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

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 overenie ročného dendrochronologického radu indexu odozvy (response index, RI), vypočítaného ako (počet signálov / počet dostupných vzoriek) × 100 %, ktorý vyjadruje relatívnu intenzitu povodňovo-eróznych udalostí.
- určenie základných štatistických vlastností historického radu vrátane priemeru, mediánu, variability, kvantilov a početnosti prekročenia zvolených prahov RI.
- posúdenie dlhodobého vývoja pomocou lineárnej regresie, Mannovho–Kendallovho testu a analýzy časovej závislosti medzi susednými rokmi.

- vyčlenenie rokov s vysokými hodnotami RI a kvantifikácia frekvencie takýchto udalostí počas dendrochronologicky rekonštruovaného obdobia.
- zostavenie troch úrovní budúceho klimatického pôsobenia podľa publikovaných projekcií extrémnych zrážok pre Slovensko, karpatský región a strednú Európu.
- vykonanie stochastických simulácií Monte Carlo s opakovaným výberom z empirického rozdelenia RI a následným škálovaním podľa klimatických scenárov.
- výpočet budúcich charakteristík RI, predikčných intervalov a pravdepodobností prekročenia vysokých prahov pre obdobia 2026–2040, 2041–2060, 2061–2080 a 2081–2100.
- porovnanie modelovaných budúcich podmienok s historickým záznamom a interpretácia smeru, veľkosti a neistoty očakávaných 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 analýzy je pravdepodobnostne odhadnúť, ako sa môže počas 21. storočia meniť výskyt výrazných povodňových prietokov v malom horskom povodí okresu Liptovský Mikuláš. Základom nie je súvislý prístrojový hydrometrický rad, ale ročný dendrochronologický záznam. Výsledky preto opisujú možné zmeny relatívnej sily povodňového signálu a frekvencie rokov s vysokým RI, nie konkrétne hodnoty Qmax alebo Hmax. RI vyjadruje percentuálny podiel dostupných vzoriek, v ktorých sa v príslušnom roku identifikovala reakcia spojená s erózno-hydrologickou udalosťou. Jeho hodnota závisí od veľkosti vzorky, citlivosti koreňov a zachovania geomorfologického záznamu, preto sa interpretuje ako proxy ukazovateľ a nie ako priama náhrada meraného prietoku.

Analytický postup zahŕňa charakteristiku rozdelenia a časovej variability radu 1981–2025, testovanie monotónneho trendu a možnej zmeny režimu, posúdenie autokorelácie, definovanie pracovných prahov vysokého RI a stochastické projekcie pre štyri budúce horizonty. Nízka, stredná a vysoká modelová dráha reprezentujú rozdielnu intenzitu klimatického pôsobenia. Použitý postup nepredstavuje lokálny dynamický downscaling CMIP6 pre konkrétny profil; ide o scenárové prenesenie publikovaného rozsahu zmien extrémnych zrážok v Karpatoch na empirickú variabilitu dendrochronologického proxy.

