

Odborná zpráva projektu QK1910029

doba řešení projektu 2019–2022

Číslo projektu: QK1910029

Název projektu: Předchozí nasycenost a návrhové srážkové intenzity jako faktory odtokové odezvy na malých povodích

Program: QK – Program aplikovaného výzkumu Ministerstva zemědělství na období 2017-2025, ZEMĚ

Podprogram: Podpora inovativního zemědělství a lesnictví prostřednictvím pokročilých postupů a technologií

Cíl podprogramu: Hlavním cílem podprogramu je získat prakticky využitelné poznatky pro zvýšení rentabilní zemědělské, lesnické a potravinářské produkce při zavedení adaptačních a zmírňujících opatření v reakci na změnu klimatu se zřetelem na zachování kvality přírodních zdrojů, surovin a životního prostředí a využití pokročilých postupů a technologií; zajištění zdravé a nutričně bohaté výživy populace pro kvalitní život. Dále je cílem zajištění nových poznatků pro rozvoj trvale udržitelného a konkurenceschopného zemědělství a lesnictví s ohledem na tvorbu, využívání a ochranu půdy a vodních zdrojů a podporu ekologické stability krajiny v návaznosti na prostředí EU a globalizaci, se zohledněním lokálních podmínek.

Doba řešení: 1. 1. 2019 - 31. 12. 2022

Hlavní příjemce: ČVUT v Praze (68407700)

Řešitel: Ing. Petr Kavka, Ph.D.

Další účastníci: Český hydrometeorologický ústav

Sweco Hydroprojekt a.s.

Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i.

Číslo smlouvy: 65070/2018-MZE-14152

Číslo jednací: 555-2018-14152

Řešitel: Ing. Petr Kavka, Ph.D.

.....

Praha, leden 2023



OBSAH

Cíle projektu.....	4
1 Popis průběhu řešení projektu v uplynulém roce.....	5
1.1 A2201 – Finalizace návrhových intenzit krátkodobých srážek.....	5
1.2 A2202 – Nasycenost povodí před návrhovými srážkami	7
1.3 A2203 – Experimentální měření a hydrologické modelování.....	8
1.3.1 Verifikace metody SCS-CN na pozorovaných srážko-odtokových událostech..	8
1.3.2 Ověření fyzikálního přístupu pro odvození návrhových charakteristik odtoku.	14
1.4 A2204 – Publikace výsledků projektu a seznamování odborné veřejnosti se závěry projektu	17
2 Dosažené výsledky	18
2.1 Metodika pro využití návrhových srážek a návrhových stavů pro odvození odtokových charakteristik (V15).....	20
2.2 Mapa výskytu typických průběhů srážek ve vazbě na předchozí úhrny srážek či retenci území (V12)	21
2.3 Software – webové nástroje poskytující charakter návrhové srážky podle lokality a zvolené doby opakování (V9)	21
2.4 Odborný článek na téma návrhových srážek (V13).....	22
2.5 Článek popisující nejistoty v hydrologickém modelování (V14)	22
2.6 Hydrologické skupiny půd – rozevřené nůžky hydrologických výpočtů (V35)	23
2.7 Mapa kategorizovaných malých povodí (V11).....	23
3 Využití nákladů za jednotlivé příjemce	24
4 Uskutečněné zahraniční cesty	24
5 Řešitelský tým.....	24
6 Hodnocení průběhu řešení.....	25
6.1 Shrnutí aktivit za jednotlivá pracoviště	26
6.2 Zhodnocení průběhu řešení za jednotlivé cíle projektu	27
6.2.1 C001 Seznamování odborné veřejnosti s postupem prací a výsledky.....	27
6.2.2 C002 Návrhové intenzity krátkodobých srážek.....	28
6.2.3 C003 Úhrny srážek a nasycenost povodí před návrhovými srážkami.....	29
6.2.4 C004 Vymezení a kategorizace oblastí v ČR jako podklad hydrologického modelování při navrhování staveb v krajině	29
6.2.5 C005 Kvantifikace nejistot odtokových odezev srážkových scénářů na základě pozorování, experimentů a hydrologického modelování.....	30

7	Popis uplatnění výsledků	31
8	Literatura.....	33

Organizace účastnící se projektu a seznam členů řešitelského kolektivu

České vysoké učení technické v Praze

Ing. Petr Kavka, Ph.D. – řešitel

Ing. Luděk Strouhal, Ph.D.

prof. Jiří Cajthaml, Ph.D.

Ing. Martin Landa, Ph.D.

Ing. Lenka Weyskrabová, Ph.D.

Ing. Martin Neumann, Ph.D.

Ing. Romana Kubínová

Ing. Jan-František Kubát

Český hydrometeorologický ústav

RNDr. Lenka Crhová, Ph.D. – další řešitel

Mgr. Stanislava Kliegrová, Ph.D.

RNDr. Anna Valeriánová

Mgr. Martin Pecha

Ing. Vojtěch Svoboda

Sweco Hydroprojekt a.s.

Ing. Martin Pavel – další řešitel

Ing. Libor Sychra

Mgr. Martin Stehlík

Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i.

RNDr. Marek Kašpar, Ph.D. – další řešitel

RNDr. Vojtěch Bližňák, Ph.D.

Bc. Filip Hulec

RNDr. Miloslav Müller, Ph.D.

RNDr. Petr Zacharov, Ph.D.

Cíle projektu

Cílem projektu je redukce nejistot při odvozování návrhových veličin při projektování a posuzování vodohospodářských opatření na drobných vodních tocích a v ploše povodí. Kombinací radarových a staničních dat budou odvozeny návrhové subdenní intenzity deště v ČR za celý rok i jednotlivé měsíce bezmrazového období. V návaznosti na předchozí projekt bude popsána sezónní a prostorová distribuce předchozích srážek, půdní vlhkosti a stav retenční kapacity území ve vztahu k průběhu a intenzitě srážky. Takto snížené nejistoty v návrhových veličinách budou ověřeny pomocí matematických modelů kalibrovaných na experimentálních výsledcích a měřených průtocích a budou využity pro definování rizika v malých povodích ČR a zdrojových plochách mimo tok.

Tabulka 1: Dílčí cíle projektu QK1910029

C001	Seznamování odborné veřejnosti s postupem prací a výsledky
C002	Návrhové intenzity krátkodobých srážek
C003	Úhrny srážek a nasycenost povodí před návrhovými srážkami
C004	Vymezení a kategorizace oblastí v ČR jako podklad hydrologického modelování při navrhování staveb v krajině
C005	Kvantifikace nejistot odtokových odezev srážkových scénářů na základě pozorování, experimentů a hydrologického modelování

1 Popis průběhu řešení projektu v uplynulém roce

Rok 2022 byl posledním rokem řešení projektu. V tomto roce byly aktivity zaměřeny především na syntézu výsledků dílčích úkolů, zejména stavu nasycení a vazby na potenciální hydrologickou odezvu s ohledem na aplikaci poznatků do inženýrské praxe a navrhování vodohospodářských opatření v ploše povodí.

Dále byly aktivity zaměřeny na publikaci výsledků a seznámení odborné veřejnosti se závěry projektu. Na podzim 2022 proběhla plánovaná konference představující závěry projektu a jejich implementaci do navrhování opatření v povodí ve vazbě na pozemkové úpravy. Konference byla součástí plánu akcí Středočeské pobočky ČMKPÚ. Dále byly publikovány příspěvky jak do českých, tak do mezinárodních periodik.

Hlavní součástí posledního roku řešení byla finalizace metodiky. Ta navazuje na předchozí metodiku „*Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině*“ a plně ji nahrazuje. Nedílnou součástí vydání metodiky je publikace výstupů a poskytování předzpracovaných srážkových dat pro hydrologické modelování pomocí SW jak formou webových služeb na portálu rain.fsv.cvut.cz, tak nástroj pro open SW QGIS.

Plánované aktivity byly rozděleny následovně:

- A2201 Finalizace návrhových intenzit krátkodobých srážek
- A2202 Nasycenost povodí před návrhovými srážkami
- A2203 Experimentální měření a hydrologické modelování
- A2204 Publikace výsledků projektu a seznamování odborné veřejnosti se závěry projektu

1.1 A2201 – Finalizace návrhových intenzit krátkodobých srážek

V posledním roce řešení se naskytla příležitost použít pro odhad návrhových úhrnů srážek časové řady radarových měření prodloužené o roky 2019 až 2021 a tím dále snížit případné nejistoty v odhadech. Nejdříve byla provedena adjustace radarových odhadů srážek denními úhrny ze stanic (dále jen adjustovaná radarová data) pro prodloužené období. Stejně jako v případě původních časových řad byla použita adjustační metoda popsaná v práci (Bližňák a kol., 2018). Finální vstupní soubor adjustovaných radarových dat tak obsahuje časové řady intenzit srážek, které pokrývají bezmrazová období od dubna do října mezi roky 2002 a 2021 s časovým rozlišením 10 min. a území ČR a jeho dvoukilometrové okolí s prostorovým rozlišením 1 km (celkem 82 737 radarových pixelů). Následně byla opětovně provedena regionální frekvenční analýza úhrnů spočtených z adjustovaných radarových dat pro vybrané délky trvání a časové průběhy srážky, která zahrnovala detekci a validaci ročních maxim úhrnů a aplikaci metod popsanych v práci (Kašpar a kol., 2021). Nově získaný soubor charakteristik návrhových srážek obsahuje (i) odhady velikosti návrhových úhrnů pro celé bezmrazové období i jednotlivé kalendářní měsíce s délkou trvání srážky od 30 min. do 24 hod. a pro doby opakování 2 až 100 roků a (ii) zastoupení (pravděpodobnost výskytu) šesti, pro území ČR typických variant srážkových událostí podle průběhu srážkové intenzity v závislosti na době opakování úhrnu pro délku trvání srážky 6 hod. Varianty byly detekovány v rámci řešení předchozího projektu a popsány prostřednictvím šesti syntetických hyetogramů (typy A až F). Více informací lze nalézt např. v práci (Müller a kol., 2018).

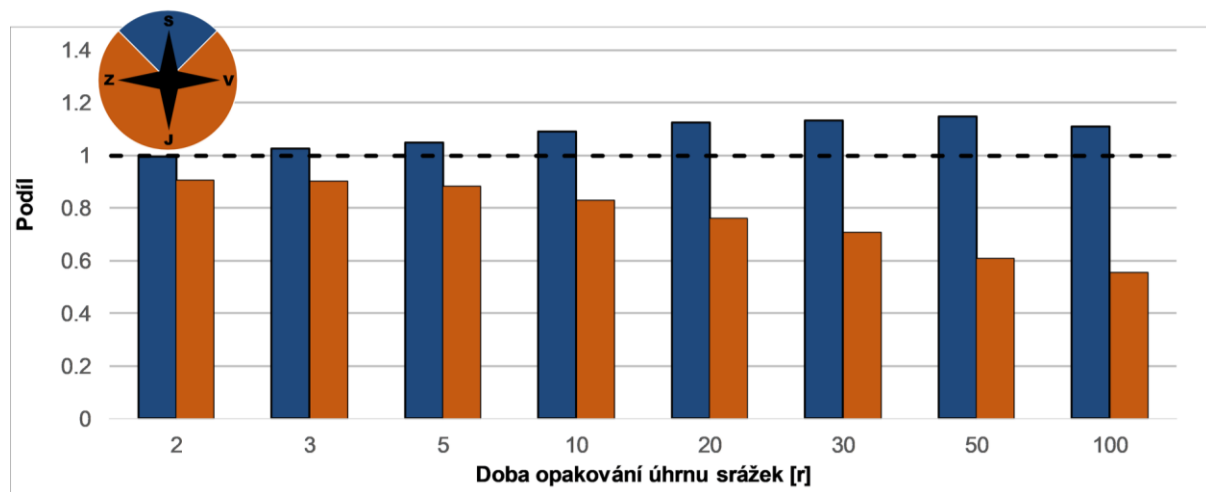
Pro zvýšení robustnosti odhadů velikosti návrhových úhrnů srážek byly návrhové úhrny z adjustovaných radarových dat zkombinovány s návrhovými úhrny ze staničních měření krátkodobých intenzit srážek odvozené v rámci aktivity A2002 „Vyhodnocení a analýza pozemních měření srážkových úhrnů“. Na základě výsledků testovacích studií, které probíhaly v předchozím roce řešení, byl navržen obecný postup, kdy se v prvním kroku spočtou rozdíly v návrhových úhrnech mezi oběma typy dat v radarových pixelech se stanicemi. V druhém kroku se tyto rozdíly interpolují do plochy všech pixelů, kde se jimi korigují návrhové úhrny z adjustovaných radarových dat. Pro interpolaci byla na základě hodnocení pomocí křížové validace vybrána geostatistická metoda Empirical Bayesian Kriging (Krivoruchko a Gribov, 2019). Metody interpolace z rodiny kriging jsou nejčastěji využívanými interpolačními metodami (Li a Heap, 2008), přičemž jsou obecně považovány za vhodné pro kombinaci radarových a staničních srážkových dat (Goudenhoofd a Delobbe, 2009). Je však nutno dodat, že poměrně nízký počet 60 stanic dostupných v době řešení tohoto projektu a jejich nerovnoměrné rozmístění vedlo k obecně malé prostorové závislosti měření mezi stanicemi, která je však důležitým faktorem zvyšujícím efektivitu interpolace. I přesto lze konstatovat, že kombinace obou typů dat přináší alespoň lokální zlepšení ve srovnání s doposud využívanými produkty. Použitý přístup má tak velký potenciál do budoucna v souvislosti s plánem zvyšovat počet dostupných stanic s kvalitními a dlouhodobými měřeními krátkodobých intenzit srážek.

