

Propojení kritických bodů s indikátorem přívalových povodní

PETR ŠERCL, MARTIN PECHA, VOJTĚCH SVOBODA, TOMÁŠ VLASÁK, KAREL DRBAL, MARTIN CALETKA, PAVLA ŠTĚPÁNKOVÁ

Klíčová slova: přívalové povodně – riziko povodní – Flash Flood Indication (FFI) – kritické body – urbanizace – nowcasting

ABSTRAKT

Príspevek se zabývá problematikou zpřesnění odhadu nebezpečí přívalových povodní prostřednictvím inovace aplikace Indikátor přívalových povodní (Flash Flood Indicator, dále FFI), který je využíván v předpovědní povodňové službě Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ). Dosavadní přístup FFI vycházel především z hodnocení nebezpečí stanoveného na základě porovnání odtokové odezvy a prahových hodnot odvozených od teoretických průtoků s danou dobou opakování, přičemž expozice a zranitelnost byly uvažovány pouze implicitně. V článku je navrženo rozšíření metodiky o explicitní zohlednění těchto složek rizika prostřednictvím dvou hlavních přístupů: (i) úpravy prahových hodnot nebezpečného odtoku v závislosti na míře urbanizace území a (ii) začlenění kritických bodů (míst potenciálního vstupu drah soustředěného odtoku do urbanizovaných lokalit) a jejich přispívajících ploch do výpočtů FFI.

Na základě analýzy vybraných srážkových epizod z let 2023–2024 bylo prokázáno, že snížení prahových hodnot v urbanizovaných oblastech vede k realističtějšímu odhadu míry rizika lokálního zatopení, zejména v intravilánu obcí. Současně bylo ukázáno, že zahrnutí kritických bodů, definovaných jako místa soustředěného odtoku na rozhraní extravilánu a intravilánu, významně zlepšuje identifikaci lokalit se zvýšeným rizikem, které nejsou dostatečně zachyceny v polygonové síti 3 × 3 km. Výsledky dále potvrzují zásadní vliv kvality vstupních meteorologických dat – především radarových odhadů srážek – na přesnost výsledného hodnocení rizika. Navržené úpravy představují krok od hodnocení samotného nebezpečí ke komplexnějšímu vyjádření reálného rizika, jež zohledňuje prostorovou variabilitu expozice a zranitelnosti. Článek zároveň identifikuje hlavní limity současného přístupu a formuluje doporučení pro další vývoj systému FFI, zejména v oblasti zpřesnění meteorologických vstupů a adaptivního nastavení prahových hodnot.

ÚVOD

Přívalové povodně mohou způsobit významné materiální škody i ztráty na životech. Vznikají následkem rychlého odtoku vody vyvolaného intenzivními srážkami většinou na menším území. Srážky spadlé na území o velikosti nejčastěji do několika km² s dobou trvání v řádu jednotek až desítek minut zpravidla nevyvolají přívalovou povodeň, ale pouze rychle se tvořící povrchový odtok z okolních pozemků. Ten může způsobovat lokální zatopení níže ležících míst a objektů. Pokud však přívalové srážky trvají déle a zasáhnou větší území, povrchový odtok se koncentruje do údolí stálých vodotečí a při souběžném zasažení vícero povodí menších vodních toků může pod jejich soutokem vyvolat přívalovou povodeň, která postihne i obce ležící níže po toku.

Výskytu přívalových povodní v různých částech světa a jejich katastrofálním následkům je věnována mediální pozornost. Z Evropy je možné zmínit povodně z července 2021 v Německu na řece Ahr (180 obětí na životech) a z října 2024 v okolí Valencie ve Španělsku v povodí řeky Turia (232 obětí). Vysoký počet obětí v případě povodní v Německu byl způsoben chybným vyhodnocením situace ze strany obyvatelstva, kdy meteorologické prognózy byly sice správné a více-méně přesné, ale hydrologická odezva a zejména její dopady byly podceněny, a tudíž chybělo i potřebné varování před extrémní povodní [1]. Ve Španělsku šlo primárně o pozdní varování ze strany samosprávy a všeobecně o celkovou nepřipravenost krizového systému, infrastruktury a obyvatelstva [2].

Na území České republiky (ČR) se v poslední době přívalové povodně většího územního rozsahu a extremity vyskytly např. 7. června 2020 ve večerních hodinách na Uničovsku a části Šumperska [3], případně 29. června 2022 večer v Pošumaví v povodí Blanice na Zlatém potoce [4]. Kulminační průtoky obou povodní dosahovaly doby opakování cca 50 let.

Včasná varování před přívalovými povodněmi je často velmi obtížné. Rozlišení meteorologických modelů a složitá fyzika atmosféry u konvektivních bouří neumožňují přesné určení místa výskytu srážek s nebezpečnými úhrny. U extrémních srážek většího územního rozsahu je pravděpodobnost úspěšné předpovědi vyšší. Meteorologické modely však predikují hodnoty některých parametrů (např. CAPE – konvektivní dostupná potenciální energie), z nichž je možné dedukovat obecné nebezpečí výskytu přívalových srážek v dané (větší) oblasti. Nejistota předpovědi často přetrvává i v den očekávané události. Variabilita jednotlivých výstupů předpovědních modelů je vysoká, což komplikuje územní specifikaci meteorologických či hydrologických výstrah. Klíčovým faktorem ovlivňujícím odtok je také nasycení půdy z předchozích srážek, jehož vyšší hodnoty snižují práh potenciálně nebezpečných srážkových úhrnů.

Pro přesnější predikci přívalových povodní je proto nutné využívat data z meteorologických radarů. Z aktuálního vývoje srážkové významné oblačnosti v čase a prostoru se počítá propagace této oblačnosti v horizontu cca 30 minut až hodiny. Tato krátkodobá předpověď, která na základě pohybu srážkové oblačnosti a výškového proudění za poslední časový interval vypočítá následné pozice této srážkové oblačnosti v daném intervalu, se nazývá nowcasting. Metoda nowcastingu, jež je nyní využívána v ČHMÚ, posouvá srážkovou oblačnost v čase bez jakékoli změny její struktury (intenzity deště), což je zatím největší omezení této metody krátkodobé předpovědi.

Informace o aktuální nasycenosti půdy a aktuálním vývoji srážkové oblačnosti používá FFI, který slouží ke krátkodobé predikci nebezpečí lokálního zatopení a vzniku přívalových povodní. Tento nástroj je v předpovědní službě ČHMÚ využíván již několik let a od roku 2017 prošel významným vývojem [5]. Zkušenosti z provozu FFI v roce 2022 a částečně v roce 2023 jsou analyzovány a komentovány v článku [4].

