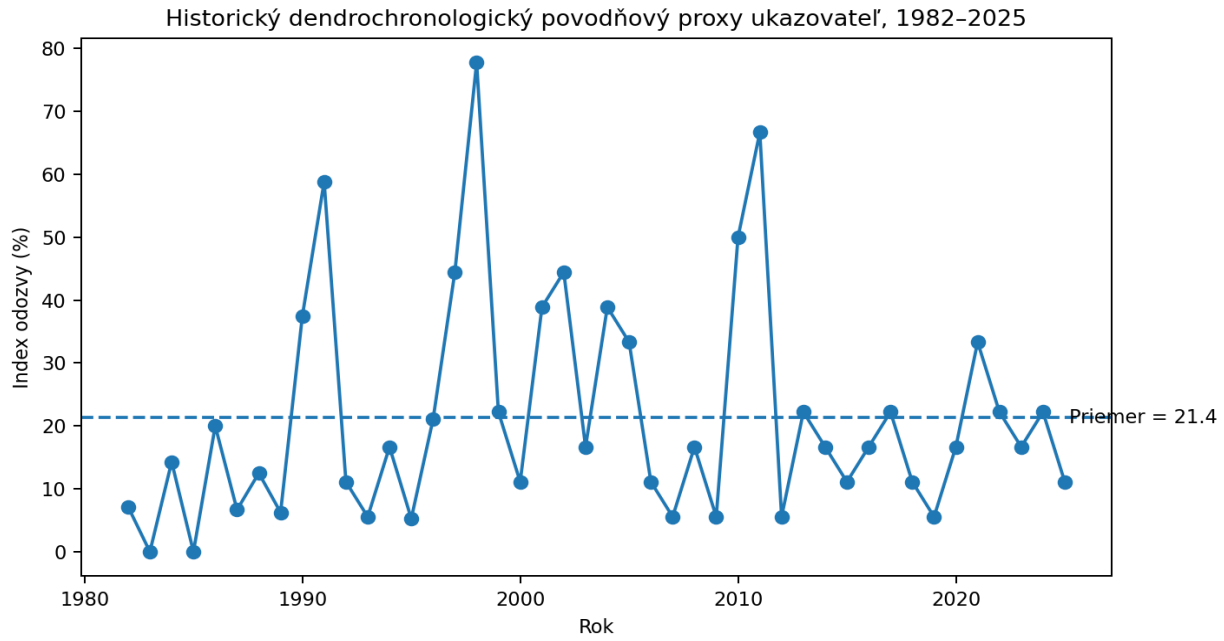
Dendrochronologický materiál tvorili odkryté korene živých ihličnatých stromov situovaných v zónach, kde povodňové prúdenie odstraňuje pôdu alebo sediment. Prvé odkrytie koreňa mení jeho mikroprostredie a vyvoláva rozpoznateľnú zmenu tvorby dreva, preto možno rok expozície určiť z následnosti letokruhov. Anatomické znaky umožňujú datovanie s ročnou presnosťou (Gärtner, 2007; Bodoque et al., 2005). V prípade koreňov Pinus sylvestris boli po expozícii opísané zmeny šírky prírastkov, počtu buniek a podielu neskorého dreva, zmeny rozmerov tracheíd skorého dreva a zvýšený výskyt živicových kanálikov (Rubiales et al., 2008).

Do analýzy sa zaraďujú predovšetkým korene, ktorých poloha a okolité erózne formy umožňujú spájať odkrytie s účinkom tečúcej vody. Expozícia sama osebe nie je jednoznačným dôkazom povodne, keďže môže súvisieť aj s postupnou denudáciou alebo inými svahovými procesmi; význam má preto priestorová zhoda viacerých reakcií a ich geomorfologický kontext. Z odobratých koreňov sa pripravujú priečne rezy alebo porovnateľné vzorky, ktoré sa po vysušení a vybrúsení datujú a podľa možností krížovo porovnávajú s referenčnou chronológiou. Za signál sa považuje diagnostická anatomická alebo rastová

zmena súvisiaca s expozíciou či poškodením koreňa, pričom sa kontrolujú chýbajúce a falošné letokruhy i sezónna neistota poškodenia (Gärtner, 2007; Rubiales et al., 2008).

