

Indikátor přívalových povodní – zkušenosti z provozu

Flash Flood Indicator – operational experience

Petr Šercl

Český hydrometeorologický ústav
Oddělení povrchových vod
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořany
✉ petr.sercl@chmi.cz

Martin Pecha

Český hydrometeorologický ústav
Oddělení povrchových vod
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořany
✉ martin.pecha@chmi.cz

Vojtěch Svoboda

Český hydrometeorologický ústav
Oddělení povrchových vod
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořany
✉ vojtech.svoboda@chmi.cz

Tomáš Vlasák

Český hydrometeorologický ústav
Regionální předpovědní pracoviště České Budějovice
Antala Staška 32, 370 07 České Budějovice
✉ tomas.vlasak@chmi.cz

Flash floods are one of the most risky natural phenomena. It is very difficult to predict exactly where they will occur and they usually come very quickly. When there is a threat of flash floods, early warning is exactly what decides on the protection of the lives and property of inhabitants. For these reasons, a Flash Flood Indicator (FFI) has been developed in the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI) for a long time, aiming to draw attention to the possibility of a flash flood or local flooding. The main purpose of this contribution is not to describe details of FFI algorithms, but to evaluate the functioning of the FFI on the basis of more than ten years of operation experience. On a basis of specific cases of significant rainfall episodes, especially from recent years, the potential benefits of FFI are shown, not only for the operational forecasting service of the CHMI, but also for wider public. At the end of the contribution, the possibilities of further development of FFI are outlined.

KLÍČOVÁ SLOVA: povodeň přívalová – zatopení lokální – nasycení území – MERGE – adjustace radaru – srážky rizikové

KEYWORDS: flash flood – local flooding – saturation of area – MERGE – radar adjustment – risk precipitation

1. Úvod

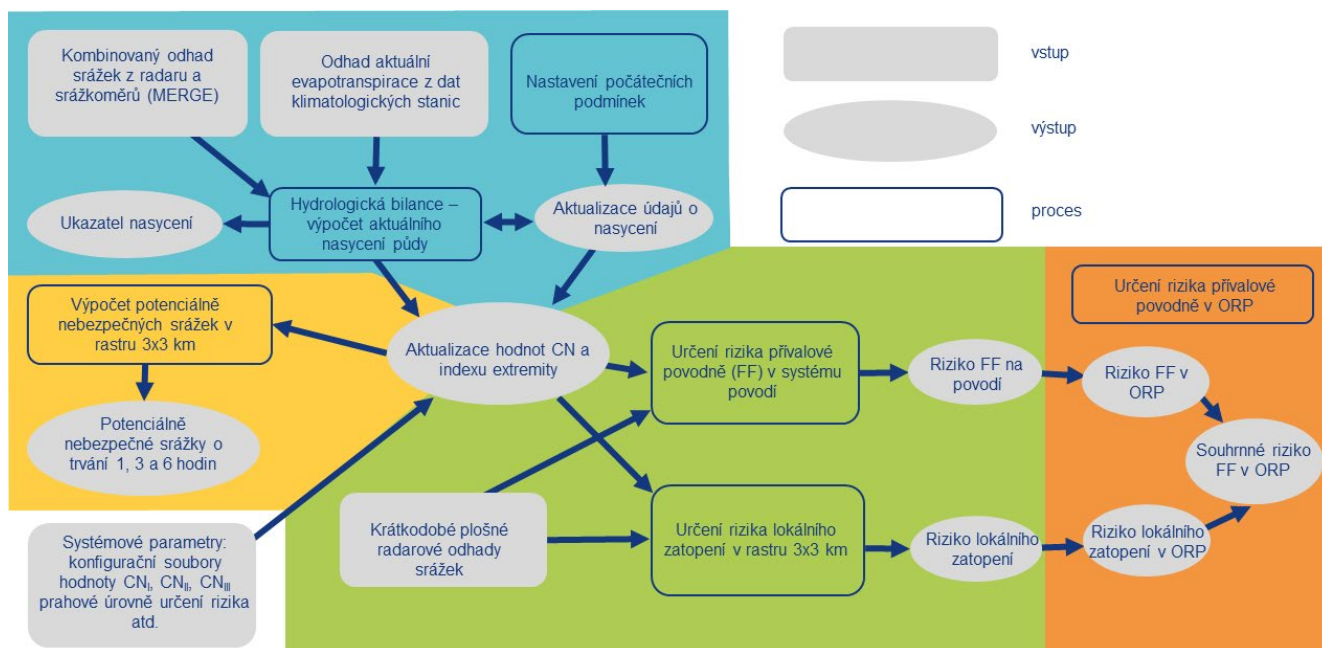
Zpravidla každý rok se několikrát setkáváme s informací, že byl nějaký region našeho území zasažen přívalovou povodní, případně obec či městská část čelila rychlému lokálnímu zatopení. Právě přívalové povodně patří k nejrizikovějším přírodním fenoménům. Je to dáno zejména dvěma okolnostmi. Jednak je velmi obtížné předpovědět, kde přesně se vyskytnou, a jak již lze z jejich názvu usuzovat, přicházejí zpravidla velmi rychle.

Přívalové povodně vznikají následkem velmi intenzivních srážek, trvajících od desítek minut až po několik hodin, při kterých může za relativně krátkou dobu spadnout velký objem vody. Pro představu, pokud prší průměrnou intenzitou 40 mm za hodinu na ploše 5 km², spadne za hodinu na danou plochu 200 000 m³ vody. Z této vody se část zachytí v prohlubních, na vegetaci a část vsákne do půdy. Kolik vody se vsákne a kolik oteče, závisí na aktuální infiltrační a retenční schopnosti půdy a jejího povrchu.

V zastavěných územích, kde je velký podíl nepropustných ploch, jsou tyto infiltrační schopnosti obecně velmi malé. V přírodním prostředí závisí rychlost infiltrace na charakteru půdy, jejího povrchu a z velké části na nasycení půdy vodou z předchozích srážek. Pokud je krajina vyschlá, je schopná zadržet velký podíl vody ze spadlých srážek, což se ukázalo během suchých období. Naopak při vysoké nasycenosti jsou infiltrační schopnosti značně omezené a při výskytu intenzivních srážek významně roste riziko přívalových povodní (Šercl, Pecha 2019).

Vlivem omezené infiltrační schopnosti půdního povrchu vstřebat srážky následně dochází k rychlému povrchovému odtoku, který se postupně soustřeďuje v nejnižších položených místech území, což jsou zpravidla údolí vodních toků. Voda ale vždy teče nejkratší možnou cestou, takže příval vody, často ve spojení s množstvím bahna a plovoucích předmětů, si nachází cestu i mimo síť vodních toků a následkem vysoké kinetické energie může mít i velkou ničivou sílu. V urbanizovaných oblastech často dochází ve snížených místech (např. pod mosty) k významnému lokálnímu zatopení a voda tekoucí velkou rychlostí místními komunikacemi rovněž může unášet velké množství předmětů. Situaci navíc často komplikuje poddimenzování mostních otvorů a propustků, kde se unášené předměty zastaví, blokují průchod vody, a tím způsobují ještě výraznější rozlivy a lokální zatopení.

Když hrozí přívalové povodně, tak je včasné varování přesně tím, co rozhoduje o ochraně životů a majetku obyvatel. Z těchto důvodů je v Českém hydrometeorologickém ústavu (ČHMÚ) dlouhodobě vyvíjen komplexní nástroj, který se snaží upozornit na možnost vzniku přívalové povodně, případně lokálního zatopení. Tímto nástrojem je Indikátor přívalových povodní (Flash Flood Indicator, zkráceně FFI).



Obr. 1 Schéma fungování systému FFI.

Fig. 1. Schematic diagram of the FFI functioning.

Podrobný popis fungování a procedur FFI je uveden v publikaci Sercl et al. (2023) jako příspěvek k mezinárodnímu transferu znalostí v této oblasti. Zmíněná publikace shrnuje veškeré poznatky, které získali odborníci z ČHMÚ během více než deseti let výzkumu a vývoje a je na ni samostatně odkázáno na úplném konci tohoto čísla časopisu Meteorologické zprávy. Indikátor přívalových povodní s aktuálními daty je dostupný široké veřejnosti prostřednictvím webové mapové aplikace (Šercl 2023).

Účelem tohoto příspěvku proto není podrobně popisovat algoritmy FFI, ale zhodnotit fungování FFI na základě dnes již více než desetiletého provozu. Na konkrétních případech významných srážkoodtokových epizod, zejména z posledních let, je ukázán potenciální přínos FFI nejen pro operativní předpovědní službu ČHMÚ, ale i pro širší veřejnost.

