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

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, overenie a usporiadanie ročného dendrochronologického radu indexu odozvy (response index, RI), vypočítaného ako (počet signálov / počet dostupných vzoriek) × 100 %, ktorý sa používa ako relatívne proxy intenzity povodňovo-eróznych udalostí.
- zostavenie súboru opisných štatistík historického radu so zameraním na stredné hodnoty, rozptyl, kvantily a početnosť rokov prekračujúcich zvolené prahy RI.
- testovanie časového smerovania pomocou lineárnej regresie a Mannovho–Kendallovho testu, doplnené Spearmanovou koreláciou a kontrolou autokorelácie prvého rádu.

- vyhľadanie rokov s výrazným povodňovým signálom a prepočet ich výskytu na relatívnu početnosť a očakávaný počet udalostí za desaťročie.
- zostavenie troch stupňov klimatického škálovania podľa publikovaných projekcií vývoja extrémnych zrážok pre Slovensko, Karpaty a strednú Európu.
- vykonanie semi-parametrických simulácií Monte Carlo, v ktorých sa empirické historické hodnoty RI opakovane bootstrapovo vzorkujú a upravujú scenárovým klimatickým koeficientom.
- odvodenie budúcich priemerov RI, predikčných intervalov a pravdepodobností prekročenia vysokých prahov pre horizonty 2026–2040, 2041–2060, 2061–2080 a 2081–2100.
- konfrontácia simulovaných výsledkov s historickým obdobím a posúdenie pravdepodobného smeru, rozsahu a neistoty 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

Úlohou analýzy je pravdepodobnostne odhadnúť možné zmeny výskytu silných povodňových prietokov počas 21. storočia v malom horskom povodí okresu Prešov. Východiskom je každoročný dendrochronologický záznam, nie súvislé prístrojové merania prietoku alebo vodného stavu. Modelované výsledky preto vyjadrujú zmenu relatívnej intenzity povodňového signálu a frekvencie rokov s vysokým RI, nie konkrétne Qmax v m^3/s alebo Hmax v cm. Response index predstavuje percentuálny podiel dostupných vzoriek, v ktorých bol v príslušnom roku identifikovaný erózno-hydrologický signál; jeho hodnota závisí aj od veľkosti vzorky, citlivosti koreňov a zachovania geomorfologického záznamu. Z tohto dôvodu sa RI interpretuje ako proxy ukazovateľ a nie ako náhrada priameho hydrometrického merania.

Spracovanie pozostáva z opisu rozdelenia a časovej variability radu 1982–2025, overenia monotónneho trendu a možného bodu zmeny, kontroly medziročnej závislosti, určenia pracovných prahov vysokého RI a následného stochastického modelovania štyroch budúcich období. Nízka, stredná a vysoká dráha predstavujú rozdielne úrovne klimatického pôsobenia. Nejde o lokálny dynamický downscaling jedného modelového gridu CMIP6 pre skúmaný profil, ale o scenárové prenesenie publikovaného rozsahu zmien extrémnych zrážok v karpatskom priestore na empirickú variabilitu dendrochronologického proxy.

