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

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

- spracovanie a kontrola ročného dendrochronologického radu indexu odozvy (response index, RI), stanoveného ako (počet signálov / počet dostupných vzoriek) × 100 %, ktorý slúži ako relatívny ukazovateľ intenzity povodňovo-eróznych udalostí.
- výpočet deskriptívnych charakteristík historického radu, vrátane priemeru, mediánu, rozptylu hodnôt, kvantilov a frekvencie prekračovania pracovných prahov RI.
- preskúmanie dlhodobého vývoja pomocou lineárnej regresie, Mannovho–Kendallovho testu a doplnkového posúdenia autokorelácie medzi po sebe nasledujúcimi rokmi.

- identifikácia rokov s vysokým dendrochronologickým povodňovým signálom a stanovenie početnosti takýchto udalostí počas rekonštruovaného obdobia.
- definovanie troch variantov budúceho klimatického pôsobenia na základe publikovaných projekcií extrémnych zrážok pre Slovensko, Karpaty a strednú Európu.
- realizácia stochastických simulácií Monte Carlo založených na bootstrapovom výbere z historického rozdelenia RI a jeho následnom škálovaní podľa prijatých klimatických variantov.
- odhad budúcich priemerných hodnôt RI, intervalov neistoty a pravdepodobností prekročenia vysokých prahov v obdobiach 2026–2040, 2041–2060, 2061–2080 a 2081–2100.
- porovnanie výsledkov modelovania s historickým záznamom a interpretácia smeru, rozsahu a neistoty možných 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 kvantitatívne a pravdepodobnostne posúdiť, ako sa môže v priebehu 21. storočia meniť výskyt výrazných povodňových prietokov v malom horskom povodí okresu Snina. Základ analýzy tvorí ročný dendrochronologický záznam, nie súvislý rad prístrojových meraní prietoku alebo vodného stavu. Projekcia sa preto vzťahuje na zmeny relatívnej sily povodňového signálu a početnosti rokov s vysokým response indexom (RI), nie na konkrétne hodnoty Qmax alebo Hmax. RI vyjadruje percentuálny podiel dostupných vzoriek, v ktorých bol v danom roku rozpoznaný erózno-hydrologický signál. Jeho veľkosť závisí od počtu vzoriek, citlivosti koreňov a zachovania geomorfologického záznamu, preto sa používa ako proxy ukazovateľ a nie ako náhrada priameho hydrometrického merania.

Analytický postup zahŕňa charakteristiku rozdelenia a časovej variability radu 1979–2025, testovanie monotónneho trendu a možnej zmeny režimu, posúdenie autokorelácie, stanovenie pracovných prahov vysokého RI a následnú stochastickú projekciu pre štyri budúce časové horizonty. Nízka, stredná a vysoká modelová dráha predstavujú rozdielnu intenzitu klimatického pôsobenia. Nejde o lokálny dynamický downscaling CMIP6 pre konkrétny profil, ale o scenárový prenos publikovaného rozsahu zmien extrémnych zrážok v karpatskom priestore na empirickú variabilitu dendrochronologického proxy ukazovateľa.