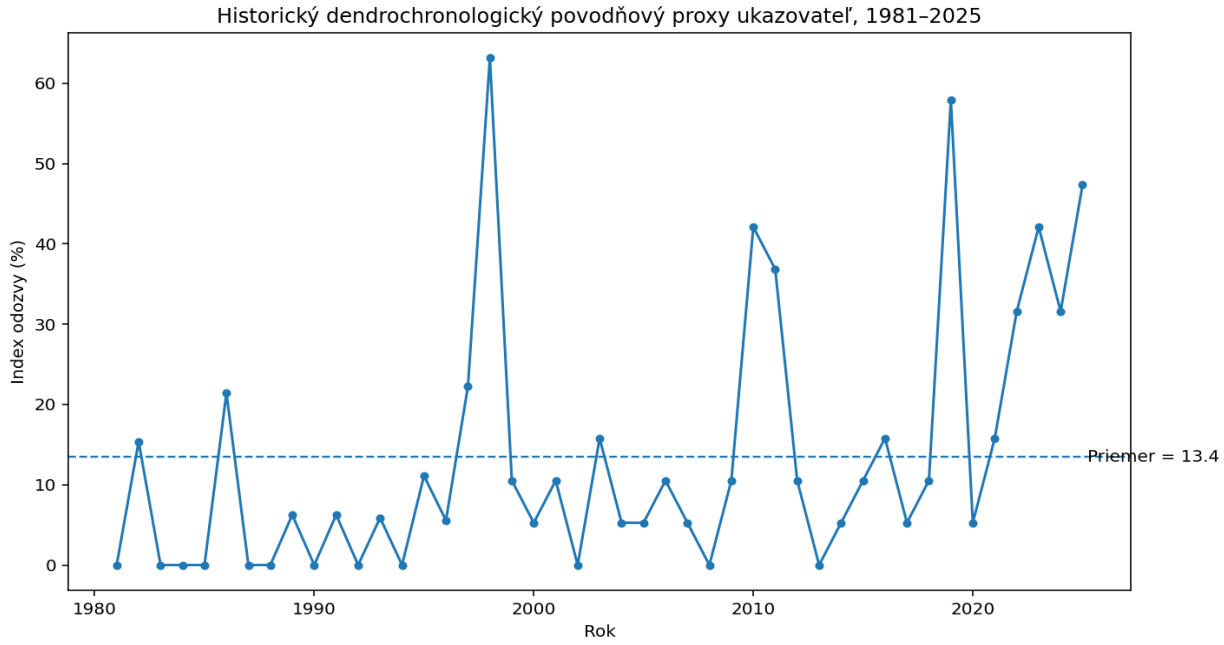
Materiálom dendrochronologickej rekonštrukcie boli odkryté korene živých ihličnatých stromov rastúcich v zónach, kde prúdenie počas povodní eroduje pôdny kryt alebo sediment. Expozícia koreňa mení jeho teplotné, vlhkostné a mechanické podmienky a následne spôsobuje diagnostické zmeny tvorby dreva, takže rok prvého odkrytia možno určiť z postupnosti letokruhov. Anatomické metódy umožňujú datovať takúto reakciu s ročným rozlíšením (Gärtner, 2007; Bodoque et al., 2005). Pri koreňoch Pinus sylvestris sa po expozícii opisujú zmeny šírky prírastku, počtu buniek, podielu neskorého dreva, rozmerov tracheíd skorého dreva a početnosti živicových kanálikov (Rubiales et al., 2008).

Na odber sa prednostne vyberajú korene, ktorých geomorfologická poloha a okolité erózne formy podporujú interpretáciu odkrytia ako dôsledku tečúcej vody. Samotná expozícia koreňa nie je dostatočným dôkazom povodne, keďže môže súvisieť aj s postupnou denudáciou alebo svahovými procesmi; rozhodujúca je preto zhoda viacerých reakcií a ich priestorový kontext. Z koreňov sa pripravujú priečne rezy alebo porovnateľné vzorky, ktoré sa po vysušení a vybrúsení datujú a podľa možnosti krížovo porovnávajú s referenčnou chronológiou. Za signál 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).

Datované reakcie jednotlivých koreňov sa následne previedli na ročný response index, ktorý predstavuje hlavnú premennú štatistického modelovania. Pre každý rok sa RI určil ako (počet vzoriek so signálom / počet vzoriek dostupných v danom roku) × 100 %. Nulová hodnota znamená absenciu reakcie v dostupnom súbore, zatiaľ čo vyššie percento vyjadruje silnejšiu synchronizáciu koreňových odoziev. RI sa tu chápe ako relatívny ukazovateľ rozsahu alebo intenzity erózno-povodňovej udalosti; trendové testy, prahové analýzy a Monte Carlo simulácie preto pracujú s pravdepodobnosťou a variabilitou RI bez jeho umelého prevodu na Hmax alebo Qmax.

Vstupný súbor pre okres Liptovský Mikuláš obsahuje 45 ročných hodnôt z rokov 1981 až 2025. RI sa pohybuje od 0.00 do 63.16 %. Priemer dosahuje 13.44 %, medián 6.25 % a smerodajná odchýlka 16.19 percentuálneho bodu. Dolný kvartil je 0.00 %, horný kvartil 15.79 %, 90. percentil 40.00 % a 95. percentil 46.32 %. Rozdelenie je výrazne pravostranne asymetrické a obsahuje veľký podiel rokov s nulovým alebo nízkym signálom, zatiaľ čo iba niekoľko rokov dosahuje vysoké hodnoty. Takáto štruktúra podporuje použitie neparametrických testov a simulácií vychádzajúcich z empirického rozdelenia.