Za účelem odstranění vysokofrekvenčních, původem radarových artefaktů v polích návrhových úhrnů srážek a zastoupení variant srážek podle jejich průběhu byla pole nakonec shlazena třídímním Gaussovým filtrem. Nastavení filtru bylo optimalizováno minimalizací střední kvadratické chyby a maximalizací korelačního koeficientu mezi návrhovými úhrny z adjustovaných radarových dat a staničních měření. Při hodnocení získaných charakteristik návrhových srážek jsme se dále zaměřili na srážky s délkou trvání 6 hod., pro které jsou k dispozici typické varianty podle jejich průběhu. Charakteristiky lze dohledat ve formě mapových produktů v certifikované mapě (výsledek QK1910029-V12), příp. certifikované metodice (výsledek QK1910029-V15), které jsou závaznými výsledky projektu. Uvedeme zde proto jen shrnutí hodnocení, které podporuje validitu použitých postupů a reálnost získaných výsledků (podrobněji viz Kašpar a kol., 2022).

Průměry návrhových úhrnů s délkou trvání srážky 6 hod. z celého území ČR dosahují pro doby opakování 2, 5, 10, 20, 50 a 100 roků hodnot 29, 39, 46, 53, 64 a 73 mm. Určitou roli v jejich pozorované prostorové variabilitě hraje nadmořská výška, takže v polohách do 300 m n. m. dosahují návrhové úhrny v průměru 28 mm pro dobu opakování 2 roky, resp. 68 mm pro dobu opakování 100 roků. V horských polohách s nadmořskou výškou nad 900 m n. m. tyto hodnoty dosahují v průměru 32, resp. 85 mm. Patrný je také zonální gradient, přičemž v severozápadní části státu jsou s výjimkou hor a jim přilehlých území návrhové úhrny obecně menší.

Stejně jako velikost návrhových úhrnů srážek, ani varianty podle jejich průběhu nejsou na území ČR rovnoměrně zastoupeny. Zastoupení jednotlivých variant se liší jak v prostoru, tak v závislosti na době opakování úhrnu. Obecně platí, že s rostoucí dobou opakování dochází k větší koncentraci vysokých hodnot zastoupení ve specifických oblastech. S ohledem na těsnou vazbu k velikosti návrhového úhrnu je prostorová distribuce zastoupení také ovlivněna topografií místa, zejména nadmořskou výškou. Závislost na topografii se však může pro jednotlivé varianty lišit vlivem rozdílných příčinných cirkulačních podmínek vzniku silných srážek. V případě nízkých dob opakování jsou zastoupení jednotlivých variant plošně poměrně rovnoměrná, ovšem s výjimkou horských oblastí, především na severních úbočích

pohraničních hor, kde je výrazně zvýšené zastoupení rovnoměrných (trvalých) srážek typu F na úkor krátkodobých epizod. Tento kontrast dále narůstá s rostoucí uvažovanou dobou opakování úhrnu (Obrázek 1).



Obrázek 1: Podíl mediánu zastoupení varianty srážkových událostí s rovnoměrnou srážkovou intenzitou typu F v radarových pixelech s danou orientací k mediánu zastoupení v pixelech s jinou než danou orientací v závislosti na návrhovém úhrnu s délkou trvání 6 hod. Uvažovány byly pouze dvě orientace pixelů podle legendy a pixely na území ČR s průměrnou nadmořskou výškou nad 900 m n. m.

1.2 A2202 – Nasycenost povodí před návrhovými srážkami

Nasycenost povodí před návrhovými srážkami byla analyzována pomocí úhrnů předchozích srážek, a to pomocí indexu předchozích srážek (API). Ten se běžně počítá pomocí denních úhrnů srážek, nejčastěji za 30 dní nebo kratší období, a vyjadřuje nasycenost povodí ráno daného dne. Protože však v tomto projektu uvažujeme šestihodinové srážkové události, které mohou začít kdykoliv během dne, bylo nutné výpočet indexu upravit tak, aby vyjadřoval nasycenost na začátku šestihodinového časového úseku s extrémním úhrnem. Vzhledem k 10-minutovému kroku adjustovaných radarových dat byly místo denních úhrnů srážek uvažovány 24-hodinové úhrny posunuté tak, aby se poslední z těchto časových úseků překrýval se začátkem šestihodinového úseku s extrémní srážkou.

V každém 1x1 km pixelu byla analyzována nasycenost před ročními maximy šestihodinových úhrnů srážek, a to pro šest variant podle průběhu srážkové intenzity. Nasycenost byla vyjádřena nejprve absolutně pomocí API za pět předchozích 24-hodinových úseků (API₅). Následně byla tato hodnota vyjádřena relativně k normálu API₅ pro daný pixel a kalendářní den (tyto normály byly spočteny jako průměry za 20-leté období, průměry byly zhlazeny Gaussovým filtrem). Následně byla takto normovaná hodnota vyjádřena jako kvantil rozdělení těchto hodnot v daném pixelu.

Kruciální otázkou aktivity A2202 byla pravděpodobnost výskytu silných srážek při vysoké nasycenosti povodí. Proto jsme se zaměřili na vysoké kvantily ukazatele API₅. Jako abnormální nasycenost jsme uvažovali hodnoty kvantilů vyšších než 0,95. V úvahu jsme dále brali i kvantily mezi 0,95 a 0,75, ovšem s klesajícím stupněm příslušnosti od 100 % po 0 %. Pro 10 největších z 20 ročních maxim šestihodinových úhrnů srážek s daným průběhem jsme v každém pixelu určili průměrné zastoupení abnormální nasycenosti, které vyjadřuje pravděpodobnost vypadávání takové srážky do abnormálně nasyceného povodí. Aby byl

potlačen nízkofrekvenční šum, byla na závěr pole hodnot v jednotlivých pixelech zhlazena prostorovým Gaussovým filtrem.

Zjištěné hodnoty byly analyzovány z hlediska jejich rozdělení v rámci území Česka, mj. vzhledem k nadmořské výšce. Průměrná pravděpodobnost srážky vysokého šestihodinového úhrnu za abnormální nasycenosti je 20 %, přičemž Pearsonův korelační koeficient mezi touto pravděpodobností v jednotlivých pixelech a jejich nadmořskou výškou je 0,18. Hodnoty se však značně liší pro jednotlivé varianty srážek podle jejich průběhu (Tabulka 2): nejvíce časově koncentrované srážky typu A spadnou do abnormálně nasyceného povodí s průměrnou pravděpodobností 14 %, přičemž korelace s nadmořskou výškou je dokonce záporná. Naopak pro relativně rovnoměrné srážkové události typu F roste průměrná pravděpodobnost abnormální předchozí nasycenosti až na 39 %, s korelačním koeficientem vůči nadmořské výšce 0,23.

Tabulka 2: Průměrné pravděpodobnosti abnormální nasycenosti před šesti variantami vysokých šestihodinových úhrnů srážek rozlišených podle jejich průběhu (průměr přes všechny 1x1 km pixely ČR a pro tři intervaly nadmořských výšek)

Varianta srážky	Celá ČR	< 400 m	400 - 600 m	≥ 600 m
A	14 %	15 %	13 %	12 %
B	17 %	17 %	17 %	18 %
C	21 %	21 %	21 %	22 %
D	27 %	25 %	27 %	29 %
E	30 %	29 %	30 %	33 %
F	39 %	36 %	40 %	43 %

1.3 A2203 – Experimentální měření a hydrologické modelování

1.3.1 Verifikace metody SCS-CN na pozorovaných srážko-odtokových událostech

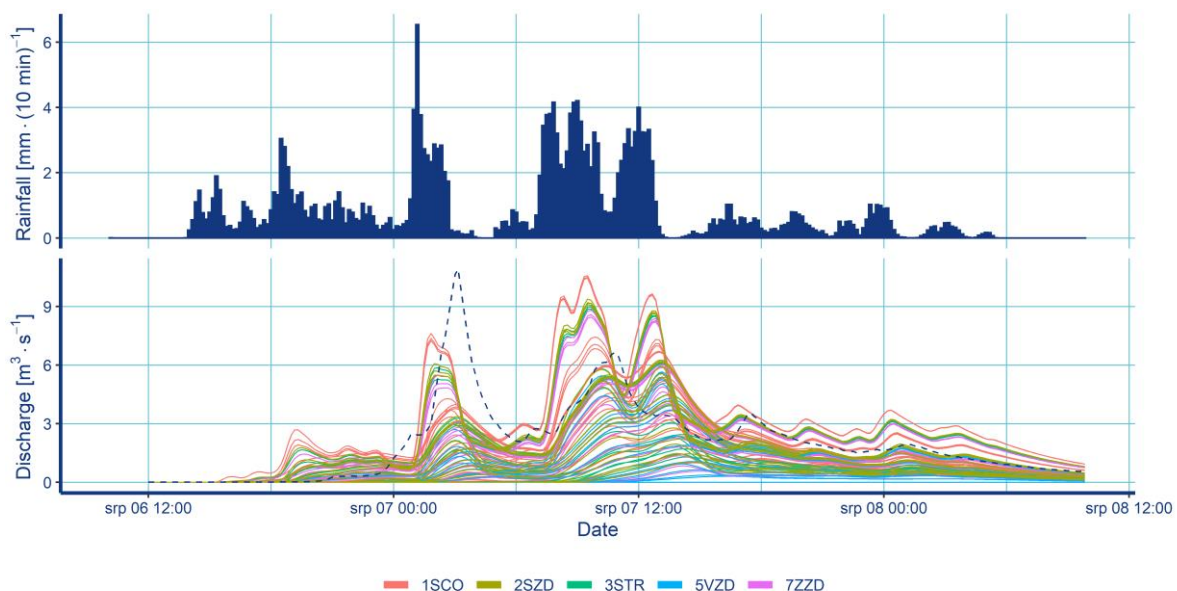
V roce 2023 bylo dokončeno modelování rozsáhlého souboru scénářů pozorovaných srážko-odtokových událostí a analýzou výsledných odtokových charakteristik byly kvantifikovány podíly variability související s jednotlivými parametry modelu a variantami datových vstupů. V souboru datových podkladů pro určení hodnoty CN byly identifikovány podklady, které v průměru vedou k lepší shodě modelů. Podrobné výsledky jsou předmětem vědeckého článku, který je v době uzavření této zprávy odeslán k publikaci v odborném časopise Water Resources Research. Výsledky byly dále promítnuty do nově aktualizované metodiky "Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině 2022". Dále následuje stručný souhrn postupu a výsledků analýz.

Pomocí metody SCS-CN, která je považována za základní metodu při odvozování odtokových charakteristik z malých povodí, bylo dokončeno modelování všech navrhovaných scénářů za

využití srážko-odtokového modelu HEC-HMS dle rozsáhlého souboru scénářů reflektujícího různé varianty vstupních podkladových dat a okrajových podmínek modelu (přehled parametrů scénářů je obsažen v Tabulka 3).

Tabulka 3 Stručný popis parametrů modelovaných scénářů

Povodí	Odvození CN	Předchozí nasycení	Počáteční ztráty	Varianta povodí	Jednotkový hydrogram
1HRU Hruškovice	1SCO HSP dle ČHMÚ (+ Corine Land Cover)	CN1 Nízké	IA10 0,1x maximální potenciální retence	CEL Celistvé	HYCLA Clarkův
2CER Černá Nisa	2SZD HSP dle ČHMÚ (+ ZABAGED)	CN2 Normální	IA20 0,2x maximální potenciální retence	DIS Distribuované	HYSCS SCS
3SPU Spůlka	3STR HSP dle projektu Strategie (+ ZABAGED)	CN3 Vysoké	IA25 0,25x maximální potenciální retence		
4DOB Dobřejevický potok	5VZD HSP dle VÚMOP (+ ZABAGED)				
5PST Pstruhovec	7ZZD HSP dle zrnitostí ČVUT (+ ZABAGED)				



Obrázek 2 Informativní zobrazení rozptylu modelovaných scénářů pro srážko-odtokovou událost ze 7. 8. 2010 v povodí Černé Nisy, scénáře jsou barevně rozlišené podle metody odvození CN, přerušovaná čára zobrazuje vyhodnocený pozorovaný průtok v 10 min kroku

Ve všech vybraných povodích, s výjimkou povodí Černé Nisy, které je díky své velikosti a charakteru uvažováno pouze jako celistvé (90 scénářů, znázornění rozptylu scénářů pro

vybranou událost je na Obrázek 2), byly pro každou událost namodelovány scénáře pro celistvou a pro distribuovanou variantu povodí (celkem 180 scénářů na událost).

