

Odhad změn návrhových srážek ve vybraných nepozorovaných lokalitách pomocí geostatistického modelu regionální frekvenční analýzy s využitím klimatických projekcí

IVANA STRNADOVÁ, FILIP STRNAD, DAMIÁN HECZKO, MARTIN HANEL

Klíčová slova: extrémní srážky – IDF, GEV, RFA – rozptyl ensemblu – klimatická změna – CORDEX

ABSTRAKT

Studie kvantifikuje změny krátkodobých návrhových srážek s dobou opakování 100 let v nepozorovaných pilotních lokalitách České republiky a analyzuje strukturu nejistoty těchto odhadů v podmínkách klimatické změny. Referenční IDF křivky byly odvozeny pomocí regionální frekvenční analýzy založené na index-flood konceptu s využitím GEV rozdělení a odhadu parametrů metodou L-momentů. Budoucí změny byly stanoveny z vícemodelového ensemblu regionálních klimatických projekcí CORDEX pro scénáře RCP2.6, RCP4.5 a RCP8.5 v obdobích 2035–2065 a 2070–2100.

Ve scénáři RCP8.5 (2070–2100) činí průměrná relativní změna 100letého hodnového kvantilu přibližně 52 %, přičemž interval 5.–95. percentilu dosahuje hodnot -7 % až +126 %. V období 2035–2065 jsou rozdíly mezi emisními scénáři menší než vnitřní modelová variabilita, zatímco ve druhé polovině století se emisní trajektorie stává dominantním zdrojem divergence projekcí. Relativní zesílení je vyšší pro kratší doby trvání, což naznačuje disproporční citlivost krátkodobých extrémů.

Analýza ukazuje, že nejistota vysokých dob opakování je významně ovlivněna odhadem tvarového parametru GEV rozdělení, jehož malé rozdíly vedou k nelineárnímu růstu extrapolovaných kvantilů. Zjištěné zesílení extrémních srážek je konzistentní s očekávaným termodynamickým zesílením hydrologického cyklu, avšak rozptyl ensemblu poukazuje na značnou strukturální nejistotu regionálních klimatických modelů.

Výsledky indikují, že použití historických IDF křivek bez zohlednění klimatické změny může vést k systematickému podhodnocení návrhových hodnot, zejména při dlouhé životnosti infrastruktury.

ÚVOD

Extrémní srážkové události představují jeden z nejdůležitějších hydro-meteorologických jevů ovlivňujících bezpečnost obyvatelstva, funkčnost technické infrastruktury i ekonomickou stabilitu regionů [1]. V podmínkách střední Evropy jsou přívalové povodně a lokální zaplavení dlouhodobě spojovány především s krátkodobými intenzivními dešti, jejichž dopady jsou zesilovány urbanizací a změnou využití krajiny. Rostoucí podíl nepropustných ploch, úpravy vodních toků a koncentrace zástavby vedou ke zrychlení odtokové odezvy povodí a zvyšují citlivost území na extrémní srážkové epizody.

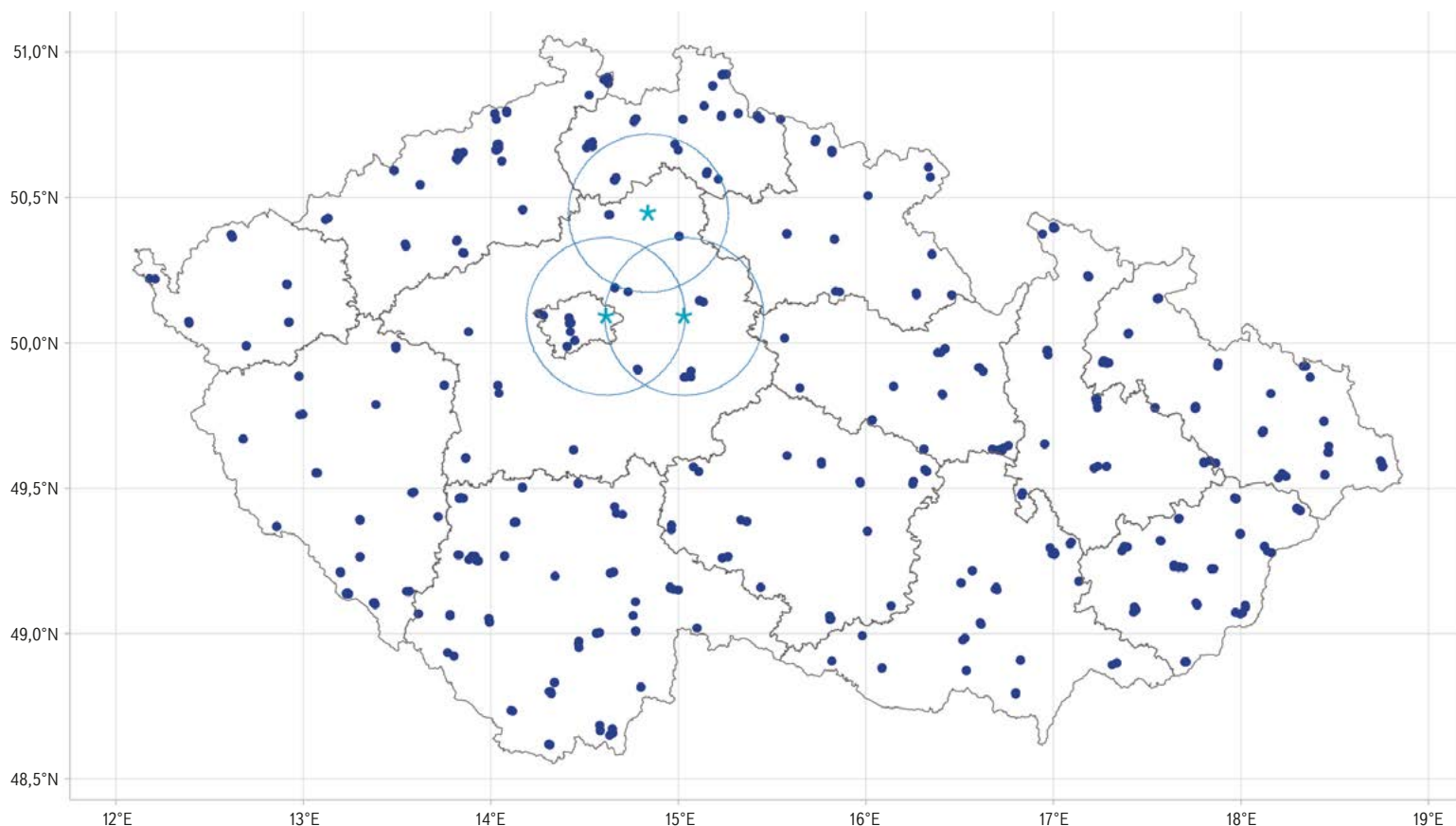
Návrh technických opatření, jako jsou kanalizační systémy, retenční nádrže, poldry či prvky modro-zelené infrastruktury, je proto založen na statistickém popisu extrémních srážek [2]. V praxi jsou používány návrhové kvantily vyjádřené prostřednictvím křivek intenzita–doba trvání–četnost (IDF), které představují základní nástroj dimenzování vodohospodářských staveb [3, 4]. Tyto křivky jsou obvykle odvozovány z historických časových řad srážek a implicitně předpokládají stacionární klimatický režim [3].