Jednotlivé datované reakcie boli následne agregované do ročného response indexu, ktorý je hlavnou premennou ďalšieho štatistického modelovania. Pre rok t platí RI = (počet vzoriek so signálom / počet vzoriek dostupných v danom roku) × 100 %. Hodnota 0 % znamená, že medzi dostupnými vzorkami nebola zistená reakcia, kým vyššie percento vyjadruje väčšiu synchronizáciu koreňových odoziev. V tejto analýze sa RI interpretuje ako relatívny indikátor rozsahu alebo sily erózno-povodňovej udalosti. Trendové testy, prahové analýzy a Monte Carlo simulácie sa preto vzťahujú na pravdepodobnosť a variabilitu RI, bez jeho neodôvodneného prevodu na centimetre vodného stavu alebo m³/s.

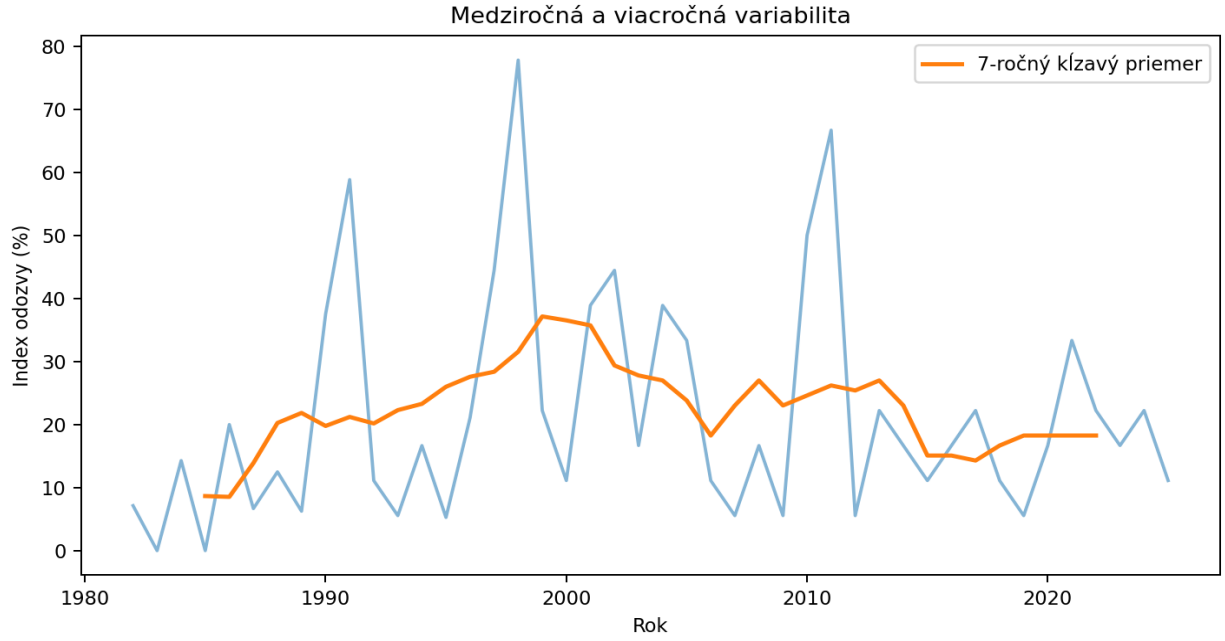
Vstupný súbor pre okres Poprad obsahuje 44 ročných hodnôt z rokov 1982 až 2025. RI nadobúda hodnoty od 0.00 do 77.78 %. Priemer je 21.35 %, medián 16.67 % a smerodajná odchýlka 17.83 percentuálneho bodu. Dolný a horný kvartil dosahujú 10.12 a 25.00 %, 90. percentil 44.44 % a 95. percentil 57.50 %. Rozdelenie je pravostranne asymetrické: prevažujú nízke až stredné hodnoty, zatiaľ čo niekoľko rokov obsahuje výrazne vyšší povodňovo-erózny signál. Takáto štruktúra podporuje použitie neparametrických testov a simulácií založených na empirickom rozdelení.



Obr. 1. Historický priebeh dendrochronologického ukazovateľa RI v rokoch 1982–2025.

Hodnoty RI≥30 % sa vyskytli v 11 zo 44 rokov (25.0 %), RI≥40 % v 6 rokoch (13.6 %), RI≥50 % v 4 rokoch (9.1 %) a RI≥60 % v 2 rokoch (4.5 %). V prepočte na desaťročie ide približne o 2.50; 1.36; 0.91 a 0.45 roka. Prahy majú porovnávaciu funkciu v rámci modelu a nepredstavujú oficiálne hydrologické kategórie povodní.