2. Stručný popis Indikátoru přívalových povodní

FFI je soubor procedur a algoritmů napsaných v jazyce Python a využívajících funkcionalitu GIS technologie ESRI, především knihovnu „arcpy“, která je k dispozici v rámci licence ArcGIS Pro. Hlavní úlohou FFI je predikovat riziko výskytu nebezpečných jevů souvisejících s přívalovými srážkami, kterými jsou přívalové povodně a lokální zatopení. Toto riziko se stanovuje nejen na základě spadlých srážek a jejich krátkodobé předpovědi formou nowcastingu¹, ale i s ohledem na předchozí nasycení území.

V denním kroku je v rámci FFI vyhodnocováno nasycení půdy na našem území, a to pomocí jednoduché bilance srážek, odtoku a aktuální evapotranspirace. Výsledkem je tzv. ukazatel nasycení. Na základě aktuálního nasycení se odvozují potenciální rizikové (nebezpečné) srážky o době trvání 1, 3 a 6 hodin. Jejich hodnota představuje úhrn srážek za daný časový

interval, který by už znamenal zvýšené riziko povrchového odtoku. Vstupem do výpočtu jsou 24hodinové úhrny srážek MERGE (Novák, Kyznarová 2016) a bodové hodnoty aktuální evapotranspirace, které jsou interpolovány do rastru.

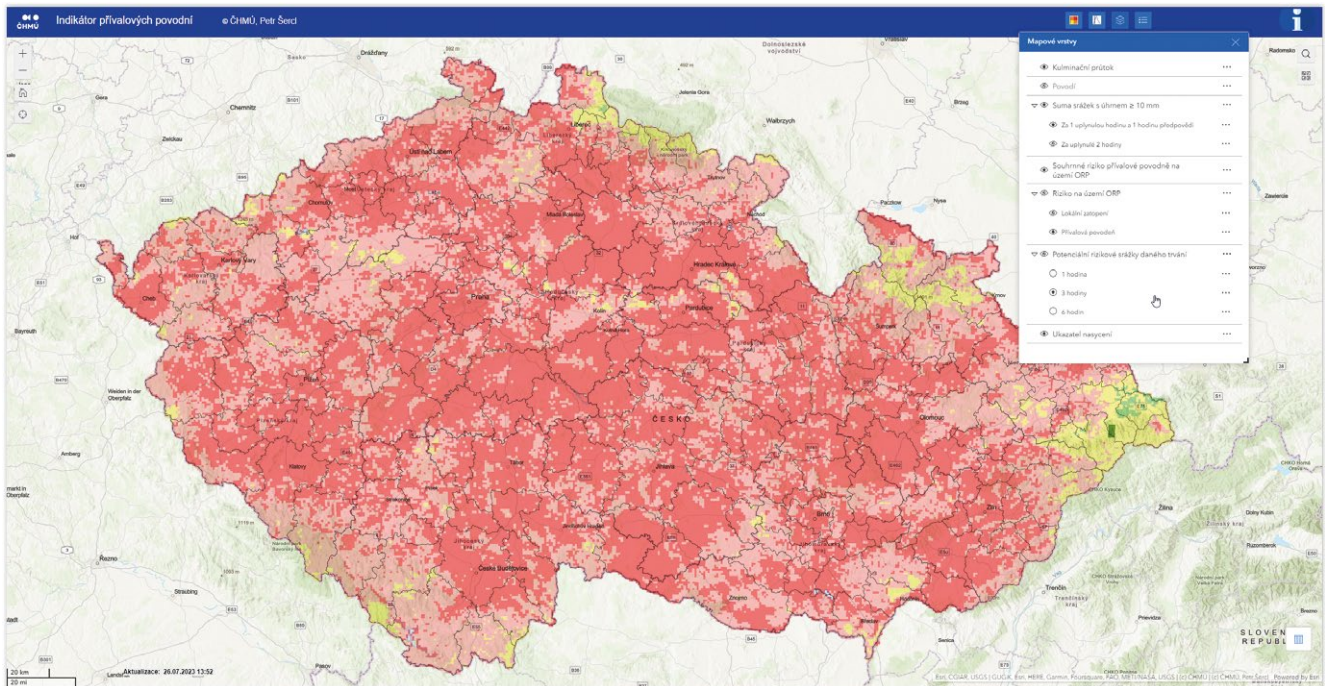
V kratším (v současnosti 15minutovém) kroku jsou stanovována rizika vzniku přívalové povodně a lokálního zatopení. Riziko přívalové povodně je vyhodnocováno pomocí jednoduchého srážkoodtokového modelu (metoda CN, jednotkový hydrogram) z odtokové reakce na spadlé a předpovídané srážky v systému hydrologicky propojených povodí 4. řádu (velikost plochy cca 5 km²). Riziko lokálního zatopení je určováno v rámci pravidelné čtvercové sítě o velikosti hrany 3 km. Z rizika přívalové povodně a lokálního zatopení je na závěr určeno tzv. souhrnné riziko přívalové povodně. Riziko přívalové povodně, lokálního zatopení a souhrnné riziko je poté vždy vztaženo k území příslušné obce s rozšířenou působností (ORP), do které dané povodí či čtverec s predikovaným rizikem územně spadá.

Vstupem do výpočtu jsou v současnosti srážkové odhady získané z 1hodinových klouzavých sum MERGE, které jsou rozděleny do 10minutových intervalů dle 10minutových surových radarových dat. Pokud ještě nejsou údaje z MERGE k dispozici, jsou využity 10minutové sumy z adjustovaných radarových dat, které jsou speciálně připravovány pro potřeby FFI.

Celý systém je možné znázornit dle schématu na obr. 1. Toto schéma je rovněž uvedeno v odkazované publikaci (Sercl et al. 2023), kde je vysvětlen postup zpracování jednotlivých algoritmů.

Výstupy z FFI, tj. ukazatel nasycení, potenciální rizikové srážky, riziko přívalové povodně a lokálního zatopení, ale i další údaje, jsou publikovány ve veřejně dostupné webové mapové aplikaci na ArcGIS Online (Šercl 2023), viz obr. 2. Tyto výstupy jsou k dispozici i pro další aplikace, např. pro mobilní aplikaci ČHMÚ či pro Hlásnou a předpovědní povodňovou službu ČHMÚ (<https://hydro.chmi.cz/hpps>).

¹ Detekce a diagnostika okamžitého stavu počasí v lokálním či mezosynoptickém měřítku a předpověď na 0 až 2 hodiny.



Obr. 2 Webová mapová aplikace Indikátor přívalových povodní.
Fig. 2. Flash Flood Indicator web map application.

3. Vývoj Indikátoru přívalových povodní do roku 2021

Vývoj systému FFI (dříve FFG-CZ, Flash Flood Guidance-CZ) začal již v letech 2008 až 2011 v rámci výzkumného projektu Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR (SP/1c4/16/07), viz Šercl (2011). Jak je již z původního názvu patrné, inspirace k vytvoření FFI byla čerpána u amerického systému Flash Flood Guidance (Sweeney 1992).

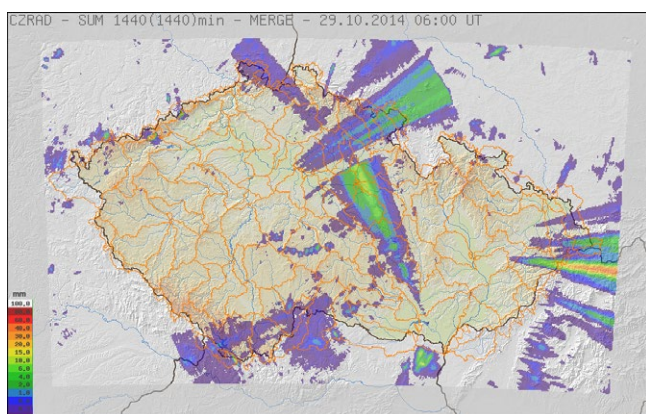
Vývoji a testování systému napomohl výskyt extrémních přívalových povodní v červnu a červenci 2009, které způsobily rozsáhlé škody na majetku a bohužel i ztráty na životech. V srpnu 2010, kdy se vyskytly další extrémní přívalové povodně, už byl systém uveden do testovacího provozu. Již velmi záhy se ale ukázalo, že bude potřeba i nadále pracovat nejen na dalším vylepšování procedur z hlediska jejich funk-

cionalita a optimalizace zpracování dat, ale rovněž na zkvalitnění vstupních dat.

Na základě prvních hodnocení testovacího provozu aplikace v letech 2010 až 2012 bylo možné konstatovat, že velmi zásadní význam pro výpočet nasycenosti půdy v průběhu roku má odhad počátečních hodnot nasycení, které byly zpočátku stanovovány pouze hrubým odhadem na základě aktuální vodnosti toků. Velkým problémem také bylo časté rušení radarových dat (např. signálem sítí Wi-Fi), které někdy způsobovalo vygenerování falešných alarmů, viz obr. 3. Dále bylo více než jasné, že bude nutné zkvalitnit metodu adjustace radarových dat, která byla až do roku 2014 zpravidla podhodnocena (stejně jako surová radarová data), což mělo za následek nepodchycení některých skutečně pozorovaných přívalových povodní.