Předpoklad stacionarity však v kontextu probíhající klimatické změny přestává být obhajitelný [1]. Rostoucí koncentrace skleníkových plynů vede k oteplování atmosféry, které je spojeno se změnami hydrologického cyklu [5]. Klimatické modely i pozorované trendy indikují zesilování extrémních srážek v mnoha regionech světa [1, 6]. Fyzikální základ tohoto zesílení je spojen s Clausius–Clapeyronovou závislostí, podle níž roste maximální obsah vodní páry v atmosféře přibližně o 7 % na 1 K oteplení [5, 6]. Vyšší obsah vodní páry vytváří potenciál pro intenzivnější srážkové události, zejména konvektivního charakteru [6].

Přestože je fyzikální mechanismus zesílení extrémních srážek relativně dobře pochopen, jeho kvantifikace na regionální a lokální úrovni je zatížena značnou nejistotou [1]. Ta vyplývá z několika zdrojů, jsou to: strukturální rozdíly mezi klimatickými modely, nejistota emisního scénáře a vnitřní klimatická variabilita [7]. Z hlediska vodohospodářské praxe je však zásadní nejen průměrná změna návrhového kvantilu, ale především jeho horní hranice, která reprezentuje potenciální riziko poddimenzování infrastruktury.

Dalším významným problémem je omezená dostupnost dlouhodobých kvalitních měření srážek. V mnoha lokalitách není k dispozici dostatečně dlouhá časová řada umožňující spolehlivý odhad vysokých dob opakování. Extrapolace 100letého nebo 200letého kvantilu z krátké časové řady je statisticky nestabilní a citlivá na jednotlivé extrémní události [2, 8]. Regionální frekvenční analýza (RFA) představuje metodický přístup, který tento problém zmírňuje sdílením informace mezi klimaticky podobnými lokalitami [9]. Oddělením regionálního tvaru rozdělení od lokálního měřítka umožňuje robustnější odhad extrémních kvantilů i v oblastech bez přímého měření nebo s omezenou dostupností dat [9].

V literatuře existuje řada studií zabývajících se změnami extrémních srážek v kontextu klimatické změny, avšak méně prací systematicky propojuje regionální frekvenční analýzu s vícemodelovým ensemblu klimatických projekcí a explicitně kvantifikuje nejistotu vysokých dob opakování [3, 10, 11]. Zvláště nedostatečně je diskutována otázka, jak velká je nejistota 100letého návrhového



Obr. 1. Výběr stanic pro RFA – body vyznačené hvězdičkou jsou pilotní lokality, body značené tečkou jsou srážkoměrné stanice ČHMÚ a kružnice představují 30km buffer
 Fig. 1. Selection of stations for RFA – locations marked with a star indicate pilot sites, points marked with a dot represent rain gauge stations CHMI, and circles denote the 30km buffer

kvantilu a jak se její struktura mění v závislosti na časovém horizontu a emisním scénáři [7].

Předložená studie si klade za cíl tuto mezeru částečně zaplnit. Dále popsaná metodika byla aplikována na tři pilotní lokality (Bukovno, Pečky a Běchovice). Hlavní výzkumné otázky lze formulovat následovně:

- Jaká je velikost změny návrhové srážky s dobou opakování 100 let v budoucím klimatu?
- Jak velký je rozsah ensemblu klimatických projekcí a jak se mění v čase?
- Je pozorované zesílení extrémních srážek konzistentní s teoretickým Clausius-Capeyronovým scalingem?

Odpovědi na tyto otázky mají přímý význam pro dimenzování vodohospodářské infrastruktury i pro strategické plánování adaptačních opatření. Studie proto kombinuje regionální frekvenční analýzu s vícemodelovým ensemblu regionálních klimatických projekcí a zaměřuje se nejen na odhad budoucích IDF křivek, ale zejména na systematickou kvantifikaci jejich nejistoty [7, 10, 11].

DATA

Pozorovaná srážková data

Ke konstrukci referenčních IDF křivek pro tři pilotní lokality byla využita pozorovaná data krátkodobých srážkových úhrnů ze sítě stanic Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) [12, 13]. Do analýzy byly zahrnuty pouze stanice s délkou časové řady přesahující 30 let, což představuje minimální délku potřebnou pro robustnější odhad vysokých dob opakování v rámci blokové analýzy

maxim [2, 8]. Výběr stanic byl dále omezen na lokality s dostatečnou kontinuitou měření a s minimálním podílem chybějících dat.

Primárním kritériem pro výběr stanic byla jejich prostorová blízkost k analyzovaným lokalitám, definovaná jako kruhový buffer o poloměru 30 km. Do regionální analýzy byly zahrnuty pouze stanice nacházející se uvnitř tohoto okruhu, jež zároveň splňovaly podmínku časové řady ročních maxim alespoň 30 let. Minimální délka záznamu byla zvolena s ohledem na stabilitu odhadu parametrů GEV (obecného rozdělení extrémních hodnot; z angl. General Extreme Value) rozdělení a na omezení nejistoty extrapolace vysokých dob opakování. Tento postup předpokládá, že stanice splňující obě kritéria vykazují dostatečnou klimatickou podobnost a statistickou robustnost pro aplikaci regionální frekvenční analýzy. Použité stanice jsou zobrazeny a popsány na obr. 1 a v tab. 1.

Tab. 1. Meteorologické stanice použité pro RFA, jejich vzdálenosti k pilotním lokalitám a délka časové řady ročních maxim

Tab. 1. Meteorological stations used for RFA, their distances to the pilot locations, and the length of the annual maxima time series

Lokalita	ID stanice	Vzdálenost [m]	Počet let	První rok	Poslední rok
Bukovno	P2CDUB01	27 831	48	1957	2022
	P2SEMC01	14 603	35	1986	2022
	P2TURN01	27 367	49	1951	2022
	U2DOKY01	18 074	60	1963	2022
Pečky	H3PODE01	8 629	37	1951	2022
	P2BRAN01	28 639	36	1986	2022
	P2NVES01	23 383	33	1986	2022
Běchovice	P1PBRA01	14 740	45	1961	2008
	P1PKAR01	13 792	61	1961	2022
	P1PKLE01	14 024	55	1961	2022
	P1PLIB01	15 041	51	1972	2022
	P1PRUZ01	24 845	37	1986	2022
	P2BRAN01	11 440	36	1986	2022
	P2NVES01	12 665	33	1986	2022
	P3ONDR01	23 791	37	1986	2022

Pro aplikaci teorie extrémních hodnot byla použita metoda blokových maxim [2, 8]. Pro každou dobu trvání (5 minut až 24 hodin) byla z časové řady extrahována roční maxima. Tento přístup je konzistentní s klasickou formulací EVT (teorie extrémních hodnot; z angl. Extreme Value Theory) a umožňuje přímé použití GEV rozdělení [8]. Výsledný soubor ročních maxim tvořil vstup pro regionální frekvenční analýzu a pro odhad parametrů GEV rozdělení v referenčním období [8, 9].