Významné odtokové události byly analyzovány a tam kde to bylo možné, byly vyhodnoceny průtoky také v 10 minutovém kroku (v povodí 5PST byla k dispozici jen hodinová data). Podrobný přehled analyzovaných srážko-odtokových událostí je uveden v Tabulka 4. Následně bylo provedeno porovnání simulací (taktéž v 10 min kroku) a pozorovaných odtokových událostí pro jednotlivá povodí. Simulované varianty vybraných významných srážko-odtokových epizod v závěrových profilech malých povodích byly porovnány s pozorováním na základě zvolených charakteristik (objem hydrogramu, kulminační průtok, průtok na 75% kvantilu). Aktivita byla dále zaměřena 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. Hlavním cílem testování modelů bylo zúžení počtu modelovaných scénářů pro návrhovou praxi při využití metody SCS-CN.

Tabulka 4: Vybrané významné srážko-odtokové události a jejich charakteristiky

Povodí	Rok	Čas kulminace	Qmax [m ³ .s ⁻¹]	N-letost [roky]	Objem vlny [1000 m ³]	Odtok. koef. [-]	Typ příčinné srážky	Srážka [mm]
1HRU	2010	2010-06-02 07:50	4,81	10-20	103,1	0,207	trvalé stratiformní	52,2
	2014	2014-09-12 10:00	3,19	5-10	40,3	0,103	trvalé. přechodně i s vnořenou konvekcí	41,0
	2016	2016-07-31 17:50	1,55	2-5	16,2	0,027	intenzivní konvektivní	63,0
2CER	2006	2006-08-07 06:20	3,84	2-5	150,9	0,496	orograficky zesílené intenzivní trvalé	169,2
	2010	2010-08-07 03:10	10,9	50-100	224,2	0,547	trvalé intenzivní s vnořenou konvekcí	226,6
	2013	2013-06-02 11:30	3,77	2-5	169,5	0,721	orograficky zesílené intenzivní trvalé. spojené přechodně i s konvekcí	130,7
3SPU	2002	2002-08-12 09:10	15,0	20-50	524,3	0,270	trvalé a vydatné stratiformní	194,1
	2009	2009-06-28 01:30	5,95	2-5	121,5	0,254	intenzivní konvektivní	47,9
	2010	2010-07-17 22:50	3,93	1-2	63,1	0,086	intenzivní konvektivní	73,2
4DOB	2002	2002-08-12 20:20	5,32	≈20	363,4	0,322	trvalé stratiformní	86,9
	2013	2013-06-02 07:30	16,6	≈100	713,8	0,495	intenzivní trvalé. spojené přechodně i s konvekcí	111,0

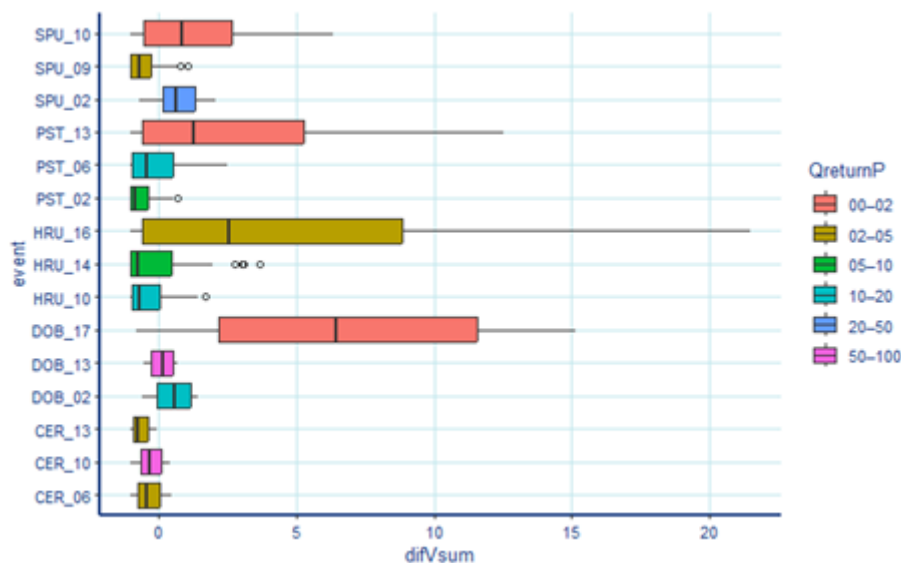
Povodí	Rok	Čas kulminace	Qmax [m ³ .s ⁻¹]	N- letost [roky]	Objem vlny [1000 m ³]	Odtok. koef. [-]	Typ příčinné srážky	Srážka [mm]
	2017	2017-08-11 20:50	0,509	≈1	23,4	0,041	intenzivní trvalé. spojené přechodně i s konvekcí	44,3
5PST	2002	2002-08-13 10:00	1,73	≈10	154,3	0,321	intenzivní trvalé. navíc dvakrát během týdne	75,5
	2006	2006-06-30 00:40	3,39	≈20	119,2	0,180	intenzivní lokální konvektivní	103,9
	2013	2013-06-25 08:30	0,579	≈2	27,5	0,045	intenzivní trvalé	95,6

V prvním kroku byla provedena kvalitativní analýza simulací s nízkou odchylkou pozorovaných objemů a kulminačních průtoků. Obecně byla nalezena dobrá shoda u scénářů, které pracovaly s předchozím stavem nasycení (PN) blízkým tomu, který byl identifikován na základě analýzy předchozího průběhu srážek (pětidenní úhrn a index API30). Ovšem mezi nejlepšími scénáři se nacházely i takové, které pracovaly s výrazně nižším PN oproti očekávanému. Často byly jako nejlepší vyhodnoceny odlišné scénáře v závislosti na charakteristice, pro niž byla shoda určována (objem vs. kulminační průtok). U srážko-odtokových událostí s komplexním průběhem příčinné srážky se ukázalo značně problematické určovat míru shody pro dobu kulminace. Co se týče datových podkladů pro CN, téměř žádný systematický vzor nebyl mezi scénáři s nejlepší shodou nalezen. Pouze scénáře založené na nejstarší vrstvě 1SCO vykazovaly konzistentně nejvyšší hodnoty oproti ostatním podkladům s výjimkou povodí Dobřejovického potoka. Efekt počáteční ztráty IA byl identifikován jako velmi slabý a zastíněný dominantním efektem PS a datového zdroje CN. Typ jednotkového hydrogramu ovlivňuje pouze hodnotu kulminačního průtoky a byly zjištěny konzistentně vyšší hodnoty v případě SCS hydrogramu oproti Clarkovu. Která z metod poskytuje lepší předpovědi nemohlo být určeno ani v případě metody jednotkového hydrogramu, ani v případě výběru struktury modelu (celistvý / distribuovaný), opět kvůli zastínění dominantním efektem PS a zdroje pro CN.

Pro následnou statistickou analýzu byly vybrány 2 indexy shody, jeden pro míru shody pozorovaného objemu (*difVsum*) a druhý pro kulminační průtok (*difQmax*), podle obecného vztahu:

$$difChar = (modChar - obsChar) / obsChar$$

Tyto dva indexy byly předmětem analýzy rozptylu (ANOVA), jejímž cílem bylo rozklíčovat podíl variability vysvětlený jednotlivými proměnnými. Vzhledem k charakteru proměnných a datové sady (nevyvážený dataset s řadou fixních i náhodných proměnných) byla zvolena metoda lineárních mixed-effects modelů. Před samotnou analýzou byly v datovém souboru nalezeny značně odlehle hodnoty s extrémním rozptylem, viz Obrázek 3. Jednalo se o události s nízkou dobou opakování jak příčinné srážky, tak pozorovaného kulminačního průtoky a zpravidla se spíše suchými počátečními podmínkami. Vzhledem k vysoké míře nejistot byly simulace těchto událostí z analýzy rozptylu vyloučeny.



Obrázek 3: Rozložení indexu shody modelovaného objemu pro jednotlivé srážko-odtokové události, barvy podle doby opakování pozorovaného kulminačního průtoku

Sestaveno bylo celkem 33 statistických modelů pro predikci *difVsum* a 55 modelů pro index *difQmax*, vždy od nejjednoduššího nulového modelu po nejkompexnější model uvažující všechny faktory i významné interakce mezi nimi. Byl vyčíslen podíl variability vysvětlené každým modelem (výkon modelu) a srovnáním modelů s příbuznou strukturou byl kvantifikován podíl variability příslušející jednotlivým faktorům. Výsledné hodnoty uvádí tabulky (Tabulka 5 a Tabulka 6).

Tabulka 5: Podíl variability indexu *difVsum* vysvětlený jednotlivými faktory a jejich interakcemi, uvedeny prvky modelu nad 1 %

Faktor	Druh efektu	Vysvětlená variabilita (%)
PN	Fixní, hlavní	42,6
událost	Náhodný, hlavní	26,9
CN (datový zdroj)	Fixní, hlavní	6,9
CN: událost	Náhodný, interakce	6,7
PN: událost	Náhodný, interakce	6,1
IA	Fixní, hlavní	2,5
STR, HYD	<i>Netestováno, irelevantní pro objem odtoku</i>	
Celkem podíl vysvětlené variability		91,7

Kromě faktorů podílejících se na definici scénáře modelu byla testována závislost výkonnosti modelu na charakteristikách srážky (celkový úhrn, maximální intenzita za 1-3-6 hodiin). Tyto charakteristiky jednoznačně žádný podíl variability nevysvětlují, což znamená vyloučení

systematických chyb modelu. Jako nejvýznamnější faktor jak pro predikci objemu, tak kulminace se ukázala předchozí nasycenost, která má na svědomí 43 % variability pro difVsum a 37 % pro difQmax. Poměrně překvapivá se ukázala role druhého nejvýznamnějšího (náhodného) faktoru srážko-odtokové (S-O) události. Tento faktor zahrnuje pravděpodobně vliv fyzikogeografických charakteristik povodí, jako je tvar povodí či hustota říční sítě. Tato hypotéza nemohla být ověřena (respektive test byl statisticky neprůkazný) kvůli nízkému počtu událostí v rámci každého povodí. Významným zdrojem nejistot vyjádřeným náhodným faktorem S-O události jsou odlišné charakteristiky příčinné srážky, jiné než testovaný celkový úhrn a průměrné maximální intenzity. V neposlední řadě může hrát roli i proměnlivost půdního krytu a vegetace. V každém případě však tento faktor zahrnuje řadu faktorů, které metoda CN nezhledňuje a ukazují tak na její limity.

Třetí nejvýznamnější faktor z hlediska podílu vysvětlené variability vychází datový zdroj pro určení CN, respektive hydrologickou půdní skupinu. Oproti prvním dvěma faktorům však vysvětluje již řádově nižší podíl. V případě objemu i kulminačního průtoku hrají významnou roli interakce jednotlivých faktorů. Většinou se jedná o interakce s náhodným faktorem S-O události. Pro tento fenomén lze nalézt vysvětlení v nejistotách ohledně určení předchozího nasycení. To je ve skutečnosti spojitou veličinou, která před každou S-O událostí nabývá unikátní hodnoty. Standardní podoba metody CN však pracuje pouze s diskretními stavy CN1-2-3, pro něž se provádí korekce čísla odtokové křivky. Tyto varianty (stejně jako varianty podle různých datových zdrojů) jsou fixní a identické pro všechny S-O události, což způsobuje proměnlivé odchylky těchto scénářových hodnot od "správné" hodnoty dle skutečného předchozího nasycení.

Tabulka 6: Podíl variability indexu difQmax vysvětlený jednotlivými faktory a jejich interakcemi, uvedeny prvky modelu nad 1 %

Faktor	Druh efektu	Vysvětlená variabilita (%)
PN	Fixní, hlavní	36,5
událost	Náhodný, hlavní	21,6
PN:událost	Náhorný, interakce	10,4
CN:událost	Náhorný, interakce	5,6
CN (datový zdroj)	Fixní, hlavní	4,9
HYD	Fixní, hlavní	3,2
HYD:událost	Náhorný, interakce	2,8
PN:HYD	Fixní, interakce	2,3
PN:CN	Fixní, interakce	1,7
IA	Fixní, hlavní	1,2
Celkem podíl vysvětlené variability		90,2

Analýza variability potvrdila pozorování z předběžných analýz ohledně minimálního významu počáteční ztráty IA. Faktor struktury modelu nepřesáhl ani jedno procento vysvětlené variability. Jeho vliv byl pozorován na kvalitativních aspektech modelovaných hydrogramů, které ale zvolené indexy nepostihovaly. Pozorování z kvalitativní analýzy ohledně faktoru jednotkového hydrogramu potvrdila i analýza variability, která mu v případě indexu shody kulminačního průtoku přisoudila celkem 8 % z celkové variability (při započtení hlavního efektu i interakcí).