Nebezpečí vzniku přívalových povodní a lokálního zatopení doposud nebylo v systému FFI příliš svázáno s rizikem, které vedle nebezpečí zahrnuje i prvky expozice a zranitelnosti. Výzkumný projekt, za jehož podpory vznikl tento článek, si kládí za jeden z cílů prvky expozice a zranitelnosti do systému FFI zahrnout, a to zejména využitím nově odvozených lokalit kritických bodů a jejich přispívajících ploch v celé ČR. Kritické body, jako jsou průsečíky drah soustředěného odtoku s hranicí intravilánu, představují místa, kde se koncentruje projev nebezpečí z přívalových srážek a současně je možné hovořit o riziku (škod, ztrát na životech a zdraví obyvatel) v urbanizované ploše.

V článku jsou na vybraných událostech přívalových povodní ukázány stávající možnosti systému FFI ohledně jejich predikce. U lokálního zatopení jsou rozebírány možnosti úpravy parametrů pro stanovení kritických prahů nebezpečného odtoku a využití kritických bodů pro posílení prvků zranitelnosti a expozice ve výpočtech FFI. U vybraných událostí je na provedených resimulacích zhodnoceno zahrnutí upravených prahů kritického odtoku a vrstvy kritických bodů.

METODIKA

Odhad rizika v Indikátoru přívalových povodní

Riziko je nejčastěji vyjádřeno mírou pravděpodobnosti výskytu nežádoucího jevu a nepříznivých dopadů na životy, zdraví, majetek nebo životní prostředí. Obecně riziko vzniká spolupůsobením nebezpečí, zranitelnosti a expozice, tj. doby, po kterou nebezpečí působilo.

$$R = f(\text{Nebezpečí}, \text{Expozice}, \text{Zranitelnost}) \quad (1)$$

Riziko je tím větší, čím delší je doba expozice, tj. čím delší je doba, po kterou je objekt vystaven nebezpečí, a čím větší je jeho zranitelnost.

Z pravděpodobnostního hlediska je riziko definováno jako n -tice vektorů [6]:

$$R_i \equiv (S_{c_i}, P_i, D_i), i = 1, \dots, n \quad (2)$$

kde:

S_c	je	scénář nebezpečí
P		pravděpodobnost výskytu scénáře nebezpečí
D	jsou	následky (poškození, škoda), vyjádřené ve vhodných jednotkách

Všechny tyto veličiny jsou časově závislé, neboť jak scénář nebezpečí, tak pravděpodobnost jeho výskytu a škoda se mohou v čase měnit. V souladu s uvedenou obecnou definicí je možné riziko určit jako spojitou funkci podle vztahu:

$$R(D) = \int_0^\infty (D(u|O) \cdot g(u) \cdot du) \quad (3)$$

kde:

$D(u O)$	je	funkce následků
u		kvantifikátor události závislý na vektoru opatření a rozhodnutí
O		výška ochranné hráze podél toku, kapacita svodného průlehu, včasná evakuace apod., jež ovlivňují následky extrémní události

Funkce $g(u)$ představuje hustotu pravděpodobnosti výskytu události (scénáře nebezpečí) s následky $D(u|O)$.

K vyjádření rizika v rámci nástroje – Indikátoru přívalových povodní – byl uplatněn jednoduchý koncepční model, který vychází ze vztahu (1). V kontextu problematiky přívalových povodní a pro vyšší srozumitelnost textu jsou jednotlivé komponenty rizika zavedeny následovně:

- **Nebezpečí (hazard):** je stav (hrozba nebo jev) s potenciálem způsobit nežádoucí následky. Ve sledovaném kontextu se jedná o přívalovou povodeň nebo lokální zatopení jako následky zejména velmi intenzivního deště, příp. porušení hráze vodní nádrže (zvláštní povodně). Tyto jevy mohou způsobit záplavy, poškodit budovy, infrastrukturu a ohrozit životy.

Indikátor přívalových povodní (FFI) počítá pravděpodobnou odtokovou odezvu na již spadlé, právě padající či očekávané srážky, a to:

- v systému povodí a říčních úseků, kde v každém dílčím povodí je v místě závěrového profilu odvozen průběh odtokové odezvy v čase; výstupem je odhad charakteristik nebezpečí, tj. přívalové povodně pro obce s rozšířenou působností,
- v pravidelné polygonové síti 3×3 km, kde je odvozena velikost maximálního specifického odtoku v daném polygonu; výstupem je odhad charakteristik nebezpečí lokálního zatopení pro obce s rozšířenou působností.

Kombinací charakteristik obou složek nebezpečí, lokálního zatopení a přívalové povodně, je odvozena míra tzv. „souhrnného“ nebezpečí přívalové povodně.

Kulminační průtok či maximální specifický odtok je porovnán s teoretickou hodnotou průtoku (specifického odtoku) s dobou opakování 100 let a na základě stanovených prahových hodnot se určí míra nebezpečí přívalové povodně (v systému povodí) a lokálního zatopení (v polygonové síti). Míra nebezpečí je klasifikována podle teoretické doby opakování daného jevu bez ohledu na lokalitu výskytu. Výsledkem je vyjádření nebezpečí jevu ve čtyřstupňové škále {0, 1, 2, 3}.

- **Expozice (exposure):** expozice popisuje, do jaké míry (resp. po jakou dobu) jsou lidé, infrastruktura, majetek nebo jiné hodnotné prvky vystaveny nebezpečí. Jde o obyvatele, domy, silnice, infrastrukturu nebo zemědělskou půdu, které se nacházejí v oblasti vystavené rozlivům z přívalových povodní či lokálnímu zatopení. Např. domy v blízkosti vodního toku, kde nejsou dostatečné protipovodňové zábrany, nebo nízko položené oblasti v obcích bez dostatečných odvodňovacích systémů jsou více vystaveny uvedenému nebezpečí.

- **Zranitelnost (vulnerability):** zranitelnost představují podmínky dané fyzickými, sociálními, ekonomickými a environmentálními faktory či procesy, jež zvyšují vnímavost/náchylnost jednotlivce, komunity, hmotného majetku nebo systémů vůči dopadu nebezpečí. V případě povodní zranitelnost může znamenat:

- málo odolné budovy vůči účinkům (proudící) vody,
- chybějící nebo nedostačující protipovodňové plány či opatření,
- nedostatečně funkční odvodňovací systémy v zástavbě, např. malá kapacita mostů, propustků či kanalizace,
- nedostatečná informovanost obyvatel o potenciálním ohrožení či aktuálním riziku.

