Využití srážkoodtokového modelování v hydrologické praxi ČHMÚ

Rainfall-runoff modelling in the hydrological practice at the CHMI

Radovan Tyl
Český hydrometeorologický ústav
Oddělení povrchových vod
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořany
✉ radovan.tyl@chmi.cz

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

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

Dominik Míka
Český hydrometeorologický ústav
Oddělení povrchových vod
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořany
✉ dominik.mika@chmi.cz

Rainfall-runoff modelling is widely used in the hydrological practice of the CHMI. The presented text offers an insight into work of the Surface Water Department. The use of hydrological modelling procedures is described on specific selected examples such as the derivation of theoretical flood waves, the evaluation and verification of past flood events or its use in several applications operated at the CHMI. Hydrological modelling is also an integral part of scientific and research activities with a focus on updating methodological procedures and harmonizing input data.

KLÍČOVÁ SLOVA: model srážkoodtokový – povodně přívalové – Indikátor přívalových povodní – povodňová vlna teoretická – vyhodnocení povodně

KEYWORDS: rainfall-runoff model – flash floods – Flash Flood Indicator – design flood – flood assessment

1. Úvod

Využití principů srážkoodtokového modelování má na hydrologických pracovištích v Českém hydrometeorologickém ústavu (ČHMÚ) dlouhou historii. Rozvoj počítačů a programového vybavení ke konci minulého století, s vazbou na geografické informační systémy, umožnil provádění prvních prostorových analýz, jejichž výstupy bylo možné začlenit do přípravy srážkoodtokového modelování. Na digitálních podkladech, zejména digitálního modelu reliéfu, tak bylo umožněno vcelku rychle a jednoduše odvodit potřebné parametry a okrajové podmínky modelu a model následně využít k řešení metodických postupů pro odvozování návrhových hydrologických dat. Zpočátku bylo modelování využíváno v rámci hydrologických studií, ale postupně se principy srážkoodtokového modelování rozšířily i do rutinního zpracování základních hydrologických údajů dle normy ČSN 75 1400 „Hydrologické údaje povrchových vod".

S rozvojem radarových (prostorových) a staničních (bodových) srážkových dat našel srážkoodtokový model uplatnění také při odhadu povodňových průtoků skutečných povodňových událostí, a to jak v profilech bez vodoměrného pozorování, tak v profilech vodoměrných stanic, pro ověření již pozorovaných a vyhodnocených průtoků.

Příspěvek představuje na vybraných příkladech z hydrologické praxe oddělení povrchových vod (OPV) ČHMÚ možnosti využití principů hydrologického modelování. V jednotlivých kapitolách je stručně popsáno využití modelování při odvozování teoretických povodňových vln (TPV), rekonstrukci a vyhodnocení proběhlých povodňových událostí, nebo jeho funkce v aplikacích používaných v hydrologii na ČHMÚ, a to včetně popisu hlavních nejistot vstupujících do srážkoodtokového modelu.

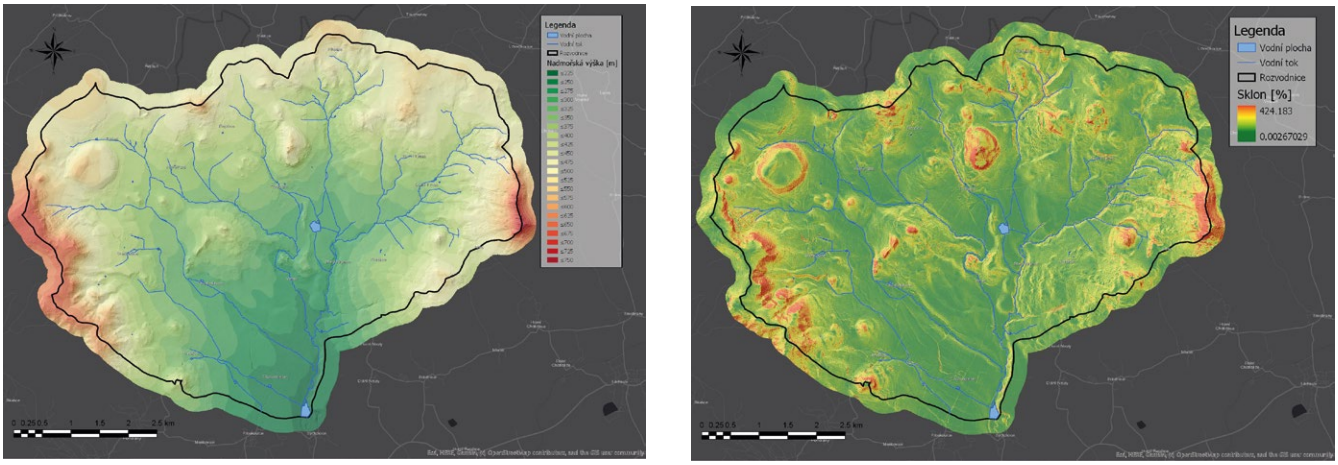
2. Využití srážkoodtokového modelování při odvozování návrhových hydrologických dat

Mezi návrhová hydrologická data patří dle normy (ČSN 75 1400) plocha povodí, průměrná výška srážek na povodí, dlouhodobý průměrný průtok, *M*-denní průtoky, *N*-leté průtoky a teoretické povodňové vlny (TPV). Srážkoodtokové modelování se využívá pro ověřování hodnot *N*-letých průtoků pro doby opakování cca 100 let a delší.

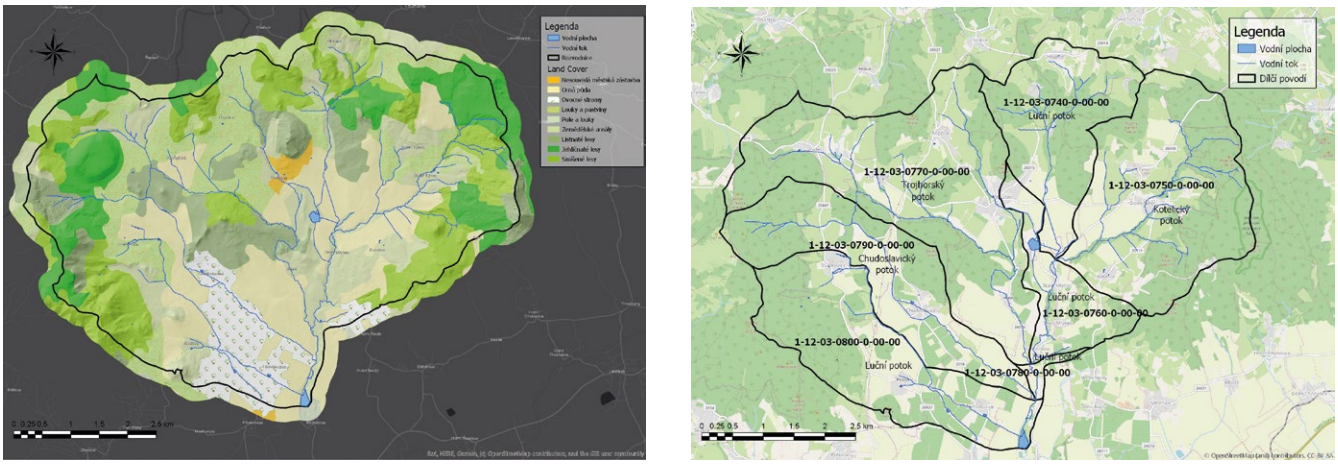
Teoretické povodňové vlny jsou charakterizovány tvarem průběhu, objemem a velikostí kulminačního průtoku požadované doby opakování. Pojem „teoretická vlna" znamená, že se jedná o hypotetický průběh vlny, který by v zájmovém říčním profilu mohl nastat při určitém časovém a prostorovém rozložení návrhových srážek a daném předchozím nasycení území.