Poslední částí analýzy byl kvalitativní rozbor scénářů z hlediska přesnosti predikcí při použití jednotlivých datových podkladů. Pro korektní rozbor nejprve bylo nutné vybrat část simulací s nejlepší shodou, respektive vyloučit scénáře s neodpovídající kombinací modelovaného a zjištěného předchozího nasycení. Pro rozbor byl kromě výše uvedených indexů shody objemu a kulminačního průtoku použit i index shody v Q75 a dva kombinované indexy zohledňující obě charakteristiky v podobě jejich RMS. Konkrétně se jedná o indexy *difVQmax* a *difVQ75*. Pro každý index byly napočteny průměrné a střední (mediánové) hodnoty pro všechny datové zdroje a těm pak určeno pořadí. Přehled pořadí datových podkladů podle všech indexů shody a průměrné pořadí ukazuje Tabulka 7.

Tabulka 7: Datové zdroje pro CN v pořadí podle jednotlivých indexů shody a celkové průměrné pořadí. Uváděno pořadí podle střední hodnoty a mediánu.

Datový zdroj CN	difVsum	difQmax	difQ75	difVQmax	difVQ75	Prům. pořadí
7ZZD	2 / 1	3 / 2	1 / 2	2 / 2	1 / 2	1,8 / 1,8
2SZD	1 / 2	4 / 4	2 / 1	3 / 3	2 / 1	2,4 / 2,2
3STR	3 / 3	1 / 1	3 / 3	1 / 1	3 / 3	2,2 / 2,2
5VZD	4 / 5	2 / 3	4 / 5	4 / 4	4 / 5	3,6 / 4,4
1SCO	5 / 4	5 / 5	5 / 4	5 / 5	5 / 4	5,0 / 4,4

Jako podklady vedoucí k průměrně nejhorší shodě se ukázala původní syntetická vrstva dle ČHMÚ 1SCO a vrstva 5VZD vycházející z HSP dle VÚMOP (2018). Nejlepší predikce naopak v průměru poskytuje vrstva využívající HSP dle půdních zrnitostí, ovšem zde je pořadí s dalšími dvěma podklady relativně těsné a mírně se mění v závislosti na použitém indexu shody a srovnávané charakteristice (medián / průměr). Posledním důležitým zjištěním je značný rozdíl v predikční schopnosti u dvou příbuzných vrstev využívajících metodiku určení HSP dle ČHMÚ, ale odlišná data pro půdní pokryv. Ukazuje se, že vrstva Corine, případně použitý převodník pro přiřazení CN, je oproti půdnímu pokryvu z polohopisu ZABAGED významně méně vhodná a vede k méně přesným predikcím odtokových charakteristik.

1.3.2 Ověření fyzikálního přístupu pro odvození návrhových charakteristik odtoku

V roce 2023 pokračovaly aktivity směřující k většímu nasazení a ověření použitelnosti procesně založených hydrologických modelů SMODERP2D a MikeSHE. Z testování obou modelů v předchozích letech řešení projektu vyplynula potřeba precizace parametrů

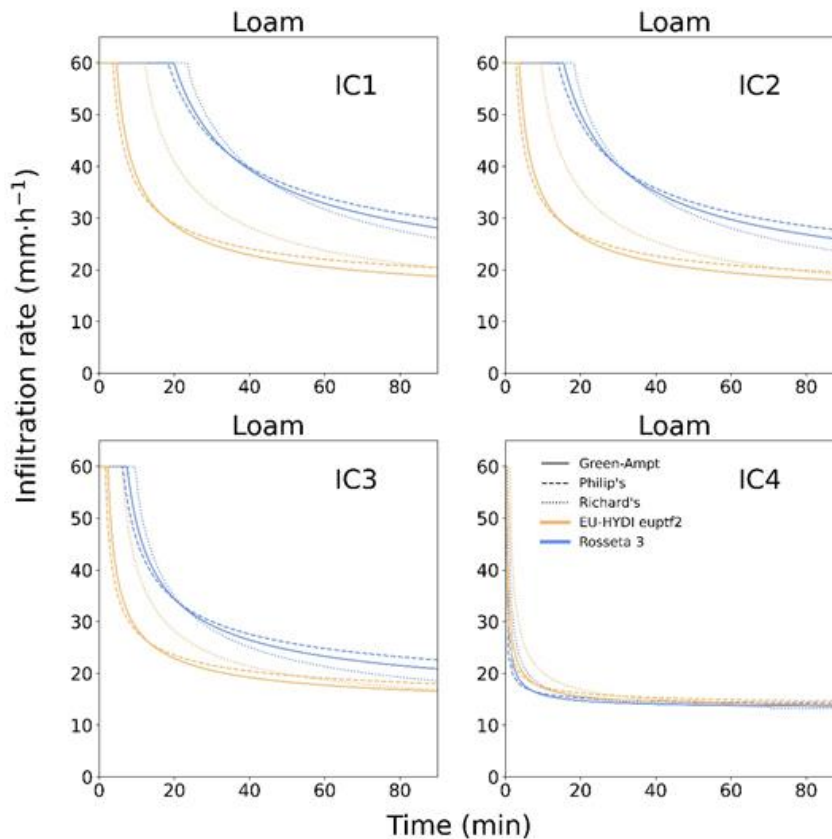
infiltračních rutin a povrchového odtoku. Proto bylo upuštěno od původního záměru do značné míry technicistní kalibrace parametrů na pozorovaných srážko-odtokových událostech a aktivity byly nasměrovány na odvození fyzikálně podložených hodnot parametrů infiltračních rutin a citlivostní analýzu výstupů.

Nasycená hydraulická vodivost K_s

Pro fyzikálně (procesně) založené hydrologické modely se jedná o naprosto klíčový vstup, v naprosté většině studií však není k dispozici její přímo měřená hodnota. Proto je běžný přístup využití pedotransferových funkcí (PTF). Byla provedena rešerše dostupných PTF, jejich nároků na vstupní data a spolehlivostí a vybrána funkce z databáze HYPRES. Ta pracuje s podíly jednotlivých zrnitostních frakcí, obsahem oranické hmoty a objemovou hmotností. Tyto hodnoty byly získány z celorepublikových map Fyzikálních a hydrologických vlastností půd ČR (Beitlerová a kol., 2021). Odvozena byla mapa K_s a pro všech 12 texturních tříd USDA klasifikace byly spočteny průměrné hodnoty i specifické hodnoty pro pozorovaná povodí.

Další parametry pro výpočet infiltrace

Pohyb vody v půdě (tedy i infiltrace) popisuje Richardsova rovnice využívající pro popis půdního prostředí retenční křivku – vztah mezi vlhkostí a tlakem půdní vody. Použití Richardsovy rovnice je značně výpočetně náročné a pro jednoduché hydrologické aplikace nadbytečné, proto jsou v praxi používány některé jednodušší modely, jako je Green&Amptův model (implementováno v MikeSHE) nebo ještě jednodušší Philipova rovnice (využívá Smoderp2D). Nejčastějším modelem pro vyjádření retenční křivky je dle Maulem-van Genuchtena. Parametry tohoto modelu byly získány pro všech 12 zrnitostních tříd z půdních databází Rosetta a EU-HYDI. Integrací křivky relativní hydraulické vodivosti (využívá MvG parametry) dle stupně saturace byly získány hodnoty sacího tlaku na čele zvlhčení pro 4 vybrané počáteční stavy (hydrolimity), což je klíčový vstup pro výpočet infiltrace podle Green&Ampta. Jednodušší Philipova rovnice implementovaná ve Smoderp2D pracuje s parametrem Sorptivity, k němuž neexistuje v literatuře mnoho podkladů s ohledem na potřebu definovat jeho hodnoty v závislosti na počáteční vlhkosti půdy. Proto byly tyto hodnoty získány fitováním na křivky kumulativní i okamžité intenzity infiltrace dle Green&Ampta. Srovnávací testy průběhu infiltrace do hlinité půdy dle jednotlivých modelů (Richards, Green&Ampt a Philip) jsou znázorněny na obrázku (Obrázek 4) a ukazují klíčový vliv volby půdní databáze hydraulických parametrů. Celý komplexní proces odvození parametrů pro běžné infiltrační rutiny je poměrně unikátní a je obsahem připravovaného článku, jeho podání se předpokládá v prvním pololetí po uzavření tohoto projektu.



Obrázek 4: Srovnání průběhu infiltrace dle Richardse, Green&Ampta a Philipa pro čtyři počáteční stavy a dvě sady hydraulických parametrů z databázi Rosetta a EU-HYDI.

Citlivostní analýza a analýza rozptylu

V předchozím projektu QJ1520265 byla provedena rozsáhlá citlivostní analýza fyzikálních modelů MikeSHE a SMODERP2D a identifikovány byly klíčové, a naopak pro celkovou variabilitu výstupů minoritní procesy. Zároveň se ukázaly některé nedostatky ohledně definování scénářů a parametrizací infiltračních rutin. V tomto projektu bylo na předchozí práci navázáno. Při tvorbě scénářů nebyla zátěžová srážka definována napříč povodími s totožnou N-letostí výskytu, ale s identickými úrovněmi srážkové výšky. Procesy intercepce, povrchové retence, povrchového a soustředěného odtoku nebyly řešeny variantně, ale pouze jednou "střední" parametrickou sadou. Definice počátečních stavů a parametrizace infiltračních rutin byly precizovány podle výše uvedeného postupu. Jednotlivé scénáře byly generovány podle následujícího schématu:

POV_HYETmm_SOILDATq_ICX_INF, kde je

- POV – pozorované povodí,
- HYET – typ návrhového hyetogramu A-F,
- mm – úhrn návrhové srážky 30-50-70-90 mm,
- SOILDAT – půdní databáze hydraulických parametrů,
- q – Kvantil K_s ,
- ICX – počáteční podmínky 1–5,
- INF – model pro výpočet infiltrace.

Pro každé z pěti pozorovaných povodí bylo podle výše uvedeného klíče připraveno 1440 scénářů. Všechny byly vypočteny modelem MikeSHE, pro Smoderp2D pak byla vybrána jen reprezentativní sada scénářů kvůli jeho vyšší výpočetní náročnosti. Do konce řešení tohoto projektu byly z vyčíslených scénářů extrahovány charakteristiky odtokových hydrogramů (objem, kulminační průtok aj.), ale nebyla ještě provedena analýza nejistot obdobná té, která byla provedena a výše popsána pro model SCS-CN. Dokončení a publikace výsledků se předpokládá v rámci navazujících činností řešitelů v první polovině roku 2023.

1.4 A2204 – Publikace výsledků projektu a seznamování odborné veřejnosti se závěry projektu

Jednou z náplní aktivity A2204 bylo uspořádání konference, kde byla odborná veřejnost seznámena s výsledky projektu. Konference "Variabilita krátkodobých srážek v hydrologickém modelování" se uskutečnila 13. 10. 2022 na Stavební fakultě ČVUT v Praze. Účastníci konference byli seznámeni s výsledky čtyřletého projektu formou prezentací řešitelů ze všech zapojených pracovišť. Představena byla teoretická část v rovině návrhových srážek a jejich odvození, i aplikace výsledků do konkrétních návrhů. Program konference a seznam účastníků je přiložen k závěrečné zprávě projektu. Prezentace je možné stáhnout na stránkách projektu, kde jsou veřejně dostupné (<https://rain.fsv.cvut.cz/konference/>).

Dalším z hlavních výstupů projektu je certifikovaná metodika, která nahrazuje původní metodiku „Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině“ (Kavka, 2018). Inovovaná metodika je certifikovaná Státním pozemkovým úřadem.

Prostorová výsledná data návrhových srážek a malých povodí jsou poskytována v podobě dvou certifikovaných map. Dostupnost dat je zajištěna formou webových služeb pomocí inovativního SW.

Odborná vědeckovýzkumná komunita byla dále seznamována s výsledky projektu formou příspěvků na odborných konferencích a v odborných časopisech dle plánu jednotlivých zapojených pracovišť.

2 Dosažené výsledky

V návrhu projektu je uvedeno celkem patnáct závazných výsledků (Tabulka 8) a zároveň byla publikována řada dalších výstupů (Tabulka 9). V následující části jsou popsány vybrané výsledky, v tabulkách jsou označeny šedě.

Publikaci průběhu řešení a výsledkům projektu jsou věnovány odborné články. Aplikačními výsledky je metodika využití návrhových srážek pro hydrologické modelování návrhů opatření v ploše povodí, dále pak dvě certifikované mapy a software, který umožňuje přístup k datům návrhových srážek.