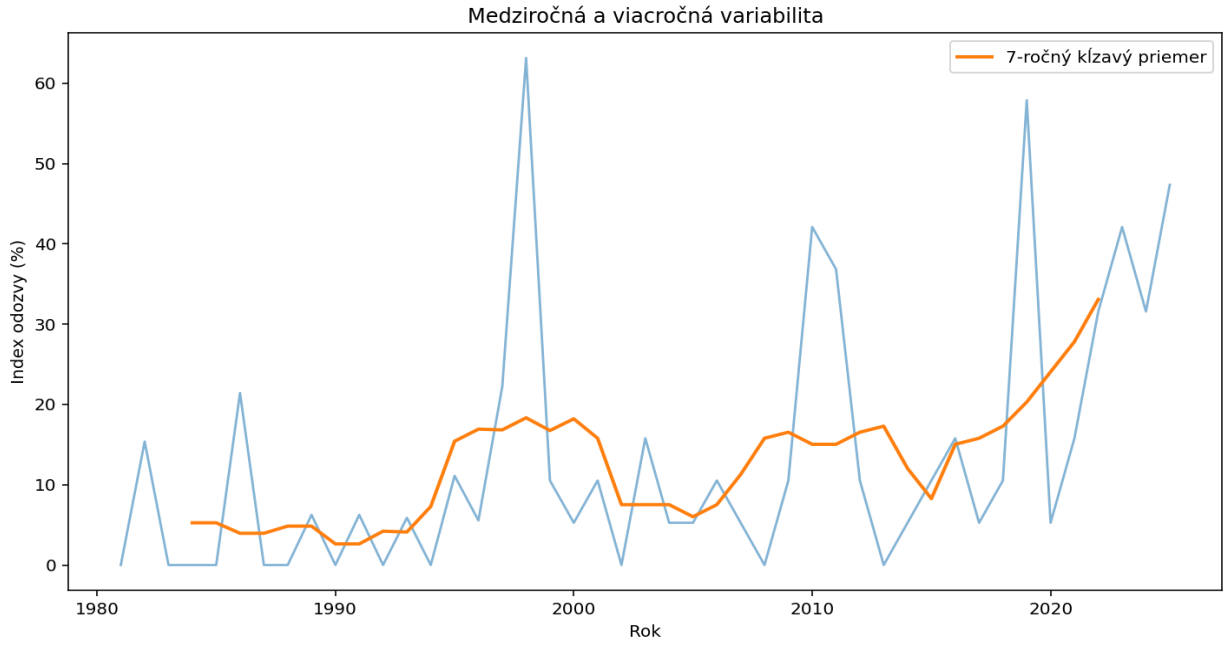


Obr. 1. Historický priebeh dendrochronologického ukazovateľa RI v rokoch 1981–2025.

Hodnoty RI≥30 % sa vyskytli v 8 zo 45 rokov (17.8 %), RI≥40 % v 5 rokoch (11.1 %), RI≥50 % v 2 rokoch (4.4 %) a RI≥60 % v 1 roku (2.2 %). V prepočte na desaťročie ide približne o 1.78; 1.11; 0.44 a 0.22 roka. Ide

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

Lineárna regresia ukazuje kladný sklon +0.569 percentuálneho bodu RI za rok a tento trend je štatisticky významný ($p=0.001$; $R^2=0.213$). Mannov–Kendallov test poskytuje $\tau=0.367$, $p=0.0007$ a Spearmanova korelácia $\rho=0.497$, $p=0.0005$. Na rozdiel od predchádzajúcich analyzovaných lokalít teda rad 1981–2025 poskytuje štatistický dôkaz rastúceho RI. Výsledok treba interpretovať opatrne, pretože RI je proxy ukazovateľ a trend môže byť ovplyvnený aj zmenami dostupnosti alebo citlivosti vzoriek, jeho konzistentnosť vo viacerých testoch však podporuje prítomnosť dlhodobého rastu povodňovo-erózneho signálu.