Při odvozování TPV je používán modelovací systém HEC-HMS. Jedná se o soubor několika modelů pro stanovení výšky efektivního deště (objemu odtoku vody ze srážek) a odvození průběhu povodňové vlny na základě transformační funkce povodí. Jako

https://doi.org/10.59984/mz.2023.05.02



Obr. 1 Digitální výškový model terénu DEM (vlevo) a sklonitost území vypočtená z DEM v prostředí GIS (vpravo).
Fig. 1. Digital elevation model (left) and the slope of the territory calculated from the DEM in the GIS environment (right).



Obr. 2 Využívání území v povodí pro stanovení např. pokrytí povodí lesním porostem (vlevo) a rozdělení povodí na jednotlivá dílčí povodí (vpravo).
Fig. 2. Land use in a river basin to determine, e.g., the coverage of the basin by forest (left) and the division of the basin into individual sub-basins (right).

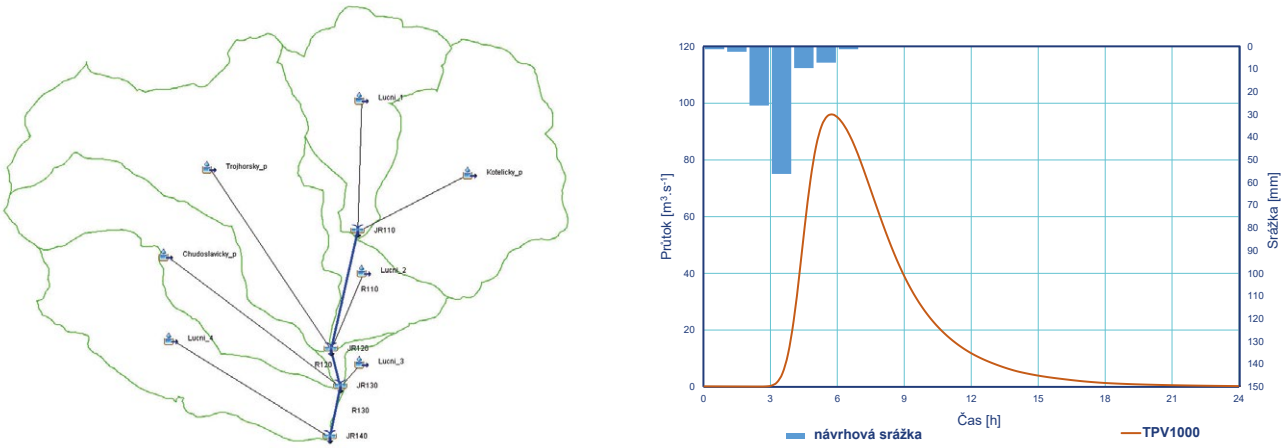
transformační funkce povodí je využíván Clarkův dvouparametrický okamžitý jednotkový hydrogram (Clark 1945) a pro stanovení objemu odtoku metoda *CN* křivek (Soil Conservation Service Curve Number, SCS-CN), více např. v Hawkins (1978) nebo Hawkins et al. (2009). Postup a transformace povodňové vlny korytem vodního toku je simulován metodou Muskingum (např. Baláž et al. 2011).

Samotný systém HEC-HMS je podrobněji popsán v manuálech společnosti US Army Corps of Engineers (USACE), která systém vyvíjí (USACE 2022; 2023).

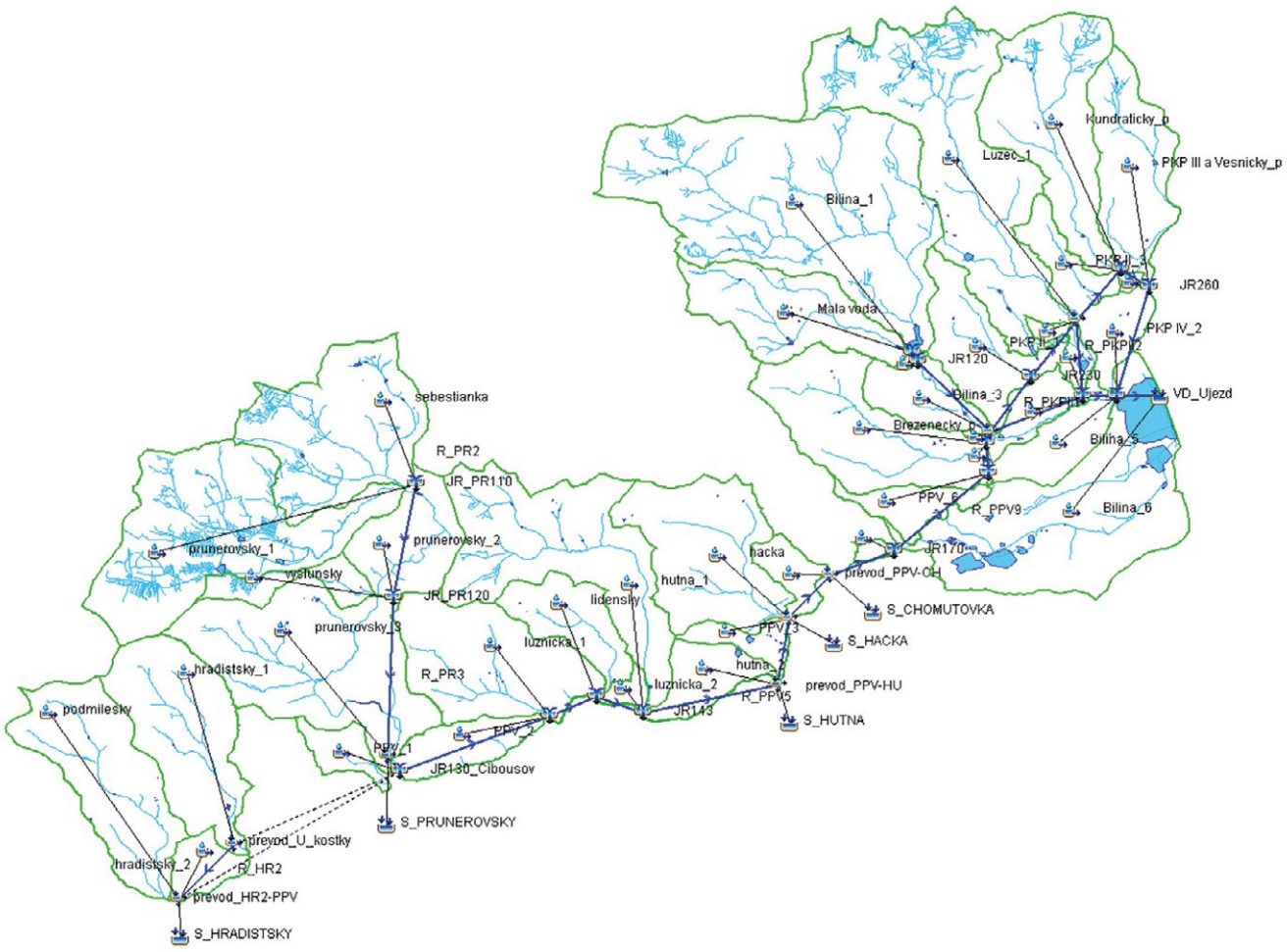
Hlavní kroky odvození teoretické povodňové vlny jsou následující:

- schématické rozdělení povodí na dílčí povodí a říční úseky pro výpočet postupu povodňové vlny tak, že závěrové profily dílčích povodí jsou místa soutoků (příp. zájmové profily typu vodoměrná stanice, vodní dílo atd.) a říční úseky jsou pod místy soutoků na mezipovodích,
- určení příslušné *N*-leté srážky na povodí, zpravidla jednodenní, výjimečně s delším trváním,
- určení zatěžovacího hyetogramu, tj. rozdělení návrhové srážky do kratších, obvykle hodinových intervalů, a to na základě regionální typizace (horské, podhorské oblasti, nížiny),
- určení průměrné hodnoty *CN* na povodí a počátečních ztrát na odtoku,
- stanovení objemu odtoku metodou SCS-CN,
- určení parametrů jednotkového hydrogramu na základě fyzicko-geografických parametrů povodí,
- vlastní odvození teoretické povodňové vlny.