Tabulka 8: Závazné výsledky projektu QK1910029

Identifikační číslo	Název	Druh výsledku
QK1910029-V1	Průběžná zpráva za první rok řešení	O
QK1910029-V2	Představení principů řešeného projektu na odborné konferenci	O
QK1910029-V3	Průběžná zpráva za rok 2020	O
QK1910029-V4	Kategorizace povodí	Jimp
QK1910029-V5	Průběžná zpráva za rok 2021	O
QK1910029-V6	Výřezový článek do českého periodika zaměřeného na hydrologii	Jost
QK1910029-V7	Souhrnný článek o výsledcích projektu do českého časopisu	Jost
QK1910029-V8	Konference zabývající se primárně zdroji nejistot v hydrologickém modelování	M
QK1910029-V9	Webové processingové služby poskytující charakter návrhové srážky podle lokality a zvolené doby opakování	R
QK1910029-V10	Závěrečná zpráva z projektu	O
QK1910029-V11	Mapa kategorizovaných malých povodí	Nmap
QK1910029-V12	Mapa výskytu typických průběhů srážek ve vazbě na předchozí úhrny srážek či retenci území	Nmap
QK1910029-V13	Odborný článek na téma návrhových srážek	Jimp
QK1910029-V14	Článek popisující nejistoty v hydrologickém modelování	Jimp
QK1910029-V15	Metodika pro využití návrhových srážek a návrhových stavů pro odvození odtokových charakteristik	NmetS

Nad rámec návrhu projektu bylo publikováno 19 dalších výsledků (Tabulka 9).

Tabulka 9: Další výsledky projektu QK1910029

Identifikační číslo	Název	Druh	Termín dosažení
QK1910029-V16	Radar-derived climatology of precipitation intensities in Czechia: improvement due to daily totals from rain gauges	O	09/2019
QK1910029-V17	Spatial analysis of sub-daily rainfall time structure variability	O	06/2019
QK1910029-V18	Analysis of precipitation intensity in the Czech Republic - past and present	O	06/2019
QK1910029-V19	Sub-daily precipitation intensity: Comparison of statistics based on regular measurement and running time intervals	O	09/2019
QK1910029-V21	Categorization of small catchments for modeling the precipitation response	O	05/2020
QK1910029-V22	Swiping/pulse portable nozzle rainfall simulator	O	05/2020
QK1910029-V23	Prostorová variabilita průběhů subdenních srážek v ČR	O	09/2021
QK1910029-V24	Swinging-Pulse Sprinkling Head for Rain Simulators	Jimp	05/2021
QK1910029-V25	Rainfall simulation experiments in vineyards comparing two different plot scales	O	05/2021
QK1910029-V26	Definition of Headwater Catchment Boundaries	O	12/2021
QK1910029-V27	Spatial analysis of the variability in the short term rainfall time structure	O	09/2022
QK1910029-V28	Estimation of precipitation preceding precipitation extremes of different lengths	O	09/2022
QK1910029-V29	Nasycenost povodí před silnými srážkami a povodněmi v Česku	O	09/2022
QK1910029-V30	Malá zdrojová povodí – jejich prostorové vymezení a klasifikace z hlediska rizika ohrožení rychlým odtokem	Jost	01/2023
QK1910029-V31	Měření a vyhodnocení krátkodobých srážek v horských a vyšších polohách	O	05/2022
QK1910029-V32	Short-term rainfall characteristics dependence on the length of processed period	O	09/2022
QK1910029-V33	Effect of plot size and precipitation magnitudes on the activation of soil erosion processes using simulated rainfall experiments in vineyards	Jimp	09/2022
QK1910029-V34	Frontiers 2022 - Variability of surface runoff processes at plot, field block and catchment scales	O	02/2022
QK1910029-V35	Hydrologické skupiny půd – rozevřené nůžky hydrologických výpočtů	Jost	09/2022

V době podání této zprávy jsou do recenzního řízení zaslány dvě další publikace v kategorii Jimp vzniklé v souvislosti s řešením projektu. První s názvem „Influence of input data on the hydrologic response of SCS-CN method calibrated on observed data from small catchments“ navazuje na aktivity spojené s hydrologickým modelováním a verifikací modelů na pozorovaných datech. Druhým je pak článek „Classification of Small Watersheds in Czechia for Assessment of Hydrological Response Uncertainty“ zasláný do časopisu Journal of Maps“, který je zaměřen na kartografické vyjádření charakteristik povodí.

2.1 Metodika pro využití návrhových srážek a návrhových stavů pro odvození odtokových charakteristik (V15)

Metodika "Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině 2022" navazuje na předchozí metodiku z roku 2019, která byla vytvořena v rámci projektu NAZV QJ1520265 řešeného v letech 2015-2017. Zásadní inovativní přístup této nové metodiky spočívá v odvození návrhových šestihodinových úhrnů srážek na základě kombinace dvacetileté řady adjustovaných radarových měření a třiceti a víceletých řad ze srážkoměrů. Druhou důležitou inovací je stanovení pravděpodobností výskytu šesti průběhů srážek v kombinaci s vyjádřením možného výskytu zvýšeného předchozího nasycení.

V této metodice je představen způsob získání návrhových parametrů pro navrhování vodohospodářských opatření v krajině a na drobných vodních tocích. Jsou zde popsány hydrologické modely – nástroje pro získání návrhových dat včetně popisu využití srážkových a dalších vstupních dat. Vhodně navržené prvky tvoří funkční systém z hlediska ovlivnění vody v krajině a v síti vodních toků. Hlavní část, kap 2.1, je věnována typům vodohospodářských opatření v krajině, navazující kapitola 2.2 popisuje hydrologické modely a limity jejich využití. Dále tato kapitola obsahuje komentáře k nejčastěji využívaným modelům v ČR. Klíčová kapitola 2.3 obsahuje popis návrhových srážek a jejich variabilitu z hlediska zastoupení tvarů hyetogramů v kombinaci s uvažovaným stupněm nasycení. Vedle srážkových dat jsou k navrhování klíčová další vstupní data, jejich dostupnost je popsána v navazující kapitole (2.4). Metodickou částí je pak kapitola 2.5, která obsahuje postup zpracování návrhu při zahrnutí variability srážek. Na tuto kapitolu navazuje zpracování typových úloh. Kapitola 3 popisuje teoretické základy, na který je odvozena návodná část (kap. 2).

Navrhovaná opatření mimo jiné slouží k ochraně půdního fondu jako protierozní opatření, anebo k retenci či bezpečnému převádění povodňových průtoků. Realizována mohou být například v rámci komplexních pozemkových úprav. Vodohospodářské stavby v ploše povodí a na drobných tocích jsou podporovány mnohými dotačními tituly (MZe, MŽP, AOPK atp.).

Metodika má sloužit jako návod pro navrhování vodohospodářských opatření v ploše povodí a na drobných vodních tocích. Hlavním nástrojem těchto návrhů je hydrologické modelování. Nevhodná volba modelu a vstupních dat, zejména srážek a jejich časového průběhu, může způsobit nedostačenou účinnost opatření anebo jejich předimenzování. Metodika je pomocníkem pro správnou volbu modelu, návrhových srážek a pro účelné navrhování vodohospodářských staveb v České republice.

Metodika je koncipována jako aplikovatelný dokument, v přílohách jsou proto publikované přehledové mapy návrhových srážek a pravděpodobnosti zastoupení tvarů hyetogramů včetně pravděpodobné nasycenosti v ČR. Zdrojem map v přílohách je certifikovaná mapa s názvem „Návrhové šestihodinové srážky pro doby opakování 2–100 let a prostorové zastoupení tvarů srážek“, která je popsána dále. Pro maximálně efektivní využití metodiky je vhodné využít software – processingové služby (popsáno dále) – dostupné z portálu rain.fsv.cvut.cz. Tyto služby jsou postaveny na otevřených (OpenSource) platformách (QGIS a Gisquick).

2.2 Mapa výskytu typických průběhů srážek ve vazbě na předchozí úhrny srážek či retenci území (V12)

Mapa "Návrhové šestihodinové srážky pro doby opakování 2 – 100 let a prostorové zastoupení tvarů" představuje lokální odhady návrhových šestihodinových úhrnů srážek s dobou opakování 2, 5, 10, 20, 50 a 100 roků. Vedle velikostí úhrnů jsou prezentovány i očekávané průběhy srážkové intenzity během nich, a to pomocí procentuálního zastoupení šesti syntetických hyetogramů odvozených ze skutečných srážkových událostí. Pro každý z nich jsou rovněž uvedeny parciální pravděpodobnosti jejich výskytu při abnormální nasycenosti povodí. Zpracování mapy bylo s prostorovým rozlišením 1 km s využitím adjustovaných radarových dat a staničních měření krátkodobých intenzit srážek. Tato mapa nahrazuje výsledek projektu „Klasifikace povodí 4. řádu a návrhové krátkodobé deště“ RIV/68407700:21110/17:00318386, který vznikl v rámci projektu NAZV QJ152026 – „Vliv variability krátkodobých srážek a následného odtoku v malých povodích České republiky na hospodaření s vodou v krajině“.

Daty ze srážkoměrů adjustovaná radarová data, charakterizovaná vysokým prostorovým rozlišením, umožnila plně využít robustnost aplikovaných progresivních metod regionální frekvenční analýzy při odhadu velikosti návrhových úhrnů srážek a jejich průběhů. Tyto metody významně redukuje nejistotu v odhadech, která je zčásti dána omezenou délkou dostupných radarových měření (20 roků). Ucelený podrobný popis aplikace těchto metod lze nalézt v práci Kašpar a kol. (2021). Z adjustovaných radarových dat odvozené velikosti návrhových úhrnů byly dále lokálně zpřesněny kombinací s bodovou frekvenční analýzou časových řad srážkových intenzit naměřených pomocí ombrografů a automatických srážkoměrů na šedesáti meteorologických stanicích s dobou měření minimálně 30 let.

Mapu certifikoval Státní pozemkový úřad. Přístup k výsledku je umožněn širší odborné veřejnosti formou WMS a WPS služby na stránkách projektu <https://rain.fsv.cvut.cz/>.

2.3 Software – webové nástroje poskytující charakter návrhové srážky podle lokality a zvolené doby opakování (V9)

Software s názvem HydroRAIN nabízí zpracování dat návrhových srážek. Mimo samotnou intenzitu srážky se jedná také o poskytování informací o zastoupení jednotlivých tvarů hyetogramů a k nim příslušný stav počátečního nasycení. HydroRAIN poskytuje datové výsledky projektu, které jsou obsahem certifikované mapy (V12), a předzpracovává je uživatelům v souladu s metodikou (V15).

Přínosem a cílem software je poskytovat předzpracovaná data pro konkrétní uživatelsky definované zájmové území, proto je koncipován jako webové služby. SW služby jsou zároveň popsány na webovém portálu rain.fsv.cvut.cz a jsou dostupné také v prostředí open source GIS (QGIS). Především se jedná o nástroje poskytující typické průběhy intenzit a pravděpodobnosti výskytu šestihodinových návrhových srážek včetně jejich počátečního nasycení a odhady návrhových úhrnů s různou délkou trvání deště a dobou opakování 2–100 let.

Vedle služeb poskytujících informace o návrhových srážkách jsou pro uživatele bez přístupu ke GIS aplikacím jsou součástí SW dvě vytvořené webové služby. Ty slouží k poskytování srážkových dat pro povodí IV. řádu (HydroRAIN_6h) a pro výpočet objemu odtoku pomocí

metody CN se zohledněním stavu předchozího nasycení (HydroRAIN_CN) v souladu s postupem pospaným v metodice.

HydroRAIN_6h

Tato aplikace poskytuje soubor dat návrhových srážek pro povodí IV. řádu. Data jsou zpracována pro povodí s plochou větší než 1 km². Plochy menších povodí IV. řádu byly sloučeny s okolními povodími. Aplikace je zacílená na využití srážkových dat pro výpočet hydrologické odezvy na příčinnou srážku pomocí metody SCS-CN se zohledněním zastoupení jednotlivých tvarů a stavu počátečního nasycení qAPI.

HydroRAIN_CN

Tato aplikace poskytuje výpočet objemu přímého odtoku pomocí metody SCS-CN se zohledněním zastoupení jednotlivých tvarů tak, jak je uvedeno v metodice. Zpřístupněná je rovněž na portálu rain.fsv.cvut.cz.

2.4 Odborný článek na téma návrhových srážek (V13)

Článek „High-resolution spatial analysis of the variability in the subdaily rainfall time structure“ popisuje původní metodu frekvenční analýzy adjustovaných radarových dat použitou při řešení projektu a představuje výsledky aplikace metody pro území Česka. Výsledky zahrnují návrhové subdenní úhrny srážek ve vysokém prostorovém rozlišení, jejich pravděpodobnost výskytu pro typické průběhy srážkových intenzit a analýzu prostorové variability pravděpodobnosti v závislosti na základních topografických parametrech a cirkulačních příčinách, které jsou též odpovědné za předchozí nasycení zasažených povodí.

Výsledek je veřejně přístupný pro objednavatele ve formě odborného článku v mezinárodním impaktovaném časopise, příp. online na adrese vydavatele.