Klimatické projekce CORDEX

Budoucí změny návrhových srážek byly odvozeny z regionálních klimatických projekcí iniciativy CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) [14]. Byly využity modely v evropských doménách EUR-11 (horizontální rozlišení přibližně 11 km) a EUR-22 (rozlišení přibližně 22 km) [15]. Vyšší prostorové rozlišení umožňuje detailnější reprezentaci orografie a regionálních cirkulačních procesů, které ovlivňují extrémní srážky.

Ensemble zahrnoval více kombinací globálních klimatických modelů (GCM) a regionálních klimatických modelů (RCM). Tento vícemodelový přístup umožňuje zachytit strukturální nejistotu vyplývající z rozdílů v dynamickém jádru modelů, parametrizaci oblačnosti, konvekce a interakce atmosféry s povrchem [7, 16]. Každá kombinace GCM–RCM představuje jednu realizaci budoucího klimatu, přičemž soubor všech realizací tvoří ensemble. Souhrn kombinací použitých ensembleů znázorňuje *tab. 2*.

Tab. 2. Složení ensemble použitých projekcí (počet unikátních kombinací GCM–RCM podle scénáře RCP a domény

Tab. 2. Composition of the ensemble of projections used (number of unique GCM–RCM combinations) by RCP scenario and domain

RCP	EUR-11 (11 km)	EUR-22 (22 km)
RCP2.6	4	2
RCP4.5	5	0
RCP8.5	23	3

Byla hodnocena tři časová období:

- referenční historické období (modelový běh odpovídající minulému klimatu),
- blízké budoucí období 2035–2065,
- vzdálenější budoucí období 2070–2100.

Pro budoucí projekce byly analyzovány emisní scénáře RCP2.6, RCP4.5 a RCP8.5, které reprezentují různé trajektorie vývoje koncentrací skleníkových plynů [17, 18]. Scénář RCP2.6 předpokládá rychlou stabilizaci emisí, RCP4.5 střední stabilizační trajektorii a RCP8.5 scénář pokračujícího růstu emisí [18].

Z klimatických modelů byla použita hodinová data srážek v jednotkách $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, která byla převedena na úhrny a následně agregována na požadované doby trvání. Pro každý gridový bod odpovídající analyzovaným pilotním lokalitám byla z regionálních modelů extrahována časová řada ročních maxim analogickým postupem jako u pozorovaných dat [8].

Aby byl omezen vliv systematických chyb modelů, byla budoucí změna návrhového kvantilu vyjádřena v relativní formě [3]:

$$\Delta = \frac{Q_{\text{future}} - Q_{\text{historical}}}{Q_{\text{historical}}} \quad (1)$$

Tento přístup předpokládá, že systematická chyba modelu je do značné míry konzistentní mezi historickým a budoucími obdobími, a umožňuje tak zaměřit analýzu na relativní změnu extrémů spíše než na jejich absolutní hodnotu [16]. Relativní změny byly následně aplikovány na referenční IDF křivky odvozené z pozorovaných dat, čímž byly získány budoucí návrhové hodnoty pro jednotlivé emisní scénáře pro obě výhledová období [12, 13]. Tímto postupem bylo možné propojit lokální statistické chování extrémních hodnot pozorovaných dat s projekcemi budoucího klimatu a zároveň systematicky kvantifikovat rozptyl ensemblu (ensemble spread) jako míru modelové nejistoty [7].

Teoretický rámec

Teorie extrémních hodnot

Teorie extrémních hodnot (EVT) představuje statistický přístup založený na asymptotických vlastnostech extrémů, určený k modelování chování maxim náhodných veličin [2, 8]. Zatímco klasická centrální limitní věta popisuje limitní chování součtů, EVT se zaměřuje na limitní vlastnosti extrémů. Pro nezávislé a identicky rozdělené náhodné veličiny X_1, \dots, X_n platí, že pro vhodně normovaná maxima $M_n = \max(X_1, \dots, X_n)$ konverguje jejich distribuční funkce k zobecněnému rozdělení extrémních hodnot (GEV) [8].

Distribuční funkce GEV je dána vztahem:

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 + \kappa \left(\frac{x - \xi}{\alpha} \right) \right]^{-\frac{1}{\kappa}} \right\} \quad (2)$$

kde:

ξ	je	parametr polohy
$\alpha > 0$		parametr měřítka
κ		parametr tvaru [8]

Parametr tvaru κ určuje tloušťku pravého chvostu rozdělení. Pro $\kappa > 0$ má rozdělení těžký chvost (Fréchetův typ), pro $\kappa = 0$ přechází do Gumbelova typu a pro $\kappa < 0$ má konečný horní limit (Weibullův typ) [8]. Odhad tohoto parametru je klíčový pro extrapolaci vysokých kvantilů, protože malé změny κ mohou vést k výrazným rozdílům při odhadu 100letého nebo 200letého extrému [2, 8].

Kvantily GEV rozdělení lze vyjádřit inverzí distribuční funkce:

$$Q(T) = \xi + \frac{\alpha}{\kappa} \left[\left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{\kappa} - 1 \right] \quad (3)$$

kde:

T	je	doba opakování [8].
-----	----	---------------------

Tato explicitní formulace umožňuje přímý výpočet návrhových hodnot po odhadu parametrů.

Regionální frekvenční analýza

Regionální frekvenční analýza (RFA) je metodika vyvinutá pro zvýšení robustnosti odhadu extrémních kvantilů v situaci omezené délky časových řad [9].

Základní myšlenkou je sdílení informace mezi stanicemi, jež vykazují podobné statistické chování extrémů [9].

Index-flood koncept předpokládá:

$$Q_i(F) = \mu_i q(F) \quad (4)$$

kde:

$Q_i(F)$	je	kvantil v lokalitě
μ_i		lokální škálovací faktor
$q(F)$		bezrozměrná regionální růstová křivka společná pro celý region [9]

Škálovací faktor je typicky definován jako první L-moment (analogický výběrovému průměru) ročních maxim [9, 19]. Pro pilotní lokality bez přímého měření byl škálovací faktor odhadnut metodou IDW (inverzní vzdálenostní váhy; z angl. Inverse Distance Weighting). Tato metoda umožňuje interpolaci kvantilových hodnot z okolních měřených stanic na základě váženého průměru hodnot, přičemž váha jednotlivých stanic je inverzně úměrná vzdálenosti k analyzovanému místu. Vzdálenosti jednotlivých použitých stanic pro tři pilotní lokality byly představeny v *tab. 1*. Normalizací dat jednotlivých stanic jejich lokálním měřítkem vzniká bezrozměrný soubor, z něhož je následně odhadnut regionální tvar rozdělení [9].