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

Autokorelácia prvého rádu dosahuje 0.306, čo poukazuje na miernu medziročnú zotrvačnosť. Pettittov test identifikuje najsilnejší bod zmeny približne v roku 1994; výsledok je štatisticky významný ($p=0.027$), čo naznačuje možnú zmenu úrovne radu. Desaťročné priemery sa zvyšujú od približne 4.8 % v najslabšom desaťročí po 28.9 % v období 2020–2025. V tomto prípade sa teda prirodzená viacročná variabilita kombinuje s merateľným rastovým signálom. Regionálne projekcie pre Karpaty zároveň naznačujú zosilňovanie vysokých kvantilov extrémnych zrážok aj pri zložitejšom vývoji sezónnych úhrnov. 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).

Pre malé horské povodie sú rozhodujúce krátkodobé aj viacdenné zrážkové extrémy, keďže odtoková reakcia býva rýchla a nelineárna. Na prenos klimatického signálu sa preto 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 tvrdenie o priamom fyzikálnom pomere medzi zrážkami a RI, ale transparentný scenárový experiment, ktorým sa klimatické pôsobenie prenáša cez pozorovanú variabilitu proxy ukazovateľa.

Monte Carlo model bol zostavený semi-parametricky. V každej iterácii sa náhodne vyberala hodnota RI z empirického rozdelenia 45 historických rokov, čím sa zachovala pozorovaná asymetria, výskyt nulových hodnôt aj pravý chvost bez predpokladu normality. Vybraná hodnota sa násobila klimatickým koeficientom, pričom jeho neistota bola reprezentovaná náhodným výberom z normálneho rozdelenia so smerodajnou odchýlkou 0,04 okolo scenárovej hodnoty. Výsledky boli obmedzené na rozsah 0–100 %. Pre každú kombináciu scenára a obdobia sa vytvorilo 200 000 syntetických ročných hodnôt a samostatne 20 000 realizácií celých období na určenie 95 % predikčných intervalov priemeru a frekvencie prekročenia RI≥50 %. Bootstrap obmedzuje potrebu extrapolovať parametre ďaleko za krátky historický rad, no môže podhodnotiť budúce bezprecedentné udalosti. Parametrické GEV prispôsobenie sa preto chápe iba ako doplnková diagnostika, nie ako hlavný základ prognózy.

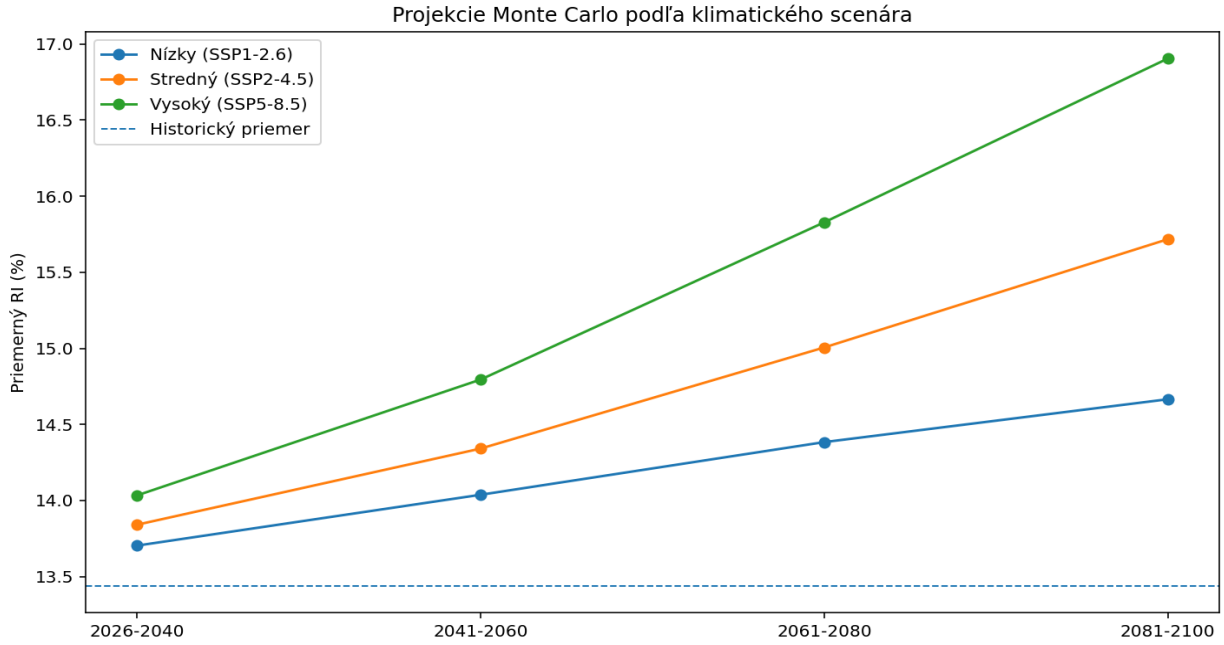
3. *Výsledky výskumu vo výpočtovej forme spolu s potrebnou dokumentáciou vo forme tabuliek, grafov a obrázkov*

