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

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

- kontrola úplnosti a chronologické usporiadanie ročného dendrochronologického indexu odozvy (response index, RI), vyjadreného vzťahom (počet zaznamenaných signálov / počet vzoriek dostupných v roku) × 100 %, ktorý slúži ako relatívny ukazovateľ povodňovo-eróznej aktivity.
- kvantitatívny opis historického radu prostredníctvom mier polohy a variability, percentilov a podielu rokov, v ktorých RI prekračuje zvolené pracovné hranice.
- overenie časovej stability série kombináciou lineárneho trendu, Mannovho–Kendallovho testu, Spearmanovej korelácie, autokorelácie prvého rádu a testu možného bodu zmeny.

- vyhodnotenie výskytu najsilnejších dendrochronologických signálov a prepočet ich historickej početnosti na priemerný počet udalostí pripadajúcich na desaťročie.
- definovanie troch intenzít budúceho klimatického pôsobenia na základe publikovaných odhadov zmien extrémnych zrážok pre Slovensko a karpatský región.
- pravdepodobnostná simulácia budúcich RI pomocou bootstrapového Monte Carlo postupu, ktorý zachováva empirický tvar historického rozdelenia a následne ho modifikuje klimatickým násobiteľom.
- odhad priemerných hodnôt, predikčných intervalov a pravdepodobností prekročenia vysokých RI pre horizonty 2026–2040, 2041–2060, 2061–2080 a 2081–2100.
- interpretácia rozdielov medzi historickým záznamom a tromi budúcimi trajektóriami vrátane samostatného posúdenia neistoty a zmien pravého chvosta rozdelenia.

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 určiť pravdepodobný smer zmien výskytu výrazných povodňových udalostí v priebehu 21. storočia v malom horskom povodí okresu Tvrdošín. Základný údajový rad nevznikol priamym meraním prietokov ani vodných stavov, ale dendrochronologickou rekonštrukciou s ročným rozlíšením. Výsledky modelovania preto opisujú relatívnu magnitúdu povodňovo-erózneho signálu a frekvenciu rokov s vysokým RI, nie absolútne Qmax alebo Hmax. Response index udáva podiel hodnotiteľných vzoriek, v ktorých bola v príslušnom roku zistená reakcia na erózno-hydrologickú udalosť. Jeho hodnotu môže okrem sily udalosti ovplyvniť aj počet vzoriek, biologická citlivosť koreňov a zachovanie geomorfologického záznamu, a preto sa používa ako proxy a nie ako hydrometrický ekvivalent.

Analytická časť najprv hodnotí rozdelenie a časovú štruktúru radu 1980–2025, následne testuje trend, prípadný skok v úrovni a medziročnú zotrvačnosť a až potom stanovuje pracovné prahy pre vysoké hodnoty RI. Projekčná časť je rozdelená do štyroch horizontov a troch úrovní klimatického pôsobenia. Použitá metóda nie je priestorovým downscalingom konkrétneho CMIP6 gridu pre miesto odberu; ide o pravdepodobnostné prenesenie rozsahu regionálne projektovaných zmien extrémnych zrážok na lokálne empirické rozdelenie dendrochronologického ukazovateľa.