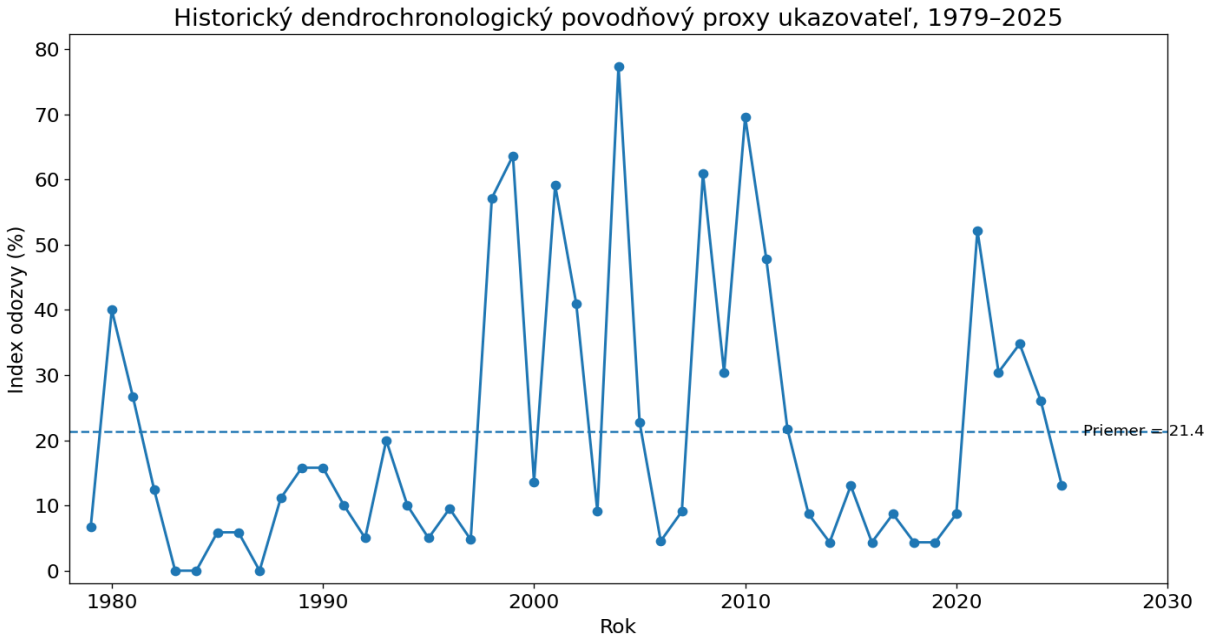
Dendrochronologická rekonštrukcia vychádzala z koreňov živých ihličnatých stromov odkrytých v zónach, kde povodňové prúdenie odstraňuje pôdny kryt alebo sediment. Prechod koreňa z pôdneho prostredia na povrch mení jeho teplotné, vlhkostné a mechanické podmienky a vyvoláva diagnostické zmeny v tvorbe dreva, vďaka čomu možno rok prvého odkrytia určiť z následnosti letokruhov. Anatomické metódy umožňujú datovanie expozície s ročným rozlíšením (Gärtner, 2007; Bodoque et al., 2005). Pri koreňoch Pinus sylvestris sa po odkrytí pozorujú zmeny šírky prírastku, počtu buniek a podielu neskorého dreva, zmeny rozmerov tracheíd skorého dreva a zvýšený výskyt živicových kanálikov (Rubiales et al., 2008).

Do súboru sa vyberajú najmä korene, ktorých geomorfologická poloha a sprievodné erózne formy podporujú interpretáciu expozície ako dôsledku pôsobenia tečúcej vody. Odkrytie koreňa samo osebe nemusí dokazovať povodeň, pretože môže súvisieť aj s postupnou denudáciou alebo inými svahovými procesmi; dôležitá je preto synchronizácia reakcií viacerých koreňov a ich priestorový kontext. Z odobratého materiálu sa pripravujú priečne rezy alebo obdobné vzorky, ktoré sa po vysušení a vybrúsení datujú a podľa možnosti krížovo porovnávajú s referenčnou chronológiou. Za signálny rok sa považuje diagnostická rastová

alebo anatomická zmena spojená s expozíciou či poškodením koreňa, pričom sa kontrolujú chýbajúce a falošné letokruhy aj neistota sezóny poškodenia (Gärtner, 2007; Rubiales et al., 2008).