V rámci nástroje FFI jsou vlastnosti území dané expozicí a zranitelností určující pro vyjádření rozdílu mezi intravilánem a extravilánem. Jak pro klasifikaci expozice, tak i pro zranitelnost je ve výsledku uplatněna dvoustupňová škála {0, 1}, v logice:

Expozice:

Intravilán {1}

Extravilán {0}

Zranitelnost:

Intravilán {1}

Extravilán {0}

(4)

Zastavěné území (intravilán) je tedy v systému FFI klasifikováno maximálním stupněm. Riziko se tak stává funkcí samotného nebezpečí s tím, že expozice a zranitelnost jsou uvažovány jako (nenulové) konstanty. V tomto případě tudíž platí:

$R = f(\text{Nebezpečí})$

(5)

Míra nebezpečí, a tím i rizika, roste s dobou opakování jevu, např. povodeň s dobou opakování 100 let představuje větší nebezpečí než povodeň s $N = 10$ let. Ukázalo se však, že míru nebezpečí je nutné posuzovat odlišně v extravilánu a v intravilánu. V územích s vyšším podílem urbanizovaných ploch úměrně roste podíl odtoku vody ze srážek, tj. potenciálně nebezpečný odtok nastává s vyšší frekvencí. Zároveň se významně zvyšuje pravděpodobnost větší expozice a zranitelnosti, a proto potenciální nebezpečí, které představuje v extravilánu 100letá povodeň, nastává v intravilánu s větší četností.

Z uvedeného je zřejmé, že stále trvá potřeba zpřesnění zranitelnosti či expozice pro konkrétní místa s takovou podrobností, aby bylo možné nastavit prahy nebezpečného odtoku pro každé konkrétní povodí či říční úsek, příp. polygon, v systému FFI. Pro nebezpečí lokálního zatopení byl proto navržen jednoduchý princip, který zohledňuje podíl urbanizovaných ploch na míře nebezpečí, a to stanovením nižších prahových hodnot vůči velikosti 100letého specifického odtoku:

$T_u = T_{100} + (T_0 - T_{100}) \cdot (1 - u_p)^2$

(6)

kde:

u_p	je	podíl urbanizovaného území v daném polygonu nebo dílčím povodí
T_{100}		prahová hodnota vůči 100letému specifickému odtoku v intravilánu
T_0		prahová hodnota vůči 100letému specifickému odtoku v extravilánu

Uplatněním uvedeného principu je upravena klasifikace nebezpečí, a tím i hodnota rizika přívalové povodně, viz vztah (5).

Kritické body a Indikátor přívalových povodní

Kritické body – ve vztahu k povodňovému nebezpečí – jsou místa na rozhraní extravilánu a intravilánu, kde za situace přívalových srážek může dojít k soustředěnému odtoku vody z pozemků v extravilánu, tvořících tzv. přispívající plochu. Přispívající plocha je povodí, které je uzavřeno profilem kritického bodu.

Soustředěný odtok proto představuje bezprostřední nebezpečí pro danou obec a za určitých okolností i významné riziko spočívající v ohrožení majetku a životů obyvatel obce. Stanovení kritických bodů vychází z upravené metodiky [7], kde významnými parametry jsou vedle velikosti příslušné přispívající plochy rovněž průměrná sklonitost, podíl orné půdy a hodnota parametru CN (číslo odtokové křivky), jež slouží k vyjádření souhrnné charakteristiky tzv. ukazatele kritických podmínek (F).

V rámci stanovení rizik vyplývajících z lokálního zatopení nebo přívalové povodně ve FFI byl původní předpoklad začlenit povodí přispívajících ploch do výpočtu odhadu rizika přívalové povodně, tedy počítat riziko v systému vzájemně propojených povodí a říčních úseků. Z hlediska faktického vyhodnocení nebezpečí, které plyne z potenciálního výskytu přívalových srážek na povodích kritických bodů, bylo rozhodnuto začlenit povodí ke kritickým bodům (KB) pro stanovení nebezpečí následkem lokálního zatopení, jelikož odtoková odezva odpovídá svou povahou spíše pluvialní povodni než fluvialní (říční) povodni. Přispívající vrstvy kritických bodů budou tedy v systému FFI fungovat jako samostatná vstupní vrstva GIS s vypočtenými fyzickogeografickými charakteristikami a určenými prahovými hodnotami pro vyhodnocení míry rizika lokálního zatopení.

Zapojení kritických bodů a jejich charakteristik do systému FFI bylo testováno na datech odvozených v rámci předchozího projektu v roce 2009 (celkem 9 261 kritických bodů a přispívajících ploch). Postupně se přechází na vrstvy aktualizovaných KB z roku 2026. Při klasifikaci povodí kritických bodů z hlediska odhadu rizik se vycházelo z upraveného přístupu (viz kap. Odhad rizika v Indikátoru přívalových povodní), který kromě zvyšování míry nebezpečí s růstem doby opakování kulminačního průtoku předpokládá rovněž zvyšování expozice a zranitelnosti s růstem míry urbanizace v povodí. Vzhledem k tomu, že kritické body, jako jsou závěrové profily přispívajících ploch, leží na hranici intravilánu, byly prahové hodnoty pro stanovení míry nebezpečí uvažovány pro stupeň urbanizace odpovídající 100 %.

Výpočetní procedura FFI, pomocí níž je odvozována míra nebezpečí (a rizika) vzniku lokálního zatopení z přívalových srážek, byla upravena tak, že vedle stanovení odtoku v rámci čtvercové sítě 3 × 3 km je počítáno i riziko nebezpečného odtoku z povodí ke kritickým bodům. Příslušnost jednotlivých povodí kritických bodů k obci s rozšířenou působností (ORP) je dána závěrovým profilem povodí a jeho polohou vůči ORP. Výsledná míra rizika plynoucího z lokálního zatopení je brána jako ta méně příznivá dle výpočtů nad čtvercovou sítí a na povodí ke kritickým bodům.

VÝSLEDKY

Úprava prahových hodnot nebezpečného odtoku

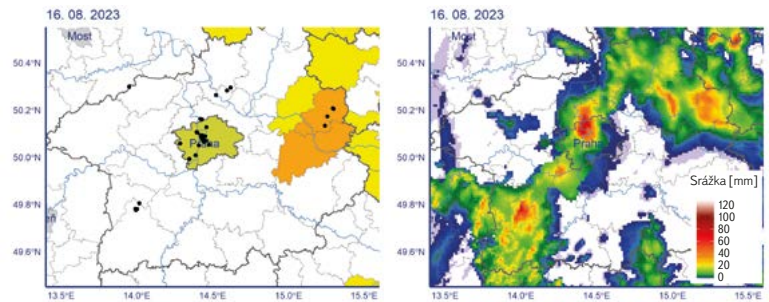
Vztah (6) byl testován na vybraných významnějších srážkových epizodách v letech 2023–2024, jež způsobily lokální zatopení, a to především v intravilánu měst. Jako podklad pro výběr epizod posloužily vedle srážkových údajů i údaje o výjezdech hasičů, které má ČHMÚ pro interní potřebu k dispozici, a také fotky a videa ze zasažených oblastí.

Zmenšení prahových hodnot v některých případech logicky vedlo k odhadům vyššího stupně rizika lokálního zatopení v polygonech, kde skutečné riziko bylo dle reálných následků větší než odhad rizika dle původních prahových hodnot (tab. 1).