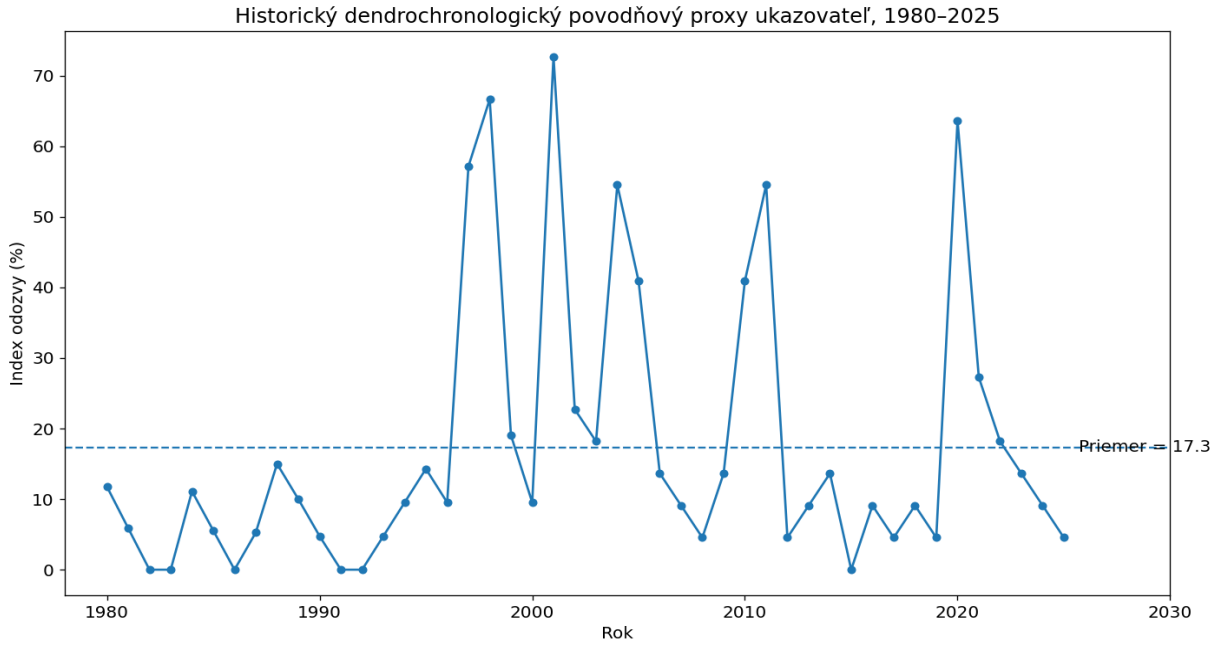
Základom dendrogeomorfologickej rekonštrukcie sú odkryté korene živých ihličnatých stromov v častiach doliny, kde prúdiaca voda odstraňuje pôdu alebo jemné sedimenty. Premiestnenie koreňa z pôdneho prostredia na povrch mení teplotný, vlhkostný a mechanický režim a môže vyvolať charakteristickú reakciu v tvorbe dreva. Rok prvého odkrytia sa preto určuje z anatomických a rastových zmien v následnosti letokruhov, pričom správne pripravené vzorky umožňujú ročné datovanie (Gärtner, 2007; Bodoque et al., 2005). Pri koreňoch Pinus sylvestris sa medzi diagnostické znaky zaraďujú zmeny šírky prírastku, počtu buniek, podielu neskorého dreva, rozmerov tracheíd skorého dreva a výskytu živicových kanálikov (Rubiales et al., 2008).

Vzorkovanie sa sústreďuje na korene v geomorfologických polohách, kde okolité erózne formy a sedimentárne pomery umožňujú spájať expozíciu s pôsobením povodňovej vody. Jednotlivé odkrytie sa neposudzuje izolovane, pretože podobnú reakciu môže vyvolať aj pomalá denudácia alebo iný proces; rozhodujúca je priestorová a časová zhoda viacerých signálov. Z koreňov sa pripravujú priečne rezy alebo ekvivalentné vzorky, ktoré sa po vysušení a vybrúsení datujú a podľa možností krížovo overujú voči

referenčnej chronológii. Pri interpretácii sa kontrolujú falošné a chýbajúce letokruhy a zohľadňuje sa aj neistota sezóny, v ktorej mohlo dôjsť k odkrytiu alebo poškodeniu (Gärtner, 2007; Rubiales et al., 2008).