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	13.7	6.3–22.7	4.9%	0.49
Nízky (SSP1-2.6)	2041-2060	14.0	7.5–22.1	5.4%	0.54
Nízky (SSP1-2.6)	2061-2080	14.4	7.4–22.6	5.8%	0.58
Nízky (SSP1-2.6)	2081-2100	14.7	7.7–22.9	6.3%	0.63
Stredný (SSP2-4.5)	2026-2040	13.8	6.3–22.9	5.0%	0.50
Stredný (SSP2-4.5)	2041-2060	14.3	7.6–22.6	5.8%	0.58
Stredný (SSP2-4.5)	2061-2080	15.0	7.9–23.4	6.7%	0.67
Stredný (SSP2-4.5)	2081-2100	15.7	8.3–24.8	8.1%	0.81
Vysoký (SSP5-8.5)	2026-2040	14.0	6.5–23.0	5.3%	0.53

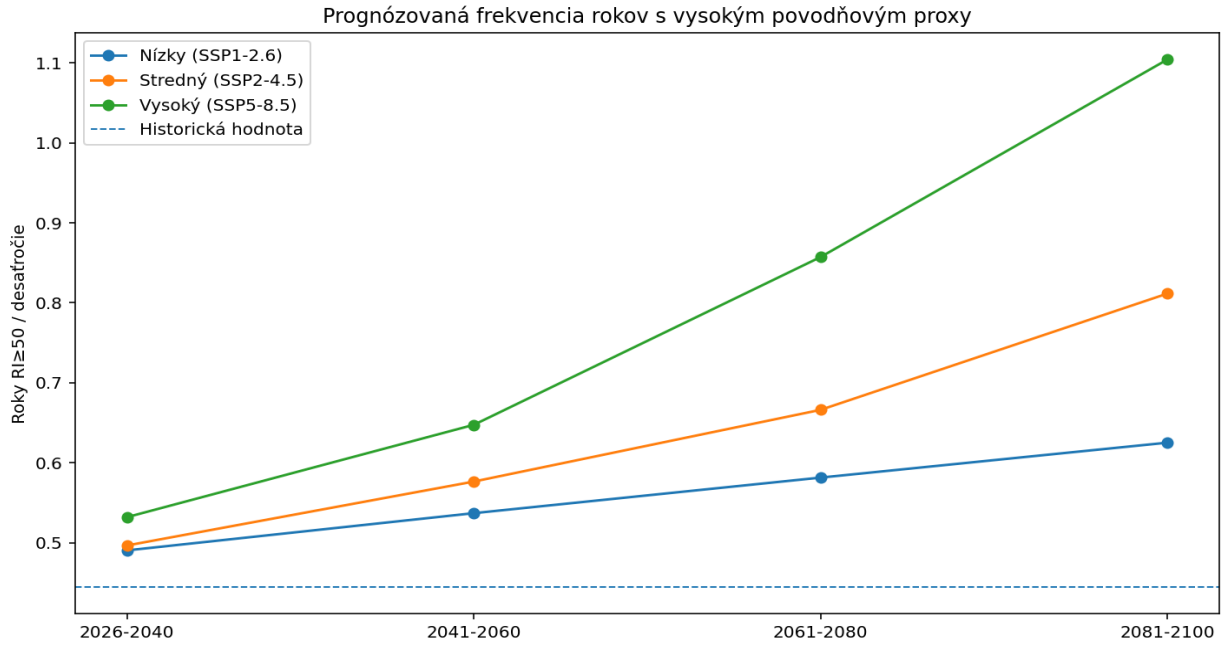
Vysoký (SSP5-8.5)	2041-2060	14.8	7.7–23.2	6.5%	0.65
Vysoký (SSP5-8.5)	2061-2080	15.8	8.4–24.8	8.6%	0.86
Vysoký (SSP5-8.5)	2081-2100	16.9	8.8–26.4	11.0%	1.10