Jednotlivé datované reakcie sa následne agregujú do ročného response indexu, ktorý tvorí hlavnú premennú štatistickej analýzy. Pre každý rok platí RI = (počet vzoriek so signálom / počet vzoriek dostupných v danom roku) × 100 %. Hodnota 0 % označuje neprítomnosť zaznamenanej reakcie v dostupnom súbore, zatiaľ čo rastúce percento vyjadruje väčšiu synchronizáciu odozvy koreňov. V tejto práci sa RI interpretuje ako relatívny ukazovateľ rozsahu alebo intenzity ročnej erózno-povodňovej udalosti. Trendové testy, prahové analýzy a simulácie Monte Carlo preto pracujú s pravdepodobnosťou a variabilitou RI bez jeho neodôvodneného prepočtu na Hmax alebo Qmax.

Vstupný súbor pre okres Snina obsahuje 47 ročných hodnôt z rokov 1979 až 2025. RI nadobúda hodnoty od 0.00 do 77.27 %. Priemer je 21.39 %, medián 12.50 % a smerodajná odchýlka 20.97 percentuálneho bodu. Dolný kvartil dosahuje 5.88 %, horný kvartil 30.43 %, 90. percentil 57.92 % a 95. percentil 62.81 %. Rozdelenie je pravostranne asymetrické: väčšina rokov sa vyznačuje nízkym až stredným signálom, zatiaľ čo menší počet rokov dosahuje veľmi vysoké hodnoty. Takáto štruktúra podporuje použitie neparametrických testov a simulácií založených na empirickom rozdelení.

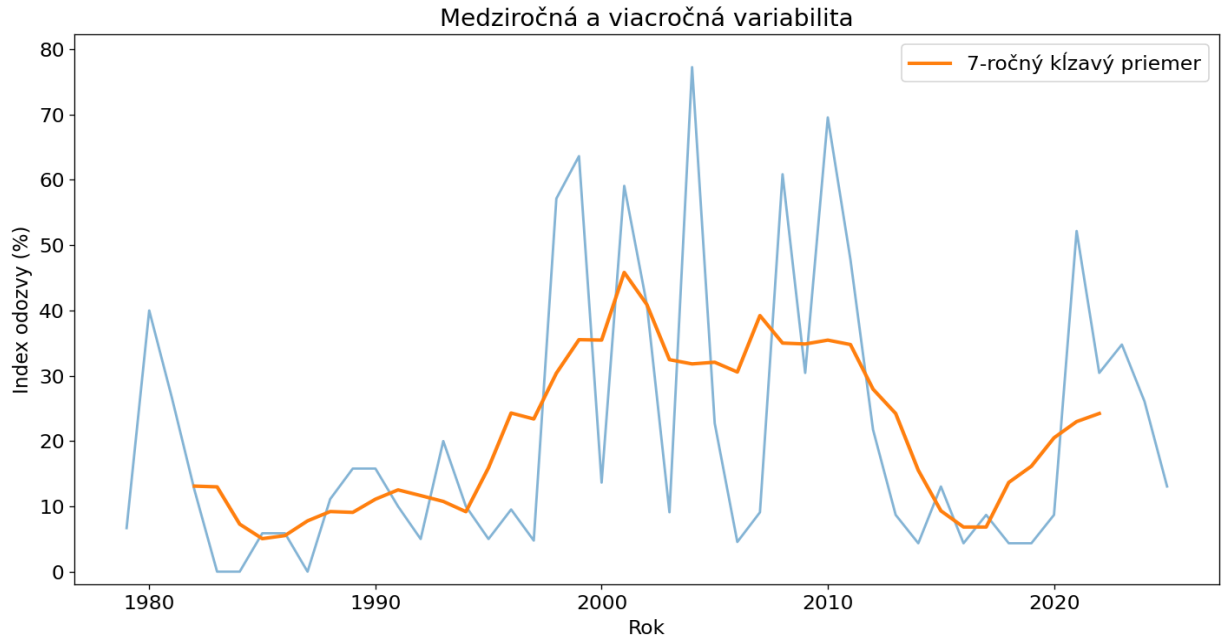


Obr. 1. Historický priebeh dendrochronologického ukazovateľa RI v rokoch 1979–2025.