Jednotlivé datované reakcie sa pre každý kalendárny rok agregujú do response indexu: RI = (počet vzoriek so signálom / počet vzoriek dostupných na hodnotenie) × 100 %. Hodnota 0 % vyjadruje absenciu identifikovaných reakcií v dostupnom súbore, kým vysoké RI znamená väčšiu synchronizáciu reakcií koreňov. V ďalších výpočtoch sa RI používa ako relatívna miera priestorového rozsahu alebo intenzity erózno-povodňovej udalosti. Trendové testy, prahové porovnania a Monte Carlo simulácie sa teda vzťahujú k pravdepodobnosti a variabilite tohto proxy ukazovateľa a nepredstavujú jeho prevod na centimetre vodného stavu ani na m³/s.

Vstupný súbor pre okres Tvrdošín obsahuje 46 ročných hodnôt z rokov 1980 až 2025. RI sa pohybuje od 0.00 do 72.73 %. Priemerná hodnota je 17.31 %, medián 9.52 % a smerodajná odchýlka 19.61 percentuálneho bodu. Dolný kvartil dosahuje 4.76 %, horný kvartil 18.18 %, 90. percentil 54.55 % a 95. percentil 62.01 %. Rozdelenie je výrazne pravostranne asymetrické: väčšina rokov má nízky až stredný RI, ale niekoľko epizód vytvára hodnoty presahujúce 50–60 %. Táto vlastnosť podporuje použitie neparametrických postupov a simulácií založených na empirickom, nie normálnom rozdelení.

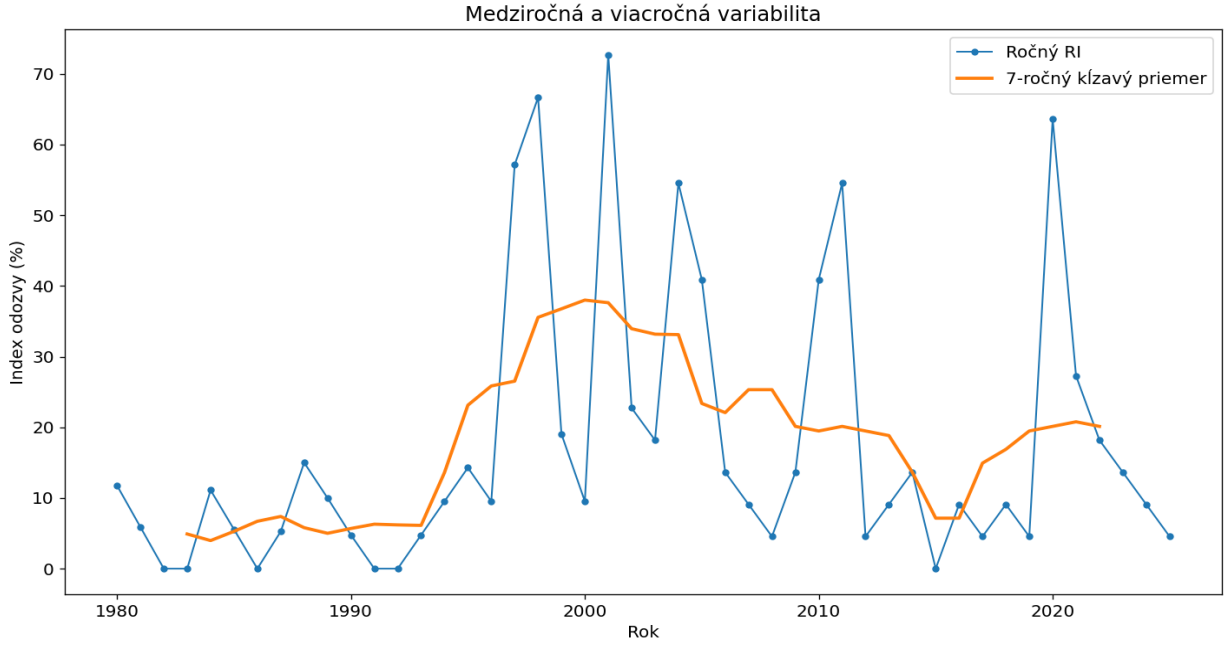


Obr. 1. Historický priebeh dendrochronologického ukazovateľa RI v rokoch 1980–2025.