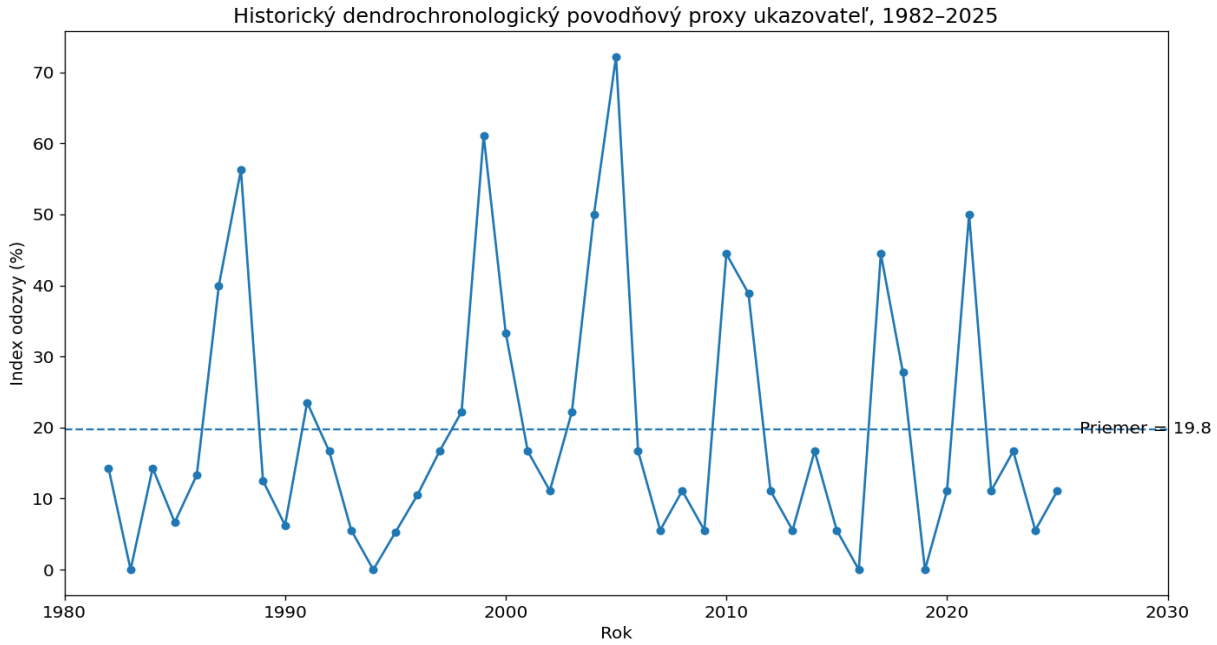
Dendrochronologický materiál tvoria korene živých ihličnatých stromov, ktoré boli odkryté eróziou pôdy alebo sedimentu v zónach ovplyvňovaných povodňovým prúdením. Po prvom odkrytí sa menia teplotné, vlhkostné a mechanické podmienky rastu koreňa, čo sa môže prejaviť diagnostickou zmenou anatómie a šírky ročných prírastkov. Takéto zmeny umožňujú určiť rok expozície s ročným rozlíšením (Gärtner, 2007; Bodoque et al., 2005). Pri Pinus sylvestris boli po odkrytí dokumentované zmeny šírky prírastkov a počtu buniek, podielu neskorého dreva, parametrov tracheíd skorého dreva a početnosti živicových kanálikov (Rubiales et al., 2008).

Pri terénnom výbere sa uprednostňujú korene, ktorých poloha voči korytu, eróznym formám a sedimentom podporuje väzbu expozície na účinok tečúcej vody. Samotné odkrytie koreňa nie je jednoznačným dôkazom povodne, keďže môže vzniknúť aj pri pomalej denudácii alebo iných geomorfologických procesoch; rozhodujúca je preto synchronizácia reakcií viacerých koreňov a ich priestorový kontext. Z odobratého materiálu sa pripravujú priečne rezy alebo porovnateľné vzorky, ktoré sa po vysušení a vybrúsení datujú a podľa možností krížovo porovnávajú s referenčnou chronológiou. Pri

identifikácii signálneho roku sa kontrolujú chýbajúce a falošné letokruhy aj neistota sezóny poškodenia (Gärtner, 2007; Rubiales et al., 2008).