Homogenita regionu byla hodnocena v rámci regionální frekvenční analýzy založené na L-momentech dle [9]. Pro každou dobu trvání byly nejprve vypočteny L-momentové poměry jednotlivých stanic a následně byla pomocí Monte Carlo simulací (1 000 realizací) odhadnuta očekávaná variabilita homogenního regionu stejné velikosti. Na tomto základě byly stanoveny H-statistiky (H_1, H_2, H_3) – sumarizace se nachází v *tab. 3* –, které kvantifikují odchylku pozorované mezi-staniční variability od variability simulovaného homogenního regionu.

Podle interpretačních kritérií [9] platí, že $H < 1$ indikuje homogenní region, $1 \leq H < 2$ slabou heterogenitu a $H \geq 2$ heterogenní region.

K identifikaci potenciálně nesouladných stanic byla použita míra diskordance, jejíž hodnoty zůstaly ve většině případů pod kritickou mezí (1,33 pro tříčlenný subregion, resp. 2,33 pro širší region), což neindikuje přítomnost výrazného outlieru v L-momentovém prostoru. Celkově lze region považovat za dostatečně homogenní pro aplikaci regionální frekvenční analýzy, s vědomím mírně zvýšené variability u delších dob trvání.

Tab. 3. Souhrn regionálních statistik pro regiony Bukovno, Pečky a Běchovice; uvedeny jsou intervaly hodnot metrik heterogenity

Tab. 3. Summary of regional statistics for the Bukovno, Pečky, and Běchovice regions; ranges of heterogeneity metrics are reported

Statistika	Běchovice	Pečky	Bukovno
Diskordance (D)	<0,02; 2,48>	<0,06; 1,33>	<0,02; 1,33>
H_1	<-1,32; 2,13>	<-1,19; 0,66>	<-0,91; 2,47>
H_2	<-1,62; 2,82>	<-0,60; 1,93>	<-1,24; 1,41>
H_3	<-1,33; 2,56>	<-1,05; 2,04>	<-1,12; 2,00>

Souhrnné hodnocení ukazuje, že oblast Bukovna je z hlediska regionální frekvenční analýzy převážně homogenní, avšak s lokálně zvýšenou heterogenitou, zejména podle statistiky H_1 a okrajově H_3 . Oblast Peček působí jako nejhomogennější ze všech tří lokalit, bez překročení kritické meze diskordance

a pouze s náznaky slabé až mírné heterogenity u H_2 a H_3 . Naopak Běchovice vykazují nejvyšší míru prostorové nehomogenity, a to jak ojedinělým překročením kritické meze diskordance, tak zvýšenými hodnotami statistik H_2 a H_3 .

VÝSLEDKY

Teoretický rámec založený na GEV rozdělení a regionální frekvenční analýze umožnil převést klimatické projekce do změn návrhových kvantilů extrémních srážek. Následující sekce proto prezentuje kvantifikaci těchto změn se zaměřením na velikost 100letého kvantilu a strukturu nejistoty vyplývající z vícemodového ensmbly.

Změna 100letého hodinového kvantilu

Relativní změna 100letého hodinového kvantilu Q_{100} vykazuje systematickou závislost na emisním scénáři i časovém horizontu. V období 2035–2065 jsou rozdíly mezi scénáři RCP menší než vnitřní variabilita mezi jednotlivými realizacemi v rámci téhož scénáře. Ve vzdáleném období 2070–2100 dochází k výrazné divergenci scénářů.

Ve scénáři RCP8.5 (2070–2100) činí průměrná relativní změna Q_{100} 52 % se směrodatnou odchylkou 41 %. Interval mezi 5. a 95. percentilem dosahuje hodnot -7 % až 126 %. Medián změny je přibližně 47 %. Zhruba 80 % realizací vykazuje kladnou změnu.

Pro scénář RCP2.6 (2070–2100) činí průměrná změna přibližně 19 % a interval nejistoty je výrazně užší. Rozdíl mezi průměrnými změnami scénářů RCP8.5 a RCP2.6 ve druhé polovině století přesahuje 30 procentních bodů.

Hodnoty přesahující 100 % jsou generovány omezeným počtem realizací a odpovídají případům s kladným tvarovým parametrem κ , který implikuje těžký pravý chvost GEV rozdělení. Rozdělení změn napříč scénáři a obdobími je

znázorněno na obr. 2, jenž ilustruje výrazné rozšíření rozpětí ensmbly ve scénáři RCP8.5 (2070–2100).

Závislost na době trvání

Relativní změna extrémních srážek vykazuje klesající trend s rostoucí dobou trvání. Ve scénáři RCP8.5, který představuje vysoký emisní scénář používaný zejména k ilustraci horní meze klimatických dopadů (2070–2100), činí průměrná změna přibližně:

- 1 h: 52 %,
- 6 h: 39 %,
- 24 h: 28 %,
- 48 h: 28 %.

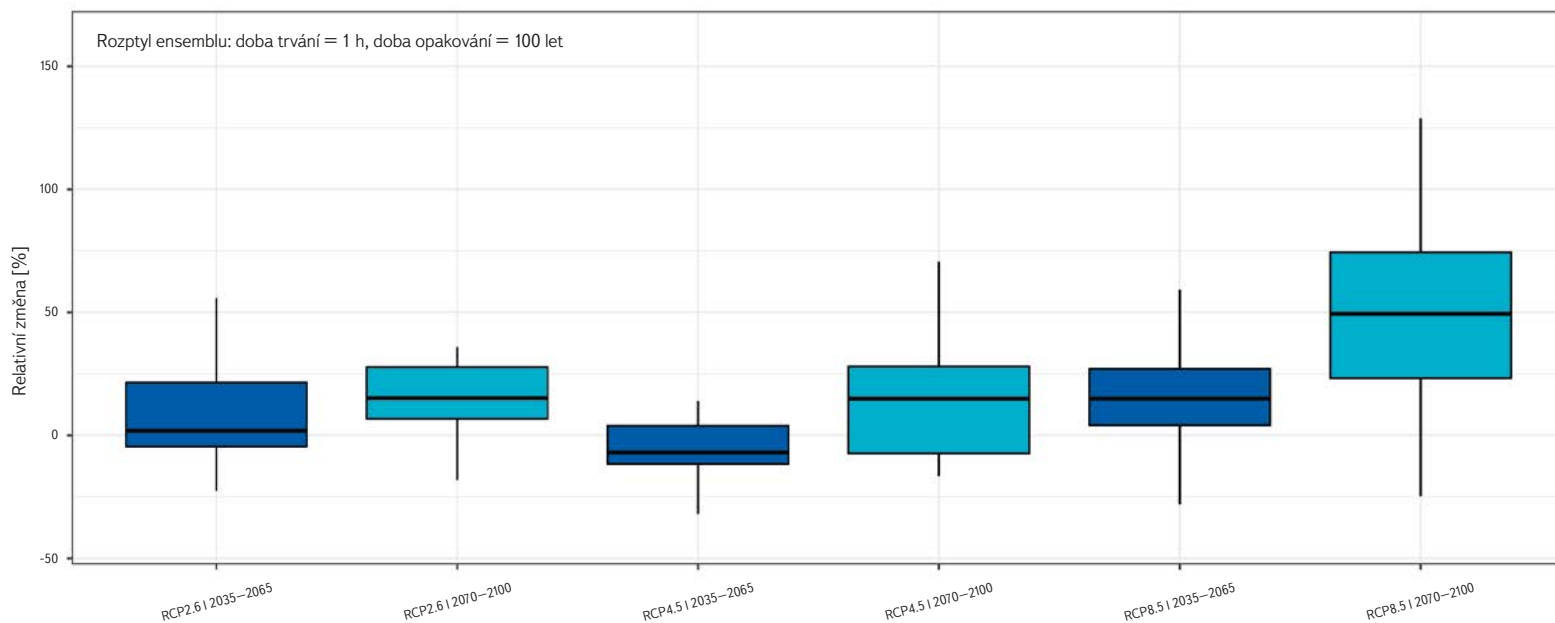
Tento gradient je patrný i z IDF křivek pro stejnou variantu scénáře na obr. 3, kde je zesílení výraznější pro kratší doby trvání.