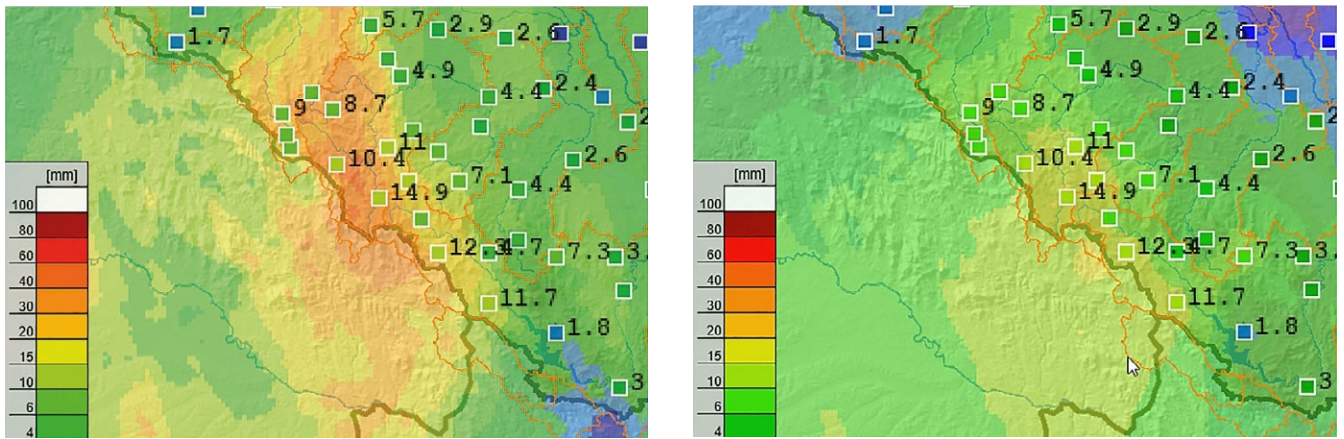
V letech 2014–2016, po výměně již v té době zastaralé technologie meteorologických radarů, došlo k výrazným kvalitativním i kvantitativním změnám u poskytovaných produktů (surová a adjustovaná radarová data, MERGE). Nově adjustovaná radarová data byla od této doby naopak velmi často nadhodnocena, což způsobovalo zvýšené množství falešných alarmů, které nastávaly nejen u událostí konvektivního typu, ale v případě velkého předchozího nasycení území i při velkoplošných stratiformních srážkách, a to zejména tehdy, když byl přítomný tzv. brightband², viz obr. 4.

Parametry systému FFI sloužící k detekci rizika byly sice změněny, ale bylo jasné, že bude nutné problematiku adjustace radarových dat a srážkových vstupů jako celku řešit komplexněji. Začaly se proto připravovat podklady z jednotlivých srážkoodtokových událostí, které později posloužily k vývoji nové metody adjustace radarových dat a jejich podstatnému zkvalitnění, více viz kap. 4.



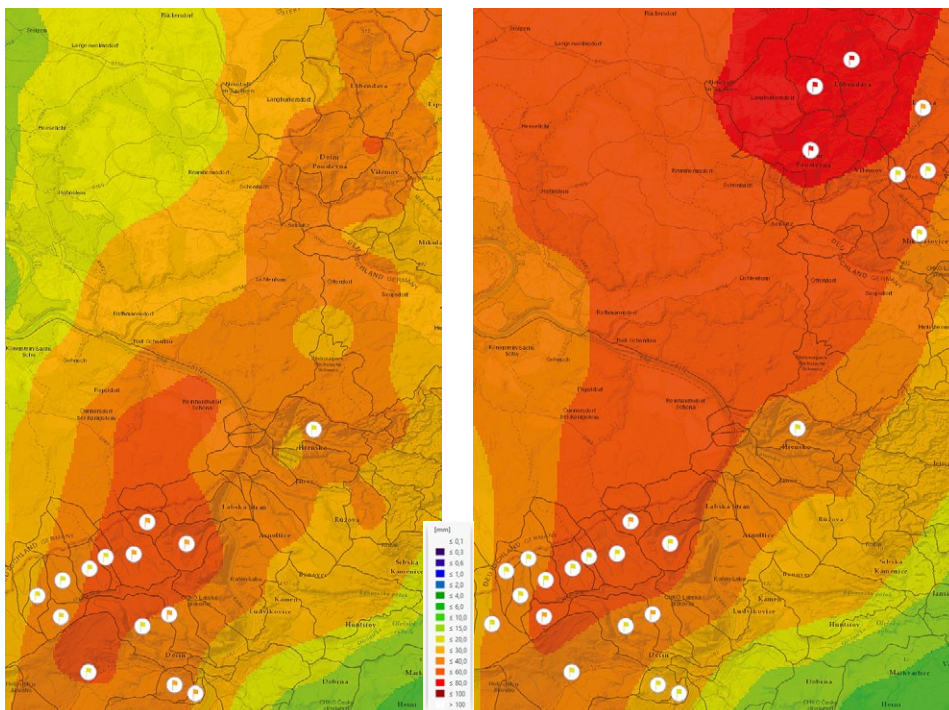
Obr. 3 Rušení radarových dat signály vysílači Wi-Fi.
Fig. 3. Interference of radar data by Wi-Fi transmitters.

² Vrstva atmosféry o tloušťce několika stovek metrů, v níž je pozorováno zvýšení radarové odrazivosti cca o 5 až 15 dBz vlivem tání sněhových srážek pod nulovou izotermou.



Obr. 4 Suma adjustovaných radarových odhadů srážek za 3 hodiny (vlevo) a odhadů srážek pomocí MERGE (vpravo) k 4. srpnu 2020 12:00. Bodové symboly reprezentují lokality srážkoměrných stanic s naměřenými úhrny.

Fig. 4. Sum of 3-hour adjusted radar QPE (left) and MERGE QPE (right) on August 4, 2020 10:00 UTC. Point symbols represent locations of climatological and precipitation stations and the respective numbers are the precipitation totals over a specific period.



Obr. 5 Suma srážek 17. července 2021 za 3 hodiny a 30 minut k 18:30 a detekované riziko přívalové povodně dle dat z adjustovaného radaru (vlevo) a MERGE (vpravo).

Fig. 5. Sum of precipitation totals on July 17, 2021 16:30 UTC for 3 hours and 30 minutes and detected risk of flash flooding according to adjusted radar data (left) and MERGE (right).

V období let 2016–2021 byla věnována pozornost zlepšení způsobu stanovení počátečních podmínek nasycení, aby co nejvíce odpovídalo reálnému stavu. Jako nejvhodnější se ukázalo provedení podrobné analýzy hodnot měření půdní vlhkosti. Území ČR bylo rozděleno podle aktuální vlhkosti půdy do několika regionů. Zároveň probíhalo postupné vylepšování radarových produktů a docházelo k odstraňování rušivých artefaktů, například vlivem Wi-Fi signálů. Nejvíce změn pak bylo provedeno v období let 2019 až 2021.

Kromě převažujícího nadhodnocení dat z adjustovaného radaru se vyskytlo i několik případů přívalových povodní, kde byla vstupní data z různých důvodů naopak podhodnocena, a tudíž FFI nedetekoval odpovídající riziko přívalové povodně.

Dne 17. července 2021 se vyskytly významné přívalové povodně na Šluknovsku a Děčínsku. Zde, zejména na Šluknov-

sku, byla data z adjustovaného radaru významně podhodnocena (obr. 5 vlevo). Suma srážek za 24 hodin činila dle adjustovaného radaru v oblasti Lobendavy kolem 80 mm, ale srážkoměrná stanice Lobendava naměřila za 24 hodin 134 mm srážek. Podhodnocení radarových úhrnů bylo zřejmě dáno zacloněním radarového paprsku a velkou vzdáleností od radaru, jelikož oblast se nachází na hranicích ČR a SRN. Pro oblast Lobendavy nebylo aplikací FFI detekováno žádné riziko přívalové povodně (obr. 5 vlevo), zatímco později provedené výpočty již za použití dat z MERGE ukázaly, že by FFI detekoval nejvyšší stupeň rizika, viz obr. 5 vpravo.