Datované reakcie jednotlivých koreňov sa sumarizujú do ročného response indexu, ktorý je základnou premennou ďalšieho štatistického modelovania. Pre rok t sa používa vzťah RI = (počet vzoriek so signálom / počet vzoriek dostupných v danom roku) × 100 %. Nulová hodnota znamená, že v dostupnom materiáli nebola zistená reakcia, zatiaľ čo rastúce percento vyjadruje vyššiu synchronizáciu dendrogeomorfologických signálov. V tejto štúdii sa RI chápe ako relatívny ukazovateľ rozsahu alebo sily erózno-povodňovej udalosti; trendové testy, prahové analýzy a Monte Carlo simulácie preto pracujú s jeho pravdepodobnosťou a variabilitou bez neodôvodneného prepočtu na Hmax alebo Qmax.

Vstupný súbor pre okres Prešov obsahuje 44 ročných hodnôt z rokov 1982 až 2025. RI sa pohybuje od 0.00 do 72.22 %. Priemer dosahuje 19.76 %, medián 13.81 % a smerodajná odchýlka 18.03 percentuálneho bodu. Dolný a horný kvartil sú 6.08 a 24.59 %, 90. percentil dosahuje 48.33 % a 95. percentil 55.31 %. Rozdelenie je pravostranne asymetrické: dominujú nízke až stredné hodnoty, ale rad obsahuje aj niekoľko výrazných epizód s RI nad 50 %. Takáto distribúcia odôvodňuje použitie neparametrických testov a bootstrapových simulácií vychádzajúcich z empirického rozdelenia.

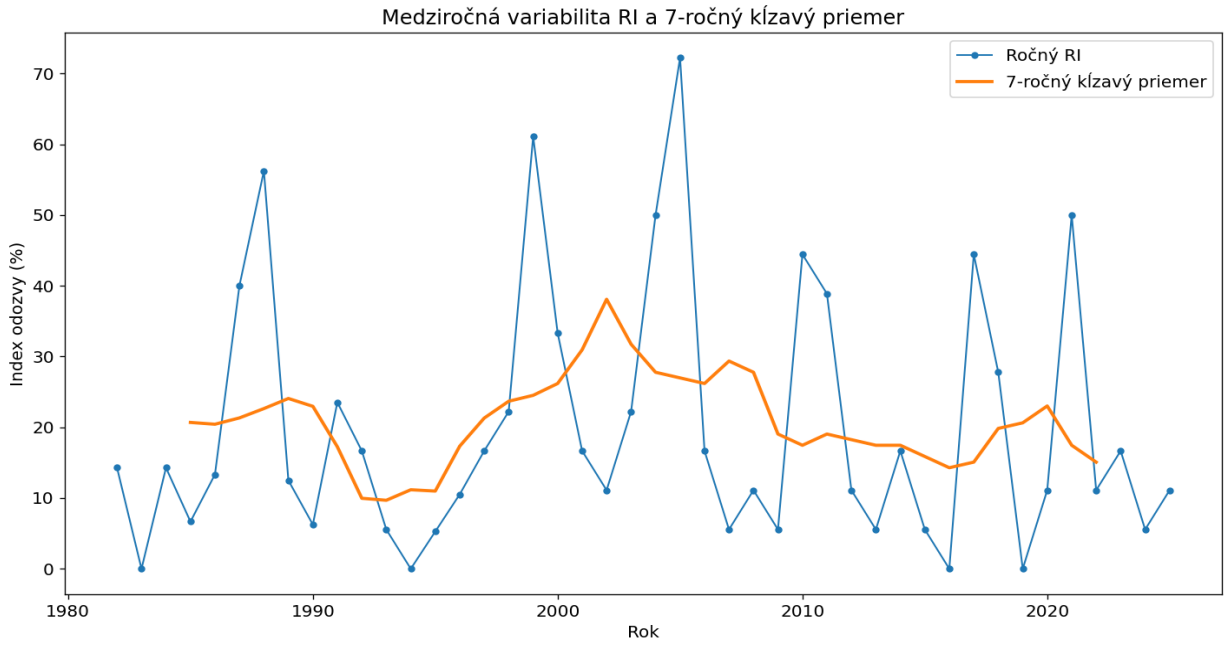


Obr. 1. Historický priebeh dendrochronologického ukazovateľa RI v rokoch 1982–2025.