Odvození srážkoodtokového modelu a jeho parametrů probíhá z velké části v prostředí geografických informačních systémů pomocí programového vybavení ArcGIS, s využitím toolboxu HydroHMS (Šercl 2014), vyvinutém v ČHMÚ přímo pro účely srážkoodtokového modelování. Toolbox mimo jiné umožňuje pro jednotlivá (dílčí) povodí vypočítat fyzicko-geografické charakteristiky z digitálního výškového modelu DEM (sklon povodí, sklon a délku údolnice), spočítat průměrné hodnoty *CN* či návrhové srážky na povodí a z fyzicko-geografických charakteristik odhadnout parametry pro srážkoodtokový model, např. dobu koncentrace. Toolbox disponuje rovněž procedurou pro export GIS vrstev povodí, propojených identifikátorem jejich



Obr. 3 Schematizace dílčích povodí a říčních úseků v HEC-HMS (vlevo), návrhový hyetogram a výsledná teoretická povodňová vlna (vpravo).
Fig. 3. Schematization of sub-basins and river sections in HEC-HMS (left), design hyetograph and estimated design flood wave (right).



Obr. 4 Struktura srážkoodtokového modelu pro VD Újezd v prostředí HEC-HMS.
Fig. 4. Rainfall-runoff model structure in HEC-HMS for the Újezd water reservoir.

hydrologického pořadí, do formátu *.basin, který je následně využit v modelu HEC-HMS. Na obr. 1 a obr. 2 jsou na konkrétním příkladu povodí Lučního potoka v Českém středohoří ukázány důležité vstupy a výstupy při odvození fyzicko-geografických charakteristik pro srážkoodtokový model.

Druhá část výpočtu TPV probíhá v programu HEC-HMS, kde jsou pro všechna dílčí povodí a říční úseky nadefinovány parametry modelu, zadány srážky ve formě zvoleného návrhového hyetogramu a pro závěrový profil je odvozena teoretická povodňová vlna (viz obr. 3), příp. více variant povodňových vln, např. na základě volby různých tvarů návrhových zatěžovacích hyetogramů.

Od roku 2004, kdy byl připraven první metodický postup pro odvozování TPV pomocí srážkoodtokových modelů, již bylo v OPV zpracováno více než 80 hydrologických studií na stanovení TPV s dobou opakování delší než 500 let.

Jako příklad poměrně složité konstrukce srážkoodtokového modelu v rámci zpracování hydrologické studie uvádíme odvození teoretických povodňových vln pro vodní dílo (VD) Újezd, které se nachází na řece Bílině. Studie pro VD Újezd je příkladem, že v prostředí HEC-HMS lze namodelovat i složité vodohospodářské soustavy, které jsou spojeny s převody vody a manipulacemi na vodních dílech. Součástí modelu byl, kromě přirozených vodotečí, také Podkrušnohorský přivaděč, což je umělé vodní dílo, dlouhé necelých 34 km, převádějící vodu z Ohře a podkrušnohorských toků do povodí Bíliny. Podkrušnohorský přivaděč je významnou průmyslovou stavbou ovlivňující hydrologický režim v podhůří Krušných hor. Vybudován byl v letech 1957 až 1982 především pro potřeby zásobování vodou a ochranu průmyslové oblasti podkrušnohorské hnědouhelné pánve před povodněmi. Právě ve vodním díle Újezd Podkrušnohorský přivaděč končí.

Do modelu byly zahrnuty veškeré převody vody, manipulace na objektech, a jelikož je přivaděč ve velké části zatrubněn, bylo nutné znát i maximální možnou kapacitu potrubí přivaděče. Současně byla do modelu zahrnuta povodí přirozených vodních toků odvodňujících Krušné hory a ústících do přivaděče nebo jej křižujících. Veškeré podklady o Podkrušnohorském přivaděči byly poskytnuty provozem podniku Povodí Ohře s. p. a zároveň byla ještě před vytvořením modelu uskutečněna dvoudenní podrobná rekognoskace vodohospodářské soustavy.

Srážkoodtokový model byl nakonec tvořen dohromady 93 elementy, z tohoto počtu je 39 typu dílčí povodí (sub-basin), 24 koryto (reach), 16 soutok (junction), 8 odbočení (diversion) a 6 závěrových profilů (sink). Kromě závěrového profilu VD Újezd byly vytvořeny také profily Hačka, Hutná, Hradišťský potok, Chomutovka a Prunéřovský potok, tedy profily po odbočení z Podkrušnohorského přivaděče.

Automatické procedury v prostředí GIS, umožňující odvození srážkoodtokového modelu, byly využity pouze zčásti, a to pro stanovení fyzicko-geografických charakteristik. Velká část sestavení, propojení a nastavení komponent modelu musela kvůli složitosti soustavy proběhnout ručně přímo v prostředí HEC-HMS. Výsledné schéma modelu je zobrazeno na obr. 4.

Pro odvozování *N*-letých průtoků a teoretických povodňových vln je v OPV, ale především na hydrologických pracovištích poboček ČHMÚ, využívána také interní aplikace AGPosudek, což je rozšíření GIS SW ArcGIS Pro. Do zmíněné aplikace byly včleněny algoritmy používané v HEC-HMS, tudíž aplikace umožňuje výpočet TPV z návrhových srážek přímo v prostředí GIS, ale s omezením výpočtu pouze na jedno ucelené povodí (Šercl et al. 2022).

3. Využití srážkoodtokového modelu při vyhodnocení proběhlých povodňových událostí

Povodňové události, zejména přívalového charakteru, se vyskytují často na povodích, která nejsou hydrologicky monitorována. Kulminační průtok se za povodní tohoto typu většinou nepodaří přímo změřit, a proto je potřebné hodnotu kulminačního průtoku vyhodnotit (ověřit) nepřímo za využití srážkoodtokového, příp. hydraulického modelu.

V případě srážkoodtokového modelu se obdobně jako u návrhových hydrologických dat (kap. 2) využívá HEC-HMS. Rozdělení povodí na dílčí prvky (povodí, říční úseky) probíhá obdobně, jak je uvedeno v kap. 2. Využívány jsou i shodné postupy pro odvození objemu odtoku a výpočet odtokové odezvy. Odlišnosti jsou popsány v následujícím textu.

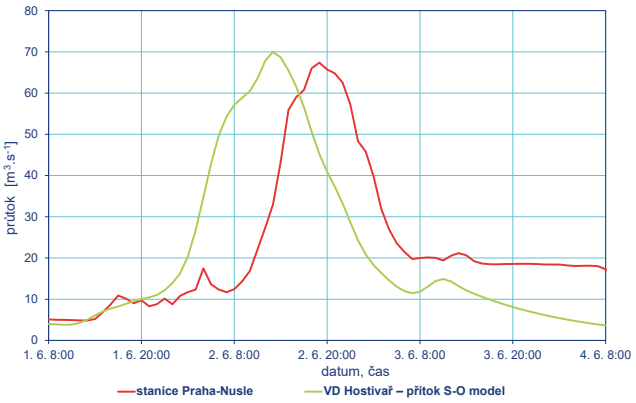
Zcela zásadní jsou v tomto případě co nejpřesnější srážkové vstupy, které v posledních letech tvoří kombinovaný odhad z radarových odhadů srážek a srážkoměrných pozorování. Radarová měření pokrývají celé území České republiky, tudíž je možné provést relativně přesné odhady množství spadlých srážek, a to i v místech mimo srážkoměrné stanice. Srážky do modelu vstupují v nejkratším možném intervalu, v kterém jsou k dispozici. Zpravidla jde o krok kratší než jedna hodina, v současnosti obvykle 10–15 minut.