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.



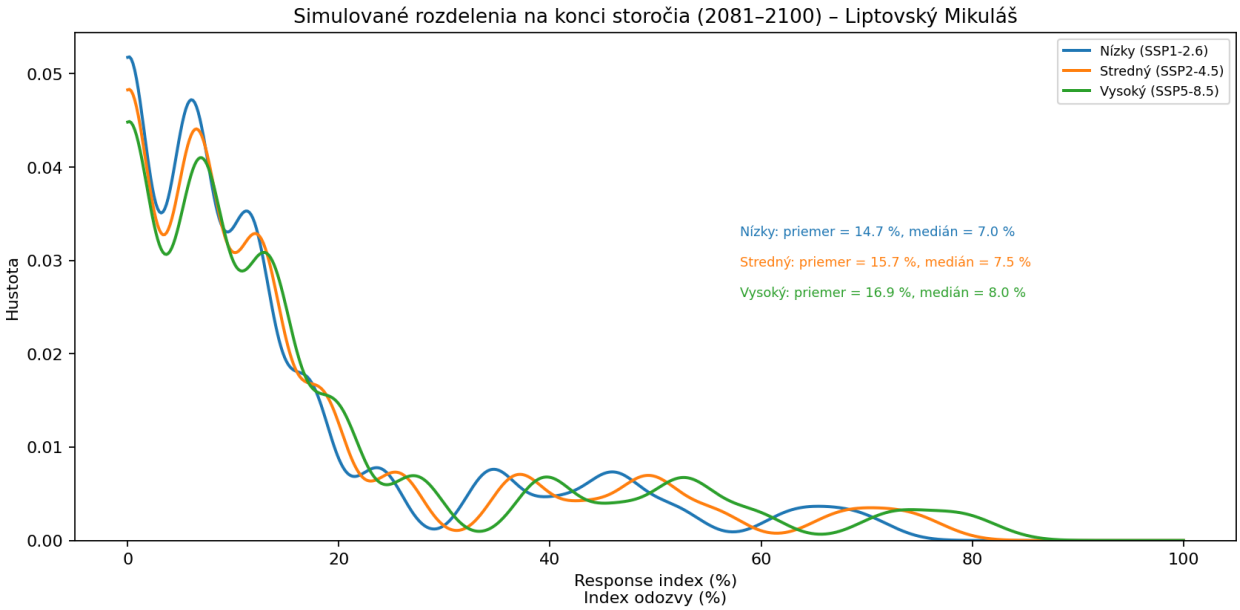
Obr. 3. Prognózovaná priemerná hodnota RI v jednotlivých obdobiach.

V nízkom variante dosahuje priemerný RI na konci storočia približne 14.67 % oproti historickým 13.44 %. Stredný variant vedie k hodnote približne 15.72 % a vysoký k 16.90 %. Ide približne o zvýšenie o 9.2 %, 17.0 % a 25.8 % voči historickému priemeru. Rozdiely medzi scenármi zostávajú v prvých desaťročiach relatívne malé a po polovici storočia sa zväčšujú; na tejto lokalite sa však klimatický signál prekrýva s už pozorovaným historickým rastom RI.