Tab. 1. Vybrané testované události s výskytem přívalových srážek
Tab. 1. Selected tested events with occurrence of torrential rainfall

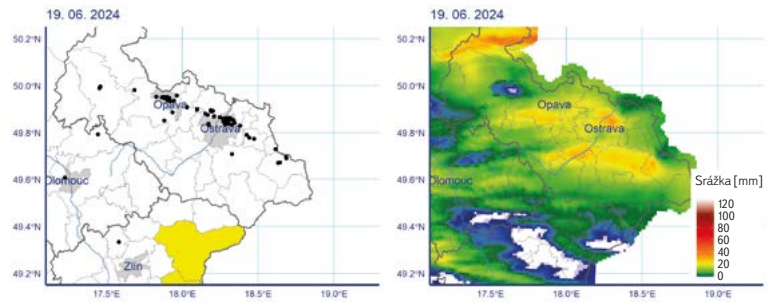
Termín výpočtu	Testovaná ORP	Původní max. riziko	Nové max. riziko
16. 8. 2023 18:50	Praha	1	2
13. 9. 2023 22:20	Opava	1	1
6. 6. 2024 20:05	Brno	0	0
19. 6. 2024 21:35	Ostrava	0	1
18. 8. 2024 17:35	Praha	2	3

Podrobněji jsou dále popsány tři vybrané epizody, u nichž se díky změnám v nastavení prahových hodnot podařilo výstupy FFI přiblížit realitě v zasažených oblastech. Jde o dny 16. srpna 2023, 19. června 2024 a 18. srpna 2024. Ve zbylých dvou případech v Opavě a Brně ani změna parametrů nezpůsobila změnu vypočteného stupně rizika. Obrázek vlevo ukazuje místa zásahů hasičů v terénu spojená s vodou (černé tečky) a nejvyšší hodnotu rizika pro jednotlivé obce s rozšířenou působností (ORP), kde barevné rozlišení odpovídá riziku 0–3, jak je uvedeno v tab. 1. Obrázek vpravo ukazuje rozložení a množství srážek během vybraných epizod.



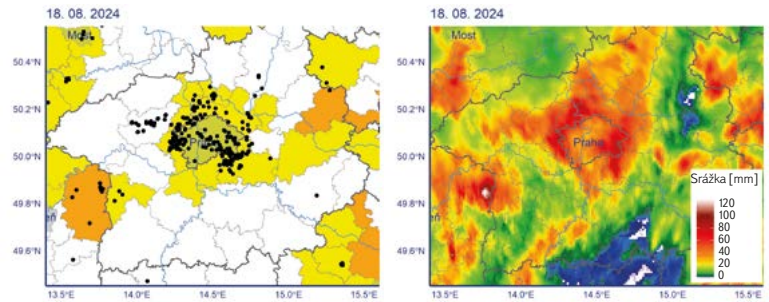
Obr. 1 a, b. Souhrnné riziko přívalové povodně a suma srážek (MERGE) z 16. srpna 2023
Fig. 1 a, b. General flash flood risk and precipitation total (MERGE) from 16th August 2023

Dne 16. srpna 2023 šlo o lokální a velmi intenzivní srážky, které se nad centrum Prahy nasouvaly od severu a pohybovaly se velmi pomalu (obr. 1 b). Zůstávaly tak nad jedním místem delší dobu a za cca hodinu spadlo 40 až 50 mm (např. stanice Praha-Střešovice 44,5 mm). Dle vysokého počtu výjezdů hasičů, informací přímo z terénu a množství fotek a videí na sociálních sítích byly zasaženy poměrně velké části centrální Prahy. Ačkoli zde byl krátkodobě téměř přerušen běžný provoz, ve dvou výpočtech FFI po sobě bylo vpodvečer identifikováno pouze nejnižší riziko vzniku lokálního zatopení (tab. 1), což znamenalo i nejnižší stupeň souhrnného rizika (obr. 1 a). Po změnách v nastavení prahových hodnot dle vzorce (6) a následné resimulaci byl vypočten druhý stupeň rizika lokálního zatopení pro centrum Prahy, což znamená alespoň přiblížení k reálným dopadům této situace v centru Prahy.



Obr. 2 a, b. Souhrnné riziko přívalové povodně a suma srážek (MERGE) z 19. června 2024
Fig. 2 a, b. General flash flood risk and precipitation total (MERGE) from 19th June 2024

Při srážkové události na Ostravsku 19. června 2024 (obr. 2) z hlediska FFI šlo o poměrně složitou situaci, jelikož přechod intenzivních srážek přes Ostravu byl velmi rychlý a FFI porovnává potenciální rizikové srážky se skutečně spadlými v rámci trvání minimálně jedné hodiny. V Ostravě spadlo na některých místech cca 30 mm za zhruba 30 minut, případně i za kratší dobu, a radarové odhady srážek byly spíše podhodnocené vůči skutečnosti. FFI v tomto případě nemohlo dostatečně zareagovat a nebyl vypočten ani nejnižší stupeň rizika. Po změně parametrů a resimulaci už byl vypočten pro některé části Ostravy alespoň nejnižší stupeň rizika lokálního zatopení.



Obr. 3 a, b. Souhrnné riziko přívalové povodně a suma srážek (MERGE) z 18. srpna 2024
Fig. 3 a, b. General flash flood risk and precipitation total (MERGE) from 18th August 2024

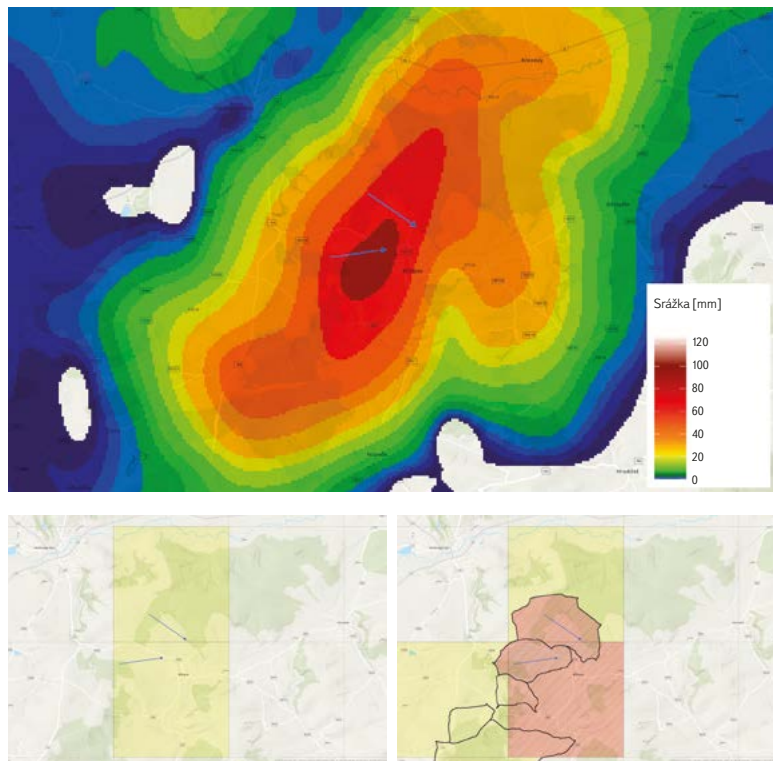
Poslední testovaná epizoda je z 18. srpna 2024, kdy byly Praha a blízké okolí zasaženy velmi intenzivní srážkovou činností (obr. 3 b). V Praze-Ruzyni, kde spadlo téměř 70 mm za hodinu, musel být dokonce přerušen provoz mezinárodního letiště, protože byla (nejen) odletová plocha zatopená. Také na mnoha dalších místech v Praze a blízkém okolí byly srážky tak intenzivní, že docházelo k lokálnímu zatopení či rychlému odtoku z krajiny. Operativní výpočty FFI vygenerovaly první stupeň souhrnného rizika (žlutá barva na obr. 3 a) a pouze výjimečně bylo riziko lokálního zatopení na stupni 2 (tab. 1). Po změnách v nastavení prahových hodnot a následné resimulaci byl v oblasti letiště Ruzyně vypočten nejvyšší stupeň nebezpečí vzniku lokálního zatopení a ve více lokalitách bylo lokální zatopení alespoň na středním stupni 2.