2.5 Článek popisující nejistoty v hydrologickém modelování (V14)

Odborný článek „SMODERP2D—Sheet and Rill Runoff Routine Validation at Three Scale Levels“ popisuje nejistoty v kalibrování fyzikálně založených modelů na základě měření ve třech měřítkách. Zabývá se nejistotami v popisu a kalibraci parametrů infiltračních rutin, drsností ovlivňující dynamiku povrchového odtoku a limitními rychlostmi, které mají dopad na vznik soustředěného odtoku. V článku jsou využita data z dlouhodobého monitoringu v povodí Býkovického potoka, jehož provoz a infrastruktura byly v podporovány z tohoto projektu.

V příspěvku je popsána důležitost kalibrace infiltračních rutin modelu a jejich vliv na formování odtoku. Kalibrace infiltračních rutin je provedena na měřítku plochy 8x2m, která byla zadešťována pomocí simulátoru deště. Verifikace rutin plošného odtoku byla provedena na odezvě z přirozených srážek na měřítku ploch 22x2 m. Posledním kalibrovaným parametrem v měřítku pozemků byla hodnota limitní rychlosti pro vznik soustředěného odtoku na základě detekce erozních rýh. Článek je dostupný formou open access. <https://doi.org/10.3390/w14030327>.

2.6 Hydrologické skupiny půd – rozevřené nůžky hydrologických výpočtů (V35)

Jedná se o výsledek popisující současnou datovou základnu půdních dat v ČR s dopadem na validitu výsledků hydrologických modelů. Vzhledem k rozsahu byl článek rozdělen na dva samostatné články, které vyšly v číslech 6/2022 a 9/2022 časopisu Vodní hospodářství (Strouhal a Kavka, 2022 a, b). Zde jsou popsány společně.

První článek představuje historický vývoj metod a datových podkladů pro stanovení hydrologických skupin půd (HSP) v zahraničí i na našem území. HSP jsou využívány mj. pro určení charakteristik odtoku, zejména pomocí metody SCS-CN. Tato metoda je určena pro výpočty odtoku a návrh vodohospodářských opatření v ploše povodí nebo na drobných tocích v malých povodích. Příspěvek shrnuje datové podklady a způsoby odvození tří stávajících map HSP jak na zemědělské, tak na lesní půdě, a jedné syntetické mapy CN, které jsou k dispozici v měřítku celé České republiky.

Navazující článek kvantifikuje rozdíly mezi popsány datovými podklady nejprve v úrovni celého území ČR a poté v případové studii 7 malých povodí. Na úrovni ČR v průměru nejlépe propustné půdy vykazuje mapa HSP z projektu *“Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice”* (Drbal a kol., 2016) a v průměru nejhůře propustné mapa HSP odvozená na základě zrnitosti půdy (Beitlerová a kol., 2021). V podrobnějším měřítku je vyčíslen dopad zjištěné variability na výpočet objemu přímého odtoku metodou SCS-CN. Příklad výpočtu objemu odtoku ze srážky s úhrnem 50 mm ukazuje značnou variabilitu výsledné návrhové veličiny v řádu desítek procent (v některých případech se výsledky liší i několikanásobně) a prokazuje kritickou úlohu volby půdního datového podkladu.

2.7 Mapa kategorizovaných malých povodí (V11)

Mapa byla certifikována pod názvem "Prostorové vymezení malých horních povodí a jejich klasifikace z hlediska ohroženosti rychlým odtokem". Představuje vymezení malých zdrojových povodí do velikosti 5 km², která lze považovat za primární a na kterých je formován odtok. Kromě vymezení těchto povodí mapa představuje jejich zařazení z hlediska rizika možného vzniku rychlého odtoku.

Novost mapy spočívá ve vlastním vymezení horních povodí na základě DMR 4G, vodních toků a vodních nádrží a jejich následné klasifikaci z hlediska ohrožení rychlým odtokem. Vymezována byla povodí v několika třídách do velikosti 5 km². Tato velikost odpovídá maximální ploše povodí, pro kterou předpokládá TNV 75 2102 – úprava potoků z roku 2010, možnost využít modelování.

Mapu certifikoval Státní pozemkový úřad. Přístup k výsledku je umožněn širší odborné veřejnosti formou WPS služby na stránkách projektu <https://rain.fsv.cvut.cz/>. (https://rain1.fsv.cvut.cz/?PROJECT=rain/small_catchment/webapp).

Postup odvození mapy a klasifikace rizika vzniku rychlého odtoku je detailně popsána v impaktovém článku „Spatial Delimitation of Small Headwater Catchments and Their Classification in Terms of Runoff Risks“ (Kavka, 2021) – výsledek projektu č. V4.

3 Využití nákladů za jednotlivé příjemce

PRO PUBLIKACI NA WEBU ODSTRANĚNO

4 Uskutečněné zahraniční cesty

PRO PUBLIKACI NA WEBU ODSTRANĚNO

5 Řešitelský tým

V této zprávě jsou komentovány pouze změny v řešitelském kolektivu za poslední rok řešení.

ČHMÚ

Složení řešitelského týmu ČHMÚ v roce 2022 bylo shodné s plánem dle návrhu projektu.

ÚFA

Složení řešitelského týmu se v roce 2022 částečně změnilo a celkový pracovní úvazek se nepatrně snížil. Tým plánovaně opustil RNDr. Petr Zacharov, Ph.D. Výše úvazků ostatních členů týmu zůstala oproti roku 2021 nezměněná. Reagovali jsme tím na snížení celkového úvazku plánovaného v návrhu projektu a na odbornou náplň aktivit v posledním roce řešení.

ČVUT

Na pracovišti ČVUT v Praze se na řešení projektu podíleli pracovníci z Katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství. Klíčové osoby ve složení Kavka, Strouhal, Neumann byli do projektu zapojeni po celou dobu řešení. Roman Kubínová do svého odchodu na mateřskou a následnou rodičovskou dovolenou 5/22. Do řešení v posledním roce se formálně nezapojil prof. Jiří Cajthaml, který se podílel na kartografických výstupech. Činnostmi na kartografických výstupech se zabýval bez finančních nároků. Dále byl stejně jako v roce 2020 zapojen Jan-František Kubát na aktivity spojené s prací v terénu a následnou analýzu vzorků a GIS analýzy a předzpracování dat. Po návratu z rodičovské dovolené byla do týmu zapojena opět Lenka Weyskrabová, její náplní bylo zpracování dat a jejich analýza.

Sweco Hydroprojekt, a.s.

Za společnost Sweco Hydroprojekt a.s. se na řešení projektu podíleli pouze kmenoví zaměstnanci. Kromě klíčových osob ve složení Martin Pavel, Martin Stehlík a Libor Sychra se na projektu dále podíleli na pozicích technických pracovníků (další osoby podílející se na řešení) Ing. Lucie Frelichová (Brožová), Ing. Jiří Bohůnek a Ing. Jaroslav Blažek.

6 Hodnocení průběhu řešení

Cílem projektu bylo zkvalitnit datovou základnu pro využití hydrologických modelů využívaných při odvozování veličin nutných pro návrh vodohospodářských opatření na drobných vodních tocích a v ploše povodí. Kombinací radarových a staničních dat byly odvozeny návrhové šestihodinové intenzity deště v ČR. Včetně zastoupení tvarů a v návaznosti na analýzy předchozí nasycenosti i počáteční podmínky. Zároveň s tím byly analyzovány další nejistoty dané různými přístupy k hydrologickému modelování a různé datové základně. Jednotlivé dílčí aktivity byly v začátku řešení projektu zpracovávány odděleně a v posledním roce došlo k jejich propojení.

Za jednotlivá pracoviště řešitelé z ČHMÚ pokračovali v pracích na hydrologickém modelování pozorovaných průtokových epizod na malých povodích. Pracoviště ÚFA spolupracovalo na dokončení odhadů návrhových hodnot srážek, zastoupení jednotlivých tvarů a z radarových dat také na kvantifikaci stavu počátečního nasycení. ČVUT v Praze pokračovalo ve spolupráci s ČHMÚ v aktivitách hydrologického modelování. Byla provedena analýza půdních dat, která jsou také významným zdrojem nejistot. Společně se SWECO Hydroprojekt, a.s. byly na případových studiích testovány dopady variability srážek na projektování staveb. Řešitelský tým ČVUT pokračoval ve výzkumu odtoku z experimentálních ploch a malých povodí. Společné výsledky projektu navázaly na úzkou spolupráci mezi jednotlivými pracovišti. ČHMÚ a ÚFA při zpracování srážkových dat, ČVUT v Praze a ČHMÚ na poli výběru hydrologických modelů a měřených dat pro jejich ověřování, ČVUT v Praze a SWECO Hydroprojekt a.s. byla spolupráce zaměřena především na klasifikaci malých povodí a na aplikaci výsledků v praxi.

Výsledná spolupráce dala vzniknout nejzásadnějším výsledkům projektu, kterými jsou zpracování dat návrhových srážek. Data se podařilo zpracovat na unikátní dvacetileté řadě srážkových radarů a staničních měření. Výsledkem je specializovaná mapa návrhových srážek včetně zastoupení tvarů hyetogramů a stavu počátečního nasycení. Zpracování a využití tohoto širokého spektra vstupních dat pro hydrologické modelování s následnou aplikací do návrhu opatření v krajině je shrnuté do dalšího klíčového výsledku – metodiky. Výsledky jsou dále zpřístupněny díky vyvinutému SW – online nástroji, případně QGIS nástroji, pro poskytování a předzpracování dat. Společným výsledkem celého řešitelského kolektivu bylo také seznámení odborné veřejnosti formou konference. Pro odbornou komunitu byly prezentovány výsledky v odborných článcích, a to jak v českém prostředí, tak na mezinárodním poli.

Citlivost hydrologických modelů na vstupní data, ověření validity výsledků získaných pomocí hydrologických modelů bylo druhou hlavní náplní řešeného projektu. Modely byly hodnoceny jak z pohledu využití návrhových srážek, tak na základě ověření pozorovaných odtoků na malých povodích s delší časovou řadou.

Z hlediska aplikace hydrologického modelování byla v rámci řešeného projektu odvozena horní zdrojová povodí do velikosti 5km². Tedy takových povodí, v kterých je hydrologické modelování navázané na subdenní průběhy srážek klíčové pro získání návrhových charakteristik.

Kromě celkových patnácti plánovaných výsledků bylo v souvislosti s řešením projektu dosaženo dalších devatenácti výsledků. Z toho dva články v kategorii Jimp a dva články v kategorii Jost.

Hodnocení průběhu řešení je dále popsáno za jednotlivá pracoviště a dále podle struktury cílů projektu.

6.1 Shrnutí aktivit za jednotlivá pracoviště

ČHMÚ

Řešitelský tým ČHMÚ se zabýval především činnostmi spojenými s aktivitami A2203. Ve spolupráci s týmem ČVUT byly modelovány scénáře simulací průtokových vln na malých povodích. Pomocí metody SCS-CN bylo dokončeno modelování všech navrhovaných scénářů za využití srážko-odtokového modelu HEC-HMS dle rozsáhlého souboru scénářů reflektující různé varianty vstupních podkladových dat a okrajových podmínek modelu. Výsledky byly podrobně analyzovány vzhledem k pozorovaným průtokům. V roce 2022 byl v časopisu Meteorologické zprávy publikován článek Crhová et al. (2022) shrnující provedená zpracování staničních dat srážkových intenzit (výsledek QK1910029-V7).

ÚFA

Řešitelský tým ÚFA se zabýval činnostmi spojenými s aktivitami A2201, kde spolupracoval s týmem ČHMÚ na přípravě podkladů ze staničních dat, a A2202, kde využil datových výstupů ČHMÚ a konzultoval s týmem ČVUT některé aplikované metodické postupy.

V rámci aktivity A2201 byly prodlouženy vstupní časové řady adjustovaných radarových dat o bezmrazová období 2019 až 2021 a z nich opětovně odhadnuty velikosti návrhových úhrnů srážek pro požadované délky trvání a doby opakování. Pro délku trvání 6 hod. byla navíc opětovně odhadnuta zastoupení (pravděpodobnosti výskytu) šesti, pro území ČR typických variant srážkových událostí podle průběhu srážkové intenzity v závislosti na době opakování úhrnu. Při odvozování charakteristik návrhových srážek byly použity pokročilé a v průběhu řešení ověřené metody regionální frekvenční analýzy. Poté bylo přistoupeno ke zpřesnění návrhových úhrnů srážek z adjustovaných radarových dat návrhovými úhrny ze staničních měření. Na základě výsledků testovacích studií z předchozího roku řešení, bylo rozhodnuto kombinovat velikosti návrhových úhrnů z obou typů dat prostřednictvím interpolace diferencí. Výsledky hodnocení prostorové variability získaných charakteristik návrhových srážek na území ČR podpořily obecnou validitu použitých postupů.