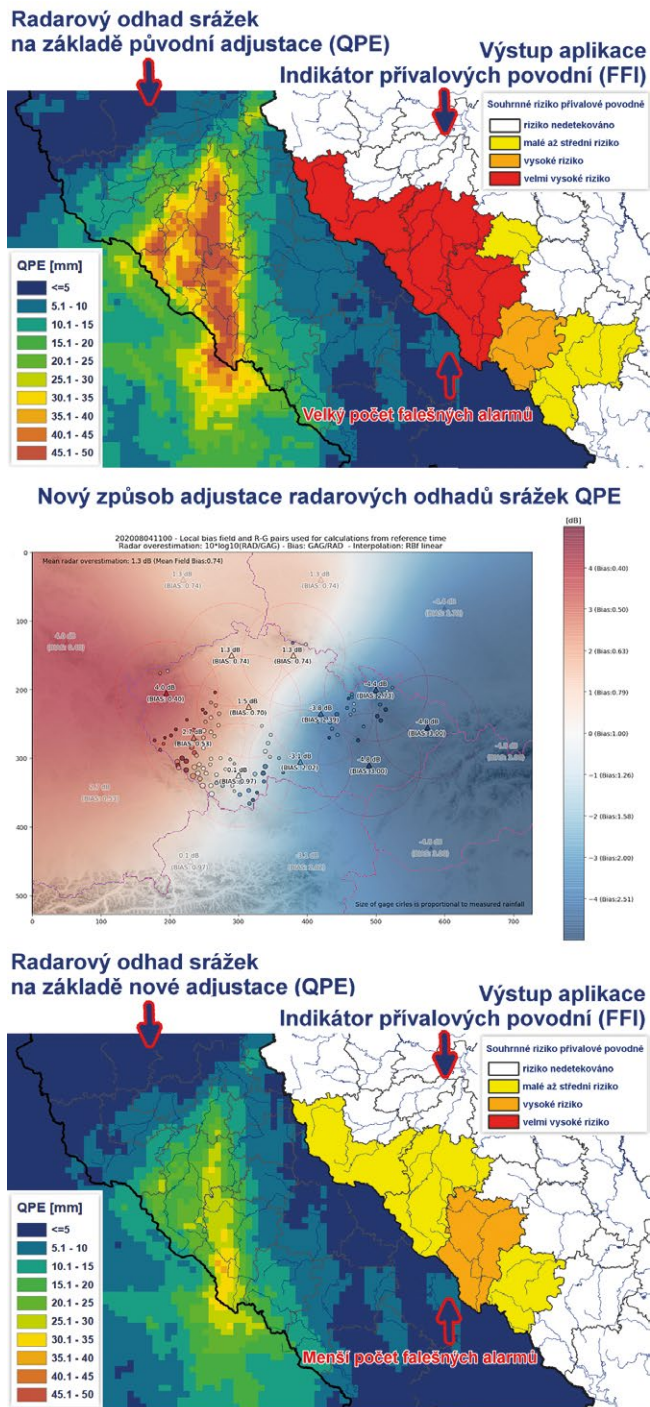
Dne 7. června 2020 se ve večerních hodinách vyskytla přívalová povodeň na Uničovsku. V tomto případě byl adjustovaný radar jen nepatrně podhodnocen oproti naměřeným srážkám a detekce rizika pomocí FFI odpovídala extremitě povodně. Více je tato

situace rozebrána v již zmíněné monografii (Sercl et al. 2023) a ve vyhodnocení přívalové povodně (Šercl 2020).

4. Rozvoj FFI v rámci výzkumného projektu

Projekt „Hydrometeorologická rizika v České republice – změny rizik a zlepšení jejich predikcí (VI20192021166)“, byl řešen v letech 2019–2021 a jeho součástí byla inovace výpočetních procedur FFI. Důraz byl kladen zejména na rozvoj metody adjustace radarových dat a na širší začlenění produktu MERGE do FFI.

V roce 2021 byl do operativního provozu zaveden nový algoritmus slučování produktu PseudoCAPPI 2 km (Novák et al.



Obr. 6 Porovnání výstupů FFI vzhledem k původní a nové metodě adjustace radarových dat.
 Fig. 6. Comparison of FFI outputs according to old and new radar data adjustment.

2021) vyvinutý v roce 2020. Zpřesněné produkty PseudoCAPPI 2 km jsou využívány pro operativní výpočet všech radarových odhadů srážek, tj. včetně vstupů do FFI.

Rovněž v roce 2021 byl softwarově implementován, otestován a zprovozněn nový algoritmus adjustace radarových odhadů srážek. Algoritmus byl odvozen v roce 2020 na základě podrobného vyhodnocení dat meteorologických radarů a pozemního měření z významných situací v letech 2018 až 2020. V rámci testování v roce 2021 byly principy navrženého algoritmu (konzervativní shlažený plošně proměnný koeficient) zachovány, upraven byl způsob plošné interpolace adjustačních

koeficientů z 11 virtuálních výpočetních lokalit do plochy, kde původně uvažovaná metoda IDW (Inverse Distance Weighted) byla nahrazena vhodnější metodou RBF-linear (Radial Basis Function s lineárním jádrem) s doplněnými virtuálními lokalitami také za hranicemi ČR.

Při testování nového adjustačního algoritmu bylo provedeno statistické vyhodnocení na nezávislých srážkoměrných stanicích (24hodinové úhrny srážek ze stanic nevstupujících do výpočtu adjustačních koeficientů) ve vybraných srážkových situacích z let 2018–2020. Následně pak byly pro čtyři vybrané epizody z roku 2020 v rámci aplikace FFI porovnány radarové odhady srážek korigované starou a novou metodou. Statistické vyhodnocení potvrdilo, že původní adjustační algoritmus zpřesňoval originální nekorigované radarové odrazy, ale zároveň jasně prokázalo, že zpřesnění novým adjustačním algoritmem je výraznější. Nový adjustační algoritmus snižuje nejen průměrnou odchylku (bias), ale i rozptýl odchylek korigovaných radarových odhadů od hodnot ze srážkoměrů.

Výše zmíněné 4 epizody z roku 2020 pro testování nové adjustační metody v systému FFI byly vybrány tak, aby pokryly jak odlišný charakter srážek (konvektivní, vrstevnaté), tak i odlišné chování původní adjustační metody. Testování prokázalo, že nová metoda adjustace ve všech případech zrealizovala detekci rizika pomocí FFI. Ukázka porovnání výsledků FFI při použití původního a nového adjustačního algoritmu za situace stratiformních srážek s výrazným brigtbendem je zobrazena na obr. 6.

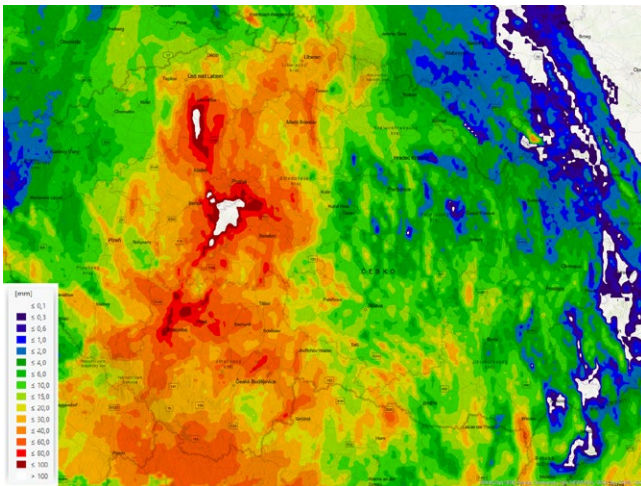
V rámci testování byla také navržena implementace nového algoritmu již do operativního provozu FFI v roce 2022. Nový adjustační algoritmus i jeho vyhodnocení bylo publikováno v článku Novák et al. (2021).

Kombinované odhady MERGE v časovém kroku 1 hodina počítané klouzavě po 10 minutách jsou nejpřesnější operativně dostupné odhady srážek získané z radarových a srážkoměrných dat. Jsou však k dispozici zhruba se zpožděním 25–30 minut. Aby bylo možné tato data využít v FFI pro zpřesnění vstupních dat, byl vyvinut a otestován nový algoritmus pro rozdělení 1hodinových kombinovaných odhadů srážek MERGE do kratších desetiminutových intervalů na základě časového vývoje srážek získaného ze surových radarových dat (Sercl et al. 2023). Pro odhady srážek z posledních cca 30 minut a 1hodinového nowcastingu jsou nadále využívána radarová data adjustovaná dle nově odvozené metodiky. Testována byla rovněž situace stratiformních srážek na Šumavě (obr. 4 a obr. 6) a FFI nedetekoval žádný nejvyšší stupeň rizika vzniku přivalové povodně, což je v souladu se skutečností.

Také 10minutové odhady MERGE byly v rámci projektu implementovány do algoritmů FFI a byly již využity v operativním provozu aplikace FFI v roce 2022.