Hranicu RI≥30 % prekročilo 8 z 46 rokov (17.4 %), RI≥40 % rovnako 8 rokov (17.4 %), RI≥50 % 6 rokov (13.0 %) a RI≥60 % 3 roky (6.5 %). V priemere to zodpovedá približne 1.74; 1.74; 1.30 a 0.65 roka za

desaťročie. Prahy majú čisto analytickú funkciu pri porovnávaní historických a simulovaných rozdelení a nemožno ich zamieňať s formálnymi stupňami hydrologickej povodne.

Lineárna regresia naznačuje mierne kladný sklon +0.260 percentuálneho bodu RI za rok, avšak bez štatistickej významnosti ($p=0.237$; $R^2=0.032$). Podobný záver poskytuje Mannov–Kendallov test ($\tau=0.112$; $p=0.283$) aj Spearmanova korelácia ($\rho=0.191$; $p=0.204$). Z historického radu preto nemožno preukázať trvalý monotónny rast alebo pokles povodňového proxy ukazovateľa. Pozorované viacročné zmeny majú skôr charakter kolísania medzi obdobiami s rozdielnou úrovňou aktivity než jednoduchého lineárneho trendu.



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

Autokorelácia prvého rádu je 0.335, teda kladná a stredne silná, čo naznačuje určitú zotrvačnosť medzi po sebe nasledujúcimi rokmi. Pettittov test identifikuje ako najsilnejší kandidátsky bod zmeny približne rok 1994; na rozdiel od lineárneho trendu je táto zmena štatisticky významná ($p\approx0.032$). Desaťročné priemery sa pohybujú od približne 6.5 % v období 1980–1989 po 26.0 % v období 2000–2009, čo podporuje interpretáciu možnej zmeny úrovne série pri zachovaní veľkej medziročnej variability. Regionálne klimatické projekcie pre Karpaty zároveň poukazujú skôr na zosilňovanie vysokých kvantilov zrážok než na rovnomerný rast všetkých úhrnov. Gaál et al. (2014) uvádzajú na konci 21. storočia nárast 50-ročných extrémov, v zime v priemere približne o 22–25 %; zmeny extrémnych indexov opisujú aj Bartholy a Pongrácz (2010), zatiaľ čo EURO-CORDEX ukazuje výrazné otepľovanie a priestorovo zložitejšiu odozvu priemerných zrážok (Skarbit et al., 2022).

Pri malých horských povodiach môže rovnaká zmena zrážok viesť k rozdielnej odtokovej odozve podľa predchádzajúceho nasýtenia, dĺžky a intenzity epizódy, podielu konvekčných zrážok, snehu a retenčných vlastností doliny. Klimatický vplyv bol preto reprezentovaný tromi postupne sa rozchádzajúcimi škálovacími dráhami. Nízky variant zvyšuje mierku RI v jednotlivých horizontoch o 2, 5, 7 a 9 %, stredný o 3, 7, 12 a 17 % a vysoký o 4, 10, 18 a 25 %. Najvyšší koeficient má rovnaký rád ako zmeny vysokých kvantilov extrémnych zrážok uvádzané pre karpatský región na konci storočia. Ide o scenárovú transformáciu, nie o tvrdenie, že percentuálna zmena zrážok sa fyzikálne prenáša na RI v pomere 1:1.