V rámci aktivity A2202 byly nejprve testovány metody vyjádření nasycenosti povodí pomocí předchozích srážek, a to na řadách ročních maxim šestihodinových úhrnů srážek z 60 stanic ČHMÚ od roku 1961. Následně byla zvolená metodika aplikována na obdobná maxima určená plošně v celém Česku pomocí adjustovaných radarových dat z období 2002–2021. Pro absolutní roční maxima i maxima v šesti variantách podle průběhu srážkové intenzity byly vyjádřeny velikosti relativní nasycenosti, z nich pak byly pro každou variantu odvozeny pravděpodobnosti vypadávání takové srážky do abnormálně nasyceného povodí.

ČVUT v Praze

Řešitelský tým ČVUT v Praze po odborné stránce pokračoval ve spolupráci s ČHMÚ v aktivitách hydrologického modelování. Byla dokončena analýza půdních dat, která jsou také významným zdrojem nejistot. S touto aktivitou nebylo při přípravě projektu počítáno, ale je natolik zásadní, že bylo třeba zevrubnou analýzu půdních dat provést. Aktivity spojené

s modelováním jsou na ČVUT zaměřeny především na fyzikální modely. Na pracovišti ČVUT v Praze pokračoval experimentální výzkum odtoku na elementárních plochách pomocí dešťového simulátoru. Dále byl zajišťován a rozvíjen dlouhodobý monitoring srážkoodtokových vztahů na experimentálním povodí Býkovice. Historická data monitoringu na tomto zájmovém území byla využita pro validaci modelu SMODERP, které byly součástí výsledku V14 – Článek popisující nejistoty v hydrologickém modelování (Jimp). Členy pracoviště byla dokončena aktivita kategorizace malých povodí a finalizována do výsledku V11 – Mapa kategorizovaných malých povodí (Nmap).

Dále pak byla náplní příprava a zpracování SW (V9), který poskytuje předzpracovaná data návrhových srážek pro využití v hydrologických modelech, zejména pomocí metody CN.

V neposlední řadě je část aktivit pracoviště věnována koordinaci celého řešitelského kolektivu a také byla část aktivit věnována koordinaci uspořádané konference, která proběhla na půdě ČVUT.

Sweco Hydroprojekt, a.s.

Sweco Hydroprojekt a.s. se ve svých aktivitách zabývalo praktickou aplikací výzkumu. Návrhové srážky podle metodiky projektu byly použity v rámci studií odtokových poměrů pro povodí Bakovského potoka (území Slánsko – Velvarsko) a povodí Kocáby (ORP Příbram, Dobříš, Černošice). Návrhové srážky s dobou opakování 5, 20 a 100 let byly vstupem pro modelování povodňových vln programem HEC-HMS v profilech tzv. kritických bodů. Na základě hydrologických modelů byl kvantifikován efekt navrhovaných přírodně blízkých protipovodňových opatření. Postupy modelování podle metodiky byly testovány také např. na lokalitách v povodí Berounky. Podle metodiky byly posuzovány prvky opatření retenční i odváděcí. Vhodný přístup byl prezentován na konferenci k projektu a je zohledněn také při sestavení finální podoby metodiky připravené k certifikaci.

6.2 Zhodnocení průběhu řešení za jednotlivé cíle projektu

6.2.1 C001 Seznamování odborné veřejnosti s postupem prací a výsledky

Výsledkem tohoto dílčího cíle bylo poskytnutí výsledků odborné veřejnosti a organizačním složkám státu přístupnou formou. Tento cíl neměl primárně samostatnou expertní část, jeho hlavní náplní bylo propojení výsledků ostatních dílčích cílů a poskytování aplikovaných výsledků. Do těchto výsledků lze zahrnout především prezentace a publikace odborných map, poskytování mapových služeb, uspořádání odborné konference a vydání metodiky. Dále je pak součástí cíle také seznamování odborné veřejnosti s dílčími výsledky projektu formou odborných článků.

Tyto výsledky jsou detailně popsány v kapitole 2 – dosažené výsledky, kromě výsledku M – uspořádání konference. Ta se pod názvem "Variabilita krátkodobých srážek v hydrologickém modelování" uskutečnila 13. 10. 2022 na Stavební fakultě ČVUT v Praze. Účastníci konference byli seznámeni s aktuálními výsledky projektu formou prezentací řešitelů ze všech zapojených pracovišť. Prezentace jsou dostupné na stránkách projektu (<https://rain.fsv.cvut.cz/konference/>).

Vedle těchto společných výstupů zúčastněných institucí pracovníci z ČHMÚ seznámili odbornou veřejnost s postupem prací a dílčími výsledky projektu v článku z kategorie Jost (Crhová a kol., 2021; výsledek V7) a v prezentacích na celkem 3 mezinárodních a jedné tuzemské konferenci (zkrácené ID odpovídajícího výsledku je uvedené v závorce):

- 14th International Meeting on Statistical Climatology, 24-28 June, Toulouse, France (V18),
- EMS Annual Meeting 2019, 9.-13. 9. 2019, Copenhagen, Dánsko (V19),
- Meteorologické konference Jizerka 2022, 17. – 19. 5. 2022, Jizerka v Jizerských horách (V31),
- EMS Annual Meeting 2022, 4.–9. 9. 2022, Bonn, Německo. (V32).

Vyjma společných výstupů zúčastněných institucí pracovníci z ÚFA AV ČR, v. v. i. seznámili odbornou veřejnost s postupem prací a dílčími výsledky projektu v článku z kategorie Jimp (Kašpar a kol., 2021; V13:) a v prezentacích na celkem 4 mezinárodních a 2 tuzemských konferencích:

- 39th International Conference on Radar Meteorology, 16.–20.9. 2019, Nara, Japonsko. (V16,)
- 12th International Precipitation Conference, 19.–21.6. 2019, Irvine, U.S.A. (V17),
- 11th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, 29.8.–2.9. 2022, Locarno, Švýcarsko. (V27),
- EMS Annual Meeting, 4.–9.9. 2022, Bonn, Německo. (V28),
- Výroční konference ČmeS, 21.–23.9. 2021, Louny. (V23),
- Výroční konference ČmeS, 20.–22.9 2022, Telč. (V29).

Z pracoviště ČVUT v Praze byly dílčí výsledky pravidelně prezentovány odborné veřejnosti. Příspěvky byly předneseny na mezinárodní konferenci EGU, na konferenci Frontiers in Hydrology a dále na lokálních národních konferencích. Mimo publikační výsledky vznikly v souvislosti s řešením projektu odborné články v kategoriích Jimp, Jost a ostatní. Dále byl v souvislosti s potřebami řešeného projektu využíván dešťový simulátor, jehož inovativní princip je chráněn jako Užitečný vzor.

6.2.2 C002 Návrhové intenzity krátkodobých srážek

Vstupem pro odhad návrhových intenzit krátkodobých srážek byla adjustovaná radarová data a staniční měření. Vstupní adjustovaná radarová data tvoří řady desetiminutových intenzit srážek, které pokrývají bezmrazová období od dubna do října mezi roky 2002 a 2021 a území ČR a jeho dvoukilometrové okolí s prostorovým rozlišením 1 km. Intenzity byly odvozeny adjustací radarových odhadů intenzit denními úhrny srážek na srážkoměrných stanicích ČHMÚ (viz např. Výsledek V16). Vstupní staniční měření poskytují řady intenzit pro 60 stanic v minutovém a patnácti nebo desetiminutovém časovém kroku a s průměrnou délkou 47 roků v období 1951–2019. Řady byly sestaveny spojením dat z měření klasických ombrografů a automatických srážkoměrů (viz V7).

Finální odhady návrhových intenzit byly získány kombinací návrhových intenzit z adjustovaných radarových dat a návrhových intenzit ze staničních měření. V obou případech byly návrhové intenzity určeny z parametrů zobecněného rozdělení extrémních hodnot odhadnutých s využitím blokových maxim intenzit a L-momentů. V případě adjustovaných radarových dat mohly být díky jejich vysokému prostorovému rozlišení parametry rozdělení odhadnuty regionálně pomocí metody oblasti vlivu s cílem částečně snížit nejistotu v odhadech danou zejména relativně krátkou délkou řad dostupných radarových měření

(Kašpar a kol., 2021; V13). Tímto způsobem byly odhadnuty návrhové intenzity pro srážky s délkou trvání od 30 min. do 24 hod, pro celé bezmrazové období i jednotlivé kalendářní měsíce. Návrhové intenzity získané z obou typů dat byly následně zkombinovány prostřednictvím prostorové interpolace diferencí s využitím metod z rodiny kriging přednostně pro srážky s délkou trvání 6 hod. Pro tuto délku trvání byly navíc z adjustovaných radarových dat s využitím stejných metod regionální frekvenční analýzy odhadnuty pravděpodobnosti výskytu šesti, pro území ČR typických variant srážkových událostí podle průběhu srážkové intenzity v závislosti na době opakování návrhové srážky (viz V12, V15). Analýza prostorové variability získaných charakteristik návrhových srážek podpořila realnost jejich hodnot a validitu použitých postupů (viz např. V27).

6.2.3 C003 Úhrny srážek a nasycenost povodí před návrhovými srážkami

Také odhad pravděpodobnosti výskytu silných srážek při abnormální nasycenosti byl proveden s využitím adjustovaných radarových dat. Byl využit ukazatel předchozích srážek za pět 24-hodinových úseků před začátkem šestihodinového úseku s vysokým srážkovým úhrnem (API_5), normovaný průměrnou hodnotou této veličiny v daném 1x1 km pixelu a v daném kalendářním dni. Pravděpodobnost abnormální nasycenosti před extrémní srážkou byla určena z průměrného kvantilu nasycenosti před ročními maximy srážek.

Zjištěné pravděpodobnosti abnormální předchozí nasycenosti se významně liší mezi variantami srážkových událostí podle průběhu srážkové intenzity, přičemž obecně narůstá s větší rovnoměrností intenzity srážek během šestihodinového časového úseku. Pole těchto pravděpodobností pro jednotlivé varianty nejsou nicméně plošně homogenní. Částečně se projevuje vliv orografie, takže na horách či v jejich předpolí obecně roste pravděpodobnost abnormální nasycenosti u případů s rovnoměrným rozdělením srážek během šesti hodin (viz výsledky V12, V15).

Pravděpodobnosti abnormální předchozí nasycenosti ($qAPI$) je pro metodu SCS-CN v kombinaci s jednotkovým hydrogramem interpretována jako poměr mezi zastoupením CN2 a CN3. Toto prostorové rozdělení společně se zastoupením tvarů je pro praktické využití klíčové a je popsáno v metodickém návodu (V15). Cílem je v praktických úlohách zohlednit nejen data o intenzitě srážky, ale i zastoupení tvarů a počáteční nasycenosti. Hodnota CN 1, která odpovídá podprůměrnému předchozímu nasycení, se na území ČR vyskytuje významně méně a pro návrh opatření se využití tohoto stavu nedoporučuje.

6.2.4 C004 Vymezení a kategorizace oblastí v ČR jako podklad hydrologického modelování při navrhování staveb v krajině

Kategorizace oblastí se změnila na plošné vymezení malých horních zdrojových povodí do velikosti 5 km² na území ČR. Cílem nebylo jen vymezení těchto povodí, ale také jejich kategorizace z hlediska charakteristik ovlivňujících formování rychlého odtoku. Vymezená povodí, která tvoří 80 % plochy ČR, byla dále klasifikována na základě sady jejich charakteristik z hlediska rizika rychlého odtoku. Klasifikace těchto povodí byla vytvořena pomocí clustrové analýzy, do které vstupují charakteristiky povodí, a které ovlivňují hydrologickou odezvu, jako jsou srážková data, hydromorfologické charakteristiky daného povodí, využití území a hydrologické vlastnosti půdy. Výsledky jsou součástí certifikované mapy (V11).

Principy vymezení horních povodí byli prezentovány na národní i mezinárodní úrovni a samotná analýza a klasifikace jsou popsány v impaktovaném časopise – výsledek V4. Představení povodí včetně verifikace míry rizika z hlediska rychlého odtoku je prezentováno v českém časopise kategorie Jost (V30).

Přístup k výsledku je umožněn širší odborné veřejnosti formou WPS služby na stránkách projektu <https://rain.fsv.cvut.cz/>.