Hodnoty RI≥30 % sa vyskytli v 13 zo 47 rokov (27.7 %), RI≥40 % v 10 rokoch (21.3 %), RI≥50 % v 7 rokoch (14.9 %) a RI≥60 % v 4 rokoch (8.5 %). V prepočte na desaťročie ide približne o 2.77; 2.13; 1.49 a

0.85 roka. Ide o pracovné prahy určené na porovnanie historického radu s budúcimi simuláciami, nie o oficiálne hydrologické kategórie povodní.

Lineárna regresia ukazuje kladný sklon +0.285 percentuálneho bodu RI za rok, tento trend však nie je štatisticky významný ($p=0.210$; $R^2=0.035$). Mannov–Kendallov test poskytuje $\tau=0.095$, $p=0.349$ a Spearmanova korelácia $\rho=0.173$, $p=0.244$. Historický rad 1979–2025 teda neposkytuje dostatočný štatistický dôkaz pre trvalý monotónny rast alebo pokles RI. Pozitívny smer regresného sklonu možno vnímať ako slabú tendenciu, ale vzhľadom na veľkú medziročnú variabilitu ju nemožno oddeliť od prirodzeného kolísania.



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

Autokorelácia prvého rádu dosahuje 0.295, čo poukazuje na miernu medziročnú zotrvačnosť. Pettittov test identifikuje najsilnejšieho kandidáta na zmenu úrovne približne v roku 1997, výsledok však nie je štatisticky významný ($p=0.117$). Priemerné hodnoty za ucelenejšie desaťročné obdobia sa pohybujú približne od 11.8 % v rokoch 1980–1989 do 32.8 % v rokoch 2000–2009, čo ukazuje výraznú viacročnú variabilitu v porovnaní so slabým lineárnym trendom. Regionálne projekcie pre Karpaty 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) uvádzajú na konci 21. storočia rast 50-ročných extrémov, v zime priemerne približne o 22–25 %. Podobný smer zmien extrémnych ukazovateľov opisujú Bartholy a Pongrácz (2010), zatiaľ čo EURO-CORDEX poukazuje na výrazné otepľovanie a priestorovo diferencovanú odozvu zrážok (Skarbit et al., 2022).

V malom horskom povodí sú z hľadiska povodňovej odozvy podstatné krátkodobé aj viacdenné zrážkové extrémy, pretože reakcia odtoku môže byť rýchla a nelineárna. Na prenos klimatického signálu sa použili tri trajektórie škálovania: nízky variant zvyšuje mierku RI postupne o 2 %, 5 %, 7 % a 9 %, stredný o 3 %, 7 %, 12 % a 17 % a vysoký o 4 %, 10 %, 18 % a 25 % v štyroch budúcich horizontoch. Najvyššia hodnota 25 % zodpovedá rádu zmien uvádzanému pre extrémne zrážky na konci storočia v karpatskom regióne. Koeficienty nepredstavujú priamu fyzikálnu rovnosť medzi zmenou zrážok a RI, ale kontrolovaný scenárový experiment, ktorým sa klimatické pôsobenie prenáša cez pozorovanú variabilitu proxy ukazovateľa.