5. Provoz FFI v letní sezoně 2022

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4, v rámci výzkumného projektu byly vyvinuty nové přístupy, které vedly ke zkvalitnění srážkových vstupů do FFI. Rovněž došlo k úpravě a optimalizaci algoritmů FFI. Všechny tyto změny se podařilo implementovat ještě před začátkem konvektivní sezóny 2022. Průběh letní sezóny roku 2022 byl názornou ukázkou toho, jak probíhá odtok z krajiny za převažujících delších suchých epizod, které se na našem území vyskytují po roce 2014 (Šercl, Pecha 2019). Na začátku letní sezóny se významnější srážkoodtokové situace



Obr. 7 24hodinová suma srážek odvozená metodou MERGE od 24. června 2022 13:00 do 25. června 2022 13:00.

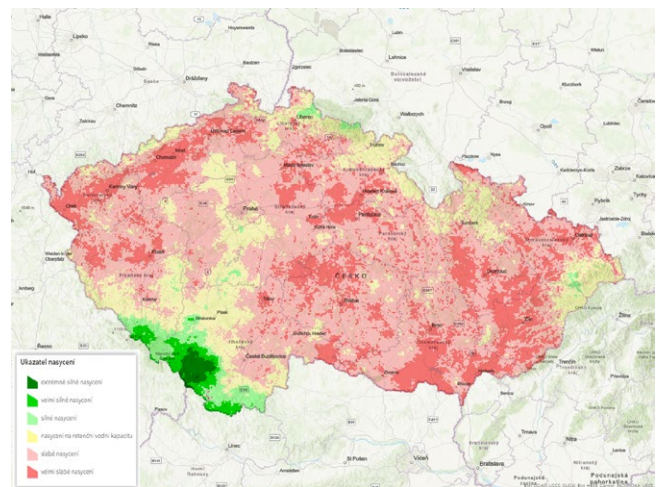
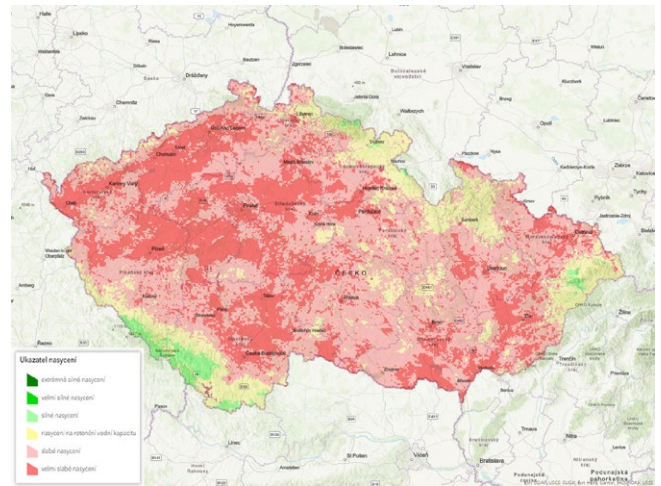
Fig. 7. 24-hour precipitation derived by the MERGE method from June 24, 2022 11:00 UTC to June 25, 2022 11:00 UTC.

nevyskytovaly. Proto se zhruba do poloviny třetí dekády června postupně zmenšovala nasycenost území. K výraznému zlomu, alespoň na části území, došlo až od 24. června, kdy spadlo v pásu od Šumavy přes střední Čechy až do severních Čech plošně 30 až 80 mm a lokálně více než 100 mm, viz obr. 7.

Vzhledem k velmi slabému nasycení území (obr. 8 nahoře) ale následná hydrologická odezva svým významem vůbec neodpovídala významnosti spadlých srážek. Srážkový úhrn přes 100 mm za 24 hodin v zasažených místech v okolí Prahy znamená dobu opakování více než 100 let. FFI pro drobné vodní toky na jihu Prahy a jižně od Prahy signalizoval jen nejnižší riziko přívalové povodně, na Strakonicku bylo riziko o stupeň vyšší. Ve skutečnosti došlo k relativně krátkodobému dosažení 3. SPA na Botiči a jeho přítocích nad nádrží Hostivař. Odhadnuté doby opakování se pohybovaly od dvou do 20letého průtoku. Doba pozorování je v těchto profilech ale zatím příliš krátká pro spolehlivé stanovení doby opakování. Na Botiči a jeho přítocích FFI však žádné riziko nedetekoval. Důvody, proč se tak stalo, mohou být různé, a budou podrobněji zkoumány. Jedno z možných vysvětlení je to, že FFI při výpočtu odtokové odezvy na spadlé srážky zatím nedokáže přesněji zohlednit větší podíl urbanizovaných území. V rámci začínajícího výzkumného projektu (viz kap. 9) je právě problematika urbanizovaných ploch a zohlednění zranitelnosti území součástí řešení dalšího rozvoje FFI.

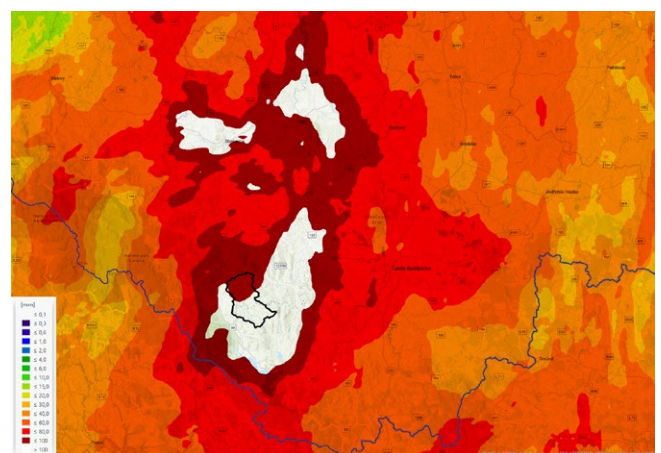
Také v dalších červnových dnech roku 2022 se především v Čechách vyskytovaly vydatné srážky, které byly často i přívalového charakteru, a to nejčastěji znovu v pásu od Šumavy přes střední Čechy a dále k severu až severovýchodu. Na opakovaně zasažených místech se postupně výrazně zvyšovalo nasycení území, a tak se během týdne také zvyšovala pravděpodobnost výskytu významnějšího rozvodnění vodních toků a vzhledem k charakteru srážek i přívalových povodní. Po častých srážkách v období od 24. do 29. června již bylo nasycení území ve zmiňovaném pásu normální až silné a na Šumavě a v Pošumaví místy velmi až extrémně silné, viz obr. 8 dole.

Navic právě tento pás území byl 29. června později odpoledne, večer a v noci opět zasažen intenzivní srážkovou činností. Na základě takto významně nasyceného území a očekávaných intenzivních srážek byla již v dopoledních hodinách vydána vý-



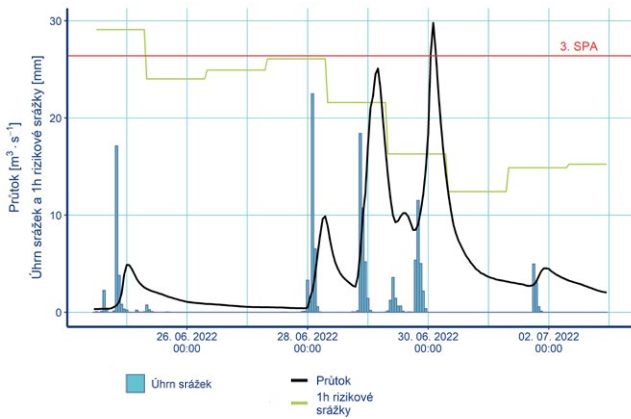
Obr. 8 Ukazatel nasycení k 24. červnu 2022 8:00 (nahore) a 29. června 2022 8:00 (dole).

Fig. 8. Soil saturation indicator for June 24, 2022 at 6:00 UTC (up) and for June 29, 2022 at 6:00 UTC (down).



Obr. 9 72hodinová suma srážek odvozená metodou MERGE od 27. června 2022 08:00 do 30. června 2022 08:00. Vyznačeno je rovněž povodí Blanice k profilu vodoměrné stanice Blanický Mlýn.

Fig. 9. 72-hour precipitation derived by the MERGE method from June 27, 2022 06:00 UTC to June 30, 2022 06:00 UTC. The picture also shows the border of the Blanice catchment to the cross-section of the Blanický Mlýn water-gauging station.



Obr. 10 Průměrné hodinové průtoky, hodinové výšky srážek a potenciální rizikové srážky na povodí Blanice k profilu vodoměrné stanice Blanický Mlýn.

Fig. 10. Mean hourly discharge, hourly precipitation depth and potential risk precipitation on the Blanice basin to the Blanický Mlýn water-gauging station site.

straha na možnost dosažení 1. a 2. stupňů povodňové aktivity (SPA) a především pro oblast Šumavy, Pošumaví a Novohradských hor i 3. SPA. Speciálně zmíněno bylo zejména povodí Blanice, které bylo intenzivní srážkovou činností pravidelně zasahováno už v předchozích dnech, a pravděpodobnost dalších významných srážek zde byla velmi vysoká. Na obr. 9 je zobrazena třídní suma srážek od 28. do 30. června 2022 a vyznačena poloha povodí Blanice k profilu vodoměrné stanice Blanický Mlýn.