Rozpětí mezi 5. a 95. percentilem je širší u kratších dob trvání. Relativní nejistota tedy roste s intenzitou extrému.

Vliv tvarového parametru κ

Citlivost vysokých kvantilů na tvarový parametr κ roste s dobou opakování T . Z kvantilové funkce GEV (3) vyplývá, že $\partial Q / \partial \kappa$ roste s T . Malé rozdíly v odhadu tak vedou k výrazným rozdílům ve vysokých dobách opakování.

Realizace s $\kappa > 0$ generují rychlejší růst $Q(T)$ a vysvětlují horní část rozptylu ensmbly. Tento efekt představuje strukturální zdroj nejistoty extrapolace. Růst relativní nejistoty s dobou opakování je dokumentován na obr. 4, kde se rozpětí projekcí systematicky zvětšuje s rostoucí dobou opakování.



Obr. 2. Relativní změna 100letého hodinového kvantilu (Q_{100} , 1 h) napříč scénáři RCP a časovými horizonty pro tři pilotní lokality. Box-ploty reprezentují jednotlivé realizace GCM–RCM kombinací (celkem 37) v intervalu 5.–95. percentilu, box znázorňuje mezikvartilové rozpětí a černé čáry představují medián. Barevně jsou rozlišeny časové horizonty – tmavě modré (2035–2065), světle modré (2070–2100). Rozptyl ensmbly je výrazně širší ve scénáři RCP8.5 (2070–2100), kde horní hranice přesahuje 100 %

Fig. 2. Relative change in the 100-year hourly quantile (Q_{100} , 1 h) across RCP scenarios and time horizons for three pilot areas. Box plots represent individual GCM–RCM realizations (37 in total) within the 5th–95th percentile range; the box indicates the interquartile range and the black line denotes the median. Time horizons are distinguished by colour – dark blue (2035–2065) and light blue (2070–2100). The ensemble spread is substantially wider under the RCP8.5 scenario (2070–2100), where the upper bound exceeds 100 %

DISKUZE

Dominantní zdroje nejistoty

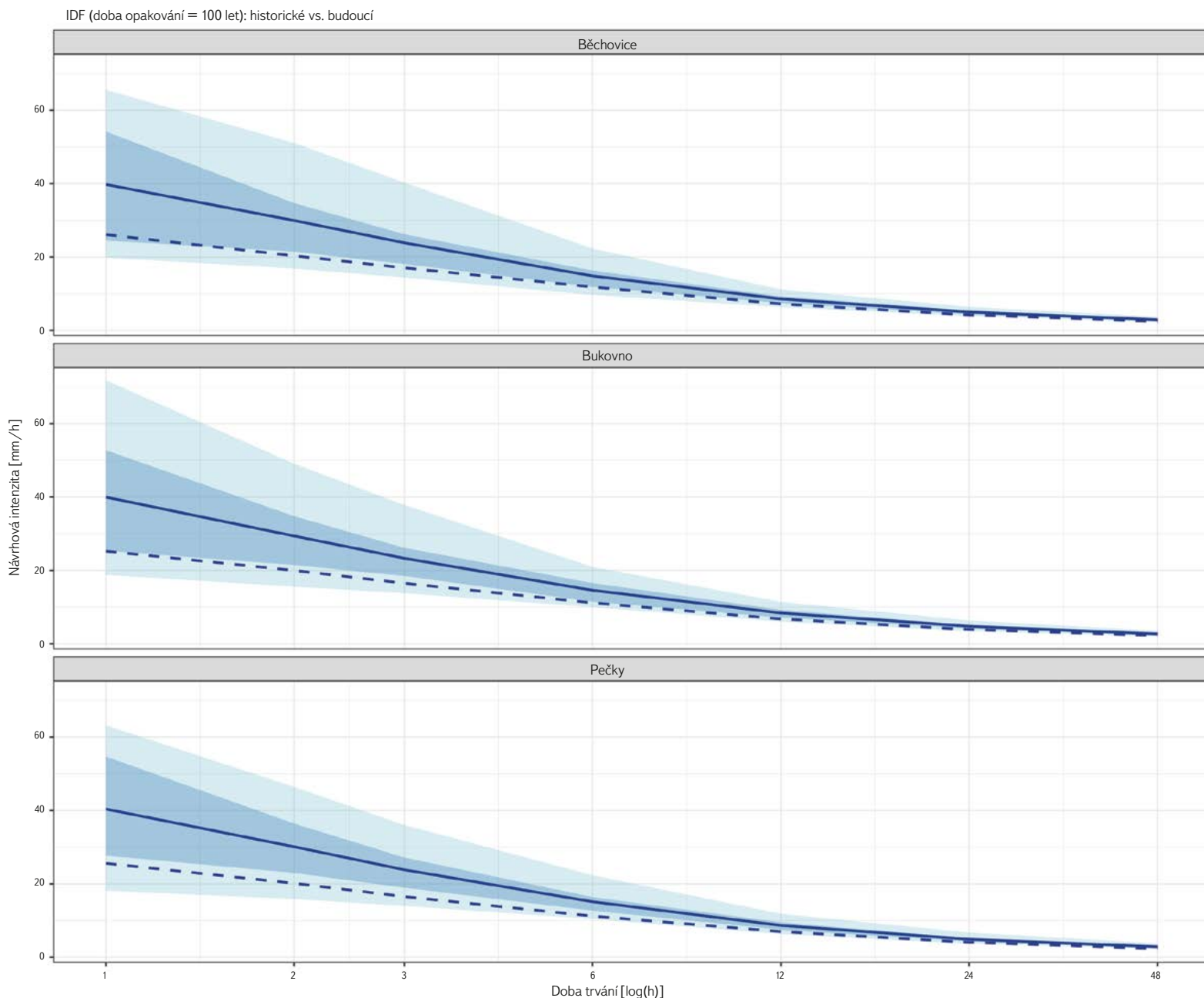
Charakter nejistoty se liší podle časového horizontu. V blízkém období je dominantní strukturální modelová variabilita, zatímco ve vzdáleném období nabývá na významu divergence emisních scénářů. Tento výsledek je konzistentní s obecnými závěry klimatických projekcí.