Hodnoty RI≥30 % sa vyskytli v 10 zo 44 rokov (22.7 %), RI≥40 % v 8 rokoch (18.2 %), RI≥50 % v 5 rokoch (11.4 %) a RI≥60 % v 2 rokoch (4.5 %). V prepočte na desaťročie ide približne o 2.27; 1.82; 1.14 a 0.45 roka.

Uvedené prahy slúžia na vnútorné porovnanie historického radu s projekciami a nepredstavujú oficiálne hydrologické stupne povodní.

Lineárna regresia poskytuje takmer nulový kladný sklon +0.012 percentuálneho bodu RI za rok a trend je jednoznačne štatisticky nevýznamný ($p=0.955$; $R^2=0.000$). Mannov–Kendallov test dáva $\tau=-0.019$, $p=0.863$ a Spearmanova korelácia $\rho=-0.028$, $p=0.856$. Historický rad 1982–2025 teda nevykazuje dôkaz dlhodobého monotónneho rastu ani poklesu RI. Budúca scenárová zmena je preto v tomto prípade odvodená predovšetkým z klimatického pôsobenia, nie z extrapolácie historického trendu.



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

Autokorelácia prvého rádu dosahuje 0.271, čo poukazuje na miernu medziročnú zotrvačnosť. Pettittov test označuje ako najsilnejšieho kandidáta na zmenu úrovne približne rok 1996, výsledok je však nevýznamný ($p\approx0.991$). Priemery v jednotlivých častiach radu kolíšu bez jednoznačného dlhodobého smerovania; najvyšší desaťročný priemer pripadá na roky 2000–2009 (približne 24.4 %), zatiaľ čo po roku 2020 je priemer približne 17.6 %. Regionálne klimatické projekcie pre Karpaty pritom naznačujú, že vysoké kvantily extrémnych zrážok môžu v priebehu 21. storočia zosilnieť aj pri zložitejšom sezónnom vývoji priemerných úhrnov. Gaál et al. (2014) uvádzajú pre koniec storočia rast 50-ročných extrémov, v zime priemerne približne o 22–25 %. Podobný smer zmien extrémnych ukazovateľov opisujú Bartholy a Pongrácz (2010), kým výsledky EURO-CORDEX ukazujú výrazné otepľovanie a priestorovo diferencovanú odozvu zrážok (Skarbit et al., 2022).

V malom horskom povodí môžu povodňovú odozvu určovať krátke intenzívne lejaky aj viacdenné zrážkové epizódy, pretože transformácia zrážky na odtok je rýchla a často nelineárna. Klimatický signál bol preto prenesený tromi škálovacími trajektóriami. Nízky variant zvyšuje mierku RI 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. Hodnota 25 % na konci storočia zodpovedá rádu zmien uvádzanému pre extrémne zrážky v karpatskom regióne. Koeficienty sa nechápu ako priamy fyzikálny pomer zrážka–RI, ale ako transparentný scenárový experiment umožňujúci preniesť klimatické pôsobenie cez pozorovanú variabilitu proxy.

Stochastický model Monte Carlo má semi-parametrickú konštrukciu. V každej iterácii sa náhodne vyberá hodnota z empirického rozdelenia 44 historických RI, čím sa zachováva pozorovaná asymetria, nulové hodnoty aj pravý chvost bez predpokladu normality. Vybraná hodnota sa násobí scenárovým klimatickým koeficientom, ktorého neistota sa reprezentuje normálnym rozdelením so smerodajnou odchýlkou 0,04 okolo príslušnej scenárovej hodnoty; výsledky sú obmedzené na interval 0–100 %. Pre každú kombináciu scenára a obdobia sa generuje 200 000 syntetických ročných hodnôt a 20 000 realizácií celých období na odhad 95 % predikčných intervalov priemeru a frekvencie prekročenia RI≥50 %. Bootstrap znižuje potrebu extrapolovať parametre za rozsah krátkeho historického radu, môže však podhodnotiť budúce bezprecedentné extrémy; parametrické GEV prispôsobenie preto slúži iba ako doplnková diagnostika.