Dalším velmi důležitým krokem je určení hodnoty *CN*. Hodnota *CN* není stálá, ale mění se v závislosti na předchozím nasycení. Za tímto účelem lze využít hodnoty *CN*, které jsou v denním kroku počítány v Indikátoru přívalových povodní, dále FFI, (Sercl et al. 2023), popřípadě lze alespoň spočítat hodnotu ukazatele předchozích srážek za posledních 30 dní (API_{30}) od posuzované události. Hodnotu *CN* lze následně s využitím tohoto ukazatele odhadnout. Hlavní význam co nejpřesnějšího odhadu *CN* je v tom, že pomocí *CN* je nejen určován objem odtoku, ale tento údaj vstupuje i do odhadu parametrů srážkoodtokového modelu, například doby koncentrace nebo hodnoty počáteční ztráty.

První rozsáhlejší modelování tohoto typu proběhlo v OPV po přívalových povodních v Jizerských horách a blízkém okolí v první dekádě srpna 2010. Srážkové odhady ze surových radarových dat byly adjustovány naměřenými denními srážkovými úhrny ve stanicích a tento nejlepší možný srážkový odhad následně vstupoval do srážkoodtokového modelu HEC-HMS vybraných malých povodí. Podrobnější informace jsou dostupné z vyhodnocení těchto mimořádných přívalových povodní (Pecha et al. 2010).

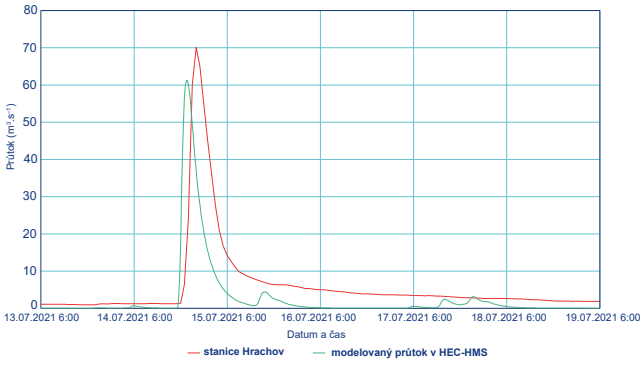
K dalším mimořádným povodňovým událostem, po kterých bylo významně využito srážkoodtokového modelování, došlo v červnu 2013. Po vlhkém květnu se vyskytly na přelomu května a června trvalejší a vydatnější srážky, do kterých byly později v úvodu června vnořeny konvektivní srážky. Povodně, které byly v nejvíce zasažených lokalitách převážně přívalového charakteru, postihly velkou část území Čech. Modelovány byly menší přítoky Vltavy, a to nejen v Praze na Botiči (obr. 5), ale například přítoky středního Labe či menší toky v povodí horního Labe. Nedlouho po odeznění těchto povodní se vyskytla další synopticky zajímavá situace, která způsobila v ještě stále relativně hodně nasyceném území lokální přívalové povodně, které se vyskytovaly v průběhu několika dní různě po celém našem území. Podrobněji je opět hydrologické modelování, především na menších tocích, popsáno ve vyhodnocení povodní (Šercl et al. 2013).

Další rozsáhlejší srážkoodtokové modelování proběhlo po přívalových povodních, které se vyskytly v průběhu července 2021 v několika regionech na našem území (např. Šluknovsko, Děčínsko, oblast Jeseníků). Tyto přívalové povodně naštěstí nebyly tak ničivé a rozsáhlé jako předchozí zmíněné povodně, případně jako ty, které se v té době vyskytly například v Ně-



Obr. 5 Porovnání pozorované a modelované povodňové vlny na Botiči (v odlišných profilech, vlevo) a ústí rozvodněného Botiče do Vltavy (vpravo).
Fig. 5. Comparison of the observed and simulated flood wave on the Botič stream (specific cross-sections, left) and on the flooded Botič at the confluence with the Vltava River (right).

Obr. 6 Rozvodněná Brzina nedaleko obce Svatý Jan, zdroj: Oficiální web obce Svatý Jan.
Fig. 6. Flooded Brzina River near the village of Svatý Jan, source: Official website of the village of Svatý Jan.



Obr. 7 Pozorovaný a modelovaný průtok Brziny v profilu vodoměrné stanice Hrachov.
Fig. 7. Observed and modelled discharge of the Brzina River at the cross-section of the Hrachov water-gauging station.

mecku (Daňhelka 2022). V některých zasažených lokalitách ale i tak došlo k poměrně značným škodám, a tak bylo potřeba zjistit, případně ověřit kulminační průtoky v několika nejvíce zasažených povodích (Pecha et al. 2022).

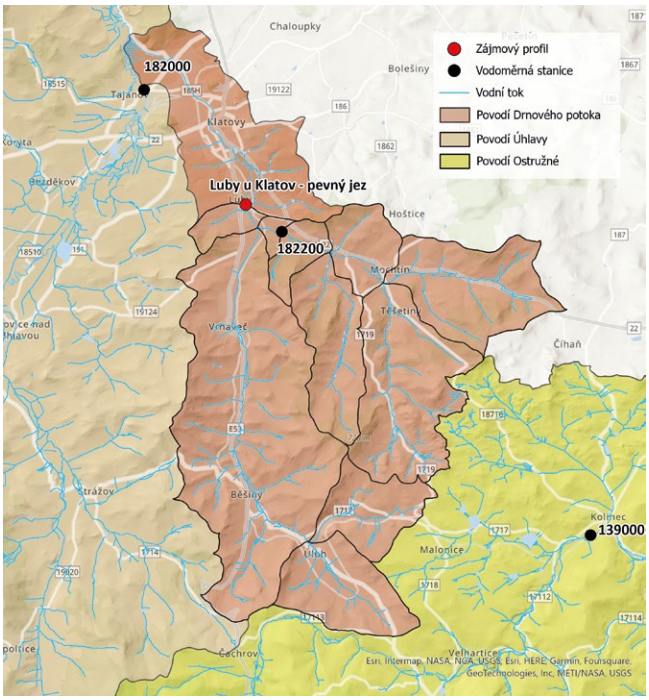
V období cca od roku 2010 až do roku 2022 bylo srážkoodtokovým modelem ověřováno či vyhodnocováno několik dalších událostí, které už ale nebyly tak plošného rozsahu jako výše popisované povodně. Jednou z těchto událostí byla povodeň na říčce Brzině také v červenci 2021. Brzina je jedním z pravostranných přítoků Vltavy v oblasti Slapské přehrady. Relativně blízko ústí do Vltavy se nachází vodoměrná stanice Hrachov. Během 13. a 14. července bylo povodí Brziny několikrát zasaženo intenzivními srážkami, které v profilu stanice způsobily povodňový průtok s dobou opakování 20 až 50 let. Na obr. 6 je zachycena rozvodněná Brzina nedaleko obce Svatý Jan.