Je třeba zdůraznit, že prezentované rozpětí zahrnuje pouze variabilitu mezi modelovými realizacemi. Nejistota odhadu parametrů GEV (např. intervaly

spolehlivosti κ) zde není explicitně kvantifikována a může dále rozšiřovat celkovou nejistotu.

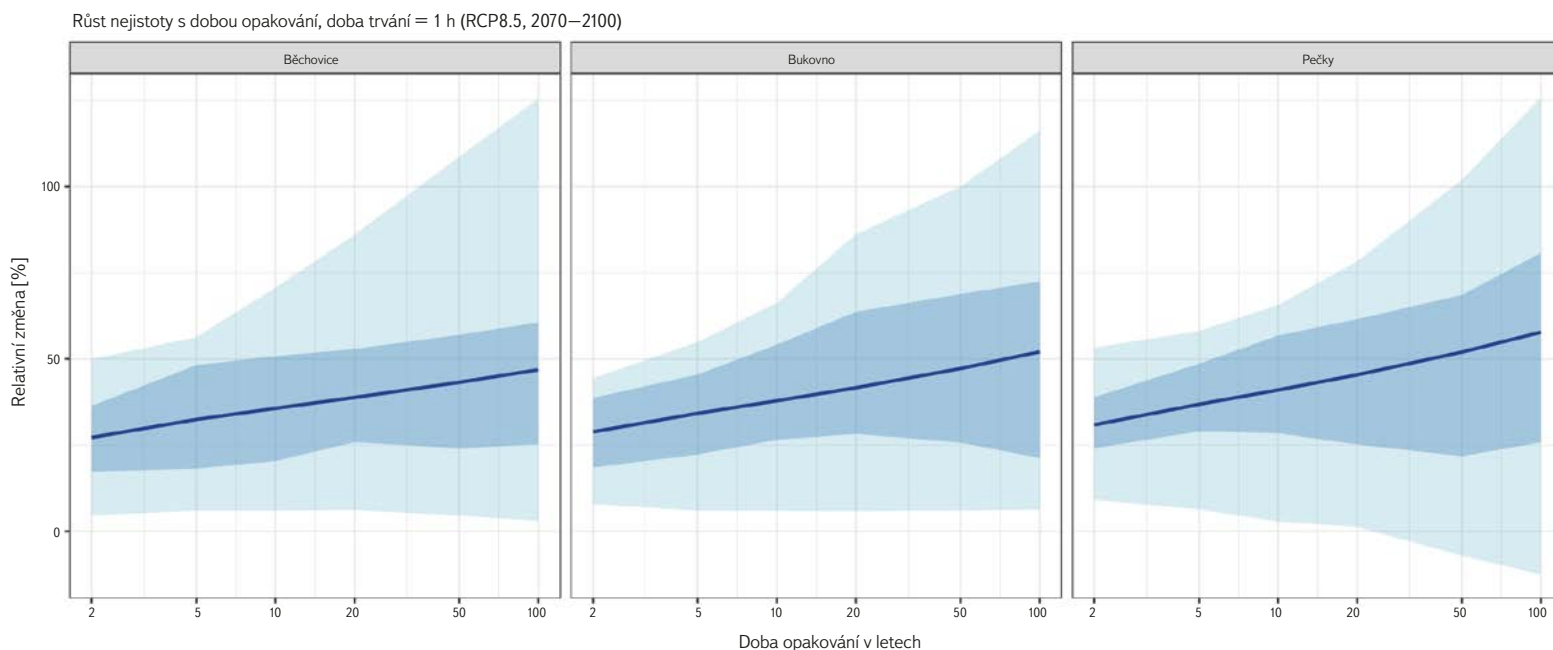
Interpretace vysokých relativních změn

Relativní změny přesahující 100 % představují horní část rozdělení projekcí a nejsou reprezentativní pro střed ensemblu. Jejich výskyt je spojen s kombinací silného klimatického signálu a kladného κ .



Obr. 3. Srovnání historických a budoucích IDF křivek ($T = 100$ let) pro pilotní lokality Bukovno, Pečky a Běchovice. Plná čára představuje medián projekcí scénáře RCP8.5 (2070–2100), přerušovaná čára referenčního období. Světle modrá plocha znázorňuje rozpětí 5.–95. percentilu ensemblu, tmavší modrá plocha rozpětí 25.–75. percentilu

Fig. 3. Comparison of historical and future IDF curves ($T = 100$ years) for the pilot locations Bukovno, Pečky, and Běchovice. The solid line represents the median of the RCP8.5 (2070–2100) projections, while the dashed line corresponds to the reference period. The lighter blue area indicates the 5th–95th percentile range of the ensemble, and the darker blue area shows the 25th–75th percentile range



Obr. 4. Závislost relativní změny návrhového kvantilu na době opakování (logaritmická osa) pro dobu trvání 1 h, scénář RCP8.5 (2070–2100). Plně čárý představují průměr změn, světle modrá plocha znázorňuje rozpětí 5.–95. percentilu ensamble, tmavší modrá plocha rozpětí 25.–75. percentilu. Rozptyl mezi realizacemi roste s dobou opakování, což odráží citlivost extrapolace na tvarový parametr κ

Fig. 4. Dependence of the relative change in the design quantile on return period (logarithmic scale) for a 1-hour duration under the RCP8.5 scenario (2070–2100). Solid lines represent the mean change, the light blue area indicates the 5th–95th percentile range of the ensemble, and the darker blue area shows the 25th–75th percentile range. The spread among realizations increases with return period, reflecting the sensitivity of the extrapolation to the shape parameter κ

Z čistě termodynamického hlediska by Clausius–Clapeyronův scaling při oteplení přibližně 4 K implikoval zesílení kolem 28 % [5, 6]. Průměrná hodnota 52 % ve scénáři RCP8.5 (2070–2100) tento jednoduchý scaling převyšuje, což naznačuje, že vedle termodynamického zesílení mohou hrát roli i dynamické změny cirkulace, změny konvektivní organizace nebo nelineární odezva extrémů.

Vzhledem k tomu, že studie neprovádí explicitní analýzu dynamických mechanismů, je však třeba tuto interpretaci chápat jako hypotézu konzistentní s literaturou, nikoli jako přímý důkaz.

Implikace pro návrh infrastruktury

Použití historických IDF křivek bez zohlednění klimatické změny vede při vyšších emisních scénářích k systematickému podhodnocení objemů extrémních srážek.

Zároveň však nelze považovat průměr ensamble za dostatečný reprezentant rizika. Návrhové hodnoty by měly reflektovat celé rozpětí projekcí a být posuzovány v kontextu akceptovatelné úrovně rizika a životnosti infrastruktury.

Aplikační rámec studie

Metodika i výběr pilotních lokalit zároveň přímo navazují na zadání projektu „Adaptace urbanizovaných území na přívalové povodně a sucho“ (SrUrb, č. SS06010386), financovaného Technologickou agenturou ČR v programu Prostředí pro život. Cílem projektu je podpora rozhodovacích procesů při adaptaci urbanizovaných území na extrémní hydrometeorologické jevy, což předurčilo výběr lokalit s vysokou mírou urbanizace a přímou praktickou relevancí pro návrh opatření.