Průměrné hodinové průtoky za období od 24. června do 3. července 2022 na povodí Blanice k profilu Blanický Mlýn (85,47 km²) jsou znázorněny na obr. 10 společně s hodinovými výškami srážek na povodí. V denním kroku graf ukazuje potenciální rizikové srážky o době trvání 1 hodina, jejichž změny vyjadřují de facto změnu nasycenosti půdy. Hodnoty rizikových srážek se však vztahují k povodí řádově menší velikosti, než by odpovídalo profilu Blanický Mlýn. 3. SPA byl v profilu Blanický Mlýn překročen až během povodňové vlny z 29. na 30. června, kdy byla půda již velmi nasycená vodou z předchozích srážek.

5.1 Rozbor srážkoodtokové situace ze dne 29. června 2022

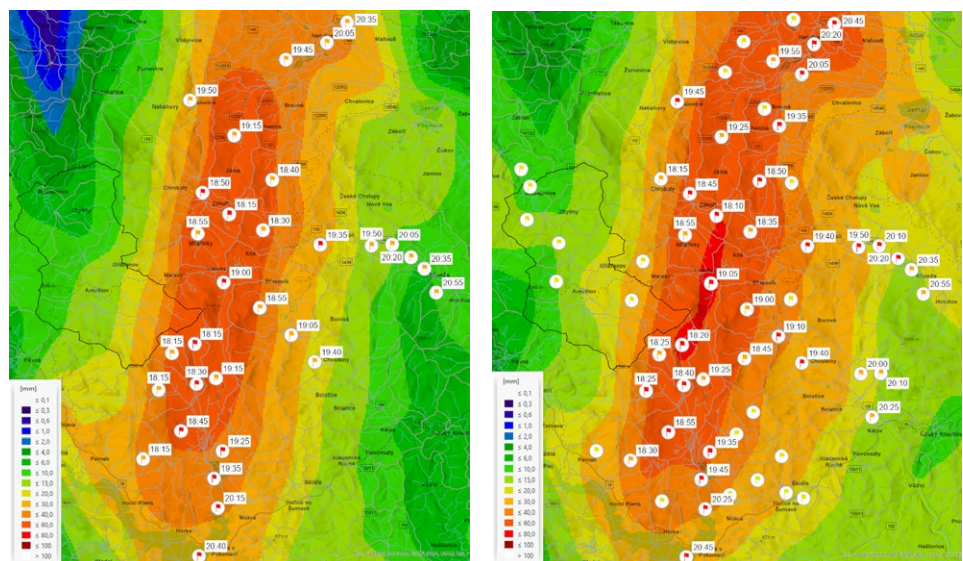
První přívalové srážky spojené s bouřkovou činností se objevily 29. června kolem 18:00 na Prachaticku. Bouřky postupovaly relativně rychle od jihu k severu. Na linii zhruba od Lipna přes Prachatice, Vodňany a Písek přecházelo po sobě několik bouřek, které se řadily do tzv. vlakového efektu („train effect“). Tento jev je velmi častý při výskytu mimořádných srážek a s nimi spojených přívalových povodní.

Z detailního rozložení srážek v nejvíce zasažené oblasti (obr. 11) je zřejmé, že tvar srážkového pole odpovídá směru pohybu bouřek. Nejvyšší úhrn (91,3 mm) během této události byl naměřen ve stanici Ktiš. Dle radarového odhadu je možné tvrdit, že tento naměřený úhrn je patrně blízko srážkovému maximu v celé zasažené oblasti. Většina srážek z úhrnu za 29. června spadla mezi 18:00 a 22:00. V době vrcholících srážek dosahovaly intenzity deště 10 až 15 mm za 10 minut a nejvyšší hodinový úhrn srážek (58 mm) byl naměřen také ve stanici Ktiš.

Upozornění před přívalovou povodní bylo možné sledovat online také v rámci mobilní verze webové aplikace FFI, kde je na obr. 12 situace z 29. června 2022 v 21:30.

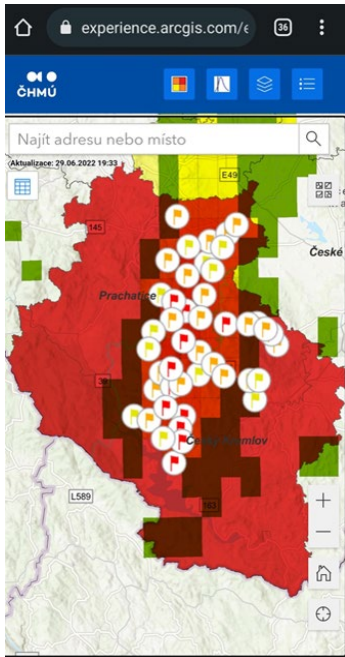
Při hodnocení úspěšnosti detekce rizika systémem FFI bylo možné vycházet ze záznamu vodoměrné stanice Ktiš, která je stanicí lokálního varovného systému (LVS) obce Ktiš. Riziko prvního stupně pro povodí Křemžského potoka poblíž Ktiše detekoval systém FFI v 18:56, druhého stupně v 19:12 a nejvyššího stupně v 19:29 (obr. 11 vlevo). Stav ohrožení (3. SPA) byl ve vodoměrné stanici Ktiš překročen v 19:30 a kulminace nastala o půl hodiny později ve 20:00. Předstih detekce rizika nejvyššího stupně před faktickým překročením 3. SPA byl minimální, a také čas kulminace byl FFI odhadnut na pozdější dobu oproti skutečnosti. Na druhou stranu FFI dokázal vystihnout hrozící nebezpečí a za předpokladu vzniku rozsáhlejších škod až po výraznějším překročení 3. SPA poskytl i určitý minimální předstih varování. Ve vodoměrné stanici Brloh, která se nachází v první větší obci na Křemžském potoce, kulminovala povodňová vlna až ve 22:30 a 3. SPA byl překročen ve 21:50. Nejnižší stupeň rizika FFI byl pro tuto část Křemžského potoka detekován v 18:56, druhý stupeň v 19:12 a nejvyšší v 19:57 (obr. 11 vpravo). Předstih před překročením 3. SPA byl tedy téměř 2 hodiny. Obr. 13 ukazuje rozvodněný Křemžský potok v obci Brloh cca v době kulminace a v malém výřezu je vidět tentýž potok za běžného stavu.

Krátce po 23:00 kulminovala Polečnice ve Chvalšínách. Pro tento profil FFI vyhodnotil riziko nejvyššího stupně s předstihem dvě a půl hodiny před překročením 3. SPA. Větší odlišnost



Obr. 11 Rozložení srážek v povodí Blanice a riziko přívalové povodně dne 29. června 2022 k 19:20 (vlevo) a k 19:50 (vpravo). U vlaječek je znázorněn odhadnutý čas kulminace.

Fig. 11. Distribution of precipitation over the Blanice catchment and flash flood risk for June 29, 2022 at 17:20 UTC (left) and at 17:50 UTC (right). The estimated time of peak flow occurrence is shown next to the flags.



Obr. 12 Výstup z mobilní verze aplikace FFI, pro ORP Český Krumlov a Prachatice bylo detekováno nejvyšší riziko vzniku přívalových povodní. Na vlaječkách jsou znázorněny očekávané kulminace na zasažených vodních tocích v daném regionu.

Fig. 12. Output from the Flash Flood Indicator mobile version application, for the MEP of Český Krumlov and Prachatice the highest risk of occurrence of flash floods was detected. The flags show the expected peak flows on the affected catchments in the region.

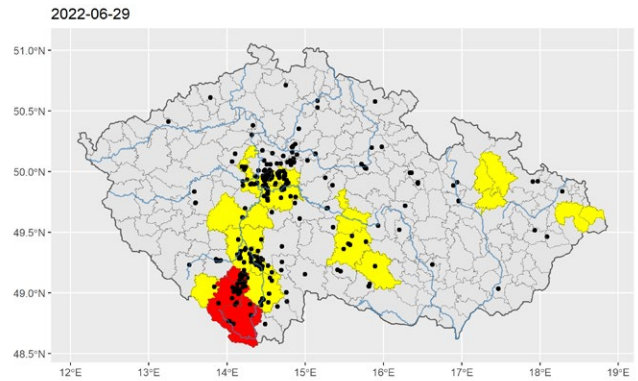
byla v odhadu doby kulminace, která fakticky nastala až o několik desítek minut později. Poměrně významné škody napáchala povodeň v Českém Krumlově, kde byl 3. SPA překročen až 30. června v 1:30. Časový rozdíl mezi detekcí rizika nejvyššího stupně a vzniku škod byl proto několik hodin. Podobná situace jako ve Chvalšínách byla také na Zlatém potoce v Hracholuskách a na Bezdrevském potoce v Netolicích. V Hracholuskách byl sice 3. SPA překročen už 50 minut po vydání rizika nejvyššího stupně FFI, ale opravdu nebezpečný vzestup nastal až o dvě hodiny později při doběhu vlny z horní části povodí. Podrobnější informace lze nalézt ve zprávě o přívalové povodni (RPP České Budějovice 2022).