Monte Carlo projekcia bola zostavená tak, aby zachovala empirické vlastnosti 46-ročného historického radu. V každej iterácii sa bootstrapovo vyberá jedna z pozorovaných hodnôt RI a násobí sa klimatickým koeficientom; neistota koeficientu sa modeluje normálnym rozdelením so smerodajnou odchýlkou 0,04 okolo hodnoty príslušného scenára. Výstup sa obmedzuje na fyzický rozsah 0–100 %. Pre každú kombináciu scenára a časového horizontu sa generuje 200 000 syntetických ročných hodnôt a ďalších 20 000 realizácií celých období na odhad 95 % predikčných intervalov priemeru a frekvencie RI≥50 %. Takýto semi-parametrický bootstrap nenúti údaje do normálneho rozdelenia a dobre zachováva nuly aj pravostrannú asymetriu, ale môže podhodnocovať budúce udalosti bez historického analógu; GEV prispôsobenie sa preto používa iba ako doplnková diagnostika.

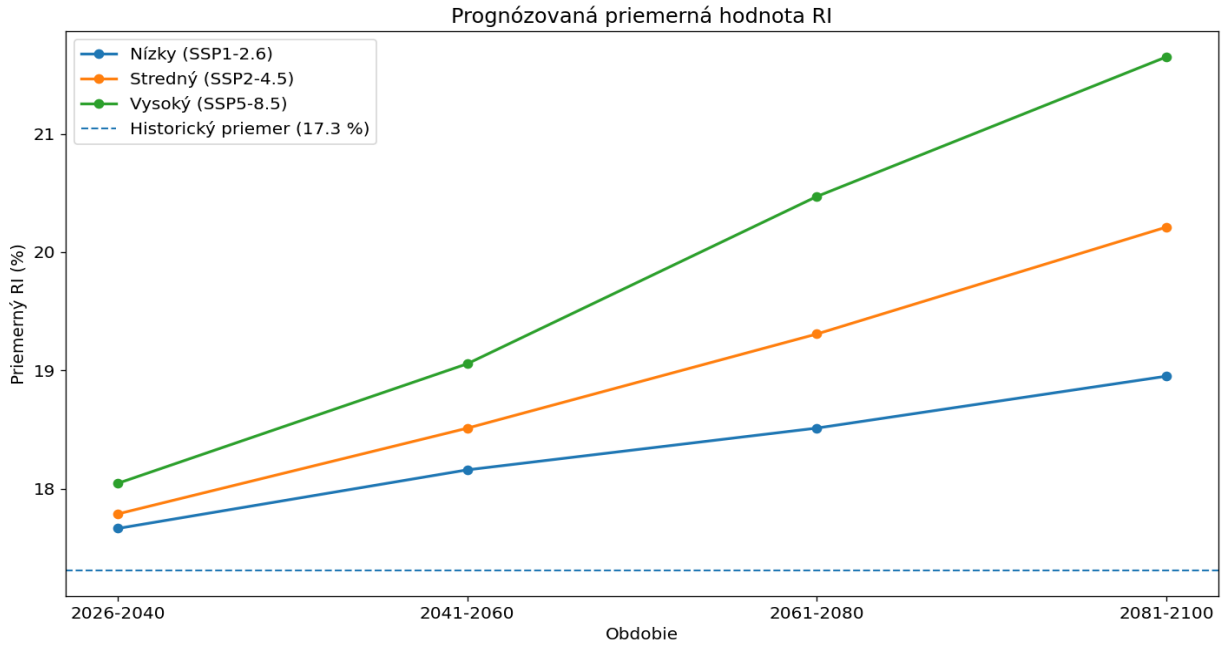
3. *Výsledky výskumu vo výpočtovej forme spolu s potrebnou dokumentáciou vo forme tabuliek, grafov a obrázkov*

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	17.7	8.7–28.6	13.0%	1.30
Nízky (SSP1-2.6)	2041-2060	18.2	10.0–27.7	13.0%	1.30
Nízky (SSP1-2.6)	2061-2080	18.5	10.2–28.6	13.1%	1.31
Nízky (SSP1-2.6)	2081-2100	19.0	10.5–28.8	13.1%	1.31
Stredný (SSP2-4.5)	2026-2040	17.8	8.8–28.9	13.0%	1.30
Stredný (SSP2-4.5)	2041-2060	18.5	10.2–28.4	13.1%	1.31
Stredný (SSP2-4.5)	2061-2080	19.3	10.9–29.7	13.0%	1.30
Stredný (SSP2-4.5)	2081-2100	20.2	11.3–30.9	13.4%	1.34
Vysoký (SSP5-8.5)	2026-2040	18.0	9.0–29.3	13.1%	1.31
Vysoký (SSP5-8.5)	2041-2060	19.1	10.6–29.3	13.0%	1.30