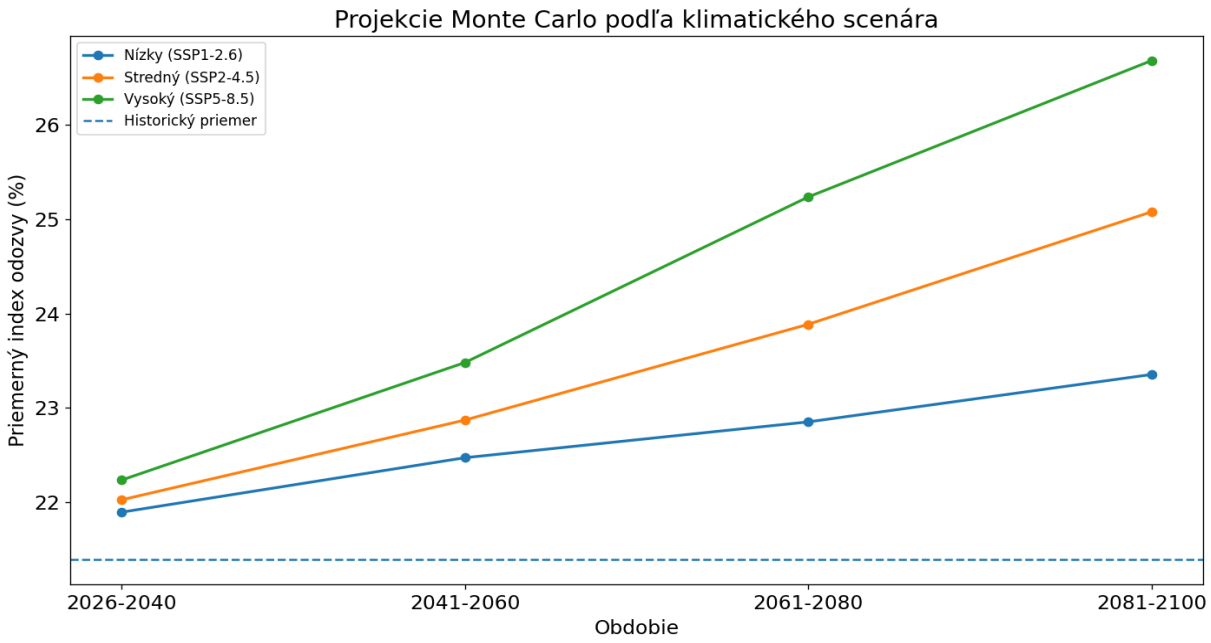
Model Monte Carlo bol zostavený semi-parametricky. V každej iterácii sa náhodne vyberala hodnota RI z empirického rozdelenia 47 historických rokov, čím sa zachovala pozorovaná asymetria, výskyt nulových hodnôt aj pravý chvost bez predpokladu normálneho rozdelenia. Vybraná hodnota sa násobila scenárovým klimatickým koeficientom, pričom neistota koeficientu bola reprezentovaná normálnym rozdelením so smerodajnou odchýlkou 0,04 okolo scenárovej hodnoty. Výsledky boli obmedzené na fyzický rozsah RI 0–100 %. Pre každú kombináciu scenára a obdobia sa vytvorilo 200 000 syntetických ročných hodnôt a osobitne 20 000 realizácií celých období na odhad 95 % predikčných intervalov priemeru a frekvencie prekročenia RI≥50 %. Bootstrapový prístup obmedzuje potrebu extrapolovať parametre ďaleko za krátky historický rad, môže však podhodnotiť budúce bezprecedentné udalosti. Parametrické prispôsobenie GEV sa preto chápe iba ako doplnková diagnostika, nie ako hlavný základ projekcie.

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

Nižšie sú uvedené výsledky vykonanej prognózy.