6.2.5 C005 Kvantifikace nejistot odtokových odezev srážkových scénářů na základě pozorování, experimentů a hydrologického modelování

V roce 2020 byla identifikována a vybrána malá povodí z databáze ČHMÚ, po vyhodnocení hydrologických dat bylo vybráno 5 finálních povodí, které nejlépe splňovaly stanovené parametry. Povodí Osvětimany na Hruškovici bylo vybráno jako první testovací a bylo využito na testování a sestavení modelových scénářů. První simulace srážko-odtokových událostí byly provedeny standardním způsobem odvozování povodňových vln v ČHMÚ. V metodice používané v ČHMÚ se jako transformační funkce povodí využívá Clarkova dvouparametrického okamžitého jednotkového hydrogramu a pro stanovení odtokových ztrát metody CN. Odvození srážko-odtokového modelu probíhá z velké části v prostředí geografických informačních systémů pomocí programového vybavení ArcGIS s využitím extenze HydroHMS, vyvinuté v ČHMÚ přímo pro účely srážko-odtokového modelování. Pomocí extenze byla odvozena struktura srážko-odtokového modelu a spočítány fyzicko-geografické parametry modelu, které jsou extenzí následně exportovány do systému HEC-HMS. V dílčích povodích se počítá transformace srážky na odtok metodou SCS-CN a v říčních úsecích dochází pomocí metody Muskingum k transformaci povodňové vlny podél toku. V prvních sadách simulací bylo využito vrstvy hodnot CN za uvažování průměrných vláhových podmínek předchozího nasycení povodí (CN2), které jsou používány v ČHMÚ při odvozování teoretických povodňových vln.

V oblasti fyzikálních modelů byl sestaven testovací model povodí Hruškovice a provedeny první zkušební výpočty pozorovaných srážko-odtokových událostí. Model Smoderp2D byl aplikován v případové studii v katastru Libštát, v níž byla s pomocí modelu hodnocena efektivita několika opatření spolu s nejistotami danými variabilitou příčinných srážek.

V roce 2021 pokračovaly práce na hydrologickém modelování pozorovaných průtokových epizod na malých povodích. Pro všechna zvolená malá povodí byly podrobně zkontrolovány průběhy významných pozorovaných průtokových epizod v hodinovém kroku, které jsou nezbytné pro verifikaci hydrologických modelů. Zároveň byl s pobočkami ČHMÚ konzultován reálný stav v povodí. Na prvním testovacím povodí Hruškovice-Osvětimany bylo provedeno modelování vybraných průtokových epizod v systému HEC-HMS dle rozsáhlého souboru scénářů reflektující různé varianty vstupních podkladových dat a nastavení modelu (viz Tabulka 3). Celkově bylo tento rok pro každou epizodu modelováno 24 scénářů pro celistvou a 24 scénářů pro distribuovanou variantu povodí. U ostatních povodí byla v odvozena struktura srážko-odtokového modelu, spočítány fyzicko-geografické parametry modelu a bylo započato s modelováním epizod na povodí Černá Nisa-Uhlířská.

Součástí řešení v roce 2021 bylo také ověření využití dat nasycenosti území a vrstev CN z aplikace Indikátor přívalových povodní (FFI) pro dané průtokové epizody na vybraných povodích. Tyto hodnoty byly odvozeny v průběhu testovacího provozu aplikace FFI na ČHMÚ a zatím nebyly v praxi testovány. Pro vybraná povodí byla provedena analýza odvozených

denních hodnot CN v gridových bodech za dostupné období (2013–2020). Ačkoliv průměrné hodnoty CN na povodí poměrně dobře odpovídají hodnotám CN za uvažování průměrných vláhových podmínek nasycení povodí (tzn. CN dle scénáře 1SCO), z důvodu změn v aplikaci v průběhu testovacího provozu a nepřesností při ukládání dat z aplikace se ukázalo jako nezbytné resimulovat výstupy za celé období pozorování. Z tohoto důvodu nebyly scénáře využívající hodnot CN z aplikace FFI v rámci tohoto projektu nakonec modelovány.

V oblasti fyzikálních modelů proběhla v roce 2021 kalibrace parametrů Smoderp2D na pozorovaných datech detailního měřítka ze simulací deště pomocí srážkového simulátoru. V modelu MikeSHE byl dokončen model povodí Hruškovice a simulovány všechny zaznamenané povodňové události. Hlavní změnou byl přechod na novou datovou sadu půdních zrnitostí (Beitlerová, 2021). Testy ukázaly na potřeby co nejpřesnější definice počátečního stavu a nedostatečnou existující parametrizaci. Simulace také poukázaly na limitovanou schopnost modelu replikovat chování odtoku v lesním povodí, kde je povrchový odtok jen velmi výjimečným jevem, ale v modelu se jedná prakticky o jediný modelovaný princip tvory odtoku.

V roce 2022 byly srážko-odtokovým modelem HEC-HMS namodelovány všechny zbývající scénáře na vybraných odtokových událostech ve zbývajících povodích (celkově se jedná u každé události o 90 simulací pro celistvou a 90 pro distribuovanou variantu povodí). Následně byly všechny simulace porovnávány s naměřeným průtokem během vybraných epizod v závěrových profilech vybraných malých povodích. Aktivity byly dále 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. Zároveň probíhaly práce na přípravě odborného článku.

V rámci fyzikálního modelování proběhly rozsáhlé práce s cílem vytvořit konzistentní sadu parametrů pro infiltrační modely Philipa a Green&Ampta. Definovány byly čtyři počáteční stavy na základě významných hydrolimitů a z nejnovějších půdních map odvozeny pomocí pedotransferových funkcí a vlastních výpočtů potřebné sady parametrů. Sestaveny byly modely zbývajících pozorovaných povodí a na každém z nich spočtena sada 1440 scénářů. Výsledky jsou připraveny k analýze variability, která však nebyla kvůli prioritám v oblasti konceptuálních modelů a tvorby metodiky do konce projektu zpracována a bude předmětem navazujících aktivit řešitelů v roce 2023.

7 Popis uplatnění výsledků

Cílem projektu v aplikační rovině je především inovativní přínos v oblasti návrhových srážek a nástrojů hydrologického modelování pro odvozování návrhových veličin projektování vodohospodářských opatření na drobných vodních tocích a v ploše povodí. Aplikační výsledky projektu jsou vzájemně propojeny. Z hlediska aplikace je za hlavní výsledek možné považovat dále popsanou metodiku. Ta předpokládá využití návrhových srážek včetně jejich průběhů a předpokládaného počátečního nasycení. Tyto prostorově distribuované charakteristiky byly v rámci projektu odvozeny a jsou součástí výsledné mapy návrhových srážek. Dostupnost srážkových dat a jejich předzpracování pro inženýrskou praxi je pomocí software, který využívá vyvinuté webprocessingové služby, a to buď formou vytvořených aplikací na rain.fsv.cvut.cz anebo z prostředí open GIS QGIS.

Metodika najde uplatnění ve vodním hospodářství, např. při zpracování pozemkových úprav, studií na ochranu půdního fondu, zvyšování retence krajiny a projektů protierozních a

protipovodňových opatření v lokálním měřítku malých povodí. Potenciálními uživateli jsou projektanti hydrotechnických staveb v malých povodích a autoři studií odtokových poměrů v povodích, jejichž cílem je identifikovat kritická místa infrastruktury, navrhnout zlepšení stavu povrchových vod a zlepšit protipovodňovou ochranu. Zásadním přínosem je zvýšení kvality a standardizace zpracování studií představujících variantní řešení. Podklady zpracované metodikou jsou důležitým vstupem pro návrh plánu společných zařízení v rámci komplexních pozemkových úprav, které se mohou stát základem dlouhodobě udržitelné stabilní krajiny.

Předkládaná mapa návrhových srážek je přínosná v mnoha oblastech. Srážková data budou využita pro další analýzy, například pro stanovení potenciálu odtoků a bilance vody v rámci ČR, a to jak z hlediska současného stavu, tak z hlediska možných budoucích klimatických scénářů. Státní pozemkový úřad i další organizační složky státu mohou data návrhových srážek využít při navrhování opatření v ploše povodí v rámci přípravy a realizace společných zařízení, při realizacích pozemkových úprav a dále při správě malých vodních nádrží. Zásadním přínosem mapy jsou data odvozená prostorově pro celé území ČR na základě nejaktuálnějších dostupných dat. V souladu s Technickým standardem pro provádění pozemkových úprav publikovaném 10. 10. 2022 jsou odvozeny návrhové srážky v délce šesti hodin a pro doby opakování 2, 5, 10, 20, 50 a 100 let. Návrhové srážky jsou odvozeny z historických dat a pro využití v rámci pozemkových úprav, kde jsou návrhy opatření navrhovány na budoucí klimatické scénáře, je nutné absolutní hodnoty odvozených srážkových úhrnů násobit koeficientem změny příslušného klimatického scénáře. Dalšími uživateli mapy jsou řešitelské kolektivy autorů včetně Českého hydrometeorologického ústavu, jakožto odborně způsobilá právnická osoba pověřená ústředním orgánem státní správy v oblasti poskytování standardních hydrologických dat pověřená Ministerstvem životního prostředí a další vědeckovýzkumné instituce a vysoké školy.

Další výsledky jako mapa malých povodí má také potenciál k širokému využití v mnoha oblastech. Odvozená zdrojová povodí doplňují hierarchickou strukturu povodí zatříděných do čtyřech úrovní. Samotné vymezení malých povodí může být další formou kategorizace odtokových ploch. Relativně určená míra rizika malých zdrojových povodí z hlediska vzniku rychlého odtoku může být podkladem prioritizace katastrálních území pro realizaci pozemkových úprav a projektů vedoucích ke zvýšení retence území. Rozčlenění zdrojových povodí z hlediska odtokové odezvy má další širší využití. Rychlá odtoková odezva může způsobit snížení dostupné vody pro rostliny a pro území především v suchých oblastech to může znamenat potřebu závlahové vody, která bude zároveň méně dostupná z lokálních zdrojů. V těchto rizikových oblastech bude nutné vytvářet záchytné prvky ve větším rozsahu tak, aby byly schopné zachycovat odtokové extrémů a zajistit tak vodu pro závlahy pro suchá období. Dále může mapa sloužit jako indikátor pro další úpravy v krajině, ochranu vodních zdrojů atp.

Pro odbornou komunitu byly prezentovány dílčí výsledky ve větším detailu. Jedná se o výsledky, které nepředpokládají přímou implementaci, jejich přínos je především v prezentaci projektu na venek a seznámení odborné vědecké komunity se zvoleným řešením. Současně získání zkušeností na národní a mezinárodní úrovni umožňuje potřebnou zpětnou vazbu k řešení projektu.

8 Literatura

- Beitlerová, H., Žížala, D., Minařík, R., Strouhal, L., Kavka, P., & Juřicová, A. (2021). *Fyzikální a hydrologické vlastnosti půd ČR*. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.; České Vysoké učení technické v Praze. <https://rain.fsv.cvut.cz/pudy/hydro-pudy/>
- Bližňák, V., Kašpar, M., Müller, M., 2018. Radar-based summer precipitation climatology of the Czech Republic. *Int. J. Climatol.*, 38, 677–691. DOI: 10.1002/joc.5202
- Crhová L., Kliegrová S., Valeriánová A., 2022. Měření srážkových intenzit na stanicích Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) a průběh jejich zpracování. *Meteorologické zprávy*, roč. 75, č. 2, s. 37–43. ISSN 0026-1173.
- Drbal, K. (2016). Strategie ochrany před negativními dopady povodní a erozními jevy přírodě blízkými opatřeními v České republice. *Vodohospodářské Technicko-Ekonomické Informace*, 58(6), 4. <https://doi.org/10.46555/VTEI.2016.05.001>
- Goudenhoofd, E., Delobbe, L., 2009. Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 195–203. DOI: 10.5194/hess-13-195-2009
- Kašpar, M., Bližňák, V., Hulec, F., Müller, M., 2021. High-resolution spatial analysis of the variability in the subdaily rainfall time structure. *Atmos. Res.*, 248, 105202. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105202
- Kašpar, M., Bližňák, V., Hulec, F., Müller, M., 2022. Spatial analysis of the variability in the short term rainfall time structure. 11th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, 29th August–2nd September, Locarno, Switzerland. <https://enacshare.epfl.ch/dUQ4fCXGYPh3RbcKWFpwL> (CLI.P2_Kašpar.pdf).
- Kavka, P.; Jeřábek, J.; Landa, M. SMODERP2D—Sheet and Rill Runoff Routine Validation at Three Scale Levels. *Water* 2022, 14, 327. <https://doi.org/10.3390/w14030327>
- Krivoruchko, K., Gribov, A., 2019. Evaluation of empirical Bayesian kriging. *Spatial Statistics*, 32, 100368. DOI: 10.1016/j.spasta.2019.100368
- Li, J., Heap, A. D., 2008. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. *Geoscience Australia*, Canberra, 137 p.
- Müller, M., Bližňák, V., Kašpar, M., 2018. Analysis of rainfall time structures on a scale of hours. *Atmos. Res.*, 211, 38–51. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.04.015
- Strouhal, L., Kavka, P. Hydrologické skupiny půd – metodiky a datové podklady (1. část). *Vodní hospodářství*. 2022a, 72(6), s. 4–10 [online]. Dostupné z: <https://vodnihospodarstvi.cz>
- Strouhal, L., Kavka, P. Hydrologické skupiny půd – rozevřené nůžky hydrologických výpočtů (2. část). *Vodní hospodářství*. 2022b, 72(9), s. 7–12 [online]. Dostupné z: <https://vodnihospodarstvi.cz>