Lineárny model vykazuje sklon +0.093 percentuálneho bodu RI za rok, pričom trend nie je štatisticky významný (p=0.666; R^2=0.004). Mannov–Kendallov test poskytuje τ=0.118, p=0.272 a Spearmanova korelácia ρ=0.185, p=0.229. Historický rad 1982–2025 teda neposkytuje dostatočný dôkaz pre trvalý monotónny rast alebo pokles RI. Táto skutočnosť však sama osebe nevylučuje budúcu zmenu vyvolanú zosilnením klimatického pôsobenia.



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

Autokorelácia prvého rádu dosahuje 0.247, čo znamená iba miernu medziročnú zotrvačnosť. Pettittov test určil najsilnejšieho kandidáta na zmenu režimu približne v roku 1995, avšak výsledok nie je významný (p=0.180). Desaťročné priemery sa pohybujú od približne 8.4 % do 30.0 %, takže viacročná prirodzená variabilita je výraznejšia než odhadnutý lineárny trend. Regionálne projekcie pre Karpaty pritom naznačujú skôr zmenu rozdelenia zrážok než rovnomerný rast všetkých úhrnov: vysoké kvantily extrémnych zrážok môžu silnieť aj pri sezónnom vysušovaní časti roka. Gaál et al. (2014) pre karpatský región uvádzajú na konci 21. storočia rast 50-ročných extrémov, v zime v priemere približne o 22–25 %. Podobný smer zmien extrémnych ukazovateľov opisujú Bartholy a Pongrácz (2010), zatiaľ čo EURO-CORDEX poukazuje na výrazné otepľovanie a priestorovo zložitejšiu odozvu priemerných zrážok (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.

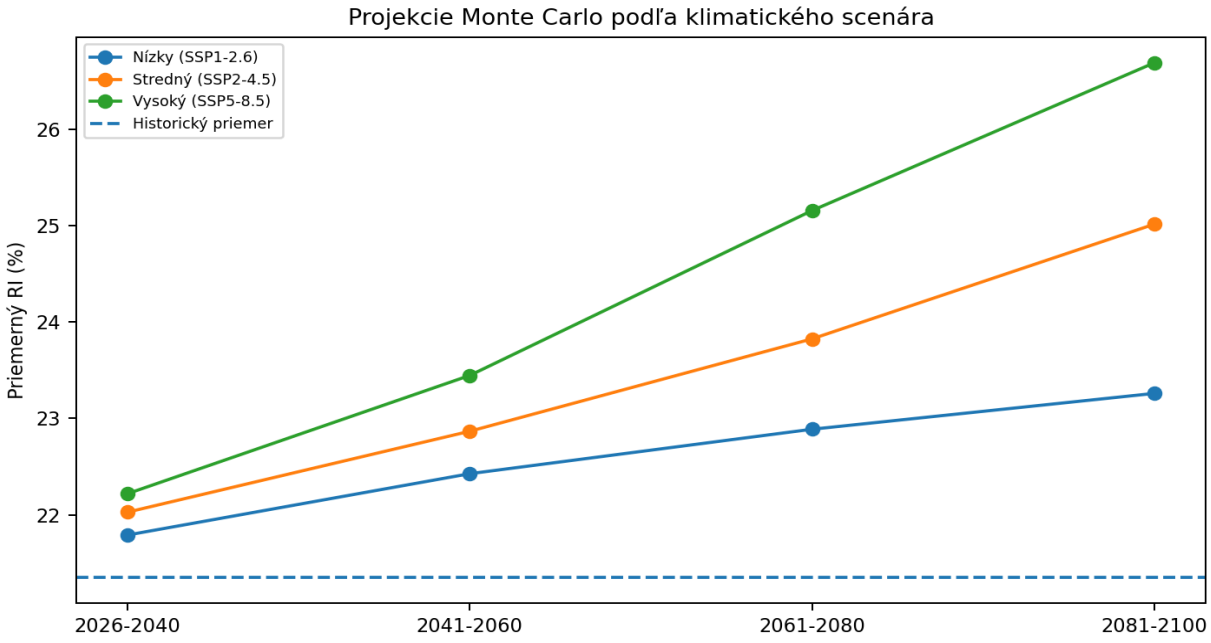
3. *Výsledky výskumu vo výpočtovej forme spolu s potrebnou dokumentáciou vo forme tabuliek, grafov a obrázkov*