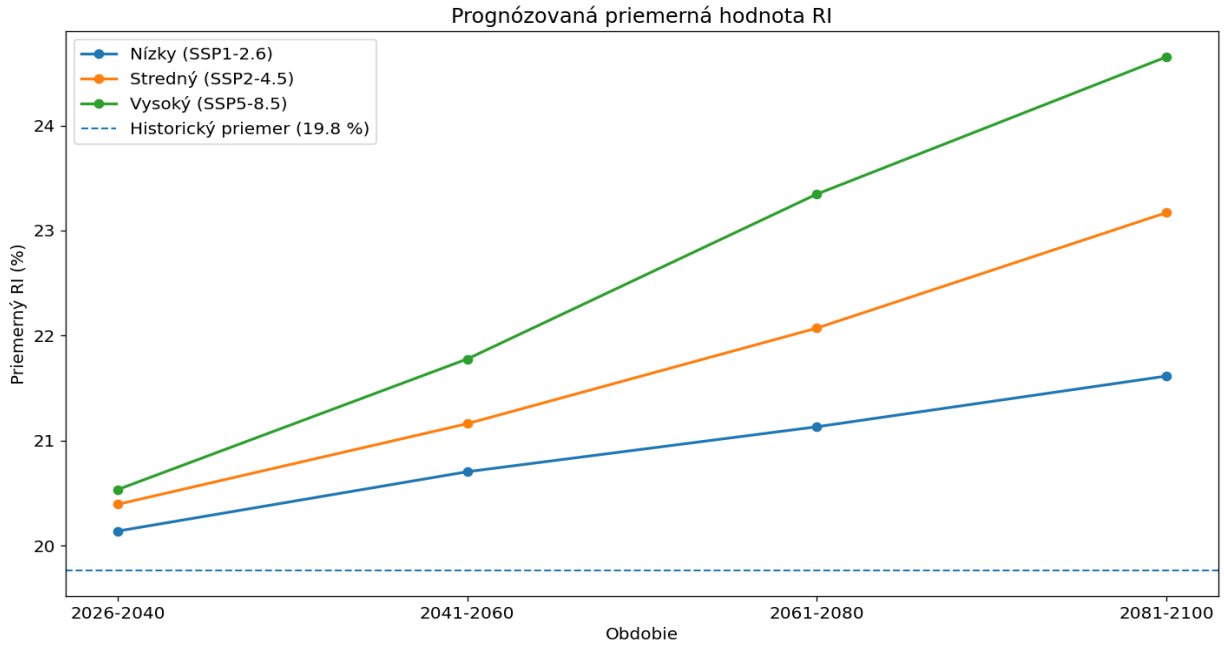
3. *Výsledky výskumu vo výpočtovej forme spolu s potrebnou dokumentáciou vo forme tabuliek, grafov a obrázkov*

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	20.1	11.6–30.2	10.0%	1.00
Nízky (SSP1-2.6)	2041-2060	20.7	13.1–29.4	11.0%	1.10
Nízky (SSP1-2.6)	2061-2080	21.1	13.4–30.1	11.6%	1.16
Nízky (SSP1-2.6)	2081-2100	21.6	13.6–30.7	12.3%	1.23
Stredný (SSP2-4.5)	2026-2040	20.4	11.9–30.3	10.3%	1.03
Stredný (SSP2-4.5)	2041-2060	21.2	13.3–30.1	11.5%	1.15
Stredný (SSP2-4.5)	2061-2080	22.1	13.9–31.3	13.4%	1.34
Stredný (SSP2-4.5)	2081-2100	23.2	14.6–33.0	15.4%	1.54
Vysoký (SSP5-8.5)	2026-2040	20.5	12.0–30.6	10.7%	1.07
Vysoký (SSP5-8.5)	2041-2060	21.8	13.8–31.0	12.6%	1.26