Začlenění kritických bodů do Indikátoru přívalových povodní

Upravené procedury FFI (viz kap. Kritické body a Indikátor přívalových povodní) byly testovány na proběhlých srážkoodtokových epizodách z minulých let, prioritně na třech vybraných povodňových událostech. Šlo o přívalovou povodeň z 2. června 2024 ve Štěnovicích na Plzeňsku a o přívalové povodně z 27. června 2024 v Blížejově na Domažlicku a v Šišmě u Lipníka nad Bečvou.

Na obr. 4 je ukázka z testování přívalové povodně v Blížejově na Domažlicku z 27. června 2024, konkrétně z termínového výpočtu 12:20 UTC, kdy byla v obci Blížejov zaznamenána významná lokální povodeň z přívalových srážek. V horní

části obrázku je znázorněno rozložení srážek (kombinovaný radarový odhad – MERGE) a ukázán směr přítoku do obce Blížejev. Patrné je zasažení dvou přispívajících ploch kritických bodů. Obrázek dole vlevo (4 b) ukazuje původní verzi výpočtu bez kritických bodů, vpravo (4 c) pak už s jejich započtením. Nejintenzivnější srážky spadly právě na povodí s vymezenými kritickými body severozápadně od okraje obce, což výrazně ovlivnilo odhad reálného nebezpečí lokálního zatopení v obci Blížejev. Zatímco výpočty pouze pro polygon 3 × 3 km ukázaly jen malé až střední riziko (žlutá), na povodí ke kritickým bodům bylo zaznamenáno riziko velmi vysoké (červená). Bezejmenná vodoteč je v obci navíc zatrubněná a níže po toku vede koryto do málo kapacitního železničního propustku, což také přispělo ke zhoršení odtokové situace v obci.



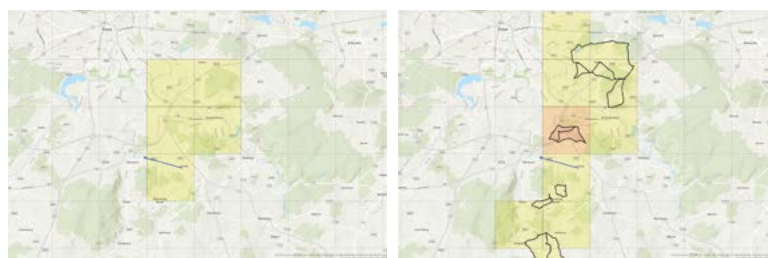
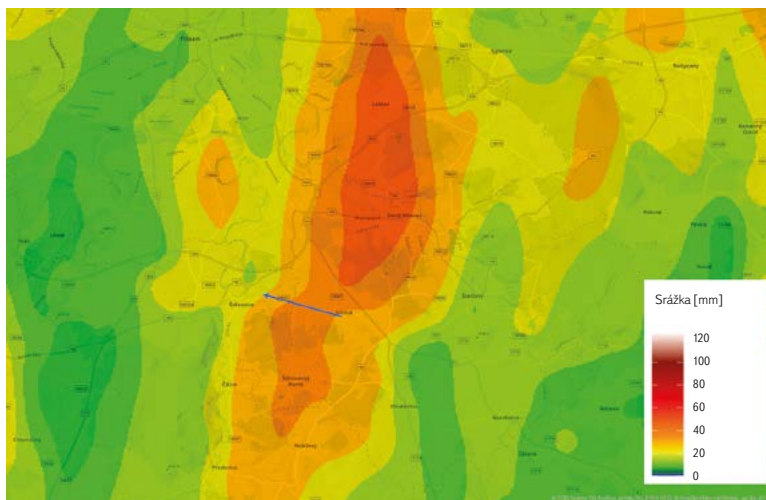
Obr. 4 a, b, c. Testování výpočtů na situaci přívalové povodně v Blížejevě na Domažlicku z 27. června 2024 v čase 12:20 UTC. Na horním obrázku je 24hodinový úhrn srážek k termínu 28. června 2024 6:00 UTC. Vlevo je verze výpočtu FFI bez kritických bodů, vpravo nová verze výpočtu FFI s jejich započtením

Fig. 4 a, b, c. Testing of calculations for the flash flood situation in Blížejev in the Domažlice region on 27th June 2024 at 12:20 UTC. The upper image shows the 24-hour precipitation total up to 28th June 2024, 06:00 UTC. On the left is the FFI calculation version without critical points; on the right is the new FFI calculation version including them

Na obr. 5 je situace z okolí obce Štěnovice na Plzeňsku z 2. června 2024, kdy se zde vyskytla významná přívalová povodeň, jež způsobila značné škody na majetku a ohrožovala i obyvatele. Obcí protéká řeka Úhlava, do které zprava ústí Losinský potok, na jehož povodí spadly přívalové srážky. Pod soutokem se nachází vodoměrná stanice na Úhlavě, která povodeň na Losinském potoce ve formě výrazné průtokové špičky zaznamenala (obr. 6). Na základě tohoto hydrogramu povodně na Úhlavě lze odvodit, že v kulminaci mohlo přitékat z Losinského potoka ($11,6 \text{ km}^2$) odhadem $40\text{--}45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($Q_{100} \approx 20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