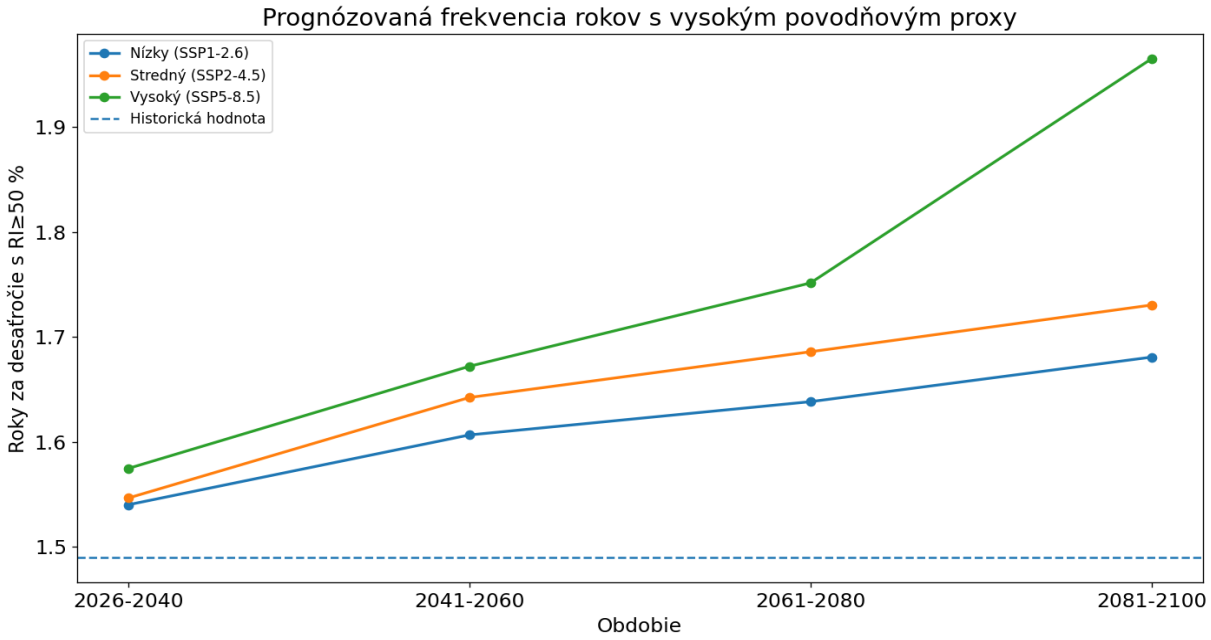
Scenár	Obdobie	Priemerný RI	95 % PI priemeru	P(RI≥50 %)	Roky RI≥50 / desaťročie
Nízky (SSP1-2.6)	2026-2040	21.9	12.0–33.1	15.4%	1.54
Nízky (SSP1-2.6)	2041-2060	22.5	13.5–32.4	16.1%	1.61
Nízky (SSP1-2.6)	2061-2080	22.8	13.9–33.2	16.4%	1.64
Nízky (SSP1-2.6)	2081-2100	23.4	14.1–33.9	16.8%	1.68
Stredný (SSP2-4.5)	2026-2040	22.0	12.0–33.5	15.5%	1.55
Stredný (SSP2-4.5)	2041-2060	22.9	13.7–33.2	16.4%	1.64
Stredný (SSP2-4.5)	2061-2080	23.9	14.4–34.8	16.9%	1.69
Stredný (SSP2-4.5)	2081-2100	25.1	14.9–36.4	17.3%	1.73
Vysoký (SSP5-8.5)	2026-2040	22.2	12.1–33.9	15.7%	1.57
Vysoký (SSP5-8.5)	2041-2060	23.5	14.2–34.2	16.7%	1.67
Vysoký (SSP5-8.5)	2061-2080	25.2	15.2–36.6	17.5%	1.75
Vysoký (SSP5-8.5)	2081-2100	26.7	16.1–38.8	19.7%	1.97

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.