Systém FFI poskytoval během této přívalové povodně relevantní informace pro předpovědní povodňovou službu a umožnil s určitým předstihem varovat zasažené obce již před příchodem přívalové povodně.



Obr. 13 Křemžský potok v obci Brloh cca v době kulminace přívalové povodně.

Fig. 13. Křemžský potok (brook) in the village of Brloh around the time of the peak of the flash flood.



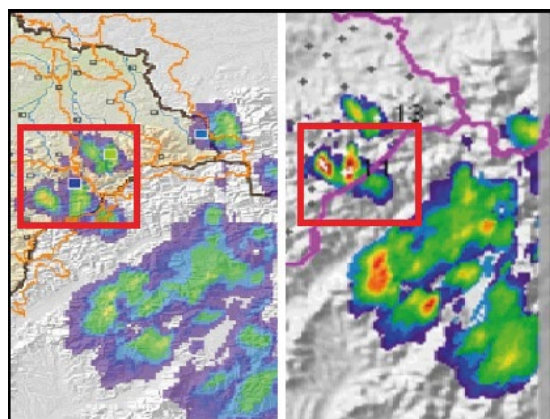
Obr. 14 Nejvyšší detekované souhrnné riziko přívalové povodně pro jednotlivé ORP dne 29. června 2022 a bodové zobrazení jednotlivých zásahů hasičů spojených s čerpáním vody v terénu.

Fig. 14. The highest overall risk of flash flood for individual MEPs and locations of firefighter interventions associated with pumping water in the field during June 29, 2022.

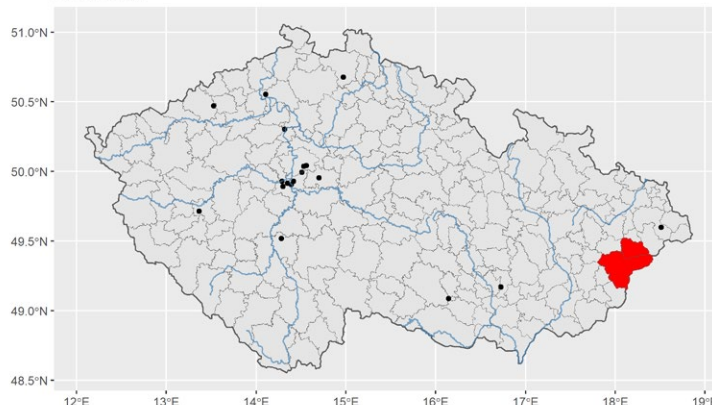
Již v průběhu prací na projektu, který je podrobněji zmiňován v kapitole 4, začalo vyhodnocování vygenerovaných rizik FFI pomocí zaznamenaných zásahů hasičů v terénu. Jsou sledovány pouze ty zásahy, které souvisí s následky přívalových srážek, konkrétně čerpání vody či odstraňování naplavenin. Na obr. 14 je barevně znázorněno nejvyšší detekované souhrnné riziko přívalové povodně pro jednotlivé ORP během dne 29. června 2022 a zároveň jsou zde bodově zobrazeny jednotlivé zásahy hasičů z daného dne. Z obrázku je zřejmé, že velké množství výjezdů bylo zaznamenáno nejen v nejvíce zasažené oblasti, ale i v místech, kde byl detekován jen nejnižší stupeň souhrnného rizika, zejména v urbanizovaných oblastech (v Praze a na jih od Prahy).

6. Stručné vyhodnocení provozu FFI v sezoně 2022

Riziko vzniku přívalové povodně či lokálního zatopení bylo v roce 2022 detekováno celkem ve 43 dnech. Nejvyšší stupeň souhrnného rizika pro ORP byl vypočten celkem ve 12 dnech, a to ve 14 samostatných událostech. Jednoznačné falešné alarmy byly zaznamenány pouze ve dvou případech. V prvním případě se jednalo o chybné údaje ze srážkoměru na Plzeňsku, ve druhém o výrazné a nereálné nadhodnocení srážkových úhrnů MERGE v lokální konvektivní buňce v oblasti Beskyd. Produkt MERGE nejprve odhadl úhrn v jádru buňky na více než 100 mm, ale ve skutečnosti spadlo srážek mnohem méně, viz MERGE po úpravě (oba úhrny na obr. 15 vlevo). V dané oblasti nebyly žádné zásahy hasičů (obr. 15 vpravo), ani se nezvedly hladiny vodních toků.



2022-06-26



Obr. 15 Produkt MERGE (26. června 2022) pro oblast Beskydy po úpravě a před úpravou (vlevo) a falešný alarm nejvyššího stupně způsobený příliš vysokým odhadem srážkového úhrnu produktem MERGE před úpravou (vpravo).

Fig. 15. MERGE product (June 29, 2022) for the Beskydy region after correction and before correction (left) and false alarm of the highest degree caused by too high precipitation total estimate by MERGE product before correction (right).

Především v urbanizovaných oblastech naopak některé události nebyly systémem FFI dostatečně podchyceny, např. při významných srážkových událostech 24. a 29. června v povodí Botiče (obr. 14, Praha a okolí), ale i při některých lokálních událostech.

7. Dosavadní zkušenosti ze sezony 2023

Nasycenost území byla v průběhu dubna mnohem významnější než v předchozích letech, což bylo zohledněno v nastavení počáteční nasycenosti území v systému FFI. Zhruba od druhé poloviny května a i v průběhu června docházelo k postupnému snižování nasycenosti území a v polovině července již převládalo území s velmi slabým nasycením.

Konvektivní sezona 2023 až do konce července příliš významných situací z hlediska možnosti vzniku přívalových povodní nepřinesla. Zpočátku sezony, kdy nasycení území bylo ještě relativně vysoké, bylo detekováno několikrát riziko přívalové povodně či lokálního zatopení způsobené především nowcastingem, který většinou nadhodnotil očekávané srážkové úhrny za situací málo pohyblivých bouřkových buněk. Například na Jindřichohradecku byl ale druhý stupeň souhrnného rizika predikován správně, protože po velmi intenzivních srážkách přívalového charakteru došlo k lokálnímu vybrežení malých vodních toků a protržení rybníků (Idnes.cz 2023).

8. Nejistoty a omezení systému FFI

Stejně jako jiné předpovědní systémy má také FFI své limity a nejistoty vycházející jak ze vstupů, tak i z metody výpočtu. A podobně jako u interpretace předpovědi počasí, průtoků nebo výstrah je výhodou, pokud uživatel zná omezení systému a dokáže posoudit jeho spolehlivost. Většinu nejistot však lze jen obtížně přesněji kvantifikovat. O nejistotách FFI by mohl pojednávat samostatný příspěvek, zde bude soustředěna pozornost především na to, co je možné od systému FFI reálně očekávat a co nikoliv.

FFI je v podstatě nekalibrovaným srážkoodtokovým modelem, protože při svém rozsahu pokrytí a podrobnosti území není ka-

librace vzhledem k nedostatku kalibračních dat proveditelná. Všechny parametry, které jsou v modelu použity, byly proto odvozeny z fyzicko-geografických charakteristik území.

Hlavním účelem FFI je detekce rizika vzniku či výskytu přívalové povodně a lokálního zatopení při znalosti aktuálního nasycení území a spadlých, či v nejbližší době očekávaných srážek. Právě průběh posledních konvektivních sezon jasně ukazuje neustálou potřebu pravidelné kontroly údajů ze srážkoměrných stanic, a to jak v denním kroku, tak také v kratším, například hodinovém kroku. Pokud totiž zůstává významná chyba na některé ze srážkoměrných stanic a následně tedy i v MERGE, tak je ovlivněn nejen výpočet aktuální nasycenosti území a potenciálně rizikových srážek, ale v určitých případech i výpočet detekce rizika vzniku přívalové povodně nebo lokálního zatopení.

Výpočet aktuálního nasycení vychází z bilance srážek, výparu a evapotranspirace a je založen na průběžných změnách hodnoty *CN*. Metoda *CN* je podrobně popsána v Hawkins (1978). Čím je hodnota *CN* vyšší, tím vyšší je nasycenost území, a tím méně vody je krajina schopná zadržet. Velmi dobře to ilustruje obr. 10, kde je znázorněn hydrogram průtoků na Blanici ve stanici Blanský Mlýn za období od 24. června do 3. července 2022.