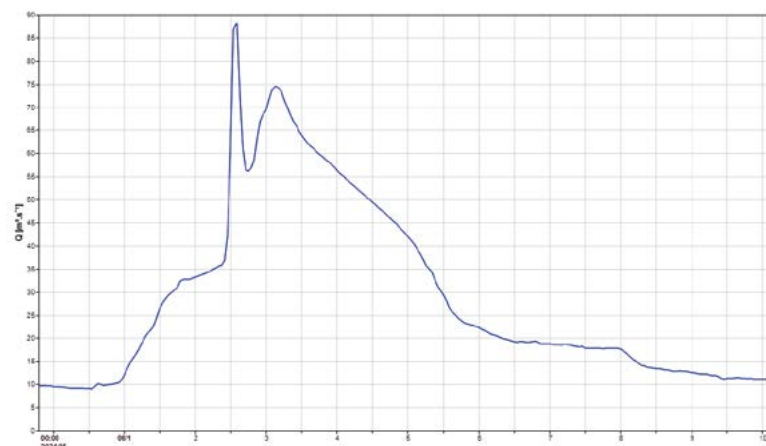
Na základě zjištění z amatérského pozorování srážek ve Štěnovicích a v obci Losíná lze usuzovat na poměrně výrazné podhodnocení radarových odhadů srážek v kombinaci se srážkoměry (metoda MERGE), což vedlo k tomu, že ve FFI bylo na povodí Losinského potoka detekováno riziko pouze na nejnižším stupni

(žlutý). Při uvažování povodí ke kritickým bodům bylo severně od Štěnovic odhadnuto riziko druhého stupně (oranžový), patrně z důvodu o něco vyšších a realitě tak nejspíše bližších odhadů srážkových úhrnů.



Obr. 5 a, b, c. Testování výpočtů na situaci přívalové povodně ve Štěnovicích na Plzeňsku z 2. června 2024 v čase 10:50 UTC. Na horním obrázku je 24hodinový úhrn srážek k 3. červnu 2024 6:00 UTC. Vlevo je verze výpočtu FFI bez kritických bodů, vpravo nová verze výpočtu FFI už s jejich započtením

Fig. 5 a, b, c. Testing of calculations for the flash flood situation in Štěnovice in the Plzeň region on 2nd June 2024 at 10:50 UTC. The upper image shows the 24-hour precipitation total up to 3rd June 2024, 06:00 UTC. On the left is the FFI calculation version without critical points; on the right is the new FFI calculation version already including them



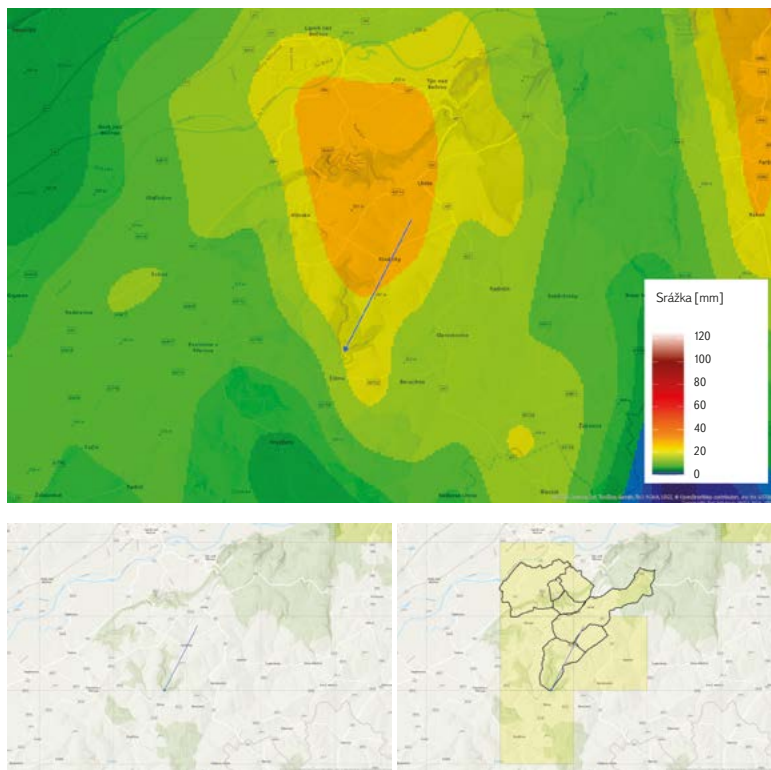
Obr. 6. Povodňová vlna na Úhlavě ve Štěnovicích na začátku června 2024

Fig. 6. Flood wave on the Úhlava river in Štěnovice at the beginning of June 2024

Třetí testovanou událostí je extrémní přívalová povodeň z 27. června 2024 na Šišemce (přítok Moštěnky) na Přerovsku, kde nejpostiženější obcí byla Šišma, ale

zasaženy byly i další obce. Průtočné poměry v obci Šišma byly nepříznivě ovlivněny mnohými mostky vedoucími přes koryto Šišemky k jednotlivým nemovitostem. Hodnota kulminačního průtoku v obcích Šišma a Hradčany přesahovala odhadem $30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (více než Q_{100}), v Prusech na Moštěnce již patrně plošší, tedy transformovaná, průtoková vlna kulminovala na hodnotě $18\text{--}20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Na obr. 7 je znázorněna situace v okolí obce Šišma a kombinované radarové odhady srážek (MERGE), které byly bohužel velmi podhodnocené. Amatérský srážkoměr v obci Šišma naměřil více než 50 mm za zhruba 30–40 minut, odhady srážek z radaru však v daném místě činily jen 10 mm. FFI také z tohoto důvodu zaznamenal riziko pouze na nejnižším stupni (žlutá), a to až při zohlednění povodí ke kritickým bodům.



Obr. 7 a, b, c. Testování výpočtů na situaci přívalové povodně v Šišmě u Lipníka nad Bečvou z 27. června 2024 v čase 15:35 UTC. Na horním obrázku je 24hodinový úhrn srážek k 28. červnu 2024 6:00 UTC. Vlevo je verze výpočtu FFI bez kritických bodů, vpravo nová verze výpočtu FFI s jejich započtením

Fig. 7 a, b, c. Testing of calculations for the flash flood situation in Šišma near Lipník nad Bečvou on 27th June 2024 at 15:35 UTC. The upper image shows the 24-hour precipitation total up to 28th June 2024, 06:00 UTC. On the left is the FFI calculation version without critical points; on the right is the new FFI calculation version including them

SHRNUTÍ, ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

Predikce přívalových povodní zůstává i nadále jednou z nejsložitějších úloh v hydrometeorologické předpovědní službě. Hlavní příčinou obtížnosti je výrazná prostorová a časová variabilita konvektivních srážek, jež zásadně omezuje schopnost jejich spolehlivé předpovědi. Numerické meteorologické modely, včetně modelů s vysokým prostorovým rozlišením, zpravidla poskytují pouze informaci o zvýšené pravděpodobnosti výskytu nebezpečných srážek v širších oblastech, nikoli však o jejich přesné lokalizaci a intenzitě. Krátkodobé zpřesnění předpovědi umožňuje nowcasting, jehož přínos spočívá zejména v extrapolaci aktuálního pohybu srážek. Tento přístup však zatím většinou nedokáže spolehlivě zachytit rychlé změny struktury a intenzity konvektivních

buněk, které jsou pro vznik přívalových povodní klíčové. Výsledná přesnost predikce přívalových povodní je navíc významně ovlivněna hydrologickými vstupy, především odhadem aktuální nasycenosti půdy, a rovněž nejistotami v odhadu množství spadlých i předpovídaných srážek.