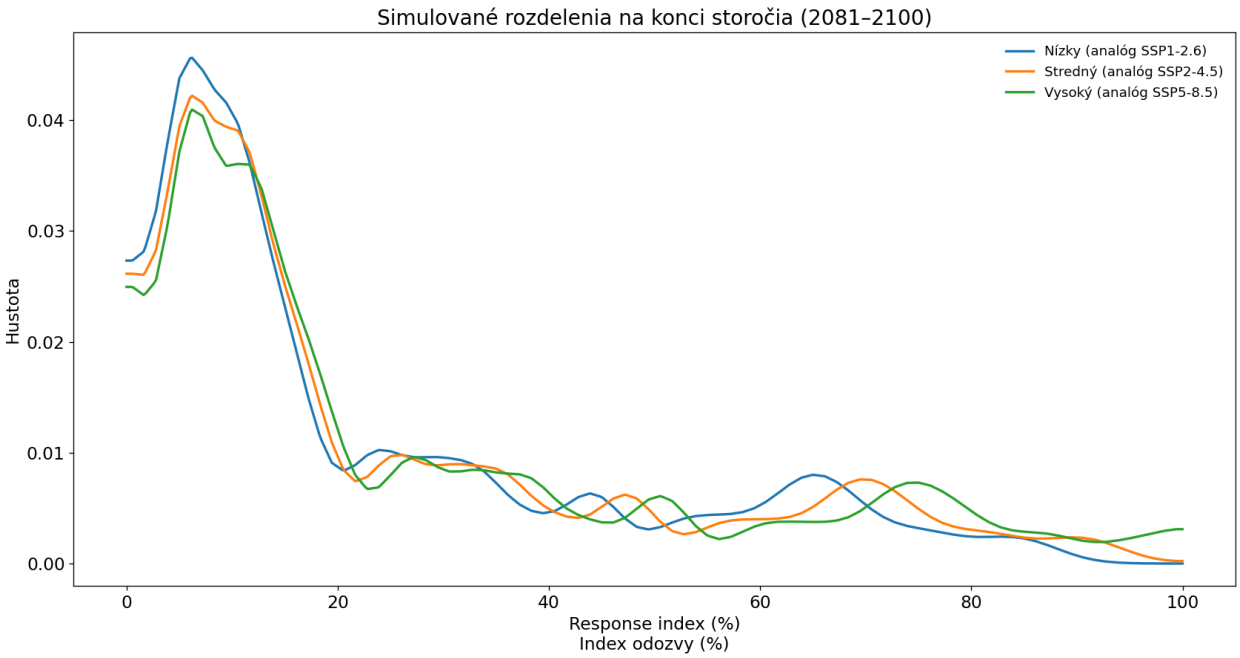
Obr. 3. Prognózovaná priemerná hodnota RI v jednotlivých obdobiach.

V nízkom variante dosahuje priemerný RI na konci storočia približne 23.35 % oproti historickým 21.39 %. Stredný variant vedie k hodnote približne 25.08 % a vysoký k 26.68 %. Ide približne o zvýšenie o 9.2 %, 17.3 % a 24.8 % voči historickému priemeru. Rozdiely medzi scenármi zostávajú v prvých desaťročiach malé a po polovici storočia sa postupne zväčšujú. Pri Snine sa tento projekčný signál premieta na historický rad, v ktorom samotný monotónny trend nebol štatisticky významný.



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

Historická pravdepodobnosť RI≥50 % je 14.9 %, teda približne 1.49 roka za desaťročie. Pre obdobie 2081–2100 simulácia odhaduje približne 1.68, 1.73 a 1.97 roka za desaťročie v nízkom, strednom a vysokom variante. Pri prahu RI≥60 % je historická frekvencia 8.5 %, zatiaľ čo ku koncu storočia model dáva približne 12.5 %, 14.3 % a 15.8 %. Najvýraznejšia zmena sa prejavuje v pravom chvoste rozdelenia, teda pri rokoch s najsilnejším dendrochronologickým povodňovým signálom.



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

V malých horských povodiach sa zosilnenie extrémnych zrážok nemusí prenášať do povodňových prietokov lineárne. Výslednú odozvu podmieňuje predchádzajúce nasýtenie pôdy, intenzita a trvanie zrážok, podiel konvekčných epizód, snehová pokrývka, zamrznutie pôdy, retenčná schopnosť svahov a dolín aj zmeny využívania krajiny. Scenárové škálovanie RI je preto zámerne zjednodušené: jeho výhodou je transparentnosť a explicitné zahrnutie neistoty, nevýhodou absencia lokálne kalibrovaného modelu zrážka–odtok. Výsledky treba chápať ako pravdepodobnostný odhad zmeny podmienok priaznivých pre vysoké povodňové prietoky, nie ako deterministickú predpoveď konkrétnych rokov povodní.