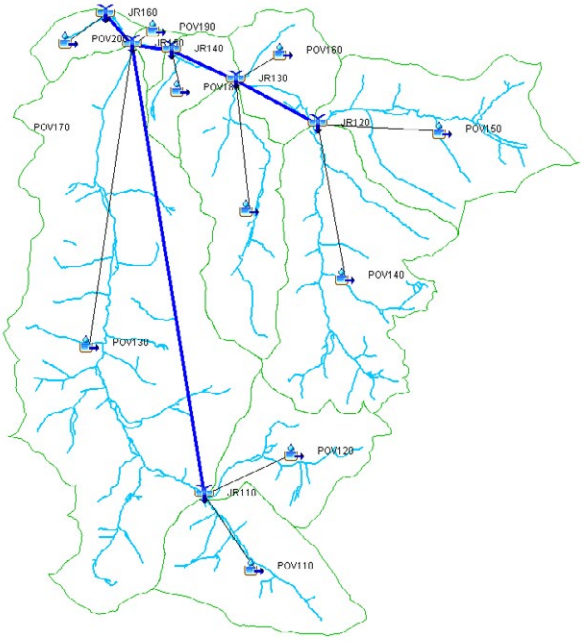
Jelikož se nepodařilo změřit průtok ihned po kulminaci povodně, bylo potřeba hodnotu kulminačního průtoku ověřit pomocí srážkoodtokového modelu. Jako vstupní srážky byly použity 15minutové úhrny radarového produktu MERGE (kombinace radarových odhadů a dat ze srážkoměrů) (Novák, Kyznarová 2016). Nasycenost povodí byla odhadnuta pomocí aktuálních hodnot *CN* odvozených z výpočtu aplikace FFI k 13. červenci. Porovnání modelovaného a vyhodnoceného průtoku v profilu stanice Hrachov je na obr. 7. Výsledky z modelu posloužily ke zpřesnění stanovení kulminačního průtoku povodně ve stanici Hrachov a také ke zpřesnění měrné křivky průtoků v dané stanici.

4. Využití proběhlých povodňových událostí k ověření parametrů modelu při odvozování návrhových hydrologických dat

Vyhodnocení proběhlých povodňových událostí lze rovněž využít k ověření a kalibraci parametrů modelu při odvozování návrhových hydrologických dat. Ve studii v povodí Drnového potoka byl využit srážkoodtokový model pro ověření hodnot *N*-letých průtoků pro profil jezu v Lubech u Klatov (80,36 km^2).

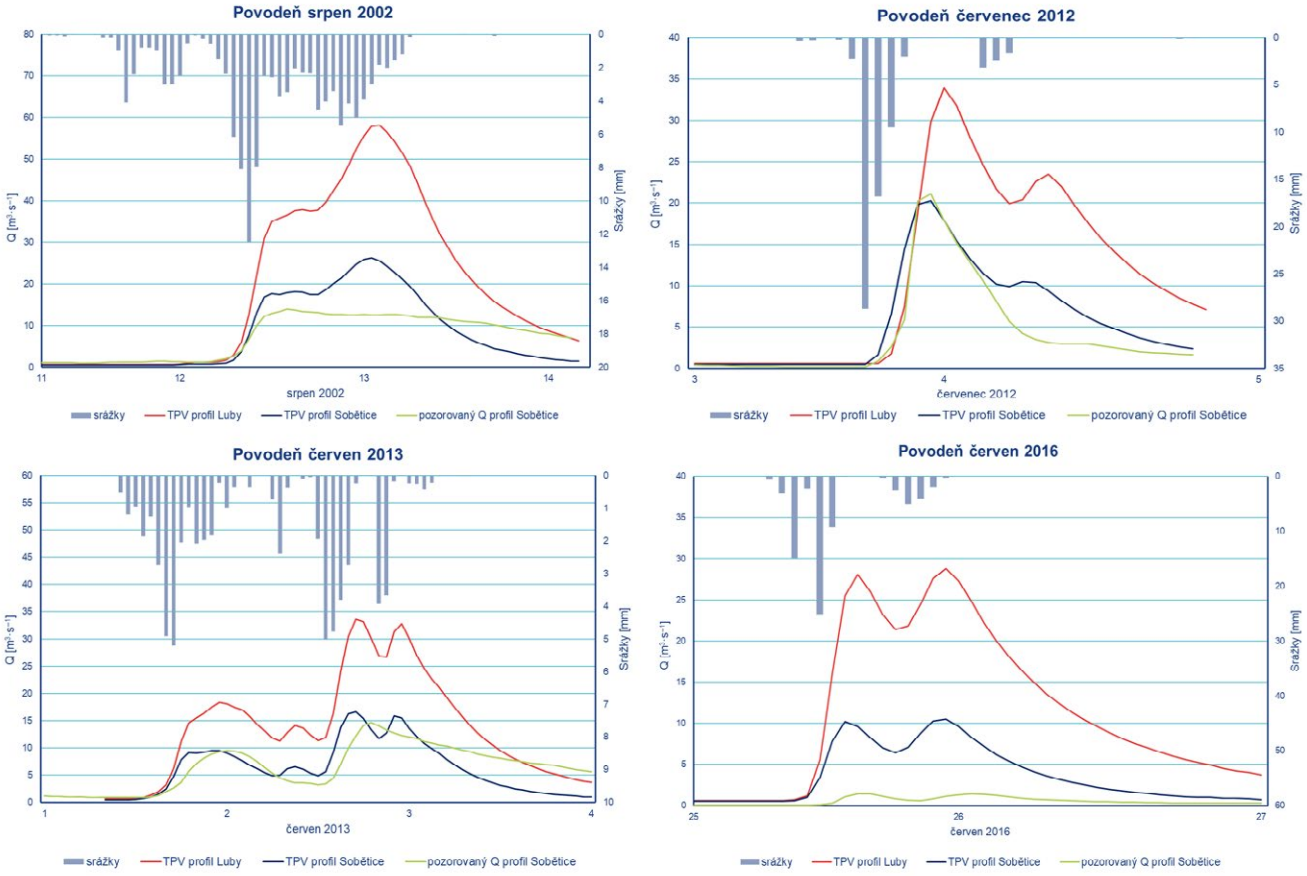
V povodí Drnového potoka ČHMÚ provozuje vodoměrnou stanici Sobětice na Mochtínském potoce (35,09 km^2). Nejvýznamnější pozorované povodňové vlny v tomto profilu posloužily ke kalibraci parametrů modelu pro odvození TPV s kulminačním průtokem o době opakování 100 let (TPV$_{100}$) pro zájmový pro-





Obr. 8 Povodí Drnového potoka a část povodí Úhlavy a Ostružné s uvedenou lokalizací požadovaného profilu a vyznačením vodoměrných stanic (vlevo) a struktura srážkoodtokového modelu pro povodí Drnového potoka k profilu Luby u Klatov v prostředí HEC-HMS (vpravo).

Fig. 8. Drnový potok basin and the part of Úhlava and Ostružná basins with the location of the required profile and water-gauging stations (left) and rainfall-runoff model structure in HEC-HMS for Drnový potok basin (right).



Obr. 9 Modelované povodňové vlny pro profily Luby a Sobětice v porovnání s pozorovaným průběhem povodňové vlny v profilu Sobětice pro vybrané povodňové události.

Fig. 9. Modelled flow rates during the selected flood events for the cross-sections of Luby and Sobětice compared to the observation at the Sobětice site.

fil Luby u Klatov (obr. 8). Model byl kalibrován na čtyřech povodňových událostech (ze srpna 2002, července 2012, června 2013 a června 2016), které byly namodelovány a následně porovnány s pozorovaným průběhem povodňových vln v profilu Sobětice (obr. 9). Aby výsledný modelový hydrogram co nejlépe odrážel pozorovaný průběh povodňové vlny, byly v modelu upraveny parametry jednotkového hydrogramu a pro každou povodňovou událost upraveny počáteční ztráty tak, aby odpovídaly předchozímu nasycení povodí.

Z výsledků modelu je zřejmá velká nejistota ve srážkoodtokovém modelování, která je dána jak podrobností srážkových vstupů, vystižením vlivu předchozího nasycení i nastavením parametrů modelu. Velkou nejistotou mohou být zatížena i průtoková data ve vodoměrné stanici vzhledem k nutnosti extrapolace měrné křivky průtoku mimo rozsah provedených měření průtoku. I přes výše uvedené okolnosti, pozorované a simulované průtoky vykazují poměrně slušnou shodu s výjimkou odtokové události z června 2016 (obr. 9).

Povodeň v červnu 2016 vznikla z extrémních přívalových srážek z bouřkové činnosti, přičemž zasaženo bylo zejména povodí Drnového potoka nad soutokem s Mochtínským potokem. Velký nesoulad mezi pozorovaným a simulovaným průtokem v profilu Sobětice spočívá zřejmě v nižším předchozím nasycení povodí Mochtínského potoka a v nižší intenzitě srážek, které se stačily vsakovat.