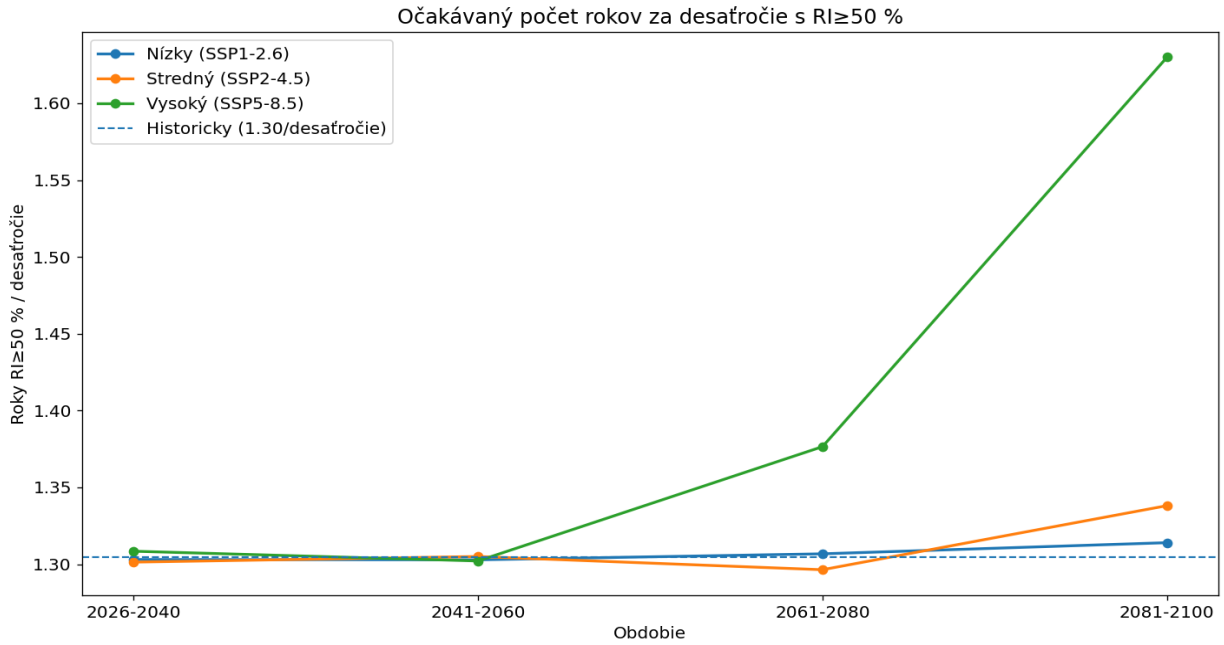
Vysoký (SSP5-8.5)	2061-2080	20.5	11.3–31.3	13.8%	1.38
Vysoký (SSP5-8.5)	2081-2100	21.7	12.0–33.1	16.3%	1.63

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.