Otepľovanie môže meniť aj sezónnosť mechanizmov vzniku povodní. Väčší podiel dažďa v zimnom období, častejšie epizódy dažďa na sneh a skoršie topenie môžu ovplyvniť zimno-jarný odtok, zatiaľ čo v teplej polovici roka vyššia kapacita atmosféry pre vodnú paru podporuje intenzifikáciu najsilnejších zrážok. Súčasne môžu dlhšie suché obdobia pri niektorých epizódach znižovať počiatočnú vlhkosť pôdy. Budúci režim tak môže byť kontrastnejší. Dôležitým obmedzením je dĺžka historického radu – 47 rokov neposkytuje stabilný základ pre odhad veľmi dlhých periód opakovania. Response index navyše závisí od počtu dostupných koreňov a ich citlivosti. V prípade Sniny historické testy nepreukazujú štatisticky významný monotónny trend ani významnú zmenu režimu, preto budúci scenárový signál treba interpretovať predovšetkým ako dôsledok prijatého klimatického pôsobenia na pozorovanú distribúciu RI.

Ďalším zdrojom neistoty je prenos regionálnej projekcie zrážok na dendrochronologický proxy povodňových prietokov. Model nevyužíva lokálne denné rady zrážok, teploty, snehovej pokrývky ani prietoku, a preto nekalibruje miestnu funkciu zrážka–odtok. Spoľahlivosť by výrazne zvýšilo prepojenie RI s prístrojovými Qmax/Hmax, lokálnymi indexmi Rx1day/Rx5day a indikátormi predchádzajúcej vlhkosti. Následne by bolo možné vytvoriť nestacionárny alebo hierarchický GEV model, ktorého parametre by záviseli od klimatických kovariát 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 Snina je výrazne epizodický a pravostranne asymetrický, pričom v období 1979–2025 nevykazuje štatisticky významný monotónny trend. Lineárny sklon dosahuje +0.285 percentuálneho bodu za rok, ale p=0.210; nevýznamný je aj Mannov–Kendallov test (τ=0.095, p=0.349). Vysoké hodnoty RI≥50 % sa historicky vyskytli v 14.9 % rokov, teda približne 1.49 roka za desaťročie. Regionálna klimatologická literatúra však poukazuje na zosilňovanie vysokých kvantilov extrémnych zrážok v karpatskom regióne počas 21. storočia. Simulácie Monte Carlo preto naznačujú postupný rast priemernej magnitúdy proxy ukazovateľa a frekvencie rokov s vysokým RI, pričom rozdiely medzi scenármi sú malé v blízkom horizonte a výraznejšie po polovici storočia. Vo vysokom variante dosahuje priemerný RI v rokoch 2081–2100 približne 26.7 % oproti historickým 21.4 %. Frekvencia RI≥50 % rastie z približne 1.49 na 1.97 roka za desaťročie a RI≥60 % z 0.85 na približne 1.58 roka za desaťročie. Výsledky podporujú scenár miernej až strednej intenzifikácie najvýznamnejších povodňovo-eróznych udalostí, nie rovnomerného rastu každého ročného maxima. Neistota zostáva značná, preto treba výsledky interpretovať ako scenárové pravdepodobnostné rozsahy. Kalibrácia voči lokálnym Qmax/Hmax a zrážkovým údajom by bola ďalším krokom umožňujúcim lepšie prepojiť dendrochronologický proxy s hydrologickými jednotkami. Napriek obmedzeniam analýza poskytuje kvantitatívny a reprodukovateľný základ pre hodnotenie možnej budúcej zmeny povodňového ohrozenia v okrese Snina.

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, 25.05.2026

Dr hab. Jerzy Cabała

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

PREZES ZARZĄDU
Oddział Górnośląski Polskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi
Katowice, 28.05.2026
dr hab. Jerzy Cabała