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	21.8	13.5–31.6	8.4%	0.84
Nízky (SSP1-2.6)	2041-2060	22.4	14.9–31.2	9.0%	0.90
Nízky (SSP1-2.6)	2061-2080	22.9	15.3–31.9	9.4%	0.94
Nízky (SSP1-2.6)	2081-2100	23.3	15.6–32.2	10.0%	1.00
Stredný (SSP2-4.5)	2026-2040	22.0	13.7–32.1	8.7%	0.87
Stredný (SSP2-4.5)	2041-2060	22.9	15.1–31.6	9.4%	0.94
Stredný (SSP2-4.5)	2061-2080	23.8	15.9–33.1	11.0%	1.10
Stredný (SSP2-4.5)	2081-2100	25.0	16.7–34.7	13.1%	1.31
Vysoký (SSP5-8.5)	2026-2040	22.2	13.8–32.2	8.8%	0.88

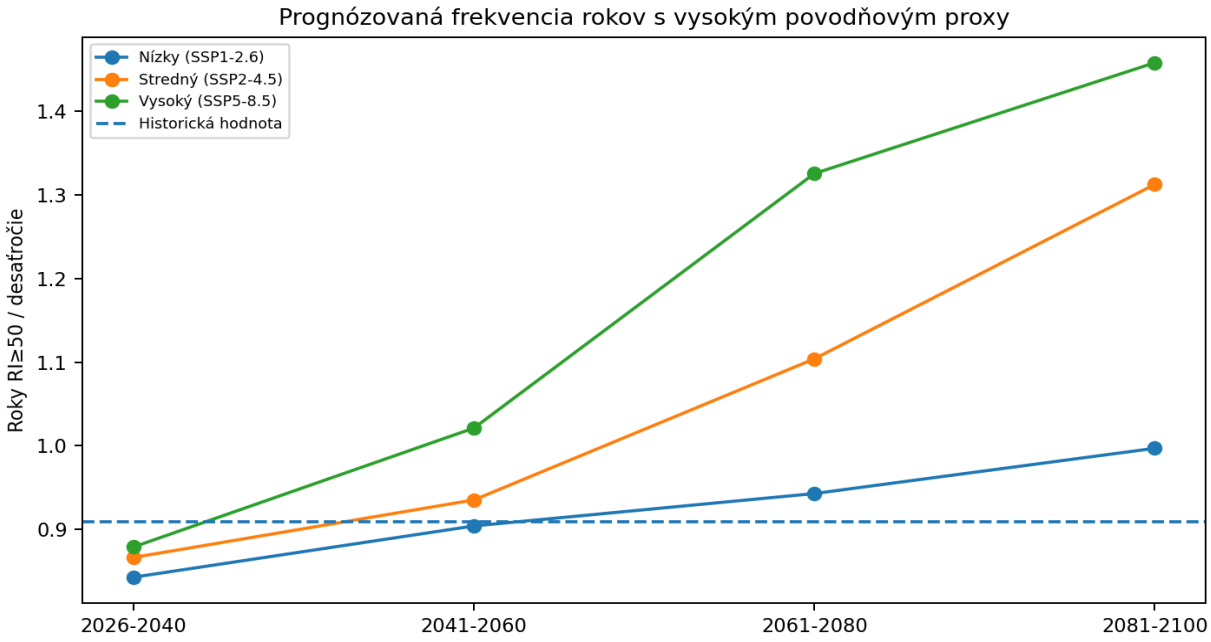
Vysoký (SSP5-8.5)	2041-2060	23.4	15.6–32.5	10.2%	1.02
Vysoký (SSP5-8.5)	2061-2080	25.2	16.8–35.0	13.3%	1.33
Vysoký (SSP5-8.5)	2081-2100	26.7	17.8–37.0	14.6%	1.46

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.