Kalibrovaný model byl poté využit pro nastavení rozmezí parametrů modelu pro simulaci TPV_{100} v profilu Luby u Klatov.

5. Indikátor přívalových povodní

Další významné využití nachází srážkoodtokový model v aplikaci Indikátor přívalových povodní (FFI), více v Sercl et al. (2023), která je pracovníky OPV vyvíjena a spravována. 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 ještě očekávaných srážek. FFI počítá v denním kroku nasycenost území, a to na základě jednoduché bilance srážek, odtoku a aktuální evapotranspirace. Srážky vstupují ve formě 24hodinových sum MERGE (Novák, Kyznarová 2016), hodnoty denní aktuální evapotranspirace vychází z modifikace metody Penmann-Monteith (Kohut et al. 2011).

Pro odhad odtoku ze srážek je používána metoda SCS-CN. V modelu se předpokládá, že voda, která neodteče, se vsákne do půdy a postupně se vypařuje. Při vyšším nasycení (nad hodnotu CN_{II}) se část vody dostává do podzemních vod. Smyslem výpočtu je tedy každodenní plošná aktualizace hodnot *CN*, které lze převést na potenciální retenci, tedy schopnost zadržet vodu v půdě a obecně v krajině.

Aktualizované hodnoty *CN* poté vstupují do výpočtu srážkoodtokového modelu, který je spouštěn každých 15 minut a využívá obdobné metody stanovení odtokové odezvy popsané v kap. 2 a 3. Jako srážkové vstupy jsou používány 10minutové odhady vycházející z kombinace srážkoměrných a radarových měření (MERGE), případně adjustovaná radarová data (Novák et al. 2021) v termínech, kdy MERGE není k dispozici. Mnohem více je o provozu FFI napsáno v samostatném článku tohoto vydání Meteorologických zpráv.

6. Hlavní nejistoty související se srážkoodtokovým modelováním

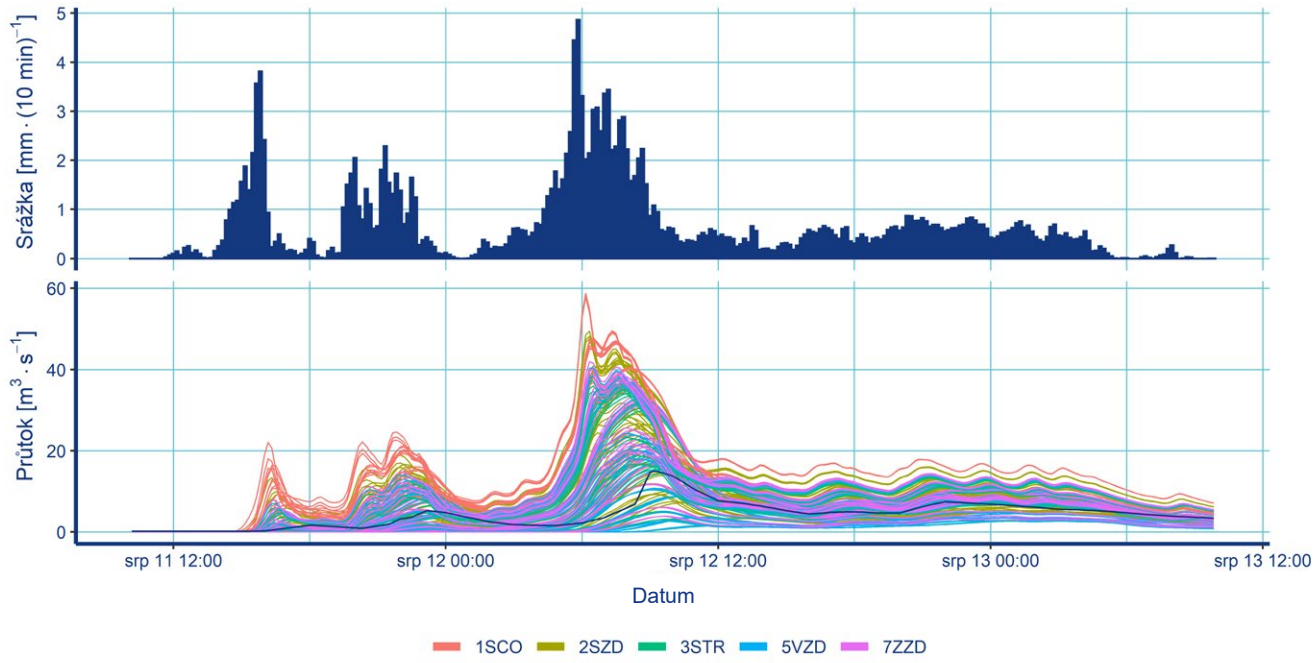
Srážkoodtokové modelování je zatíženo celou řadou nejistot. Jednou z těchto nejistot je variabilita vstupních údajů a podkladů, které je možné použít při odvození parametrů srážkoodtokového modelu.

Oddělení povrchových vod ČHMÚ bylo zapojeno do projektu „Předchozí nasycenost a návrhové srážkové intenzity jako faktory odtokové odezvy na malých povodích (QK1910029)“, který se zabýval modelováním extrémních srážkoodtokových událostí na malých povodích. Hlavním cílem bylo pokusit se vyhodnotit nejistoty spojené se vstupními parametry při aplikaci metody SCS-CN, která je v kombinaci s jednotkovým hydrogramem používána v ČHMÚ k odvození objemu přímého odtoku a tvaru povodňové vlny a je též implementována do FFI. Z množství srážkoodtokových situací v posledních letech je známo, že stav předchozí nasycenosti povodí hraje zásadní roli při formování odtoku z přívalových povodní (např. Svoboda, Pecha 2018; Pecha et al. 2022), nicméně vyhodnocení tohoto vlivu i s ohledem na další nejistoty spojené s metodou *CN* křivek a dalšími vstupy zatím nebylo provedeno.

Metodou SCS-CN bylo za využití systému HEC-HMS modelováno 15 významných pozorovaných srážkoodtokových událostí na pěti malých povodích. Snahou bylo najít taková malá povodí, která budou zastupovat různé typy naší krajiny. Bohužel malých povodí s dlouhou řadou pozorování průtoků mnoho není, a to zejména v zemědělsky obhospodařovaných oblastech. Vybrána tak byla dvojice horských povodí (Černá Nisa po profil Uhlířská, 1,80 km² a Spůlka po profil Nový Dvůr, 9,99 km²), vrchovinné polohy reprezentovalo povodí Pstruhovce po profil Landštejn nad nádrží (6,36 km²) a pahorkatiny byly zastoupeny povodím Hruškovice po profil Osvětimany (9,54 km²) a povodím Dobřejovického potoka až po profil v Průhonicích (13,00 km²). Simulováno bylo více než 1 700 modelových scénářů událostí s různými kombinacemi předchozího nasycení, hydrologických skupin půd a zdrojů dat *CN*, celistvosti povodí v modelu a dalších modelových parametrů.

Cílem bylo pokusit se vyjádřit nejistoty v modelování a významnost jednotlivých vstupních parametrů a jejich kombinací. Pro porovnání modelovaných a pozorovaných průtoků bylo využito řad vodních stavů z databáze ČHMÚ, z nichž byly odvozeny průtoky v desetiminutovém kroku. Pro modelování byly využity desetiminutové radarové odhady srážek, adjustované srážkoměry na Ústavu fyziky atmosféry AV ČR (Bližňák et al. 2017). Posuzovány byly vybrané charakteristiky pozorovaných a modelovaných událostí – objem, kulminační průtok a průtok na 75% kvantilu. Další aktivity byly zaměřeny zejména na citlivostní analýzu parametrů modelu a k odhadu variability a vlivu konkrétních parametrů na celkovou odezvu modelu, především ve vazbě na počáteční podmínky modelovaných situací.