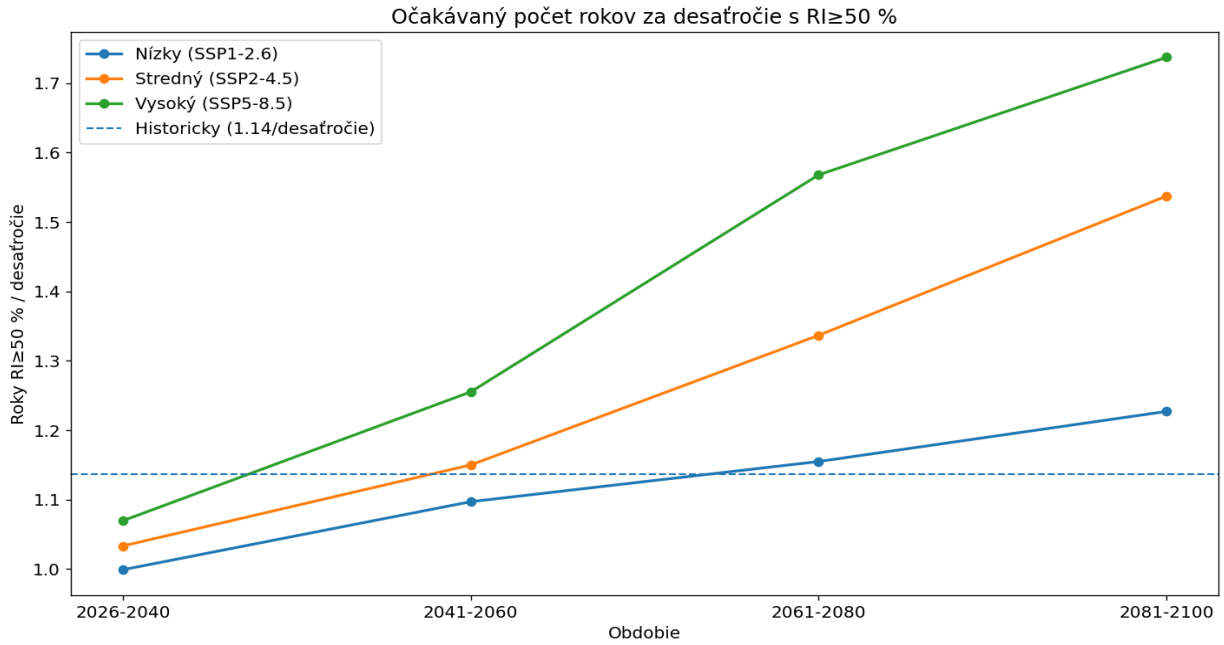
Vysoký (SSP5-8.5)	2061-2080	23.3	14.8–33.2	15.7%	1.57
Vysoký (SSP5-8.5)	2081-2100	24.7	15.7–35.1	17.4%	1.74

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.