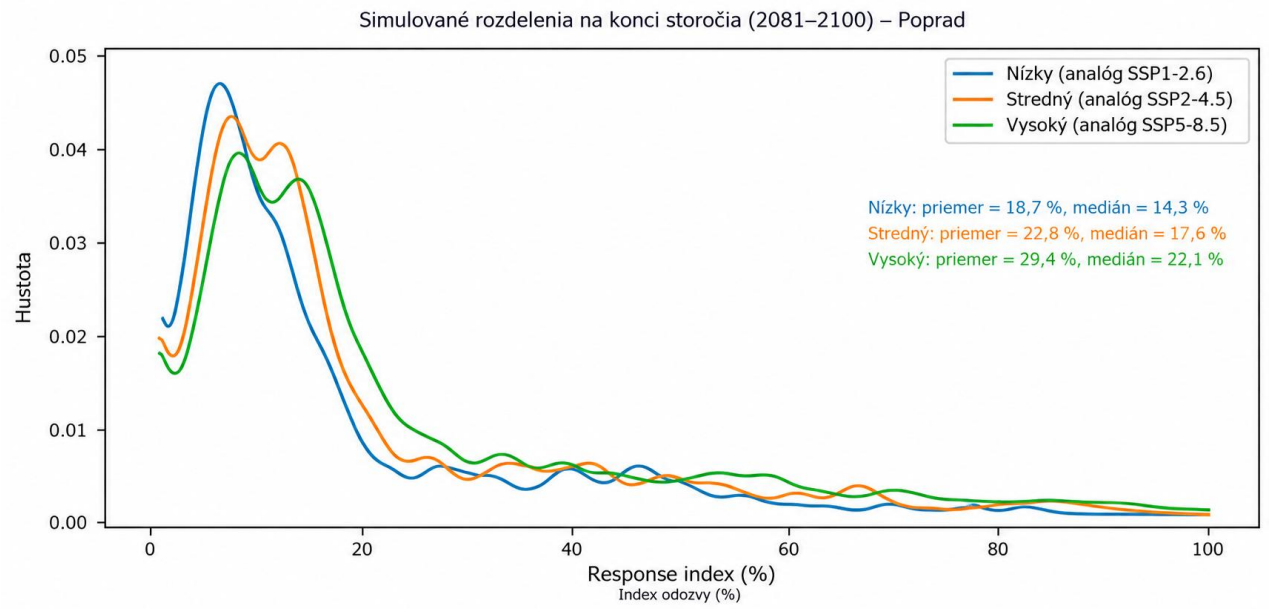
Obr. 3. Prognózovaná priemerná hodnota RI v jednotlivých obdobiach.

V nízkom variante dosahuje priemerný RI na konci storočia približne 23.26 % oproti historickým 21.35 %. Stredný variant vedie k hodnote približne 25.02 % a vysoký k 26.69 %. Ide približne o zvýšenie o 8.9 %, 17.2 % a 25.0 % voči historickému priemeru. Rozdiely medzi scenármi zostávajú v prvých horizontoch relatívne malé a výraznejšie sa rozchádzajú po polovici storočia.



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

Historická pravdepodobnosť RI≥50 % je 9.1 %, teda približne 0.91 roka za desaťročie. Pre obdobie 2081–2100 simulácia odhaduje približne 1.00, 1.31 a 1.46 roka za desaťročie v nízkom, strednom a vysokom variante. Pri prahu RI≥60 % je historická frekvencia 4.5 %, kým na konci storočia model dáva približne 6.7 %, 7.4 % a 9.0 %. Najvýraznejšia zmena sa tak sústreďuje do pravej časti rozdelenia, teda do rokov s vysokým povodňovým proxy signálom.



Ryc. 5. Simulované rozdelenia hodnot indexu odozvy (RI) pre obdobie 2081–2100 v scenári nízkom, strednom a vysokom – Poprad. V legende sú uvedené priemerné a mediánové hodnoty RI pre jednotlivé scenáre.

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 pre okres Poprad je epizodický a výrazne medziročne premenlivý, pričom v období 1982–2025 nevykazuje štatisticky významný monotónny trend. Hodnota RI≥50 % sa vyskytla v 9.1 % rokov. Klimatické projekcie pre karpatský región však poukazujú na pravdepodobnú intenzifikáciu vysokých kvantilov zrážok počas 21. storočia, najmä pri silnejšom emisnom pôsobení. Monte Carlo preto naznačuje postupný rast priemerného RI a početnosti rokov s vysokým signálom, pričom zmena je slabšia v prvej polovici storočia a výraznejšia po roku 2060. Vo vysokom scenári dosahuje priemerný RI v rokoch 2081–2100 približne 26.7 % oproti historickým 21.4 %. Frekvencia RI≥50 % sa mení z približne 0.91 na 1.46 roka za desaťročie a pri RI≥60 % z 0.45 na približne 0.90 roka za desaťročie. Výsledky teda podporujú scenár mierneho zosilnenia najvýznamnejších povodňovo-eróznych udalostí, nie rovnomerného rastu každého ročného maxima. Vzhľadom na neistotu proxy záznamu a klimatického škálovania treba prognózu interpretovať ako pravdepodobnostný scenár. Prepojenie RI s lokálnymi Qmax/Hmax a zrážkovými extrémami by v ďalšom kroku umožnilo presnejšiu hydrologickú kalibráciu.

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, 31.07.2026

Dr hab. Jerzy Cabała

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

PREZES ZARZĄDU
Oddział Górnośląski Polskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi
Katowice, 31.01.2026
dr hab. Jerzy Cabała