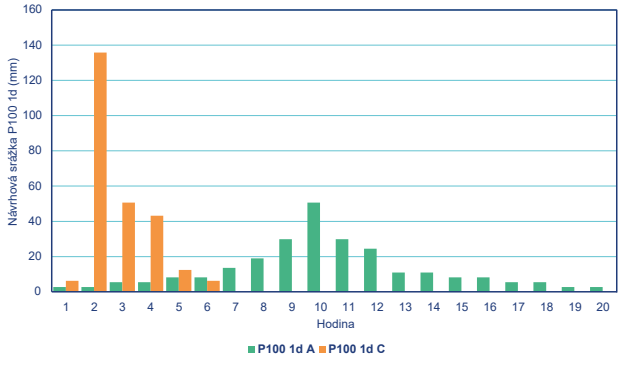
Příklad rozptylu jednotlivých variant scénářů je zobrazen na události z 12. srpna 2002 z povodí Spůlky (obr. 10). Barevné rozlišení je provedeno na základě různých metod pro odvození hodnot *CN*. Z obrázku je patrný velký rozptyl modelovaných průtoků v závislosti na použitých modelových scénářích. Komplexní popis testovaných parametrů, jednotlivých modelovaných scénářů a celkových výsledků je k nalezení v publikaci Kavka et al. (2023).



Obr. 10 Informativní zobrazení rozptylu modelovaných scénářů pro srážkoodtokovou událost z 12. srpna 2002 v povodí Spůlky, hyetogram příčinných srážek v povodí (nahoře) a scénáře, barevně rozlišené podle metody odvození CN, s tmavě modrou čárou zobrazující vyhodnocený pozorovaný průtok v desetiminutovém kroku (dole).
Fig. 10. Variance of modelled rainfall-runoff scenarios for the event of August 12, 2002 in the Spůlka basin, hyetograph of causal rainfall in the basin (above) and scenarios, coloured according to the CN derivation method, with a dark blue line showing the evaluated observed flow rate in a ten-minute step (below).

Z řešení projektu vyplynulo, že ve srážkoodtokovém modelování je velmi mnoho obtížně kvantifikovatelných nejistot, z nichž nejvýznamnější roli hraje počáteční nasycení před srážkoodtokovou událostí. Další navazující významnou nejistotou je odhad hodnoty *CN* jako klíčového parametru pro určení velikosti odtoku. V současné době existuje více datových zdrojů pro určení hodnot *CN* v podobě dat o využívání území a hydrologických skupin půd. Za tímto účelem řešitelé zmíněného projektu navrhli navazující výzkumný projekt, který by se měl mimo jiné soustředit na sjednocení datových zdrojů a metodiky odvození hodnot *CN*.

V současné době je k dispozici celá řada digitálních podkladů, které mají různou dobu vzniku a rozdílné prostorové rozlišení, ať už se jedná o prostorové rozlišení digitálního modelu reliéfu (např. DMR 5G), nebo o data využití území, případně informace o infiltračních vlastnostech půd, které byly aktualizovány Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půd v roce 2017 (VÚMOP 2018). V ČHMÚ se při odvození hodnot *CN* také zohledňuje sklonitost území.



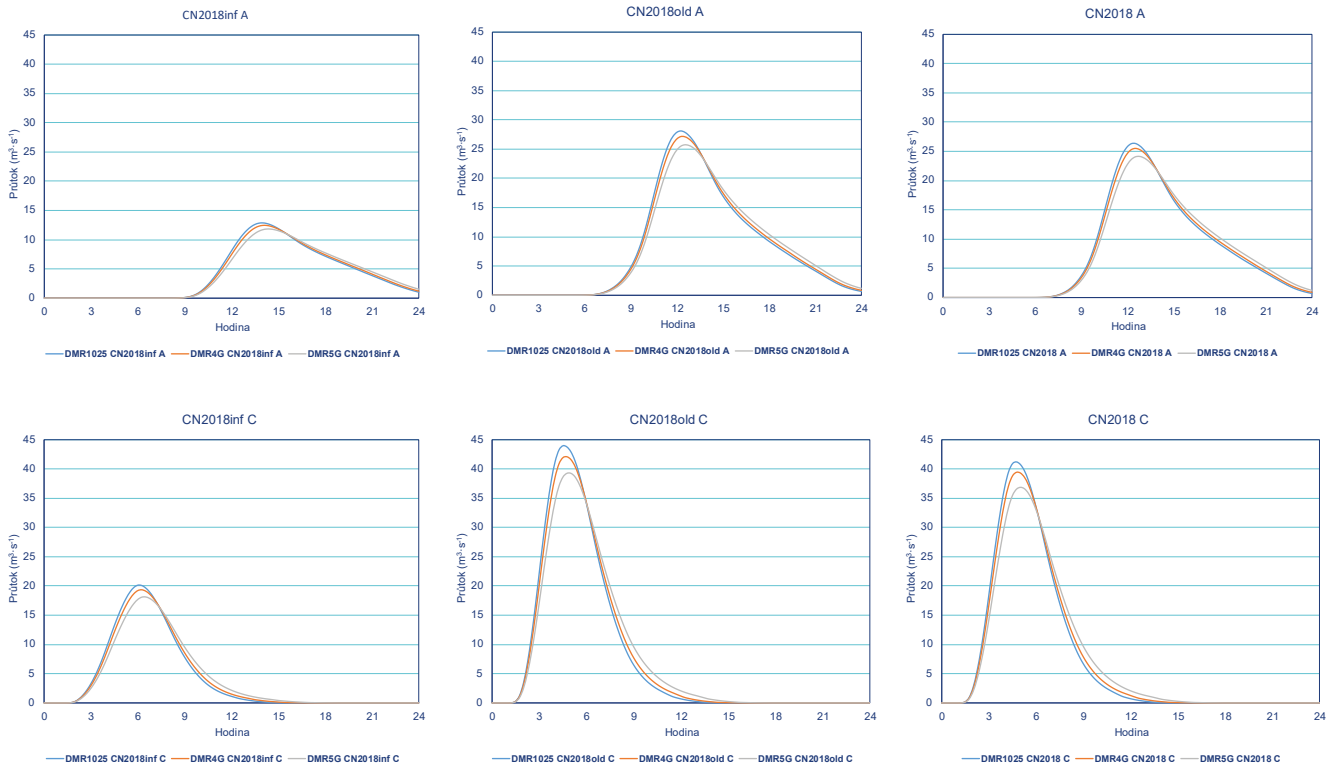
Obr. 11 Návrhové hyetogramy z jednodenní srážky P_{100}.
Fig. 11. Design hyetographs from one-day P_{100} rainfall.

Posouzení variability vstupních parametrů srážkoodtokového modelování bylo testováno v povodí Blatného potoka po profil Blatný rybník (plocha povodí je 4,76 km^2).

Pomocí srážkoodtokového modelu HEC-HMS byly vypočteny parametry povodňové vlny z jednodenní stoleté návrhové srážky P_{100} v povodí Blatného potoka, odvozené pomocí různých kombinací okrajových parametrů modelu z různých variant vstupních podkladů. Kulminační průtoky z modelu byly porovnány s hodnotou 100letého průtoku (Q_{100}) stanovenou statisticky z pozorovaných dat ve vodoměrné stanici Blatný rybník. V analýze byly použity tři verze digitálního modelu reliéfu (DMR25, DMR 4G a DMR 5G), dvě varianty hydropedologických dat, data Corine Land Cover 2018 a dvě varianty návrhového hyetogramu (obr. 11), kde varianta A představuje celodenní vytrvalý déšť s rozdělením jednodenního úhrnu do 20 hodin a varianta C spíše srážky přívalového charakteru v délce trvání 6 hodin.