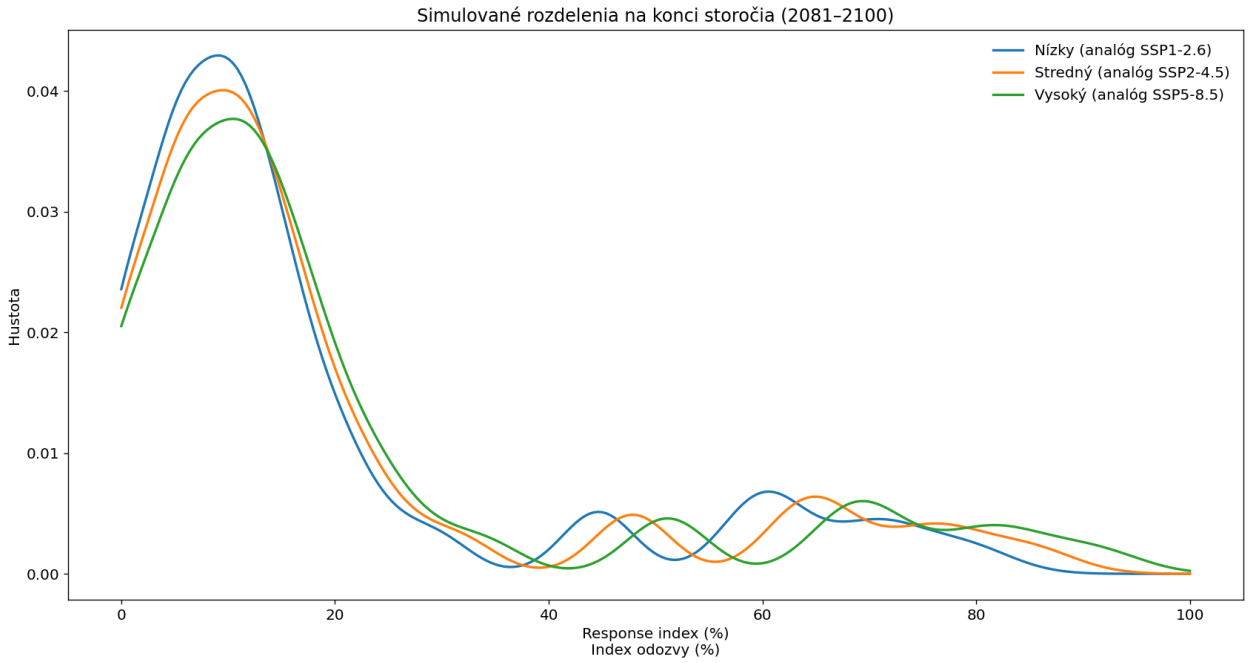
Obr. 3. Prognózovaná priemerná hodnota RI v jednotlivých obdobiach.

Na konci storočia sa priemerný RI v nízkom variante zvyšuje z historických 17.31 % na približne 18.95 %. Stredný scenár poskytuje hodnotu približne 20.21 % a vysoký približne 21.65 %. V relatívnom vyjadrení ide o nárast približne o 9.5 %, 16.8 % a 25.1 %. Rozdiely medzi modelovými dráhami sú na začiatku obdobia malé a zväčšujú sa najmä po roku 2060. Pri Tvrdošíne sa tento scenárový rast kombinuje s historickou indikáciou bodovej zmeny úrovne, hoci bez preukázaného monotónneho trendu.



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

V historickom období sa RI≥50 % vyskytuje v 13.0 % rokov, čo zodpovedá približne 1.30 roka za desaťročie. V rokoch 2081–2100 model odhaduje v nízkom, strednom a vysokom variante približne 1.31, 1.34 a 1.63 roka s RI≥50 % na desaťročie. Pre prah RI≥60 % je historická frekvencia 6.5 %, zatiaľ čo ku koncu storočia simulácia dáva približne 10.2 %, 12.7 % a 13.0 %. Klimatické škálovanie teda mení najmä pravý chvost rozdelenia, čiže pravdepodobnosť rokov s najsilnejším dendrochronologickým povodňovým signálom.