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

Historická pravdepodobnosť RI≥50 % je 4.4 %, teda približne 0.44 roka za desaťročie. Pre obdobie 2081–2100 simulácia odhaduje približne 0.63, 0.81 a 1.10 roka za desaťročie v nízkom, strednom a vysokom variante. Pri prahu RI≥60 % je historická frekvencia 2.2 %, zatiaľ čo ku koncu storočia model dáva približne 4.2 %, 4.5 % a 5.3 %. Zmena je najvýraznejšia v pravom chvoste rozdelenia, teda pri rokoch s najsilnejším dendrochronologickým povodňovým signálom.



Obr. 5. Simulované rozdelenia hodnôt indexu odozvy (RI) pre obdobie 2081–2100 v scenári nízkom, strednom a vysokom – Liptovský Mikuláš. V legende sú uvedené scenáre a v grafe priemerné a mediánové hodnoty RI.

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

V malých horských povodiach sa rast intenzity extrémnych zrážok nemusí premietať do povodňových prietokov lineárne. Výslednú odozvu ovplyvňuje predchádzajúce nasýtenie pôdy, intenzita a trvanie zrážok, konvekčný charakter epizód, snehová pokrývka, zamrznutie pôdy, retenčné vlastnosti svahov a dolín aj zmeny využívania krajiny. Scenárové škálovanie RI je preto zámerne zjednodušené: jeho výhodou je transparentnosť a explicitná propagácia neistoty, nevýhodou absencia lokálne kalibrovaného modelu zrážka–odtok. Projekcie treba chápať ako pravdepodobnostný odhad zmeny podmienok priaznivých pre vysoké povodňové prietoky, nie ako predpoveď konkrétnych rokov povodní.

Otepľovanie môže meniť aj sezónnosť povodňových mechanizmov. Väčší podiel dažďa v zimnom období, epizódy dažďa na sneh a skoršie topenie môžu meniť zimno-jarný odtok, zatiaľ čo v teplej časti roka vyššia kapacita atmosféry pre vodnú paru podporuje intenzifikáciu najsilnejších zrážok. Súčasne môžu dlhšie suché obdobia znižovať počiatočnú vlhkosť pri časti epizód. Budúci režim tak môže byť kontrastnejší. Osobitným obmedzením je dĺžka radu – 45 rokov neposkytuje stabilný základ pre odhad veľmi dlhých periód opakovania. Navyše response index závisí od počtu dostupných koreňov a ich citlivosti. V Liptovskom Mikuláši je však dôležité, že historický rast RI aj Pettittov test vychádzajú ako štatisticky významné, čo odlišuje túto lokalitu od prípadov, kde budúci scenárový signál nie je podporený historickým trendom.

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. Výrazné zvýšenie spoľahlivosti by prinieslo 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 Liptovský Mikuláš je výrazne epizodický, ale na rozdiel od predchádzajúcich lokalít vykazuje v období 1981–2025 štatisticky významný rast. Lineárny trend dosahuje +0.569 percentuálneho bodu za rok (p=0.001), pričom rast potvrdzujú aj Mannov–Kendallov a Spearmanov test. RI≥50 % sa historicky vyskytol v 4.4 % rokov. Pettittov test zároveň naznačuje významnú zmenu úrovne radu približne okolo roku 1994. Regionálne klimatické projekcie pre Karpaty poukazujú na ďalšie zosilňovanie vysokých kvantilov extrémnych zrážok. Monte Carlo preto naznačuje rast priemerného RI aj frekvencie rokov s vysokým povodňovým signálom; vo vysokom scenári dosahuje priemerný RI v rokoch 2081–2100 približne 16.9 % oproti historickým 13.4 %. Frekvencia RI≥50 % sa vo vysokom variante zvyšuje z približne 0.44 na 1.10 roka za desaťročie. Výsledky podporujú hypotézu rastúcej aktivity najsilnejších povodňovo-eróznych udalostí, pričom neistota zostáva významná a výsledky treba prezentovať ako scenárové pravdepodobnostné rozsahy. Kalibrácia voči lokálnym Qmax/Hmax a zrážkovým údajom by umožnila presnejšie oddeliť klimatický signál od vlastností dendrochronologického záznamu.

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
Katowice, 31.07.2024
Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi
dr hab. Jerzy Cabała