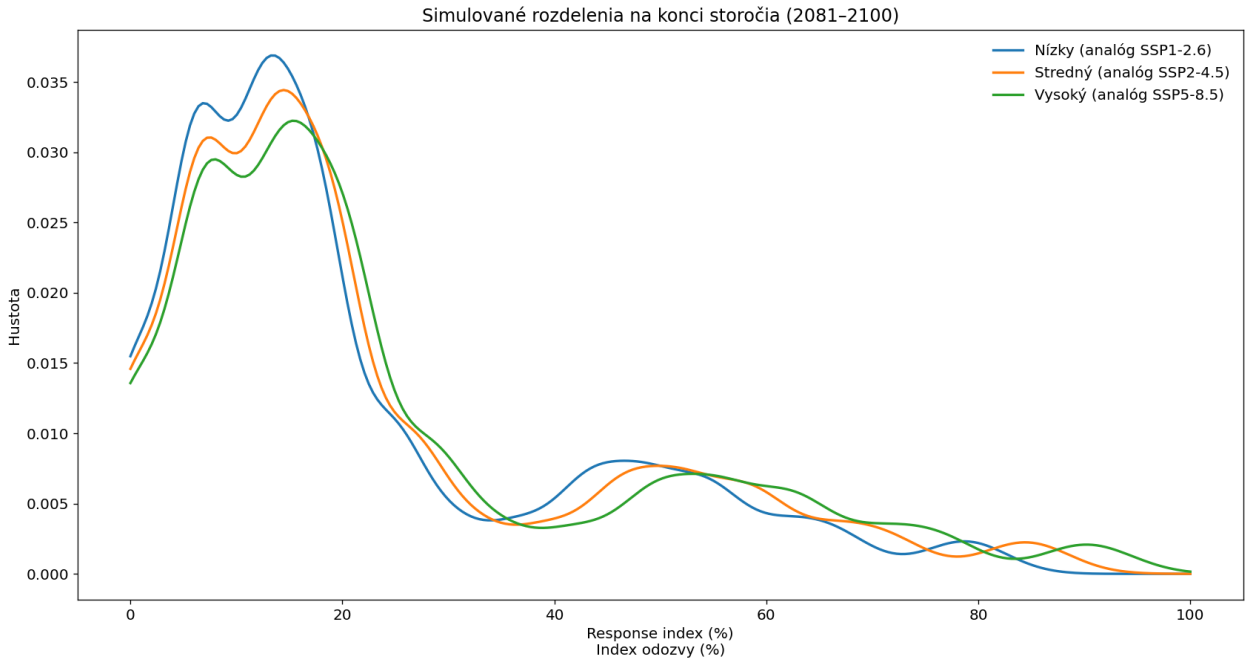
Obr. 3. Prognózovaná priemerná hodnota RI v jednotlivých obdobiach.

V nízkom variante dosahuje priemerný RI na konci storočia približne 21.61 % oproti historickým 19.76 %. Stredný variant vedie k hodnote približne 23.17 % a vysoký k 24.65 %. V relatívnom vyjadrení ide približne o zvýšenie o 9.4 %, 17.2 % a 24.7 % voči historickému priemeru. Rozdiely medzi scenármi sú v prvom horizonte malé a výraznejšie sa rozchádzajú po polovici storočia; keďže historický trend v Prešove je prakticky nulový, tento nárast treba interpretovať ako scenárový dôsledok zosilnenia klimatického pôsobenia.



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

Historická pravdepodobnosť RI≥50 % je 11.4 %, teda približne 1.14 roka za desaťročie. Pre obdobie 2081–2100 model odhaduje približne 1.23, 1.54 a 1.74 roka za desaťročie v nízkom, strednom a vysokom variante. Pri prahu RI≥60 % je historická frekvencia 4.5 %, zatiaľ čo na konci storočia simulácia dáva približne 6.3 %, 7.8 % a 10.9 %. Výsledky tak poukazujú predovšetkým na postupné zosilnenie pravého chvosta rozdelenia a rast početnosti rokov s veľmi vysokým dendrochronologickým povodňovým signálom.



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

Vzťah medzi intenzitou extrémnych zrážok a povodňovým prietokom v malom horskom povodí nie je lineárny. Výslednú odozvu modifikuje počiatočná vlhkosť pôdy, trvanie a intenzita dažďa, konvekčný charakter epizódy, snehová pokrývka, zamrznutie pôdy, retenčné vlastnosti svahov a doliny aj zmeny využívania krajiny. Použité škálovanie RI je preto zámerne jednoduché: jeho prednosťou je transparentnosť a explicitné zahrnutie neistoty, nevýhodou absencia lokálne kalibrovaného modelu zrážka–odtok. Projekcie treba chápať ako pravdepodobnostný odhad posunu podmienok priaznivých pre vysoké povodňové prietoky, nie ako predpoveď konkrétnych rokov povodní.