V kontextu přívalových povodní je podstatná klasifikace území na extravilán a intravilán. V urbanizovaných územích je odtoková odezva povodí mnohem rychlejší a dochází ke zvětšení objemu povrchového odtoku, což se projevuje častějším výskytem a vyšší intenzitou lokálních záplav i při srážkách s kratší dobou opakování. Vyhodnocení míry rizika ve FFI je vázáno na prahové hodnoty překročení nebezpečného odtoku, které jsou odvozené od velikosti průtoku s dobou opakování 100 let a jsou stejné bez ohledu na klasifikaci území. Takto stanovené hodnoty ovšem nemusejí vyjadřovat skutečnou míru nebezpečí a rizika v extravilánu a intravilánu.

Zásadním prvkem expozice a zranitelnosti jsou kritické body definované jako místa, kde soustředěný povrchový odtok ze zemědělské krajiny vstupuje do intravilánu obce. Právě tato místa často představují iniciační body vzniku povodňových škod při přívalových srážkách. Zahrnutí povodí kritických bodů do výpočtu FFI výrazně zpřesňuje odhad míry nebezpečí a rizika [8], zejména v případech, kdy standardně využívaná polygonová síť o velikosti $3 \times 3 \text{ km}$ nedokáže dostatečně postihnout lokální odtokovou odezvu a její dopady na obydlená území.

I přes tyto úpravy přístupu stanovení míry nebezpečí a rizika zůstává zásadním prvkem nejistoty reprezentativnost vstupních srážkových dat. Analýza vybraných případů významných přívalových povodní, např. ve Štěnovicích dne 2. června 2024 a v obci Šišma dne 27. června 2024, ukázala výrazné podhodnocení radarových odhadů srážek ve srovnání s naměřenými úhrny amatérskými pozorovateli. Tento nedostatek měl přímý dopad na schopnost FFI adekvátně vyhodnotit míru nebezpečí, a to i přesto, že do výpočtu byly zahrnuty všechny v tu dobu dostupné údaje o srážkových úhrnech či intenzitách i kritické body. Tyto příklady, ale i některé jiné z let předchozích, zdůrazňují, že další zlepšení predikce a hodnocení přívalových povodní bude nutně závislé nejen na zpřesnění metodiky FFI, ale také na dalším rozvoji a validaci radarových srážkových produktů, které procházejí postupným vývojem [9].

Na základě upravených přístupů testovaných na reálných povodňových událostech lze formulovat následující závěry:

Testované povodňové události prokázaly, že úprava prahových hodnot nebezpečného odtoku na základě podílu urbanizovaných ploch ve výpočtových polygonech umožňuje reálnější odhad míry rizika v intravilánu. Tím dochází k lepšímu odlišení situací, jež mohou vést ke skutečným dopadům v zastavěném území, od případů, kdy zvýšený odtok zůstává bez významnějších následků. Zároveň je ale nutné mít na paměti, že zmenšení prahových hodnot odtoku může vést ke zvýšení počtu falešných alarmů.

Významný přínos pro vyhodnocování lokálního rizika představuje zahrnutí kritických bodů do výpočtu FFI. Započtení povodí kritických bodů umožňuje zachytit lokální odtokové špičky, které by v rámci standardní polygonové sítě jinak zůstaly potlačené nebo zcela opomenuty. Tento přístup přispívá zejména k přesnějšímu vyhodnocení rizika v menších obcích a v místech, kde koncentrovaný povrchový odtok vstupuje do zástavby a představuje hlavní mechanismus vzniku povodňových škod.

Současně se potvrzuje, že úspěšná predikce přívalových povodní je zásadně závislá na kvalitě meteorologických vstupů. Nejistoty v radarových odhadech srážek i v jejich krátkodobé předpovědi se přímo promítají do celkové nejistoty výsledků FFI a mohou vést k podhodnocení rizika i v případech, kdy jsou uvažovány kritické body i míra urbanizace území. Přes tyto limity však lze konstatovat, že FFI se postupně posouvá od hodnocení samotné míry nebezpečí směrem k reálnějšímu odhadu povodňového rizika.

Analýza povodňových událostí nicméně nadále ukazuje, že modelové odhady vyžadují další zpřesňování, a to zejména v městském prostředí. Lokální morfologie terénu, technická infrastruktura a způsob využití území zde mají

zásadní vliv na výslednou míru rizika a představují významnou výzvu pro další rozvoj metodických přístupů hodnocení a predikce přívalových povodní.

Z výše uvedených závěrů je možné formulovat doporučení pro další vývoj FFI i směrem k efektivnějšímu zvládání rizik spojených s přívalovými povodněmi. Tato doporučení se týkají jak technického rozvoje samotného nástroje, tak jeho praktické integrace do krizového řízení a směrů příštího výzkumu.

Jako klíčové se jeví další zlepšení zpracování radarových odhadů srážek. Pravidelná validace radarových dat vůči síti profesionálních srážkoměrů by měla být standardní součástí provozu. Doplňkově lze uvažovat i o využití lokálních srážkoměrů provozovaných obcemi nebo dobrovolníky [10]. I přes vědomí možných systematických či náhodných chyb těchto měření mohou tato data přinášet cennou informaci o lokálních extrémech, které radarový odhad nedokáže vždy spolehlivě zachytit. Dalším důležitým krokem ke snížení nejistot predikcí konvektivních srážek, které jsou pro vznik přívalových povodní rozhodující, je posílení nowcastingových metod, zejména zapojením algoritmů schopných modelovat vývoj konvektivních buněk v čase, včetně změn jejich struktury a intenzity. Současně se jako perspektivní ukazuje zavedení adaptivních prahových hodnot nebezpečí a rizika, diferencovaných podle typu obce. Městské, příměstské a venkovské oblasti se výrazně liší svou odtokovou odezvou, a jednotlivé prahové hodnoty proto nemusejí odpovídat skutečné míře ohrožení v daném území.

Vedle technického rozvoje je nezbytné věnovat pozornost také lepší integraci hodnocení rizika do systému krizového řízení. Kritické body identifikované v rámci celé ČR by měly být systematicky využívány např. při aktualizaci lokálních povodňových plánů. Zároveň je vhodné posílit komunikaci rizika směrem k obyvatelům obcí, a to zejména v souvislosti s místy, kde dochází ke zvýšené koncentraci povrchového odtoku a lokálnímu zaplavení způsobenému nedostatečným odvodněním obce. Zvýšení povědomí o těchto „slepých místech“ může přispět ke snížení škod i zlepšení připravenosti obyvatel. Dalším krokem by mohlo být technologické propojení indikátoru FFI s automatickými varovnými systémy obcí, jako jsou chytré sirény, SMS varování nebo notifikace skrze mobilní aplikace. Takové propojení by umožnilo rychlejší a cílenější varování v situacích, kdy se riziko lokálního zatopení rychle zvyšuje.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory výzkumného projektu TA ČR č. SS06010059 „Zvýšení připravenosti urbanizovaných lokalit v ČR propojením metody kritických bodů s indikátorem přívalových povodní“.