Zvolený 30km prostorový buffer a regionální frekvenční přístup byly proto koncipovány primárně jako nástroj aplikovatelného odhadu návrhových hodnot v konkrétních projektových územích, nikoli jako obecná klimatologická regionalizace na národní úrovni. Tento aplikační rámec vysvětluje pragmatickou volbu prostorových kritérií i zaměřením na 100letý návrhový kvantil, který je klíčový pro dimenzování městské infrastruktury.

Limity metodického řešení

Přestože studie poskytuje systematickou kvantifikaci změn IDF, je nutné zdůraznit několik omezení. Studie je založena na hodinových výstupech regionálních klimatických modelů, které neumožňují explicitní zachycení subhodinových extrémů. Krátkodobé intenzivní srážky s dobou trvání pod jednu hodinu proto mohou být v modelových projekcích podhodnoceny či zanedbány. Použitý GEV model byl aplikován stacionárně na jednotlivá časová období, aniž by byla implementována explicitní nestacionární parametrizace s časově proměnnými parametry. Rovněž nebyla provedena formální dekompozice variance na složku modelovou, scénářovou a interní variabilitu. Uvedené aspekty představují omezení studie a současně potenciální směr dalšího metodického rozvoje.

Dále je potřeba zmínit, že regionální klimatické modely jsou zatíženy systematickými biasy [16]. Přestože byla použita relativní změna vůči historickému běhu modelu, nelze vyloučit strukturální chyby v reprezentaci extrémních procesů [16]. Současně regionální frekvenční analýza předpokládá homogenitu oblasti [9]. Ačkoli byla homogenita statisticky testována, reálné klimatické pole může vykazovat prostorové gradienty, které tento předpoklad částečně porušují [9].

Výsledky je proto vhodné interpretovat především jako podporu rozhodování v projektových územích a jako ilustraci možného rozsahu změn extrémních srážek, nikoli jako plošnou klimatickou charakteristiku celé České republiky.

Navzdory těmto omezením poskytuje studie robustní rámec pro kvantifikaci změn návrhových srážek a jejich nejistoty.

ZÁVĚR

Cílem předložené studie bylo kvantifikovat změny návrhových srážek v nepozorovaných lokalitách a systematicky vyhodnotit nejistotu 100letého návrhového kvantilu v podmínkách klimatické změny. Kombinace regionální frekvenční analýzy a vícemodového ensamble regionálních klimatických projekcí umožnila propojit lokální statistický odhad extrémů s globálním a regionálním klimatickým kontextem [9, 14, 15].

Výsledky ve většině realizací indikují zesílení extrémních srážek napříč hodnocenými scénáři, přičemž velikost změny obecně roste s emisní trajektorií i s časovým horizontem [1, 18]. Ve scénáři RCP8.5 dosahuje průměrná relativní změna 100letého hodinového kvantilu do konce století hodnot přibližně 30–50 %, zatímco horní hranice rozpětí ensamble může indikovat i více než zdvojnásobení extrémů. Současně však interval nejistoty zahrnuje i realizace s menší nebo nevýraznou změnou, což odráží přetrvávající modelovou variabilitu emisních scénářů. Tyto výsledky mají významné implikace pro dimenzování infrastruktury s dlouhou životností, zejména při rozhodování v podmínkách velkých nejistot [7].

Analýza nejistoty ukázala, že v blízkém horizontu (2035–2065) dominuje modelová variabilita mezi jednotlivými regionálními klimatickými modely [7]. Ve vzdálenějším horizontu (2070–2100) se však významně projevuje divergence emisních scénářů [7, 18]. To znamená, že rozhodování o adaptačních opatřeních musí zohlednit nejen průměrnou projekci, ale i rozpětí možného vývoje a související emisní trajektorii.

Zjištěné zesílení extrémů je fyzikálně konzistentní s očekávaným Clausius-Clapeyronovým scalingem přibližně 7 % na 1 K oteplení [5, 6]. Mírně vyšší zesílení ve scénáři RCP8.5 může odrážet kombinaci termodynamických a dynamických změn v atmosférické cirkulaci a konvekci [1, 6].

Z hlediska vodohospodářské praxe výsledky naznačují, že použití historických IDF křivek bez zohlednění klimatické změny může vést k systematickému poddimenzování infrastruktury [1, 3]. Rozptýl ensamble zároveň ukazuje, že návrh založený pouze na průměrné projekci nemusí být z hlediska řízení rizika dostatečný [7]. Budoucí adaptivní přístup by měl pracovat s intervalem možných změn a explicitně zohledňovat nejistotu.

Studie představuje metodický rámec, který lze aplikovat i na další regiony s omezenou hustotou měření. Další výzkum by měl směřovat k využití nestacionárních modelů extrémních hodnot, k aplikaci konvekčně-permitujících klimatických modelů s vyšším časovým rozlišením a k hlubší integraci klimatických projekcí do rozhodovacích procesů v oblasti hospodaření se srážkovými vodami [6, 20].

Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci projektu č. SS06010386 „Adaptace urbanizovaných území na přívalové povodně a sucho“ pod záštitou Technologické agentury ČR a současně s podporou projektu č. 42200-1312-3158 „Climate Model-Based Estimation of Intensity-Duration-Frequency Curve Changes“ podpořeného Interní grantovou agenturou FŽP.