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

Hydrologická reakcia horskej zlewni na extrémne zrážky je výsledkom viacerých navzájom prepojených procesov. Rozhoduje počiatočné nasýtenie pôdy, intenzita a dĺžka zrážok, ich priestorové rozloženie, snehové podmienky, zamrznutie pôdy, retencia na svahoch a v údolí aj zmeny využívania krajiny. Preto je prenos regionálneho zrážkového signálu na RI zámerne zjednodušený. Výhodou postupu je kontrolovateľná a transparentná propagácia neistoty, nevýhodou absencia lokálne kalibrovaného modelu zrážka–odtok; výsledky sa majú chápať ako zmena pravdepodobnostných podmienok pre silné povodňové prietoky, nie ako kalendárna predpoveď jednotlivých povodní.

Otepľovanie môže zároveň meniť sezónnosť mechanizmov vedúcich k povodniam. V chladnej časti roka môže vyšší podiel kvapalných zrážok, dážď na sneh a skoršie topenie zvyšovať význam zmiešaných zimno-jarných udalostí, kým v lete vyššia kapacita atmosféry pre vodnú paru podporuje intenzívnejšie lejaky. Suchšie medzidobia však môžu pri niektorých epizódach znižovať počiatočnú vlhkosť pôdy, takže budúca odozva nemusí byť monotónna. Ďalším obmedzením je dĺžka radu – 46 rokov je nedostatočných na stabilné odhady veľmi dlhých periód opakovania. V Tvrdošíne je navyše potrebné zohľadniť významný Pettittov bod zmeny okolo roku 1994, ktorý môže naznačovať zmenu režimu, ale sám osebe nevysvetľuje jej klimatickú príčinu.

Neistotu zvyšuje aj samotná povaha dendrochronologického proxy. RI závisí od počtu dostupných koreňov, ich veku a citlivosti, ako aj od toho, ktoré erózne udalosti sa v zázname zachovali. Model navyše nevyužíva súbežné lokálne denné rady zrážok, teploty, snehu a prietoku, takže nedokáže kalibrovať explicitnú funkciu medzi atmosférickým impulzom a Qmax/Hmax. Ďalší krok by mal spočívať v spojení RI s lokálnymi hydrometrickými maximami, Rx1day/Rx5day a ukazovateľmi predchádzajúcej vlhkosti; následne možno vytvoriť nestacionárny alebo hierarchický extrémový model s klimatickými kovariátmi z 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 Tvrdošín je silne epizodický a pravostranne asymetrický. V rokoch 1980–2025 lineárny model síce naznačuje mierny rast (+0.260 percentuálneho bodu RI za rok), ale tento trend nie je štatisticky významný ($p=0.237$); nevýznamný je aj Mannov–Kendallov test ($\tau=0.112$; $p=0.283$). Odlišný obraz poskytuje Pettittov test, ktorý identifikuje približne rok 1994 ako štatisticky významný bod zmeny úrovne ($p\approx0.032$), čo poukazuje skôr na skokovú alebo režimovú zmenu než na stabilný monotónny trend. Historicky sa RI≥50 % vyskytol v 13.0 % rokov, teda približne 1.30 roka za desaťročie. Monte Carlo projekcie pri regionálnom klimatickom škálovaní ukazujú postupný nárast priemernej hodnoty RI, ktorá v rokoch 2081–2100 dosahuje približne 18.95 %, 20.21 % a 21.65 % v nízkom, strednom a vysokom variante. Počet rokov s RI≥50 % sa v rovnakom horizonte zvyšuje na približne 1.31, 1.34 a 1.63 roka za desaťročie. Model teda podporuje scenár zvýšenej pravdepodobnosti vysokých povodňovo-eróznych signálov ku koncu storočia, najmä pri silnom klimatickom pôsobení. Výsledok však zostáva pravdepodobnostný a jeho presnosť obmedzuje krátky rad, nepriamy charakter RI a absencia lokálnej kalibrácie zrážka–odtok. Pre praktické hodnotenie povodňového rizika by preto mala byť dendrochronologická rekonštrukcia kombinovaná s meranými Qmax/Hmax, lokálnymi extrémami zrážok a 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, 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

Katowice, 31.07.2024

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

dr hab. Jerzy Cabała