Použití různé podrobnosti DEM je zásadní při odvozování morfologických charakteristik, tj. sklonu povodí, sklonu a délky údolnice atd., což má pak následný vliv na parametry srážkoodtokového modelu. V povodí Blatného potoka se při použití podrobnějšího digitálního modelu reliéfu prodlužuje délka údolnice, což se odráží ve zmenšení výsledného kulminačního průtoku, jelikož je vypočítaná doba koncentrace delší.

Z ostatních parametrů má na průběh povodňové vlny nejzásadnější vliv tvar hyetogramu návrhové srážky, viz grafy na obr. 12. Analýza v povodí Blatného potoka byla provedena s cílem zpřesňovat metodiky používané při určování teoretických povodňových vln v ČHMÚ a zhodnotit využívání a relevanci vstupních podkladů. Podrobnější výsledky jsou uvedené v příspěvku na konferenci Hydrologie malého povodí 2023 (Tyl 2023).



Obr. 12 Průběhy TPV odpovídající tvaru návrhového hyetogramu uvedeného na obr. 11.
Fig. 12. Theoretical flood hydrographs corresponding to the shape of the design hyetograph mentioned above.

7. Závěr

Srážkoodtokové modelování má v OPV ČHMÚ relativně dlouhou historii a široké uplatnění. Umožňuje odvozování návrhových hydrologických dat v profilech, kde chybí, nebo je nedostatečné, vodoměrné pozorování. V nepozorovaných profilech je srážkoodtokové modelování relevantní nástroj, např. při vyhodnocení proběhlých povodňových událostí, jejichž součástí je odhad průběhu povodňové vlny, jejího kulminačního průtoku a objemu. Pracovníci OPV jsou zapojeni také do vědeckých projektů zaměřených na srážkoodtokové modelování. Hlavním cílem probíhajících, ale i několika již ukončených, výzkumných projektů, je průběžná aktualizace metodických postupů a harmonizace vstupních podkladů pro odhad parametrů srážkoodtokového modelu.

Pracovníci OPV plánují v budoucnu také využití kontinuálních srážkoodtokových modelů (HBV Model), zejména v probíhajících či chystaných výzkumných projektech, zabývajících se vlivem změny klimatu na hydrologický režim. Jelikož je směrem do budoucna, kromě výskytu povodní, velkým rizikem i častý výskyt dlouhých suchých period, kontinuální modely budou využívány spíše pro odhad změn režimu minimálních průtoků.

Literatura:

BALÁŽ, M., DANÁČOVÁ, M., SZOLGAY, J., 2011. On the use of the Muskingum method for the simulation of flood wave movements. *Slovak Journal of Civil Engineering*. Vol. **18**, No. 3, s. 14–20. Dostupné z doi: https://doi.org/10.2478/v10189-010-0012-6.

BLIŽŇÁK, V., KAŠPAR, M., MÜLLER, M., 2017. Radar-based summer precipitation climatology of the Czech Republic. *International Journal of Climatology*. Vol. **38**, s. 677–691. Dostupné z doi: https://doi.org/10.1002/joc.5202.

CLARK, C. O., 1945. Storage and the unit hydrograph. *Transactions, ASCE*. Vol. **110**, No. 2261, s. 1419–1446.

DAŇHELKA, J., 2022. Německé povodně v červenci 2021 zpovzdálí. *Meteorologické zprávy*, roč. **75**, č. 2, s. 53–59. ISSN 0026-1173.

HAWKINS, R. H., 1978. Runoff Curve Numbers with Varying Site Moisture. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. Vol. **104**, No. 4, s. 389–398. Dostupné z doi: https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001221.

HAWKINS, R. H., WARD, T. J., WOODWARD, D. E., Van MULLEM J. A., 2009. Curve Number Hydrology: State of the Practice. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia. 106 s. ISBN 978-0-7844- 1044-2.

KAVKA, P., STROUHAL, L., PECHA, M., SVOBODA, V., 2023. Analýza vlivu stavu počátečního nasycení a dalších vstupních parametrů pomocí metody SCS-CN. In: *Hydrologie malého povodí 2023*. Praha: Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v. v. i., s. 59–66. ISBN 978-80-87117-22-4.

KOHUT, M., HORA, P., CHUCHMA, F., 2011. Potenciální evapotranspirace travního porostu v oblasti lokality Pánov na Hodonínsku – dlouhodobé vývojové trendy v období let 1961–2099. In: *Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí*. Praha: ČHMÚ, s. 23. ISBN 978-80-86690-87-2.

NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., 2016. MERGE2 – modernizovaný systém kvantitativních odhadů srážek provozovaný v Českém hydrometeorologickém ústavu. *Meteorologické zprávy*, roč. **69**, č. 5, s. 137–144. ISSN 0026-1173.

NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, 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.

PECHA, M., TYL, R., SVOBODA, V., 2022. Přívalové povodně v červenci 2021. In: *Hydrologická ročenka České republiky 2021* [online]. Praha: ČHMÚ, s. 251–261 [cit. 28. 7. 2023]. Dostupné z WWW: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/hydro/hydrologicke_rocenky/HR_2021.pdf.

PECHA, M., TYL, R., ŠERCL, P., 2010. Vyhodnocení povodní v srpnu 2010. Vyhodnocení průběhu povodně na nepozorovaných povodích s využitím srážkoodtokového modelu. Příloha č. 2 k dílčí zprávě Hydrologické vyhodnocení průběhu povodní [online]. Praha: ČHMÚ [cit. 28. 7. 2023]. Dostupné z WWW: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/hydro/povodne/pov10s/pdf/priloha2.pdf.

SERCL, P., PECHA, M., NOVAK, P., KYZNAROVA, H., LEDVINKA, O. et al., 2023. Flash Flood Indicator [online]. Praha: ČHMÚ. ISBN 978-80-7653-050-8 [cit. 28. 7. 2023]. Dostupné z WWW: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/nakladatelstvi/publikace-ke-stazeni.html.

SVOBODA, V., PECHA, M., 2018. When does extreme rainfall cause an extreme flood? [online]. 20th EGU General Assembly, EGU2018, Proceedings from the conference held 4–13 April, 2018 in Vienna, Austria, s. 4872 [cit. 28. 7. 2023]. Dostupné z WWW: https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-4872.pdf.

ŠERCL, P., 2014. Aplikace HydroHMS pro ArcGIS. Praha: Český hydrometeorologický ústav [interní dokument, nepublikováno].

ŠERCL, P., TYL, R., KUKLA, P., PECHA, M., 2022. Praktické příklady využití GIS v hydrologii v ČHMÚ. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, roč. **64**, č. 1, s. 32–39. ISSN 0322-8916.

ŠERCL, P., TYL, R., PECHA, M., HALÍŘOVÁ, J., FRYČ, T., 2013. Vyhodnocení povodní v červnu 2013. Hydrologický průběh povodní, dílčí zpráva [online]. Praha: ČHMÚ. [cit. 28. 7. 2023]. Dostupné z WWW: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/hydro/povodne/pov13/DilciZprava_DU_1_2_Hydrologie.pdf.

TYL, R., 2023. Variabilita vstupních parametrů při srážkoodtokovém modelování a jejich vliv na hydrologické údaje. In: *Hydrologie malého povodí 2023*. Praha: Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v. v. i., s. 90–99. ISBN 978-80-87117-22-4.

USACE, 2022. HEC-HMS Technical Reference Manual [online]. U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA [cit. 28. 7. 2023]. Dostupné z WWW: https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm.

USACE, 2023. HEC-HMS User's Manual. Version 4.12.0 [online]. U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA [cit. 28. 7. 2023]. Dostupné z WWW: https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.9.

VÚMOP, 2018. Nové mapy hydrologických funkcí půd [online]. [cit. 28. 7. 2023]. Dostupné z WWW: https://www.vumop.cz/nove-mapy-hydrologickych-funkci-pud.

Lektoři (Reviewers):
Mgr. Alena Kamínková, Ing. Petr Pavlík