Klimatické otepľovanie môže meniť aj sezónnu štruktúru povodňových mechanizmov. Vyšší podiel dažďa počas zimy, epizódy dažďa na sneh a skoršie topenie môžu meniť zimno-jarný odtok, zatiaľ čo v teplej časti roka rastúca kapacita atmosféry pre vodnú paru podporuje intenzifikáciu najsilnejších zrážok. Súčasne môžu dlhšie suché intervaly znižovať počiatočné nasýtenie pri časti epizód, takže budúci režim môže byť kontrastnejší. Dôležitým obmedzením je aj dĺžka radu: 44 rokov nestačí na stabilný odhad veľmi dlhých periód opakovania. Response index navyše závisí od počtu dostupných koreňov a ich citlivosti, preto jeho zmeny nemožno automaticky stotožňovať s rovnakou percentuálnou zmenou prietoku.

Ďalšia neistota vzniká pri prenose regionálnych projekcií zrážok na dendrochronologický proxy povodňovej aktivity. Model nepoužíva lokálne denné rady zrážok, teploty, snehovej pokrývky ani prietoku

a nekalibruje preto miestnu funkciu zrážka–odtok. Spoľahlivosť budúcej analýzy by zvýšilo prepojenie RI s prístrojovými Qmax/Hmax, lokálnymi indexmi Rx1day a Rx5day a ukazovateľmi predchádzajúcej vlhkosti. Takéto údaje by umožnili vytvoriť nestacionárny alebo hierarchický GEV model s klimatickými kovariátmi z ansámblu CMIP6/EURO-CORDEX a oddeliť vplyv klimatického trendu od vlastností dendrochronologického záznamu.

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 Prešov je epizodický a pravostranne asymetrický, pričom v rokoch 1982–2025 nevykazuje štatisticky významné monotónne smerovanie. Lineárny sklon je iba +0.012 percentuálneho bodu za rok ($p=0.955$) a nevýznamný výsledok poskytuje aj Mannov–Kendallov test ($\tau=-0.019$; $p=0.863$). Pettittov test síce označuje približne rok 1996 ako najsilnejšieho kandidáta na zmenu úrovne, ale bez štatistickej významnosti ($p\approx0.991$). Historická frekvencia rokov s RI≥50 % dosahuje 11.4 %, teda približne 1.14 roka za desaťročie. Monte Carlo projekcie ukazujú pri prijatom klimatickom škálovaní postupný rast priemerného RI aj početnosti vysokých hodnôt, pričom do rokov 2081–2100 priemerný RI dosahuje približne 21.61 %, 23.17 % a 24.65 % v nízkom, strednom a vysokom variante. Očakávaný počet rokov s RI≥50 % sa v rovnakom horizonte zvyšuje približne na 1.23, 1.54 a 1.74 roka za desaťročie. Najvýraznejšia zmena sa prejavuje v pravom chvoste rozdelenia, teda pri najsilnejších dendrochronologických povodňových signáloch. Keďže historický rad neposkytuje dôkaz rastúceho trendu, budúci nárast je scenárovým výsledkom prenesenia regionálne projektovaného zosilnenia extrémnych zrážok a nemá sa chápať ako jednoduchá extrapolácia minulosti. Výsledky naznačujú možný rast povodňového ohrozenia v priebehu 21. storočia, jeho veľkosť však zostáva podmienená neistotou klimatických projekcií, krátkosťou dendrochronologického radu a nepriamou povahou RI. Pre praktické hodnotenie rizika je preto vhodné kombinovať dendrochronologické proxy s lokálnymi hydrometrickými a zrážkovými údajmi a s hydrologickým modelovaním.

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, 19.05.2026

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

Katowice, 19.05.2026

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

dr hab. Jerzy Cabała