Literatura

- [1] THIEKEN, A., ZENKER, M.-L., BUBECK, P. Flood-Related Fatalities During the Flood of July 2021 in North Rhine-Westphalia, Germany: What Can Be Learnt for Future Flood Risk Management? *Journal of Coastal and Riverine Flood Risk*. 2023, 2. Dostupné z: <https://doi.org/10.59490/jcfr.2023.0005>
- [2] CHAVDA, S. The 2024 Spain Floods: Failures in Early Warning, Action, Coordination, and Localisation. *Global Network of Civil Society Organizations for Disaster Reduction*. 2024. [citováno 2025-12-05]. Dostupné z: <https://www.gndr.org/2024-spain-floods-early-warning-action-coordination-and-localisation>
- [3] ŠERCL, P. *Povodeň na Uničovsku 7. a 8. června 2020. Předběžné vyhodnocení extrémní hydrometeorologické situace*. 16. června 2020. Dostupné z: <https://storymaps.arcgis.com/stories/878800fbefee43fb850c89ac587cb263>
- [4] ŠERCL, P., PECHA, M., SVOBODA, V., VLASÁK, T. Indikátor přívalových povodní – zkušenosti z provozu. *Meteorologické zprávy*. 2023, 76(5), s. 138–147. ISSN 0026-1173. Dostupné z: https://www.chmi.cz/documents/42501/55105/MZ_05_2023.pdf/3c744ab4-a791-628f-35e5-3c6198338b60?t=1761301223425
- [5] ŠERCL, P., PECHA, M., NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., LEDVINKA, O., SVOBODA, V., DAŇHELKA, J. *Flash Flood Indicator*. Praha: ČHMÚ, 2023. 54 s. ISBN 978-80-7653-050-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.59984/978-80-7653-050-8>
- [6] TICHÝ, M. Rizikové inženýrství. 1–Riziko a jeho odhad. *Stavební obzor*. 1994, 9, s. 261–262.

[7] DRBAL, K., CALETKA, M., ŠTĚPÁNKOVÁ, P., ŠERCL, P. *Metodický návod pro identifikaci kritických bodů*, 2026. Dostupné z: https://heis.vuv.cz/data/webmap/datovesady/projekty/kritickebody/docvystupy/Metodicky_navod_KB_2026.pdf?v=2

[8] DRBAL, K., DUMBROVSKÝ, M., MUCHOVÁ, Z., SOBOTKOVÁ, V., ŠTĚPÁNKOVÁ, P., ŠARAPATKOVÁ, B. Mitigation of Flood Risks with the Aid of the Critical Points Method. *Agronomy*. 2022, 12(6), 1300. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/agronomy12061300>

[9] NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., PECHA, M., ŠERCL, P., SVOBODA, V., LEDVINKA, O. Utilization of Weather Radar Data for the Flash Flood Indicator Application in the Czech Republic. *Remote Sensing*. 2021, 13(16), 3184. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs13163184>

[10] O'HARA, T., McCLEAN, F., HERRERA, R. V., LEWIS, E., FOWLER, H. J. Filling Observational Gaps with Crowdsourced Citizen Science Rainfall Data from the Met Office Weather Observation Website. *Hydrology Research*. 2023, 54(4), s. 547–556. ISSN 1998-9563. Dostupné z: <https://doi.org/10.2166/nh.2023.136>

Autoři

Ing. Petr Šercl, Ph.D.¹

✉ petr.sercl@chmi.cz

ORCID: 0000-0003-1581-961X

Mgr. Martin Pecha¹

✉ martin.pecha@chmi.cz

ORCID: 0000-0003-0294-8981

Ing. Vojtěch Svoboda, Ph.D.¹

✉ vojtech.svoboda@chmi.cz

ORCID: 0000-0002-8716-0239

Ing. Tomáš Vlasák, Ph.D.²

✉ tomas.vlasak@chmi.cz

ORCID: 0000-0003-2819-5180

Ing. Karel Drbal, Ph.D.³

✉ karel.drbal@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-5595-2493

Mgr. Martin Caletka³

✉ martin.caletka@vuv.cz

ORCID: 0000-0003-0772-3247

Ing. Pavla Štěpánková, Ph.D.³

✉ pavla.stepankova@vuv.cz

ORCID: 0000-0003-2079-9078

¹Český hydrometeorologický ústav, Praha (Česká republika)

²Český hydrometeorologický ústav, pobočka České Budějovice (Česká republika)

³Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Brno (Česká republika)

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.05.001

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

LINKING CRITICAL POINTS TO THE FLASH FLOOD INDICATOR

ŠERCL, P.¹; PECHA, M.¹; SVOBODA, V.¹; VLASÁK, T.²; DRBAL, K.³; CALETKA, M.³; ŠTĚPÁNKOVÁ, P.³

¹Czech Hydrometeorological Institute, Prague (Czech Republic)

²Czech Hydrometeorological Institute, České Budějovice (Czech Republic)

³T. G. Masaryk Water Research Institute, Brno (Czech Republic)

Keywords: flash floods — flood risk — Flash Flood Indicator (FFI) — critical points — urban areas — nowcasting

This paper addresses the improvement of flash flood hazard estimation through modifications of the Flash Flood Indicator (FFI), which is operationally used by the Czech Hydrometeorological Institute. The existing FFI framework primarily evaluates hazard based on the comparison of runoff response and threshold values derived from theoretical return period discharges, while exposure and vulnerability have so far been considered only implicitly. This paper proposes

an extension of the methodology to explicitly incorporate these components of risk through two main approaches: (i) adjustment of runoff threshold values according to the degree of urbanization and (ii) integration of critical points (positions of potential entry of concentrated runoff pathways into urbanized locations) and their contributing areas into the FFI calculations.

Based on the analysis of selected rainfall events from 2023–2024, it is demonstrated that lowering threshold values in urbanized areas leads to a more realistic estimation of local flooding risk, particularly within built-up areas. Furthermore, the inclusion of critical points, defined as locations where concentrated runoff from rural catchments enters urban areas, significantly improves the identification of high-risk locations that are not adequately captured by the standard 3 × 3 km grid. The results also highlight the crucial influence of meteorological input data quality, especially radar-based precipitation estimates, on the overall accuracy of risk assessment. The proposed modifications represent a shift from hazard-based evaluation towards a more comprehensive assessment of actual risk, accounting for spatial variability in exposure and vulnerability. At the same time, the paper identifies key limitations of the current approach and provides recommendations for further development of the FFI system, particularly in terms of improving meteorological inputs and implementing adaptive threshold settings.