Literatura

- [1] SENEVIRATNE, S. I., ZHANG, X., ADNAN, M., BADI, W., DERECZYNSKI, C., DI LUCA, A., GHOSH, S., ISKANDAR, I., KOSSIN, J., LEWIS, S. et al. Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021, s. 1513–1766. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>
- [2] KATZ, R. W., PARLANGE, M. B., NAVEAU, P. Statistics of Extremes in Hydrology. *Advances in Water Resources*. 2002, 25(8–12), s. 1287–1304. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00056-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00056-8)
- [3] KOURTIS, I. M., TSIHRINTZIS, V. A. Update of Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves under Climate Change: A Review. *Water Supply*. 2022, 22(5), s. 4951–4974. Dostupné z: <https://doi.org/10.2166/ws.2022.152>
- [4] LANGOUSIS, A., VENEZIANO, D. Intensity-Duration-Frequency Curves from Scaling Representations of Rainfall. *Water Resources Research*. 2007, 43(2), W02422. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2006WR005245>
- [5] ALLEN, M. R., INGRAM, W. J. Constraints on Future Changes in Climate and the Hydrologic Cycle. *Nature*. 2002, 419, s. 224–232. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/nature01092>
- [6] WESTRA, S., FOWLER, H. J., EVANS, J. P., ALEXANDER, L. V., BERG, P., JOHNSON, F., KENDON, E. J., LENDERINK, G., ROBERTS, N. M. Future Changes to the Intensity and Frequency of Short-Duration Extreme Rainfall. *Reviews of Geophysics*. 2014, 52(3), s. 522–555. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/2014RG000464>
- [7] HAWKINS, E., SUTTON, R. T. The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2009, 90(8), s. 1095–1108. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2607.1>
- [8] COLES, S. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. London: Springer, 2001. ISBN 978-1-85233-459-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>
- [9] HOSKING, J. R. M., WALLIS, J. R. *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. ISBN 9780521019408. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511529443>
- [10] HAILEGEORGIS, T. T., THOROLFSSON, S. T., ALFREDESEN, K. Regional Frequency Analysis of Extreme Precipitation with Consideration of Uncertainties to Update IDF Curves for the City of Trondheim. *Journal of Hydrology*. 2013, 498, s. 305–318. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.019>
- [11] VAN DE VYVER, H. Bayesian Estimation of Rainfall Intensity–Duration–Frequency Relationships. *Journal of Hydrology*. 2015, 529(Part 3), s. 1451–1463. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.036>
- [12] CRHOVÁ, L., BLIŽŇÁK, V., KAŠPAR, M., MÜLLER, M., SVOBODA, V., ŠERCL, P., ŠTĚPÁNEK, P. SS02030040-V46. *Souhrnná výzkumná zpráva (VSOUHRN). Návrhové hodnoty srážek*. 2023. Dostupné z: <https://www.perun-klima.cz/results/navrhSrazekZprava.pdf>
- [13] KAVKA, P., KAŠPAR, M., CRHOVÁ, L., PAVEL, M., MÜLLER, M., BLIŽŇÁK, V., HULEC, F., STROUHAL, L., LANDA, M., WEYSKRABOVÁ, L., KUBÁT, J.-F., STEHLÍK, M., PECHA, M., SVOBODA, V. *Metodika. Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině*. Praha: ČVUT, ÚFA AV ČR, ČHMÚ, Sweco Hydroprojekt, a. s., FSv ČVUT, 2023. ISBN: 978-80-01-07115-1. Dostupné z: https://rain.fsv.cvut.cz/data/files/metodika_N_srazky_2023_web.pdf
- [14] GUTOWSKI, W. J., GIORGI, F., TIMBAL, B., FRIGON, A., JACOB, D., KANG, H.-S., RAGHAVAN, K., LEE, B., LENNARD, C., NIKULIN, G., O'ROURKE, E., RIXEN, M., SOLMAN, S., STEPHENSON, T., TANGANG, F. WCRP Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX): A Diagnostic MIP for CMIP6. *Geoscientific Model Development*. 2016, 9(11), s. 4087–4095. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4087-2016>
- [15] JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B., ALIAS, A., CHRISTENSEN, O. B., BOUWER, L. M., BRAUN, A., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GEORGIEVSKI, G., GEORGOPOULOU, E., GOBIET, A., MENUJ, L., NIKULIN, G. et al. EURO-CORDEX: New High-Resolution Climate Change Projections for European Impact Research. *Regional Environmental Change*. 2014, 14, s. 563–578. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- [16] KOTLARSKI, S., KEULER, K., CHRISTENSEN, O. B., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GOBIET, A., GOERGEN, K., JACOB, D., LÜTHI, D., VAN MEIJGAARD, E., NIKULIN, G., SCHÄR, C., TEICHMANN, C., VAUTARD, R., WARRACHSAGI, K., WULFMEYER, V. Regional Climate Modeling on European Scales: A Joint Standard Evaluation of the EURO-CORDEX RCM Ensemble. *Geoscientific Model Development*. 2014, 7(4), s. 1297–1333. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014>
- [17] MOSS, R. H., EDMONDS, J. A., HIBBARD, K. A., MANNING, M. R., ROSE, S. K., VAN VUUREN, D. P., CARTER, T. R., EMORI, S., KAINUMA, M., KRAM, T. et al. The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. *Nature*. 2010, 463, s. 747–756. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- [18] VAN VUUREN, D. P., EDMONDS, J., KAINUMA, M., RIAHI, K., THOMSON, A., HIBBARD, K., HURTT, G. C., KRAM, T., KREY, V., LAMARQUE, J.-F., MASUI, T., MEINSHAUSEN, M., NAKICENOVIC, N., SMITH, S. J., ROSE, S. K. The Representative Concentration Pathways: An Overview. *Climatic Change*. 2011, 109, 5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- [19] HOSKING, J. R. M. L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*. 1990, 52(1), s. 105–124. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1990.tb01775.x>
- [20] SARHADI, A., SOULIS, E. D. Time-Varying Extreme Rainfall Intensity-Duration-Frequency Curves in a Changing Climate. *Geophysical Research Letters*. 2017, 44(5), s. 2454–2463. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/2016GL072201>

Autoři

Ing. Ivana Strnadová¹

✉ strnadovai@fzp.czu.cz

ORCID: 0009-0003-4058-1815

Ing. Filip Strnad, Ph.D.¹

✉ strnadf@fzp.czu.cz

ORCID: 0000-0003-4669-2869

Bc. Damián Heczko¹

✉ xhecd001@studenti.czu.cz

ORCID: 0009-0005-0499-5732

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.^{1,2}

✉ hanel@fzp.czu.cz

ORCID: 0000-0001-8317-6711

¹Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí
(Česká republika)

²Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha (Česká republika)

Průspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.03.003

ISSN 0322-8916/© 2026 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

ESTIMATION OF CHANGES IN DESIGN PRECIPITATION AT UNGAUGED LOCATIONS USING A GEOSTATISTICAL MODEL OF REGIONAL FREQUENCY ANALYSIS WITH CLIMATE PROJECTIONS

STRNADOVÁ, I.¹; STRNAD, F.¹; HECZKO, D.¹; HANEL, M.^{1,2}

¹Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Environmental Sciences (Czech Republic)

²T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague (Czech Republic)

Keywords: extreme precipitation – IDF, GEV, RFA – ensemble spread – climate change – CORDEX

The study quantifies changes in the 100-year design quantile of short-duration precipitation at ungauged locations in the Czech Republic and analyzes the uncertainty structure of these estimates under climate change conditions. Reference IDF curves were derived using regional frequency analysis based on the index-flood concept, employing the GEV distribution with parameter estimation by the method of L-moments. Future changes were determined from a multi-model ensemble of CORDEX regional climate projections for the RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios over the periods 2035–2065 and 2070–2100.

Under the RCP8.5 scenario (2070–2100), the mean relative change in the 100-year hourly quantile is approximately 52 %, with the 5th–95th percentile range spanning from -7 % to +126 %. In the period 2035–2065, differences among emission scenarios are smaller than internal model variability, whereas in the second half of the century the emission trajectory becomes the dominant source of projection divergence. The relative amplification is higher for shorter durations, indicating a disproportionate sensitivity of short-term extremes.

The analysis shows that uncertainty at high return periods is strongly influenced by estimation of the GEV shape parameter, where small differences lead to nonlinear growth of extrapolated quantiles. The detected intensification of extreme precipitation is consistent with the expected thermodynamic amplification of the hydrological cycle; however, the ensemble spread highlights substantial structural uncertainty in regional climate models.

The results indicate that the use of historical IDF curves without accounting for climate change may lead to systematic underestimation of design values, particularly for infrastructure with long service life.