Jedna z hlavních nejistot v FFI spočívá v určení hodnoty *CN*. Ta se v průběhu roku mění, a to nejen kvůli změnám v nasycení půdy, ale rovněž i ve změnách hospodaření, které mohou být jen dočasné. Příkladem je orná půda, která je v FFI uvažována obecně jako jeden ze způsobů využívání území, na kterém spočívá odvození *CN*. Je známo, že plodiny na zemědělských pozemcích se střídají, a tudíž mohou být za těchto podmínek jiné infiltrační vlastnosti půdy a odlišná retenční schopnost půdního povrchu. V takových případech mohou být reálné hodnoty potenciálních rizikových srážek i významněji odlišné oproti aktuálně odvozeným hodnotám.

Dále je nutné dávat do kontextu podrobnost členění území v modelu (povodí, polygonová síť) s ohledem na rozsah území zasažené přívalovými srážkami. Pokud je zasažené území příliš malé, nebo je velmi heterogenní s ohledem na infiltrační schopnosti, nemusí detekované riziko přívalové povodně nebo lokálního zatopení odpovídat reálné skutečnosti, protože na větších územních celcích jsou fyzicko-geografické charakteristiky více „zprůměrovány“. Riziko přívalové povodně či lokálního zatopení tak může být i významně podhodnoceno.

Úspěšnost výstrahy či předpovědi průtoku lze jednoduše zpětně porovnat s průběhy hydrogramů ve vodoměrných stanicích. U systému FFI je to však nepoměrně složitější, protože detekce rizika přívalové povodně je prováděna na povodích, kde zpravidla přímé pozorování vodních stavů není. Jednou z možností je porovnat stanovené riziko s reálnými dopady v zasažených lokalitách, a to například pomocí foto či video dokumentace, případně uskutečněných zásahů hasičů spojených s likvidací škod po proběhlé povodni, viz obr. 14 a obr. 15 vpravo.

9. Možnosti dalšího rozvoje FFI

Od dubna 2023 bylo ve spolupráci s VÚV T. G. M. v. v. i. zahájeno řešení projektu SS06010059: „Zvýšení připravenosti urbanizovaných lokalit v ČR propojením metody kritických bodů s Indikátorem přívalových povodní“. Jedním z cílů je větší zohlednění zranitelnosti území v FFI. V definici projektu se jedná o „zvýšení odolnosti urbanizovaného území vůči dopadům povodní z přívalových srážek a snížení škod prostřednictvím definování kritických bodů“.

Kritický bod je ve své podstatě průsečík extravalánu s intravalánem jako závěrový bod plochy, na které může, vzhledem k jejím fyzicko-geografickým charakteristikám, dojít za určitých podmínek ke vzniku povrchového odtoku a jeho následné koncentraci. V projektu by proto mělo dojít k zohlednění kritických bodů a případně i jejich okolí do struktury členění povodí tak, aby výsledek nové členění více reflektovalo potenciálně zranitelná místa na toku či v povodí.

Pro všechna dílčí povodí budou v rámci projektu určena kritéria z hlediska rizika při odtoku z přívalových srážek ve formě indexů (aktualizovaný Index extremity IE100, ukazatel kritických podmínek F) a rovněž budou definována kritéria zranitelnosti z hlediska ohrožení majetku a životů občanů. Podle těchto kritérií budou nově stanoveny i prahové hodnoty, které signalizují v Indikátoru přívalových povodní (FFI) stupeň rizika.

Následně budou upraveny algoritmy procedur FFI, které stanovují riziko vzniku přívalové povodně a lokálního zatopení. Upravené procedury budou nejprve testovány ve vybraných pilotních územích s využitím dat reálných srážkoodtokových událostí. Teprve na základě tohoto testování bude uvedený postup modifikován tak, aby byla zajištěna funkcionálnost FFI na celém území ČR.

10. Závěr

Příspěvek hodnotí zkušenosti z fungování FFI v rámci dnes již více než desetiletého provozu.

Optimalizace běhu procedur FFI během roku 2022 přinesla zrychlení výpočtů, tudíž je už možné výpočty rizika přívalové povodně provádět v kratším intervalu, konkrétně 4× za hodinu. Kýžené výsledky přineslo i výrazné zkvalitnění srážkových vstupů. V průběhu celé konvektivní sezony 2022 bylo zaznamenáno mnohem méně falešných alarmů, které byly dříve způsobeny především nadhodnocením adjustovaného radaru.

Přestože se v letech 2019 až 2021 podařilo významně vylepšit srážkové vstupy do FFI, tak bude i v následujících letech potřeba zdokonalovat především metodu MERGE, protože se i v posledních dvou letech vyskytly srážkové situace, které současná metoda MERGE zatím nedokáže adekvátně podchytit, a FFI následně v těchto situacích nedetekuje takové riziko, jaké by odpovídalo realitě.

Výstupy ze systému FFI jsou postupně stále více začleňovány do předpovědního a výstražného systému ČHMÚ a patří již k základním podkladům na všech předpovědních pracovištích ČHMÚ a rovněž i mezi členy Konvektivní skupiny, která soustřeďuje odborníky na konvektivní bouře. Lze tak očekávat, že to ještě více posílí zpětnou vazbu mezi uživateli a vývojáři systému FFI.

V následujících letech bude snaha do systému FFI ještě více začlenit prvky zranitelnosti z hlediska ohrožení majetku a životů občanů ve formě nově definovaných kritérií, které se promítnou do stanovení prahových hodnot signalizujících v FFI stupeň rizika určité úrovně.

Literatura:

- HAWKINS, R. H., 1978. Runoff Curve Numbers with Varying Site Moisture. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering* 1978, Vol. 104, s. 389–398. Dostupné z doi: <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001221>.
- Idnes.cz, 2023. Voda se z přeplněných rybníků na Jindřichohradecku valila do domů i zahrad [online]. [cit. 28. 7. 2023]. Dostupné z WWW: https://www.idnes.cz/ceske-budejovice/zpravy/povoden-jindrichov-hradec-debolin-rybnik.A230607_115403_budejovice-zpravy_mcb.
- NOVÁK, P., KYZVAROVÁ, H., 2016. MERGE2 – modernizovaný systém kvantitativních odhadů srážek provozovaný v Českém hydro-meteorologickém ústavu. *Meteorologické zprávy*, roč. 69, č. 5, s. 137–144. ISSN 0026-1173.
- NOVÁK, P., KYZVAROVÁ, H., PECHA, M., ŠERCL, P., SVOBODA, V., LEDVINKA, O., 2021. Utilization of Weather Radar Data for the Flash Flood Indicator Application in the Czech Republic. *Remote Sensing*, Vol. 13, No. 16, 3184. ISSN 2072-4292. Dostupné z doi: <https://doi.org/10.3390/rs13163184>.
- RPP České Budějovice ČHMÚ, 2022. Zpráva o přívalové povodni v povodí horní Vltavy [online]. [cit. 28. 7. 2023]. Dostupné z WWW: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/povodnove_zpravy/cb_2022_06.pdf.
- SWEENEY, T. L., 1992. Modernized Areal Flash Flood Guidance. NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO. National Weather Service Office of Hydrology: Silver Spring, MD. Dostupné také z WWW: <https://www.weather.gov/media/owp/oh/hdsc/docs/TM44.pdf>.
- ŠERCL, P. et al., 2011. Vývoj robustní metody odhadu odtoku z přívalových srážek. Dílčí úkol 4 výzkumného projektu SP/1c4/16/07. Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR. Závěrečná zpráva za období 2008–2011 [online]. Praha: ČHMÚ [cit. 28. 7. 2023]. Záznam dostupný z WWW: <https://invenio.nusl.cz/record/125595>.
- ŠERCL, P., PECHA, M., 2019. Hydrologické sucho a významné srážkoodtokové události v období 2015–2018. *Meteorologické zprávy*, roč. 72, č. 4, s. 114–121. ISSN 0026-1173.
- ŠERCL, P., 2020. Povodeň na Uničovsku 7. a 8. června 2020 (mapa s průběhem) [online]. [cit. 28. 7. 2023]. Dostupné z WWW: <https://storymaps.arcgis.com/stories/878800fbefee43fb850c89ac587cb263>.
- SERCL, P., PECHA, M., NOVAK, P., KYZVAROVA, H., LEDVINKA, O. et al., 2023. Flash Flood Indicator [online]. Praha: ČHMÚ [cit. 28. 7. 2023]. ISBN 978-80-7653-054-6. Dostupné z WWW: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/nakladatelstvi/publikace-ke-stazeni.html>.
- ŠERCL, P., 2023. Indikátor přívalových povodní (webová mapová aplikace) [online]. [cit. 28. 7. 2023]. Dostupné z WWW: <https://experience.arcgis.com/experience/f7ada465fba941399057cbce595e59e0/>.

Lektoři (Reviewers):

Mgr. Alena Kamínková, Ing. Adam Vizina, Ph.D.